DADOS ISOTÓPICOS DE CHUMBO EM SULFETOS E A EVOLUÇÃO METALOGENÉTICA DOS DEPÓSITOS DE ZINCO E CHUMBO DAS COBERTURAS NEOPROTEROZÓICAS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO

AROLDO MISI¹, SUNDARAM SANKARA S. IYER², COLOMBO CELSO G. TASSINARI³,
WASHINGTON J.S. FRANCA-ROCHA^{1,4}, CARLOS EDUARDO S. COELHO^{1,5},
IONÁ DE ABREU CUNHA¹ & ADRIANA S. ROCHA GOMES^{1,6}

Abstract LEAD ISOTOPIC DATA AND THE METALOGENETIC EVOLUTION OF THE ZINC AND LEAD DEPOSITS OF THE NEOPROTEROZOIC COVERS OF THE SÃO FRANCISCO CRATON Pb isotope analyses have been carried out on sulfides from different Neoproterozoic sedimentary rocks hosting Zn-Pb deposits of the São Francisco Craton, Brazil. The isotope data of 80 sulfide samples from five mineralized areas yield high radiogenic values (mean $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio >21) and show a remarkable homogeneity for some deposits. In the Pb-Pb isotope plot all data points fall above the plumbotectonic model lead isotope growth curve for an upper crustal source. The age values calculated for the source rocks in some areas from secondary isochrons (1.7 to 1.8 Ga), are concordant with the radiometrically dated age values for the highly radioactive basement rocks of the São Francisco Craton. This would imply that the metals for many of the deposits appear to have been derived from the basement rocks themselves. The spread in the isotope data for the sulfides from all deposits can be explained on the basis of: (1) diverse nature and composition of basement rock sources in each deposit, (2) nature of the reactivity (ionic strength, pH, etc.) of the mineralizing solutions and (3) the lengths of time or periods of interaction of the mineralizing fluid with the source rocks. The ore forming episode dated by Pb isotopic method (~0.65 Ga) is probably associated with extensional events that took place during the evolution of the Neoproterozoic basins in the São Francisco Craton.

Keywords: metalogenesis, Zn-Pb deposits, Pb isotopes, Neoproterozoic, São Francisco Craton

Resumo Dados isotópicos de Pb de depósitos de Zn-Pb das coberturas sedimentares neoproterozóicas do Cráton do São Francisco são apresentados e discutidos. Resultados de 80 amostras de sulfetos provenientes de cinco áreas mineralizadas, assim como publicados por diversos pesquisadores, mostraram-se muito radiogênicos (média da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ acima de 21) e com marcante homogeneidade na maioria dos principais depósitos, quando vistos individualmente. Todos os dados situam-se sobre e acima da curva da crosta superior no modelo de evolução da Plumbotectônica. O espalhamento dos dados, quando vistos todos resultados de cada depósito em conjunto, pode ser explicado pela (1) diversidade da natureza e composição das rochas fontes do embasamento em cada depósito (2) variação dos fatores que influem sobre a reatividade das soluções mineralizantes com as rochas fontes (3) variação do período de interação dos fluidos mineralizantes com as rochas fontes. A idade calculada das rochas fontes de alguns depósitos (1,7 a 1,8 Ga), tais como os de Irecê, cuja idade foi obtida a partir de isócronas secundárias relativamente bem alinhadas, é concordante com idades radiométricas de rochas fortemente radioativas do embasamento da bacia. Isto sugere que os metais desses depósitos podem ter derivado dessas rochas. A idade de formação da mineralização nas sequências neoproterozóicas, sugerida pelos dados geológicos e petrográficos (em torno de 0,65 Ma.) é confirmada pelos dados isotópicos, podendo corresponder a eventos extensionais durante a evolução das bacias. Os dados isotópicos de Pb corroboram a possibilidade de ter existido, pelo menos, um evento metalogenético importante que estaria associado a processos extensionais, durante a sedimentação das coberturas neoproterozóicas.

Palavras-chave: metalogênese, depósitos de Pb-Zn, isótopos de Pb, Neoproterozóico, Cráton do São Francisco

INTRODUÇÃO O estudo isotópico de Pb em sulfetos dos depósitos de Pb-Zn das coberturas sedimentares do Cráton do São Francisco é um dos principais alvos de trabalho dos autores, como projeto de pesquisa desenvolvido principalmente entre 1998 e 2002. Neste trabalho são apresentados 80 novos dados de composição isotópica de Pb de cinco depósitos distribuídos na extensa cobertura neoproterozóica de Minas Gerais e da Bahia (Fig. 1). Em conjunto com dados publicados por outros autores sobre análises de sulfetos e de rocha total, são discutidas as implicações da evolução metalogenética no estabelecimento de modelos exploratórios.

OS DEPÓSITOS DE Zn-Pb As principais características dos depósitos estudados constam da Tabela 1. Os depósitos de Pb-Zn estão distribuídos em mais de 300.000 km² e suas reservas e teores constam da Tabela 2. Somente Morro Agudo e Vazante estão presentemente sob exploração pela Companhia Mineira de Metais (CMM), com uma produção de 580.000t/ano (5% Zn e 2% Pb) e 650.000t/ano (11,5% Zn), respectivamente. Os trabalhos mais recentes e mais completos sobre esses depósitos foram realizados por Monteiro *et al.* (1999), Cunha (1999) e Monteiro (2002).

As principais características comuns aos depósitos estudados, a maioria apresentada por Misi *et al.* (2000), compreendem:

- 1 - Grupo de Metalogênese, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia e Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, 123, Federação CEP 40210-340, Salvador, Bahia. misi@ufba.br,
- 2 - Department of Physics and Astronomy, University of Calgary, 2500 University Drive NW, Calgary, Alberta, Canada, T2N 1N4. iyer@ucalgary.ca
- 3 - Centro de Pesquisas Geocronológicas, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, Campus Universitário, CEP 05422-970, São Paulo, SP. cegtassi@usp.br
- 4 - Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Ciências Exatas, Km 03 BR 116 CEP 44031, Feira de Santana, Bahia. wrocha@ufba.br
- 5 - Petrobrás-CENPES, Ilha do Fundão, quadra 7, prédio 20, Cidade Universitária, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ. cescoelho@petrobras.com.br
- 6 - Centro de Educação Técnica Federal da Bahia (CEFET/BA), Rua Emídio dos Santos s/n, Barbalho, Salvador, Bahia

LEGENDA

Fanerozóico	Sedimentos siliciclásticos
Neoproterozóico	Grupo Bambuí, Grupo Vazante e Grupo Una
	Sedimentos carbonáticos não metamorfisados
	Dobrados e levemente metamorfisados
	Faixas de dobramentos (~600 Ma)
Mesoproterozóico	Equivalentes metamórficos do Grupo Bambuí e seqüências mais antigas deformadas
	Supergrupo Espinhaço
Paleoproterozóico/Arqueano	Metassedimentos predominantemente siliciclásticos
	Embasamento
	Gnaiss, granito, migmatito

Figura 1 – Mapa geológico simplificado da região nordeste do Brasil, destacando o Cráton do São Francisco com as bacias proterozóicas. Modificado de Dardenne (1979)

1 - As rochas encaixantes são principalmente dolomitos, com feições de deposição em águas rasas e geralmente associadas com estruturas orgânicas (estromatolitos e carbonatos micríticos negros). Os dolomitos estão intensamente silicificados, ricos em ferro e capeadas por margas e pelitos, localmente piritosos.

2 - A presença de nódulos de quartzo microcristalino tipo *length slow* ou lutcita (Irecê, Corpo N-Morro Agudo, Nova Redenção), de gipsita (Irecê), nódulos de sulfetos (Irecê, Corpo N-Morro Agudo) e de sulfetos pseudomorfos de gipsita (Irecê, Nova Redenção), assim como de estruturas sedimentares *teepees* (Irecê, Morro Agudo, Nova Redenção, Serra do Ramalho), sugere ambiente evaporítico dominante que controlou pelo menos uma fase importante da mineralização (Kyle & Misi 1997, Gomes 1998, Cunha 1999).

3 - Os depósitos têm nítido controle estrutural por fraturas e

falhas N40-50W em Nova Redenção, Irecê e Vale do São Francisco (Itacarambí, Montalvânia e Serra do Ramalho) e falhas normais N10-20W em Morro Agudo e N50E em Vazante. São estruturas profundas que cortam a cobertura sedimentar e o embasamento e que provavelmente tiveram um papel importante para a migração dos fluidos durante o processo mineralizante.

4 - Exceto na mina de Vazante, onde a mineralização primária é essencialmente silicática (willemita), nos demais depósitos a associação mineral principal consiste de sulfetos (pirita, esfalerita e galena). Esfalerita e pirita predominam em Morro Agudo e Irecê, e galena nos demais. Em Vazante, a mineralização é representada principalmente por esfalerita. Prata está presente em todos os depósitos, aparentemente associada com galena.

5 - Os minerais de ganga mais comuns a todos os depósitos estudados são calcita, dolomita, quartzo (megacristais e microcristalino) e barita. Em Serra do Ramalho, Montalvânia e Itacarambí (Vale do São Francisco) fluorita pode ocorrer e é tardia em relação aos sulfetos. Carbonato fluorapatita ocorre no mesmo horizonte mineralizado em sulfetos de Irecê, mas formou em estágio diagenético anterior à deposição dos sulfetos (Misi & Kyle 1994).

6 - Em todos depósitos ocorrem mineralizações discordantes (veios, bolsões) e concordantes a sub-concordantes. Em Morro Agudo foram descritos 4 tipos de depósitos (Romagna & Costa 1988): N (estratiforme, maciço e disseminado), M (veios), JKL (maciço, substituindo matriz de dolarenito oolítico) e GHI (maciço, substituindo brechas).

7 - Estudos de inclusões fluidas primárias em esfalerita (Coelho *et al.* 2002) mostram muitas semelhanças das temperaturas de homogeneização (T_H) e salinidades (% de NaCl equivalente) entre os diversos depósitos estudados. Em Morro Agudo, T_H e salinidade variam em cada tipo de mineralização e de acordo com sua posição em relação à zona de falha (Falha Principal) e T_H varia de 80 a 300°C (moda de 160°C, $n = 347$) e salinidades de 14 a 22% NaCl equivalente (Cunha 1999). Em Vazante, Monteiro (2002) obteve valores de 170 a 232°C (T_H) e salinidades de 15 a 23% a partir de inclusões fluidas em esfalerita. Em Nova Redenção, T_H em esfalerita primária varia de 80 a 210°C (moda de 185°C, $n = 165$) e a salinidade de 10 a 25% NaCl (Gomes 1998). Um número limitado de dados em esfalerita primária de Irecê indicam T_H de 140 a 200°C com 3 a 10% NaCl equivalente. A figura 2 permite comparar os dados desses depósitos com os de mineralizações do tipo Mississippi Valley (MVT), Sedimentar-exalativo (SEDEX) e Irlandês (Irish). Os dados de todos os depósitos estudados coincidem com o campo dos depósitos irlandeses.

O método isotópico de Chumbo em metalogênese e em exploração mineral

O uso da composição isotópica de Pb a partir de depósitos de galena, com objetivos essencialmente metalogenéticos, remonta ao final da década de 1930. Nier (1938) publicou o primeiro de uma série de artigos que relataram variações sistemáticas da composição isotópica de Pb em galena, a partir de fontes diversificadas. O mesmo pesquisador e sua equipe demonstraram, alguns anos após, que os isótopos de Pb de galena proveniente de diferentes depósitos apresentavam variações de composição, atribuídas pelos autores a misturas de Pb radiogênico (proveniente do decaimento de ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th) com Pb primordial, antes da deposição ou formação da galena. Desde então, diversos trabalhos acadêmicos demonstraram a possibilidade de uso de isótopos de Pb para se definir a natureza da rocha fonte nos depósitos de sulfetos e caracterizar a interação fluido-rocha encaixante.

Segundo Faure (1986), os trabalhos de Nier e sua equipe esti-

Tabela 1 - Características dos depósitos de Pb-Zn das coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco (Grupos Bambuí, Vazante e Una).

NOME	FORMAS	MINERAIS MINÉRIO	MINERAIS GANGA	ROCHA ENCAIX.	ESTRUTURA ASSOCIADA	IDADE ENCAIXANTE (Ga)	IDADE MINERALIZ. (Ga)
IRECÊ (Rufina, Morro do Gomes, Melancias)	maciço, dissem. bolsão, estratíf., veio	esf., pir., gal., (Ag)	calcita, dol., qz., barita, gipsita.	Dolarenito silicificado	falhas N40W	0,75-0,65	0,65 (?)
NOVA REDENÇÃO	bolsão, veio	gal., esf., pir., (Ag)	qz., chert, calc., dol., barita	dolarenito silicificado	falhas N40W	0,75-0,65	0,65 (?)
SERRA DO RAMALHO (Campo Alegre, Lagedinho, Mina do Zezinho)	bolsão, veio	gal., esf., pir., (Ag)	calcita, dol., qz., fluorita	dolarenito silicificado	falhas N45W	0,75-0,65	0,65 (?)
VALE DO S. FRANCISCO (Montalvânia, Januária, Itacarambi)	bolsão, veio	gal., esf.	calcita, dol., qz., fluorita	dolarenito silicificado	falhas N45W	0,75-0,65	0,65 (?)
MORRO AGUDO	maciço, dissem. bolsão, estratíf., veio	gal., esf., pir., (Ag)	Calcita, dol., qz.	dolarenito, brecha	falhas N15W	0,75-0,65 (?)	0,65 (?)
VAZANTE	veio, bolsão	Willem., esf., calamina	qz., dol., calcita, hematita	dolarenito, brecha	falhas N50E	0,75-0,65 (?)	0,65 (?)

Tabela 2 – Reservas minerais medidas ou indicadas dos depósitos estudados. Dados fornecidos pelas empresas detentoras de alvarás de pesquisa ou de lavra.

Depósito	Reservas (t)	Teores		
		Pb (%)	Zn (%)	Ag (g/t)
Morro Agudo	11.700.000	2,2	6,4	–
Vazante	8.125.000	–	23	–
Irecê	1.500.000	–	7,9	120
Nova Redenção	2.500.000	6,3	0,5	33

mularam o esforço na construção de modelos quantitativos para traçar a evolução do Pb, a partir dos quais as idades da Terra e dos minerais comuns de Pb podem ser estimadas. Desde então, diversos modelos para calcular idades e/ou determinações de fontes de Pb surgiram, dentre os quais se destacam: 1) o modelo de estágio simples, de Holmes-Hautermans, independente e simultaneamente formulado por ambos cientistas em 1946, onde se assume que a idade da Terra é de $4,55 \times 10^9$ anos, quando teria iniciada a evolução do Pb na crosta; 2) o modelo de estágio duplo, de Stacey & Kramers (1975), no qual a evolução do Pb iniciou a partir de Pb primordial há 4,55 Ga (T) e, em determinado estágio da evolução ($t=3,70$ Ga) a razão U/Pb do reservatório mudou por diferenciação geoquímica, permanecendo constante até o presente; 3) o modelo de Cumming & Richards (1975), que propõe uma evolução contínua, onde as razões U/Pb e Th/Pb aumentaram constantemente no reservatório fonte dos depósitos de sulfetos maciços; 4) o modelo plumbotectônico de Zartman & Doe (1981), que demonstra, matematicamente, a evolução do Pb nos grandes reservatórios terrestres (ambiente orogênico, crosta superior, crosta inferior e manto). Todos esses modelos, e cada um em separado, são aplicáveis, a depender do caso, para definir “idades-modelo” de um determinado reservatório de Pb. Além disso, e principalmente, a teoria da evolução do Pb na Terra e os modelos dela decorrentes, são de grande valor para identificar a natureza da fonte do Pb no reservatório estudado. A primeira e essencial condição para a correta interpretação dos dados isotópicos, é a de que haja um corre-

Figura 2 – Temperaturas de homogeneização e salinidades em inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias de esfaleritas de diversos depósitos e comparação com dados de depósitos clássicos de Zn-Pb. 1 – Mississippi Valley Type, MVT (Goodfellow et al. 1993). 2 – Irlandês (Hitzman 1995). 3 – Sedimentar-exalativo, SEDEX (Goodfellow et al. 1993). Dados de Vazante obtidos por Monteiro (2002).

to e completo conhecimento geológico, estratigráfico e petrográfico do objeto de estudo. Os detalhes sobre o desenvolvimento matemático e a aplicação dos modelos podem ser consultados nos trabalhos referidos e em Gulson (1986).

A aplicação dos isótopos de Pb em exploração mineral vem tendo um desenvolvimento considerável nos últimos 15 anos. Baseia-se, principalmente, na interpretação de pequenas diferenças na abundância relativa dos principais isótopos de Pb nos reservatórios representados pelos depósitos minerais. A sua utilização tem se tornado mais popular na exploração mineral, graças aos seguintes aspectos, dentre outros:

- As assinaturas isotópicas de Pb funcionam como verdadeiras impressões digitais, uma vez que podem ser distintas para cada tipo de mineralização e respectivas rochas encaixantes;

- Ao contrário dos elementos químicos mais leves como enxofre, carbono, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, a composição isotópica do Pb não se modifica por fracionamento isotópico, durante os processos naturais de baixas temperaturas, tais como atividade biológica, intemperismo, evaporação, etc.

Por ser um elemento mais raro, comparado com outros elementos leves, a possibilidade de mistura de Pb a partir de fontes diversas é menor, o que facilita a interpretação das variações isotópicas observadas. Ademais, como se utilizam razões isotópicas de Pb e não a sua quantidade absoluta, mesmo que ocorra perda durante processos geológicos posteriores, não há modificação da composição isotópica original.

O custo de uma análise isotópica é relativamente baixo, sobretudo se considerarmos que requer um número bem menor de amostras, comparativamente a outros métodos. Uma análise isotópica de Pb a partir de uma amostra de galena ou de outro sulfeto custa, em média, US\$ 150 a 200 nos mais conceituados laboratórios. Na maioria dos casos, para obter resultados estatisticamente representativos, não são necessárias mais do que 10 a 15 amostras de cada tipo de minério, respeitado o conhecimento geológico e petrográfico das amostras, indispensáveis para o sucesso dos métodos isotópicos na exploração mineral.

Sucesso tem sido alcançado com o emprego desse método na exploração mineral nos últimos 20 anos. Diversos *case histories* na Austrália e EUA são relatados, por exemplo, por Gulson (1986) e por Young (1995).

Métodos de amostragem e análise Os estudos isotópicos de Pb realizados e em curso nos depósitos de Pb-Zn das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco, visam principalmente (i) permitir a modelagem metalogenética dos mesmos, apoiada pelos contextos geológicos e geotectônicos conhecidos e (ii) sugerir novos parâmetros de exploração mineral na localização de depósitos economicamente exploráveis por empresas de mineração/exploração mineral.

Os trabalhos até agora realizados abrangem os depósitos neoproterozóicos de Irecê, Serra do Ramalho, Nova Redenção e Morro Agudo. Os depósitos de Serra do Ramalho (Campo Alegre e Lagedinho), Montalvânia, Januária, Itacarambi e outras, parte do conjunto de depósitos de Pb-Zn do Vale do Rio São Francisco (Dardenne 1979), foram também estudados por Amaral (1968a e b), Cassedanne & Lassère (1969), Iyer (1984) e Iyer *et al.* (1992). Eles ainda serão objeto de estudos geológicos e petrográficos, para posterior amostragem e análises adicionais. Da mesma forma, os estudos nos depósitos de Morro Agudo e em outros menores a norte de Morro Agudo (Ambrósia e Fagundes) estão sendo detalhados com a realização de análises adicionais e serão objeto de outros trabalhos.

A amostragem tem sido realizada, sempre que possível, em testemunhos de sondagem. Amostras de superfície, quando utilizadas, provêm de trincheiras. Normalmente, amostra-se os diferentes tipos de mineralização de cada depósito a partir de um conhecimento petrográfico prévio. A maioria das amostras utilizadas até agora foi de galena, mas no depósito de Irecê também se amostrou e analisou esfalerita e pirita. A separação dos minerais foi por catação manual, sob lupa binocular.

As análises das amostras de galena de Morro Agudo, Serra do Ramalho e Nova Redenção foram realizadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Os agregados cristalinos de galena foram lavados em água destilada para remover impurezas superficiais, pulve-

rizadas e dissolvidas em solução destilada de HCl 10N. As análises foram realizadas em espectrômetro de massa Micromass VG 354, usando o depósito em filamento simples com sílica gel. A precisão dos dados foi da ordem de $\pm 0,1\%$. Usaram-se padrões NBS 981 e 982 para corrigir o fracionamento isotópico durante as análises. As amostras de galena, esfalerita e pirita de Irecê foram analisadas no Max Planck Institute, Alemanha, sob a supervisão do Dr. Theofilos Toulkeridis. Os procedimentos de purificação das amostras foram semelhantes. As análises foram realizadas em espectrômetro de massa MAT 261 e corrigidas para o fracionamento isotópico, utilizando o padrão SRM982 (fator de correção: $1,0014 \pm 0,00025$ (1s) por unidade de massa). Os procedimentos analíticos adotados na análise das amostras de galena dos depósitos do vale do rio São Francisco, em Minas Gerais, estão detalhados em Iyer (1984) e Iyer *et al.* (1992), que relatam estimativas de precisão de 0,2 a 0,4%.

Resultados Estudos isotópicos de Pb foram realizados em depósitos de sulfetos das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco, por diversos autores. Os trabalhos referem-se principalmente aos depósitos de Morro Agudo, Vazante e do vale do rio São Francisco (MG). Determinações geocronológicas em rocha das coberturas e do embasamento do Cráton do São Francisco foram divulgadas, dentre outros, por Parenti-Couto *et al.* (1981), Marinho (1991), Cordani *et al.* (1992), Silva (1992), Babinski *et al.* (1993), Marinho *et al.* (1993), Santos-Pinto (1996) e Barbosa (1996). Embora novos dados estejam ainda sendo levantados, os resultados até então obtidos nos depósitos estudados (Tabela 3 e Fig. 3), permitem algumas interpretações preliminares, abaixo discutidas.

Um aspecto importante a considerar na interpretação da natureza da fonte dos metais, é a curva de evolução isotópica do chumbo da crosta superior do Cráton do São Francisco, elaborada a partir dos dados de rocha total em vários intervalos de idades, por diversos autores. Esta curva está em construção (Iyer e colaboradores, inédito) e demonstra o caráter mais radiogênico da crosta superior do Cráton do São Francisco, em relação à média dos valores globais encontrada por Zartman & Doe (1981), no modelo da plumbotectônica.

As composições isotópicas de Pb dos depósitos estudados neste trabalho, lançadas nos gráficos de evolução acima, situam-se acima da curva da crosta superior (Fig. 4). Exceto os dados de Morro Agudo, Vazante e, parcialmente, Nova Redenção e de Vale do São Francisco, localizados próximos à curva e com idades aproximadamente concordantes com as das encaixantes, os demais se afastam muito da curva. As idades-modelo calculadas para Morro Agudo/Vazante e Nova Redenção, respectivamente de 650 Ma e 400-600 Ma, são próximas das idades das rochas encaixantes, enquanto que em Irecê e nos depósitos do Vale do São Francisco (incluindo Serra do Ramalho), os valores são muito radiogênicos e fornecem idades futuras, o que implica em admitir uma fonte de Pb com razão U/Pb maior que a razão média considerada a partir do modelo adotado para a crosta continental. Os resultados dos depósitos de Morro Agudo, Vazante, Serra do Ramalho e Nova Redenção apresentam valores com pequenas variações, o que revela uma boa homogeneidade. Chama atenção, em todos os depósitos, a disposição linear dos pontos, com destaque para Irecê, Vazante e Serra do Ramalho, cujos valores de R^2 das retas obtidas a partir dos gráficos $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ / $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ estão acima de 0,98 (Fig. 5). Cada um desses depósitos ou conjunto de mineralizações será discutido e interpretado separadamente.

Irecê Foram medidas as razões isotópicas de Pb de 12 amostras

Tabela 3 – Dados isotópicos de chumbo dos depósitos de sulfetos das coberturas sedimentares neoproterozóicas do Cráton do São Francisco.

Depósito	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Descrição	Depósito	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Descrição
<i>Irecê: Rofino</i>					<i>Serra do Rancho: Lagedinho</i>				
(Misi 1999)					LBX-1	30,726	17,583	49,748	Galena
IL 53-8.89c	26,7109	16,9009	43,4641	Galena, mucilagem, estratoligada	LBX-2	30,972	17,663	50,241	Galena
IL 5312.85c	25,4522	16,7385	42,7684	Galena, mucilagem, c/ barita	LBX-3	30,784	17,574	49,731	Galena
IL 53-8.89a	26,9855	17,0059	43,8302	Pirita, mucilagem, estratoligada	LBX-4	32,761	17,923	53,539	Galena
IL 5312.85a	26,731	16,9285	43,5117	Pirita, em placas, c/ barita	LBX-5	30,228	17,577	49,532	Galena
IL 53 17.70b	26,7343	16,9337	43,5421	Esferulita fina, disseminada	LBX-6	30,583	17,655	50,296	Galena
IL 53 17.70a	26,7813	16,9229	43,5141	Pirita fina, disseminada	LBX-7	31,670	17,675	51,034	Galena
IL 53 17.70c	26,6504	16,9116	43,4511	Galena fina, disseminada	LBX-8	30,218	17,451	49,272	Galena
IL 53 17.50a	24,8715	16,6829	42,1788	Pirita grossa, em placas	<i>Serra do Rancho: Mina do Zezinho</i>				
IL 53 17.50b	24,8917	16,6795	42,1703	Esferulita grossa	MZ-3	18,676	15,776	38,590	Galena
IL 52 15.12a	22,9322	16,4664	41,0707	Pirita em placas, com gipsita	<i>Morro Agudo</i>				
IL 52 15.12c	22,909	16,4425	40,9949	Galena fina, disseminada	(Iyer et al. 1992, Amaral 1968*, Cassedanne & Lassère 1969)				
IL 53 15.87a	26,7451	16,9499	43,5835	Pirita mucilagem	MM 13	17,692	15,569	36,89	Galena
<i>Irecê: Morro do Gomes</i>					MM 14	17,791	15,602	36,98	Galena
(Misi 1999)					MM 15	17,911	15,812	37,67	Galena
MGa	18,4844	15,8385	39,124	Galena grossa, com quartzo e calcita	MM 18	17,78	15,71	37,24	Galena
MGb	18,4703	15,8249	39,0748	Galena grossa, com quartzo	MM 19	17,76	15,71	37,25	Galena
MGc	18,4703	15,8251	39,0751	Galena grossa, com quartzo	MM 20	17,914	15,692	37,15	Galena
<i>Nina Redenção</i>					MM 21	17,794	15,71	37,25	Galena
(Gomes 1998)					MM 22	17,79	15,71	37,24	Galena
NR AM 1	19,304	16,077	39,497	Galena grossa, veios	DP60	17,61	15,59	36,9	Galena
NR AM 8	18,585	15,894	37,966	Galena, disseminada	(Misi 1999)				
NR 14-25.45	19,3	16,064	39,437	Galena, bolsões	MA N 4a	17,787	15,788	37,371	Galena
NR 12-25.5	19,34	16,078	39,55	Galena, grossa, disseminada	MA N 4c	17,846	15,774	37,399	Galena
NR 12-32.5	19,466	16,203	39,92	Galena, cimentando cooides	JK 1*	18,003	15,941	37,86	Galena
NR 12-25.45b	19,667	16,336	40,13	Galena, disseminada, c/ qzo	JK 2*	17,866	15,774	37,401	Galena
NR 12-28.6a	19,499	16,259	40,105	Galena, cimentando cooides	GHI 1b	17,848	15,789	37,43	Galena
NR 25-0.6	19,244	16,016	39,28	Galena, bolsões	(Cunha et al. 2001)				
<i>Vale do São Francisco</i>					MA-IC-24	17,693	15,677	37,144	Galena Corpo N
(Iyer et al. 1992, Amaral 1968*, Cassedanne & Lassère 1969)					MA-IC-25	17,588	15,641	37,065	Galena Corpo N
MM 1	19,72	15,79	38,55	Galena	MA-IC-39	17,620	15,608	36,998	Galena Corpo N
MM 2	20,24	15,94	40,29	Galena	MA-IC-40	17,661	15,642	37,045	Galena Corpo N
MM 3	20,02	15,93	39,85	Galena	MA-IC-11	17,652	15,642	37,065	Galena Corpo N
MM 4	19,83	15,85	39,05	Galena	MA-IC-46	17,628	15,648	37,068	Galena Corpo N
MM 5	18,92	15,83	38,64	Galena	MA-IC-10	17,787	15,735	37,372	Galena Corpo M
MM 6	18,94	15,8	38,48	Galena	MA-IC-34	17,771	15,699	37,271	Galena Corpo M
MM 7	24,87	16,29	46,05	Galena	MA-IC-37	17,824	15,787	37,546	Galena Corpo M
MM 8	36,43	18,21	45,63	Galena	MA-IC-9	17,747	15,677	37,204	Galena Corpo M
MM 9	20,52	15,48	43,93	Galena	MA-IC-47	17,821	15,774	37,515	Galena Corpo M
MM 10	19,95	15,29	37,21	Galena	MA-IC-48	17,839	15,789	37,558	Galena Corpo M
MM 11	18,92	15,75	37,95	Galena	MA-IC-33 A	17,704	15,652	37,123	Galena fina Corpo Jk
MM 12	32,12	17,69	44,93	Galena	MA-IC-33B	17,727	15,655	37,144	Galena grossa Corpo Jk
MM 16	18,91	15,62	37,89	Galena	MA-IC-12	17,755	15,721	37,330	Galena Corpo Jk
MM 17	19,13	15,82	38,54	Galena	MA-IC-41	17,765	15,757	37,473	Galena Corpo Jk
T	19,6	15,85	38,87	Galena	MA-IC-19A	17,707	15,628	37,072	Galena Corpo Jk
I	20,6	16,1	40,9	Galena	MA-IC-19B	17,738	15,670	37,193	Galena Corpo Jk
II	20,3	16,1	40,9	Galena	MA-IC-16	17,762	15,704	37,276	Galena Corpo Jk
I2	20,54	16,36	41,56	Galena	MA-IC-4	17,684	15,608	36,998	Galena Corpo Jk
F	19,06	15,9	38,99	Galena	MA-IC-14	17,724	15,648	37,084	Galena Corpo Jk
DP 61	19,02	15,52	37,63	Galena	MA-IC-45	17,793	15,746	37,402	Galena Corpo GHI
DP 68	19,34	15,78	38,34	Galena	MA-IC-50	17,813	15,763	37,469	Galena Corpo GHI
DP 63	19,95	16	39,53	Galena	MA-IC-51	17,752	15,683	37,196	Galena Corpo GHI
DP 69	19,96	16,1	39,45	Galena	MA-IC-44	17,734	15,657	37,138	Galena Corpo GHI
DP 62	19,86	15,86	38,98	Galena	MA-IC-53	17,681	15,655	37,125	Galena Corpo GHI
DP 74	19,92	15,96	39,21	Galena	<i>Vizante</i>				
<i>Serra do Rancho: Campo Alegre</i>					(Cunha et al. 2001, Misi 1999, Amaral 1968*)				
CA-4	23,442	16,327	41,830	Galena	VZ-IC-F797	17,718	15,667	37,179	Galena
CA-9	23,403	16,366	42,068	Galena	VZ-IC-F1106	17,730	15,669	37,170	Galena
CA-10a	23,347	16,315	41,890	Galena	VZ-IC-F1136	17,759	15,706	37,303	Galena
CA-10b	23,431	16,378	42,049	Galena	VZ 01	17,697	15,652	37,068	Galena
CA-12	23,222	16,314	41,902	Galena	V1	17,68	15,62	37,06	Galena
					V2	17,64	15,56	37,06	Galena
					V3	17,85	15,81	37,39	Galena

Figura 3 – Depósitos e ocorrências de sulfetos de Pb-Zn das coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco, com indicação dos pontos de amostragem para estudos de isótopos de Pb. Prefixo e origem das amostras: IL, MG, FG, AM, MA, NR, N, JK, GHI, CA, LBX, MZ e VZ: este trabalho; MM: Iyer (1984) e Iyer et al. (1992); DP: Cassedanne & Lassère (1969); V, I, T e F: Amaral (1968a). Principais depósitos: 1 – Vazante 2 – Morro Agudo 3 – Januária-Itacarambá 4 – Montalvânia 5 – Serra do Ramalho 6 – Nova Redenção 7 – Irecê 8 – Morro do Gomes 9 – Melancias.

de sulfetos (galena, esfalerita e pirita), dos tipos maciço, estratiforme a subestratiforme e disseminado, provenientes de 2 furos de sondagem do depósito da Fazenda Rufino (prefixo IL), e 3 amostras de galena grossa, em veios de quartzo com calcita, da ocorrência de Morro do Gomes (prefixo MG), interpretada como remobilização tardia da mineralização primária. Os resultados salientam dois grupos distintos (Tabela 3):

1 - No primeiro grupo, os valores da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ variam de 22,9090 a 26,452, com média de 25,6996 ($n=12$). As razões isotópicas $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ médias são, respectivamente, 16,7969 e 42,8399

2 - No segundo grupo, os valores são menos radiogênicos e a razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ é mais uniforme e varia de 18,4703 a 18,4844 (média de 18,4750, $n=3$). As razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ médias são de 15,8295 e 39,0995, respectivamente.

No gráfico $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, os dados do primeiro grupo se alinham segundo uma reta com $R^2 = 0,98$ (Fig. 5a), o que corresponde a uma isócrona com inclinação de 0,127453. No gráfico $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 5b), os dados também são lineares ($R^2 = 0,99$). No diagrama uranogênico, estes valores situam-se acima da curva de evolução isotópica do Pb de Stacey & Kramers (1975) e das curvas do modelo da Plumbotectônica de Zartman & Doe (1981), o que sugere a existência de alto conteúdo de Th e U na rocha fonte, uma vez que não se registrou a presença de minerais radioativos associados aos sulfetos. A distribuição homogênea dos pontos nos dois gráficos sugere ainda a existência de uma fonte de Pb uniforme, com alta razão Th/U, o que poderia sugerir ausência de mistura de fontes.

Tratando-se de sulfetos, principalmente galena, aos quais não foi constatada a ocorrência de minerais de U e Th, a reta obtida

Figura 5 – Gráficos $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, com indicação das linhas de tendência para os diversos depósitos de sulfetos estudados.

não pode ser considerada uma isócrona primária e, portanto, não é adequada para determinar a idade da mineralização, pois o decaimento radioativo do U e do Th cessa a partir da formação do sulfeto. Assim, a isócrona deve traduzir parâmetros relacionados à rocha-fonte do Pb e não da concentração mineral.

Assim, considerando a mineralização com idade próxima da rocha encaixante (~0,65 Ga), como indicam os dados geológicos e petrográficos, e utilizando a inclinação da reta obtida ($R^2 = 0,127453$), pode-se calcular a idade aproximada da rocha fonte pela resolução da equação (1) abaixo, de acordo com o modelo de evolução do Pb em dois estágios evidenciado por diversos autores e desenvolvido por Stacey & Kramers (1975):

$$\frac{(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_T}{(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_T} = \frac{[e^{(\lambda' \cdot T)} - e^{(\lambda' \cdot t)}]}{137,88 [e^{(\lambda' \cdot T)} - e^{(\lambda' \cdot t)}]} = \text{inclinação da reta (1)}$$

onde: T = idade da rocha fonte, t = idade de formação da mineralização, λ' = constante de decaimento do ^{238}U ($0,155125 \times 10^{-9}$), λ' = constante de decaimento do ^{235}U ($0,98485 \times 10^{-9}$).

A idade que se obtém para a rocha fonte é de 1,7 a 1,8 Ga. Este resultado baseia-se em duas premissas, a partir da interpretação dos dados isotópicos e geológicos:

- 1 - haveria uma única rocha fonte e esta seria rica em U e Th.
- 2 - a idade da mineralização seria igual ou próxima à da encaixante.

Essa idade corresponde a um importante evento de magmatismo ácido a intermediário, alcalino a subalcalino, relacionado ao evento Espinhaço. Os representantes plutônicos afloram principalmente no vale do Paramirim, Bahia, onde os granitos do *Complexo Granítico de Lagoa Real* têm valores altos de U e Th e idade radiométrica definida por vários métodos em ca. 1,7 a 1,8 Ga.

Nova Redenção Dados isotópicos de Pb de 8 amostras de galena de Nova Redenção mostram composições radiogênicas, e os dados situam-se acima da curva de evolução da crosta superior (modelos de Zartman & Doe 1981 e Stacey & Kramers 1975). Os valores de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 7 amostras (Tabela 3), mostram boa uniformidade, com variação de 19,244 a 19,667, valor médio de $19,274 \pm 0,04$. A amostra NR-AM-8, de galena muito fina disseminada em dolarenito, apresenta um valor de 18,585, muito abaixo do intervalo de variação das demais amostras. As razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostram comportamento similar com respeito à uniformidade de valores: sete amostras variam, respectivamente, de 16,016 a 16,336 (valor médio de $16,046 \pm 0,04$) e 39,280 a 40,130 (valor médio de $39,388 \pm 0,15$). A amostra NR-AM-8 forneceu valores de 15,584 e 37,966, respectivamente. Os valores μ , calculados para todas as amostras indicam uma variação de 10,96 a 12,65. As idades-modelo calculadas para a mineralização, pelo modelo de estágio duplo de Stacey & Kramers (1975), variam de 400 a 600 Ma. Na faixa de erro admissível, esses valores sugerem uma idade provavelmente relacionada ao final do Neoproterozóico, próxima da idade da rocha encaixante, e compatível com dados geológicos e petrográficos.

As figuras 4b, 5c e 5d mostram a distribuição dos valores obtidos, lançados em gráficos de dispersão clássicos incluindo as curvas de evolução isotópica do Pb do modelo de Zartman & Doe (1981). O *trend* oblíquo definido pelos pontos na figura 5c sugere a presença de fontes heterogêneas de Pb (com relação à razão U/Pb), mas todas com proveniência da crosta continental superior. O caráter radiogênico dos dados pode ser explicado pelo enriquecimento em urânio e tório nas rochas fontes.

Vale do São Francisco Os dados do conjunto de mineralizações do Vale do São Francisco (Tabela 3), quase todas localizadas no

Bloco Brasília, foram produzidos, na sua maior parte, por Iyer (1984) e Iyer *et al.* (1992). Nesses trabalhos, os autores também utilizam alguns dados obtidos por Amaral (1968a e b) e Cassedanne & Lassère (1969), também apresentados na Tabela 3. Eles serão tratados em conjunto, considerando as mesmas razões que justificaram a descrição dessas mineralizações agrupadamente. Os dados sobre os depósitos da Serra do Ramalho, produzidos por Misi *et al.* (2002), embora situados no Bloco Brasília e no mesmo contexto, serão tratados separadamente devido às suas marcantes características e homogeneidade e ao melhor conhecimento do depósito, descrito e amostrado pela equipe do projeto.

Em geral, galenas dos depósitos do Vale do São Francisco apresentam composições isotópicas bastante radiogênicas. A distribuição dos valores nos gráficos de evolução do Pb mostra que todos os pontos, exceto quatro, colocam-se acima das curvas de evolução do Pb na crosta superior (Fig. 4c). Os resultados da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ nas 25 amostras analisadas variam de 18,92 a 36,43. Eles podem ser classificados em três grupos:

Muito radiogênicos: Valores de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ acima de 24,00. Correspondem às ocorrências de galena situadas próximo e a oeste de Belo Horizonte. As amostras MM 7, MM 8 e MM 12 forneceram valores de 24,87, 36,43 e 32,12, respectivamente. (média de 31,14). Os dados de $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ são os mais elevados: 46,05, 45,63 e 44,93, com média de 45,53.

Radiogênicos: Valores de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ próximos e/ou pouco acima de 20,00. Provenientes principalmente de galenas da região de Januária/Itacarambí, incluindo uma ocorrência a sul (amostras I₁, I₂, MM 1 e 2, MM 4, DP 63 e 69), além de três outras menores, a norte e a oeste de Belo Horizonte (amostras MM 9 e 10, DP 62 e 74). O valor médio da razão isotópica é de 20,11 ($n = 12$) e o da razão $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 39,96. As amostras MM 9 e 10 apresentaram composições isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mais radiogênicas. Isto implica na possibilidade de mistura de fluidos na formação da mineralização, a partir de uma contribuição subordinada de Pb de rochas paleoproterozóicas típicas da crosta inferior, normalmente mais ricas em ^{238}U e com alta razão Th/Pb.

Pouco radiogênicos: Valores de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ abaixo ou pouco acima de 19,00. Constitui a faixa de valores da maior parte das ocorrências estudadas, no conjunto dos depósitos do Vale do São Francisco. Incluem-se aí os depósitos de Montalvânia (amostras MM 5 e 6 e MM 3) e outras 4 ocorrências menores (amostras MM 11, 16, 17, DP 61, 68 e F). Os valores médios das razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ são, respectivamente, 19,14 e 38,47 ($n = 9$).

A distribuição dos pontos no gráfico $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostra uma reta com $R^2 = 0,889$ e inclinação = 0,141215 (Fig. 5e). Iyer *et al.* (1992) já salientam o alinhamento dos pontos e a inclinação da reta, mostrando que ela corta a curva de evolução do chumbo no modelo de Cummings & Richard (1975) em dois diferentes pontos, correspondentes às idades-modelo de 650 e 1800 Ma., interpretadas como a idade da mineralização e a da rocha fonte, respectivamente.

Considerando a margem de erro admissível inerente ao método, pode-se concluir que a idade Neoproterozóica atribuída à mineralização e Paleoproterozóica para a rocha fonte por Iyer *et al.* (1992) estão corretas, sendo próximas dos parâmetros obtidos nas mineralizações de Irecê. Isto pode indicar a existência de um importante evento metalogenético no final do Proterozóico. Além disso, para a inclinação da reta obtida e utilizando a equação (1), chega-se a uma idade da rocha fonte em ca. 1,9 Ga. Salienta-se o caráter homogêneo da maioria dos dados individuais de cada depósito nessa região, o que corrobora a proposta de fonte principal

dos metais em cada depósito. Evidencia-se, também, a importância do evento Espinhaço como gerador das possíveis rochas-fonte dos metais.

Serra do Ramalho Os depósitos de Serra do Ramalho geraram valores extremamente radiogênicos e com boa homogeneidade, se considerados os depósitos isoladamente. Em Campo Alegre (amostras com prefixo CA), a média das razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ em galenas foi respectivamente de $23,369 \pm 0,08$ e $41,890 \pm 0,1$ ($n=5$) e em Lagedinho (LBX), são de $30,943 \pm 0,8$ e $50,364 \pm 1,37$ ($n=8$) (Tabela 3 e Fig. 5g e h). Esses valores são compatíveis com fontes com razões U/Pb e Th/Pb elevadas. Em conjunto, esses depósitos, situados muito próximos e participando de um mesmo sistema de falhas, mostram linearidades marcante ($R^2 > 0,99$). Uma única amostra da chamada “mina do Zezinho” (MZ-3) forneceu valores bem menos radiogênicos.

Morro Agudo A maioria das determinações isotópicas de Pb em galena das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco foi realizada nessa região. São pioneiros os trabalhos de Amaral (1968a,b) e de Cassedanne & Lassère (1969). Destacam-se também os de Iyer (1984), Iyer et al. (1992), Freitas Silva & Dardenne (1997) e Dardenne & Freitas Silva (1998), comentados a seguir.

Os trabalhos de Iyer e colaboradores, consistiram na determinação de isótopos de Pb a partir de 8 amostras de galena da região de Morro Agudo/Vazante. Para interpretar os dados, os autores incorporaram outras determinações em galena, realizadas por Amaral (1968a) (3 amostras) e Cassedanne & Lassère (1969) (1 amostra) (Tabela 3). Os cálculos realizados por Iyer et al. (1992) mediante o modelo III de Cumming & Richard (1975) e com base na razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, forneceram uma idade das galenas de 650 ± 50 Ma. Para Iyer et al. (1992), o caráter não radiogênico e uniforme da composição isotópica da galena estudada poderia resultar tanto de uma fonte homogênea, quanto de mistura de fontes, durante a extração do Pb e posterior formação do sulfeto.

Freitas Silva & Dardenne (1997) e Dardenne & Freitas Silva (1998), interpretam os dados isotópicos de 12 amostras de galena da região de Morro Agudo como o resultado de diferentes eventos de remobilização ocorridos na região. A idade calculada pelos

autores para a galena dita “primária” de Morro Agudo, pelo modelo de estágio duplo de Stacey & Kramers (1975), é de 1053 Ma. Para a galena “remobilizada”, os mesmos autores obtiveram idade entre 750 e 650 Ma. Infelizmente, os autores não forneceram os resultados analíticos e a descrição das amostras, apenas os gráficos e as interpretações.

Para realizar o presente trabalho, optou-se por uma amostragem seletiva dos diferentes corpos de minério. Numa primeira fase, em caráter exploratório, foram coletadas cinco amostras de galena dos corpos N (2 amostras), JKL (2) e GHI (1). Numa segunda fase coletou-se um total de 26 amostras de galena dos diversos corpos de minério (Tabela 3). Não se observou variação marcante das razões isotópicas nos diferentes corpos de minério de Morro Agudo, e entre estes e os de Vazante. Os dados da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostram uma notável uniformidade, entre 17,588 a 18,003, com média de $17,563 \pm 0,08$. As razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostram uma uniformidade também marcante, com média de $15,707 \pm 0,07$. A média das razões $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ é de $37,268 \pm 0,2$, a partir das 31 amostras analisadas. Nos gráficos $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figs. 5i e j), evidencia-se o pequeno espalhamento dos pontos e bom alinhamento, num padrão muito similar ao obtido por Iyer et al. (1992). A distribuição dos pontos analíticos no diagrama uranogênico do modelo da Plumbotectônica (Zartman & Doe 1981), define um *trend* oblíquo que corta as diferentes curvas, sugerindo que o Pb incorporado aos sulfetos teria sido proveniente de fontes com razões U/Pb diversas. Estes pontos interceptam a curva de evolução de Pb no modelo de Stacey & Kramers (1975) entre 600 e 625 Ma., período este interpretado como a época de incorporação do Pb na formação dos sulfetos.

Vazante Em Vazante foram analisadas 4 amostras de galena. Os resultados são discutidos em conjunto com 3 análises realizadas por Amaral (1968a) (Fig. 5 e Tabela 3). As razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostram pequena variação, de 17,640 a 17,850, com média de $17,563 \pm 0,09$ ($n=7$). As razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ também são uniformes e de $15,560$ a $15,810$, com média de $15,739 \pm 0,07$ e a média das razões $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ é de $37,176 \pm 0,12$. As figuras 5k e l evidenciam o pequeno espalhamento dos pontos e o bom alinhamento da linha de tendência para a primeira razão acima ($R^2=0,98$).

A comparação dos dados de Irecê, Morro do Gomes e Serra do Ramalho com os do *Complexo Granítico de Lagoa Real* (Fig. 7) mostra uma notável semelhança. Resta demonstrar a possibilidade de existirem intrusões graníticas dessa idade próximas ou sob a cobertura Proterozóica do Cráton do São Francisco, que pudessem atuar como fonte desses depósitos. O evento Espinhaço teve expressão global e certamente afetou outras áreas das massas continentais que hoje formam o Cráton do São Francisco, propiciando a geração de outros corpos graníticos. Os dados geocronológicos disponíveis, assim como os de anomalia Bouguer do Cráton do São Francisco (Ussami 1993, Gomes et al. 1996) confirmam essa possibilidade (Misi et al. 2000).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES Os dados isotópicos de Pb disponíveis para os depósitos estudados, vistos em conjunto, revelam alguns aspectos importantes para o entendimento da evolução metalogenética dos depósitos de Pb-Zn no Cráton do São Francisco. Na figura 8 estão lançados, sobre as curvas da plumbotectônica de Zartman & Doe (1981), os resultados obtidos em todos depósitos. Na figura 9 estão lançadas as faixas de variação da relação isotópica $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de todos os depósitos estudados. Os seguintes aspectos devem ser salientados:

Figura 6 - Variação da composição isotópica dos sulfetos das bacias neoproterozóicas do Cráton do São Francisco com indicação da linha de tendência, incluindo todos os depósitos estudados. A inclinação da reta obtida (0,135841) expressaria a idade aproximada das rochas fontes (1,7 a 1,8 Ga), de acordo com a equação (1).

Figura 7 – Diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ // $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (rocha total) de amostras do granito de Lagoa Real, Vale do Paramirim (triângulos fechados) comparativamente aos dados de galena e outros sulfetos dos depósitos de Serra do Ramalho, Irecê e Morro do Gomes. Dados de Lagoa Real a partir de Iyer et al. (1999). Ver Tabela 3 para demais dados e referências.

Figura 8 – Evolução do chumbo nos depósitos relacionados às coberturas neoproterozóicas, de acordo com o modelo de evolução da Plumbotectônica, de Zartman & Doe (1981). Os valores das amostras MM 8 e MM 12, assim como os de Serra do Ramalho, com razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ muito elevadas, não estão lançados no gráfico, visando melhorar a visualização em relação ao comportamento dos outros depósitos. Indicações sobre as curvas de evolução: UC – crosta superior MN – manto OR – oroquênese LC – crosta inferior.

Figura 9 – Distribuição dos depósitos e ocorrências estudadas, com indicação das faixas de variação da composição de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ obtidas. Principais depósitos: 1 – Vazante 2 – Morro Agudo 3 – Januária-Itacarambí 4 – Montalvânia/Cocos 5 – Serra do Ramalho 6 – Nova Redenção 7 – Irecê 8 – Morro do Gomes 9 – Melancias

1 - todos os depósitos parecem derivar predominantemente de fonte constituída por rochas da crosta continental superior, principalmente do embasamento das bacias sedimentares proterozóicas ou, possivelmente, das próprias coberturas sedimentares. Pelo menos em alguns depósitos, com destaque para Irecê e Serra do Ramalho, as rochas-fonte seriam muito ricas em urânio e tório. A galena dos outros depósitos, incluindo as de Morro Agudo e de Vazante, são menos radiogênicas. Nesses depósitos observa-se um elevado grau de uniformidade de valores da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, quando cada depósito é considerado isoladamente. As figuras 7 e 8 permitem deduzir que deve existir uma forte influência da composição do embasamento, imediatamente sob cada um dos depósitos. O espalhamento dos dados isotópicos, quando vistos em conjunto, pode ser explicado por variações da natureza e composição das rochas-fonte, pela possível diversidade de fatores que influíram a reatividade das soluções e por diferentes períodos de interação dos fluidos mineralizantes com as rochas-fonte.

2 - Alguns autores têm procurado demonstrar a relação direta entre assinaturas isotópicas homogêneas e grandes depósitos. Gulson (1986) chama atenção que somente sistemas hidrotermais de grande porte poderiam conduzir à homogeneização isotópica, em vista do longo tempo de ação desses sistemas desde a solução, o transporte e a deposição. Outros ainda, como Stacey *et al.* (1968) e Loveless (1975), defendem o conceito de que quanto menos radiogênico for o Pb, maior a chance de grandes concentrações. À primeira vista, admitindo como corretas essas correlações, os depósitos da faixa Unaí-Paracatú, onde se localizam as minas de Morro Agudo e de Vazante, seriam os mais propensos a apresentar reservas de grande porte ou de classe mundial. Essas relações, entretanto, devem ser vistas com cautela, mesmo porque existem grandes depósitos com assinaturas radiogênicas e não homogêneas, como demonstra Gulson (1986). A composição do embasamento nos depósitos de derivação crustal (crosta superior), como é o caso dos depósitos estudados deve, provavelmente,

ser o fator determinante principal para as diferentes assinaturas isotópicas observadas.

3 - a natureza radiogênica do embasamento do Cráton do São Francisco na sua parte leste, demonstrada por diversos autores, é destacada pela curva preliminar de evolução do Pb na sua crosta superior (Fig. 4, trabalho em preparação). Ela dá consistência à interpretação das assinaturas isotópicas observadas em Irecê, Nova Redenção e Serra do Ramalho.

4 - as idades aproximadas calculadas para as rochas-fonte dos depósitos das coberturas neoproterozóicas são compatíveis com uma importante fase da evolução geotectônica do Cráton do São Francisco, quando ocorreram eventos geradores de granitos de filiação alcalina (1,7 a 1,9 Ga), ricos em U e Th.

5 - os dados isotópicos de Pb corroboram a possibilidade de ter existido, pelo menos, um evento metalogenético importante que estaria associado a processos extensionais, durante a sedimentação das coberturas neoproterozóicas.

Os resultados discutidos neste trabalho favorecem, portanto, os modelos metalogenéticos que envolvem lixiviação de metais a partir de rochas do embasamento e transporte para as coberturas sedimentares, possivelmente por meio de falhas extensionais.

Agradecimentos À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/PADCT III, Contrato 64.99.0264.00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de diversos convênios. Participaram também do projeto, com apoio financeiro e/ou logístico de campo, a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), a Companhia Mineira de Metais (CMM), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a empresa Geologia e Sondagens Ltda. (GEOSOL). A pesquisa integra o projeto IGCP 450 – *Proterozoic Sediment-Hosted Base Metal Deposits of Western Gondwana*, apoiado pela UNESCO e pela International Union of Geological Sciences (IUGS). Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Amaral G. 1968a. Aplicação do estudo da composição isotópica do chumbo a problemas metalogenéticos: Resultados preliminares para galenas de depósitos do Grupo Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, Belo Horizonte, *Anais*, pp. 131-138.
- Amaral G. 1968b. *Geologia e depósitos de minério da região de Vazante, Estado de Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 103 p.
- Babinski M., Van Schmus W.R., Chemale Jr F., Brito Neves B.B., Rocha A.J.D. 1993. Idade isocrônica Pb-Pb em rochas carbonáticas da Formação Caboclo, Morro do Chapéu, Bahia. In: SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, 2, Salvador, *Anais*, pp. 160-163.
- Barbosa J.S.F. 1996. O embasamento Arqueano e Proterozóico Inferior do Estado da Bahia. In: J.S.F. Barbosa e J.M.L. Domínguez (eds.), *Mapa Geológico do Estado da Bahia, Texto Explicativo*, Convênio SGM-UFBA/CPGG/Curso de PG em Geologia, Salvador, pp. 65-102.
- Cassedanne J. & Lassère M. 1969. Étude géologique et analyse isotopique par la méthode au plomb de quelques galenas du Brésil. BRGM, Bulletin, Serie 2 Section 4, p. 71-87.
- Coelho C.E.S., Misi A., Gomes A.S.R., Cunha I.A., Martins V.S. 2002. Composição e Geotermometria dos Fluidos Mineralizantes: Estudo de Inclusões Fluidas. In: A. Misi & C.E.S. Coelho (eds.), *Os Depósitos de Zinco e Chumbo das Bacias Proterozóicas do Cráton do São Francisco: Estudos Integrados Isotópicos e de Inclusões Fluidas, Correlações e Modelos Metalogenéticos*. FINEP/UFBA, Relatório Final, pp. 71-120.
- Cordani U.G., Iyer S.S., Taylor P.N., Kawashita K., Sato K., McReath I. 1992. Pb-Pb, Rb-Sr, and K-Ar systematics of the Lagoa Real uranium province (South-central Bahia, Brazil) and the Espinhaço cycle (ca. 1.5 – 1.0 Ga). *Jour. South Amer. Earth Sci.*, 5:33-46.
- Cumming G.L. & Richards J.R. 1975. Ore lead isotope relations in a continuous changing earth. *Earth Planet. Sci. Letters*, 28:155-171.
- Cunha I.A. 1999. *Estudos de inclusões fluidas e de isótopos de enxofre dos corpos de minério de Morro Agudo, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 105 p.
- Cunha I.A., Babinski M., Misi A. 2001. Isótopos de Pb em galenas dos depósitos de Pb-Zn da região de Vazante-Paracatú: Dados preliminares. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 41, *Anais*, p. 492.
- Dardenne M.A. 1979. *Les minéralisations de plomb, zinc, fluor du Protérozoïque Supérieur dans le Brésil Central*. These de Doctorat, Univ. de Paris VI, 251 p.
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. John Wiley & Sons, New

York, 589 pp.

- Freitas Silva F.H. & Dardenne M.A. 1997. Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Ouro (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. In: South American Symp. Isotope Geology, 1, Campos do Jordão (SP), *Extended Abstracts*, p. 118-120.
- Gomes A.S.R. 1998. *As mineralizações de sulfetos de Pb-Zn de Nova Redenção, Bacia de Una-Utinga, Bahia*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, 112 pp.
- Gomes R.A.A.D., Gomes P.J.P., Silveira Filho N.C. 1996. O novo mapa Bouguer do Estado da Bahia. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 36, Salvador, *Anais*, p. 423-424.
- Goodfellow W.D., Lydon J.W., Turner R.J.W. 1993. Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulfide deposits. In: R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke (Eds.), *Mineral Deposits Modelling*, Geol. Assoc. of Canada, Special Paper 40, pp. 201-251.
- Gulson B.L. 1986. *Lead Isotopes in Mineral Exploration*. Developments in Economic Geology, 23, Elsevier, NY, 245 p.
- Hitzman M.W. 1995. *Mineralization in the Irish Zn-Pb-(Ba-Ag) Orefield*. In: K.E. Anderson, J. Ashton, G. Earls, M. Hitzman, S. Tear (Eds.), *Irish Carbonate-Hosted Zn-Pb Deposits*, Society of Economic Geology Guidebook Series, Fort Collins, CO (USA), Irish Association of Economic Geology, 21 pp. 25-61.
- Iyer S.S. 1984. A discussion on the lead isotope geochemistry of galenas from the Bambuí Group, Minas Gerais- Brazil. *Mineralium Deposita*, 19:132-137.
- Iyer S.S., Babinski M., Marinho M.M., Barbosa J.S.F., Sato I.M., Salvador V.L. 1999. Lead isotope evidence for recent uranium mobility in geological formations of Brazil: Implications For Radioactive Waste Disposal. *Applied Geochemistry*, 14:197-221.
- Iyer, S.S., Hoefs, J., Krouse, H.R. 1992. Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil—implications for ore genesis. *Econ. Geology*, 87:437-443.
- Kyle J.R. & Misi A. 1997. Origin of Zn-Pb-Ag sulfide deposits within Upper Proterozoic phosphate-rich carbonate strata, Irecê Basin, Bahia, Brazil. *Intern. Geol. Rev.*, 39:383-399.
- Loveless A.J. 1975. Lead isotopes – a guide to major mineral deposits. *Geoexploration*, 13:13-27
- Marinho M.M. 1991. *La séquence volcano-sédimentaire de Contendas-Mirante et la bordure occidentale du bloc Jequié (Cráton do São Francisco, Brésil). Un exemple de transition Archéen-Protérozoïque*. Tese de Doutorado, Univ. Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, França, 388 p.
- Marinho M.M., Barbosa J.S.F., Vidal P. 1993. O embasamento do Cráton do São Francisco no sudeste da Bahia. Revisão geocronológica. In: SBG, Simp. Cráton do São Francisco, 2, Salvador, *Anais*, p. 12-16.
- Misi, A., 1999. *Um modelo de Evolução Metalogenética para os Depósitos de Zinco e Chumbo Hospedados em Sedimentos Proterozóicos de Cobertura do Cráton do São Francisco (Bahia e Minas Gerais)*. Tese de Professor Titular, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 151 p.
- Misi A., & Kyle J.R. 1994. Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil. *Jour. Sed. Research.*, A 64:299-310.
- Misi A., Iyer S.S.S., Coelho C.E.S., Tassinari C.C.G., Franca Rocha W.J.S., Gomes A.S.R., Cunha I.A., Toulkeridis T., Sanches A.L. 2000. A metallogenic evolution model for the Pb-Zn deposits of the Meso and Neoproterozoic sedimentary basins of the São Francisco Cráton, Bahia and Minas Gerais, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, 30:302-305.
- Misi A., Iyer S.S.S., Coelho C.E.S., Tassinari C.C.G., Franca Rocha W.J.S., Cunha I.A., Gomes A.S.R., Oliveira T.F., Conceição Filho V.M. 2002. SIG – Integração de dados: modelo de evolução metalogenética para os depósitos de Zn-Pb das coberturas sedimentares proterozóicas do Cráton do São Francisco. In: A.Misi & C.E.S.Coelho (eds.). *Os depósitos de Zinco e Chumbo das bacias proterozóicas do Cráton do São Francisco: estudos integrados isotópicos e de inclusões fluidas, correlações e modelos metalogenéticos*. FINEP/UFBA, Relatório Final, pp. 167-253.
- Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Spiro B., Graça R., Oliveira T.F. 1999. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on fluid evolution and willemite mineralization. *Exploration and Mining Geology (Special Issue on South American Mineral Deposits)*, 8:21-42.
- Monteiro L.V.S. 2002. *Modelamento Metalogenético dos Depósitos de Zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia Associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 317 p.
- Nier A.O. 1938. Variations in the relative abundances of isotopes of common lead from various sources. *J. Amer. Chem. Soc.*, 60:1571-1576.
- Parenti-Couto J.G., Cordani U.G., Kawashita K., Iyer S.S., Moraes N.M.P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Rev. Bras. Geoc.*, 11:5-16.
- Romagna G. & Costa R.R. 1988. Jazida de zinco e chumbo de Morro Agudo, Paracatú, Minas Gerais. In: C. Schobbenhaus & C.E. Coelho (Eds.), *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. DNP/CMVRD, 3 pp. 111-121.
- Santos-Pinto M.A. 1996. *Le Récyclage de la Croûte Continentale Archéenne. Exemple du Bloc du Gavião, Bahia, Brésil*. Univ. de Rennes, França, *Mémoires des Géosciences*, 75, 193 p.
- Silva M.G. 1992. Evidências isotópicas e geocronológicas de um fenômeno de crescimento crustal Transamazônico no Cráton do São Francisco, Estado da Bahia. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 37, *Anais*, p.181-182.
- Stacey J.S. & Kramers J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26:207-221.
- Stacey J.S., Zartman R.E., Nkomo I.T. 1968. A lead isotope study of galenas and selected feldspars from mining districts in Utah. *Econ. Geol.*, 63:796-814.
- Ussami N. 1993. Estudos geofísicos no Cráton do São Francisco: estágio atual e perspectivas. In: J. M. L. Dominguez & A. Misi (eds), *O Cráton do São Francisco*, SBG BA-SE/SGM/CNPq, Salvador, pp. 35-43.
- Young L.E. 1995. Empirical applications of common lead -isotope ratios to exploration. Society of Economic Geologists, *SEG Newsletter*, 22:7-12.
- Zartman R.E. & Doe B.R. 1981. Plumbotectonics - the model. *Tectonophysics*, 75:135-62.

Manuscrito A-1447

Recebido em 21 de junho de 2003

Revisão dos autores em 20 de março de 2004

Revisão aceita em 30 de março de 2004