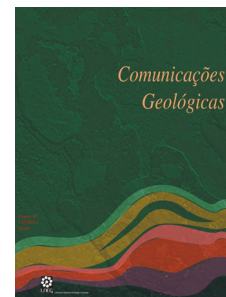


Avaliação geoquímica de ambientes contaminados pela extracção mineira em duas distintas regiões geológicas e climáticas

Geochemical evaluation of contaminated environments by mining in two distinct geological and climatic regions

C. Pinho^{1,2,3*}, R. Fonseca^{1,2,3}, L. Martins^{1,2,3}, N. Dias^{1,2,3}



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: O objectivo do presente trabalho consiste na caracterização geoquímica de duas áreas mineiras distintas, a mina de São Domingos (Portugal) e a Bacia do Paraopeba (Brasil) e suas componentes geológicas (solos, sedimentos, água intersticial e coluna de água).

Devido à ocorrência dos metais sob distintas formas minerais, óxidos de ferro na Bacia do Paraopeba e sulfuretos maciços em São Domingos, as características geoquímicas do meio e a solubilidade/biodisponibilidade dos elementos metálicos apresentam diferenças acentuadas, tendo como consequência distintos impactos ambientais.

A especiação dos elementos metálicos constitui importante ferramenta para a monitorização da poluição ambiental em regiões mineiras. A mobilidade, biodisponibilidade e ecotoxicidade dos metais depende da sua proporção nas diferentes fases minerais ou orgânicas às quais está associado, variando em função das condições químicas do meio, clima e natureza das rochas parentais. A análise das diversas formas químicas forneceu ferramenta imprescindível para o conhecimento das medidas de recuperação/reabilitação a adoptar.

Palavras-chave: Geoquímica, Metais, Impactos, Ecotoxicidade, Reabilitação.

Abstract: The aim of this work is the geochemical characterization of two distinct mining areas, São Domingos mine (Portugal) and Paraopeba Basin (Brazil) and their geological components (soil, sediment, pore water and water column).

Due to the occurrence of metals in different mineralogical forms, iron oxides in Paraopeba Basin and massive sulphides in São Domingos, the geochemical characteristics of the environment and the solubility/bioavailability of metals are markedly different, resulting in distinct environmental impacts. The speciation of metallic elements is an important tool for monitoring environmental pollution in mining areas.

The mobility, bioavailability and ecotoxicity of metals depend on their proportion in different mineral or organic phases, varying in accordance of the chemical conditions of the environment, the climate and the nature of the parent rock. The analysis of the chemical forms of metals provide indispensable tool for the knowledge of the rehabilitation and recovery measures to use in degraded areas.

Keywords: Geochemistry, Metals, Impacts, Ecotoxicity, Rehabilitation.

¹Centro de Geofísica, Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal.

²READE - Rede Luso-Brasileira de Remediação e Reabilitação de Ambientes Degradados.

³Laboratório AmbiTerra, Universidade de Évora, Rua da Barba Rala, nº1 Parque Industrial e Tecnológico, 7005-345 Évora.

*Autor correspondente / Corresponding author: catarinag_pinho@hotmail.com

1. Introdução

A actividade mineira tem sido desde sempre usada para a extracção de materiais indispensáveis às actividades humanas, com especial destaque para os recursos minerais com grande valor económico. Como a maioria das actividades industriais, a exploração mineira é susceptível de originar alterações no meio ambiente que vão, desde as mais imperceptíveis até às que podem causar graves problemas a nível ambiental no meio circundante, sendo esta actividade responsável, a nível mundial, pela adição de 1,16 milhões de toneladas de metais por ano, em ecossistemas terrestres e aquáticos.

As minas abandonadas constituem fontes de poluição ambientais preocupantes, assim como as suas instalações auxiliares, que ocupam grandes áreas. As escombreiras representam o maior risco por possuírem resíduos produzidos pela exploração mineira que se encontram a céu aberto, completamente expostos a chuvas, propiciando desta forma o contacto das águas com o minério, com as gangas e com o solo exposto, o que potencializa uma série de processos físicos tais como, a perda de cobertura vegetal e consequente aumento da erosão hídrica e eólica (Salomons, 1995), ou processos químicos como a oxidação. Estes últimos processos sobre sulfuretos causam uma drenagem ácida característica deste tipo de maciços (supergénicos), introduzindo no ambiente (através das linhas de água) substâncias tóxicas, a produção de acidez e dispersão de metais aquando da exposição dos jazigos a ambientes oxidantes (Larocque & Rasmussen, 1998) afectando, desta forma, todo o ecossistema envolvente. O método de exploração, o clima mas, principalmente, o tipo de mineralização existente num dado jazigo, constituem os principais factores que influenciam a problemática ambiental que ocorre nas áreas exploradas.

A poluição do solo e de sistemas aquáticos por metais pesados é um dos factores que mais contribui para a degradação da qualidade do meio, constituindo um risco eminente de intoxicação para o Homem.

2. Enquadramento geológico e metodologia

Foram seleccionadas, no Brasil e em Portugal, duas regiões com forte impacto mineiro, para avaliar a influência da geologia e do clima, na geoquímica de ambientes sujeitos à contaminação pela exploração mineira.

Mina de São Domingos: explorada desde o período calcolítico foi encerrada em 1966 após esgotamento do minério. Situa-se no Sul de Portugal, sob clima Mediterrânico e integra-se na Faixa Piritosa Ibérica (Fig. 1), que constitui uma das mais importantes Províncias Metalogénicas de sulfuretos maciços polimetálicos à escala mundial. Possui resíduos mineiros muito heterogéneos, encontrando-se escórias romanas e modernas, cinzas de fundição, resíduos ricos em pirite e outros resíduos provenientes da extracção de minério, como resíduos de *gossan* e de rochas-mãe (quartzitos e filitos, rochas vulcânicas ácidas com intercalações sedimentares, depósitos do tipo “flysch”). A amostragem de solos, sedimentos e águas foi efectuada de forma representativa, como podemos observar na figura 2.

Bacia do Paraopeba: situada na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, (Fig. 1) sob clima tropical seco, foi seleccionada pela sua geodiversidade, importância socioeconómica, associada a graves

problemas ambientais devido à intensa actividade mineira que se exerce há mais de 300 anos. Geologicamente é constituída por gnaisses, granitóides, rochas metavulcânicas e vulcânicas intercaladas por rochas sedimentares, quartzitos, metaconglomerados-metarenitos, metapelitos, itabiritos e mármore. A amostragem de solos e sedimentos foi efectuada de forma representativa, como podemos observar na figura 3.

Determinaram-se alguns parâmetros físico-químicos, nomeadamente o pH dos solos, sedimentos e águas (escorrência e intersticiais) e os teores de metais em amostras de água (escorrência e intersticiais). Para os solos e sedimentos foi ainda determinada a sua textura e, de forma a se conhecer o nível de perigosidade ambiental e encontrar medidas de remediação adequadas em trabalhos futuros, pretendeu-se determinar as formas químicas em que os metais se encontram nos materiais sedimentares através de estudos de especiação química, utilizando o procedimento de extracção sequencial de Tessier modificado (Tessier *et al.*, 1979) Nos sedimentos e solos avaliaram-se ainda os teores de carbono, azoto e enxofre, através da análise elementar e identificaram-se os principais minerais existentes na fracção granulométrica mais activa física e quimicamente, a fracção argilosa, através de difracção de raios-X.

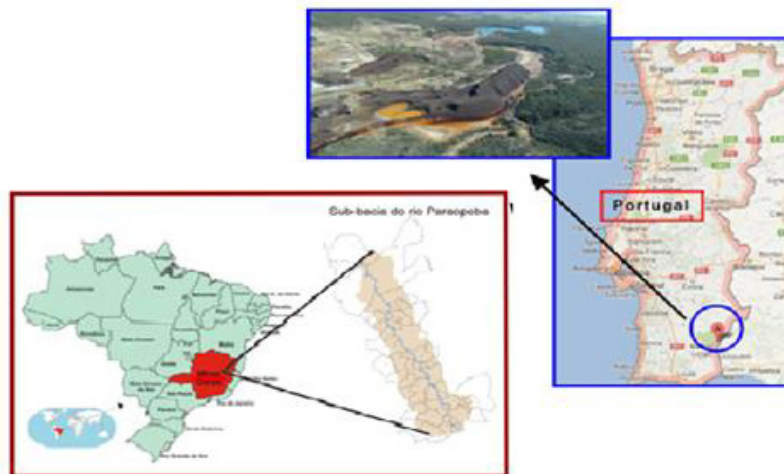


Fig. 1. Localização Geográfica da Mina de São Domingos e da Bacia do Paraopeba.

Fig. 1. Geographical location of São Domingos mine and Paraopeba basin.

3. Resultados, discussão e conclusão

Para a mina de São Domingos e a Bacia do Paropeba foram determinados os teores totais de metais (Tabela 1) (As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), através de extracção por *aqua regia*, em amostras de solos e sedimentos, representando esta extracção o total das formas extraíveis para os metais mencionados, o que permite avaliar o nível de contaminação dos materiais estudados;

Devido à ocorrência sob distintas formas minerais, óxidos de ferro na Bacia do Paraopeba e sulfuretos maciços em São Domingos, as características geoquímicas

do meio e a solubilidade e biodisponibilidade dos elementos metálicos apresentam diferenças acentuadas, tendo como consequência distintos impactos ambientais. Os valores das fracções potencialmente mais poluentes, extraíveis com *aqua regia*, são significativamente superiores para As, Pb, Zn e Cu em São Domingos, possuindo a Bacia do Paraopeba valores mais elevados de Mn e Cr. O Fe tem valores idênticos nas duas regiões. Em São Domingos, os baixos valores de pH (2,5-4,1), aumentam a solubilidade dos metais, representando uma situação de maior risco ambiental. Apenas o Mn, nas

fracções biodisponíveis, (fases dissolvidas na água intersticial, fracções de troca e ligadas a carbonatos) tem teores mais elevados na Bacia do Paraopeba, onde as concentrações sob a forma de óxidos são muito elevadas (>2000 mg kg⁻¹), (Tabela 2).

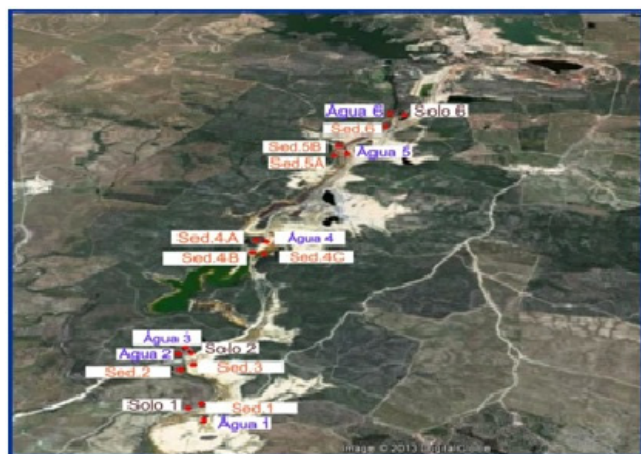


Fig. 2. Localização dos pontos de amostragem de solos, sedimentos e águas recolhidas na mina de São Domingos.

Fig. 2. Locations of soil, sediment and water sampling sites in the São Domingos mine.

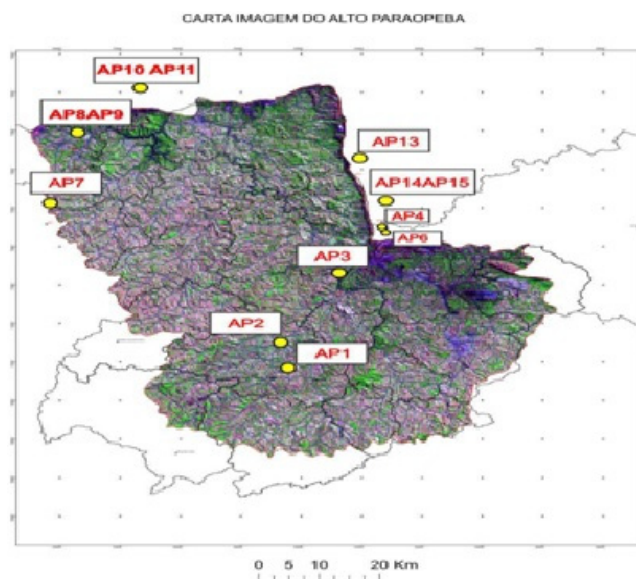


Fig. 3. Localização das amostragens efectuadas (solos e sedimentos), ao longo da Bacia do Paraopeba.

Fig. 3. Location of the sampling sites (soils and sediments) along the Paraopeba Basin.

Tabela 1. Teores totais extraídos por *Aqua Regia* nos sedimentos da Mina de São Domingos e nos solos da bacia do Paraopeba.

Table 1. Levels extracted by *Aqua Regia* sediments of the São Domingos Mine and soils of the Paraopeba basin.

	As (mg Kg ⁻¹)	Pb (mg Kg ⁻¹)	Cr (mg Kg ⁻¹)	Zn (mg Kg ⁻¹)	Cu (mg Kg ⁻¹)	Fe (%)	Ni (mg Kg ⁻¹)	Mn (mg Kg ⁻¹)	pH
Teor/(mg Kg ⁻¹)% Crosta	+++	+++	+++	+++	+++	+++	---	--	
Máximo	96	14616	28	984	1468	14	28	324	3,6
Mínimo	11	79	7	37	52	6	4	31	2,5
Média	45	4149	20	220	356	10	10	138	3,1
Solos AR									
Máximo	1	26	600	60	74	12	109	9618	7,8
Mínimo	0	8	9	19	4	4	3	24	4,6
Média	0	16	130	33	18	8	23	1253	6,5

Legenda: +++ Superior, --- Inferior, -- Dentro do Limite.

Tabela 2. Resultados obtidos para as duas zonas estudadas referentes à fracção biodisponível.

Table 2. Results obtained for the two studied zones concerning the bioavailable fraction.

Solos	F1	
	São Domingos	Mn, Cu e Zn
Bacia Rio Paraopeba	Ni, Cr e Mn	
Sedimentos	São Domingos	Pb, Zn e Cu
	Bacia Rio Paraopeba	Mn, Zn e Pb

Em ambas as regiões a poluição propagou-se ao longo das zonas estudadas, contaminando as zonas envolventes. Os teores de metais observados nos materiais estudados reflectem o risco potencial que ainda permanece devido às actividades passadas e presentes, da mineralogia dos locais estudados. Desta forma, torna-se evidente a urgente tentativa de reabilitação das duas zonas estudadas. Para a remediação das duas áreas estudadas é necessário descontaminar tanto as águas (que se encontram muito ácidas em São Domingos e ácidas a neutras na Bacia do Paraopeba) e com uma grande quantidade de metais dissolvidos – AMD), como os solos e sedimentos, que por serem lixiviados por estas águas se encontram com pH muito baixo (no caso de São Domingos) e contêm elevadas concentrações de metais.

A análise das formas químicas dos metais, distintas nas duas regiões mineiras, forneceu uma ferramenta imprescindível para o conhecimento das medidas de recuperação e reabilitação a adoptar.

Tendo em conta o cenário descrito, as medidas de remediação dividem-se em dois pontos: medidas de reabilitação das águas e medidas de reabilitação dos solos.

Como medidas de reabilitação das águas da mina de São Domingos destacam-se a utilização de bactérias de modo a reduzir os sulfatos presentes na água (transformando-os em sulfuretos secundários) (Costa & Duarte, 2005 *in* Rosado, 2009), a utilização de barreiras reactivas, o que permite a remoção de grande parte dos elementos contaminantes (formando hidróxidos metálicos secundários) ou resinas de troca de iões. Entre estes três métodos destacam-se a utilização de bactérias e a utilização de barreiras reactivas como os mais aptos para a reabilitação das águas na mina por serem os mais económicos. Podem ser ainda sublinhadas algumas técnicas que localmente poderão ser utilizadas em zonas mais contaminadas, nomeadamente a precipitação, a redução dos elementos metálicos presentes, filtração ou o tratamento electroquímico. Estes métodos não foram considerados como mais importantes nas medidas acima referidas, devido ao elevado volume de água a ser tratada, assim como ao elevado custo associado a algumas destas técnicas.

As técnicas de reabilitação dos solos passam maioritariamente pela aplicação de metodologias de fitoremediação. Assim, de modo a imobilizar a contaminação à área adjacente à mina sugere-se a

aplicação de técnicas de fitoestabilização. A técnica de fitoestabilização, através da utilização de plantas tolerantes específicas com ou sem a aplicação de correctivos do solo, poderia ser uma estratégia promissora para áreas mineiras abandonadas e também em áreas ainda activas. O objectivo da fitoestabilização não é remover os elementos contaminantes de um local mas, sim, estabilizá-los e reduzir o risco para a saúde humana e o ambiente, daí a importância de vegetação adequada. Para a acumulação de contaminantes, sugere-se a utilização de plantas acumuladoras ou hiperacumuladoras, ou seja, plantas que sejam tolerantes a altas concentrações de elementos metálicos, que possuam um sistema radicular abundante, que tenham crescimento rápido, que possuam o potencial para produzir grandes quantidades de biomassa e acumulem elevadas concentrações de metais nas suas partes aéreas.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho desejam manifestar o seu agradecimento pela oportunidade de participar no IX Congresso Nacional de Geologia / 2º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa e de poder partilhar o trabalho desenvolvido. Agradecem também a todos aos colaboradores do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental AmbiTerra que auxiliaram no decorrer deste trabalho.

Sinceros agradecimentos ao professor e co-orientador, Prof. Doutor Marcus Manuel Fernandes, pela colaboração e apoio na realização deste trabalho, principalmente na fase inicial de amostragens, e também pela sua enorme boa vontade demonstrada

Referências

- Larocque, A.C.L., Rasmussen, P.E., 1998. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation. *Environmental Geology*, **33**(2/3), 85-91.
- Rosado, L.C., 2009. *Caracterização biogeoquímica de minas abandonadas, os casos da Mina de São Domingos e da Mina da Mostardeira*. Tese de mestrado, Universidade de Évora (não publicada), 224 p.
- Salomons, W., 1995. Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration*, **52**, 5- 23.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851.