

# *Pesquisas em Geociências*

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

---

## **Razão Isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em Sedimentos Recentes Implicações na Datação Radiométrica das Rochas Sedimentares**

*Ana Maria Pimentel Mizusaki, Koji Kawashita, Antonio Thomaz Filho*

*Pesquisas em Geociências, 25 (1): 75-88, jan./abr., 1998.*

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21175>

---

Publicado por

## **Instituto de Geociências**

---



## **Portal de Periódicos UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

---

### **Informações Adicionais**

**Email:** [pesquisas@ufrgs.br](mailto:pesquisas@ufrgs.br)

**Políticas:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

**Submissão:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

**Diretrizes:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

---

Data de publicação - jan./abr., 1998.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

## Razão Isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em Sedimentos Recentes Implicações na Datação Radiométrica das Rochas Sedimentares

ANA MARIA PIMENTEL MIZUSAKI<sup>1</sup>, KOJI KAWASHITA<sup>2</sup> & ANTONIO THOMAZ FILHO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup> Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 11.348, CEP 05422-970, São Paulo, SP, Brasil

<sup>3</sup> Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier n° 524/4006-A, Maracanã  
CEP 20559-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

(Recebido em 09/97. Aceito para publicação em 03/98)

**Abstract** - Radiometric ages of geological significance are obtained when the Rb/Sr isochron method is applied to argillaceous sedimentary rocks. In spite of these results many questions arise when the Rb/Sr methodology is applied to sedimentary rocks, notably the behavior of the rubidium (Rb) and strontium (Sr) elements during sedimentation and during the diagenetic process. The greatest uncertainty lies in the mechanism and the timing of the strontium isotopic homogenization, which constitutes the basic assumption behind radiometric dating by the Rb/Sr method. The purpose of this work is to contribute to the clarification of the conditions for the strontium isotopic homogenization, the relation between Rb and Sr and the dimension and nature of sedimentary particles, the early process associated with the clay minerals, with sedimentation process and with interstitial fluids. Recent sediments were sampled from different environments: the deltaic region of the Paraíba do Sul River (RJ), the deltaic region of the Açú River (RN), the continental shelf associated with the Amazon River mouth (AM), the continental slope and Jacarepaguá coastal plain (RJ). The samples were analysed by X-ray diffraction, scanning electron microscope and chemical and isotopic techniques. Results obtained show that some samples reached uniform strontium isotopic composition under certain conditions. These conditions include close proximity between samples, clay fraction enriched in expansive minerals such as smectite and degraded illite associated with deposition preferentially in marine waters.

**Key words:** Recent, sediments, isotopic ratio, Rb/Sr methodology.

### INTRODUÇÃO

A partir do início da década de 60, inúmeros trabalhos de pesquisa sobre a aplicação do método de datação radiométrica Rb/Sr nas rochas sedimentares argilosas, preferencialmente folhelhos, tem sido apresentados na literatura (Compston & Pidgeon, 1962; Bonhomme & Segonzac, 1962; Whitney & Hurley, 1964; Bonhomme *et al.*, 1964 e 1965; Bofinger & Compston, 1967; Bonhomme & Prévot, 1968; Brookins *et al.*, 1970; Perry & Tureckian, 1974; Bonhomme, 1976; Clauer, 1982; Bonhomme 1982 e Morton, 1983 e 1985). No Brasil, os trabalhos de Kawashita (1972); Thomaz-Filho (1976) e Cordani *et al.* (1978, 1985a e 1985b) mostraram a aplicação do método Rb/Sr em rochas sedimentares argilosas paleozóicas e eomesozóicas de bacias sedimentares brasileiras, resultando em idades concordantes com a época da sedimentação e de eventos diagenéticos.

Na aplicação do método Rb/Sr em rochas sedimentares, apesar da obtenção de resultados geologicamente significativos, ainda existe o questionamento básico em relação a extensão do

conceito de uniformização isotópica do elemento estrôncio (Sr) nestas litologias. Isto porque as rochas sedimentares resultam da mistura de minerais de diversas proveniências caracterizados por diferentes razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , herdadas da rocha fonte. Sabe-se que essa uniformização ocorreu em diversos casos, visto que as idades determinadas estavam de acordo com as idades estratigráficas atribuídas às rochas sedimentares analisadas pelos autores supracitados. Na realidade, existem dois aspectos a serem considerados, ou seja, o Sr radiogênico herdado da rocha fonte e a interação desse Sr com aquele associado aos fluidos intersticiais do ambiente deposicional.

Neste sentido, pesquisas de Cordani *et al.* (1978) mostraram que alguns sedimentos recentes apresentavam valores muito próximos para a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , apesar da dispersão significativa dos valores da razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ , condição ideal para a aplicação do método isocrônico Rb/Sr. A explicação então aventada pelos autores foi a da hipótese de mistura mecânica do material detrítico na bacia deposicional, devido ao tempo relativamente longo de sua residência nos fluidos

do meio deposicional pouco agitado, característico da deposição de sequências argilosas.

Neste trabalho, propõe-se atender à recomendação de Cordani *et al.* (1978), sobre a necessidade de pesquisas com sedimentos recentes, relacionados a diferentes ambientes deposicionais, para se demonstrar a validade da proposição da uniformização isotópica do Sr nas rochas sedimentares. Para tanto, foram analisados sedimentos comprovadamente recentes, preferencialmente argilosos, associados a diversos ambientes deposicionais e de composições mineralógicas variadas. Assim, com estas características, foram selecionadas amostras de sedimentos provenientes das seguintes regiões: delta do Rio Paraíba do Sul (RJ); delta do Rio Açú (RN); plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM); talude continental da Bacia de Campos (RJ) e Baixada de Jacarepaguá (RJ).

### SEDIMENTOS ANALISADOS

Os sedimentos analisados são clásticos terrígenos preferencialmente argilosos, ou seja, com predomínio de argilominerais na fração mais fina que  $2 \mu\text{m}$  ( $F < 2 \mu\text{m}$ ) (Weaver, 1989). Os argilominerais

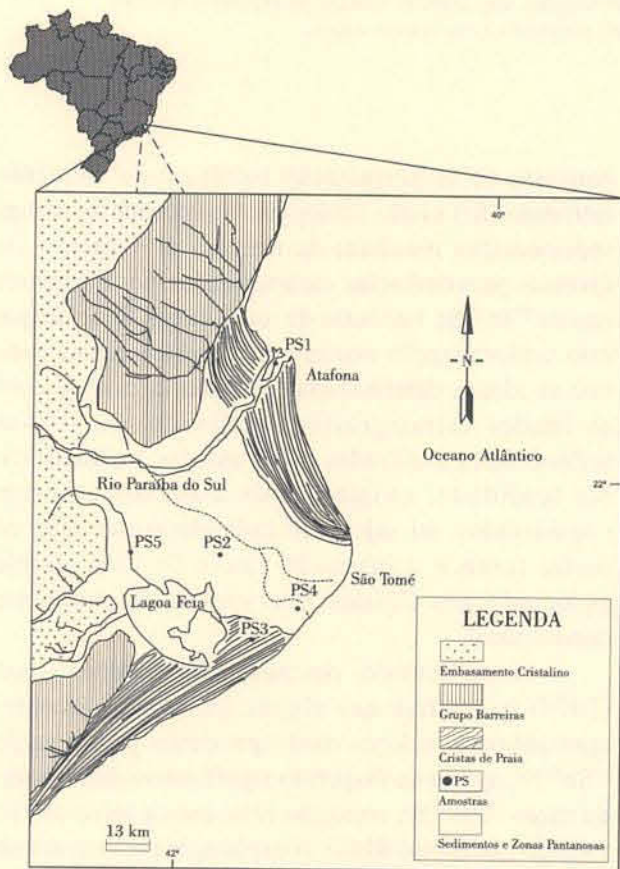


Figura 1 - Localização do Complexo Deltáico do Rio Paraíba do Sul (RJ) e pontos amostrados (modif. Silva, 1987).

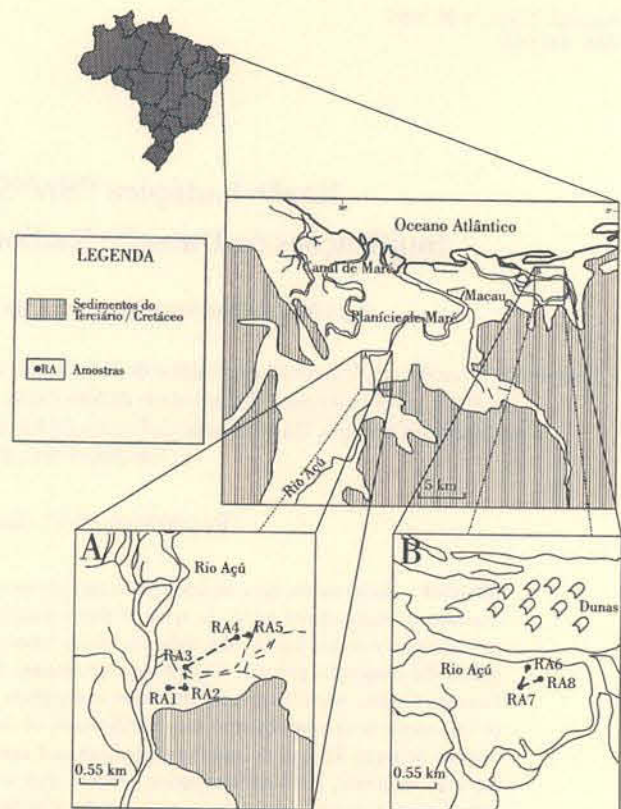


Figura 2 - Localização do Delta do rio Açú (RN) e pontos amostrados.

são predominantemente detríticos, refletindo as condições da rocha fonte. Eventualmente foram observadas algumas recristalizações bastante incipientes porém, argilominerais de origem diagênética não foram identificados mesmo com análises ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

No material analisado, foram identificados os seguintes argilominerais: caulinita, clorita, illita degradada, esmectita e interestratificados, em especial, illita-esmectita (IS). Componentes maiores são o quartzo, feldspato, plagioclásio. Pirita framboidal, embora localmente, constitui-se num componente significativo.

### Pontos de amostragem

#### Delta do Rio Paraíba do Sul (RJ)

Trata-se de um complexo deltáico com  $2500 \text{ Km}^2$  de área (Araújo *et al.*, 1975), que engloba a porção terrestre da Bacia de Campos (Fig. 1), estado do Rio de Janeiro. A área fonte dos sedimentos é a Faixa Móvel Ribeira (Província da Mantiqueira) cuja evolução final ocorreu no Proterozóico superior. Os processos deposicionais são fluviais e marinhos com o desenvolvimento de espessos prismas sedimentares, com fases transgressivas (ilhas, barreiras e lagoas) e

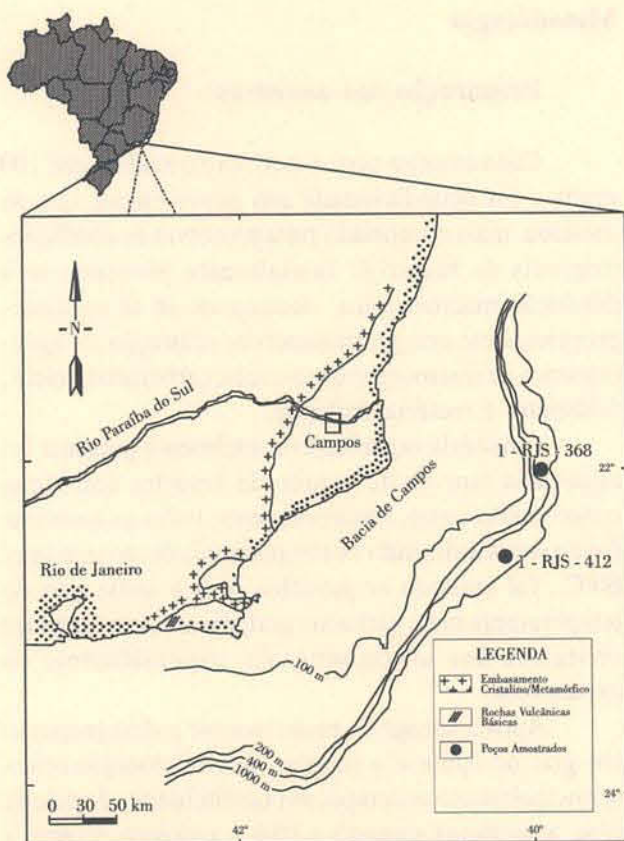


Figura 3 - Localização do talude continental da Bacia de Campos (RJ) e dos poços amostrados (modif. Dias *et al.*, 1990).

regressivas (cristas de praia) (Dias, 1981). Nesta região, foram coletadas 6 amostras (identificadas por PS1 a PS6) de sedimentos recentes, sendo 4 delas provenientes de testemunhos de sondagem rasa (até profundidades de 30 cm) e 2 outras em superfície.

#### Delta do Rio Açu (RN)

Localizado no litoral do estado do Rio Grande do Norte, nas proximidades da cidade de Macau, compreende areias finas a muito finas, siltes e níveis bem destacados de argila (Fig. 2). A área fonte dos sedimentos é a região de dobramentos Nordeste ou Província Borborema ligada ao Ciclo Brasileiro (final do Proterozóico superior). Foram coletadas 8 amostras (denominadas de RA1 a RA8) de sedimentos recentes provenientes de testemunhos de sondagens rasas, todas concentrando-se no mesmo nível entre 3,0 e 4,0 metros de profundidade.

#### Talude continental da Bacia de Campos (RJ)

A Bacia de Campos está situada no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, abrangendo uma área de 100.000 km<sup>2</sup> (Fig. 3). Na região representativa do seu talude continental foram coletadas 22 amostras de

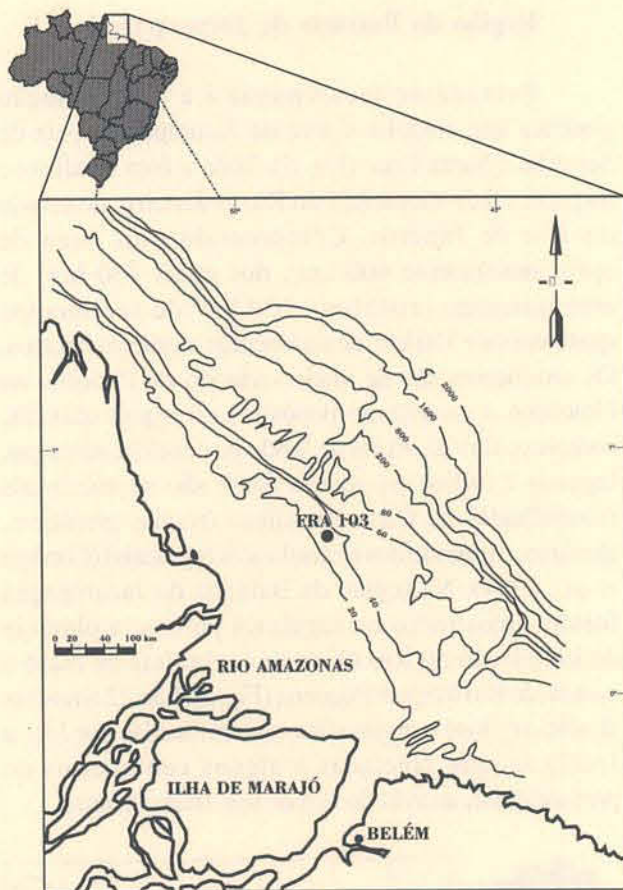


Figura 4 - Localização da plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM) e ponto amostrado (modif. Nittrouer *et al.*, 1988).

sedimentos compreendendo silte e argila. Foram amostrados dois poços da Petrobras: 1-RJS-368 (11 amostras em profundidade variando de 4 a 144 metros; identificadas por TA1 a TA11) e 1-RJS-412 (11 amostras em profundidades variando de 0,15 a 90 metros; identificadas por TA12 a TA22) realizados para sondagens geotécnicas, visando fixação de plataforma de produção de petróleo.

#### Plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM)

A Foz do Rio Amazonas, na margem continental brasileira, tem 700 km de extensão e largura de até 250 km (Appi *et al.*, 1988) (Fig. 4). Os sedimentos provêm da região dos Andes (Cretáceo-Terciário e Pré-Cambriano), do Escudo das Guianas, do Guaporé (Pré-Cambriano) além de rochas sedimentares e vulcânicas de idade meso-terciária. Foram coletadas 6 amostras de silte argiloso (anotadas como FRA1 a FRA6), provenientes de um testemunho (FRA-103, Fig. 4) coletado na plataforma interna. As profundidades das amostras variam de 0 até 60 cm, em intervalos regulares de 10 cm.

## Região da Baixada de Jacarepaguá (RJ)

Baixada de Jacarepaguá é a denominação genérica que engloba a área de Jacarepaguá, baía de Sepetiba e Santa Cruz (Fig. 5). Toda a área localiza-se na parte sul do município do Rio de Janeiro, no estado do Rio de Janeiro. Compreende uma área de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, dos quais 130 km<sup>2</sup> de embasamento cristalino, 120 km<sup>2</sup> de sedimentos quaternários e 150 km<sup>2</sup> de sedimentos marinhos imersos. Os sedimentos são de idade variando do Plioceno ao Holoceno e constituem depósitos de leques aluviais, complexo fluvial, areias de fundo de enseada, restingas, lagunas e turfas. As rochas fonte são supracrustais retrabalhadas no Ciclo Brasileiro (rochas graníticas, alcalinas, metamorfitas e cataclásitos regionais) (Cordani *et al.*, 1984). Na região da Baixada de Jacarepaguá foram amostrados os seguintes pontos: a planície de inundação do Rio Guandu, a planície de maré e o canal do Rio Vargem Pequena (Fig. 5). São 22 amostras de silte argiloso e argila síltica (identificadas por JA1 a JA22) sempre coletadas a alguns centímetros de profundidade, através do uso de um trado manual.

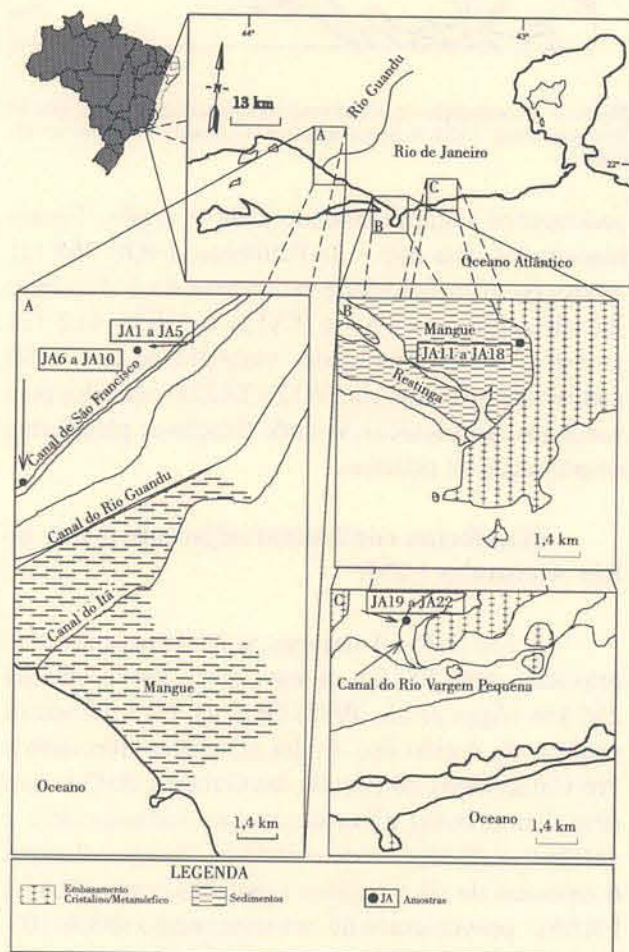


Figura 5 - Localização da Baixada de Jacarepaguá (RJ) e pontos amostrados.

## Metodologia

### Preparação das amostras

Cada amostra perfazendo aproximadamente 100 gramas foi acondicionada em papel Saran, que se mostrou mais apropriado para preservar as condições originais do material. Inicialmente procedeu-se à descrição macroscópica destacando-se as seguintes propriedades: cor, granulometria, saturação de água, presença de microorganismos, sais, carbonatos, micas, feldspatos e matéria orgânica.

A matéria orgânica eventualmente presente foi eliminada através do ataque da amostra com água oxigenada comum. Posteriormente, todas as amostras foram secas utilizando-se temperaturas de, no máximo, 60°C. Tal cuidado se justifica pois a utilização de temperaturas mais elevadas poderia afetar a estrutura cristalina dos argilominerais, especialmente os expansivos.

Após a secagem, processou-se a desagregação em gral de ágata e a triagem dos microorganismos (principalmente as carapaças constituídas de calcita e/ou aragonita) quando então a amostra recebe a denominação de rocha total (RT). Em algumas amostras previamente selecionadas foi também separada a fração inferior a 2 micra ( $F < 2 \mu m$ ) através do uso de centrifuga.

A identificação da mineralogia presente nas amostras (tanto RT como na  $F < 2 \mu m$ ) foi obtida com o uso de técnicas de difratometria de raios-X (DRX), seguindo-se o procedimento padrão de Brown & Brindley (1980). Estas análises foram realizadas no Centro de Pesquisas da Petrobras - CENPES, utilizando-se um difratômetro de raios X modelo Rotaflex RU 200Z da RIGAKU com anodo de cobre, monocromador de grafite, fendas de 1°, 80 mA e 40 kV.

Análises ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi, modelo S-450 do Centro de Pesquisas da Petrobras - CENPES foram empregadas para analisar as evidências morfológicas que permitissem a identificação de possíveis eventos de recristalização nos argilominerais.

Para as análises dos teores de Rb, Sr e da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , as amostras foram atacadas com HCl para a remoção do carbonato de cálcio eventualmente associado. Os teores semi-quantitativos e quantitativos de Sr e de Rb foram determinados por fluorescência de raios X, segundo os procedimentos propostos por Kawashita (1972). O elemento Sr foi então separado após a digestão química da amostra (com uso combinado de HF e  $\text{HClO}_4$ ) e a passagem

em colunas de resinas de trocas catiônicas (granulometria entre 200 e 400 mesh, tipo AG 50 W - X8, Biorad).

A composição isotópica do Sr foi determinada no espectômetro de massa VG-354 do Centro de Pesquisas Geocronológicas - CPGeo do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - USP, com coletor simples, que apresentou, no período correspondente as análises, em 56 determinações do padrão de Sr NBS-987, utilizado internacionalmente, resultados com média de  $0,71025 \pm 0,0004$  ( $\sigma$ ) para a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  normalizada para  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$ .

### Geoquímica do Sr e do Rb

O Rubídio (Rb) pertence ao Grupo IA (metais alcalinos) da Tabela Periódica, cuja principal característica é a presença de um único elétron de valência no orbital *s* que, por ser facilmente removido, origina a carga +1 e propicia ligações iônicas com o oxigênio e os halogênios. O Rb, na natureza, não forma minerais próprios e é sempre encontrado como impureza nos minerais potássicos, devido ao seu raio iônico (1,48Å) ser muito semelhante ao do potássio (K) (1,34Å). O Rb apresenta dois isótopos naturais:  $^{87}\text{Rb}$  e  $^{85}\text{Rb}$ , em proporção de  $27,8346 \pm 0,0132\%$  e  $72,1654 \pm 0,03\%$  respectivamente, e com razão  $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb}$  igual a  $2,59265 \pm 0,00170$  (Faure, 1986).

O Estrôncio (Sr) pertence ao Grupo IIA da Tabela Periódica, cujos elementos químicos apresentam 2 elétrons de valência no orbital *s* e formam íons com a carga +2. Este elemento forma ligações iônicas com elementos não metálicos, incluindo-se aí o Oxigênio. Possui raio iônico (1,13Å) próximo ao íon  $\text{Ca}^{2+}$  (0,99Å), tornando possível a substituição deste pelo  $\text{Sr}^{+2}$  em alguns minerais, particularmente aragonita. O elemento Sr, ao contrário do Rb, forma minerais próprios tais como a estroncianita ( $\text{SrCO}_3$ ) e a celestita ( $\text{SrSO}_4$ ). Apresenta 4 isótopos de ocorrência natural:  $^{84}\text{Sr}$  (0,55%),  $^{85}\text{Sr}$  (9,75%),  $^{87}\text{Sr}$  (6,96%) e  $^{88}\text{Sr}$  (86,74%). A razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  no Sr metálico é de 0,7119 e na água do mar é  $0,70906 \pm 0,00003$  (Faure, 1986).

Neste sentido, análises químicas das amostras PS1 a PS6 (correspondentes ao delta do Rio Paraíba do Sul, RJ), mostraram a associação do  $\text{K}_2\text{O}$  com o Rb e do  $\text{CaO}$  com o Sr. Há uma excelente correlação entre o  $\text{CaO}$  e o Sr, evidenciando o comportamento geoquímico semelhante desses elementos (Shaomou *et al.*, 1988; Goldschmidt, 1970). A correlação entre o  $\text{K}_2\text{O}$  e Rb, apesar de ocorrer, não é tão perfeita, talvez devido ao fato do íon  $\text{K}^+$  ser lixiviado mais rapidamente que o íon  $\text{Rb}^+$ , quando do intemperismo (Clauer, 1981) e ao fato do raio iônico do Rb ser levemente superior

ao do K, o que faz com que o Rb se fixe melhor na estrutura dos argilominerais (Sawhney, 1972).

Durante a atuação de processos intempéricos em rochas ígneas, os minerais contendo K e Rb são mais resistentes do que aqueles que contem Ca e Sr. Assim sendo, Ca e Sr são lixiviados desde os estágios iniciais do intemperismo, enquanto o K e o Rb são lixiviados principalmente nos estágios mais avançados. Como consequência, a relação Rb/Sr de uma rocha alterada aumenta em relação à rocha não alterada.

O Sr removido das rochas concentra-se nos oceanos, onde é um dos elementos traço mais abundantes. A concentração do Sr e as razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nos sedimentos são o resultado da mistura do Sr herdado da rocha fonte (contido nos minerais detríticos) e do Sr adsorvido no meio ambiente (águas da bacia e/ou intersticiais presentes nos poros). Com a adsorção do Sr do meio ambiente, tende a haver o aumento do teor de Sr no sedimento e a diminuição das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , que tendem ao valor da água do mar: 0,709.

O Rb precipita-se principalmente a partir da sua adsorção preferencial pelos argilominerais, a qual é mais eficiente que a do K devido ao maior raio iônico do Rb.

Tais processos ocorrem após a floculação e deposição do material provavelmente no que se convencionou chamar de diagênese precoce (Singer & Muller, 1983).

### Halmirólise e diagênese

Halmirólise envolve processos ainda pouco estudados na literatura (Hummel, 1922; Packam & Crook, 1960; Russel, 1970 e Robertson, 1974) e refere-se às primeiras trocas físico-químicas e químicas significativas observadas na interface sedimentos/águas marinhas, que visam a estabelecer o equilíbrio exigido pelo novo ambiente. O íon  $\text{Ca}^{+2}$ , acompanhado pelo  $\text{Sr}^{+2}$ , presente nos argilominerais, é substituído pelo  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$  (juntamente com o  $\text{Rb}^+$ ) ou  $\text{Na}^+$ , normalmente presentes na água do mar. Esse é um processo rápido, que ocorre em espaço de tempo de até poucos anos (Russel, 1970).

A presença de argilominerais expansivos é essencial para os fenômenos de trocas catiônicas associadas com a halmirólise (Drever, 1971). Russel (1970) mostrou que os argilominerais reagem com a água do mar somente até o limite da sua capacidade de troca catiônica e que aproximadamente 2/3 da perda relativa dessa capacidade está relacionada com a fixação do  $\text{K}^+$  e, conseqüentemente, do  $\text{Rb}^+$  na estrutura desses minerais. Millot (1970) propôs que a

regeneração da illita degradada e da clorita detrítica, a partir de interestratificados do tipo desordenado, ocorreria quando da adsorção dos íons  $K^+$  e  $Mg^{+2}$  pelos argilominerais.

Considera-se que os processos de halmirólise ocorrem quando o material ainda está em suspensão. A troca de cátions e a floculação dos argilominerais parecem ser processos quase concomitantes (Larsen & Chilingar, 1983). Dentro do campo de atuação da halmirólise estariam, ainda, aquelas recristalizações dos argilominerais que se processam de forma muito incipiente e a formação de pequenos cristais de pirita e halita.

Após a floculação e a sedimentação, nos espaços porosos preenchidos por águas intersticiais, ocorrem eventuais processos de interação entre os argilominerais e as águas conatas, caracterizando então o processo denominado de diagênese precoce (Singer & Muller, 1983). Nesse contexto, os argilominerais, em função das suas dimensões e da sua estrutura, são os mais suscetíveis às mudanças diagenéticas. Denomina-se diagênese ao conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nas rochas sedimentares, durante o período compreendido entre a deposição e o metamorfismo (Read & Watson, 1962; Millot, 1970; Larsen & Chilingar, 1983).

### RESULTADOS OBTIDOS

A datação radiométrica pelo método isocrônico Rb/Sr pressupõe, como condição fundamental, que o conjunto de amostras analisadas apresente a uniformização dos valores da razão isotópica  $^{87}Sr/^{86}Sr$ , quando da deposição ou logo após a sedimentação, assim como uma adequada dispersão dos valores da razão  $^{87}Rb/^{86}Sr$ , condições que permitem uma boa definição da linha isócrona (Faure, 1986).

Os sedimentos recentes coletados e analisados neste trabalho mostraram que existem condições em que estas premissas (ou seja, uniformização da razão  $^{87}Sr/^{86}Sr$  e dispersão da razão  $^{87}Rb/^{86}Sr$ ) ocorrem. Para tanto foram analisadas as influências de diversas variáveis tais como: amostragem, área fonte, fatores ambientais, granulometria, mineralogia e soterramento.

### Amostragem

Cordani *et al.* (1978, 1985A) sugeriram que uma amostragem adequada é essencial para o sucesso da aplicação do método isocrônico Rb/Sr em rochas sedimentares argilosas. Isso porque, prevalecendo os processos de mistura mecânica do material detrítico

na bacia deposicional, quanto menores as distâncias entre as amostras coletadas dentro de uma mesma camada sedimentar, maior será a possibilidade de se obter amostras sob forma de rocha total contendo Sr cuja composição isotópica tenha sido aproximadamente uniforme no momento da deposição. O esquema ideal para a amostragem de rochas sedimentares visando a sua datação radiométrica pode ser observado na figura 6 (Thomaz-Filho & Lima, 1978).

Os sedimentos dos diferentes ambientes deposicionais aqui analisados confirmaram a influência do fator amostragem, quando se pretende obter razões  $^{87}Sr/^{86}Sr$  iniciais aproximadamente uniformes. No caso das amostras coletadas próximas umas das outras, houve uma visível tendência à uniformização, quando estas foram analisadas sob forma de rocha total (RT).

Assim, os sedimentos coletados em intervalos centimétricos na planície de maré da Baixada de Jacarepaguá (RJ) (Fig. 5) mostraram valores  $^{87}Sr/^{86}Sr$  entre 0,7187 e 0,7195 (Tab. 1), que podem ser

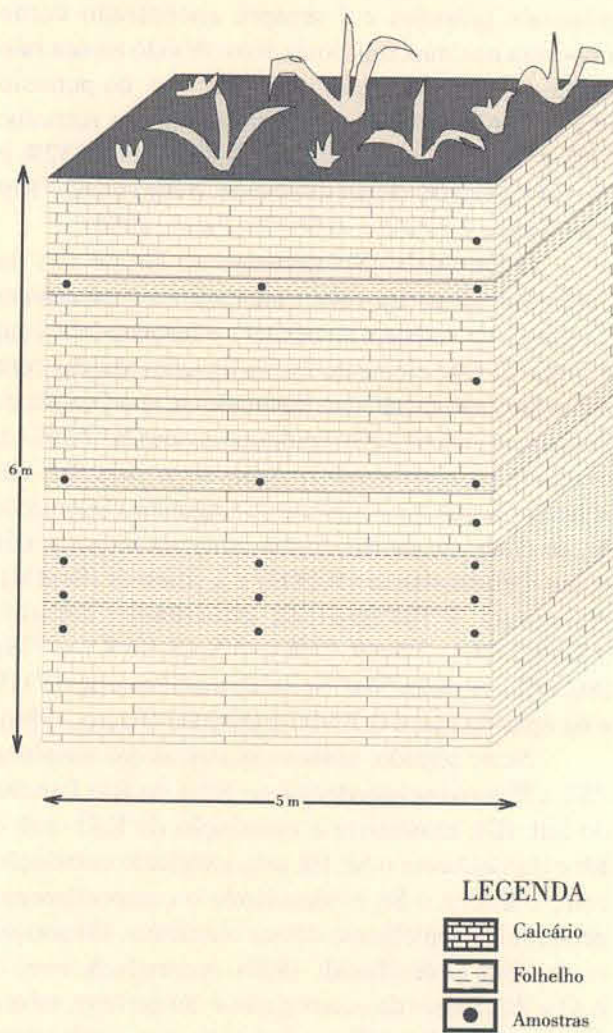
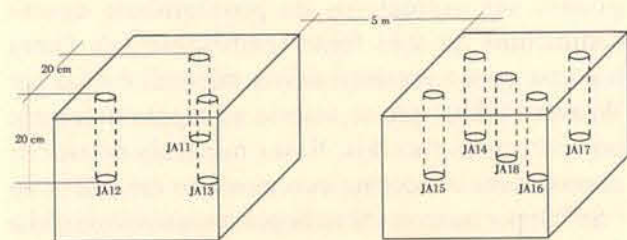


Figura 6 - Modelo teórico de amostragem para datação radiométrica de rochas sedimentares (modif. Thomaz-Filho & Lima, 1979).

considerados uniformes (Fig. 7). A razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  apresenta valores entre 1,6 e 2,4. Esses dados não estão de acordo com as idéias de Morton (1983), quando afirma que o processo mecânico sugerido por Cordani *et al.* (1978, 1985A) pode perfeitamente uniformizar os valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (inicial) mas também tenderá a uniformizar os valores da razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ .

Sedimentos coletados na região da plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM) (Fig. 4), em intervalos verticais regulares de 10 cm mostram valores variando entre 0,7146 e 0,7169 (Tab. 2).



Am.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
JA11	0,71889	1,694
JA12	0,71872	1,919
JA13	0,71928	2,482

Am.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
JA14	0,71951	2,227
JA15	0,71956	2,701
JA16	0,71952	2,139
JA17	0,71951	1,932
JA18	0,71915	2,436

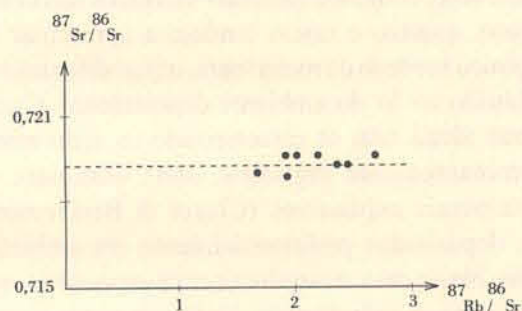


Figura 7 - Esquema de amostragem utilizado na planície de maré da Baixada de Jacarepaguá (RJ) e isócrona resultante.

Já no caso das amostras coletadas relativamente espaçadas uma das outras, verificou-se uma significativa dispersão dos valores das razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . É o caso do Delta do Rio Paraíba do Sul (RJ) (Fig. 1), onde amostras coletadas a distâncias de dezenas de quilômetros mostram valores entre 0,7099 e 0,7289 (Tab. 3) e do Delta do Rio Açu (RN) (Fig. 2) (Tab. 4). Neste caso, embora as amostras façam parte de um mesmo intervalo estratigráfico estão espaçadas por quilômetros e apresentam razões entre 0,7117 e 0,7216.

De todos os esquemas de amostragem avaliados, aquele utilizado na região da Baixada de Jacarepaguá

(RJ) foi o que aparentou ser o mais indicado, pois identificou microambientes (escala centimétrica)

Tabela 1 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total coletadas na região da Baixada de Jacarepaguá (RJ).

AMOSTRA	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
JA1	74,5	54,0	0,728000	3,999
JA2	79,0	54,5	0,727790	4,201
JA3	41,0	40,5	0,738670	2,937
JA4	103,0	115,0	0,739200	3,825
JA5	95,0	72,0	0,728350	2,599
JA6	0,0	23,0	0,719480	0,000
JA7	6,0	11,0	0,720380	1,581
JA8	1,0	9,0	0,717410	0,322
JA9	0,0	10,0	0,717910	0,000
JA10	0,0	15,0	0,718610	0,000
JA11	43,0	73,5	0,718890	1,694
JA12	53,0	80,0	0,718720	1,919
JA13	63,0	73,5	0,719280	2,482
JA14	93,0	121,0	0,719510	2,227
JA15	96,0	103,0	0,719560	2,701
JA16	79,0	107,0	0,719520	2,139
JA17	78,0	117,0	0,717951	1,932
JA18	95,0	113,0	0,719150	2,436
JA19	193,5	262,5	0,716700	2,134
JA20	220,5	303,5	0,717110	2,104
JA21	207,0	307,5	0,717430	1,949
JA22	170,5	361,5	0,713900	1,365

Tabela 2 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total (RT) coletadas na plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM).

AMOSTRA	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
FRA1	121,0	119,5	0,71617	1,766
FRA2	105,5	222,0	0,71467	1,376
FRA3	78,5	146,0	0,71687	1,560
FRA4	119,0	209,0	0,71609	1,649
FRA5	114,0	218,0	0,71524	1,515
FRA6	147,0	186,0	0,71697	2,289

Tabela 3 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total coletadas na região do Delta do Rio Paraíba do Sul (RJ).

AMOSTRA	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
PS1	75,5	92,7	0,728930	2,362
PS2	65,0	201,7	0,716740	0,934
PS3	68,8	150,1	0,716020	1,328
PS4	30,9	212,7	0,711880	0,421
PS5	56,8	42,5	0,726680	3,866
PS6	11,4	1416,0	0,709920	0,023



Tabela 4 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total coletadas na região do Delta do Rio Açú (RN).

AMOSTRA	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
RA1	115,0	408,0	0,713780	0,816
RA2	140,0	166,0	0,720690	2,444
RA3	113,0	409,0	0,713240	0,800
RA4	151,0	122,0	0,721690	3,587
RA5	140,0	205,0	0,717560	1,978
RA6	101,0	460,0	0,712080	0,636
RA7	111,0	427,0	0,712150	0,753
RA8	108,0	478,0	0,711750	0,654

caracterizados por composições isotópicas semelhantes.

### Área fonte

Sedimentos recentes apresentam predomínio de minerais detríticos, que trazem Sr radiogênico herdado da rocha fonte e, conseqüentemente, alta razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Whitney & Hurley, 1964; Dasch, 1969; Cordani *et al.*, 1978 e Morton, 1983).

A composição mineralógica das amostras da Baixada de Jacarepaguá (RJ) (Fig. 5), de forma geral, é semelhante, refletindo área fonte comum (rochas granito-gnáissicas): feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, caulinita, illita degradada e interestratificado illita-esmectita. Pequenas diferenças são observadas nos argilominerais detríticos como, por exemplo, na caulinita que é mais abundante nas amostras coletadas na planície de inundação enquanto que a illita, ocorre em maiores teores nas amostras da planície de maré.

As amostras JA1 a JA5, próximas ao embasamento aflorante (Fig.5), apresentam valores bastante elevados para as razões isotópicas (0,728 a 0,739) (Tab. 1), atribuídos a presença de fragmentos de feldspato potássico, plagioclásio e minerais micáceos, que contem Sr radiogênico herdado da área fonte. Isto confirma que os minerais detríticos apresentam excesso de  $^{87}\text{Rb}$  em relação a água do mar, conforme é documentado por Dasch (1969).

As amostras JA6 a JA10 (Tab. 1), já nas proximidades do Rio Guandu (Fig. 5), apresentam composição mineralógica muito simples, onde predominam minerais como o quartzo, caulinita e traços de gibbsita, indicativos de intenso processo de intemperismo químico. Assim, os minerais potássicos foram totalmente lixiviados e o teor de Rb atinge valores extremamente baixos (entre 0 e 6 ppm). O Sr, com razões isotópicas de 0,7174 a 0,7203, provavelmente encontra-se adsorvido nas caulinitas, conforme demonstrado por Clauer (1979, 1981),

denunciando o Sr radiogênico herdado da rocha fonte que ainda permanece mesmo nos estágios avançados de alteração e lixiviação.

As amostras JA19 a JA22 (Tab. 1), coletadas no Canal do Rio Vargem Pequena, se caracterizam por teores mais elevados de Rb e de Sr (Rb entre 170 e 221 ppm e Sr entre 260 e 362 ppm), resultado da presença mais abundante de feldspato potássico e do plagioclásio. O predomínio do interestratificado illita-esmectita na  $F < 2\mu\text{m}$  e a presença de plagioclásio, minerais pouco resistentes ao transporte sedimentar, podem ser indicativos da proximidade desses sedimentos da área fonte (embasamento). Outra hipótese para a presença desses minerais é dada por Weaver (1989), que os associa ao rápido transporte por correntes fluviais. Esses minerais detríticos normalmente ocasionam incremento no valor da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  por trazerem Sr radiogênico herdado da rocha fonte. Apesar disso, essa razão isotópica nas amostras do canal do rio Vargem Pequena mantém-se relativamente baixa em função da eventual presença de calcita associada nestes sedimentos.

### Granulometria

A granulometria dos sedimentos é um fator importante para a aplicação da metodologia Rb/Sr. Observa-se que as frações granulométricas do tamanho silte, contendo minerais detríticos tais como feldspato, quartzo e micas tendem a apresentar Sr radiogênico herdado da rocha fonte, o qual dificilmente será diluído no Sr do ambiente deposicional. Como amostras ideais tem se caracterizado os sedimentos predominantemente argilosos, onde dominam os argilominerais expansivos (Clauer & Bonhomme, 1974), depositados preferencialmente em ambiente marinho. Nesse caso, os argilominerais expansivos, que contêm o Sr lixiviado da rocha fonte, por apresentarem estrutura relativamente aberta, facilitam as trocas tanto com o Sr da água do mar como com aquele presente nas águas intersticiais. Esses fenômenos e mais a neoformação de argilominerais nas frações granulométricas mais finas são as causas principais para explicar a uniformização da razão isotópica do Sr nos sedimentos (Giblin, 1979 in Clauer, 1982).

Morton (1983) verificou um aumento na relação Rb/Sr com o decréscimo do tamanho do grão em frações finas, onde predomina a illita, argilomineral potássico normalmente enriquecido em Rb.

A amostra PS1 (coletada no Delta do Rio Paraíba do Sul, RJ) foi preparada visando a análise das suas diferentes frações granulométricas (intervalos entre 10 e  $1\mu\text{m}$ ). Os resultados, neste caso, mostraram:

1) há mudanças na composição mineralógica, com o feldspato e a caulinita mal formada predominando nas frações mais grosseiras ( $3 < F < 10 \mu\text{m}$ ) e a illita e o interstratificado IS predominando nas frações mais finas; 2) as frações mais finas têm o teor de Sr e as razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mais baixas, aproximando-se do provável valor para as águas intersticiais. Isso resulta do fato dos minerais das frações mais finas apresentarem maiores áreas específicas, o que facilita os fenômenos de trocas químicas entre os argilominerais e o meio aquoso, além de serem mais susceptíveis a recristalizações e mesmo neoformação de minerais.

### Fatores ambientais

A experiência (com as amostras da planície de maré da Baixada de Jacarepaguá, do Talude Continental e da Foz do Rio Amazonas) tem demonstrado que os sedimentos depositados em ambiente marinho ou em contato com águas de salinidade mais elevada apresentam maior facilidade de uniformizarem os valores das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , pois as trocas iônicas processam-se mais rapidamente, embora, muito provavelmente, tais processos sejam efetivos somente a pequenas distâncias.

Spears (1974) mostrou que os folhelhos marinhos apresentam elevada concentração de K, quando comparados com aqueles depositados em outros ambientes sedimentares. Esse incremento, o referido autor atribuiu à fixação do K e, conseqüentemente do Rb e a liberação do Ca e Sr pelas estruturas dos argilominerais expansivos, quando em ambiente marinho e já associado ao processo de halmirólise. Tal processo ocasiona aumento na relação Rb/Sr e foi considerado como de extrema importância para chegar-se à horizontalização da isócrona inicial do sedimento, denominada isócrona zero, conforme idéias expostas por Cordani *et al.* (1978, 1985).

Os processos de halmirólise e provavelmente de diagênese precoce podem levar os sedimentos argilosos recentes, depositados em ambiente marinho, a razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  aproximadamente uniformes, assim como modificar sensivelmente as relações Rb/Sr nas diferentes porções do sedimento. Tal fato foi verificado nas amostras da planície de maré da Baixada de Jacarepaguá (amostras JA11 a JA18) (Tab. 1), desde que amostradas a intervalos centimétricos.

Dasch (1969), Faure & Chaudhuri (1967) e Byscae & Dasch (1971) demonstraram que os argilominerais em ambiente marinho não se equilibram isotopicamente com o Sr da água do mar, durante a

sedimentação. Os autores supõem que caso tenha ocorrido um processo de uniformização isotópica do Sr, muito provavelmente, o fenômeno estaria associado com as águas intersticiais. Neste trabalho, os resultados obtidos com os sedimentos recentes confirmam a influência da água do mar na tendência de uniformizar os valores das razões isotópicas do Sr, principalmente em presença de argilominerais expansivos e da atuação da halmirólise. Os valores obtidos para a uniformização foram sempre superiores ao valor da razão isotópica da água do mar atual (0,709). Razões mais elevadas tornam-se plausíveis para o Sr contido na água dos poros, desde que haja influência dos produtos de dissolução principalmente dos minerais micáceos e dos feldspatos potássicos associados. Essa dissolução libera o K e, conseqüentemente, o Rb e o Sr a ele associado para as águas intersticiais. Esta fase, provavelmente, ocorre após a floculação/deposição (halmirólise) do sedimento, associando-se com o início dos processos diagenéticos.

Conclui-se que, em ambientes marinhos ou onde haja interação com águas de salinidade mais elevada (por exemplo, planícies de maré), associados com argilominerais expansivos permitem a atuação dos processos acima descritos e facilitam a uniformização da razão isotópica do Sr. Nesse caso, a razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  associada, em última análise, ao comportamento do íon K e a capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais, pode assumir ampla variação permitindo também o espalhamento dos pontos ao longo do eixo X dos diagramas isocrônicos.

### Argilominerais

Nas análises efetuadas (Baixada de Jacarepaguá, Talude Continental e plataforma adjacente a Foz do Rio Amazonas) verificou-se maior tendência em se obter a uniformização dos valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em sedimentos com predomínio de argilominerais do tipo interstratificado illita-esmectita (IS) e da illita degradada, comprovando a sua importância. Esses argilominerais apresentam feições incipientes de recristalização que foram interpretadas como evidências de processos associados com halmirólise. Além disso, observa-se a associação com eventuais cristais de halita, possível indício da atuação de águas de alta salinidade.

As camadas dos argilominerais expansivos não são eletricamente neutras. Substituições isomórficas na estrutura cristalina ocasionam o excesso de cargas negativas desses minerais, que são balanceados de um modo geral por cátions hidratados tais como o  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Sr}^{+2}$  no espaçamento intercamadas,

sempre em função da sua alta energia de hidratação. A energia de hidratação é a propriedade dos íons, quando em solução, de serem circundados por moléculas de água. Quando a energia de hidratação do íon é elevada, as moléculas de água a ele associadas são de difícil remoção. Na estrutura dos argilominerais, esses íons previnem o colapso das camadas e são intercambiáveis com os íons presentes no meio ambiente.

Hortsman (1957) e Goldschmidt (1970) mostraram que os argilominerais apresentam enriquecimento relativo do Rb em relação ao K. O Rb apresenta um baixo valor para a energia de hidratação, quando comparado aos outros elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Isso significa que o envelope de moléculas de água, que normalmente circunda os íons, quando em solução, pode ser facilmente removido do Rb, permitindo então que eventuais posições intercambiáveis, presentes na estrutura dos argilominerais expansivos, sejam preenchidas por este íon anidro. Tal fato ocasiona o colapso das camadas para espessuras de 10 Å e a conseqüente retenção do Rb.

Algumas amostras enriquecidas em caulinita detríticas (amostras JA6 a JA10 da planície de inundação do Rio Guandu, Baixada de Jacarepaguá) (Tab. 1) também mostraram uma certa tendência para a uniformização isotópica do Sr embora as razões  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  sejam muito baixas tendendo a zero. Ao argilomineral caulinita, cujo domínio é associado com intensos processos de intemperismo químico, pode-se verificar dois comportamentos distintos. O conjunto de amostras JA1 a JA5, quando observado ao MEV mostra a transformação gradual dos fragmentos de feldspato potássico em caulinita. Essas amostras apresentam elevados valores para a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Tab. 1), influência destes fragmentos detríticos que trazem Sr radiogênico herdado da rocha fonte. São amostras que foram coletadas na planície de inundação porém nas proximidades do embasamento aflorante.

O segundo grupo (JA6 a JA10), que somente apresenta caulinita, quartzo e gibbsita, ou seja mineralogia indicativa da atuação de intensos processos de lixiviação, mostra certa tendência da razão isotópica do Sr para um valor uniforme. Fordham (1973) relata que, em argilominerais, o Sr se localiza preferencialmente em posições de adsorção que, no caso da caulinita, são as bordas das camadas do mineral. Essa constatação fez Clauer (1979) supor que as caulinitas podem adsorver e trapear Sr do ambiente. Isso contribuiria para o rebaixamento dos elevados valores da razão inicial destes argilominerais, relacionados ao Sr radiogênico herdado da rocha fonte. Hossam (inf. verbal) comenta que o grau de adsorção

de um elemento pela caulinita está relacionado à relação carga/superfície específica. Assim, elementos como o Rb, onde esta razão é reduzida, são pouco adsorvidos em comparação com elementos tais como o Sr, onde esta relação é mais elevada. Além disso, não existe posição estrutural para íons das dimensões do K ou do Rb, o que faz com que ocorram como impurezas ou íons adsorvidos. Isto explica os baixos teores de Rb obtidos com estas caulinitas, coletadas na planície de inundação porém já nas proximidades da foz do Rio Guandu, distantes do embasamento aflorante.

### Soterramento

Os processos diagenéticos, que evoluem com o soterramento do sedimento incluem a conversão da esmectita no interstratificado illita-esmectita (Hower *et al.*, 1976). Como estes processos se iniciam pelas frações mais finas supõe-se que para um sedimento, a idade isocrônica da  $F < 2\mu\text{m}$  seria mais nova do que a idade RT. No entanto, se como mostraram Singer & Stoffers (1980), essa transformação for rápida e se

Tabela 5 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total e amostras da fração fina ( $F < 2\mu\text{m}$ ) coletadas no Talude Continental da Bacia de Campos (RJ).

AMOSTRA	FRAÇÃO	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
TA 1	RT	85,1	212,3	0,712260	1,158
	$F < 2\mu\text{m}$	135,5	196,5	0,711880	1,820
TA 2	RT	80,0	254,4	0,712160	0,911
	$F < 2\mu\text{m}$	143,0	216,0	0,712950	1,917
TA 3	RT	99,4	272,9	0,711820	1,055
	$F < 2\mu\text{m}$	---	---	---	---
TA 4	RT	110,2	192,4	0,713310	1,659
	$F < 2\mu\text{m}$	---	---	---	---
TA 5	RT	61,5	365,5	0,710400	0,487
	$F < 2\mu\text{m}$	---	---	---	---
TA 6	RT	56,3	556,8	0,710960	0,553
	$F < 2\mu\text{m}$	---	---	---	---
TA 7	RT	63,8	931,8	0,709450	0,175
	$F < 2\mu\text{m}$	71,2	71,2	0,710020	0,317
TA 8	RT	80,9	361,1	0,710210	0,332
	$F < 2\mu\text{m}$	115,0	474,5	0,710620	0,702
TA 9	RT	84,0	392,1	0,710320	0,645
	$F < 2\mu\text{m}$	155,0	256,0	0,711670	1,753
TA 10	RT	80,5	361,1	0,710740	0,620
	$F < 2\mu\text{m}$	149,0	284,0	0,711720	1,519
TA 11	RT	93,5	252,1	0,710410	1,077
	$F < 2\mu\text{m}$	138,0	163,0	0,712120	2,451

iniciar logo após a deposição, as idades RT e  $F < 2\mu\text{m}$  devem indicar valores muito próximos.

As amostras coletadas no Talude Continental são ideais para o estudo do efeito soterramento em sedimentos comprovadamente recentes (Tabs. 5 e 6). Os sedimentos inconsolidados quando observados ao MEV apenas apresentam algumas feições muito incipientes de recristalização. Além disso, não foram observadas diferenças sistemáticas entre os argilominerais do topo e da base do intervalo ou seja, trata-se de um intervalo homogêneo.

O valor da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das amostras TA1 a TA11 (Tab. 5) apresenta valores entre 0,711 e 0,713, estabilizando-se em 0,710 a partir da amostra TA5 (65m). Assim, desta profundidade até 145 m (TA11), há uma tendência da razão fixar-se em torno deste valor, indicando um possível equilíbrio da razão isotópica dos minerais com aquela da água intersticial do sedimento. Comportamento semelhante também é observado para as amostras TA12 a TA 22 (Tab. 6). Esses sedimentos (amostras TA1 a TA 22) encontram-se em uma região com lâmina de água em torno de 700 m. Sabe-se que a razão isotópica da água do mar atual está em torno de 0,709 (Faure, 1986) mas o valor mais elevado obtido pode ser razoável para o Sr da água do poro, o qual

Tabela 6 - Razões isotópicas para amostras do tipo rocha total coletadas no Talude Continental da Bacia de Campos (RJ).

AMOSTRA	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
TA12	71,0	733,0	0,710190	0,280
TA13	96,0	450,0	0,711160	0,618
TA14	119,0	284,0	0,712040	1,214
TA15	103,0	279,0	0,711930	1,069
TA16	124,0	235,0	0,712900	1,528
TA17	109,0	244,0	0,712530	1,294
TA18	108,0	362,0	0,712850	1,194
TA19	91,0	250,0	0,712010	1,054
TA20	82,0	464,0	0,710520	0,512
TA21	121,0	422,0	0,710770	0,830
TA22	106,0	235,0	0,711680	1,306

pode tornar-se mais radiogênico pela contribuição dos produtos de dissolução especialmente de minerais potássicos.

A  $F < 2\mu\text{m}$  tende a seguir o comportamento da RT (Tab. 5). Os valores obtidos para esta fração parecem mostrar um pequeno incremento com a profundidade. Esse fato leva à suposição do aumento do  $^{87}\text{Sr}$ , explicável pelo estabelecimento de um sistema

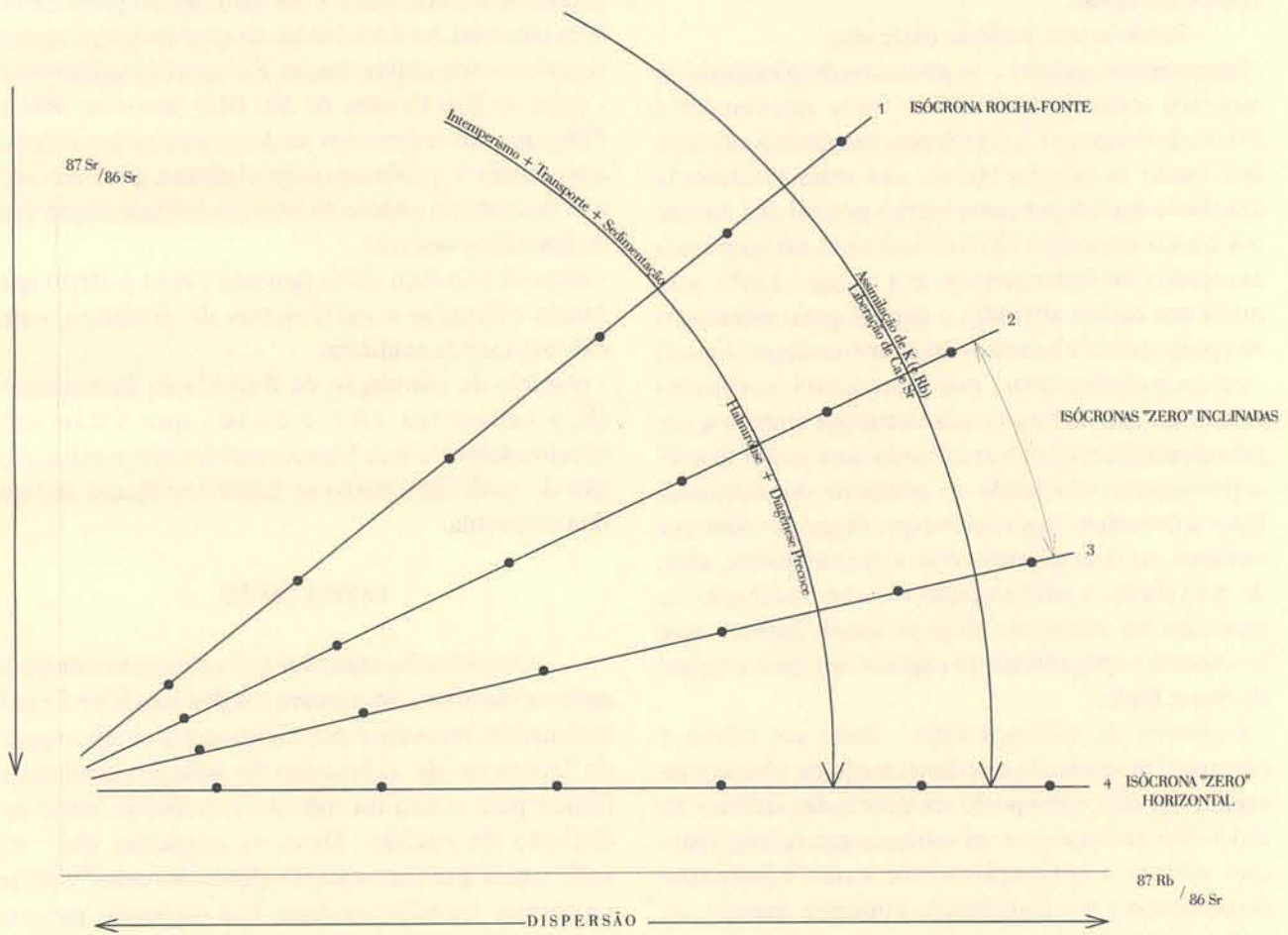


Figura 8 - Processos que ocasionam a horizontalização da isócrona.

fechado (Clauer *et al.*, 1990) onde as trocas iônicas ocorreriam entre as  $F < 2\mu\text{m}$  e  $F > 2\mu\text{m}$ , sem contribuição externa. Nesse caso, o  $^{87}\text{Sr}$  liberado a partir da dissolução do feldspato potássico e mica (presentes na fração mais grosseira), é incorporado ao interstratificado presente na fração mais fina. Esses argilominerais, quando mal cristalizados como os das amostras analisadas, apresentam grande número de posições intercambiáveis, quando comparados com os minerais bem cristalizados, facilitando as reações associadas a diagênese precoce, concomitantes ou não ao evento deposicional.

### Processos geoquímicos e sedimentares que levam à isócrona zero horizontal

Com os resultados obtidos, a partir da análise de sedimentos recentes coletados em diversos ambientes, verifica-se que existem processos que contribuem para a uniformização das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e a dispersão das razões  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ . A figura 8 esquematiza a evolução destes processos geoquímicos e sedimentares que ocasionam a horizontalização da isócrona zero quando da deposição do sedimento, premissa básica para o uso do método isocrônico Rb/Sr.

Sendo assim, pode-se dizer que:

- intemperismo químico - os processos de intemperismo químico atuando nas rochas fonte ocasionam a lixiviação inicial do Ca e do Sr pois os minerais cálcicos, tais como os plagioclásios, são mais facilmente alteráveis em relação aos minerais potássicos. Assim, o K e o Rb somente serão lixiviados nos estágios mais avançados do intemperismo e a relação Rb/Sr será maior nas rochas alteradas o que irá gerar diferenças no aporte desses elementos no ambiente deposicional;
- transporte sedimentar - este processo irá auxiliar no sentido de que os fragmentos detríticos tenham a sua granulometria reduzida resultando num maior teor de argilominerais chegando ao ambiente deposicional. Estes apresentam superfícies específicas elevadas que auxiliam as trocas químicas com o meio ambiente, além de permitirem a neoformação e a recristalização de minerais no ambiente deposicional, fatores que favorecem o apagamento do registro isotópico original da rocha fonte;
- ambiente de sedimentação - deve ser calmo e adequado propiciando a sedimentação de alto teor de argilominerais; o tempo de residência dos detritos no fluido deposicional deve ser suficientemente longo para que ocorra a interação entre estes elementos favorecendo a sua distribuição uniforme quando da sedimentação.

- halmirólise - conjunto de fenômenos de trocas físico-químicas e químicas, muito eficientes a pequenas distâncias, que ocorrem na interface sedimentos/águas-marinhas. São processos que visam à obtenção do equilíbrio químico exigido pelo novo ambiente favorecendo ao aumento da relação Rb/Sr e à uniformização isotópica do Sr;

- diagênese precoce - processos que ocorrem após a halmirólise e a sedimentação. Estão ligados principalmente a presença de argilominerais expansivos cuja estrutura facilita as trocas químicas entre o sedimento e as águas intersticiais, facilitando a uniformização isotópica do Sr. São processos que devem iniciar logo após a sedimentação.

Assim, quando todos esses eventos, ou uma boa parte deles, ocorreram, há uma forte perspectiva de obter-se à isócrona zero horizontal, caso dos sedimentos coletados na:

- planície de maré (amostras JA11 a JA18) e no canal do Rio Vargem Pequena (JA19 a JA22), da Baixada de Jacarepaguá (RJ);

- plataforma continental adjacente à Foz do Rio Amazonas (AM) (amostras FRA1 a FRA6);

- talude continental na região do Rio de Janeiro (RJ) (amostras TA1 a TA11).

Não tendo ocorrido alguns dos eventos acima expostos, a tendência é a dos sedimentos partirem de uma isócrona zero inclinada, da qual resultam idades superiores à da sedimentação. É o caso dos sedimentos:

- delta do Rio Paraíba do Sul (RJ) (amostras PS1 a PS6), que são sedimentos predominantemente sílticos, amostrados a quilômetros de distância, com elevado teor de caulinita e baixo de interstratificado expansivo do tipo illita-esmectita;

- delta do Rio Açu (RN) (amostras RA1 a RA8) que foram coletadas a quilômetros de distância, com elevado teor de caulinita;

- planície de inundação da Baixada de Jacarepaguá (RJ) (amostras JA1 a JA10) que estão nas proximidades da área fonte e também apresentam alto teor de caulinita e baixo de interstratificado do tipo illita-esmectita.

### CONCLUSÕES

Os resultados aqui obtidos forneceram subsídios para o estudo do comportamento dos íons Rb e Sr nos sedimentos recentes e possibilitaram a comprovação do fenômeno da uniformização isotópica, premissa básica para o uso do método isocrônico Rb/Sr na datação de rochas. Deve-se ressaltar que os sedimentos que apresentam valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  uniformes também mostram boa dispersão para os valores da razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ .

Com base no acima exposto pode-se concluir que os seguintes critérios, quando obedecidos, irão contribuir para o sucesso de uma datação de rochas sedimentares pelo método da isócrona Rb/Sr em rocha total (RT):

- utilização de rochas sedimentares com elevado teor de fração argila;
- fração fina onde predominem os argilominerais expansivos;
- deposição em meio aquoso, preferencialmente associada a águas marinhas;
- amostragem de preferência seguindo a proposição de Thomaz-Filho & Lima (1979).

**Agradecimentos-** Este trabalho é parte da tese de doutorado do autor senior apresentada no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Os autores agradecem aos técnicos do Centro de Pesquisas Geocronológicas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo apoio prestado durante a realização das análises isotópicas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appi, C.J.; Kowsmann, R.O.; Flood, R.D.; Manley, P.L. & Pirmez, C. 1988. Evolução Quaternária pós-glacial do Cone Submarino do Amazonas: um modelo retrogradante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais...** Belém, SBG. v.2, p. 451-465.
- Araújo, M.B.; Beurlen, G.; Piazza, H.D.; Cunha, M.C.C. & Santos, A.S. 1975. Projeto Rio Paraíba do Sul - **Sedimentação Deltáica Holocênica**. Salvador, Petrobrás. RPBA/Direx, 2 v. (relatório interno).
- Bofinger, V.M. & Compston, W. 1967. A reassessment of the age of the Hamilton Group, New York and Pennsylvania, and the role of inherited radiogenic <sup>87</sup>Sr. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 31:2353-2359.
- Bonhomme, M. & Segonzac, G.D. 1962. Mésures d'âge par la méthode rubidium-strontium dans les schistes de Steiges (Vosges Setentrionales). **Bulletin Scientifique des Cartes Géologiques Alsace-Lorraine**, 4: 124-137.
- Bonhomme, M.; Lucas, J. & Millot, G. 1964. Signification des déterminations isotopiques dans la géochronologie des sédiments. **Science de la Terre**, tX, n°3-4, pp. 539-565.
- Bonhomme, M.; Weber, F. & Faure-Mercuret, M. 1965. Age par la méthode rubidium-strontium des sédiments du Bassin de Frannoëville. **Bulletin Scientifique des Cartes Géologiques Alsace-Lorraine**, 21: 249-252.
- Bonhomme, M. & Prévot, L. 1968. Application de la méthode rubidium-strontium à l'étude de l'âge radiométrique de quelques dépôts du massif de La Bruche (Vosges du Nord). **Bulletin Scientifique des Cartes Géologiques Alsace-Lorraine**, 21: 215-247.
- Bonhomme, M. 1976. Mineralogie des fractions fines et datation Rb-Sr dans le Groupe Bambui (MG-Brasil). **Revista Brasileira Geociências**, 6 (4):211-222.
- Bonhomme, M. 1982. The use of Rb-Sr and K-Ar dating methods as a stratigraphic tool applied to sedimentary rocks and minerals. **Precambrian Research**, 18:5-25.
- Brookins, D.G.; Chaudhuri, S.; Dulekoz, E. 1970. Rb-Sr isotopic age of the Skridge shale (Lower Permian), Eastern Kansas. **Sedimentary Geology**, 4:103-115.
- Brown, G. & Brindley, G.W. 1980. X ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. (eds). **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. London, Mineralogical Society, p. 305-359.
- Byscae, P.E. & Dasch, E.J. 1971. The rubidium, strontium, strontium isotope system in deep sea sediments: Argentine Basin. **Journal Geophysical Research**, 76(21):5087-5096.
- Clauer, N. 1979. Relationship between the isotopic composition of strontium of newly formed continental clay minerals and their source material. **Chemical Geology**, 27: 115-124.
- Clauer, N. 1981. Strontium and argon isotopes in naturally weathered biotites, muscovites and feldspars. **Chemical Geology**, 31: 325-334.
- Clauer, N. 1982. Rubidium-Strontium method applied to sediments: certitudes and uncertainties. In: ODIN, G.S., (ed.), **Numerical Dating in Stratigraphy**. New York, Wiley, 1: 245-276.
- Clauer, N.; O'neil, J.R.; Bonnot-Courtois, C. & Holtzapffel, T. 1990. Morphological, chemical and isotopic evidence for an early diagenetic evolution of detrital smectite in marine sediments. **Clays and Clay Minerals**, 38 (1): 33-46.
- Compston, W. & Pidgeon, R.T. 1962. Rubidium-strontium dating of shales by the whole-rock method. **Journal Geophysical Research**, 67:3493-3502.
- Cordani, U.G.; Kawashita, K. & Thomaz-Filho, A. 1978. Applicability of the rubidium-strontium method to shales and related rocks. In: COHEE, G.V. *et al.*, (eds), **Contributions to the Geologic Time Scale**, Amer. Assoc. Pet. Geol., Tulsa. **Studies in Geology**, 6, p. 93-117.
- Cordani, U.G.; Brito-Neves, B.B.; Fuck, R.; Porto, R.; Thomaz-Filho, A. & Cunha, F.M.B. 1984. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Petrobrás, Cenpes, **Série Ciência-Técnica-Petróleo**, n° 15, 70 p.
- Cordani, U.G.; Thomaz-Filho, A.; Brito-Neves, B.B. & Kawashita, K. 1985a. On the applicability of the Rb-Sr method to argillaceous sedimentary rocks: some examples from Precambrian sequences of Brazil. **Giornale di Geologia**, ser.3ª, 47(1-2): 253-280.
- Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Kikuchi, R.K.P. & Simomoto, M.A. 1985b. Sistemática Rb-Sr em rochas sedimentares argilosas do Paleozóico da Bacia Amazônica. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, II, 1985, Belém. **Anais...** Belém, SBG, 1985, 1:94-105.
- Dasch, E.J.; Hills, F.A. & Turekian, K.K. 1966. Strontium isotopes in deep sea sediments. **Science**, 153: 295-297.
- Dasch, E.J. 1969. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments and sedimentary rocks. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 33:1521-1552.
- Dias, G.T.M. 1981. O complexo deltáico do Rio Paraíba do Sul (RJ). In: SIMPÓSIO DO QUATERNÁRIO DO BRASIL, IV, 1981, Rio de Janeiro. **Publicação especial...** Rio de Janeiro, SBG, 1981, 2:58-88.
- Dias, J.L.; Scarton, J.C.; Guardado, L.R.; Esteves, F.R. & Carminatti, M. 1990. In: RAJAGABAGLIA, G. & MILANI, E.J. (eds.) **Origem e evolução das Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, Petrobras/Serec, 415p.
- Drever, J.I. 1971. Early diagenesis of clay minerals, Rio Ameca Basin, Mexico. **Journal Sedimentary Petrology**, 41(4):982-984.
- Faure, G. 1986. **Principles of Isotope Geology**. New York, John Wiley & Sons, 587 p.
- Faure, G. & Chaudhuri, S. 1967. The geochronology of the Keweenaw rocks of Michigan and the origin for the copper deposits. **The National Science Foundation**, Final Report,

- Grants 3090, GA 470, 41 p.
- Fordham, A.W. 1973. The location of iron-55, strontium-85 and iodide-125 sorbed by kaolinite and dickite particles. **Clays and Clay Minerals**, 21: 175-184.
- Goldschmidt, V.M. 1970. **Geochemistry**. Oxford, Clarendon Press, 730 p. (The international Series of Monograph on Physics).
- Horstman, E.L. 1957. The distribution of lithium, rubidium and caesium in igneous and sedimentary rocks. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 12:1-24.
- Hower, J.; Eslinger, E.; Hower, M. & Perry, E. 1976. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments, 1, Mineralogical and chemical evidence. **Geological Society of America Bulletin**, 87, p. 725-737.
- Hummel, K. 1922. Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmyrolise. **Geologische Rundsch**, v.13, pp 40-81.
- Kawashita, K. 1972. **O método Rb-Sr em rochas sedimentares**. São Paulo, 111 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- Larsen, G. & Chilingar, G.V. 1983. **Diagenesis in sediments and sedimentary rocks**, 2. Amsterdam, Elsevier, 1983, 572 p. (Developments in Sedimentology, 25B).
- Millot, G. 1970. **Geology of clays**. Berlin, Springer-Verlag, 429 p.
- Morton, J.P. 1983. **Rb-Sr dating of clay diagenesis**. Texas, 234 p. Doctor of Philosophy Thesis, Department of Geology, University of Texas.
- Morton, J.P. 1985. Rb-Sr evidence for punctuated illite-smectite diagenesis in the Oligocene Frio Formation, Texas Gulf. Coast. **Geological Society of America Bulletin**, 96: 114-122.
- Nittrouer, C.A.; Sharara, M.T. & Demaster, D.J. 1988. Variations of sediment texture on the Amazon continental shelf. **Journal of Sedimentary Petrology**, 53:179-191.
- Packam, G.H. & Crook, K.A.W. 1960. The principle of diagenetic facies and some of its implications. **Journal of Geology**, 68: 392-407.
- Perry, E. & Tureckian, K.K. 1974. The effects of diagenesis on the redistribution of strontium isotopes in shales. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 38:929-935.
- Read, H.H. & Watson, J. 1962. **An introduction to Geology**. London, MacMillan, 267 p.
- Robertson, H.E. 1974. Early diagenesis: expansible soil - clay sea water reaction. **Journal of Sedimentary Petrology**, 44:441-449.
- Russell, K. L. 1970. Geochemistry and halmyrolisis of clay minerals, Rio Ameca, Mexico. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 34: 893-907.
- Sawhney, B.L. 1972. Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. **Clays Clay Minerals**, 20:93-100.
- Shaomou, C. *et al.* 1988. A preliminary study on the existing forms of elements in sediments from Northern South China Sea. **Chinese Journal of Geochemistry**, 7(4): 327-377.
- Silva, C.G. 1987. Complexo deltáico do Rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO RIO DE JANEIRO E DO ESPÍRITO SANTO, 1., 1987, Rio de Janeiro. **Anais...Rio de Janeiro, SBG**, v.1, p.299-346.
- Singer, A. & Muller, G. Diagenesis in argillaceous sediments. In: LARSEN, G. & CHILINGAR, G.V., (eds), **Diagenesis in sediments and sedimentary rocks**, 2. Amsterdam, Elsevier, 1983, p. 115-221.
- Singer, A. & Stoffers, P. 1987. Clay mineral diagenesis in two east African lake sediments. **Clays Clay Minerals**, 15:291-307.
- Spears, D.A. 1987. The Rb-Sr age dating of some Carboniferous shale. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 38:235-233.
- Thomaz-Filho, A. 1976. **Potencialidades do método Rb-Sr para datação de rochas sedimentares**. São Paulo, 124 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- Thomaz-Filho, A. & Lima, V. Q. 1979. Datação radiométrica de rochas sedimentares pelíticas pelo método Rb-Sr. Rio de Janeiro, Petrobrás, Cenpes, 1979, nº 14 (relatório interno).
- Weaver, C.E. 1989. **Clays, muds and shales**. Amsterdam, Elsevier, 1989, 819 p. (Developments in Petrology, 44).
- Whitney, P.R. & Hurley, P. M. 1964. The problem of inherited radiogenic strontium in sedimentary age determinations. **Geochimica Cosmochimica Acta**, 28: 425-436.