

# Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais

Ariadne Marra de Souza<sup>1,2\*</sup>  
Carla Semiramis Silveira<sup>1,3</sup>  
Ronaldo Mello Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>2</sup>Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Alegre (ES), Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Geoquímica, Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense (UFF) – Niterói (RJ), Brasil.

\*Autor correspondente: ariadne\_marra@oi.com.br

## Resumo

No Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais, localiza-se a primeira jazida de urânio explorada no Brasil, a mina Osamu Utsumi. Os rejeitos sólidos na área da mina são potencialmente uma fonte de contaminação ambiental. Para avaliar a disponibilidade dos elementos químicos das pilhas de rejeito, foram amostradas rochas e água da mina e do córrego da Consulta vizinho à mina (que a drena). O material coletado na pilha de rejeito foi submetido à digestão total para caracterização da sua composição química e ensaio de lixiviação seguido de análise química para avaliar o que poderia ser liberado pelo intemperismo. As amostras foram analisadas quimicamente por absorção atômica (AAS - elementos maiores) e espectrometria de massa (ICP-MS - elementos traços). Ortoclásio, titanita, zircão e pirita foram os minerais encontrados nas amostras estudadas. O ensaio de lixiviação mostrou que os elementos terras raras e Mo, Pb, Th e U são mais facilmente mobilizados, permitindo identificar o potencial de lixiviação e concentração de elementos carregados pelos fluídos e direcionados aos efluentes. O córrego da Consulta tem composição similar às águas internas da mina e, tal como nesses efluentes, mostra altas concentrações de U, maiores do que *background* local. O impacto ambiental ocorre em decorrência da liberação de elementos traços da mina (urânio, arsênio, manganês, bário, céσιο e chumbo) no córrego vizinho em função do alto poder de mobilização do líquido percolante e da disponibilidade desses elementos.

**Palavras-chave:** meio ambiente, contaminação, rejeito mineral.

## Abstract

*The Poços de Caldas Alkaline Complex is host of the first uranium deposit explored in Brazil, the Osamu Utsumi mine. Tailings in mining areas are potential source of environmental contamination. For the evaluation of the chemical elements available in the mining dumping that potentially could contaminate the local drainage, it was sampled rocks and water in the mine and water from the Consulta stream, next to the Osamu Utsumi mine (which drains it). The collected rocks were submitted to a total digestion to identify their chemical compound and leaching procedure followed by chemical analysis to assess what could be released in environment by weathering. Rock and water (mine and stream) samples were chemically analyzed by AAS and ICP-MS. The leaching test has shown that the REE and Mo, Pb, Th and U are more easily mobilized, making it possible to identify the leaching potential and element carried by fluids into the effluents. Water of the Consulta stream has similar composition*

of that in the mine internal water and both show high U concentration, higher than in the local background. The environment impact occurs because of the release of the mine trace elements such as uranium, arsenic, manganese, barium, cesium and lead in the neighboring stream, and it is so due to the higher mobility power from fluid and availability to this elements.

**Keywords:** environment, contamination, mining waste.

## 1. INTRODUÇÃO

A mina Osamu Utsumi, localizada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC), sul de Minas Gerais, é a primeira mina de urânio do Brasil, em atividades desde a década de 1970. Sua construção se iniciou em 1959 a partir de descobertas de jazidas promissoras da rocha caldasito — mistura de zircão (silicato de zircônio) e baddeleyita (óxido de zircônio) (Maciel 2007). A exploração de urânio foi iniciada em 1982, a céu aberto, e alcançou 85 milhões de m<sup>3</sup> nos primeiros 12 anos, sendo aproximadamente metade desse volume relativa à rocha estéril (Fraenkel *et al.* 1984; Fernandes *et al.* 2008). Hoje, a mina conta com um sistema de represas e lagos para tratamento dos efluentes gerados durante a operação e das águas de infiltração das pilhas de rejeitos atuais (Souza 1995; Fernandes *et al.* 2008).

A reserva foi calculada em aproximadamente 17.200 toneladas de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> e sua lavra se desenvolveu em três frentes: mineração, processamento físico e processamento químico. Quando em operação, atingiu uma produção diária de 2.500 toneladas de minério, estando hoje desativada e em processo de descomissionamento.

Na planta da mina, destacam-se as áreas de disposição de rejeitos estéreis — denominados Bota-foras (BF) — além da cava e área de beneficiamento. Existem 8 pilhas de rejeitos (BF), e as denominadas BF-4 e BF-8 (respectivamente 12,4 e 14,8 milhões de m<sup>3</sup>) apresentam maior importância por serem resultado da exploração do minério, enquanto as demais são resultado da decapagem (Fernandes 1997). As pilhas BF-4 e BF-8 foram dispostas no divisor de drenagem das duas bacias hidrográficas principais, rio Verde e rio das Antas, então removidas, especificamente, sobre o vale e leito dos córregos da Consulta e Cercado. Apesar da impermeabilização na base das pilhas, há o risco de contaminação por percolação de fluidos.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O CAPC se localiza no sul do estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil (Figura 1) e nele está localizada a mina Osamu Utsumi que, situada no município de Calda (MG), na porção central do CAPC, com uma área aproximada de 15 km<sup>2</sup>. O CAPC está situado entre a Bacia do Paraná, a oeste, e a Faixa Ribeira, na porção centro-oeste do lineamento magmático Cabo Frio, apresentando, segundo Loureiro & Santos (1988), uma relação genética com o *trend* de falhas profundas do arqueano, mascaradas no Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico) e reativadas durante o Mesozoico.

O CAPC é o maior complexo alcalino do Brasil e uma das maiores ocorrências de magmatismo alcalino registradas

Em função do sistema de deposição em que foram formadas, essas pilhas apresentam grande heterogeneidade, não sendo possível, portanto, caracterizar com eficiência seu sistema de fluxo ou níveis de saturação. O fluido percolante na pilha é drenado para tratamento por adição de BaCl<sub>2</sub> para remover isótopos de Ra em solução. A oxidação de pirita (FeS<sub>2</sub>), mineral abundante nas pilhas de rejeito, é que melhor explica o valor baixo de pH encontrado, caracterizando uma drenagem ácida. Segundo modelagem hidrogeoquímica, o <sup>238</sup>U solúvel presente na drenagem está preferencialmente nas formas UO<sub>2</sub> e UO<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em uma concentração média de 175 Bq/L (Fernandes *et al.* 1998).

Em razão da ausência de legislações rigorosas em relação a atividades mineiras na época de sua implantação, não houve um controle adequado na disposição de rejeitos. A partir da década de 1990, foram produzidos diversos trabalhos de caracterização da contaminação e de riscos associados à mina dos quais se destacam Pinto (1995), Fernandes *et al.* (1996), Fernandes (1997), Fernandes *et al.* (1998), Fernandes & Franklin (2001), Fernandes *et al.* (2008), que indicaram a presença de drenagem ácida e níveis de radioatividade elevados nas represas que recebem efluentes da mina. Por esse motivo, a administração da mina Osamu Utsumi implantou e tem implantado sistemas de controle e monitoramento ambiental, porém ainda existe um passivo que necessita de estudos para um conhecimento mais aprofundado da dinâmica geoquímica de metais na mina. Assim, objetivou-se neste trabalho associar as concentrações de metais disponíveis nas pilhas de rejeito da mina Osamu Utsumi – INB com a concentração de material disponível que poderia ser liberada pelo intemperismo destas à existente nas águas da mina e vizinhas.

no mundo, possuindo aproximadamente 33 km de diâmetro e área total de 800 km<sup>2</sup>. É interpretado como resultante do colapso de uma cratera vulcânica (Grohmann *et al.* 2007) datada do Mesozoico-Cenozoico (Moreira *et al.* 2003), e está encaixado em rochas metamórficas arqueanas (gnaisse, migmatitos e granulitos). Também é onde se encontra a maior anomalia radioativa natural encontrada na crosta terrestre (Morro do Ferro).

Apresenta uma estrutura circular principal formada por diques de tinguaito anelares com relevo acentuado e escarpas íngremes em ambos os lados, e internamente estruturas semicirculares menores. Sua altitude média

é de 1.200 m, 500 m acima das regiões circunvizinhas. Segundo Fraenkel *et al.* (1984), apresenta marcantes indícios de rejuvenescimento na porção SE, associados às principais mineralizações uraníferas. As rochas do CAPC são alcalinas, vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas, predominantemente, tinguaito, foiaito, fonolito e nefelina sienito (Gorsky & Gorsky 1974).

A formação das jazidas do CAPC se deu por atividade hidrotermal seguida de processos de intemperismo profundo e de laterização do solo favorecidos pelas condições climáticas. As jazidas resultantes se encontram em três corpos (A, B, e E) e apresentam volumosos depósitos de elementos terras raras (ETR), bauxita, urânio, molibdênio, zircônio, ferro, manganês, argilas refratárias, entre outros. Essas mineralizações estão associadas a brechas vulcânicas mineralizadas que contêm minerais como zircão, baddeleyta, uraninita, jordisita, pirita, esfalerita, galena e fluorita (Fraenkel *et al.* 1984, Franklin 2007).

As rochas da mina e dos rejeitos da mineração são ricas em pirita, sendo que esta se encontra finamente disseminada nas rochas. A alta concentração de sulfetos permitiu a utilização desse bem para produção de ácido sulfúrico, a fim de suprir as necessidades da própria usina no beneficiamento.

Desde o início das atividades da mina foram mobilizados 92,6 milhões de toneladas de estéréis (Souza 1995), que foram dispostos em pilhas de rejeito formando bancadas pelo sistema de ponta de aterro sem controle de compactação.

O sistema hídrico de CAPC apresenta grande importância, uma vez que as cidades Poços de Caldas, Caldas e Andradas dependem desse recurso por terem seu desenvolvimento calçado no turismo, incluindo-se a utilização de águas termais em direta relação com a gênese do complexo (Cruz & Peixoto 1991). Para a implantação da mina, foram removidos os divisores das bacias hidrográficas do rio Verde e ribeirão das Antas, principais bacias hidrográficas do CAPC (Schorscher 2007).

### 3. MÉTODOS

#### 3.1 Amostragem

Foram amostradas as pilhas de rejeitos BF-4 e BF-8, sendo retiradas 4 amostras de cada uma (Figura 1 e Tabela 1). Para melhor representatividade, foram selecionados blocos de tamanhos e cores variados. Segundo Franklin (2007), as pilhas são constituídas de composição heterogênea, uma vez que parte do minério com teores mais baixos eram também descartados.

A água superficial dentro da mina foi amostrada em três pontos: na represa de controle, na barragem Nestor Figueiredo (BNF) e na cava da mina. Na área externa, foi realizada uma coleta no córrego da Consulta, o qual foi desviado para a instalação do bota-fora 4.

Todas as amostras de água foram coletadas em frascos de poliuretano em duplicatas, a exceção da amostra coleta-

Dentro da mina Osamu Utsumi, o fluxo d'água migra no meio poroso e por canais na bacia de rejeito e nas pilhas de material estéril (Schorscher 2007). Segundo Franklin (2007), a área da mina está sob influência de dois sistemas hídricos principais sem conexão entre si. O primeiro é situado dentro das pilhas de rejeitos e no material de transição (rocha alterada, parte do solo e material estéril utilizado na terraplanagem), comportando-se como aquífero livre, e está sobreposto ao segundo, um aquífero fraturado confinado (maciço rochoso), o que favorece as reações de hidrólise e oxidação típicas de intemperismo.

O pH médio dos canais fluviais na área do complexo é de 6,5 segundo Cruz & Peixoto (1991), enquanto dentro das dependências da mina os valores de pH apresentaram uma média de 3,7 e caracterizam, com a alta concentração de metais, o processo de drenagem ácida (Fernandes & Franklin 2001)

Os principais problemas ambientais enfrentados pela Indústria Nuclear Brasileira (INB) para o descomissionamento adequado da mina são: concentrações elevadas de radionuclídeos e metais nas bacias de rejeito, contaminação de sulfato na água subterrânea e contaminação de F, U e Mn. Além disso, a drenagem ácida gerada na pilha de rejeitos é responsável pela mobilização de diversos elementos (Fernandes 1997). A região já apresenta uma concentração elevada de minerais radioativos, portanto é difícil mensurar se a atividade mineira é a única responsável pela exposição do meio ambiente e ecossistema a essa alta radioatividade. Porém, a geração de drenagem ácida, pela diminuição do pH nos seus efluentes como consequência da oxidação de minerais sulfetados, predominantemente a pirita, é inegável (Ubaldo *et al.* 2006).

A água da mina propriamente dita não tem utilização na usina, mas não está totalmente confinada, de forma que percola pelo solo e atinge o lençol freático, e pode atingir as águas superficiais, principalmente, em época de chuva.

da no ponto P.1 (Figura 1 e Tabela 1). As amostras de água foram coletadas em agosto de 2008, que é o período seco, para contemplar a melhor representatividade da água subterrânea e dos processos geoquímicos resultantes da interação da água infiltrada na pilha de rejeitos, uma vez que na época da chuva poderia haver diluição das concentrações.

A água foi acidificada com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> a 65%) e mantida a baixa temperatura, para conservação e análise de concentração total de metais solúveis tal como previsto pela legislação CONAMA (2005). Essa acidificação teve como objetivo a estabilização dos metais em solução e a solubilização do particulado em suspensão, de maneira que os resultados obtidos indicam a concentração de metais totais disponíveis no sistema.

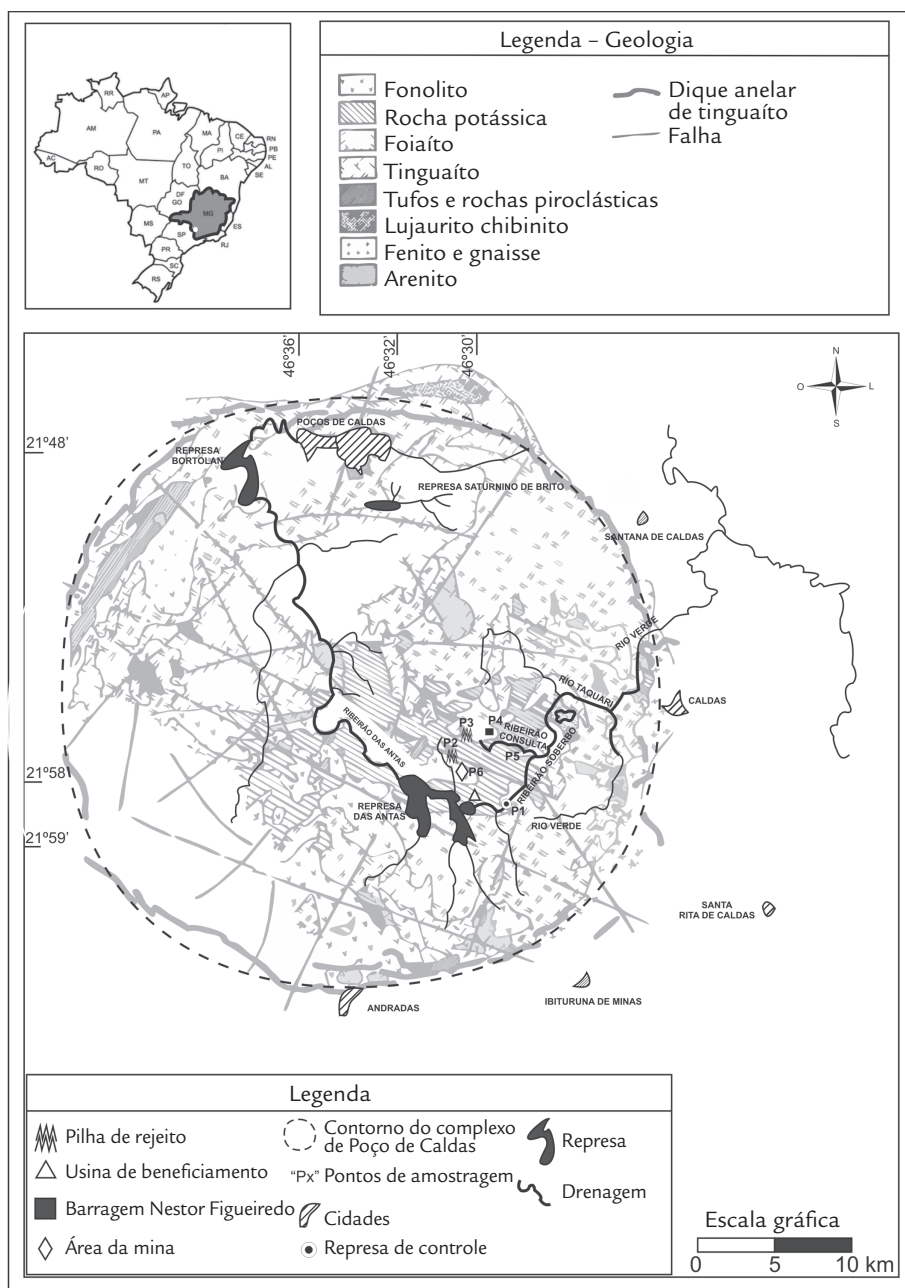


Figura 1  
Localização da mina e esquema simplificado com a distribuição dos pontos de amostragem.

Ponto	Material	Localização	Amostras
P.1	Água	Represa de controle	Amostra 1
P.2	Rocha	Bota-fora-8	B8-1, B8-2, B8-3, B8-4*
P.3	Rocha	Bota-fora-4	B4-1, B4-2, B4-3*, B4-4
P.4	Água	Barragem Nestor Figueiredo	Amostra 2 e Amostra 3
P.5	Água	Córrego da Consulta	Amostra 4, Amostra 5
P.6	Água	Cava da mina	Amostra 7 e Amostra 8

Tabela 1  
Amostras por ponto. As amostras marcadas (\*) são de material fino do rejeito.

### 3.2 Procedimentos

Uma caracterização mineralógica (microscópio petrográfico e de luz refletida) foi efetuada para avaliar as principais fases minerais presentes em cada amostra de rocha (pontos P.2 e P.3). A parte central de cada amostra foi

submetida à digestão total por triácido (ácido nítrico, ácido fluorídrico e ácido bórico). A parte externa das amostras foi submetida a ensaio de lixiviação para caracterizar os metais facilmente solubilizados ou fracamente adsorvidos. O ensaio

de lixiviação foi realizado de acordo com o método U.S. EPA SW6010, que consiste na acidificação da amostra com HCl a 0,1 M aquecido por duas horas à temperatura de 80°C. Ambas as soluções foram encaminhadas para análise química por ICP-MS (Espectrômetro de Massa por Plasma Induzido) e AAS (Espectrômetro de Absorção Atômica) no

### 3.3 Análises químicas

As análises foram realizadas em Perkin Elmer RDC Elan II ICP-MS (Zr, Ba, Ce, Sr, La, Rb, Zn, Pb, Mo, Nd, U, Nb, Y, Th, Ga, Pr, W, Ni, Sm, Co, Sc, Cr, V, Se, Be, Sn, As, Tl, Cs, Pd, Cd, Sb, In, Cu, Ge) e Perkin Elmer Analyst 200 AAS (Si, K, Al, Fe, P, Ti, Na, Ca, Mg e Mn)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização das pilhas de rejeito

Nas análises de lâminas petrográficas, se observou o predomínio de ortoclásio em mais de 50% da lâmina. Os feldspatos, quando parcialmente preservados, apresentaram bordas corroídas, sem orientação preferencial e, usualmente, zonas centrais de sericitização (alteração de feldspato potássico pelo processo de hidrotermalismo). Por vezes, ocorreram associados à titanita e zircão. Também foram observados grãos de pirita, ora disseminados em dimensões inferiores a 0,1 mm, ora formando grãos de mais de 5 mm, com hábito cúbico bem definido. As bordas destes apresentaram princípio de oxidação, com alteração para limonita. Além da pirita, foi identificada uraninita bem formada em dimensões de 0,1 mm, sem indicações de alteração química.

As rochas dos rejeitos são compostas por ordem de abundância  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Zr}$ . A correlação entre os resultados encontrados para a composição química total de amostras de BF-4

laboratório de Geoquímica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Os resultados da composição química dos rejeitos, do ensaio de lixiviação e das amostras de água foram analisados estatisticamente (estatística básica e multivariada) por meio do *software* Statistica8®.

no laboratório de Geoquímica da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Os equipamentos apresentam os seguintes limites de detecção em ppm: 0,1 (Si e P), 0,01 (Ca) e 0,001 (demais elementos).

e BF-8 e as rochas do complexo alcalino mostra que existe grande diferença principalmente para  $\text{FeO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  (Tabela 2).

Em comparação com valores da literatura de rochas da região, as amostras provenientes dos rejeitos apresentam altos teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{Zr}$  (Tabela 2), podendo  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{MnO}$  ser correlacionados ao beneficiamento do minério; segundo Pinto (1995), ao minério eram adicionadas rocha fosfática e pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) para promover a oxidação do  $\text{U}^{4+}$  a  $\text{U}^{6+}$  e retirada do excesso de  $\text{Zr}$ , gerando uma ganga estéril resultante dessa etapa de lixiviação ácida. Esse tipo de reação permite, segundo Bonotto & Oliveira (2006), que o U torne-se prontamente solubilizado. Os altos teores de fósforo também podem estar relacionados à presença de monazita (fosfato de terras raras), xenotímio ( $\text{YPO}_4$ ) e alteração hidrotermal de rochas alcalinas nefeliníticas para rochas potássicas (Schorscher et al. 2007).

Tabela 2  
Dados de composição química das rochas da região e do material dos rejeitos (Souza 1995; Fernandes 1997; Cruz & Peixoto 1991) comparados com os resultados obtidos no presente trabalho.

	Este trabalho (valor médio)		Cruz & Peixoto (1991)	Schorscher et al. (2007)	Figueiredo et al. (1995) apud Souza (1995)	Waber (1991) apud Fernandes (1997)		
	BF-4 (n=4)	BF-8 (n=4)	Fonolito	Biotita lamprofito rico em apatita	BF-4	Corpo A	Corpo B	Corpo E
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22,4	24,8	20,8	11,8	22	21,7	20	23
$\text{FeO}_{\text{tot}}$	12,52	9,26	4,81	19,81	-	2,6	1,88	2,61
$\text{K}_2\text{O}$	12,9	14,33	8,32	3,06	12	-	-	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	12,3	18,2	0,1	1,25	0,1	-	-	-
$\text{CaO}$	1,19	1,19	1,29	7,48	0,1	-	-	-
$\text{SiO}_2$	24,71	32,62	53,06	34,05	54	55	53	55
$\text{TiO}_2$	9,86	10,98	0,35	1,86	0,53	-	-	-
$\text{Na}_2\text{O}$	1,52	1,34	7,18	0,01	-	-	-	-
Zr	1514,79	1069,19	-	831	-	1708	4334	1009
U	121,29	167,9	-	5	-	89	538	279
Th	80,4	77,14	-	34	-	60	96	318
S	6700	3750	-	-	-	8616	18961	5637
Zn	412,46	227,87	-	1408	-	253	570	592

Os baixos teores de sílica são similares aos resultados obtidos por Schorscher *et al.* (2007) para biotita lampróforo rico em apatita, assim como o teor de ferro total, enquanto os teores de  $Al_2O_3$  e CaO se equiparam ao fonolito analisado por Cruz & Peixoto (1991) (Tabela 2).

A análise estatística das 8 amostras dos rejeitos coletadas foi correlacionada ( $p < 0,05$ ), não apresentando diferença

significativa entre as amostras da mesma pilha de rejeito na maior parte dos elementos analisados (Tabela 3). Destaca-se que, principalmente, as amostras de material fino (B8-4 e B4-3) apresentam a melhor correlação, sendo caracterizadas pelas concentrações mais baixas de Si e mais elevadas de Fe e Ti, sugerindo a existência de um processo de laterização (enriquecimento relativo em Al ou Fe).

Amostra	B8-1	B8-2	B8-3	B8-4	B4-1	B4-2	B4-3	B4-4	Média	CV (%)
Si (%)	22,04	15,51	21,81	10,24	14,95	18,50	10,88	7,03	15,12	36
Al (%)	11,49	15,38	10,46	15,20	7,59	10,51	14,75	14,59	12,50	23
K (%)	14,01	15,17	13,54	14,62	11,72	14,92	11,10	13,90	13,62	11
Fe (%)	4,22	8,37	6,80	17,67	6,66	9,20	20,84	13,40	10,89	54
P (%)	11,15	11,30	9,78	11,48	7,84	8,51	7,61	5,52	9,15	23
Ti (%)	3,92	5,98	7,75	8,69	5,25	6,98	6,75	4,70	6,25	26
Na (%)	0,84	1,67	1,48	1,38	1,15	1,40	1,25	2,29	1,43	30
Ca (%)	0,85	1,33	1,89	0,71	0,81	1,60	0,97	1,41	1,20	36
Mg (%)	0,03	0,16	0,19	0,12	0,02	0,11	0,17	0,30	0,14	66
Mn (%)	8,25	9,32	13,50	12,42	34,01	11,82	18,68	11,74	14,97	55
S (%)	1,00	0,17	0,05	0,28	0,16	1,76	0,48	0,28	0,52	111
C (%)	0,05	0,07	0,06	0,11	0,06	0,05	0,08	0,09	0,07	29
As (ppm)	3	3	4	6	4	5	6	1	4	45
Ba (ppm)	319	387	934	660	529	644	759	732	620	33
Be (ppm)	3	9	12	7	8	10	8	7	8	33
Cd (ppm)	3	2	3	2	2	2	2	1	2	20
Ce (ppm)	736	717	493	764	215	538	948	507	615	36
Co (ppm)	43	14	7	4	10	23	4	26	16	84
Cr (ppm)	12	11	9	16	24	14	16	6	13	40
Cs (ppm)	4	4	3	4	3	1	4	5	3	28
Cu (ppm)	2	1	1	2	2	2	2	1	2	32
Ga (ppm)	44	55	80	60	55	80	55	56	61	21
Ge (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
In (ppm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10
La (ppm)	406	425	366	494	155	317	669	257	386	40
Mo (ppm)	63	76	188	335	147	53	414	35	164	86
Nb (ppm)	146	176	33	155	90	79	148	122	119	40
Nd (ppm)	175	155	138	183	55	132	245	79	145	41
Ni (ppm)	13	18	12	13	71	15	15	11	21	98
Pb (ppm)	152	151	194	234	104	352	526	95	226	65
Pd (ppm)	0	0	0	9	7	0	7	0	3	120
Pr (ppm)	66	56	50	66	20	46	87	29	52	41
Rb (ppm)	358	325	319	351	320	497	236	387	349	21
Sb (ppm)	2	1	2	3	2	3	4	1	2	47
Sc (ppm)	14	15	13	13	12	17	11	14	14	14
Se (ppm)	12	10	11	7	7	8	11	9	9	20
Sm (ppm)	19	19	15	24	8	17	33	17	18	46
Sn (ppm)	3	5	2	6	8	18	7	4	7	76
Sr (ppm)	368	254	441	602	330	483	470	386	417	26
Th (ppm)	51	83	50	124	61	26	219	17	79	83
Tl (ppm)	3	3	4	6	3	4	5	2	4	30
U (ppm)	48	195	239	190	115	133	173	64	145	46
V (ppm)	5	10	20	14	18	17	16	3	13	49
W (ppm)	34	31	16	3	21	65	4	22	24	80
Y (ppm)	93	78	56	115	77	111	151	13	87	48
Zn (ppm)	217	149	175	371	283	181	377	808	320	67
Zr (ppm)	1472	683	898	1225	1305	3258	1325	171	1292	70

Tabela 3

Análise química dos rejeitos 4 e 8, média e coeficiente de variação.

De acordo com os resultados, não foi possível individualizar uma composição química característica para cada um dos bota-foras. Entretanto, na análise de *cluster*, foi verificada maior similaridade das amostras de BF-8 entre si, enquanto BF-4 apresenta maior heterogeneidade. Isso reflete a diferença de composição dos corpos minerados descrita por Fernandes & Franklin (2001), sendo a litologia dos corpos A e E composta por fonolitos e tinguaítos os quais foram dispostos no BF-8, o que é melhor evidenciado na Tabela 3 pela análise de elementos traços de Waber (1991) *apud* Fernandes (1997). De forma contrária, o corpo B é mais heterogêneo na sua composição litológica (fonolitos, brechas, cinzas e rochas ultrabásicas que ocorrem como diques), justificando que o BF-4, formado exclusivamente por rochas deste último corpo, apresente maior heterogeneidade.

Os elementos Fe, Mg, Mn, S, Co, Mo, Ni, Mo, Pb, Sn, Th, W, Zn e Zr são os que apresentam maior coeficiente de variação (>50%); a maior e menor concentração dos elementos Zr, Pb, Mo, Th e Ni são observadas nas amostras de BF-4. Contudo, com exceção de Mo, esses elementos se mobilizam em menos de 20%. Assim, as variações encontradas devem estar associadas à composição original da rocha amostrada, destacando-se a fase mineral a qual faz parte (Mg, Sn e W) o processo de alteração favorecido pela mobilidade de cada elemento.

Dentro desse contexto, pode-se citar a alta mobilidade do Ni e Zn, então solubilizados, a alteração da pirita modificando as concentrações de Fe e S, a alteração do ortoclásio que pode conter impurezas de Pb, e o fato de parte do minério ter sido descartada nas pilhas de rejeito, em razão do teor de corte da mina quando em operação, resultando nas altas variações de U, Mn, Mo, Th e Zr, pois algumas amostras podem conter parte do minério.

Os teores de enxofre entre 0,05 e 1,76% (com uma média de 0,5%) indicam uma alta concentração de minerais sulfetados. Entretanto, a baixa correlação (2,28%) entre as

#### 4.1.1 Análises químicas dos ensaios de lixiviação

O ensaio de lixiviação apresentou as concentrações de elementos listados na Tabela 5. Observa-se que Al é o único elemento que apresenta teor muito maior que 2% (17,6%) dentre os elementos maiores, enquanto os elementos traços Ba, Ce, La, Sr, Zn, Zr, Mo, Pb, Nd, Th e U apresentam concentração maior que 10 ppm. Esse resultado representa o material disponível na capa de alteração da rocha e, portanto, seu potencial de incremento ao sistema.

Em comparação com as concentrações nas rochas, observa-se maior solubilização dos elementos Al, Ca, Mn, Mg, P e Si (>10%) e pouca solubilização dos elementos K, Fe, Ti e Na (Tabela 5), como sugerido pela mobilização dos elementos, calculada pela razão entre as médias das concentrações no lixiviado e concentrações no rejeito.

Entre os elementos que apresentam concentrações maiores que 10 ppm no ensaio de lixiviação, apenas os elementos Ce, La, Mo, Pr e Nd se mobilizam em mais de 20%,

concentrações de Fe e S indicam que a pirita não é o sulfeto principal, havendo outras fases acessórias enriquecidas em Fe.

Uma análise multivariada da composição química das amostras mostrou que existem quatro fatores que explicam até 80% da distribuição das concentrações químicas dos elementos químicos (Tabela 4).

O fator 1 relaciona as concentrações de Fe, Ti, Mo, Tl, As, Sb, Cu, Pb, Sr, Ge, Pd, U, Th, Y com as concentrações dos ETR (La, Ce, Pr, Nd e Sm). Provavelmente esse fator explica a presença dos minerais ETR em minerais ferrosos não silicáticos e radioativos. A relação desses elementos está ligada a inclusões em minerais como pirita e sericita (que está associada ao processo de hidrotermalismo mineralizador da jazida do complexo), assim como pode ter contribuições de minerais como monazita e xenotímio em menor proporção.

O fator 4 (14%) condiciona as concentrações dos metais alcalinos (Na, Ca, Mg, Ba, Be e em parte o K, Sr, Rb e U) provavelmente relacionados aos silicatos em oposição às concentrações de Ni, Cr e em parte Mn. K e P são explicados pelo fator 3 em conjunto com Se, In e os demais ETR (Ce, Pr) e são associados a minerais de fosfato de K e de ETR, incluindo xenotímio e monazita mais expressivamente.

Os demais fatores têm importância similar, destacando-se a relação de Zr e de Si (provavelmente explicada pelo zircão) pelo fator 2, sendo que zircão ocorre com alta concentração nas rochas e depósitos minerais da região.

Urânio geralmente está presente na estrutura de minerais levemente solúveis e, no caso da mina Osamu Utsumi, essa solubilidade é ainda maior em decorrência do poder de solubilização da drenagem ácida. Muitos dos compostos de urânio só se precipitam em ambiente redutor, portanto o caráter ácido e oxidante da drenagem mantém o urânio em solução (Krauskopf 1972). A associação de urânio com metais alcalinos tem relação com sua alta mobilidade e, possivelmente, a fases minerais a que está associado, como zircão e titanita, que também contêm inclusões de Ca e Al.

enquanto os elementos Sb, Cd, Tl e Sm têm igual mobilidade, mas apresentam baixas concentrações.

A solubilização de Al é muito acentuada e demonstra que a capa de alteração possui maior concentração desse elemento do que a rocha matriz. Esse comportamento é mais bem observado em amostras de maior granulação original, pois, embora os depósitos de menor granulação tenham uma maior área específica, serão os grãos de maiores dimensões que, individualmente, terão maior superfície em exposição para percolação. Esse comportamento indica alto potencial de bauxitização das rochas do complexo.

O maior índice de solubilização/mobilização observado nas amostras de maior granulação está relacionado à maior superfície exposta para adsorção. Amostra de granulação média apresenta uma forte solubilização de Mg, observação que levanta a hipótese de estar associado à capa de alteração mais enriquecida nesse elemento, e que formaram complexos mais móveis. Esse enriquecimento, sobretudo em Mg, pode

ser justificado pela distribuição espacial das amostras na pilha, coletadas na base das pilhas de rejeito, contudo algumas poderiam estar situadas em um caminho preferencial da percolação dos fluidos, uma vez que o sistema de fluxo não tem um comportamento previsível em razão da alta heterogeneidade de granulação nas pilhas de rejeito.

Al é o elemento maior que mais se solubilizou no ensaio de lixiviação em decorrência de a crosta de alteração já apresentar características do processo supergênico (bauxitização). Quanto aos elementos traços, estes estão sendo mobilizados em uma proporção lixiviado/rocha com média de 0,14.

Variáveis	Fator 1 (31%)	Fator 2 (20%)	Fator 3 (15%)	Fator 4 (14%)
Si	0,190094	0,645146	0,443798	0,165600
Al	-0,402179	-0,668621	0,341123	-0,377532
K	0,352494	0,100536	0,492097	-0,463480
Fe	-0,706986	-0,379260	-0,245186	-0,306662
P	-0,303713	0,229216	0,529870	0,168967
Ti	-0,625672	0,278868	-0,283796	-0,546194
Na	0,377117	-0,568369	-0,254367	-0,651796
Ca	0,371868	0,175544	0,042529	-0,740499
Mg	0,096420	-0,611045	-0,100795	-0,750104
Mn	-0,038195	0,168643	-0,796159	0,533574
S	0,135578	0,656886	0,437288	-0,144500
C	-0,426910	-0,624168	-0,298937	-0,256634
As	-0,872603	0,437705	-0,143294	-0,040655
Ba	-0,251259	-0,026982	-0,515826	-0,648843
Be	-0,055781	0,287072	-0,384459	-0,639368
Cd	-0,385288	0,352887	0,195939	0,208264
Ce	-0,706823	-0,273737	0,608479	-0,140841
Co	0,621731	0,028305	0,643139	0,206287
Cr	-0,305142	0,423882	-0,504986	0,625045
Cs	-0,157323	-0,962964	0,121136	0,027503
Cu	-0,702217	0,506416	-0,111116	0,125391
Ga	0,033280	0,585592	-0,258877	-0,723162
Ge	-0,739249	-0,371845	-0,134799	-0,057187
In	-0,447723	-0,052074	0,605939	0,237305
La	-0,871683	-0,188565	0,406781	-0,139886
Mo	-0,946237	-0,098922	-0,276825	0,030280
Nb	-0,314008	-0,518000	0,432504	0,286082
Nd	-0,838281	-0,043922	0,523850	-0,074999
Ni	0,190071	0,222028	-0,641501	0,672400
Pb	-0,749214	0,270064	0,085177	-0,249978
Pd	-0,683889	-0,043849	-0,532137	0,332196
Pr	-0,819768	-0,069664	0,555737	-0,039816
Rb	0,577345	0,486576	0,148343	-0,404597
Sb	-0,731129	0,600535	0,069712	-0,145930
Sc	0,476784	0,477036	0,426769	-0,455419
Se	-0,101599	-0,153631	0,717229	0,172214
Sm	-0,903863	0,040890	0,392814	-0,019869
Sn	0,040860	0,712181	-0,125259	-0,248755
Sr	-0,568005	0,229564	-0,166042	-0,412240
Th	-0,932819	-0,200574	-0,032643	0,158442
Tl	-0,930056	0,240073	-0,067500	-0,082070
U	-0,555373	0,142193	-0,202174	-0,411433
V	-0,428510	0,644484	-0,487310	-0,106673
W	0,583764	0,608556	0,368740	-0,170404
Y	-0,814796	0,412074	0,182341	0,184437
Zn	0,202424	-0,701269	-0,320239	-0,203646
Zr	-0,085763	0,904510	0,138785	-0,082834

Tabela 4

Valores dos fatores da análise multivariada considerando todas as amostras dos rejeitos (n=8).



Os ETR por outro lado, com Mo, Pb, Th e U, representam os elementos de maior impacto, pois se solubilizam em altas proporções e têm altas concentrações nos rejeitos. Zr, apesar de sua alta concentração, é pouco mobilizado, o que se deve as suas fases minerais (zircão e baddeleyita) serem minerais resistentes e, portanto, estáveis ao ataque promovido pelo ensaio de lixiviação.

Tal como na análise por digestão total das amostras dos rejeitos, as amostras do ensaio de lixiviação apresen-

taram os mesmos padrões, tendo as amostras da pilha BF-8 mostrado um comportamento mais homogêneo do que as do BF-4; contudo, não é possível identificar grupos geoquímicos distintos entre as amostras das duas pilhas. É possível ver por meio da análise de *cluster* (Figura 2) que são dois grupos distintos baseados na granulometria das amostras e coesão de rocha; as rochas têm mais relação entre as de igual granulação, o que pode estar associado ao comportamento e representatividade da capa de alteração.

Elemento Maiores	Ensaio de lixiviação %	Mobilizado %
Si	1,58	30,61
Al	17,64	103,67
K	0,02	0,98
Fe	0,08	0,93
Ti	0,01	1,01
P	1,20	18,43
Ca	0,91	23,72
Na	0,02	3,21
Mn	1,37	11,23
Mg	0,06	26,24
Traços	PPM	%
As	0,98	25,01
Ba	17,15	2,76
Be	0,12	1,48
Cd	0,68	30,49
Ce	147,17	23,94
Co	0,22	1,38
Cr	0,37	2,73
Cs	0,13	3,90
Cu	0,21	13,09
Ga	1,28	2,11
Ge	0,02	5,82
In	0,04	2,02
La	112,0	29,01
Mo	78,07	47,66
Nb	1,39	1,17
Nd	47,45	32,69
Ni	2,44	11,65
Pb	18,92	8,38
Pd	0,36	11,22
Pr	17,15	32,68
Rb	3,12	0,90
Sb	0,78	35,43
Sc	0,07	0,52
Se	0,36	3,80
Sm	5,36	30,06
Sn	0,21	3,19
Sr	16,64	3,99
Th	13,29	16,87
Tl	0,80	20,95
U	17,71	12,25
V	0,25	1,93
W	0,04	0,18
Y	6,88	7,94
Zn	12,70	3,97
Zr	46,94	3,63

Tabela 5

Resultado médio das análises químicas do ensaio de lixiviação e mobilização média dos elementos (concentração no lixiviado/concentração no rejeito).

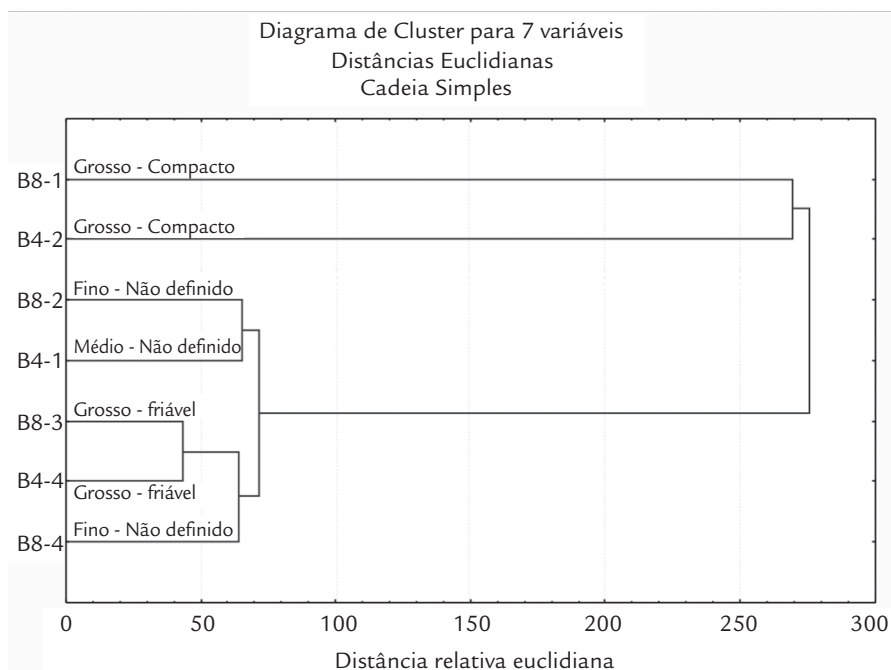


Figura 2  
Análise de *cluster* para ensaio de lixiviação com suas respectivas granulometrias e atributo físico.

O primeiro grupo identificado na análise de *cluster* é representado por rochas maciças de coloração esverdeada com granulação grossa de 5 cm em média, e o segundo se subdivide em outros dois, caracterizando-se como mais heterogêneo, embora tenham maior correlação que o primeiro, sendo constituído por rochas friáveis de granulação média entre 2 e 3 cm e silte cujas demais características não são possíveis de serem identificadas.

#### 4.2 Análise química da água

Entre os elementos maiores, o que apresenta maior concentração é Al seguido de Si, enquanto entre os elementos traços U, Sr e Ba são os que têm maior teor (>40 ppm). Contudo, estes elementos (U, Ba e Sr), assim como Fe, P, Mn, Y, Cs, Cr, La, Nb, Ni e Zn, variam em menos de 30% dentre as 8 amostras.

Em razão da drenagem ácida, existe um alto poder de solubilização nas pilhas de rejeito, liberando outros metais e potencializando o poder de solubilização do fluido e, por consequência, liberando ainda mais metais.

A análise dos elementos traços (Tabela 6) das amostras analisadas de água mostra composição química muito similar da água de drenagem dentro e fora das dependências da mina, com exceção dos elementos U, Ga, Ge, As, Pb e Rb, que na mina são bem maiores. A concentração de Sr é igual nos dois ambientes, e as concentrações muito similares de Zn, Zr, Y, Cs e La sugerem a evidência de uma mesma fonte de contribuição. Entre os elementos traços, os que se destacam com concentrações acima de 10 ppm são: Ba, Be, La, Sr, Y, Co, Ga, Pb, Rb e Cs. A alta concentração de Be pode estar associada ao substrato do rio, mais do que a composição dos

Os elementos Ba, Rb e Sr estão associados ao ortoclásio, sendo este facilmente intemperizado. O e Mn, apesar de mais estáveis que Si e Al, por apresentarem expressivas concentrações no material lixiviado, tendem a ser mais solubilizados que os demais elementos e, portanto, mais suscetíveis ao transporte. Há maior ação das condições de lixiviação sobre elementos como Ce e La (Tabela 5), enquanto Zr e Rb apresentam uma razoável estabilidade química.

rejeito, porque esse elemento apresenta baixa concentração na rocha, no ensaio de lixiviação, e é pouco mobilizado.

Em ambientes ácidos, tal como identificado dentro da mina, os elementos Mo, V, U, Se, Ca, Mg, Sr, Zn, Co, Cu e Ni apresentam alta mobilidade (Bittencourt & Tubbs Filho 2007). Os elementos S, Mo, V, U, Sr e Se também apresentam alta mobilidade em ambientes equivalentes aos rios continentais, justificando as altas concentrações de Sr e U nas amostras estudadas. Contudo, os elementos Ba, Be, Y, La, Cs, Rb, Pb e Ga apresentam concentrações igualmente altas em ambos ambientes apesar de apresentarem baixa mobilidade no ambiente analisado.

Mo, que apresenta alta concentração no material lixiviado e alta mobilidade, se torna imóvel em ambientes redutores, de forma que é possível que as ações implantadas para a contenção da drenagem ácida proveniente da mina estejam atuando de forma eficiente com relação ao equilíbrio do pH. Por outro lado, os ETR e Pb são imóveis em quaisquer dos ambientes analisados, sendo possível que esses elementos tenham sido incorporados nas análises por meio do sedimento em suspensão. As concentrações médias de U (136 ppm)

nas dependências da mina e no córrego da Consulta (94 ppm) evidenciam a contribuição da mina no córrego da Consulta, pois este não é encontrado no *background* local.

As águas do córrego da consulta têm uma média de 5% de Si e de 11% de Al, e as águas dentro das dependências da mina apresentam concentrações médias de 10% de Si e de

14% de Al (Tabela 4), valores incomuns em concentração dissolvida (Krauskopf 1972) quando comparados às médias obtidas por outros autores (Tabela 7). No presente trabalho, a análise possibilitou identificar os teores e concentrações totais disponíveis no sistema, incluindo o material em suspensão, cujos metais foram estabilizados pela acidificação.

ID AM	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AM 7	AM 8
As	11	1	14	3	2	8	8
Ba	43	41	36	34	33	52	42
Be	27	29	23	47	42	46	46
Cd	0	0	2	0	0	2	2
Ce	6	8	8	0	0	5	5
Co	4	4	4	3	27	4	5
Cr	1	1	0	0	0	0	0
Cs	14	19	16	19	19	14	15
Cu	0	0	0	0	0	0	0
Ga	11	23	20	7	7	14	14
Ge	14	15	9	2	2	5	5
In	0	0	0	0	0	0	0
La	26	19	18	24	22	12	13
Mo	0	0	0	0	0	0	0
Nb	0	0	0	0	0	0	0
Nd	1	1	1	0	0	1	1
Ni	1	1	1	1	1	1	1
Pb	28	40	31	8	8	8	8
Pr	1	1	1	0	0	0	0
Rb	32	31	28	10	10	33	32
Sb	0	0	0	0	0	0	0
Sc	0	0	0	0	0	0	0
Se	2	2	2	0	0	1	1
Sm	0	0	0	0	0	0	0
Sn	2	1	1	1	1	1	1
Sr	93	74	55	65	62	47	47
Te	0	1	1	1	1	0	1
Th	0	0	0	0	0	0	0
Tl	2	2	5	1	1	5	5
U	86	173	159	96	91	132	130
V	0	0	0	0	0	0	0
Y	21	24	23	31	28	24	24
Zn	1	2	2	2	2	1	1
Zr	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6

Concentração de elementos traços nas águas da mina e córrego da Consulta (amostras AM-4 e AM-5) (ppm).

Elemento	Concentrações na água				Ensaio de lixiviação	
	Análise - água mina Média (n=6)	Análise - água rio Média (n=2)	Cruz & Peixoto (1991)	Franklin (2007)	Mínimo (%)	Máximo (%)
Si (%)	10,00	5,00	-	-	1,58	9,42
Al (%)	14,00	11,00	-	-	4,15	28,51
K (mg/L)	126,56	40,61	2,84	8,24	0,02	0,47
Fe (mg/L)	21,33	19,38	0,81	1,78	0,02	0,17
Ti (%)	0,01	0,04	-	-	0,09	0,13
P (%)	0,04	0,03	-	-	0,32	5,79
Ca (mg/L)	501,43	42,66	4,19	71,90	0,00	0,91
Na (mg/L)	52,13	7,40	2,47	-	0,01	0,17
Mn (mg/L)	1352,62	1086,10	-	73,20	0,07	2,49
Mg (mg/L)	24,60	4,10	0,74	-	0,00	0,12
Ba (mg/L)	42,50	33,90	-	0,04	0,60	11,70

Tabela 7

Relação do *background* local e águas relacionadas à mina e em ensaio de lixiviação.

A análise estatística multielementar (Tabela 8) demonstra que tanto as amostras dentro quanto fora da mina se correlacionam pelo fator 1, concluindo-se que o processo de acumulação e dispersão dos elementos analisados é o mesmo em ambos ambientes. Também se observa que as amostras coletadas no mesmo ponto (amostras 2 e 3; amostras 4 e 5; amostras 7 e 8)

se correlacionam entre si e são explicadas pelo fator 2. A amostra 1 foi coletada na represa de controle de dentro da mina e é melhor correlacionada às amostras da drenagem externa a mina (amostras 4 e 5). Ambos os fatores indicam fontes similares de acumulação de metais, assim como processos de dispersão, embora não apresentem relação espacial, ou interconexão.

	Fator 1	Fator 2
Amostra 1	-0,931791	-0,290035
Amostra 2	-0,978413	0,121531
Amostra 3	-0,971859	0,193119
Amostra 4	-0,976347	-0,142597
Amostra 5	-0,966351	-0,164136
Amostra 7	-0,980781	0,133387
Amostra 8	-0,983980	0,132802

Tabela 8

Análise multivariada das amostras de água da mina (amostras 1, 2, 3, 7 e 8) e do córrego da Consulta (amostras 4 e 5).

#### 4.2.1 Ensaio de lixiviação e comparação com a composição química das águas analisadas

Comparando os dados de composição química das amostras de água com o resultado do ensaio de lixiviação, observa-se que Ba, Rb, Sr e U (Tabelas 5 e 6) são os únicos elementos que têm maior abundância na água do que no material lixiviado, apesar de U ser o único elemento com alta mobilidade. A disponibilidade de U na água se aproxima das concentrações resultantes da lixiviação das rochas, indicando total solubilização do U. Grande parte dessa solubilização se deve ao pH dos fluídos percolantes na pilha, uma vez que o principal mineral de U (uraninita) não é solúvel em águas naturais (Bonotto & Oliveira 2006).

O Al na água e no ensaio de lixiviação tende a atingir os mesmos valores da rocha original, indicando maior susceptibilidade desse elemento a se solubilizar. A solubilização dos metais tem sido favorecida pela disponibilidade de oxigênio, que é bem acentuada, em razão do alto índice pluviométrico e infiltração na base das pilhas.

Consoante aos resultados do ensaio de lixiviação, também se observa que Ba, La, Ce e Pb estão presentes em alta concentração nas drenagens. Por outro lado, Mo, que é o elemento mais mobilizado (61%), apresenta as menores concentrações nas drenagens, o que pode estar associado, conforme anteriormente descrito, ao controle imposto pela administração.

As concentrações de Al, As, Cd, Fe, P, Pb, Mn, Ni e U e Zn são as que se originam dentro da mina, porque esses são os elementos que mais se mobilizam no ensaio de lixiviação e apresentam maior concentração dentro e fora da mina. Ba, Be e Se não são encontrados no *background* da região, o que reforça a hipótese de influência antrópica. Esses elementos

se acumulam e formam a capa de alteração, a partir de onde são gradativamente liberados no sistema conforme o poder de solubilização do fluído. Segundo Carvalho (1995), elementos como Zn, Sb, Sn, In, Pb e Cd são praticamente insolúveis em condições de pH e Eh registradas nos rios, o que descarta valores herdados de outros canais.

Nos efluentes analisados dentro da área da mina, se observa que os elementos que se destacam por maiores concentrações são: As, Ba, Ce, Ge, Ga, Pb, Rb e U, enquanto no córrego da Consulta as maiores concentrações são de Be, La, Co, Cs e Y. As concentrações de Ba, Si e U são maiores na água do que no material lixiviado, assim deve ser considerada a possibilidade de as concentrações nas drenagens estarem associadas também aos terrenos em que estão encaixadas. Isso leva a enriquecimento nos elementos mais facilmente desprendidos das rochas, assim como ao material em suspensão, cuja origem pode ser tanto das rochas encaixante quanto das drenagens na mina, que foi solubilizado durante a acidificação.

As concentrações dos elementos As, Ba, Pb, Fe e Se no córrego da Consulta excedem os limites estabelecidos pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA para concentrações mínimas de efluentes, e os elementos Co, P, Se e Zn são superiores às águas internas da mina. As concentrações de Ag, Cu, Cr, Sn, Ni, e Zn, tanto dentro quanto fora da mina, estão nos limites de uma classe menos permissiva (Classe 3 da Resolução CONAMA). As altas concentrações de alguns elementos no material lixiviado indicam uma ação efetiva da drenagem ácida, das pilhas de rejeito, na liberação desse elemento ao meio ambiente.

## 5. CONCLUSÕES

O ensaio de lixiviação permitiu identificar o potencial de lixiviação e as concentrações de elementos químicos carregadas nos líquidos percolantes. Alguns apresentam lixiviação maior que 100%, indicando enriquecimento desse material por processos supergênicos e/ou acumulação.

Supõe-se que a heterogeneidade na granulação das rochas nas pilhas de rejeito criou caminhos preferenciais de percolação com grande porosidade e maior abundância de oxigênio, contribuindo para a oxidação dos minerais sulfetados, ocasionando a drenagem ácida. Essa condição aumenta o poder de solubilização dos fluídos e ocasiona a

remobilização dos demais elementos na rocha matriz, como As, Ba, Cd, Fe, Mn e U, além do próprio S.

Diversos elementos traços apresentam potencial de contaminação elevado, com especial destaque a U e As, tanto por sua abundância como pelo seu efeito em diversos organismos. A remobilização dos elementos tem direta correlação com a granulação e coesão das rochas nas pilhas de rejeito sobrepondo grupos composicionais, de maneira que não é possível separar grupos geoquímicos com base na composição.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Dr. Rene Rodrigues (UERJ) e aos técnicos (UERJ) Camila Mitie Li, Maria Rosalva Coelho e Miguel

As análises nas pilhas de rejeitos, suas drenagens e canal vizinho à mina (córrego da Consulta) permitiram observar que há importante impacto ambiental, embora haja uma tentativa de controle por parte da INB. O principal impacto ambiental decorrente dos efluentes das pilhas de rejeitos da mina Osamu Utsumi se deve à liberação de metais, nos quais estão incluídos urânio, arsênio, manganês, bário, cério e chumbo, em concentrações talvez mais preocupantes do que as concentrações de enxofre, amplamente estudado na área pela formação de drenagem ácida.

Arcanjo, bem como aos Drs. Ivan Antunes e Edenil M. Britto, e ao funcionário Helder M. Barreto (Unidade Caldas/INB).

## 7. REFERÊNCIAS

- Bittencourt A.V.L. & Tubbs Filho D. 2007. Hidrogeoquímica e Aplicações em Prospecção Geoquímica. In: Licht O.A.B., Mello C.S.B., Silva C.R. *Prospecção Geoquímica: Depósitos Minerai s Metálicos, Não-Metálicos, Óleo e Gás*. CPRM, Rio de Janeiro, p. 307-332.
- Bonotto D.M. & Oliveira E.G. 2006. Geoquímica do Urânio: Aplicada a Águas Minerai s. Editora UNESP, São Paulo, 154 p.
- Carvalho I.G. 1995. Fundamentos da Geoquímica dos Processos Exógenos. Bureau Gráfica e Editora Ltda., Salvador, 239 p.
- Cruz W.B. & Peixoto C.A.M. 1991. A Evolução Química das Águas Subterrâneas de Poços de Caldas – MG. *Rev. Bras. Geoc.*, 21:23-33.
- Fernandes H.M., Franklin M.R., Veiga L.H.S., Freitas P., Gomiero L.A. 1996. Management of Uranium Mill Tailing: Geochemical Processes and Radiological Risk Assessment. *J. Environ. Radioac.*, 30:69-95.
- Fernandes H.M. 1997. Subsídios ao descomissionamento da primeira indústria de mineração e beneficiamento de urânio no Brasil - O caso do Complexo Miner o Industrial de Poços de Caldas – MG. Tese de Doutorado em Geociências, Universidade Federal Fluminense.
- Fernandes H.M., Franklin M.R., Veiga L.H. 1998. Acid rock drainage and radiological environmental impacts. A study case of the Uranium mining and milling facilities at Poços de Caldas. *Waste Management*, 18:169-181.
- Fernandes H.M. & Franklin M.R. 2001. Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil. *J. Environ. Radioac.*, 54:5-25.
- Fernandes H.M., Franklin M.R., Gomiero L.A. 2008. Critical analysis of the waste management performance of two uranium production units in Brazil - part I: Poços de Caldas production centre. *J. Environ. Manag.*, 87:59-72.
- Fraenkel M.O., Santos R.C., Loureiro F.V.L., Muniz W.S. 1984. jazida de Urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. In: Principai s depósitos minerai s do Brasil. NUCLEBRAS, Rio de Janeiro, 1:89-103, *Anais*.
- Franklin M.R. 2007. Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gorsky V.A. & Gorsky E. 1974. *Contribuição à mineralogia e petrografia do planalto de Poços de Caldas*. Rio de Janeiro, CNEN, Boletim 13.
- Grohmann C.H., Riccomini C., Alves F.M. 2007. SRTM-Based Morphotectonic Analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, Southeastern Brazil. *Computer & Geosciences*, 33:10-19.

- Krauskopf K.B. 1972. Introdução à Geoquímica. Lando M. & Paulo S.C. Bogus (Trad.). Editora USP, São Paulo, 311 p.
- Loureiro F.E.V. & Santos R.C. 1988. The intra-intrusive uranium deposits of Poços de Caldas, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 3:227-240.
- Maciel A.C. 2007. Formação de geólogos no Brasil e sua influência na prospecção, pesquisa e descoberta de jazidas de urânio *In*: Gomes C.B. (org.). *Geologia USP – 50 anos*. Editora USP, São Paulo, 544 p.
- Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acessado em 29 fev 2011.
- Moreira F.R.S., Almeida-Filho R., Câmara G. 2003. Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: evaluation in the Poços de Caldas Plateau. *Rev. Bras. Geoc.*, 33(Suppl):183-190.
- Pinto P.F. 1995. Caracterização dos processos geoquímicos atuantes na mobilização de radionuclídeos e metais na bacia de rejeitos do complexo minero-industrial de Poços de Caldas – MG – Brasil. Dissertação de Mestrado em Geoquímica Ambiental, Universidade Federal Fluminense. 1995.
- Schorscher J.H.D., Alves A.D., Silveira L.P.M. 2007. Rochas alcalinas e mina de urânio de Caldas da INB – Industrias Nucleares do Brasil, complexo alcalino de Poços de Caldas, MG/SP. *In*: XI Congresso Brasileiro de Geoquímica – Atibaia, MG.
- Souza V.P. 1995. Drenagens ácidas do estéril piritoso da mina de urânio de Poços de Caldas: interpretação e implicações ambientais. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Ubaldo M.O., Borma L.S., Barbosa M.C. 2006. Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas. Rio de Janeiro, CETEM, Coleção Artigos Técnicos: Série Gestão e Planejamento Ambiental, 2.