

Capítulo VI

GEOLOGIA DE ISÓTOPOS RADIOGÊNICOS

1 - INTRODUÇÃO:

Os estudos de geoquímica isotópica tem como finalidade determinar idades e estudar a evolução de rochas da crosta terrestre utilizando razões isotópicas de elementos como Rb-Sr, K-Ar, U-Pb, Sm-Nd, etc. Cada método tem diferentes aplicações e valores interpretativos. Assim, por vezes, é necessária a aplicação de mais de um método para o entendimento em conjunto da evolução e idades.

A boa distribuição de Sm e Nd nas mais variadas litologias, a baixa mobilidade destes terras raras durante os processos intempéricos, hidrotermais e metamórficos, bem como o comportamento geoquímico similar de Sm e Nd, permite que o método Sm-Nd tenha uma aplicação muito ampla no estudo de idades e evolução da crosta.

Os procedimentos analíticos estão resumidos em um quadro no final do capítulo.

1.1 - O método Sm-Nd:

Samário e neodímio são elementos terras raras leves, suas concentrações em rocha ígneas crescem com o aumento do grau de diferenciação pois na maior parte dos casos são incompatíveis. No entanto a razão Sm/Nd decresce, já que o Nd vai sendo mais concentrado no líquido em relação ao Sm durante o processo da cristalização fracionada.

Os minerais exercem um considerável grau de seletividade na admissão de ETR assim; piroxênio, anfibólio e granada costumam concentrar ETR pesados, enquanto que feldspato,

biotita e apatita concentram os ETR leves. Esta seletividade reflete na concentração de ETR nas rochas (Faure, 1986).

Sm e Nd são ligados em uma relação pai e filho pelo decaimento alfa do ^{147}Sm para ^{143}Nd estável com uma meia vida de $1,06 \times 10^{11}$ anos. O decaimento do ^{147}Sm é descrito pela equação;

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i + (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m (e^{\lambda t} - 1)$$

onde o ^{144}Nd é usado como isótopo de referência, “t” é o tempo decorrido, “λ”, é a constante de decaimento ($6,54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$), e “m” e “i” designam, respectivamente, a razão isotópica atual da amostra e a razão inicial.

A abundância de ^{143}Nd e, conseqüentemente, a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ da Terra cresceu com o tempo por causa do decaimento do ^{147}Sm para ^{143}Nd . Isto pode ser descrito por um modelo baseado na idade e razão Sm/Nd da Terra e sua razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ primordial. Estes dois parâmetros são considerados iguais às razões dos meteoritos condríticos, referidos como reservatório condrítico uniforme *CHUR* (*Chondritic Uniform Reservoir*) (De Paolo & Wasserburg, 1976). A fusão parcial de um reservatório condrítico uniforme faz crescer a razão Sm/Nd do resíduo, evoluindo para uma razão Sm/Nd maior que a do CHUR. As partes do manto que não foram envolvidas em eventos de fusão parcial devem conter Nd, cuja composição isotópica evoluiu junto com a linha do CHUR.

Diferenças de procedimentos analíticos de diferentes laboratórios apresentam diferenças na razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ primordial (Wasserburg et al., 1981). Razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ foram normalizadas de diferentes formas (Faure, 1986). Dados corrigidos para uma razão $^{146}\text{Nd}/^{142}\text{Nd} = 0,636151$ o CHUR tem $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511844$, enquanto que dados corrigidos para $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ o CHUR tem $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$. Todos os dados isotópicos Nd discutidos neste trabalho foram corrigidos para o último valor.

Para comparar as diferenças entre as razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de rochas ígneas e CHUR, De Paolo & Wasserburg (1976) introduziram o parâmetro;

$$\varepsilon_{\text{Nd}} = \{ [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) / I_{\text{CHUR}}^t] - 1 \} \times 10^4$$

onde I_{CHUR}^t é a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ na época da formação da rocha. O cálculo deste parâmetro também evita o problema de procedimento de normalização de diferentes laboratórios. Um valor de ε positivo implica que os magmas foram formados de um manto depletado, enquanto que um valor negativo indica que eles foram derivados de fontes mantélicas enriquecidas ou fusão de rochas crustais que tinham uma razão Sm/Nd mais baixa que o CHUR.

1.2 - Aplicação do método Sm-Nd a rochas sedimentares:

Rochas de origem sedimentar são compostas de minerais e partículas de rocha derivados do intemperismo de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares mais antigas. A composição isotópica Sm-Nd de sedimentos não depende apenas do decaimento de ^{147}Sm a partir da deposição, mas também das idades das partículas que os compunham (Faure, 1986).

Estudos de MacCulloch & Wasserburg (1978) demonstram que sedimentos tem as razões Sm/Nd muito constantes e similares às das rochas das quais foram derivadas. Concluindo assim, que durante os processos de intemperismo, transporte, deposição e diagênese, os sedimentos não sofrem alterações significativas nas razões Sm/Nd.

Possíveis efeitos metamórficos na abundância de elementos mais móveis em rochas sedimentares são discutidos em trabalhos de Taylor et al. (1986) concluindo que não existem perturbações significativas nos padrões de ETR, e estudos de Fletcher et al. (1992) comprovaram que o sistema Sm-Nd de rochas metassedimentares do fácies anfíbolito superior/granulito do oeste da Austrália permaneceram fechados desde a sedimentação e sem perturbação durante os eventos metamórficos.

As idades modelo Sm-Nd de rochas sedimentares refletem as idades das rochas das quais elas foram derivadas, podendo ser úteis na identificação de sua fonte. As idades modelo também podem ser interpretadas como o tempo gasto desde que o Nd foi separado do reservatório condrítico CHUR. Idades modelo são “idades de residência crustal” e podem ser usadas para estudar a interação entre o manto e a crosta através do tempo geológico. As relações entre idades modelo e idade de deposição permite o estudo de modelos de crescimento da crosta continental pela adição de material manto derivado (Faure, 1986).

Uma condição importante a ser observada é de que quando houver mais de uma fonte, de idades diferentes, a composição Sm-Nd da rocha sedimentar será a média das fontes e, conseqüentemente as razões isotópicas e idades modelo calculadas.

2 - ANÁLISES Sm-Nd:

Foram feitas análises Sm-Nd de metassedimentos e rochas graníticas. Para os metassedimentos o objetivo é identificar as fontes do protólito através da análise de rocha total e a idade do metamorfismo através de isócronas minerais. A análise de rocha total das rochas graníticas tem como objetivo determinar a idade modelo e a origem do magma que os geraram.

2.1 - Rochas metassedimentares:

Análises isotópicas Sm-Nd de rocha total foram feitas em sete amostras de xistos e uma de seixo granítico encontrado em metassedimento. A tabela VI 2.1a apresenta além dos resultados obtidos, dados obtidos por Viana (1995); um metassedimento da mesma faixa e uma amostra de gnaiss tonalítico de idade U-Pb de 0,86 Ga, que é utilizada para o cálculo das idades modelo. Os gnaisses tonalíticos são interpretados como porção plutônica das rochas supracrustais que serviram de fonte para os sedimentos, por isso uma análise desta rocha é acrescentada como referencial.

Tabela VI 2.1a - Dados Sm-Nd das rochas metassedimentares.

Amostra	Rocha	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T_{DM}	$\epsilon_{Nd}(T)$
MR-3*	GnTo	3.300	14.353	0.139	0.512551	1.00	+4.6
MR-18*	MS-1	3.560	16.530	0.130	0.512374	1.20	+2.0
MR-101A	MS-2	3.414	15.650	0.132	0.512449	1.10	+3.4
MR-111C	MS-2	2.175	10.225	0.129	0.512487	0.93	+4.5
MR-137A	MS-3 (fina)	4.771	21.446	0.134	0.512209	1.58	-1.5
MR-137B	MS-3 (grossa)	5.331	26.169	0.123	0.512440	1.01	+1.8
MR-137B1	Seixo	3.360	11.144	0.182	0.512735	-----	+3.5
MR-152A	MS-3	5.527	25.384	0.132	0.512400	1.19	+2.5
MR-173	MS-1	4.520	21.010	0.130	0.512464	1.05	+2.0
MR-178A	MS-1	3.588	16.926	0.128	0.512440	1.06	+3.8

O cálculo de $\epsilon_{Nd}(T)$ tem como base a idade U-Pb em zircão do GnTo (0,86Ga)

MS-1 Grt-Bt Xisto c/Ky; MS-2 Hbl-Bt Xisto c/Ky; MS-3 Grt-St-Ms-Bt Xisto

* Dados de Viana (1995)

Os valores $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ estão por volta de 0.13 e são similares às razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ dos gnaisses tonalíticos.

As idades modelo da maioria das amostras de metassedimentos variam de 0,9Ga a 1,2Ga, também semelhantes à idade modelo do gnaiss tonalítico.

Os valores de ϵ_{Nd} da maioria das amostras são positivos, demonstrando que os sedimentos derivaram de rochas que possuíam um caráter primitivo. Exceção dada a amostra MR-137A, um metassedimento fino cuja idade de 1,56Ga, é interpretada como idade mista, já que sedimentos finos podem ter origens mais distais.

Não foi possível calcular a idade modelo do seixo (MR-137B1) devido a sua alta razão $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (0,182).

Na figura VI-1 são comparados os valores de ϵ_{Nd} dos metassedimentos com os valores de gnaisses regionais. Os metassedimentos apresentam um comportamento semelhante aos gnaisses do arco de Mara Rosa e diverso dos gnaisses arqueanos de Goiás, demonstrando uma contribuição dominante das rochas do arco como rocha fonte dos sedimentos.

2.2 - Isócronas minerais Sm-Nd dos metassedimentos:

Para as análises Sm-Nd de minerais dos metassedimentos foram utilizados os seguintes minerais; hornblenda granada, biotita, estaurolita e plagioclásio. Foram escolhidas quatro amostras de metassedimentos, duas da porção norte e duas da porção sul da faixa de metassedimentos. Para a confecção das isócronas foram adicionados dados de rocha total (tabela VI-2.1b).

Tabela VI - 2.1b - Dados Sm-Nd de rocha total e minerais dos metassedimentos.

Amostra	Mineral	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T_{DM}	MSWD
MR-101A	Rocha total 1	3.414	15.650	0,132	0,512449	1.10	7.9
	Rocha total 2	3.221	14.640	0,133	0,512429	1.15	
	Plagioclásio	3.000	14.250	0,127	0,512414		
	Hornblenda	3.670	13.760	0,161	0,512458		
	Granada 1	2.071	5.687	0,220	0,512680		
	Granada 2	2.057	6.017	0,207	0,512748		
MR-173	Rocha total	4.520	21.010	0,130	0,512464	1.05	1.6
	Plagioclásio	3.130	10.300	0,184	0,512686		
	Granada	2.634	7.866	0,202	0,512772		
	Biotita	6.697	30.653	0,132	0,512497		
MR-137A	Rocha total	4,771	21,446	0,134	0,512090	1.58	9.6
	Granada	3.720	12.480	0,180	0,512409		
	Biotita 1	4.334	19.350	0,135	0,512147		
	Biotita 2	4.166	18.610	0,136	0,512189		
	Estaurolita	4.474	20.830	0,130	0,512187		
MR-137B	Rocha total	5,331	26,169	0,123	0,512440	1.01	
	Granada	3.890	11.087	0,212	0,512889		

As amostras MR-101A e MR-173, no centro norte da faixa, apresentaram idades isocrônicas para o metamorfismo de $610 \pm 52 \text{Ma}$ e $604 \pm 66 \text{Ma}$ e valores iniciais de $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +2,0$ e $+0,9$ respectivamente. Os valores positivos de ϵ_{Nd} e idades modelo entre 1,0 e 1,1Ga indicam um caráter juvenil dos sedimentos originais. As idades de metamorfismo correspondem ao ciclo Brasileiro que afetou toda região.

As amostras MR-137A (porção fina) e MR-137B (porção mais grosseira) 20Km a sul, forneceram idades metamórficas de $733 \pm 75 \text{Ma}$ com $\epsilon_{\text{Nd}} = -1,5$ e $760 \pm 75 \text{Ma}$ com $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +1,8$, respectivamente. Estas idades são substancialmente mais antigas que as idades encontradas a norte. Dentro da faixa oeste as duas idades são idênticas e provavelmente representam um pico metamórfico mais antigo similar ao de $777-780 \text{Ma}$ encontrado em zircões metamórficos dos complexos Barro Alto e Niquelândia (Ferreira F^o. Et al., 1994, Suita et al., 1994), e isócronas minerais Sm-Nd do complexo Cana Brava com $770 \pm 43 \text{Ma}$ (Correia et al., 1997).

2.3 - Rochas graníticas:

Seis amostras de rochas graníticas foram analisadas para rocha total de Sm-Nd, sendo uma de veio granítico pertencente ao grupo de rochas graníticas deformadas, uma do granito Amador, uma de um dique subvulcânico, duas do granito Faina e uma de quartzo diorito, estas últimas cinco pertencentes ao grupo das rochas graníticas pouco deformadas. A tabela VI - 2.3 apresenta também dados Sm-Nd do granito amador obtido por Viana (1995). Para o cálculo dos valores de ϵ_{Nd} foi utilizada a idade de alojamento dos corpos pós-tectônicos ocorrido há 600Ma.

Tabela VI - 2.3 Dados Sm-Nd das rochas graníticas.

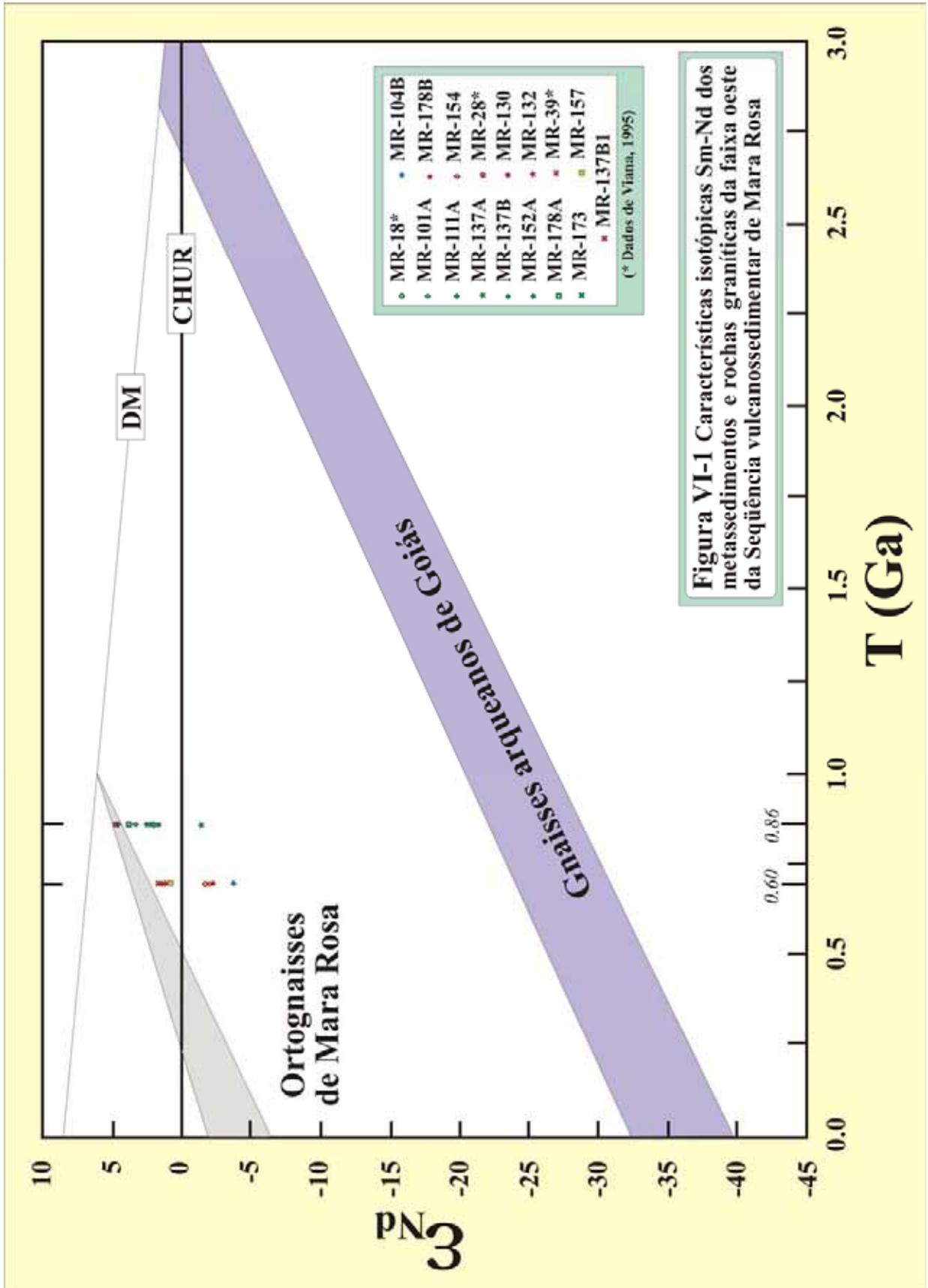
Amostra	Rocha	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T_{DM}	ϵ_{Nd}
MR-104	veio (γ deformado)	3,341	14,228	0,142	0,512227	1,60	-3,8
MR-28*	γ Amador	3,172	18,608	0,103	0,512160	1,21	-2,1
MR-154	γ Amador	2,163	11,000	0,119	0,512216	1,32	-2,3
MR-178B	dique γ sub-vulc.	1,627	8,760	0,112	0,512204	1,25	-1,9
MR-130	γ Faina (borda)	4,837	28,763	0,102	0,512335	0,97	+1,3
MR-132	γ Faina	7,632	38,344	0,120	0,512394	1,05	+1,1
MR-39*	γ Faina	6,420	33,980	0,114	0,512391	1,00	+1,5
MR-157	Qtz diorito	5,019	27,243	0,111	0,512343	1,04	+0,8

* Dados de Viana (1995)

Os valores $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ das rochas graníticas variam de 0,10 a 0,12 exceção da amostra de veio granítico que possui um valor ligeiramente maior (0,14), mais próximo dos valores encontrados nos metassedimentos.

As rochas graníticas possuem idades modelo variadas. A idade mais alta pertence ao veio granítico (1,6Ga). O granito Amador e o dique subvulcânico possuem idades entre 1,21 a 1,32Ga, semelhantes as idades modelo dos metassedimentos. As idades encontradas para o granito Faina e para o quartzo diorito são mais baixas, por volta de 1,0Ga. Na figura VI-1 são comparados os dados de $\epsilon_{Nd} \times T$ dos granitos aos de gnaisses arqueanos de Goiás e ortognaisses de Mara Rosa.

As rochas graníticas apresentam dois conjuntos; um com idades acima de 1,2Ga e ϵ_{Nd} negativo, referente a corpos de menos de 1km de diâmetro, o segundo com idades por volta de 1,0Ga e ϵ_{Nd} positivo referente a corpos com mais de 2Km de diâmetro. As amostras com ϵ_{Nd} negativo sugerem a participação de fontes levemente mais antigas e as amostras com ϵ_{Nd} positivo demonstram que os magmas originais possuíam um caráter primitivo, isotopicamente semelhantes aos gnaisses tonalíticos e aos metassedimentos mencionados anteriormente.



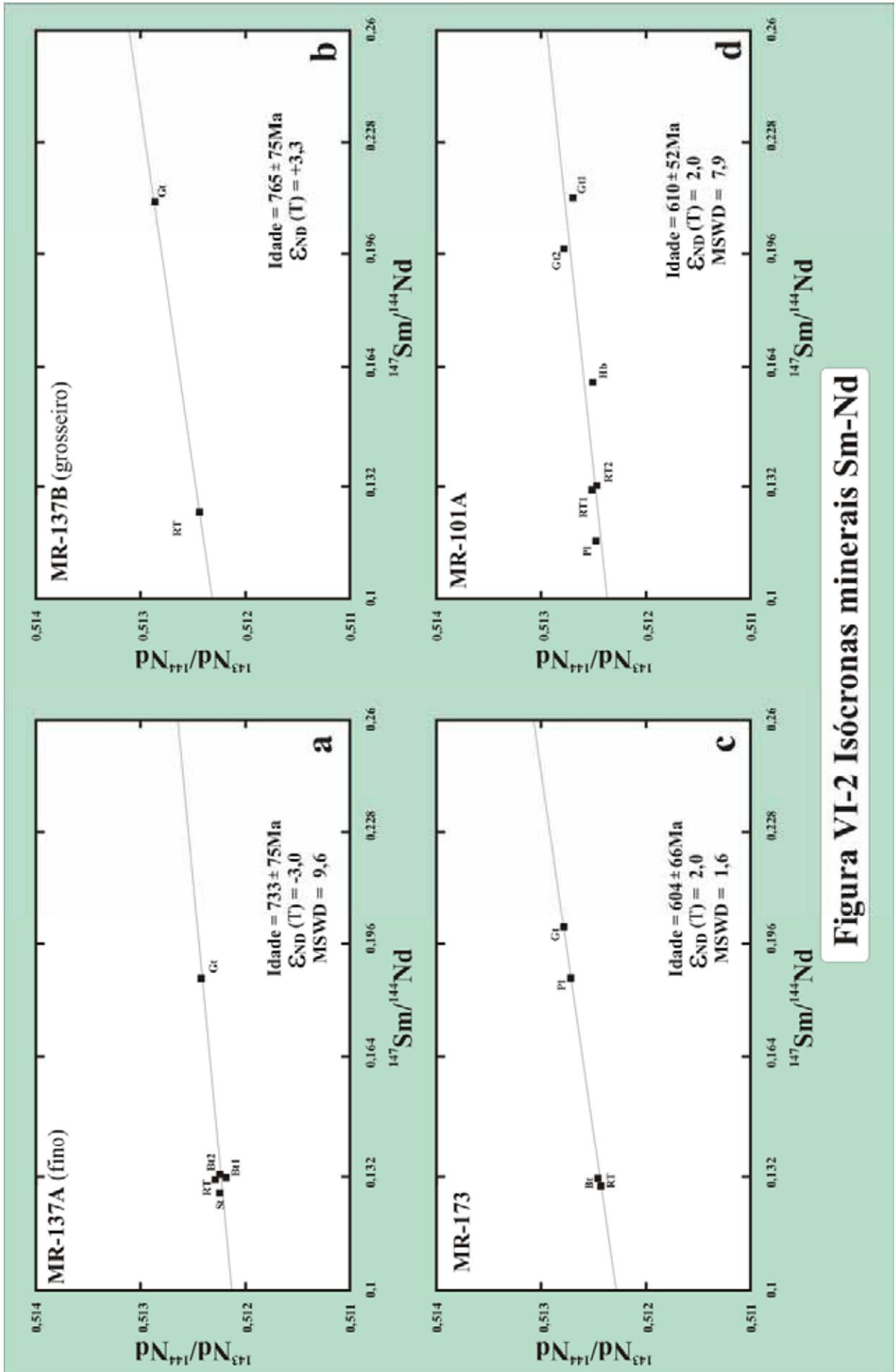


Figura VI-2 Isócronas minerais Sm-Nd

3 - DISCUSSÃO:

Os resultados indicam que os sedimentos tem uma contribuição predominantemente do arco. Algumas amostras indicando que contribuição de fontes mais pouco velhas também estão presentes. Isto pode refletir a situação paleogeográfica e estratigráfica original do complexo de arco; enquanto amostras com uma assinatura juvenil poderiam ter-se originado em um ambiente verdadeiramente intraoceânico, sedimentos de uma fonte sílica mais antiga das proximidades poderiam ter-se depositado juntos aos sedimentos do arco, provavelmente pouco antes do arco colidir contra a borda continental.

O fato das rochas graníticas apresentarem dois conjuntos com idades e valores de ϵ_{Nd} diferentes demonstra a existência de dois magmatismos diferentes. A causa desta diferença pode ser atribuída a diferentes épocas de intrusão, ou processos magmáticos diferentes com variação no grau de contribuição entre magmas primitivos e fusão de sedimentos. O mais provável é que tanto a idade como o processo magmático sejam a causa da diferença, pois normalmente eles estão associados à ambientação tectônica.

Procedimentos de preparação de amostras para análise de Sm e Nd:

A - Digestão da amostra: A digestão das amostras de rocha total foi feita em bombas de teflon, enquanto que a digestão dos minerais foi feita em cápsulas de teflon (Savilex).

Digestão em bomba de teflon: Pesar 50 a 100 mg de amostra de rocha e adicionar ao traçador (*spike*). Dissolver a mistura em bomba de teflon revestida com jaqueta de aço inox, passando por um ataque de ácido, que consiste de adição de 1ml de HNO₃ concentrado (destilado) e adição de 4ml de HF concentrado (destilado), seguido de evaporação através de um sistema de evaporação montado com lâmpadas de infravermelho. Após a evaporação, nova adição de 1ml de HNO₃ concentrado e 4ml de HF seguido de aquecimento de 3 a 4 dias a 190°C em estufa. Depois da completa dissolução, prossegue-se com evaporação. Após a evaporação são adicionados 2ml de HNO₃ concentrado os quais também são totalmente evaporados. Novo ataque com 6ml de HCl 6N (destilado) é feito em estufa por uma noite.

Digestão em cápsula de teflon (Savilex): Pesar 50 a 100mg de amostra e misturar ao traçador (*spike*) e dissolver em cápsula de teflon. Adicionar 250µl de HNO₃ concentrado (destilado) e 3ml de HF concentrado (destilado). Deixar em chapa quente por um dia e uma noite. Evaporar. Adicionar novamente 250µl de HNO₃ concentrado e 3ml de HF e aquecer por 3 a 4 dias na chapa quente. Evaporar. Adicionar 1ml de HNO₃ e evaporar. Adicionar 4ml de HCl 6N (destilado) e deixar na chapa quente por um dia e uma noite.

No fim da etapa de digestão deve-se observar-se se houve a total digestão da amostra. A solução deve estar homogênea. Evaporar a solução da amostra e adicionar 2ml de HCl 2,5N (repouso). A solução deve estar homogênea como anteriormente.

B) Separação dos ETRs (calibração da coluna primária): Uma coluna de quartzo (h=15cm e d.i.=8mm) é empacotada com 2,2g (seca a 60°C) ou 12cm de resina catiônica Bio-Rad AG 50W-X8 200-400 *mesh* em meio aquoso. A primeira fração com cerca de 32ml de HCl 2,5N é descartada. O grupo dos ETRs é coletado na fração entre 1 e 15ml de HCl 6N. A coluna é regenerada com mais 15ml de HCl 6N e estocada em solução fracamente ácida.

C) Separação de Sm e Nd (calibração da coluna secundária): Uma coluna de teflon (Savilex) (h=10cm e d.i.=5mm) é empacotada com resina LN-Spec (resina líquida HDEHP - ácido di-(etilexil) fosfórico impregnada em pó de teflon de 270-150 *mesh*) e completada com H₂O destilada até a altura de 6,5cm. Evaporação total do concentrado de ETRs e adição de 200µl de HCl 0,18N. Fazer a deposição dos 200µl da solução da amostra na coluna. A primeira fração de 10ml é descartada e a fração de Nd é coletada com 4ml de HCl 0,3N. Após a coleta de Nd são descartados 2ml de HCl 0,3N, e a fração de Sm é coletada com 3,5ml de HCl 0,4N. A regeneração da resina é feita com 6ml de HCl 6N. A coluna é novamente condicionada com a passagem de duas vezes 3ml de HCl 0,18N.

D) Deposição no filamento: A fração coletada na coluna secundária é evaporada. O resíduo é dissolvido com 1µl de HNO₃ 5% (destilado). No filamento de Re foi depositado 1µl de da amostra e evaporado lentamente, primeiro a 0,7A até a gota ficar plana, depois a 1,2A para secar a gota, e então é levado a 1,8A, sem levar ao rubro. O espectrômetro utilizado é o Finnigan MAT dotado de 7 coletores tipo "Faraday Cup" e as análises têm sido realizadas em modo estático, utilizando o arranjo de filamento duplo. A razão ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd foi normalizada para ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0,7219 e a constante de decaimento utilizada foi o valor revisado por Lugmair & Marti (1978) de 6,54x10⁻¹²/a. A incerteza típica na razão ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd é de 0,004% (2σ) e a incerteza analítica da razão ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd é estimada em torno de 0,05%. A amperagem tanto para Nd quanto para Sm no filamento de ionização é de 4A (correspondendo a uma temperatura de aproximadamente 1660°C) e no de evaporação pode variar, normalmente, de 1,5 a 2,3A.