GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DO Sr NO DISTRITO FLUORÍTICO DE SANTA CATARINA: IMPLICAÇÕES NA FONTE DOS FLUIDOS MINERALIZANTES DE FLUORITA

ANDRÉA RITTER JELINEK¹, ARTUR CEZAR BASTOS NETO¹, FLÁVIO FRANÇA NUNES DA ROCHA¹ & MAURÍCIO PRADO¹

Abstract In this work, we present the results of Sr analyses of fluorites, barites and disseminated fluorite with the objective to identify the source of the mineralizing fluids of the Santa Catarina Fluorite District. The sampling was divided among south and north parts of the district, Segunda Linha Torrens and Grão-Pará sub-districts, respectively. In the Segunda Linha Torrens sub-district, the constancy of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reasons confirms the model of meteoric fluids involved in 3 successive hydrothermal circuits that drained, all the 3, a same rock source or a same composition of rocks source. It can be admitted that the Tabuleiro granite has been an important source of F, maybe the most important, because it was very rich in F in the form of disseminated fluorite of magmatic origin. However, we can't exclude the contribution of the Pedras Grandes granite, the most abundant, and in which happens also disseminated fluorite (of secondary origin) away in smaller amount. In the Grão-Pará sub-district, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reasons decrease clearly from the earlier fluorite to the late paragenesis and it's easily to establish correlations among the fluorite of the several veins. During the mineralization process, the source and the origin of fluids changes. For the phase 1 of mineralization, it can be conceived a hydrothermalism in which the meteoric fluids drain the host granitic rocks and they leach F. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reasons of the vein fluorite indicate a strong influence of the Pedras Grandes granite that it might have been drained in depth. In the phase 2, the fluid gradually raise to a descending fluid, saline, saturated in halite, originated from the sedimentary covering.

Keywords: fluorite, Sr isotopes, hydrothermalism, Santa Catarina

Resumo Com o objetivo de caracterizar a fonte dos fluidos mineralizantes do Distrito Fluorítico de Santa Catarina foram realizadas análises isotópicas de Sr em fluoritas e baritas filoneanas e em fluorita disseminada na rocha encaixante. A amostragem foi dividida entre parte sul e norte do distrito, sub-distritos Segunda Linha Torrens e Grão-Pará, respectivamente. No sub-distrito Segunda Linha Torrens, a constância das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ confirma o modelo de fluidos unicamente meteóricos envolvidos em 3 circuitos hidrotermais sucessivos que drenaram, todos os 3, uma mesma rocha fonte, ou uma mesma composição de rochas fonte. Pode-se admitir que os corpos Tabuleiro tenham sido uma fonte importante do F, talvez a mais importante, haja visto a sua riqueza em F na forma de fluorita disseminada de origem magmática. Entretanto, não há porque excluir a contribuição do Granito Pedras Grandes, o mais abundante, e no qual também ocorre fluorita disseminada (de origem secundária) embora em menor quantidade. No sub-distrito Grão-Pará, as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ decrescem claramente desde fluorita precoce até as em paragéneses tardia, podendo-se facilmente estabelecer correlações entre a fluorita dos diversos filões. Ao longo do processo de mineralização, ocorreram mudanças de fonte e de origem dos fluidos. Para a fase 1 de mineralização, pode-se conceber um hidrotermalismo no qual os fluidos meteóricos drenam o embasamento granítico e lixiviam o F. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da fluorita filoneana indicam uma forte influência do Granito Pedras Grandes que não aflora nas proximidades do depósito, mas pode ter sido drenado em profundidade. No início da fase 2, após o fluido meteórico drenar o embasamento granítico, gradualmente passa a predominar um fluido descendente, salino, saturado em halita, oriundo da cobertura sedimentar.

Palavras-chave: fluorita, isótopos Sr, hidrotermalismo, Santa Catarina

INTRODUÇÃO A aplicação dos isótopos de Sr em estudos geoquímicos justifica-se pelo fato de a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em minerais com baixos teores de Rb, como é o caso da fluorita, representar a razão do meio de formação do mineral, uma vez que a formação de Sr radiogênico na rede cristalina destes minerais é extremamente reduzida. Sendo assim, quando aplicado em minerais com razões Rb/Sr muito baixas, estudos isotópicos de Sr têm sido utilizados na identificação da fonte e evolução dos fluidos mineralizantes (Babieri *et al.* 1987, Canals & Cardellach 1993, Galindo *et al.* 1994, 1997, Simonetti & Bell 1995, Menuge *et al.* 1997, Huang *et al.* 2003).

No Distrito Fluorítico de Santa Catarina (DFSC), os dados geoquímicos de fluorita (elementos terras raras; microtermometria e isótopos estáveis na água de inclusões fluidas da fluorita) têm indicado uma evolução hidrotermal complexa, tanto na escala de filão, como na escala do distrito, podendo se postular diferenças significativas no comportamento dos sistemas hidrotermais entre os diferentes sub-distritos, incluindo as presenças de fluidos de diferentes origens, e a participação de diferentes rochas fonte. Neste sentido, análises $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vem sendo siste-

maticamente aplicadas nos estudos realizados no DFSC, com o objetivo de aperfeiçoar o modelo genético da mineralização de fluorita e efetuar correlações entre filões e sub-distritos. O presente trabalho integra os dados inéditos de Rocha (1997) e Jelinek (2002) cujas amostragens foram realizadas nos principais filões de fluorita das partes norte e sul do distrito. Adicionalmente, foram amostradas 3 ocorrências de filões de barita (sem fluorita) da parte norte do distrito com o objetivo de investigar suas relações com a mineralização de fluorita.

Os trabalhos anteriores sobre as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em minerais filoneanos e rocha encaixante do DFSC são aqueles de Tassinari & Flores (1992) no filão Fumaça (Fig. 1) e encaixante, na parte sul do distrito e os de Sallet *et al.* (1996 e 2000) sobre o granito Tabuleiro e a fluorita disseminada nesta rocha. Rocha (1997) apresenta dados adicionais da fluorita disseminada no Granito Tabuleiro.

GEOLOGIA DO DISTRITO FLUORÍTICO DE SANTA CATARINA O embasamento do DFSC (Fig. 1) é constituído predominantemente pelo Granito Pedras Grandes (Sallet 1988).

1 - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970. Porto Alegre, RS. andrea.jelinek@ufrgs.br.

As rochas da Bacia do Paraná presentes no distrito pertencem às Formações Rio do Sul e Rio Bonito, ambas do Permiano Inferior, e Serra Geral representada por diques e soleiras de diabásio do Juro-Cretáceo. Os filões de fluorita encaixam-se preferencialmente nos granitos, desaparecendo, por estreitamento, ao penetrarem as rochas sedimentares e soleiras de diabásio.

A mineralização de fluorita é filoneana hidrotermal, sendo controlada por falhas e fraturas N-S a ENE-SSW. A paragênese é composta por fluorita + quartzo + barita ± pirita ± siderita, ocorrendo uma zonação vertical marcada pelo enriquecimento em sílica nas porções inferiores e em barita nas superiores dos filões (Savi 1980). As maiores jazidas têm reservas da ordem de 500.000 t a 1.000.000 t, com teor médio em torno de 50% CaF₂. A maior parte das jazidas, no entanto, tem reserva da ordem de 150.000 t, espessura de até 3 m e são exploradas até profundidade de 150 m.

Na porção sul do DFSC (sub-distritos Segunda Linha Torrens e Ribeirão da Areia, Fig. 1), a fluorita depositou-se ao longo de quatro fases de abertura e preenchimento das estruturas filoneanas. Nas fases 1 e 3 predominam fluorita maciça e brechas tectônicas. Nas fases 2 e 4 predominam texturas bandadas, brechas de colapso e *cocardes* (Bastos Neto 1990). Já na parte norte do DFSC (sub-distrito Grão Pará), a fluorita depositou-se segundo duas fases de abertura/preenchimento (Rocha 1997, Jelinek 2002, Prado 2002). O minério da fase 1 depositou-se durante reativação transtensiva dextral da zona de cisalhamento Rio dos Bugres, já o minério da fase 2 foi depositado durante fase distensiva, na qual a abertura da caixa filoneana foi relacionada a movimentação normal da estrutura. O minério da fase 1 tem textura maciça e bandamento espesso, enquanto o da fase 2 é bandado, comumente com brechas de colapso e *cocardes*. Pelas datações disponíveis (Jelinek *et al.* 1999 e 2003a) as fases de mineralização da parte norte são mais jovens do que as do sul.

Onde a fluorita maciça e/ou bandada não preencheu totalmente a caixa filoneana, restaram espaços residuais lenticulares (*vugs*) que podem ser interligados. Este sistema pode chegar até as raízes do filão, assim como até muito próximo à superfície ou à cobertura sedimentar. Os *vugs* podem ser parcialmente ou totalmente preenchidos por uma paragênese tardia, composta por cristais cúbicos de fluorita, lamelas de barita, quartzo piramidal, pirita euédrica, illita/esmectita e, por fim, argila vermelha rica em óxidos de ferro e manganês, de origem atribuída a processos intempéricos.

Os modelos genéticos para o DFSC dividem-se em duas linhas. A primeira relaciona a mineralização ao magmatismo alcalino de Anitápolis (Morgental 1984) ou ao de Lages (Horbach & Marimon 1980), cujas idades são de, respectivamente, 129 Ma (Amaral *et al.* 1967) e 70 Ma (Scheibe 1986). A segunda, conforme proposta por Savi & Dardenne (1980) considera que o flúor foi lixiviado dos granitos pela circulação convectiva de águas meteóricas gerada por anomalia térmica associada ao rifteamento do Atlântico Sul, assim como de conglomerados da Bacia do Paraná, por soluções cognatas que migraram para o domo formado na borda da bacia durante esse rifteamento. Este modelo foi baseado nos distritos fluoríticos filoneanos e/ou estratiformes em borda de bacia sedimentar (Touray & Ziserman 1980, Valette 1983, Lhegu *et al.* 1988), nos quais a gênese da mineralização foi atribuída a soluções conatas salinas que, carregadas em flúor a partir de sedimentos ou da devitrificação de rochas vulcânicas, migraram para a borda da bacia onde a mistura com soluções meteóricas causou a deposição da fluorita. No DFSC, entretanto, a ausência de salinidade nas inclusões fluidas em fluorita (Dardenne & Savi 1984, Sallet 1988, Bastos Neto *et al.* 1992) e os dados de isótopos de hidrogênio da água das inclusões fluidas (Bastos Neto *et al.* 1996) indicaram uma origem meteórica para as soluções mineralizantes. Essas solu-

ções teriam infiltrado no embasamento em profundidade, onde lixivaram a fluorita dos granitos (Sallet 1988, Sallet *et al.* 1996) e, em sua ascensão, redepositaram-na nas estruturas filoneanas, como efeito da queda de temperatura (Dardenne & Savi 1984) associada a trocas iônicas com a encaixante (Bastos Neto *et al.* 1997). Soluções mais salinas foram identificadas apenas nos estágios finais (Jelinek *et al.* 2003b).

As ocorrências de barita estudadas situam-se no prolongamento sul da falha que controla a jazida Rio Bravo Alto. Estão associadas a cristas topográficas de orientação geral N-S, ao longo das quais encontram-se blocos de quartzo micro-cristalino (com aspecto de calcedônia e localmente conhecido como “pedra-osso”) que originalmente cimentava brechas de falha. A barita ocorre como cristais ortorrômbicos milimétricos bem formados ou como constituinte da matriz.

MÉTODOS Uma das questões em aberto na geologia do DFSC é a correlação entre as fases de abertura/preenchimento das partes norte e sul do distrito. Neste sentido, procurou-se efetuar uma amostragem de modo que abrangesse todas as fases de deposição de fluorita das partes norte e sul do DFSC, e também a paragênese tardia. Na parte norte, no sub-distrito Grão-Pará (Fig. 1), a maior parte das amostras de fluorita provém da jazida Nova Fátima, a principal em atividade nesta parte do DFSC. Foram analisadas, também, algumas ocorrências de barita e calcita na parte norte do distrito. As amostras da parte sul (Fig. 1) provêm dos filões Cocal, Mina 2 e Fumaça, no sub-distrito Segunda Linha Torrens, e do filão São Pedro, no sub-distrito Ribeirão da Areia.

Algumas análises isotópicas foram realizadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas da USP – São Paulo, em espectrômetro de massa modelo VARIAN-MAT TH-5 e, outras, no Laboratório de Geologia Isotópica do IG/UFRGS – Porto Alegre, em espectrômetro VG SECTOR 54. Este último opera com sistema multicoletor e módulo dinâmico de análise, no qual a intensidade do sinal para a massa 88 foi de 1V ou 10⁻¹¹ Å. Os teores de Sr foram determinados pelo ACTLAB – Canadá.

RESULTADOS Na Tabela 1 constam as razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de fluorita (e calcita) das jazidas filoneanas e de barita de ocorrências do norte do DFSC. As amostras da jazida Nova Fátima apresentam teores de Sr no intervalo de 137,02 a 372,56 ppm e teores de Rb abaixo de 3,37 ppm, com média de 0,50 ppm. Com exceção da amostra NF04, as maiores razões ocorrem na fluorita da fase 1 (0,7373 < ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr < 0,7556) com média de 0,7499. As razões da fluorita da fase 2 para esta mesma jazida situam-se entre 0,7233 e 0,7376, com média de 0,7291.

As razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr da fluorita das demais jazidas do norte do DFSC acompanham os valores encontrados na jazida Nova Fátima para cada uma das fases de mineralização. Já a razão obtida na jazida Rio dos Índios, tentativamente interpretada por Rocha (1997) como de uma terceira fase de mineralização, por ser a menor de todas as obtidas em fluorita, enquadra-se, no entanto, perfeitamente dentro do intervalo de razões da fase 2. A razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr da calcita da paragênese tardia na jazida Rio dos Bugres é muito baixa. As ocorrências de barita da parte norte também apresentam valores baixos, na mesma ordem de grandeza da calcita tardia, em torno de 0,72.

A tabela 2 apresenta os dados das análises de fluorita do sul do distrito. Com exceção da amostra 28, proveniente do filão São Pedro, todas as demais foram coletadas no sub-distrito Segunda Linha Torrens. A fluorita mais precoce analisada (fase 1) apresenta razões de 0,73483 e 0,73048. Desta fase para a seguinte, constata-se um aumento abrupto na razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr atingindo valores de 0,75183 e 0,75810. Nas fases 3 e 4, os valores são praticamente idênticos considerando-se o erro (entre 0,72629 e 0,73725).

Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Sudeste do estado de Santa Catarina, com a localização dos sub-distritos. Modificado de Silva et al (2000).

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Correlações entre os filões e sub-distritos No conjunto de resultados do sub-distrito Grão-Pará, destaca-se a diminuição geral das razões ao longo do processo de mineralização e que as ocorrências de barita de Gerônimo Eller, Rio Sete e Rio Areia, apesar de bastante distantes dos filões de fluorita, enquadram-se perfeitamente como o estágio mais tardio da mineralização (vide calcita da Mina Rio dos Bugres). Com relação às amostras do filão Rio Bravo Alto, se as inserirmos no mesmo contexto da mineralização do sub-distrito Grão-Pará, elas pertenceriam à fase 2 de mineralização. Conseqüentemente, devido a sua posição mais a leste, teriam sido depositadas em profundidade mais rasa, o que vem de encontro à interpretação das anomalias positivas de Eu observadas nesta jazida (Bastos Neto 1990).

Na parte sul do DFSC, mais especificamente no sub-distrito Segunda Linha Torrens, os dados de Tassinari & Flores (1992) no filão Fumaça são consistentes com os aqui obtidos (Tab. 2). A fluorita verde da borda do filão Fumaça tem razões entre 0,7381 e 0,7482; a amarela do centro do filão têm valores entre 0,7292 e 0,7317. O granito alterado, encaixante deste filão, apresenta uma razão inicial de 0,7215 e este valor foi interpretado como razão

de Sr da solução hidrotermal. Segundo os autores, as diferenças entre as composições isotópicas na fluorita poderiam ser devidas ao fato da fluorita da borda ter assimilado uma quantidade maior de ^{87}Sr da rocha encaixante ou existirem duas gerações distintas de fluorita. Em função dos estudos detalhados de ETR e inclusões fluidas (Bastos Neto 1990) e das idades obtidas para os eventos hidrotermais (Jelinek 1997, Jelinek et al. 1999) trata-se provavelmente de duas fases distintas, com uma defasagem de tempo considerável. A fluorita da borda seria das fases 1 ou 2 e a fluorita do centro seria da fase 4.

No conjunto dos resultados do sub-distrito Segunda Linha Torrens (Tab. 2), as razões são aproximadamente constantes, com exceção das amostras da fase 2 (razões mais altas). Observa-se, portanto, que os resultados anômalos enquadram-se numa fase distensiva (fase 2) em que ocorreu abertura generalizada de fraturas, o que poderia permitir o acesso de fluidos anteriormente não envolvidos no sistema hidrotermal. O filão São Pedro, dentro da população de amostras da fase 2, destaca-se por apresentar uma razão baixa. Trata-se de um depósito situado na borda do graben de Urussanga e que é parcialmente encaixado em rochas sedimentares, o que explicaria sua composição

Tabela 1 - Resultados das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de fluorita e calcita das jazidas e ocorrências de barita do norte do DFSC.

Amostra	Mineral	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm \sigma$	Fase de mineralização	Jazida
NF03	fluorita	184,1433	0,75556	0,038	1	Nova Fátima
NF04	fluorita	368,0039	0,73728	0,009	1	Nova Fátima
NF07	fluorita	142,0346	0,75475	0,062	1	Nova Fátima
NF09	fluorita	173,4859	0,74245	0,000	1	Nova Fátima
NF06	fluorita	249,3863	0,73342	0,062	2	Nova Fátima
NF16	fluorita	137,0178	0,72332	0,000	2	Nova Fátima
NF10	fluorita	270,6334	0,72429	0,000	2	Nova Fátima
NF12	fluorita	174,9705	0,73056	0,000	2	Nova Fátima
NF02	fluorita	235,3010	0,72845	0,033	2	Nova Fátima
NF13	fluorita	372,557	0,72604	0,000	2	Nova Fátima
NF-veio	fluorita	165	0,75451	0,003	1	Nova Fátima
NF-1-1	fluorita	---	0,75480	0,045	1	Nova Fátima
NF-1-4	fluorita	---	0,73763	0,007	2	Nova Fátima
RB-N1-60-1A	fluorita	155	0,75484	0,003	1	Rio dos Bugres
RB-S3-152	fluorita	---	0,74182	0,002	2	Rio dos Bugres
RB-cc	calcita	---	0,72378	0,003	tardia	Rio dos Bugres
RC-1C	fluorita	111	0,75800	alto Rb	1	Rio do Chapéu
RC-1B	fluorita	90	0,75053	0,004	1	Rio do Chapéu
RI	fluorita	---	0,73260	0,004	2	Rio dos Índios
RBA-22	fluorita	---	0,72742	0,005	2	Rio Bravo Alto
RBA-23	fluorita	---	0,72836	0,005	2	Rio Bravo Alto
GE-1B	barita	328	0,72010	0,012	tardia	Gerônimo Eller
RA-1B	barita	984	0,72237	0,004	tardia	Rio Areia
RS-1D	barita	2354	0,72460	alto Rb	tardia	Rio Sete

Tabela 2 - Resultados das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da fluorita do sul do DFSC.

Amostra	Filão	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm \sigma$	Fase de mineralização
1	Cocal	0,73483	0,007	1
2B	Cocal	0,73048	0,010	1
5A	Cocal	0,75183	0,020	2
6	Cocal	0,75810	0,007	2
28	São Pedro	0,72869	0,020	2
VRD-MAC	Mina 2	0,73725	0,007	3
9	Cocal	0,73028	0,010	3
4	Cocal	0,72964	0,010	3
10	Cocal	0,72754	0,020	4
20	Fumaça	0,72884	0,020	4
3	Cocal	0,72844	0,010	4
8	Cocal	0,73050	0,004	4
33	Mina 2	0,72629	0,003	4

isotópica distinta dos demais filões.

Os resultados das partes norte e sul do DFSC são comparados nas figuras 2 e 3. Na figura 2, visualiza-se bem a diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ à medida que evolui a mineralização na parte norte. Isto deve representar uma variação na fonte à medida que evolui o processo de mineralização. O intervalo de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da parte sul superpõe-se ao intervalo de razões da parte norte, havendo, entretanto, grande concentração de razões baixas na parte sul.

Quando comparamos estes dados isotópicos com aqueles da geoquímica de elementos terras-raras (Jelinek 2002), no caso o diagrama La/Sm vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Fig. 3), observa-se comportamentos muito distintos para as partes norte e sul do distrito. Na parte sul, a ampla variação do parâmetro La/Sm sugere uma evolução hidrotermal mais complexa (diferentes eventos hidrotermais), mas uma única fonte, como indicado pela pequena variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, com exceção das amostras anômalas, anteriormente referidas. Já na parte norte, as amostras distribuem-se regularmente dentro de uma amplitude maior de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, o que parece indicar o envolvimento de fontes e/ou fluidos diferentes ao longo de um mesmo evento mineralizante. Não se pode, portanto, estabelecer correlações diretas entre as fluoritas das partes norte e sul.

Rocha fonte e sistema hidrotermal O diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr} \times 10^3$ (Fig. 4a) foi utilizado por Sallet *et al.* (1996) como base para suas interpretações sobre a rocha fonte e as dimensões das células convectivas do hidrotermalismo. Segundo os autores, há duas *mixing lines* com os respectivos *end-member* (1) água meteórica e (2) fluorita magmática Tabuleiro. Estas duas *mixing lines* têm um *end-member* comum na razão isotópica inicial do Granito Pedras Grandes. Os dados da fluorita filoniana destes autores agruparam-se sobre a *mixing line* 1, com exceção do filão Jaguaruna sobre a *mixing line* 2. Como este filão localiza-se em corpo do Granito Tabuleiro, foi interpretado que a célula hidrotermal responsável por sua formação era restrita a este corpo granítico e originada a partir do seu calor radiogênico, no caso com alto fluxo de calor. No caso do Granito Pedras Grandes, ter-

Figura 2 - Diagrama comparativo entre as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da mineralização do norte do DFSC, da fluorita do sul do DFSC e da fluorita disseminada no granito Tabuleiro.

Figura 3 - Diagrama La/Sm vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da fluorita da jazida Nova Fátima e da fluorita do sul do DFSC.

se-iam gerado células com grandes dimensões devido ao menor fluxo de calor e, desta forma, a razão isotópica da fluorita filoneana tenderia a seguir a *mixing line* da água meteórica. Ainda segundo estes autores, a inexistência de Sr oriundo dos basaltos significaria que, à ocasião da mineralização, o DFSC não era mais coberto pelos derrames basálticos, sendo necessário rever a idade da mineralização, que seria mais jovem do que o anteriormente suposto, e considerar que o rifteamento do Atlântico Sul não seria o único responsável por anomalias térmicas.

Em nosso entender, a linha de interpretação seguida por Sallet et al. (1996) é coerente com os resultados então apresentados. Por outro lado, os dados adicionais sobre a fluorita disseminada (Rocha 1997 e Sallet et al. 2000), somados aos dados do presente trabalho permitem avançar nas interpretações. Por um lado, constatou-se que a composição isotópica da fluorita disseminada varia desde as razões mais baixas da fluorita filoneana até valores muito mais elevados (Fig. 2). Estas razões, quando plotadas no diagrama de Sallet et al. (1996), implicam o deslocamento da *mixing line* 2 (Fig. 4b). Por outro lado, as amostras de fluorita do norte do distrito (filões Nova Fátima,

Rio dos Bugres e Rio Chapéu) assim como de calcita e barita da paragênese tardia (Fig. 4c) situam-se sobre o *trend* do Granito Pedras Grandes. Observa-se, ainda, que parte da fase 2 e a paragênese tardia situam-se abaixo da razão inicial deste granito e da *mixing line* com a água meteórica. Isto é interpretado como um aumento progressivo na contribuição de uma fonte com composição isotópica diferente e menor do que a do Granito Pedras Grandes. De acordo com os dados de Thomaz Filho et al. (1976) (razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,722-0,745 nos sedimentos da Formação Rio Bonito) os sedimentos da Bacia do Paraná poderiam representar esta fonte.

Considerando-se um modelo de hidrotermalismo por células convectivas, a discussão acima conduziria a assumir que as células teriam grandes dimensões, o que é corroborado pelos dados de traços de fissão em apatita (Jelinek 2002, Jelinek et al. 2003a) que identificaram uma anomalia térmica regional responsável pelas fases de mineralização tardias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS No sub-distrito Segunda Linha Torrens, onde a existência de 3 ciclos hidrotermais sucessivos foi comprovada pelo estudo da alteração hidrotermal da encaixante (Bastos Neto et al. 1997), os ETR apresentam evoluções para cada um destes ciclos (Bastos Neto 1990). Estes manifestam-se já entre a fluorita precoce e tardia de uma mesma fase, sendo, portanto, possível identificar as fases com base nos ETR. Já as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ são basicamente constantes, com exceção da fluorita da fase 2. No sub-distrito Grão-Pará, as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ decrescem desde a fluorita precoce até a paragênese tardia, podendo-se facilmente estabelecer correlações entre a fluorita dos diversos filões com base nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Os dois sub-distritos tiveram, portanto, evoluções hidrotermais distintas.

No sub-distrito Segunda Linha Torrens, a consistência das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ confirma o modelo de fluidos unicamente meteóricos envolvidos em 3 circuitos hidrotermais sucessivos que drenaram, em todos os 3, uma mesma rocha fonte, ou uma mesma composição de rochas fonte. Ou seja, se tivessem sido identificadas diferentes razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para a fluorita de cada um dos ciclos propostos, haveria que se rever a idéia de polifasagem hidrotermal, pois as evoluções nos ETR deveriam ser atribuídas às mudanças de fonte e não a diferentes eventos hidrotermais. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ indicam claramente que os corpos Tabuleiro não podem ter sido a única fonte do Sr, nem mesmo para o filão Jaguaruna, como sugerido por Sallet et al. (2000). Seguramente, os sistemas hidrotermais drenaram quantidades consideráveis do Granito Pedras Grandes. Pode-se admitir que os corpos Tabuleiro tenham sido uma fonte importante do F, talvez a mais importante, haja visto sua riqueza em F na forma de fluorita disseminada de origem magmática. Entretanto, não há motivo para excluir a contribuição do Granito Pedras Grandes, o mais abundante, e no qual também ocorre fluorita disseminada (de origem secundária) embora em menor quantidade.

No sub-distrito Grão-Pará, foram comprovadas mudanças de fonte e de origem dos fluidos ao longo do processo de mineralização. Para a fase 1 de mineralização, pode-se conceber um hidrotermalismo em parte semelhante a qualquer um dos eventos hidrotermais da parte sul do DFSC, ou seja, fluidos meteóricos drenando o embasamento granítico e lixiviando o F. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da fluorita filoneana indicam uma forte influência do Granito Pedras Grandes que não aflora nas proximidades do depósito, mas pode ter sido drenado em profundidade. Na fase 2, gradualmente passou a predominar um fluido descendente, salino, saturado em halita, oriundo da cobertura sedimentar (Jelinek et al. 2003b), o que é corroborado pela razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aqui apresentadas. A leste, na jazida Rio Bravo Alto, as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na fluorita indicam tratar-se do minério da fase 2 e as ocorrências de barita correlacionam-se às fases tardias presentes nos filões de fluorita.

Figura 4 - Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$. (a) Extraído de Sallet et al. (1996); (b) Modificado de Rocha (1997); (c) Análises deste estudo.

Agradecimentos Os autores agradecem ao corpo técnico e mineiros da Companhia Nitroquímica S.A. em Morro da Fumaça, na pessoa do Geól. Clóvis Savi, pelo auxílio nos trabalhos de

campo; ao Prof. Koji Kawashita pelo auxílio nas análises realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica do IG/UFRGS.

Referências

- Amaral G., Bushee J., Cordani U.G., Kawashita K., Reynolds J.H. 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **31**:117-142.
- Barbieri M., Bellanca A., Neri R., Tolomeo L. 1987. Use of strontium isotopes to determine the sources of hidrothermal fluorite and barite from Northwestern Sicily (Italy). *Chem. Geol.*, **66**:273-278.
- Bastos Neto A.C. 1990. *Le district à fluorine de Santa Catarina: minéralisations et altérations hydrothermales dans leur cadre géodynamique*. Tese de doutoramento, Université d'Orléans, 420 p.
- Bastos Neto A.C., Touray J.C., Charvet J., Dardenne M. 1992. Contrôle tectonique des minéralisations à fluorine de Santa Catarina, Brésil: filons en décrochement et en extension. *Chron. Rech. Min.*, **507**: 43-52.
- Bastos Neto A.C., Touray J.C., Dardenne M. 1996. Géochimie isotopique (δD) appliquée à l'étude des inclusions fluides de la fluorine du district de Santa Catarina (Brésil): une discussion sur l'origine des solutions minéralisées. *Acad. Bras. Ciênc.*, **68**(2):213-221.
- Bastos Neto A.C., Dardenne M.A., Touray J.C. 1997. Contribuição do estudo das alterações hidrotermais de encaixante a gênese das mineralizações do distrito fluorítico de Santa Catarina. *Geoch. Bras.*, **11**(2):213-229.
- Canals A. & Cardellach E. 1993. Strontium and Sulphur isotope geochemistry of low-temperature barite-fluorite veins of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain): a fluid mixing model and age constrains. *Chem. Geol.*, **104**:269-280.
- Dardenne M.A. & Savi C.N. 1984. Geologia e geoquímica dos filões de fluorita Segunda Linha Torrens e Cocal (SC). *Rev. Bras. Geoc.*, **14**(2):120-127.
- Dardenne M.A. & Schobbenhaus C. 2001. *Metagênese do Brasil*. Universidade de Brasília (ed.), Brasília. 392 p.
- Galindo C., Tornos F., Darbyshire D.P.F., Casquet C. 1994. The age and origin of the barite-fluorite (Pb-Zn) veins of the Sierra del Guadarrama (Spanish Central System, Spain); a radiogenic (Nd, Sr) and stable isotope study. *Chem. Geol.*, **112**(3-4):351-364.
- Galindo C., Pankhust R.J., Casquet C., Conigold J., Baldo E., Rapela C.W., Saaveda J. 1997. Age, Sr and Nd isotope systematics, and origin of two fluorite lodes, Sierras Pampeanas, Argentina. *Int. Geol. Rev.*, **39**:948-954.
- Horbach R. & Marimon R.G. 1980. Esboço da evolução tectônica e seu significado na gênese dos depósitos de fluorita no sudeste catariense. In: Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, *Anais*, **3**:1540-1551.
- Huang Z.L., Xu C., Liu D.R., Xu D.R., Li W.B., Guan T. 2003. Sr and Nd isotope geochemistry of fluorites from the Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China: implications for the source of ore-forming fluids. *Journ. Geoch. Explor.*, **78-79**:643-648.

- Jelinek A.R. 1997. *Análise por traços de fissão em apatitas (AFTA) da encaixante dos depósitos de fluorita filoneana do Sudeste Catarinense: uma evolução hidrotermal polifásica*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 200 p.
- Jelinek A.R. 2002. *Evolução Geológica do Distrito Fluorítico de Santa Catarina: Estudo integrado de mineralogia, geoquímica e tectônica por traços de fissão em apatita*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 205 p.
- Jelinek A.R., Bastos Neto A.C., Lelarge M.L.V., Soliani Jr. E. 1999. Apatite fission track dating of fluorite ore veins from Santa Catarina state, Brazil: a complex hydrothermal evolution. *Jour. South Amer. Earth Sc.*, **12**:367-377.
- Jelinek A.R., Bastos Neto A.C., Poupeau G. 2003a. Análise por traços de fissão em apatitas do Distrito Fluorítico de Santa Catarina: Relações entre hidrotermalismo e evolução da margem continental. *Rev. Bras. Geoc.*, **33**(3):289-298.
- Jelinek A.R., Prado, M.; Bastos Neto A.C., Pereira, V.P.; Ronchi, L.H.; Savi, C.N. 2003b. Ocorrência de gorceixita e de inclusões sólidas de halita em fluorita da Jazida Nova Fátima: implicações na gênese da mineralização do Distrito Fluorítico de Santa Catarina. *Rev. Bras. Geoc.*, **33**(3):363-370.
- Lhegu J., Jebrak M., Touray J.C. 1988. Fluorite and barite deposits in France. In: IAGOD Symposium, 7, Lulea, *Anais*, 297-307.
- Menuge J.F., Feely M., O'Reilly C. 1997. Origin and granite alteration effects of hydrothermal fluid: isotopic evidence from fluorite veins. *Miner. Dep.*, **32**:34-43.
- Morgental A. 1984. *Caracterização dos depósitos de fluorita*. Projeto fluorita no sudeste de Santa Catarina. Relatório Preliminar, Etapa 2. Porto Alegre, CPRM, 130 p.
- Prado M. 2002. *Contribuição à geologia das jazidas de fluorita Rio dos Bugres e Nova Fátima: sudeste de Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91 p.
- Rocha F.F.N. 1997. *Geologia e geoquímica dos filões de fluorita da parte Norte do Distrito Fluorítico de Santa Catarina*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 188 p.
- Sallet R.G. 1988. *Étude pétrologique et métallogénique d'un secteur du district à fluorine de Santa Catarina, Brésil. Les granitoides précambriens monzonitiques source probable de la fluorine filonienne post-jurassique*. Tese de doutoramento, Université de Paris VI, 233 p.
- Sallet R.G., Moritz R., Fontignie D. 1996. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics at the post-jurassic Santa Catarina Fluorite District, Brazil. Genetic model and age implications. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 39, Salvador, *Anais*, 7:328-331.
- Sallet R.G., Moritz R., Fontignie D. 2000. Fluorite $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and REE constraints on fluid-melt relations, crystallization time span and bulk D^{Sr} of involved high silica granites. Tabuleiro granites, Santa Catarina, Brazil. *Chem. Geol.*, **164**:81-92.
- Savi C.N. 1980. *Gênese e controle das mineralizações de fluorita da região de Criciúma (SC)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 112 p.
- Savi C.N. & Dardenne M.A. 1980. Zonação, paragênese e controles da mineralização de fluorita do filão Segunda Linha Torrens, Município de Morro da Fumaça, SC. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, *Anais*, 3:1743-1757.
- Scheibe L.F. 1986. *Geologia e petrologia do distrito alcalino de Lages, SC*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 224 p.
- Silva M.A.S., Leites S.R., Caruso Jr. F. 2000. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina. Escala 1:250.000. CPRM, Brasília.
- Simonetti A. & Bell K. 1995. Nd, Pb and Sr isotope systematics of fluorite at the Amba Dongar carbonatite complex, India: evidence for hydrothermal and crustal fluid mixing. *Econ. Geol.*, **90**:2018-2027.
- Tassinari C.G. & Flores J.A. 1992. Aplicação dos isótopos de Sr e Nd na mineralização de fluorita do poço 5, Segunda Linha Torrens, sudeste de Santa Catarina. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 37, São Paulo, *Anais*, 1:259-260.
- Thomaz Filho A., Cordani U.G., Kawashita K. 1976. Aplicação do método Rb/Sr na datação de rochas sedimentares argilosas da Bacia do Paraná. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, *Anais*, 4:293.
- Touray J.C. & Ziserman A. 1980. Sur la genèse des gisements (F-Ba-Fe-Mn) de Chailac. - *Mém. BRMG Fr.*, **104**:377-380.
- Valette C.O. 1983. *Karts et filons à fluorine dans le faisceau synclinal du Morvan: le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire, France)*. Tese de doutoramento, Université d'Orléans, 299 p.

Manuscrito A-11631

Revisão aceita em 25 de junho de 2006