

Condicionantes impostas à dispersão de metais acumulados em escombreliras mineiras: o exemplo de Caveira (Faixa Piritosa Ibérica)

António Mateus^{1,4}, Jorge Figueiras², João Xavier Matos³, Mário Abel Gonçalves², Rui Lopes^{1*}, José Labaredas^{1*} & Andreia Beleque¹

¹ Depto. Geologia e CeGUL, Fac. Ciências, Univ. Lisboa, C6, Piso 4, 1749-016 Lisboa.

² Depto. Geologia e CREMINER, Fac. Ciências, Univ. Lisboa, C6, Piso 4, 1749-016 Lisboa.

³ Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Rua Frei Amador Arrais 39, Ap. 104, 7801-902 Beja.

⁴ E-mail: amateus@fc.ul.pt

*Actualmente na Genius Mineira Lda., Angola.

Palavras-chave: Resíduos mineiros; Dispersão supergénica; Mina de Caveira, Faixa Piritosa Ibérica

Resumo: A mina de Caveira (NW da FPI) foi intermitentemente explorada desde a época Romana até aos anos 60 do séc. XX. Os resíduos mineiros aí existentes documentam esta longa actividade e incluem materiais diversos com conteúdos elevados em vários metais. O essencial destas acumulações concentra-se numa escombrelira de grandes dimensões, que é uma fonte potencial de metais para as águas de escorrência. A caracterização química dos sedimentos de corrente, complementada pela análise das distribuições espaciais de concentração em Cu, Zn e Pb, revela, porém, que a dispersão sedimentar é bastante reduzida. Tal deve-se a circunstâncias de natureza geomorfológica/sedimentar e à possibilidade de estabilizar fases minerais secundárias que incorporam aqueles metais.

Key-words: Mining wastes; Supergene dispersion; Caveira mine; Iberian Pyrite Belt

Abstract: The Caveira mine (IPB NW domain) was intermittently exploited from Roman times till the sixties of the 20th century. Large mining waste piles record this long exploitation history and include different types of residues containing significant amounts of several metals. The main waste pile is a huge perched accumulation and a potential source of metals in streams. The chemical characterization of stream sediments, coupled to the spatial distribution analysis of Cu, Zn and Pb contents, show, however, that stream dispersion is rather limited. This is due to geomorphic/sedimentary circumstances and to the possibility of stabilize secondary mineral phases incorporating those metals.

1. Introdução

A avaliação do impacte ambiental associado às actividades mineiras tem sido fonte de preocupação crescente, desde logo pela tomada de consciência da enorme complexidade dos processos envolvidos e da natureza multi-escala (espácio-temporal) dos efeitos que se lhes associam, requerendo abordagens próprias que carecem de

ajustamento a cada caso. Quando estão em causa impactes resultantes de actividade há muito perecida, os problemas a equacionar, embora de raiz comum, são diferentes, podendo exigir metodologias alternativas de análise, nomeadamente se existirem evidências claras de atenuação natural das perturbações induzidas nos balanços que determinam a evolução da Zona Crítica (e.g. Anderson *et al.*, 2007). Em Portugal

continental, os vestígios de mineração passada são comuns, maioritariamente relacionados com centros produtores de metais básicos; estes foram recentemente inventariados e categorizados em função da sua perigosidade, o que permitiu definir estratégias de remediação em locais de maior risco (Oliveira *et al.*, 2002; Matos & Martins, 2006). Do ponto de vista geológico, porém, a análise dos impactes associados a alguns destes centros mineiros não se pode circunscrever à área intervencionada, porque alguns dos elementos químicos envolvidos têm grande mobilidade e são passíveis de dispersão assinalável, provocando manifestações débeis, mas perceptíveis, relativamente distantes da sua fonte.

A Faixa Piritosa Ibérica (FPI) é a principal província mineira europeia e inclui numerosos centros mineiros desactivados, dois deles (Caveira e Lousal) no domínio NW da extensa área de rochas paleozóicas que limita a W a bacia do Alto Sado (Matos & Martins, 2006; Oliveira *et al.*, 2006). Os impactes resultantes da mineração nestes locais foram objecto de vários estudos (Silva *et al.*, 2005, 2006) que, incidindo especificamente sobre a drenagem ácida ou os

resíduos mineiros acumulados, não abordam a dispersão dos metais para a área envolvente. Todavia, essa dispersão não deve ser negligenciada, como se depreende das concentrações de Cu, Zn e Pb presentes em sedimentos de corrente colhidos em 4230 estações distribuídas pela Zona Sul Portuguesa, as quais evidenciam um alinhamento anómalo NW-SE que se estende de Caveira a Aljustrel (Feliciano *et al.*, 2008), e dos resultados de trabalhos realizados na área do Lousal (Reis *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2005, 2006). O presente trabalho procura detalhar esta faixa anómala, analisando os sedimentos de corrente colhidos entre Caveira e Lousal e interpretando as distribuições de concentração obtidas à luz do conhecimento actual da variabilidade composicional admitida pela área fonte de Caveira.

2. Breve enquadramento geológico e geomorfológico

A mina de Caveira localiza-se na extremidade NW do sector Caveira-Lousal, parte fundamental da região paleozóica que,

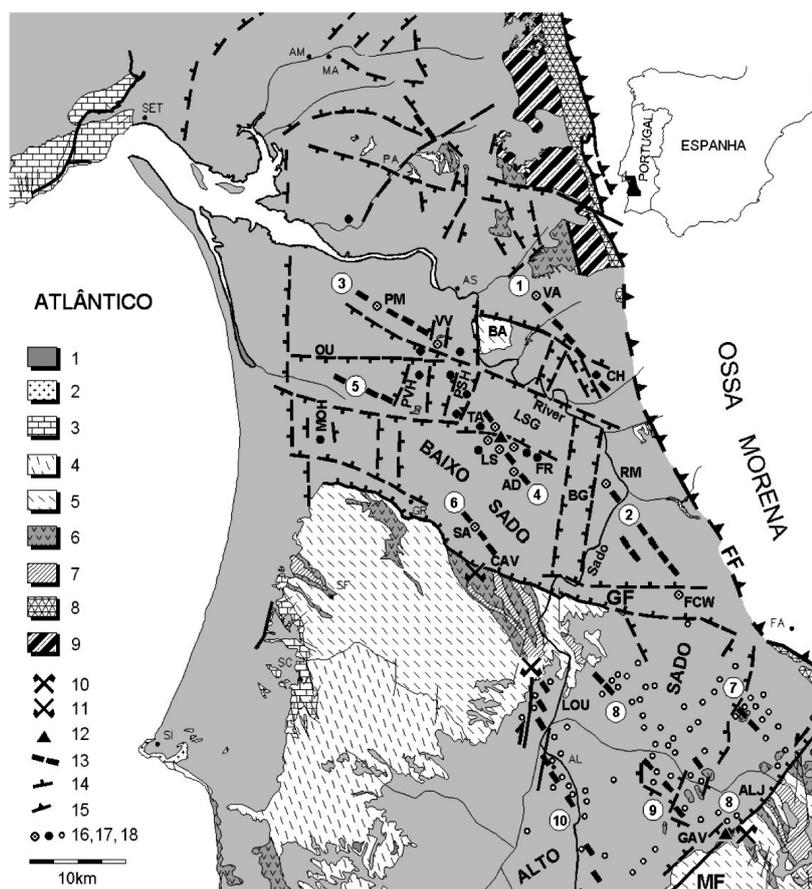


Figura 1 - Mapa geológico sintético do sector NNW da FPI (Oliveira *et al.* 2001). As estruturas tectónicas que compartimentam o soco Paleozóico subjacente à bacia do Sado, assim como os principais alinhamentos do CVS, foram inferidos através da conjugação de dados geofísicos (gravimetria, magnetometria e resistividade eléctrica) e sondagens mecânicas. Detalhes sobre os alinhamentos do baixo e alto Sado podem ser encontrados em Oliveira *et al.* (2001). 1 - Cenozóico; 2 - Maciço de Sines; 3 - Mesozóico indiferenciado; Soco Paleozóico: 4 - Fm. de Mértola; 5 - Fm. de Mira; 6 - CVS; 7 - GFQ; 8 - Gr. Pulo do Lobo; 9 - Gr. Ferreira-Ficalho. 10 - Mina activa; 11 - Mina inactiva; 12 - Jazida de sulfuretos inexplorada; 13 - Alinhamento CVS; 14 - Falha normal; 15 - Falha inversa. Dados de sondagem: 16 - Vulcanitos CVS; 17 - Sedimentos indiferenciados; 18 - Formações do soco indiferenciadas (sector alto Sado da Bacia).

limitada a NE pela falha de Grândola, separa parcialmente as bacias terciárias do Alto e do Baixo Sado (fig. 1; Oliveira *et al.*, 2001, 2006). Este sector é estruturalmente muito complexo, sendo dominado por um alinhamento NW-SE de rochas do Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS) e do Grupo Filítico-Quartzítico (GFQ), bordejado a SW por sequências *flysch* atribuídas à *Fm. Mértola*. O núcleo da estrutura de Caveira é ocupado por xistos negros com intercalações de metassiltitos e quartzitos do Devónico Sup., atribuídos ao GFQ (Pereira *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2008). As sequências siliciosas contactam com o CVS através de acidentes tectónicos cavalgantes, frequentemente sublinhados por precipitados siliciosos brechificados (fig. 2). As mineralizações de sulfuretos intersectadas por sondagem desenvolvem-se preferencialmente nos bordos do alinhamento CVS (Matos *et al.*, 2008). Outros indicadores de mineralização (chapéus de ferro e brechas ferruginosas) encontram-se a S de Caveira, em Casa Nova das Algedas e Barros, observando-se ainda efeitos de remobilizações tardias (variavelmente meteorizadas) ao longo de planos de fractura e zonas de falha com cinemática diversa. São ainda dignas de registo mineralizações de (Fe-)Mn próximo do contacto CVS - *Fm. Mértola*, associadas a xistos borra-de-vinho.

As formações mais siliciosas que acompanham as mineralizações de Caveira originam uma pequena crista de rumo geral NNW-SSE que sobressai na paisagem desde o local da mina até Casa Nova das Algedas, antes de se perder gradualmente em direcção à bacia do Alto Sado, perto de Azinheira de Barros. Geograficamente, esta pequena crista encontra-se muito perto do sopé oriental da Serra de Grândola, bloco de levantamento relativamente recente que termina abruptamente na falha de Grândola. A vertente oriental desta serra drena para o Sado e divide-se numa zona setentrional, com drenagem para N ou NE colectada pela Ribeira de Grândola e numa zona meridional com drenagem para S ou SE colectada pela Ribeira de Corona, a qual desagua na zona de Azinheira de Barros. A linha de fecho que separa estas duas zonas de drenagem local oposta tem orientação aproximada E-W e situa-se à

latitude de S. Francisco da Serra e Azinheira de Barros.

A mina de Caveira situa-se muito perto do topo da crista siliciosa, situando-se os trabalhos superficiais sobretudo na vertente leste, de topografia um pouco menos acidentada. Apesar da pequena dimensão da mina e do carácter intermitente da exploração, a sua implantação é dominada por uma escombreira alcandorada de grandes dimensões, a que se juntam várias zonas de menor área com resíduos de natureza variada, a maior parte das quais está perto das antigas instalações mineiras (a N da escombreira principal – fig. 2). Embora a mina se situe numa crista, a drenagem regional não é dispersiva, pois todas as linhas de água nela originadas convergem para dois pontos vizinhos da Ribeira de Grândola próximos de Canal Caveira. É curioso notar que algumas dessas linhas de água alimentam a chamada Barragem de Águas Limpas, usada durante a exploração.

A escombreira principal de Caveira foi usada para lixiviação de minério pobre, por águas da própria mina, daí a sua área relativamente desproporcionada e a sua localização em encosta íngreme. As águas saídas desta escombreira eram parcialmente retidas numa pequena barragem (actualmente inactiva) que permitia limitar a carga sólida lançada na rede de drenagem regional (Matos & Martins, 2006; Matos *et al.*, 2008). Um pequeno sistema de canais conduzia as águas ácidas enriquecidas a tanques onde se obtinha cobre por cementação. Actualmente, parte considerável das águas vindas da escombreira não são interceptadas por qualquer barragem, como não o são as que se originam nas restantes instalações da mina, onde ainda são bem visíveis acumulações de minério destinadas a sofrer o mesmo processo de lixiviação que ocorria na escombreira principal. Esta escombreira é notável por dois motivos: primeiro, pela ausência *total* de vegetação, apesar dos seus já quase 50 anos de idade, em contraste com o que é habitual nos restantes centros mineiros da FPI, e a existência, também incomum nesta região mineira, de ravinamentos muito profundos consequência, sobretudo, do forte pendor das encostas do lado leste da mina (fig. 2).

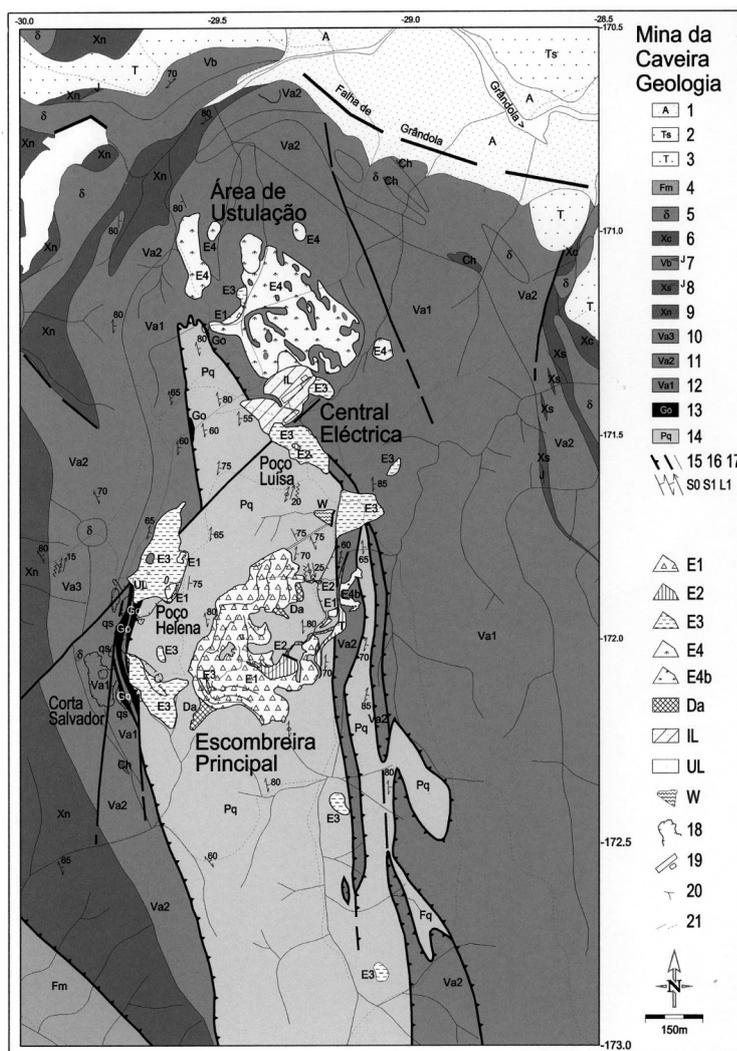


Figura 2 - Mapa geológico-mineiro da área de Caveira (Matos, 2006). **Geologia:** Quaternário: 1, Aluviões; Bacia do Sado: 2, Areias eólicas; 3, Terraços fluviais, depósitos coluvionares. Soco Paleozóico (Zona Sul Portuguesa): 4, Fm. *Flysch do Baixo Alentejo*; 5, Fm. Mértola, turbiditos (Viseano Sup.); CVS (Fameniano Sup. - Viseano Sup.): 5, meta-diabases; 6, xistos cloríticos; 7, meta-espilitos; escassos jaspes (J); 8, xistos siliciosos; jaspes (J); 9, xistos cinza/negros; 10, metavulcanitos félsicos (mtv. f.) afaníticos xistificados; 11, mtv. f. porfíricos xistificados; chertes (Ch); 12, mtv. f. com xistificação incipiente; alteração hidrotermal quartzosericítica (qs). 13, chapéus de ferro. GFQ (Struniano Sup.): 14, xistos e quartzitos. 15, carreamento; 16, falha; 17, limite geológico. **Mineração:** Escombrelas: E1, safrão e pirite (semi-)maciça; E2, minério pirítico fragmentado, localmente misturado com depósitos coluvionares (T); E3, rochas encaixantes com rara pirite; E4, escórias e pirite ustulada; E4b, escórias Romanas in situ. Da, Drenagem ácida; principal escoamento de águas ácidas: ➔. Aterros: IL, industriais; UL, urbanos. Outros: W, barragem de água ácida; 18, "Open pit"/declive forte; 19, Edifícios mineiros; 20, Escorrência; 21, estrada/caminho. Coordenadas Hayford-Gauss (km).

3. Mina de Caveira

As mineralizações de Caveira foram sujeitas a exploração intermitente desde a época romana até finais da década de 60 do século XX. A actividade romana, geralmente circunscrita aos domínios aflorantes e oxidados da mineralização (contendo $\approx 4,5$ ppm Au, 45-300 ppm Ag, $< 10\%$ Cu e 3-6% S - SIORMINP, 2002), deixou numerosos vestígios, nomeadamente escórias estimadas em cerca de $7,3 \times 10^3$ t (Matos *et al.*, 2008). A exploração moderna inicia-se em 1854 com a descoberta dos extensos escoriais romanos e dos chapéus de ferro por Ernest Delegny. Concessionada em 1863, a mineração da parte superficial das massas mineralizadas decorreu de forma irregular até 1919.

A lavra desenvolvida entre 1907 e 1916, por exemplo, incidiu sobre minérios com teores em Cu variáveis entre 2,5 e 11% e,

segundo os relatórios técnicos existentes, terão sido produzidas cerca de 5.000 t de concentrados com 70-80% de Cu, além de 16.447 t de concentrados de pirite com Cu $< 1\%$ e S $< 45\%$ (SIORMINP, 2002); a exploração do chapéu de ferro foi suspensa em 1909. A partir de 1936, extraiu-se minério pirítico para enxofre, por poços e galerias. Mais recentemente, a área de Caveira voltou a suscitar interesse para prospecção e pesquisa sendo investigada na década de 80 e entre os anos 90 e 2002. Os diferentes projectos de prospecção desenvolvidos evidenciaram a presença de horizontes mineralizados em sulfuretos, preferencialmente ao longo do contacto GFQ-CVS no sector oriental da mina, sem potencial económico significativo e teores médios variáveis entre 0,07-1,24 ppm Au, 5,42-42 ppm Ag, $< 0,01\%$ Cu, 0,22-2,14% Zn e 0,57-0,7% Pb). A partir de finais de 2006 procedeu-se a uma avaliação

preliminar do potencial das escombrelas e chapéus de ferro para Au, Ag, Cu, Pb e Zn (Lopes & Labaredas, 2007).

Desta breve resenha ressaltam dois aspectos fundamentais com implicações para o presente estudo: por um lado, o facto das mineralizações aflorantes se confinarem a pequenos chapéus de ferro (incluindo precipitados hidrotermais de quartzo brechificados e enriquecidos em óxidos/hidróxidos de Fe e Mn intersticiais) preferencialmente dispostos ao longo do contacto tectónico entre o GFQ e o CVS; por outro, a longa actividade mineira na Caveira, geradora de volumes consideráveis de resíduos já notados no local nos anos 30 (fig. 2). Atendendo à sua disposição espacial e maior vulnerabilidade física, estes materiais são a principal fonte de metais dos sedimentos de corrente em estudo, e determinam a sua assinatura química. Importa, por isso, fazer a caracterização sumária da composição química das mineralizações aflorantes e dos resíduos mineiros acumulados, dando particular atenção aos seus conteúdos metalíferos.

3.1. Mineralizações aflorantes

A Tabela I sintetiza os resultados obtidos em 39 amostras de rochas de falha colhidas no contacto GFQ-CVS, maiori-tariamente precipitados hidrotermais bre-chificados com abundantes óxidos /hidróxidos. Salienta-se sobretudo: (i) a grande amplitude de variação das concentrações de Cu, Zn, Pb e Ag; e (ii) as concentrações localmente muito elevadas em Pb e Ag. Esta assinatura química afigura-se compatível com a possibilidade de terem existido condições adequadas à remobilização metalífera durante a deformação tectónica da sequência envolvente da mineralização, ainda que parte da heterogeneidade possa ser devida a lixiviação meteórica diferencial de algumas das rochas de falha analisadas.

Os dados disponíveis para os domínios de oxidação extrema *in situ* (chapéus de ferro) são escassos e dificilmente representarão fidedignamente as distribuições de concentração natural em Au, Ag, Cu, Zn e Pb, conforme se infere a partir das discrepâncias significativas entre os valores médios e medianos reportados pela

"Rio Artezia" em 2001 (21 amostras) e pela "Iberian Resources Portugal" em 2007 (5 amostras). Esta falta de representatividade resulta directamente da heterogeneidade (ainda deficientemente estudada) dos materiais, traduzindo progressão variável da meteorização química sobre protólitos que dificilmente terão composições originais homogéneas. Apesar disso, as concentrações nos vários metais obtidas nas duas campanhas de amostragem caem em intervalos compatíveis entre si: Au [0,04; 9,52] ppm; Ag [1,50; 78] ppm; Cu [84;15000] ppm; Pb [204; 51400] ppm; e Zn [50; 13800] ppm.

Tabela I

Concentração em Au, Ag, Cu, Zn e Pb apresentada pelas mineralizações aflorantes e resíduos mineiros. Min. = mínimo; Max. = máximo; \bar{x} = média; M = mediana; VE (*) = valores excepcionais (nº de amostras).

	Au	Ag	Cu	Zn	Pb
Rochas de Falha Mineralizadas					
Min	0,01	0,20	11	9	5
Max	1,43	20,7	3880	7120	7180
\bar{x}	0,30	1,50	353	684	894
M	0,05	2,80	83	276	160
VE		134 (1)			29500(1)
Safrão + pirite semi-maciça					
Min	0,5	40,5	65	57	11500
Max	2,11	88,3	1010	1730	84200
\bar{x}	1,20	68,64	316	428	46900
M	1,23	64,10	88	162	46000
VE					
Safrão visivelmente meteorizado					
Min	0,01	1,40	13	88	662
Max	1,44	3,80	114	423	1550
\bar{x}	0,23	2,50	55,3	234	1029
M	0,03	2,50	58	185	1000
VE					89300(1)
Escórias					
Min	0,03	0,60	87	70	661
Max	2,18	66,20	6490	9430	9460
\bar{x}	0,56	32,13	1980	1994	4536
M	0,31	30,55	880	473	3770
VE			22500(1) 92700(1)	14300(1)	16400 a 29000(4)
Metavulcanitos, metassedimentos e escórias					
Min	0,14	2,20	257	62	1420
Max	2,03	30,1	812	1110	4670
\bar{x}	0,60	9,09	503	556	3290
M	0,40	5,90	501	414	2970
VE					11300(1)
Metavulcanitos e metassedimentos					
Min	0,02	0,30	19	42	50
Max	0,54	42,70	582	667	7360
\bar{x}	0,19	9,25	446	221	1883
M	0,13	4,80	104	96	1115
VE					11000(1) 31300(1)

3.2. Principais características químicas dos resíduos mineiros acumulados

Os resíduos das escombreliras de Caveira podem ser classificados em quatro categorias fundamentais, de acordo com a sua composição predominante (Matos, 2006): (i) safrão com pirite (semi-)maciça e rochas encaixantes, sobretudo xistos cinza/negros e metavulcanitos félsicos; (ii) minério pirítico fragmentado, localmente misturado com depósitos coluvionares; (iii) rochas encaixantes com escassa pirite disseminada; e (iv) escórias e pirite ustulada, incluindo um subtipo particular constituído por escórias romanas *in situ* (fig. 2). Não existe caracterização geoquímica detalhada destes resíduos, mas é possível tecer algumas considerações sobre os conteúdos em Au, Ag, Cu, Pb e Zn, com base nos resultados obtidos (Tabela I) em 60 amostras (21 compósitas, 12 em canal e 27 pontuais):

- 1) As amostras de "safrão + pirite (semi-) maciça" ([E1+E2], fig. 2) têm valores de Cu, Zn e Pb compatíveis com minérios sulfuretados polimetálicos de "baixo teor cuprífero". A existir uma zonalidade metalífera análoga à dos depósitos característicos da FPI, estas amostras podem representar o topo e/ou domínios laterais da massa de sulfuretos maciços, potencialmente mais ricos em Pb e Zn. Alternativamente, poder-se-á admitir a possibilidade de se estar na presença de um minério sulfuretado particular com teores não negligenciáveis de Ag e Au; isto é compatível com as paragénese indicadas nos relatórios técnicos para a mineralização primária: genericamente, pirite + galena + esfalerite ± calcopirite ± pirrotite ± marcassite ± bornite ± tetraedrite ± arsenopirite ± cobaltite ± ouro.
- 2) As concentrações em metais obtidas para amostras de "safrão visivelmente meteorizado" (componente de E1, fig. 2) denunciam lixiviação significativa por águas ácidas de mina, daqui resultando perdas muito variáveis de Cu, Zn, Pb, Ag e Au.
- 3) As "escórias", no seu todo (E4, fig. 2), revelam grandes variações das

concentrações de Cu, Zn, Pb, Ag e Au, o que é consistente com processos de tratamento/beneficiação de minério pouco eficientes. As escórias não romanas têm valores elevados para qualquer destes metais [Pb ≤ 2,9% (\bar{x} = 3522 ppm, M = 3105 ppm), Cu ≤ 2,25% (= 1610 ppm, M = 866 ppm), Zn ≤ 9430 ppm (= 1648 ppm e M = 466 ppm), Ag ≤ 66 (= 35,38 ppm, M = 47,25 ppm) ppm, e Au ≤ 2,18 ppm (= 0,63 ppm, M = 0,34 ppm)]; comparativamente, as escórias Romanas são mais pobres em Ag e Au, e mais ricas nos restantes metais, especialmente Pb; deste modo, ou a amostragem realizada não conseguiu a representatividade, ou a actividade Romana visou preferencialmente a extracção dos metais preciosos.

- 4) As "misturas de fragmentos de rochas metavulcânicas, metassedimentares e escórias" (domínios menores, bastante heterogéneos, das escombreliras E3, fig.2) mostram igualmente concentrações anómalas em todos os metais analisados, com especial destaque para os metais base e, entre estes, para o Pb.
- 5) As amostras compósitas de *metavulcanitos e metassedimentos em escombrelira* apresentam conteúdos metalíferos significativos devido a disseminações de granularidade submilimétrica de minerais portadores dos metais analisados, cuja natureza não deve diferir da que se observa macroscopicamente nas restantes amostras (pirite dominante, e galena, esfalerite e escassa calcopirite). Trata-se, provavelmente, de materiais com alteração hidrotermal distal provenientes de domínios da mineralização relativamente afastados dos tipificados pelo safrão.

4. Características químicas dos sedimentos de corrente no sector Caveira-Lousal

Os dados utilizados neste estudo representam uma pequena parte dos resultados obtidos em campanhas de prospecção conduzidas nos anos 90 pela "Rio Tinto" na FPI, citados em relatórios técnicos da "Soc. Mineira Rio Artezia", referentes às áreas de pesquisa da zona

de Grândola (Arquivo LNEG). Após validação da georreferenciação dos 163 pontos situados na área em estudo, procedeu-se ao exame das distribuições de concentração para os metais mais significativos e, mais tarde, à projecção espacial dos valores interpolados.

4.1. Distribuições de concentração em elementos relevantes

A Tabela II resume os resultados da estatística descritiva das distribuições de concentração de Au, Ag, Ti, V, As, Co, Ga, Mn, Sb, Cu, Pb e Zn, seleccionados de entre 48 elementos analisados em sedimentos. Os critérios de selecção foram: (i) valores de concentração sempre acima do limite de detecção do método usado na sua determinação; (ii) distribuição suficientemente heterogénea, com variações potencialmente reveladoras de domínios namalosos; e (iii) poderem ser indicadores fidedignos de proveniência relevantes para o presente estudo.

Em termos gerais, os valores listados na Tabela II reflectem bem a heterogeneidade das distribuições de concentração e a sua assimetria (≈ 13 para o Pb, entre ≈ 5 e $8,8$ para o Au, Ag, As, Zn, Sb e Cu, e < 3 para os restantes metais). As variações são elevadas, particularmente no caso do Au, Sb,

As, V, Cu, Zn, Mn e Pb e, em especial, nos três últimos metais. Os valores máximos são significativamente altos para todos os elementos, mormente para o Cu, Zn, Mn e Pb. Com excepção da Ag e Ti, os valores médios são sempre superiores aos medianos, sugerindo distribuições não normais. Os valores do 3º quartil são bastante inferiores aos máximos das distribuições, denunciando possíveis áreas com concentrações anómalas; isto é especialmente significativo para o Cu, Zn, Mn e Pb, alcançando características únicas no caso do Pb. As distribuições de concentração em Ag, Ti, V, Co, Ga e Mn têm dispersão baixa ($\acute{o}/\bar{x} \approx 1$), contrastando com as de Au, As, Sb, Zn e Cu ($2 \leq \acute{o}/\bar{x} \leq 3$) e, distintamente, com a de Pb ($\acute{o}/\bar{x} \approx 10$). Também os valores da variância são muito elevados para a maioria dos elementos, designadamente para o Au, As, Sb, V, Cu, Zn, Mn e Pb e, entre estes, para os quatro últimos metais; a distribuição de Pb é a que tem maiores desvio padrão e assimetria.

Considerando o comportamento das distribuições de concentração e as características químicas das mineralizações aflorantes e resíduos mineiros, afigura-se plausível utilizar a análise das distribuições espaciais de Pb, Zn e Cu para a detecção e avaliação de eventuais contribuições sedimentares com origem na área de Caveira.

Tabela II

Síntese estatística das distribuições de concentração em Au, Ag, Ti, V, As, Co, Ga, Mn, Sb, Cu, Pb e Zn em sedimentos no sector Caveira-Lousal (163 amostras). Min. = mínimo; Max. = máximo; \bar{x} = média; \acute{o} = desvio padrão; \acute{o}/\bar{x} = coeficiente de variação; M = mediana; Q_1 = 1º quartil; Q_3 = 3º quartil; AIQ = amplitude inter-quartis.

	Au (ppb)	Ag (ppm)	Ti (ppm)	V (ppm)	As (ppm)	Co (ppm)	Ga (ppm)	Mn (ppm)	Sb (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Min.	3	0,01	0,03	5	3	3	3	14	3	2	6	3
Max.	223	19	2,3	427	324	57	23	4698	128	931	28097	1031
\bar{x}	7,7	3,0	0,5	94,4	12,0	11,9	8,6	638,2	6,2	30,1	226,4	74,4
σ	21,4	1,7	0,4	72,2	35,7	7,9	6,2	547	14,7	84,8	2202,7	132,5
σ/\bar{x}	2,8	0,6	0,7	0,8	3,0	0,7	0,7	0,86	2,4	2,8	9,7	1,8
M	3	3	0,5	86	3	13	6	514	3	16	21	52
Moda	3	3	0,5	48	3	3	3	473	3	14	15	3
Q_1	3	3	0,3	31	3	3	3	285	3	11	16	12,8
Q_3	6	3	0,7	150	7	16	14	878	3	22	33	70
AIQ	3	0	0,4	119	4	13	11	593	0	11	17	57,3
Curtose	75	58,7	4,2	1,8	49,3	5,98	-1,1	18,4	46,0	82,5	161,1	31,3
Assimetria	8,3	6,8	1,5	1,0	6,7	1,49	0,6	3,1	6,5	8,5	12,7	5,2
Amplitude	220	19	2,2	422	321	54	20	4684	125	929	28091	1028
Variância	455,8	2,9	0,1	5211	1272	62,5	38,2	299190	216,9	7192	4851850	17543

4.2. Distribuições espaciais de concentração em Pb, Zn e Cu

Dada a heterogeneidade e assimetria das distribuições de concentração em Pb, Zn e Cu nos sedimentos, o arranjo espacial das 163 estações de amostragem não retrata geoquimicamente a área mais a S-SE, onde se situa o Lousal, sendo no entanto aceitável para a maior parte dos 400 km² pré-seleccionados (entre os meridianos -36 e -16 e os paralelos -166 e -186, Hayford-Gauss em km). Os acentuados desvios aos modelos teóricos impedem a validação fidedigna (*i.e.* com significado geológico) dos variogramas obtidos, pelo que a interpretação se baseou nos mapas de isolinhas obtidos por *kriging* ordinário dos valores de concentração.

As figuras 3A, B e C mostram as distribuições espaciais de concentração em Pb, Zn e Cu no sector Caveira-Lousal, notando-se: (i) um domínio anómalo principal para os três metais, anisótropo, com eixo maior NNW-SSE, praticamente confinado à área de influência directa de Caveira; e (ii) um domínio anómalo secundário em Zn(-Cu), anisótropo com eixo maior NNE-SSW a NE-SW para o Zn e quasi-isótropo para o Cu, centrado numa segunda fonte proximal, as antigas concessões mineiras (pirite) de Cerro dos Arneirões e Sítio do Montado (Matos 2007), a primeira situada na margem esquerda do Sado, a N da foz da Ribeira de Corona. Não se detecta qualquer sinal relacionado com o Lousal, o que, dadas as observações de terreno e as conclusões de vários trabalhos realizados nesta área (*e.g.* Reis *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2005, 2006) só pode dever-se a sub-amostragem: efectivamente, dos 163 pontos amostrados, apenas 2 se situam na Ribeira de Corona e a montante do Lousal.

Não é possível representar num único mapa a anomalia em Pb centrada em Caveira e os detalhes da distribuição regional de Pb. Daí apresentarem-se as figs. 3 D, E e F, idênticas às figs. 3 A, B e C, mas sem os 5, 7 e 10 pontos com maior valor de Pb, respectivamente. Estas figuras, além de mostrarem os domínios anómalos já indicados, revelam duas outras áreas excepcionais: uma a SW de Caveira (Figueira), próximo do contacto tectónico CVS-Fm. Mértola; outra em plena bacia do

Sado (Sesmarías das Moças), poucos km a NE do alinhamento de Salgueiral. As causas destas "novas" anomalias em Pb são desconhecidas, sendo possível que a primeira esteja centrada numa mineralização secundária não reconhecida.

5. Discussão

A composição química das mineralizações aflorantes ("chapéu de ferro", em particular) e dos resíduos mineiros de Caveira confirma indicações ocasionais da literatura sobre o seu carácter relativamente excepcional em Pb, Zn, Cu, Ag e Au. A massa de metal contida na escombrela principal é desconhecida em rigor, por não se conhecerem algumas variáveis críticas (*e.g.* espessura, densidade, heterogeneidade química); contudo, cálculos conservadores indicam algumas centenas de kg de Au, dezenas de toneladas de Zn, Ag e Cu e dezenas de milhares de toneladas de Pb. Esta escombrela representa, portanto, uma importante fonte de metais passíveis de dispersão sedimentar (detrítica e quimio-génica). Todavia, a análise das distribuições dos metais nos sedimentos demonstra que as anomalias de Cu, Zn e Pb se encontram muito confinadas em torno da escombrela. Importa, pois, procurar as razões que dificultam a dispersão sedimentar, especialmente nítida para o Pb, as quais deverão ser compatíveis com as que possibilitam as anomalias secundárias adjacentes à antiga mina de Cerro de Arneirões.

A configuração local não dispersiva da rede de drenagem em torno de Caveira não parece constituir uma das principais razões limitadoras da dispersão dos metais. Com efeito, o transporte fluvial de sedimentos metalíferos deveria originar uma anomalia com pico na mina e uma cauda relativamente extensa para ENE (Ribeira de Grândola), que não se observa. Na realidade, os valores em Pb observados em afluentes desta ribeira provenientes da área da mina são já muito próximos do que é habitual em toda a região, atestando a fraquíssima dispersão de Pb pela rede hidrográfica. Esta incipiente dispersão sugere, pois, condições adequadas à precipitação de minerais secundários que

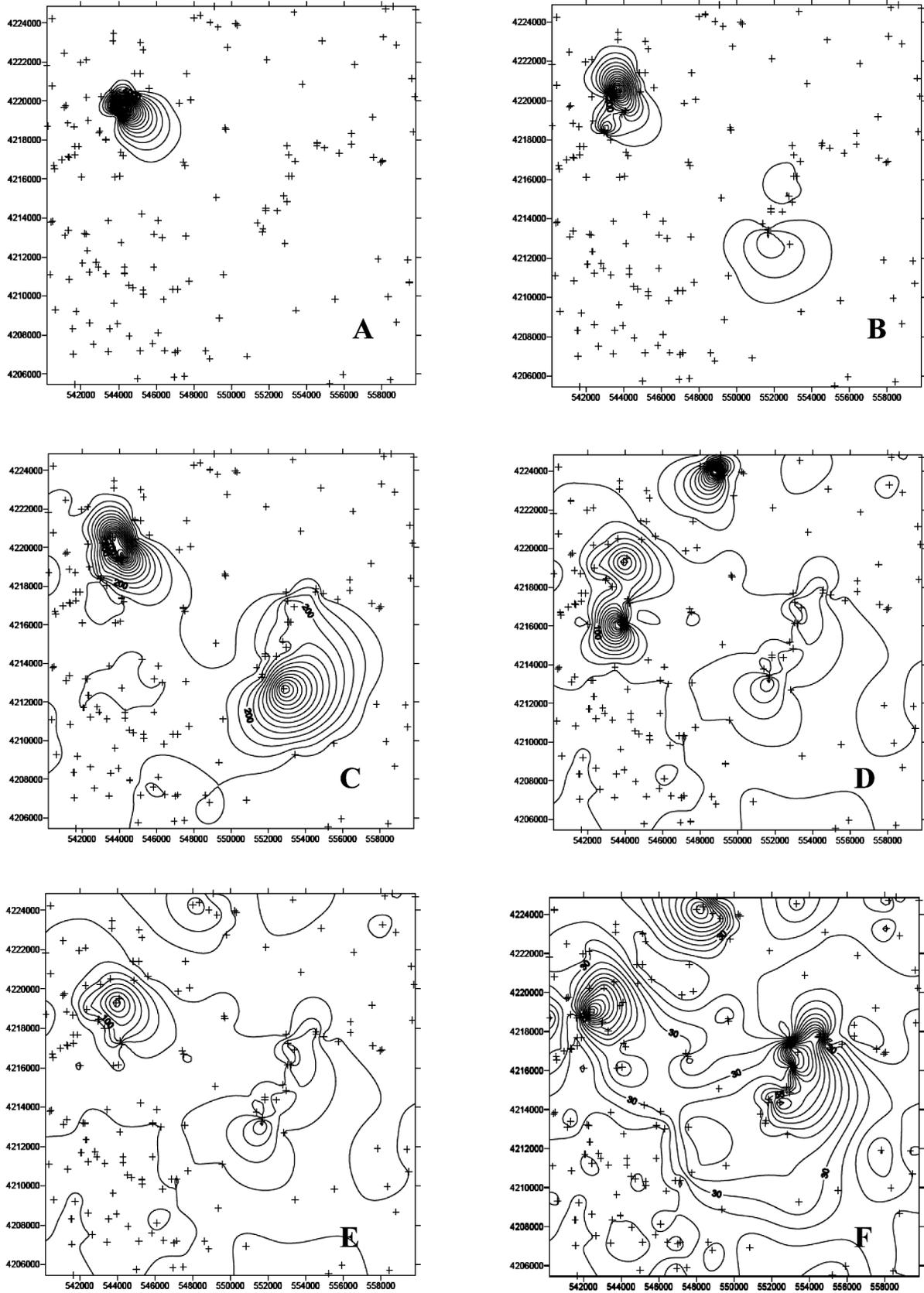


Figura 3 - Distribuição espacial das concentrações em Pb (A), Zn (B) e Cu (C) no sector Caveira-Lousal. Distribuições em Pb, retirando 5 (D), 7 (E) e 10 (F) valores anómalos Os pontos assinalados com + correspondem às estações de amostragem. Isolinas em ppm e coordenadas UTM.

incorporem estes metais, nomeadamente Pb. Trabalhos em curso permitirão testar esta possibilidade, identificando as fases presentes e avaliando as circunstâncias em que as mesmas se formam ou instabilizam. Daqui podem ainda resultar informações cruciais para a análise custo-benefício da possível retoma dos materiais da escombrela principal, para extracção de parte significativa dos seus metais e acondicionamento, nos termos ditados pelas boas práticas ambientais, dos resíduos resultantes (tendencialmente inertes e sem valor para a manufatura de agregados).

6. Conclusões

O estudo químico de 163 sedimentos de corrente do sector Caveira-Lousal da FPI revela distribuições de concentração heterogéneas e assimétricas em Au, Ag, Ti, V, As, Co, Ga, Mn, Sb, Cu, Pb e Zn. De entre estas, destacam-se as de Cu, Zn e Pb, que mostram dois domínios anómalos centrados nas antigas minas de Caveira e Cerro dos Arneirões. O domínio mais anómalo corresponde a Caveira, onde, além de mineralizações aflorantes, existe uma escombrela de grandes dimensões constituída por materiais diversos ricos naqueles metais. A notável circunscrição geográfica dos halos geoquímicos deve-se a factores diversos incompletamente conhecidos, sendo um dos mais prováveis a estabilização de minerais secundários que fixem os diferentes metais. O seu estudo detalhado poderá fornecer dados essenciais para a gestão sustentável dos resíduos mineiros da área de Caveira.

Agradecimentos: Agradecemos ao Dr. João Carlos Sousa (*Iberian Resources, Lda.*) as facilidades concedidas na consulta e utilização dos resultados geoquímicos disponíveis para Caveira. Este trabalho é uma contribuição do projecto METALTRAVEL (POCI/CTE-GEX/61700/ 2004).

Bibliografia

Anderson, S. P.; von Blanckenburg, F. & White, A. F. (2007). Physical and chemical controls on the Critical Zone. *Elements*, 3: 315-319.

- Feliciano, R.; Mateus, A. & Matos, J. X. (2008). Spatial distributions of Cu, Zn, Pb and Co contents in stream sediments of the South Portuguese Zone; implications for mineral exploration. *V Sem. Rec. Geol., Amb. e Ord. do Território*, Vila Real, Portugal (submetido).
- Lopes, R. & Labaredas, J. (2007). Desenvolvimento de competências multimetodológicas aplicadas à prospecção mineral – Parte I: Actividades de prospecção no sector Caveira-Lousal. Relat. Estágio (não publicado), CEPGA, Depto. Geologia, Fac. Ciências, Univ. Lisboa.
- Matos, J. X. (2006). Carta geológico-mineira da Caveira, escala 1/5000, INETI.
- Matos, J. X. & Martins, L. (2006). Reabilitação ambiental de áreas mineiras do sector português da Faixa Piritosa Ibérica: estado da arte e perspectivas futuras. *Bol. Geol. y Min. España*, 117: 289-304.
- Matos, J. X. (2007). Recursos geológicos. Minérios metálicos. In J. T. Oliveira (ed.) - Notícia Explicativa da Folha 42B Azinheira de Barros. Dep. Geologia INETI, Lisboa.
- Matos, J. X.; Martins, A.; Rego, M.; Mateus, A.; Pinto, A.; Figueiras, J. & Silva, E. (2008). Roman slag mine wastes distribution in the Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt. *V Cong. Int. SEDPGYM Minería y Metalurgia Históricas SW Europeo*, León, Spain, 11 p.
- Oliveira, J. T.; Relvas, J. M. R. S.; Pereira, Z.; Matos, J. X.; Rosa, C. J.; Rosa, D.; Munhá, J. M.; Jorge, R. C. G. S. & Pinto, A. M. M. (2006). O Complexo Vulcano-Sedimentar da Faixa Piritosa: estratigrafia, vulcanismo, mineralizações associadas e evolução tectono-estratigráfica no contexto da Zona Sul Portuguesa. In R. Dias; A. Araújo; P. Terrinha & J. C. Kulberg (eds.) - Geologia de Portugal no contexto da Ibéria, Univ. Évora, pp. 207-244.
- Oliveira, J. T.; Pereira, Z.; Matos, J. X. & Fernandes, P. (2008). A palinoestratigrafia no contexto da interpretação estrutural da Faixa Piritosa. *8º Conf. GGET*, Porto, 4pp.
- Oliveira, V. M. J.; Matos, J. X. & Rosa, C. (2001). The NNW sector of the IPB – new exploration perspectives for the next decade. *Geode Workshop*, Aracena, Spain, pp. 34-37.
- Reis, A. P.; Silva E. F.; Sousa, A. J.; Matos, J. X.; Patinha, C.; Abenta, J. & Fonseca, E. (2005). Combining GIS and stochastic simulation to estimate spatial patterns of variation for lead at the Lousal mine, Portugal. *Land Degrad. Develop.*, 16: 229-242.
- Silva, E. F.; Fonseca, E.; Matos, J. X. & Oliveira, V. J. M. (2005). The effect of unconfined mine tailings on the geochemistry of soils, sediments and surface waters of the Lousal area (Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal). *Land Degrad. Develop.*, 16: 213-228.
- Silva, E. F., Patinha, C.; Reis, P.; Fonseca, E.; Matos, J. X. & Barrosinho, J. (2006). Interaction of acid mine drainage with waters and sediments at the Corona stream, Lousal mine (Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal), *Environ. Geol.*, DOI 10.1007/s00254-006-0273-6.
- SIORMINP (2002). Sistema de Informação de Ocorrências e Recursos Minerais Portugueses. A. Parra & A. Filipe (Coords.). Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.