

Avaliação por modelação em SIG da contaminação mineira por drenagem ácida em S. Domingos (Faixa Piritosa, Alentejo)

M. J. Batista^(a,1), M. G. Brito^(b,2), M. M. Abreu^(c,3), A. J. Sousa^(d,4),
L. Quental^(a,5) & M. Vairinho^(a,6)

Projecto MINEO (V Programa Quadro de Investigação, CE) e projecto GEOMIN (FCT/MCT/Sapiens 99)

a - Instituto Geológico e Mineiro; b - Centro de Investigação em Geociências Aplicadas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL;

c - Instituto Superior de Agronomia, UTL; d - Instituto Superior Técnico, UTL

1 - maria.j.batista@igm.pt; 2 - mgb@fct.unl.pt, 3 - manuelaabreu@isa.utl.pt; 4 - ajsousa@ist.utl.pt;

5 - lidia.quental@igm.pt; 6 - margarida.vairinho@igm.pt

RESUMO

Palavras-chave: drenagem ácida efectiva; interpolação geostatística.

O objectivo deste estudo é a detecção de contaminação superficial resultante da antiga actividade mineira em S. Domingos, Alentejo, utilizando técnicas de interpolação geostatística combinadas com cartografia introduzida e/ou gerada nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A mina de São Domingos, localizada no Baixo Alentejo, manteve actividade durante 109 anos e foi explorada (*gossan*) desde tempos pré-romanos para Cu, Ag e Au sendo, a partir do século XIX e até 1966, explorada essencialmente para Cu e S. Em termos ambientais produziu efeitos importantes, de natureza física e química, na paisagem envolvente.

Foram analisadas 14 amostras de lixiviados de escombrelas em SO_4^{2-} e realizadas medições de pH de água superficial em 49 locais, numa área de cerca de 20 km², ao longo da ribeira de S. Domingos e em linhas de água adjacentes.

A estimação dos teores de SO_4^{2-} foi realizada recorrendo ao método geoestatístico da *krigagem da indicatriz*, o que permitiu a delimitação da área cuja concentração em SO_4^{2-} se encontra acima de determinado limiar.

O mapeamento superficial das áreas de influência da drenagem ácida foi produzido pela estimação dos valores de pH. De forma a integrar a influência da proximidade dos locais de acumulação de resíduos resultantes da actividade mineira na variação espacial dos valores de pH, foi utilizado o método geoestatístico *cokrigagem co-localizada*.

A delimitação da área de drenagem ácida mineira efectiva resultou da integração em SIG dos mapas estimados de valores de pH e dos teores estimados dos lixiviados das escombrelas.

Metodologia

Com o objectivo de delimitar a área de influência da drenagem ácida e prevêr a sua distribuição espacial foi feita a estimação dos valores de pH e de SO_4^{2-} ao longo da área de actividade mineira tendo em conta a influência da proximidade ao tipo de escombrelas existente. A metodologia aplicada teve como base os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a integração e a criação de mapas derivados de informação primária e a estimação de cartas de drenagem ácida utilizando o método geoestatístico *cokrigagem co-localizada* e o formalismo da *krigagem da indicatriz* (Soares, 2000).

A metodologia utilizada envolveu 2 etapas:

1ª etapa – avaliação da correlação existente entre os valores do pH e das concentrações de SO_4^{2-} com o tipo de material circundante e com a morfologia do terreno. Utilização de SIG's para criação de informação derivada:

- cálculo da proximidade dos pontos amostrados aos locais de deposição de resíduos mineiros;
- criação de mapas de distância aos diferentes tipos de escombrela;

2ª etapa – utilização de modelos de geoestatística para a criação de coberturas indicadoras de drenagem ácida:

- aplicação do método *cokrigagem co-localizada* e do *formalismo da indicatriz* para a incorporação da influência da proximidade aos locais dos resíduos, para os valores de pH e concentrações de SO_4^{2-} acima de determinado limiar.

A delimitação das áreas de drenagem ácida resulta da integração da informação em SIG.

Aplicação à mina de São Domingos

A metodologia foi aplicada à antiga área mineira de S. Domingos, localizada a cerca de 17 km de Mértola, no Baixo Alentejo. A intensa exploração de Cu e S, desde a 2ª metade do século XIX até o ano de 1966, produziu significativos efeitos negativos na paisagem e no meio o que a tornou, e à sua envolvente, em alvo importante para estudos de âmbito ambiental (Batista, 2000).

Foram analisadas 14 amostras de lixiviados de escombrelas para SO_4^{2-} e realizadas medições de pH em 49 locais de água superficial, numa área de cerca de 20 km², ao longo da ribeira de S. Domingos e de linhas de água

adjacentes. A tipologia dos materiais das escombreiras existentes foi obtida como resultado da classificação de imagens hiperespectrais (Quental *et al.*, 2003), no âmbito dos projectos MINEO¹ e GEOMIN². A figura 1 ilustra a área mineira estudada bem como a localização dos locais amostrados e a distribuição espacial dos 8 tipos de material de escombreira, resultantes da actividade mineira.

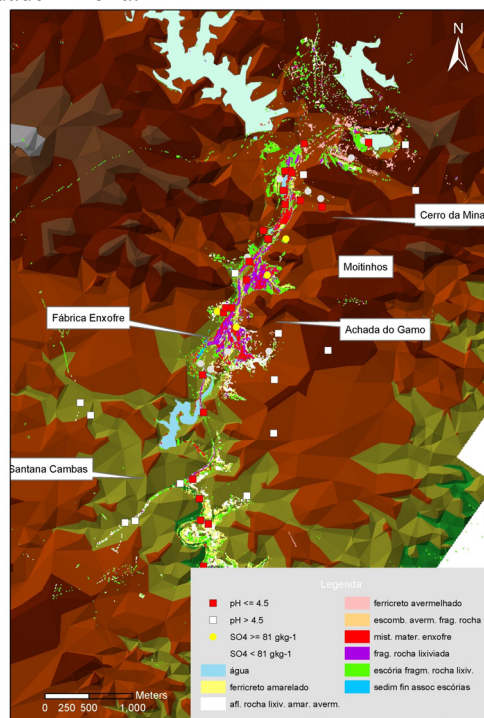


Figura 1 – Área mineira de S. Domingos – localização das amostras e tipologia dos materiais das escombreiras.

1ª etapa - Avaliação da correlação existente entre os valores de pH e das concentrações de SO_4^{2-} com o tipo de material circundante e com a morfologia do terreno.

Para o cálculo das correlações existentes entre os valores de pH, acima de determinado limiar, com os tipos de material existentes na superfície da área mineira foi utilizado o *software* ArcMap que permitiu, para cada local amostrado, calcular as distâncias ao tipo de material de escombreira. No quadro I apresentam-se os valores das correlações encontradas para as variáveis primárias, SO_4^{2-} g.kg⁻¹ e pH, e as distâncias aos diferentes tipos de material da área mineira.

Quadro I – Coeficientes de correlação do SO_4^{2-} e do pH com a distância aos tipos de escombreira.

Tipo de material	Coef. corr. SO_4^{2-} vs. dist	Coef. corr. pH vs. dist.
Mistura de materiais ricos em enxofre	-0.39	-0.67
Sedimentos finos associados a escórias	-0.32	-0.64
Mistura de fragmentos de rocha lixiviada	-0.52	-0.58
Ferricrete de tons amarelados	-0.29	-0.54
Escórias e fragmentos de rocha lixiviada	-0.47	-0.53
Ferricrete de tons avermelhados	0.19	-0.50
Afloramento de rocha lixiviada de cor branco-amarelada	-0.42	-0.40
Escombreira avermelhada de fragmentos de rocha	-0.34	-0.32

Pela análise dos coeficientes de correlação expostos no Quadro I verifica-se que, tal como seria de prever, o factor que mais influencia a ocorrência de valores de pH baixos é a proximidade aos materiais ricos em enxofre e aos materiais de sedimentos finos associados a escórias.

Relativamente a SO_4^{2-} , os valores mais elevados de coeficiente de correlação (-0.52 e -0.47) dizem respeito a tipos de material classificados como “mistura de fragmentos de rocha lixiviada” e como “escórias e fragmentos de rocha lixiviada”, respectivamente.

¹MINEO – “Assessing and Monitoring the Environmental Impact of Mining Activities in Europe Using Advanced Earth Observation Techniques”, EC- Fifth Framework Programme, IST-1999-10337, 1999-2002.

²GEOMIN - “Geostatistical Environmental Risk Assessment of Abandoned Mines Using Remote Sensing and Biomonitoring”, FCT/MCT, SAPIENS 99, Proj. N.º 34784, 2000-2003.

Os coeficientes de correlação encontrados entre os valores dos pontos amostrados e os valores de altitude extraídos do MDT foram muito baixos: 0,05 e -0,196, respectivamente para o pH das águas e o SO_4^{2-} dos lixiviados das escombreiras, pelo que não se considerou a influência da altimetria neste estudo. A razão para os valores da correlação serem tão baixos deve-se ao facto de as amostras terem sido, sistematicamente, colhidas em locais de depressão (linhas de água).

A criação dos mapas das variáveis secundárias “distância aos materiais ricos em enxofre” e “distância a materiais de fragmentos de rocha lixiviada” foram obtidos através do *software* ArcMap.

2ª etapa – Utilização de modelos de geoestatística para a criação de coberturas indicadoras de drenagem ácida.

Para a incorporação da influência da proximidade aos materiais resultantes da actividade mineira para valores de pH e concentrações de SO_4^{2-} acima de determinado limiar, foi aplicado o método geoestatístico *cokrigagem co-localizada* e o *formalismo da indicatriz*, utilizando o *software* GEOMS v.1.

Visto que apenas interessa mapear os locais indicadores de drenagem ácida foi aplicado o *formalismo da indicatriz* para as variáveis principais: (i) locais que apresentam pH inferior ou igual a 4,5 (VMA para água de rega, in Diário República, 1998); (ii) locais que apresentam concentrações de SO_4^{2-} superiores ou iguais a 81g.kg^{-1} (valor do percentil 75, visto não terem sido encontrados na bibliografia outros valores legais), limites assumidos localmente como limiar do meio ácido.

Devido ao reduzido número de amostras de concentração de SO_4^{2-} os resultados obtidos pelo método *cokrigagem co-localizada* não se mostraram satisfatórios pelo facto de, nos locais onde não existem valores amostrados, o valor estimado corresponde ao valor da variável secundária. Assim, não obstante o reduzido número de ensaios, optou-se por estimar esta variável pelo método da *krigagem da indicatriz*, por se considerar pertinente a sua representação espacial, como parâmetro indicador de drenagem ácida.

Na figura 2 apresentam-se os semi-variogramas experimentais e respectivos parâmetros dos modelos ajustados para a estimação das variáveis $\text{SO}_4^{2-} \geq 81\text{g.kg}^{-1}$ (Fig. 2a) e para a variável $\text{pH} \leq 4,5$ condicionada à proximidade de materiais ricos em enxofre (Fig. 2b).

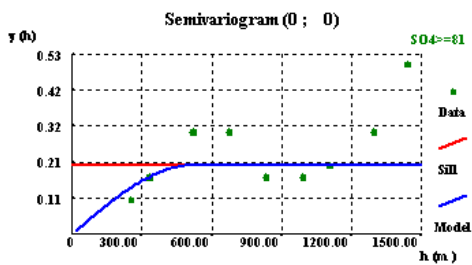


Fig. 2a - Variável $\text{SO}_4^{2-} \geq 81\text{g.kg}^{-1}$, amplitude = 520m
C0+C1 = 0.204

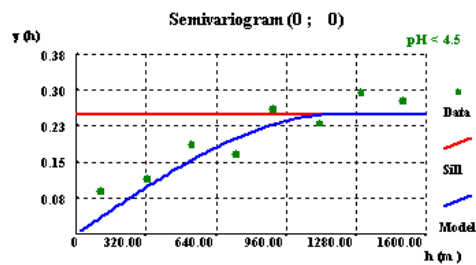


Fig. 2b - Variável $\text{pH} \leq 4,5$, amplitude = 1200m
C0+C1 = 0.25

Na figura 3 apresentam-se os mapas de probabilidade estimados para a variável SO_4^{2-} e respectivo mapa de concentração de valores $\text{SO}_4^{2-} \geq 81\text{g.kg}^{-1}$, utilizando os parâmetros do variograma experimental da Fig. 2a. Na figura 4 apresentam-se os mapas de probabilidade estimados pelo método *cokrigagem co-localizada* para a variável indicatriz $\text{pH} \leq 4,5$ condicionada à variável secundária “distância a materiais ricos de enxofre”.

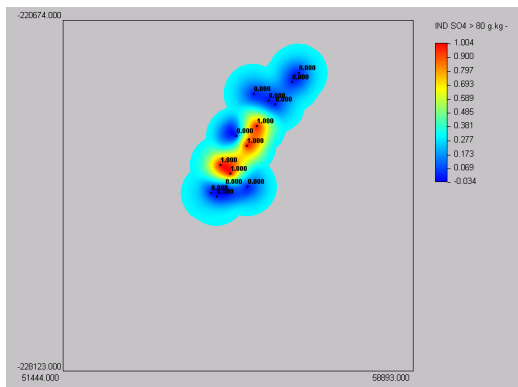


Fig 3a - Probabilidade de $\text{SO}_4^{2-} \geq 81\text{g.kg}^{-1}$

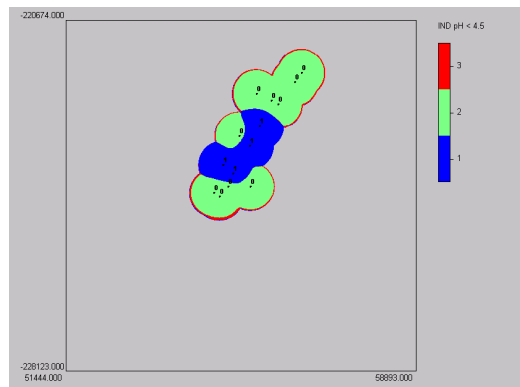


Fig 3b - Indicatrix $\text{SO}_4^{2-} \geq 81\text{g.kg}^{-1}$
Legenda: 1) $\text{SO}_4^{2-} \geq 81$; 2) $\text{SO}_4^{2-} < 81$; 3) área incerteza.

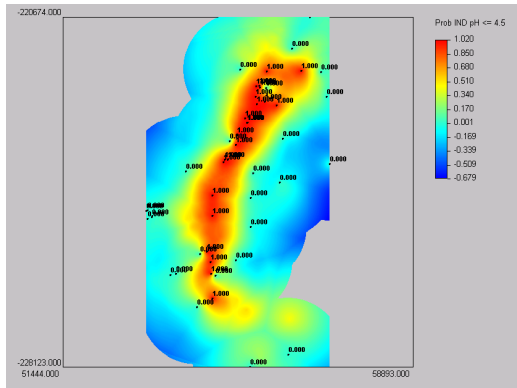


Fig.4a- Probabilidade de $\text{pH} \leq 4,5$ vs distância aos materiais ricos em enxofre.

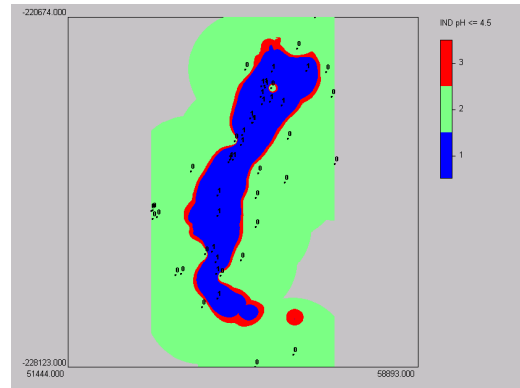


Fig. 4b - Indicatriz $\text{pH} \leq 4,5$ vs distância
Legenda: 1) $\text{pH} \leq 4,5$; 2) $\text{pH} > 4,5$; 3) área incerteza.

A delimitação das áreas de drenagem ácida é apresentada na figura 5.

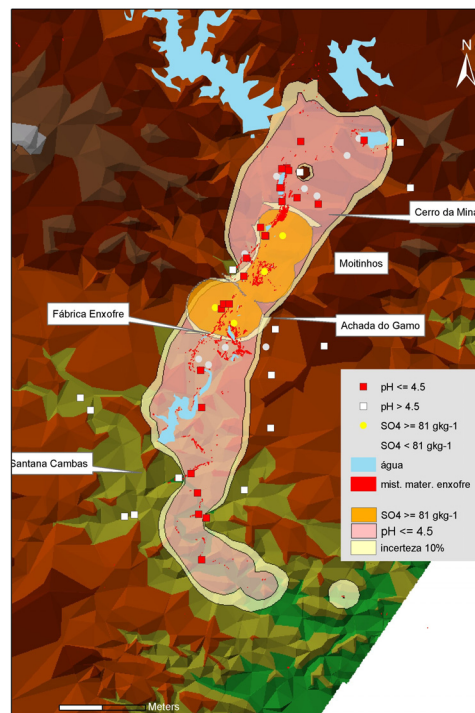


Figura 5 – Áreas de drenagem ácida.

Esta área resultou da integração dos mapas estimados do $\text{pH} \leq 4,5$ condicionados pela distância aos materiais de enxofre existentes com as áreas estimadas da concentração de SO_4^{2-} acima de 81g.kg^{-1} .

Tal como seria de prever, a área mais crítica em termos de drenagem ácida corresponde à zona denominada Achada do Gamo, junto à antiga fábrica de enxofre onde era feita a ustulação do minério.

Faz-se, no entanto, notar, na área sul da figura, a existência de uma zona de incerteza de 10% quanto à existência de valores de $\text{pH} \leq 4,5$, zona esta que se encontra ainda na área de influência das amostras vizinhas e que, devido ao coeficiente de correlação de $-0,67$ encontrado entre os valores de pH e os materiais da escombreira, é classificada como área provável de ocorrência de valores de $\text{pH} \leq 4,5$.

Conclusões

A metodologia aplicada permitiu integrar na estimação de uma variável primária, escassa e amostrada pontualmente, a influência de conjunto denso de informação secundária que, de alguma forma, a traduz e representa nas suas características espaciais e estruturais. A utilização do método geoestatístico *cokrigagem co-localizada* permitiu a estimação dos valores da variável primária $\text{pH} \leq 4,5$, medida localmente em linhas de água superficiais, tendo em conta a influência da proximidade dos locais de acumulação de resíduos resultantes da actividade mineira.

Devido à baixa correlação encontrada entre a concentração de SO_4^{2-} e a distância a materiais geradores de drenagem ácida e, simultaneamente, devido ao escasso número de amostras existentes, optou-se por estimar esta

variável pelo método da *krigagem da indicatriz* de forma a caracterizar, a nível local, as áreas onde esta variável assume valores extremos, indicadores de drenagem ácida.

A delimitação das áreas de drenagem ácida na totalidade da área mineira resultou da integração em SIG dos mapas estimados para valores de $\text{pH} \leq 4,5$ condicionados pela distância a materiais de enxofre existentes na área mineira, com as áreas estimadas da concentração de SO_4^{2-} acima de 81g.kg^{-1} .

Bibliografia

Diário da República, I Série A, nº 176, Decreto-lei nº. 236/98 de 1 de Agosto, Art. 58 – Águas de Rega, 46 (1998)

Batista, M. J. (2000) - Environmental state of the portuguese test site S. Domingos Mine: past and present. *Report European Commission* (http://www.brgm.fr/mineo/IGM_test_site.pdf): 41 p.

Quental, L.; Brito, M. G.; Sousa, A. J.; Abreu, M. M.; Batista, M. J.; Oliveira, V.; Vairinho, M. & Tavares, T. (2003) - Utilização de imagens hiperespectrais na avaliação da contaminação mineira em S. Domingos, Faixa Piritosa, Alentejo. *VI Congresso Nacional de Geologia*, Monte da Caparica.

Soares, A. (2000) - Geostatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. *IST Press*, Lisboa, 206 p.