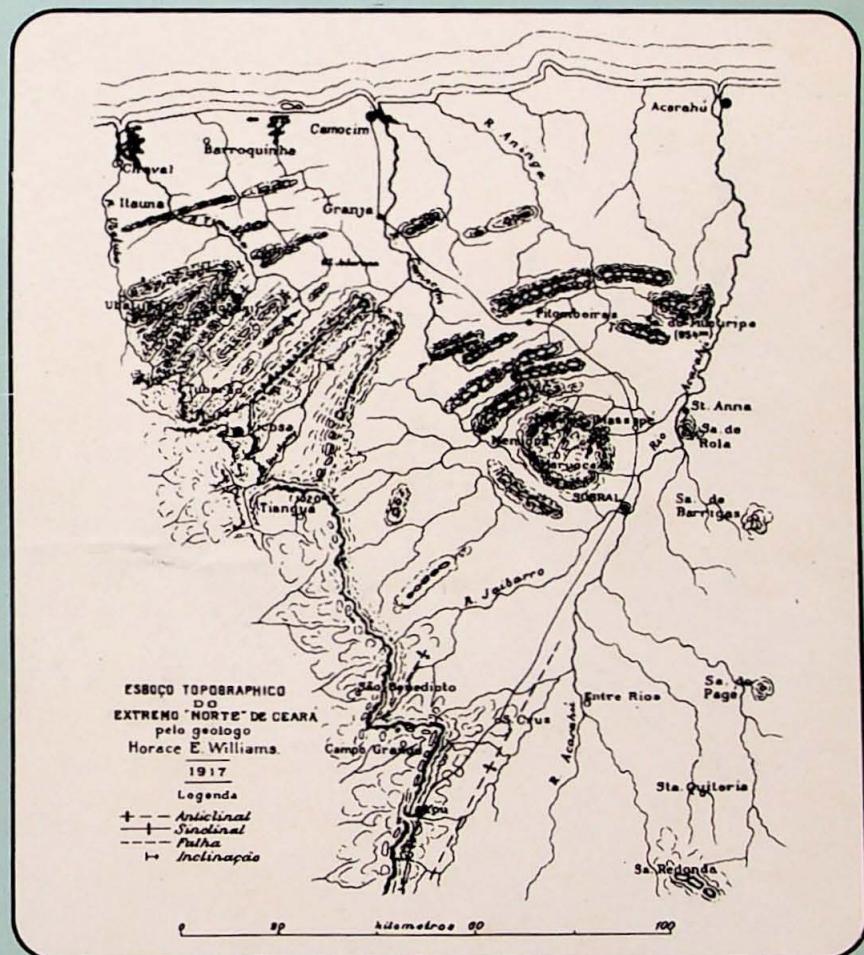


SSN-0103-2410
VOLUME 8
1995

INSTITUTO DE GEOCIÉNCIAS - USP
— BIBLIOTECA —



REVISTA DE GEOLOGIA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
FORTALEZA

GEOCRONOLOGIA NUCLEAR

CAPÍTULO VI

DATAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES PELOS MÉTODOS RADIODIÁTRICOS RUBÍDIO-ESTRÔNCIO (Rb/Sr) E POTÁSSIO-ARGÔNIO (K/Ar)

Antonio Thomaz Filho*
Ana Maria Pimentel Mizusaki**
Koji Kawashita***
Joaquim Raul Torquato****

- * Faculdade de Geologia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524/4º andar Bloco A sala 4006. 20559-900 Rio de Janeiro.
- ** Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500. 91509-900 Porto Alegre.
- *** Centro de Pesquisas Geocronológicas. Departamento de Geologia. Universidade de São Paulo. USP. CP 20899. CEP 01498-970. São Paulo.
- **** Departamento de Geologia . Universidade Federal do Ceará. CP 12181. CEP 60455-760. Fortaleza.

6.1 - INTRODUÇÃO

Na introdução das referências de radiometria sedimentar, Muller e Muller (1976) e Muller e Muller (1978) afirmam que a aplicação da datação radiométrica em rochas sedimentares é mais difícil do que em rochas ígneas. O motivo é devido à grande diversidade de processos que ocorrem durante a deposição e o armazenamento das rochas em ambientes terrestres.

Outro problema envolvente é que muitas rochas sedimentares contêm minerais que não permitem a aplicação direta da datação radiométrica, como é o caso da magnetita, que é rica em ferro, ou da ilmenita, que é rica em titânio.

Sumário

6.1	Introdução.....	191
6.2	Aplicabilidade dos métodos radiométricos Rb/Sr e K/Ar na datação de rochas sedimentares	192
6.2.1	Método radiométrico Rb / Sr	193
6.2.1.1	Exemplos da aplicação do método Rb/Sr na datação de rochas sedimentares argilosas.....	205
6.2.1.2	Procedimentos analíticos	207
6.2.2	Método de datação baseado nas variações da razão Sr^{87} / Sr^{86} de rochas carbonáticas	213
6.2.3	Método radiométrico K / Ar.....	214
6.3	Considerações finais	219
6.4	Bibliografia.....	219

6.1 INTRODUÇÃO

As potencialidades da aplicação dos métodos radiométricos Rubídio / Estrôncio (Rb/Sr) e Potássio / Argônio (K/Ar), na datação de rochas sedimentares, são abordadas em termos da metodologia empregada, das limitações dos métodos e do significado das idades obtidas. Objetiva-se determinar a idade da sedimentação da rocha, visando ao aprimoramento da Escala do Tempo Geológico; a idade de eventos termodinâmicos associados aos processos diagenéticos; e a idade de eventos metamórficos incipientes, com temperaturas não superiores a 200°C a que estiveram sujeitas as rochas sedimentares.

Como já amplamente divulgado na literatura especializada, a aplicação de métodos radiométricos na datação de rochas ígneas tem tido ampla aceitação na comunidade geológica mundial, devido às características físicas e químicas de formação destas rochas. Ne-las, a homogeneização isotópica inicial do sistema, ou seja, a composição isotópica similar do elemento químico radiogênico presente, quando de sua formação, se materializa pelo próprio processo de cristalização dos minerais, a partir de um meio fluido (magma), propício a trocas entre os elementos químicos. Nas rochas metamórficas, o fenômeno da homogeneização isotópica é explicado pela ação das pressões e temperaturas superiores a 200°C envolvidas no processo, resultando formações e transformações de minerais, associadas aos processos de metassomatismo.

No caso de rochas sedimentares, ocorrem minerais autigênicos e detriticos. Estes últimos trazem heranças das rochas fontes e tendem a apresentar razões isotópicas dependentes da idade original dessas rochas. Devido às baixas condições de pressão e temperatura em que são formadas, a confiabilidade dos valores das idades radiométricas tem sido melhor reconhecida quando limitada a análises dos minerais formados no próprio sítio deposicional, tais como glauconita, ilita autigêntica e minerais de evaporitos portadores de potássio (por exemplo: silvita).

A glauconita é um argilomineral que tem sido encontrado quase que exclusivamente em ambiente marinho, sendo normalmente considerada como de origem autigêntica. As datações radiométricas pelo método Rb/Sr realizadas em glauconitas separadas de rochas sedimentares tem, em alguns casos, revelado resultados satisfatórios, quando comparados com a Escala do Tempo Geológico.

Paralelamente, desde a década de 60, inúmeras pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido da aplicação de métodos radiométricos para datação de rochas sedimentares pélticas, principalmente com a aplicação do método Rb/Sr em folhelhos. Em muitos casos, chegou-se a resultados geologicamente significativos, concordantes com a idade da sedimentação e de eventos diagenéticos. Podem ser citados os trabalhos de Compston & Pidgeon (1962); Bonhomme (1976 e 1982); Bonhomme & Segonzac (1962); Bonhomme & Prévôt (1968); Bonhomme *et al.* (1964 e 1965); Whitney & Hurley (1964); Allsopp & Kolbe (1965); Dasch (1969); Dasch *et al.* (1966); Bofinger & Compston (1967); Faure & Chaudhuri (1967); Brookins *et al.* (1970); Bofinger *et al.* (1968); Clauer (1975, 1979a,b e 1982); Clauer & Bonhomme (1974); Clauer *et al.* (1982); Faure & Powell (1972); Perry & Tureckian (1974); Thomaz-Filho *et al.* (1976); Mukhopadhyay & Brookins (1976); Cordani *et al.* (1978 e 1985a,b); Parenti Couto *et al.* (1981); Macedo (1982); Macedo & Bonhomme (1984); Morton (1985); Mizusaki (1992).

Os trabalhos de Kawashita (1972) e Thomaz-Filho (1976) iniciaram, no Brasil, as pesquisas da aplicação da metodologia radiométrica Rb/Sr na datação de rochas sedimentares argilosas, utilizando-se de amostras de folhelhos paleozóicos e eo-mesozóicos das bacias sedimentares do Paraná e Amazonas. Estes autores analisaram amostras em sistema rocha total e, também, em sistema fração fina (fração granulométrica inferior a duas micra), ou seja, a porção mais enriquecida em argilominerais autigênicos. Foram obtidas boas isócronas para amostras de sistemas rocha total, com idades compatíveis com a

da sedimentação, e isócronas de sistemas fração fina, com idades atribuídas a eventos diagenéticos.

O método Rb/Sr, o mais amplamente utilizado, evoluiu de maneira sistemática a partir de rochas pré-cambrianas, passando pelas paleozóicas e chegando até às eo-mesozóicas. Esta evolução foi orientada pelas dificuldades inerentes ao processo formador dos sedimentos e, principalmente, pela baixa velocidade de transformação do isótopo radioativo ^{87}Rb no isótopo radiogênico ^{87}Sr , tornando assim, cada vez mais crítica a aplicação do método em rochas mesozóicas e mais jovens. Para estas rochas, estão sendo desenvolvidas pesquisas sobre a aplicação do método K/Ar, com a perspectiva de chegar-se a resultados mais significativos.

6.2 APICABILIDADE DOS MÉTODOS RADIOMÉTRICOS Rb/Sr E K/Ar NA DATAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES

Os métodos radiométricos de datação de rochas baseiam-se, normalmente, na transformação de um isótopo radioativo (por exemplo: ^{87}Rb e ^{40}K) em outro isótopo radiogênico (por exemplo: ^{87}Sr e ^{40}Ar), segundo uma constante de desintegração radioativa que não é afetada por variáveis tais como: tempo, pressão e temperatura, entre outras.

Para obter-se uma idade com significado geológico, é necessário que sejam obedecidas algumas condições fundamentais, dentre as quais destacam-se:

- 1) que a quantidade do isótopo radiogênico primário (ou seja, presente no sistema - mineral ou rocha - no momento de sua formação) seja conhecida ou, pelo menos, seja possível estimá-la; e
- 2) que o sistema, uma vez formado, não sofra perdas ou ganhos dos elementos radioativo e radiogênico, e que as transformações que ocorreram tenham se limitado aos processos radioativos naturais.

A quantificação dos teores dos isótopos envolvidos no procedimento analítico é realizada mediante a utilização de razões isotópicas, tomando-se como denominador um isótopo estável do elemento químico considerado. Por exemplo: $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ e $^{40}\text{K} / ^{36}\text{Ar}$.

Para um sistema - mineral ou rocha - que, ao se formar, estava isento do elemento químico portador do isótopo radiogênico e era portador do elemento radioativo, a análise de apenas um destes sistemas permite determinar a idade de sua formação, pela simples aplicação da fórmula:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{F}{P} \right] \quad (1)$$

onde:

t = tempo decorrido após a formação do sistema (idade);

λ = constante de desintegração (fração de átomos que se desintegram na unidade de tempo);

F = número de átomos que se transformaram, ou seja, radiogênicos; e

P = número de átomos radioativos presentes atualmente no sistema.

Para as rochas ígneas, com base em inúmeros dados experimentais, é possível estimar-se, de forma aproximada, a quantidade do isótopo radiogênico presente inicialmente no sistema. Define-se essa quantidade em termos de razões isotópicas, tais como $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ e $^{40}\text{K} / ^{36}\text{Ar}$, no caso denominadas de razões iniciais (R_i) do sistema.

Nas rochas metamórficas e, mais especificamente, nas rochas sedimentares, não há como definir-se, com razoável acuidade, qual teria sido a quantidade do isótopo radiogênico presente inicialmente no sistema. Isso devido ao processo de formação destas rochas, onde ocorre o aporte de material de diversas procedências, muitas vezes representado por fragmentos de rochas de composições e idades diversas.

O método da linha isócrona (ou simplesmente método isocrônico) foi criado visando contornar essa imprecisão. Para a sua aplicação, e devido tratar-se de procedimento estatístico, impõe-se a necessidade da análise de aproximadamente uma dezena de amostras de uma mesma rocha ou de rochas cogenéticas. Com isso, pode-se dispensar o conhecimento prévio da quantidade inicial do isótopo radiogênico, ou seja, a razão inicial do sistema. A condição fundamental para que se alcance sucesso nesse procedimento analítico é que tenha ocorrido o fenômeno da homogeneização isotópica do elemento químico portador do isótopo radiogênico, quando da formação da rocha (idade de sua formação) ou quando processos químicos e termodinâmicos tenham nela atuado durante sua evolução geológica (idades de diagênese e/ou de metamorfismo incipiente).

A metodologia da linha isócrona, aqui exemplificada para o método Rb/Sr, por ser o mais amplamente divulgado, utiliza a fórmula geral:

$$(\text{Sr}^{87} / \text{Sr}^{86})_h = (\text{Sr}^{87} / \text{Sr}^{86})_i + (\text{Rb}^{87} / \text{Sr}^{86}) \cdot (e^{\lambda t} - 1) \quad (2)$$

Esta equação equivale à de uma reta do tipo: $y = b + ax$, onde:

$(\text{Sr}^{87} / \text{Sr}^{86})_h$ = razão isotópica atual do Sr contido no sistema;

$(\text{Sr}^{87} / \text{Sr}^{86})_i$ = razão isotópica do Sr contido originalmente no sistema, denominada de razão inicial;

$(\text{Rb}^{87} / \text{Sr}^{86})$ = obtida a partir das concentrações de Rb total e Sr total (no sistema) e das composições isotópicas atuais destes elementos;

e = base do sistema de logaritmos naturais.

A Figura 6.1 mostra, de forma esquematizada, a construção de uma linha isócrona. A partir das análises de quatro amostras ali representadas (pontos A,B,C e D), pode-se calcular o tempo decorrido desde o momento da homogeneização isotópica do sistema (ou seja, o momento de sua formação), representado pela linha horizontal tracejada. É condição indispensável que, a partir dessa homogeneização, o sistema tenha permanecido fechado para eventuais trocas químicas com os fluidos intersticiais.

6.2.1 MÉTODO RADIOMÉTRICO Rb / Sr

Inúmeros trabalhos já realizados (vide capítulo Introdução) têm evidenciado que o método radiométrico Rb/Sr pode fornecer resultados significativos na datação de rochas sedimentares pelíticas, apesar de algumas restrições impostas pela presença de minerais detriticos nelas incorporados. Tem-se obtido resultados coerentes em termos da definição de idades relacionadas à época de sedimentação e de eventos termodinâmicos ocorridos durante a evolução diagenética da rocha sedimentar, até ao estágio de metamorfismo incipiente. Esses eventos atuam de forma marcante nos argilominerais (principalmente ilita, esmectita, interestratificado ilita-esmectita, clorita e caulinita) podendo modificá-los por processos de recristalização e, mesmo, formar novos minerais por precipitação. Assim, faz-se necessário o conhecimento prévio dos argilominerais presentes nas amostras analisadas.

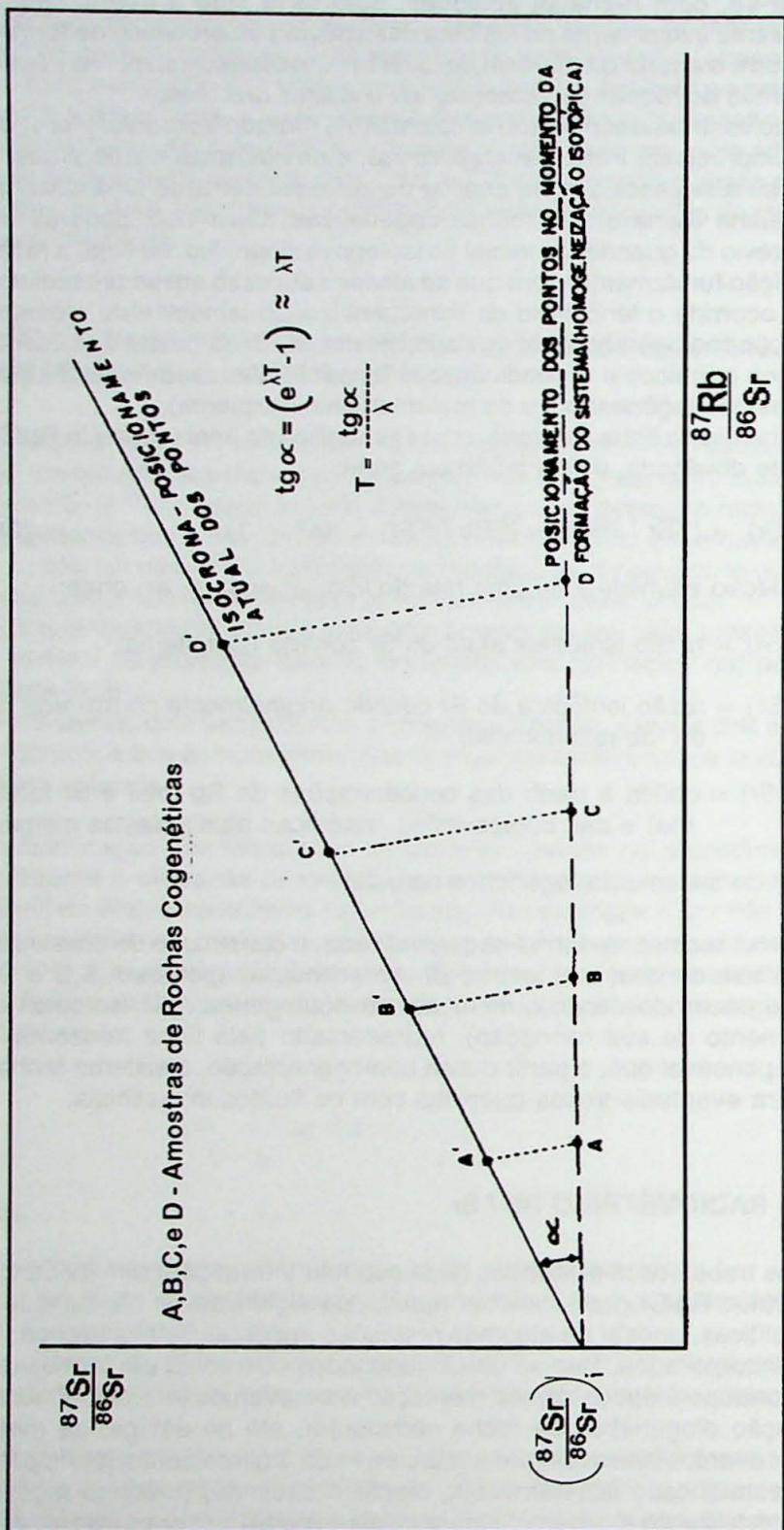


Figura 6.1 - Figura esquemática da construção de uma isócrona (THOMAZ Fº & LIMA, 1979)

Mais especificamente, os diagramas isocrônicos construídos a partir de resultados de análises em rochas sedimentares pelíticas têm mostrado a possibilidade do traçado de várias isócronas, em função do material analisado:

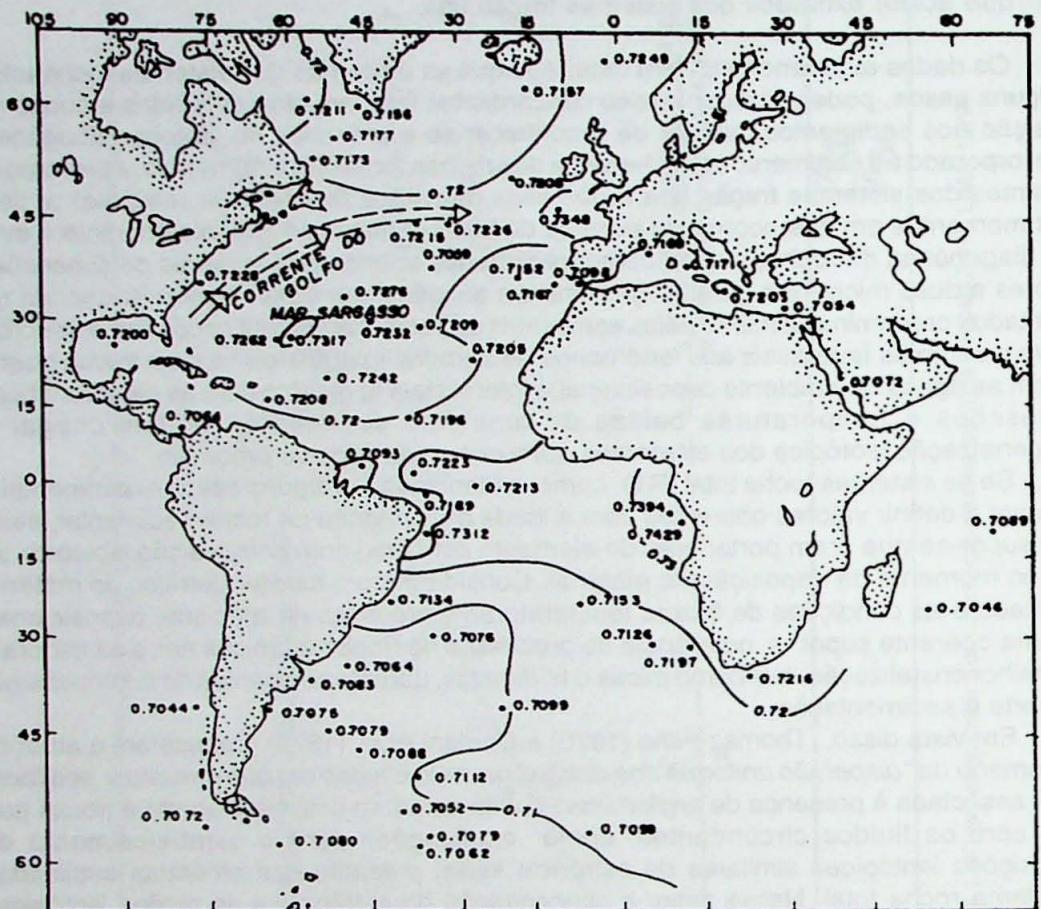
- 1- isócrona construída a partir dos pontos representativos das amostras analisadas em sistemas rocha total (RT);
- 2- isócrona obtida a partir dos pontos representativos dos sistemas fração fina (inferior a duas micra); e
- 3- outras mais, resultantes das análises em resíduos e lixiviados (mediante ataque ácido) extraídos dos sistemas fração fina.

Os dados experimentais têm mostrado que as isócronas dos sistemas rocha total, em alguns casos, podem indicar idades concordantes com aquelas atribuídas à época de deposição dos sedimentos, apesar de reconhecer-se a presença do isótopo radiogênico ^{87}Sr incorporado ao sedimento como herança das rochas fontes. Por outro lado, as isócronas resultantes dos sistemas fração fina e dos seus derivados (lixiviados e resíduos) podem definir momentos em que ocorreram eventos de homogeneização isotópica durante a evolução diagenética da rocha, e que ficaram registrados apenas nos minerais de dimensões inferiores a duas micra (em geral, argilominerais autigênicos). Esses minerais, quando representados predominantemente pelas esmectitas ou pelos interestratificados ilita-esmectita, tendem a ser mais favoráveis aos fenômenos de agradação, transformação e trocas químicas com as águas do ambiente deposicional e intersticiais e, mesmo com as características de pressões e temperaturas baixas do ambiente sedimentar, podem chegar à homogeneização isotópica dos elementos químicos envolvidos no processo.

Se os sistemas rocha total (RT), como evidenciado em alguns casos experimentais, chegaram a definir valores coerentes com a idade da formação da rocha sedimentar, seria lógico supor-se que eram portadores do elemento estrônio com composição isotópica similar, no momento da deposição do material. Considerando o caráter detritico do material depositado e as condições de baixas temperaturas e pressões do ambiente deposicional, não seria coerente supor a ocorrência de processos de trocas químicas entre os minerais com melhor cristalização, tais como micas e feldspatos, durante os eventos de intemperismo, transporte e sedimentação.

Em vista disso, Thomaz-Filho (1976) e Cordani *et al.* (1978) propuseram a atuação do fenômeno da "dispersão uniforme dos detritos no meio aquoso em que ocorreu a sedimentação", associada à presença de argilominerais cuja estrutura estivesse aberta a trocas químicas com os fluidos circundantes, como explicações para o estabelecimento de composições isotópicas similares do estrônio inicial presente nas amostras analisadas em sistema rocha total. Nesse caso, a concentração do estrônio e as razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dos sedimentos dependem da mistura do estrônio herdado das rochas fontes, presente nos minerais detriticos, com aquele contido na água do ambiente deposicional e precipitado junto aos minerais formados no mesmo ambiente, tais como carbonatos e minerais de evaporitos. Assim, os clásticos derivados das rochas fontes misturam-se iam uniformemente na bacia deposicional, de tal forma que o sistema rocha total viesse a apresentar o elemento estrônio com razões isotópicas muito semelhantes nos diferentes sítios de sedimentação.

Esse fato tem sido observado em amostras de sedimentos recentes do fundo do mar, tais como: Oceano Atlântico Norte (área da Corrente do Golfo e Mar Sargasso), com razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,720 e 0,730 (Figura 6.2; Dasch, 1969); Oceano Atlântico Sul (área da Bacia Argentina e áreas adjacentes), com razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,704 e 0,710 (Figura 6.3a; Biscaye & Dasch, 1971); e Região dos Grandes Lagos (Lago Superior), com razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ao redor de 0,740 (Figura 6.4; Hart e Tilton, 1966). É interessante notar que as curvas de distribuição dos isovalores das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Figura 6.3a), não são



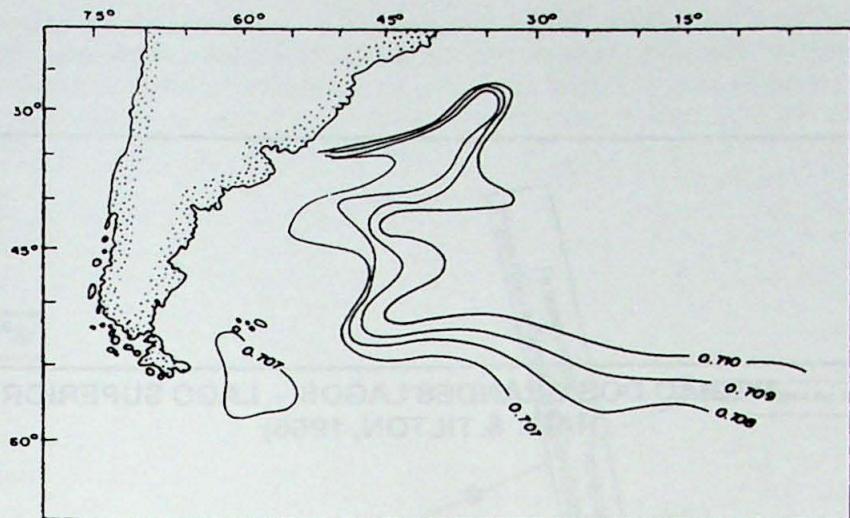


Figura 6.3a - Distribuição das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de sedimentos recentes na Bacia Argentina e áreas adjacentes. (BISCAYE & DASCH, 1971)

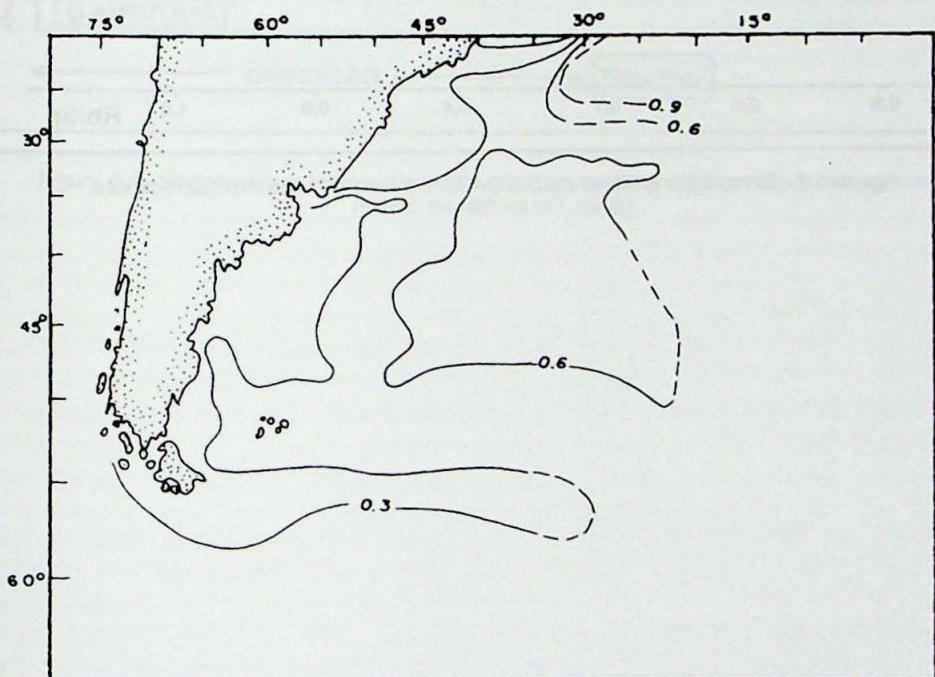


Figura 6.3b - Distribuição das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de sedimentos recentes na Bacia Argentina e áreas adjacentes. (BISCAYE & DASCH, 1971)

Figuras 3 - Comparação entre a distribuição dos valores $\frac{\text{Sr}^{87}}{\text{Sr}^{86}}$ e Rb de sedimentos recentes da Bacia Argentina e áreas contínuas (BISCAYE & DASCH, 1971)

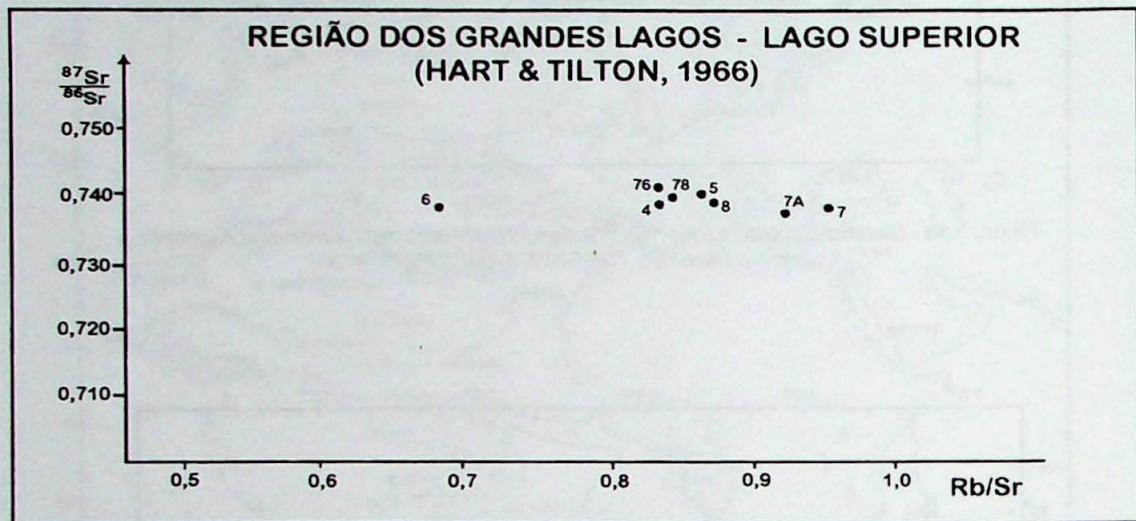


Figura 6.4 - Correlação entre as razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e Rb/Sr de sedimentos recentes.

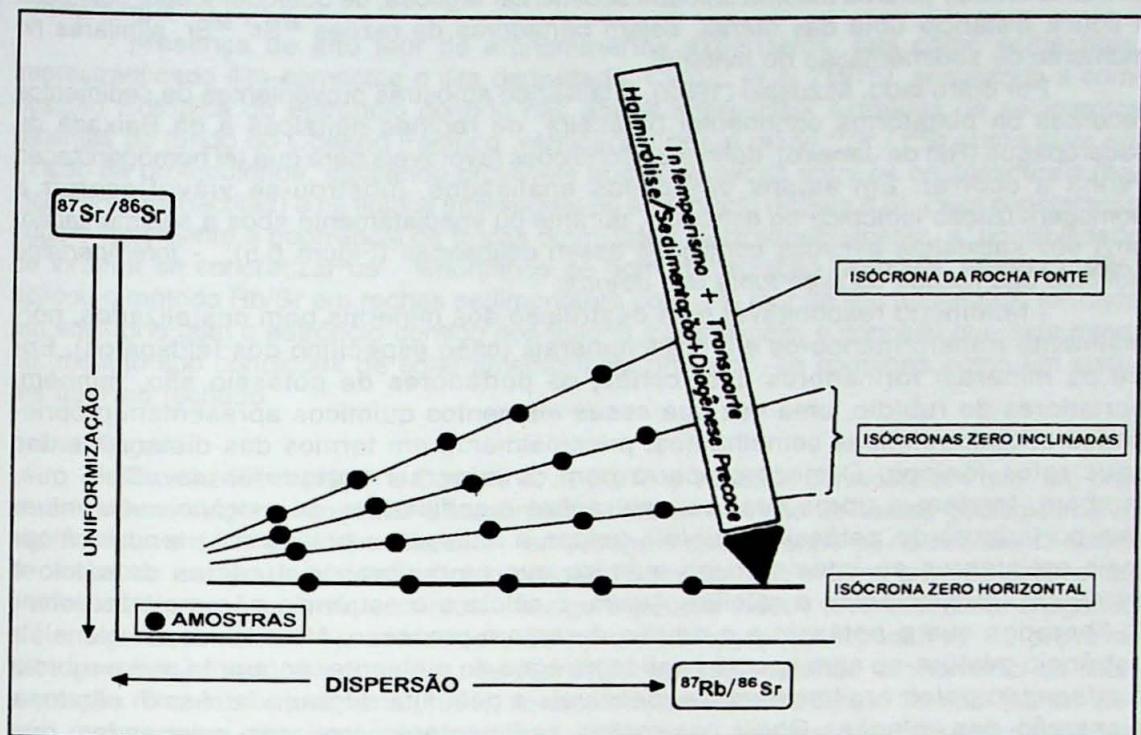


Figura 6.5 - Horizontalização da isócrona no campo da sedimentação e diagênese precoce.
(Modif. de MIZASAKI, 1992)

similares aquelas das razões Rb/Sr (Figura 6.3b), mostrando que a tendência à homogeneização isotópica do estrôncio independe da distribuição dos teores dos elementos rubídio e estrôncio nos sedimentos. Assim, pode-se diagnosticar ser muito provável que as amostras de uma mesma unidade sedimentar argilosa, de qualquer idade, coletadas a pouca distância uma das outras, sejam portadoras de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ similares no momento da sedimentação do material.

Por outro lado, Mizusaki (1992), analisando amostras provenientes de sedimentos recentes da plataforma continental brasileira, de regiões deltaicas e da Baixada de Jacarepaguá (Rio de Janeiro), definiu as condições favoráveis para que tal homogeneização venha a ocorrer. Em alguns dos casos analisados, mostrou-se viável ocorrer a homogeneização isotópica do estrôncio, durante ou imediatamente após a sedimentação, uma vez satisfeitas algumas condições assim delineadas (Figura 6.5): - *intemperismo químico das rochas da área fonte dos detritos*

- fenômeno responsável pela destruição dos minerais bem cristalizados, normalmente transformando-os em argilominerais (caso específico dos feldspatos). Entre os minerais formadores das rochas, os portadores de potássio são, também, portadores de rubídio, uma vez que esses elementos químicos apresentam propriedades cristaloquímicas semelhantes, principalmente em termos das dimensões dos seus raios iônicos. O mesmo ocorre com os minerais portadores de cálcio que, também, tendem a apresentar concentrações significativas de estrôncio. Os minerais portadores de potássio e rubídio (micas e feldspatos potássicos) tendem a ser mais resistentes ao intemperismo químico que os minerais portadores de cálcio e estrôncio (plagioclásios e calcita). Assim, o cálcio e o estrôncio são mais facilmente liberados que o potássio e o rubídio durante o processo. No sítio deposicional, o estrôncio mistura-se com aquele contido na água do ambiente, enquanto que o rubídio é adsorvido pelos argilominerais expansíveis e pela ilita degradada. Assim sendo, a dispersão das relações Rb/Sr nas rochas sedimentares argilosas independem dos fenômenos de homogeneização isotópica do estrôncio, como constatado em análises de sedimentos recentes por Biscaye & Dasch (1971) (Figuras 6.3a e 6.3b). Todos esses fenômenos tendem a favorecer a aplicação da metodologia isocrônica Rb/Sr para a datação das rochas sedimentares argilosas;

- *ambiente deposicional*

- preferencialmente marinho, calmo, muito pouco agitado que, além de favorecer a mistura mecânica uniforme do material detritico, tem se revelado mais efetivo nos processos de equilíbrio isotópico entre o estrôncio contido na água do mar e aquele presente nos argilominerais expansíveis;

- *halmirólise*

- primeiras reações físico-químicas e químicas que ocorrem na interface sedimentos / águas marinhas, no sentido de atingir o equilíbrio químico exigido pelo novo ambiente. São trocas iônicas onde o ion Ca, acompanhado do Sr, presente na estrutura dos argilominerais, é substituído pelo Mg, K (este junto com o Rb) e Na, normalmente presentes na água do mar. Supõe-se que este processo tende a produzir razões Rb/Sr com diversos valores nos diferentes sítios deposicionais;

- *diagenese*

- transformações cristaloquímicas que ocorrem nos minerais imediatamente após a sedimentação, que envolvem as três grandes fases de fenômenos diagenéticos a partir da herança, da transformação (degradação e agradação) e da neoformação de minerais preferencialmente argilosos, os mais susceptíveis a trocas químicas. Aqui são importantes as águas conatas que circulam entre os minerais durante a compactação do sedimento, produzindo reequilíbrios isotópicos parciais ou globais;

- *granulometria*

- predomínio da fração granulométrica inferior a duas micra, onde se concentram os argilominerais que melhor facilitam as trocas químicas com o meio aquoso deposicional;

- *mineralogia*

- presença de alto teor de argilominerais expansivos, tais como esmectitas, interestratificado ilita-esmectita e ilita degradada. Clauer *et al.* (1975), analisando a composição isotópica do estrôncio contido nas águas intersticiais extraídas de sedimentos recentes do fundo do Oceano Pacífico, verificaram que a razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ aumentava em função da profundidade, indicando prováveis trocas químicas entre os argilominerais (basicamente esmectitas) e os fluidos intersticiais do sedimento (Figura 6.6). Essa constatação sugere fortemente a ocorrência de trocas químicas e, consequentemente, a possibilidade de virem a se concretizar os fenômenos de homogeneização isotópica. Morton (1985) aplicou o método Rb/Sr em rochas sedimentares com alto teor de ilita autigênica, formada em equilíbrio com o estrôncio contido nos fluidos instênticos, e concluiu que este mineral, mesmo sob condições de soterramento mais profundo, se comporta como um sistema químico fechado.

- *amostragem*

- Thomaz-Filho (1976) e Cordani *et al.* (1978 e 1985a,b) consideraram que um processo de amostragem adequado é fundamental para a obtenção de idades geologicamente significativas em rochas sedimentares. A amostragem deve orientar-se no sentido da coleta de amostras isentas de alterações intempéricas, dentro de uma mesma unidade sedimentar predominantemente argilosa, separadas de alguns poucos metros (eventualmente chegando até a alguns centímetros), como meio de aproximar-se, o mais possível, da provável homogeneização isotópica ocorrida, nas diferentes amostras, quando do momento da sedimentação. Thomaz-Filho & Lima (1981), ao datarem amostras do Grupo Bambuí (Minas Gerais), propuseram um esquema considerado ideal para a coleta de amostras de rochas sedimentares argilosas, visando à sua datação pelo método radiométrico Rb/Sr (Figura 6.7).

Após a sedimentação, ocorrem fenômenos termodinâmicos de baixa intensidade, que produzem trocas químicas entre os argilominerais expansíveis e os fluidos intersticiais, ainda dentro do campo considerado como de diagênese precoce (Bonhomme *et al.*, 1964; Clauer, 1975; Singer & Muller, 1983). No processo, como já observado, é viável ocorrer a homogeneização isotópica do estrôncio neles contido. Nesse caso, as isócronas traçadas a partir dos pontos representativos das análises dos sistemas fração fina ($\text{FF} < 2\text{m}$) tendem a indicar a idade do evento termodinâmico homogeneizador.

Com base nas considerações formuladas, frutos de exemplos divulgados na literatura especializada e de pesquisas experimentais, Thomaz-Filho (1976) e Cordani *et al.* (1978) elaboraram os quatro modelos de diagramas isocrônicos, considerados casos ideais, apresentados na Figura 8. Esses modelos fundamentam-se no alcance, em área de abrangência, dos reequilíbrios isotópicos do estrôncio em termos dos tipos e dimensões dos minerais envolvidos, do volume de rocha implicado no processo e das condições de pressão e temperatura.

Modelo isocrônico I - homogeneização isotópica nos sistemas fração fina, em amplitude de uma amostra de mão (Figura 6.8A). Pode ter ocorrido a homogeneização isotópica nos sistemas rocha total, quando da sedimentação dos fragmentos detriticos, com a isócrona indicando a idade da sedimentação. Posteriormente, houve um evento de homogeneização isotópica nos sistemas fração fina (inferior a duas micra), de intensidade baixa o suficiente para atuar apenas numa pequena área de amplitude correspondente à dimensão aproximada de uma amostra de mão. A partir desse momento, esses sistemas comportaram-se como sistemas químicos fechados. Nesse caso, resultam isócronas paralelas, representativas de diferentes sistemas fração fina, lixiviado (rico em estrôncio) e resíduo (empobrecido em estrôncio), cuja inclinação define a idade do evento homogeneizador. Os pontos

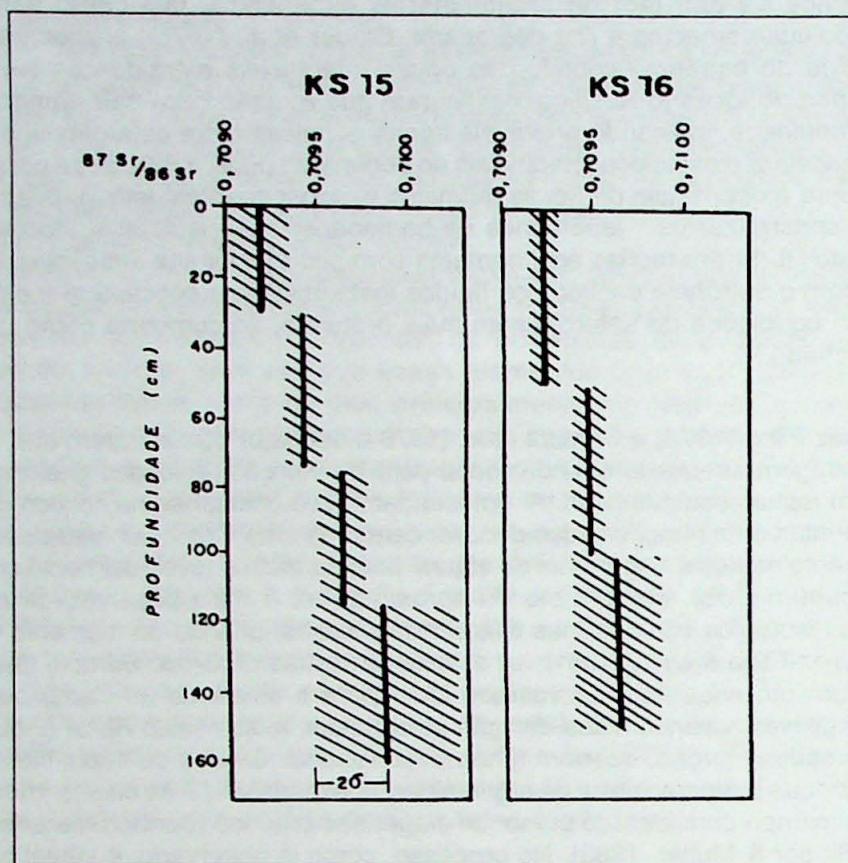


Figura 6.6 - Variações da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, das águas intersticiais em função da profundidade.
(CLAUER *et al.*, 1975)

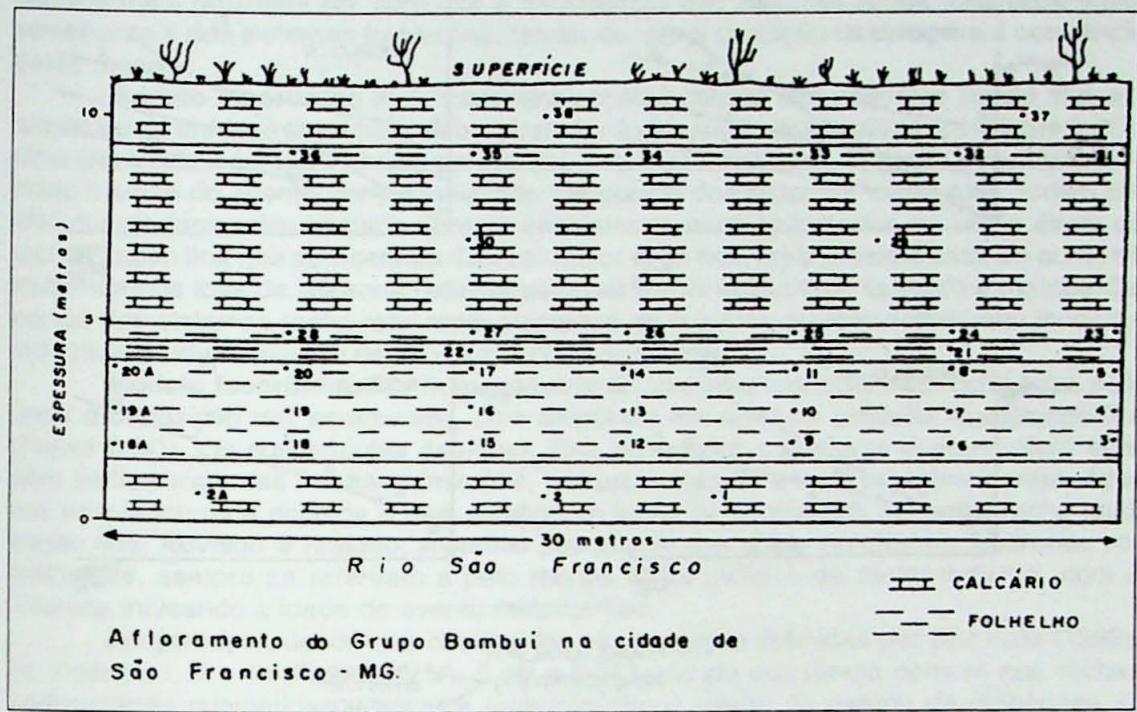


Figura 6.7 - Modelo de amostragem para datação radiométrica Rb-Sr de rochas sedimentares.
(Thomaz Fº & LIMA, 1981)

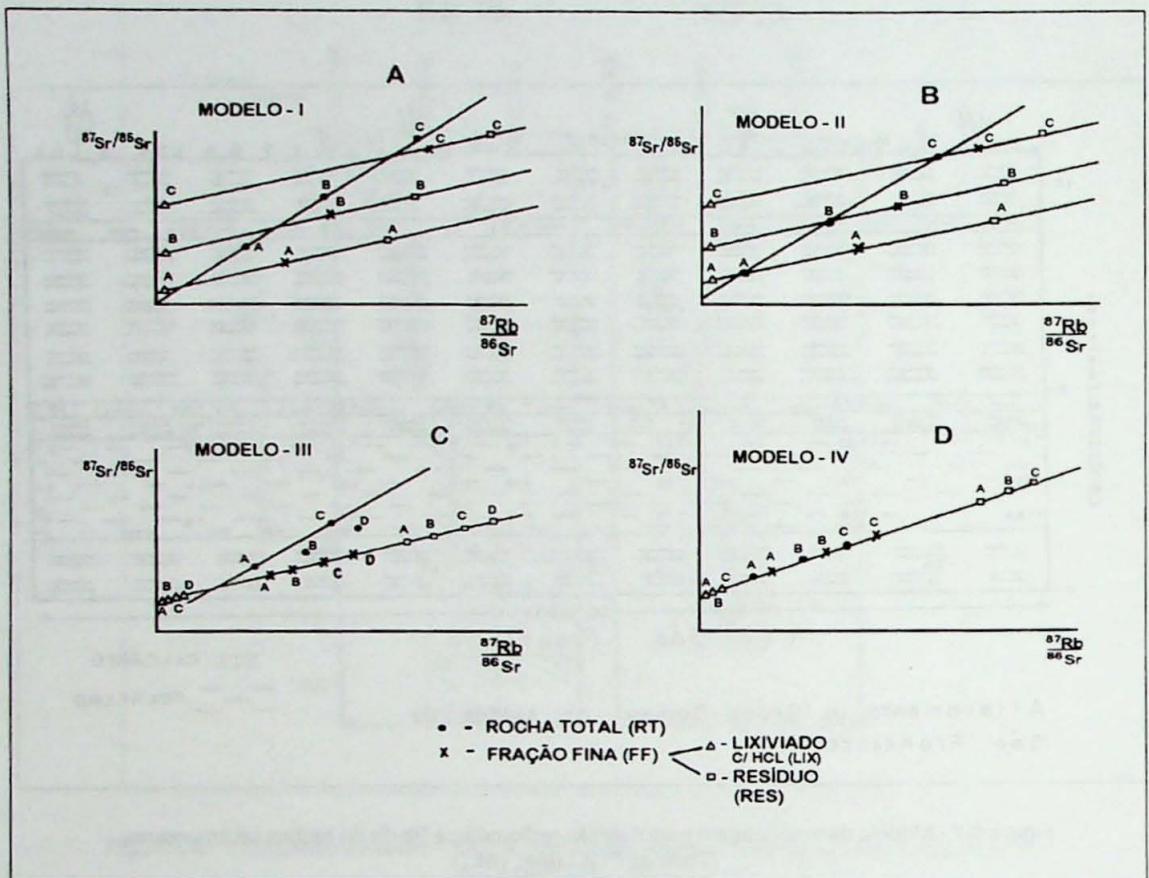


Figura 6.8 - Modelos de diagramas isocrônicos (Modif. de THOMAZ Fº, 1976)

representativos dos sistemas rocha total situam-se acima das suas respectivas isócronas e podem delinear uma isócrona cuja idade estaria próxima daquela do evento deposicional.

Modelo isocrônico II - *homogeneização isotópica nos sistemas rocha total, em amplitude de uma amostra de mão* (Figura 6.8B). Ocorreu a homogeneização isotópica nos sistemas rocha total, posterior a deposição dos sedimentos, com intensidade suficiente para atuar numa amplitude de amostra de mão. Resultam isócronas paralelas, que incluem os pontos dos sistemas rocha total, fração fina, lixiviado e resíduo, que indicam a idade do evento homogeneizador. A isócrona definida pelos pontos dos sistemas rocha total podem, ainda, indicar a idade da sedimentação. A presença minoritária de fração detritica mais grosseira faz com que a mineralogia dos sistemas rocha total fique muito semelhante à dos sistemas fração fina, tendendo ser a condição básica para a ocorrência desse modelo.

Modelo isocrônico III - *homogeneização isotópica nos sistemas fração fina, em amplitude da unidade litoestratigráfica, posterior à deposição dos sedimentos* (Figura 6.8C). Uma única reta isócrona inclui os pontos dos sistemas fração fina, lixiviado e resíduo, definindo a idade do evento homogeneizador. Os pontos dos sistemas rocha total podem ser afetados de forma diferenciada durante esse evento homogeneizador, na razão direta do teor de fração fina que apresentam. Quanto maior esse teor, mais próximo estará o ponto do sistema rocha total da isócrona definida pelos sistemas fração fina, lixiviado e resíduo. Os pontos dos sistemas rocha total mais afastados da isócrona podem definir uma isócrona indicativa da idade mínima de deposição dos sedimentos.

Modelo isocrônico IV - *homogeneização isotópica nos sistemas rocha total, posterior à deposição dos sedimentos, com amplitude em nível de unidade litoestratigráfica* (Figura 6.8D). Os constituintes detriticos com dimensões superiores a duas micra também participaram das trocas químicas e, consequentemente, se homogeneizaram. Apesar de uma isócrona é definida e nela se alinharam todos os pontos dos sistemas rocha total, fração fina, lixiviado e resíduo. Algumas pesquisas, das quais resultaram isócronas semelhantes, sempre se referiram a pelo menos leves indícios de metamorfismo, com a isócrona indicando a idade do evento metamórfico.

Em princípio, desde que obedecidas as premissas definidas por Mizusaki (1992), os modelos I, II e III (Figuras 6.8A, 6.8B e 6.8C) são de ocorrência comum nas rochas sedimentares submetidas a eventos termodinâmicos dentro do campo da diagênese. O modelo isocrônico IV já identifica, mais comumente, eventos associados aos primórdios do metamorfismo, podendo eventualmente ocorrer em rochas sedimentares submetidas apenas a eventos diagenéticos. Para tanto, é suficiente que a rocha apresente composição mineralógica com predominância de argilominerais abertos a trocas químicas com os fluidos intersticiais mobilizadores da circulação dos elementos químicos.

6.2.1.1 EXEMPLOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO RB/SR NA DATAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES ARGILOSAS

Whitney & Hurley (1964) analisaram 20 amostras de folhelho do Grupo Hamilton (Devoniano Médio) que ocorre em Nova Iorque e na Pensilvânia (EUA). O diagrama isocrônico resultante é apresentado na Figura 6.9. A idade obtida de 398 ± 12 Ma foi considerada um pouco elevada, quando comparada à da provável sedimentação da rocha. Essa discrepância foi atribuída à presença de estrôncio radiogênico herdado das áreas fontes dos detritos.

Brookins *et al.* (1970) analisaram amostras do folhelho Eskridge (Manhattan - EUA), em função do excelente controle paleontológico e estratigráfico dessa unidade sedimentar. No folhelho, intercalam-se algumas camadas de calcário e não são observados indícios de metamorfismo. A isócrona definida apresentou a idade de 300 ± 4 Ma, com razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ inicial de $0,7116 \pm 0,0006$ (Figura 6.10). A idade foi considerada máxima para a sedimentação da rocha.

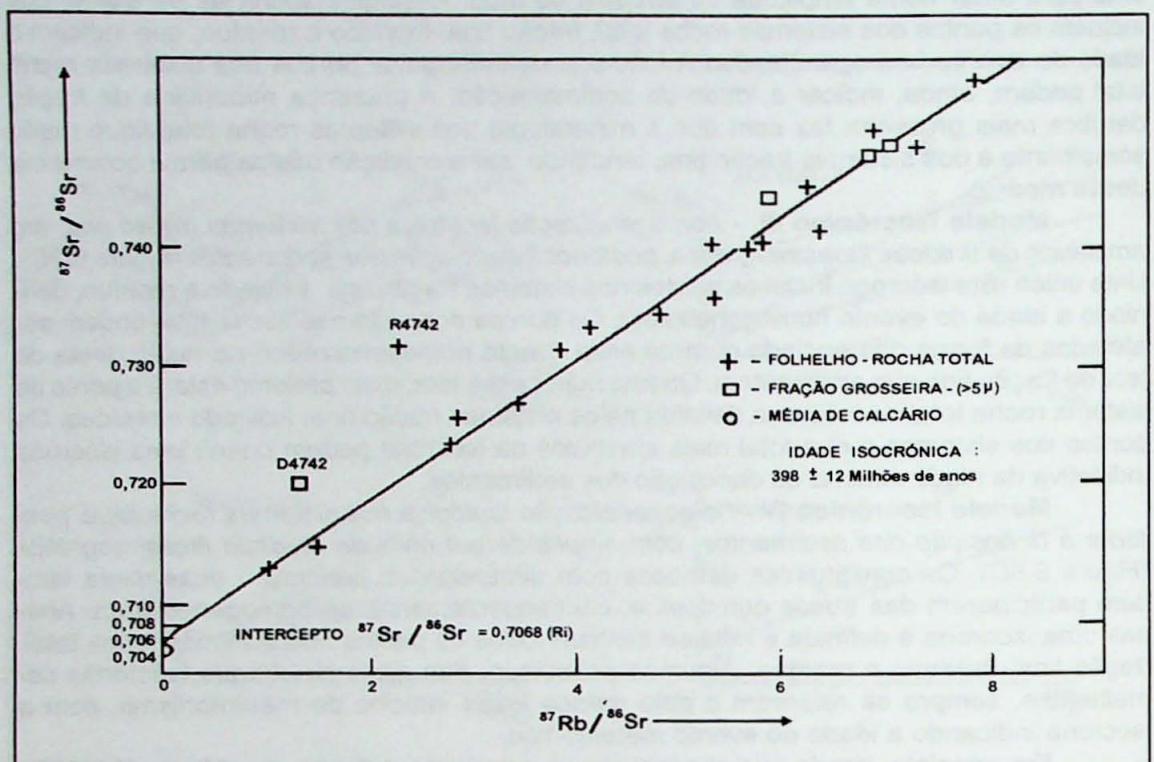


Figura 6.9 - Isócrona Rb/Sr de amostras de folhelho do grupo HAMILTON (Devoniano médio) (WHITNEY & MURLEY, 1964)

estimativa obtida é de 398 ± 12 milhões de anos, que é considerada razoável, tendo em vista que o intervalo de idade entre os resultados é de 370 a 420 milhões de anos. A idade estimada para o folhelho da Formação Hamilton é, portanto, compatível com a idade estimada para a rocha-máteria prima, que é de 398 ± 12 milhões de anos.

O Grupo Bambuí (Minas Gerais), cobertura sedimentar neoproterozóica do Cráton do São Francisco, foi amostrado por Thomaz-Filho, conforme o esquema apresentado na Figura 6.7. Thomaz-Filho & Bonhomme (1979) e Thomaz-Filho & Lima (1981) analisaram e interpretaram os resultados, conforme apresentado na Figura 6.11. Observa-se uma certa tendência ao alinhamento dos pontos no diagrama isocrônico, indicando uma idade aparente de 665 ± 16 Ma, com razão inicial de $0,7073 \pm 0,0011$. Parenti Couto *et al.* (1981) analisaram amostras de folhelhos e siltitos argilosos do Grupo Bambuí, mais especificamente das formações Pirapora e Três Marias e do Subgrupo Paraopeba (Minas Gerais). As Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 representam os diagramas isocrônicos obtidos, dos quais resultaram as idades de 577 ± 32 ; 620 ± 38 e 638 ± 12 Ma, respectivamente, que foram consideradas razoáveis em relação ao posicionamento cronoestratigráfico daquelas unidades.

Macedo (1982) e Macedo & Bonhomme (1984) dataram, pelo método isocrônico Rb/Sr, rochas sedimentares do Grupo Bambuí (Bahia) e do Grupo Una (Bacia de Lençóis - Bahia). Obtiveram idades isocrônicas que foram atribuídas a processos de diagênese, tanto precoce como tardia e, mesmo, ao do evento metamórfico que afetou aquelas rochas durante a Orogenese Brasiliana.

Cordani *et al.* (1985a) analisaram rochas sedimentares paleozóicas da Bacia do Amazonas e obtiveram idades isocrônicas compatíveis com aquelas consideradas como da sedimentação, além de outras idades atribuídas a eventos diagenéticos a que estiveram sujeitas aquelas rochas. Sugeriram a efetividade, em muitos casos, do mecanismo da dispersão mecânica da fração detritica dos sedimentos no ambiente deposicional.

6.2.1.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As amostras coletadas serão divididas em três frações distintas com as seguintes finalidades:

AMOSTRA		
FRAÇÃO PARA BRITAGEM	FRAÇÃO PARA LÂMINA DELGADA	FRAÇÃO PARA COLEÇÃO DE REFERÊNCIA

A fração para britagem é tratada de acordo com o esquema a seguir indicado, de modo a se obterem os sistemas isolados a serem analisados:

SISTEMA ROCHA TOTAL (RT)	Britador de mandíbulas
	Peneiramento (<100 mesh)
	Análise semi-quantitativa dos teores de Rb e Sr (Fluorescência de Raios-X)
	Seleção das amostras mais favoráveis para isócrona (diferentes razões Rb/Sr)
	Dispersão em água destilada
SISTEMA FRAÇÃO FINA (FF)	Desagregação (misturador + ultra-som)
	Pipetagem (fração < 2m)
	SISTEMA FRAÇÃO FINA (FF)
	Análise quantitativa por Raios-X dos elementos Rb e Sr
ANALISE ISOTÓPICA	Lixiviação ácida
	Ataque ácido (HCl - 0,1N) (10 minutos - ultra-som)
	SISTEMA LIXIVIADO (LIX)
	SISTEMA RESÍDUO (RES)
	Análise quantitativa por Raios-X dos elementos Rb e Sr
Análise isotópica	

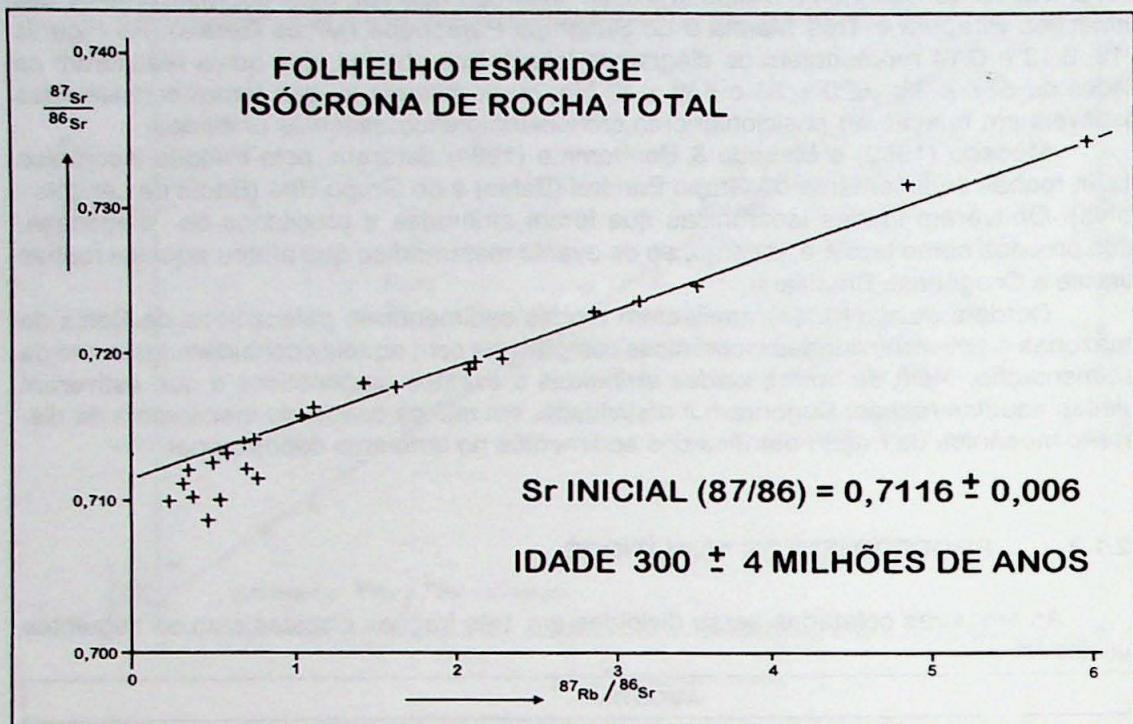


Figura 6.10 - Isócrona Rb/Sr de amostras do folhelho eskridge (BROOKINS *et al.*, 1970)

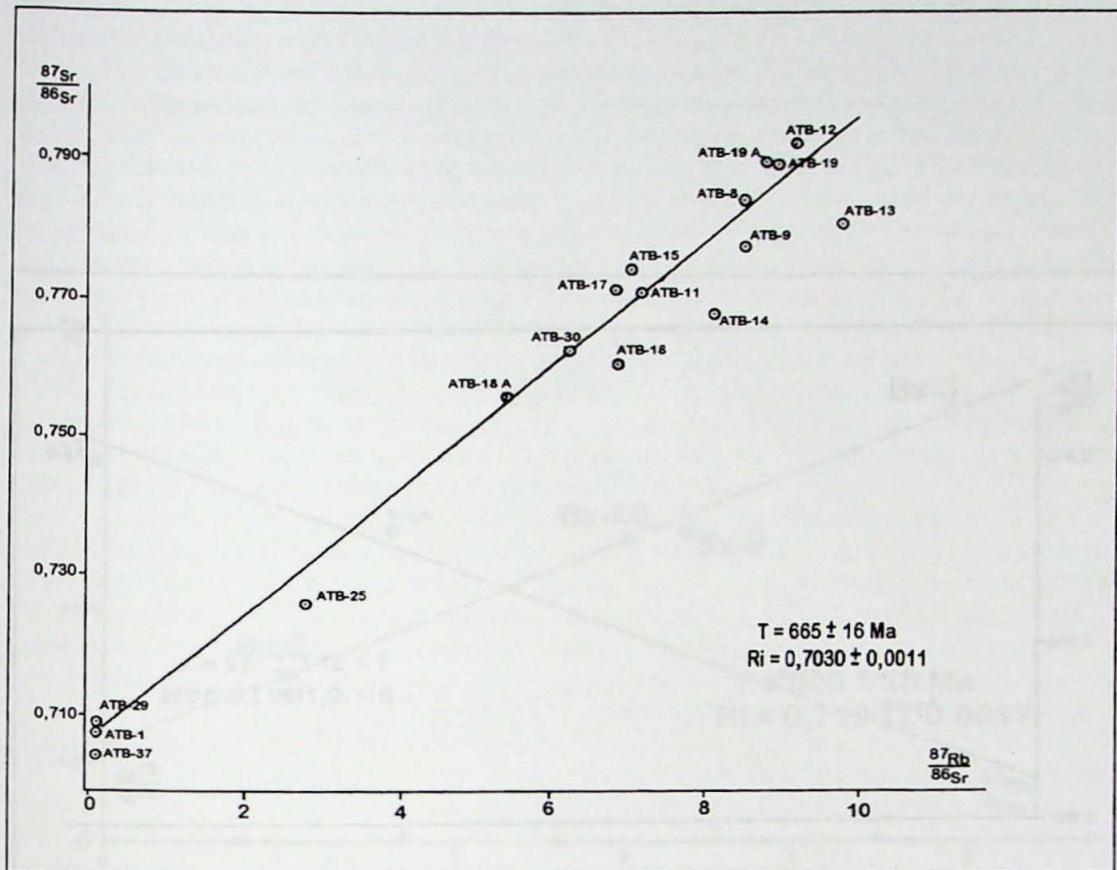


Figura 6.11 - Isócrona Rb/Sr de amostras de folhelho e calcários do grupo bambuí - (Minas Gerais)
(THOMAZ FILHO & BONHOMME, 1979 e THOMAZ FILHO & LIMA, 1981)

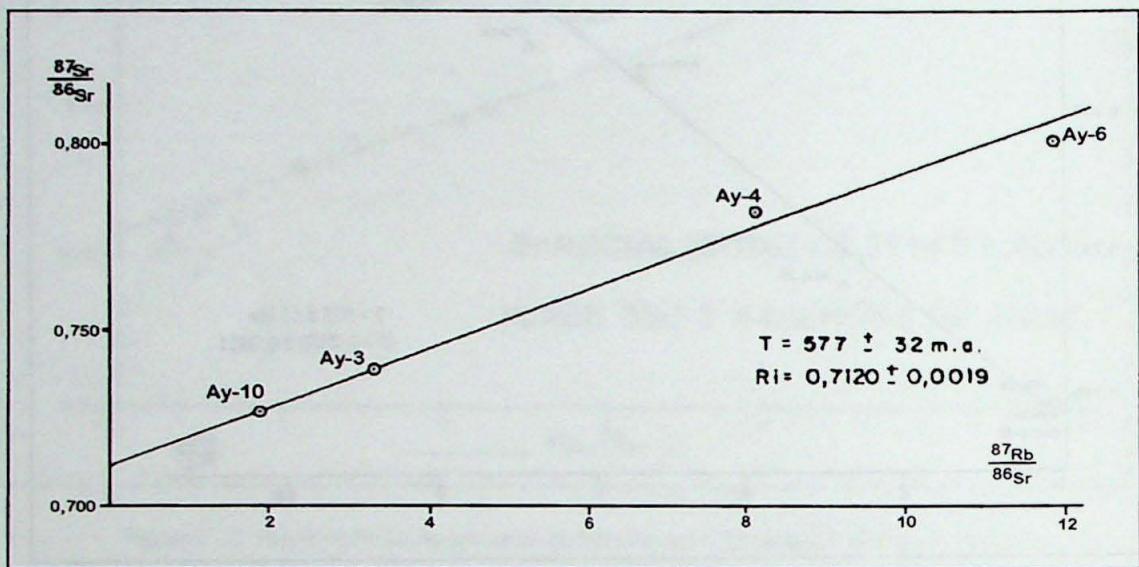


Figura 6.12 - Isócrona Rb/Sr de amostras de folhelhos e siltitos argilosos da formação Pirapora (Grupo Bambuí - MG). (PARENTE COUTO *et al.*, 1981)

6.22 MÉTODO DE DATAÇÃO RÁBIO-SR DE AMOSTRAS DA FORMAÇÃO TRÊS MARIAS

O método Rb/Sr é usado para obter a idade das rochas sedimentares e metamórficas da crosta terrestre. A sua aplicação é particularmente útil para amostras que não possuem idade conhecida ou que não podem ser datadas por outros métodos. O método Rb/Sr é baseado na constatação de que a concentração relativa de rubílio (^{87}Rb) em comparação com o estrônio (^{86}Sr) varia com o tempo de existência da rocha. O resultado da datação é obtido a partir da equação:

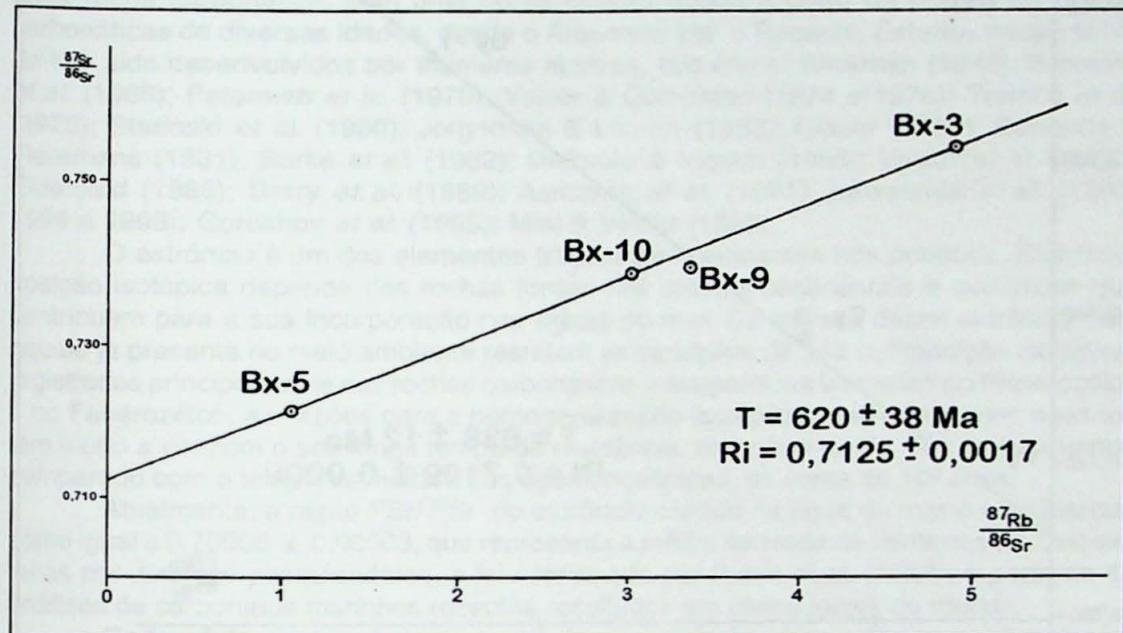


Figura 6.13 - Isocrona Rb/Sr de amostras de folhelhos e siltitos argilosos da formação Três Marias.
(Grupo Bambuí - MG). (PARENTE COUTO *et al.*, 1981)

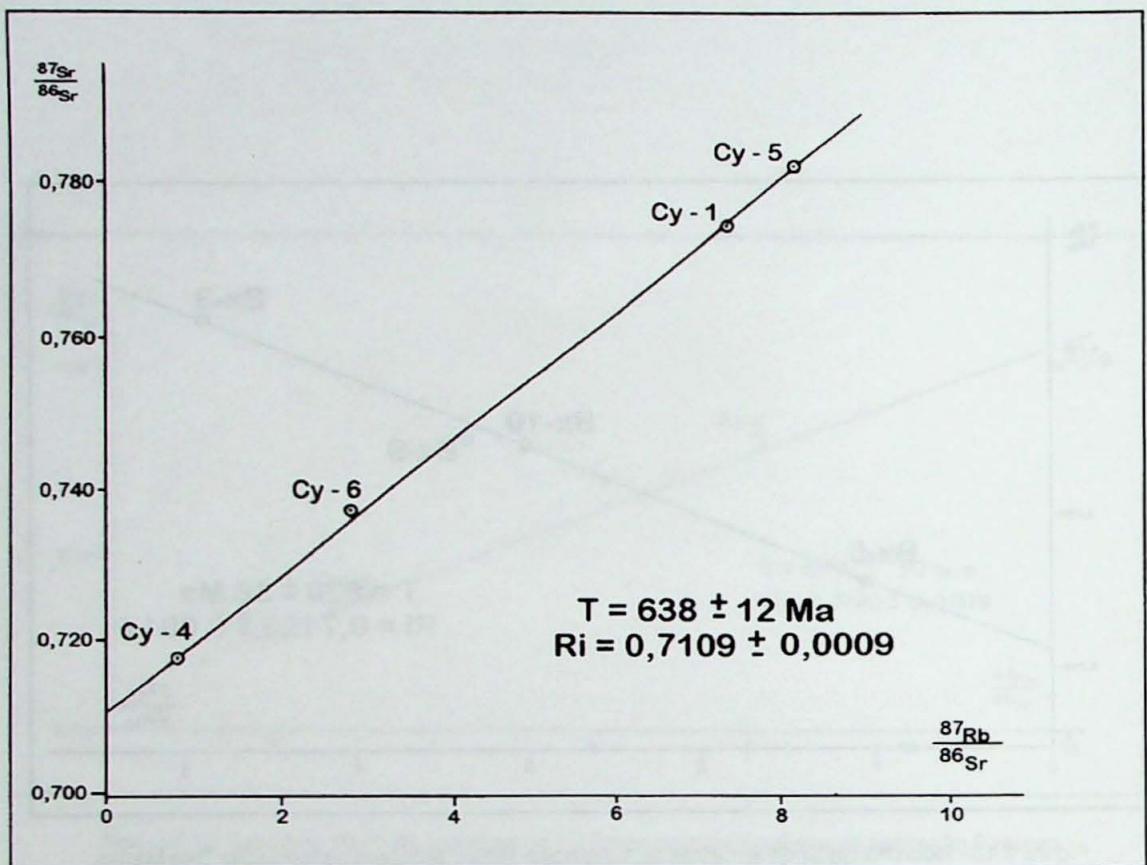


Figura 6.14 - Isócrona Rb/Sr de amostras de folhelhos e siltitos argilosos do subgrupo Paraopeba.
 (Grupo Bambuí - MG). (PARENTE COUTO *et al.*, 1981)

6.2.2 MÉTODO DE DATAÇÃO BASEADO NAS VARIAÇÕES DA RAZÃO $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ DE ROCHAS CARBONÁTICAS

Os métodos isotópicos na datação de rochas sedimentares têm se utilizado das variações das composições isotópicas do estrôncio, enxofre, carbono e oxigênio presentes em carbonatos preferencialmente marinhos.

Em termos de definição da época de sedimentação, as pesquisas têm se concentrado na análise da composição isotópica do estrôncio, tomando por base as variações da razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ em carbonatos marinhos, caracterizados por elevados teores de estrôncio e teores de rubídio extremamente baixos. Uma vez presente no sítio deposicional, o estrôncio é precipitado acompanhando principalmente o carbonato de cálcio e os evaporitos. O método baseia-se na comparação entre a razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ de uma determinada rocha carbonática, com uma curva padrão obtida a partir de razões de rochas carbonáticas de diversas idades, desde o Arqueano até o Recente. Estudos nesse sentido têm sido desenvolvidos por inúmeros autores, tais como: Wickman (1948); Brookins *et al.* (1968); Peterman *et al.* (1970); Veizer & Compston (1974 e 1976); Tremba *et al.* (1975); Starinski *et al.* (1980); Jorgensen & Larsen (1980); Clauer (1981); Demaiffe & Fieremans (1981); Burke *et al.* (1982); DePaolo & Ingram (1985); Veizer *et al.* (1983); Elderfield (1986); Derry *et al.* (1989); Asmeron *et al.* (1991); Kawashita *et al.* (1993, 1994 e 1996); Gorokhov *et al.* (1995); Misi & Veizer (1996).

O estrôncio é um dos elementos traço mais abundantes nos oceanos. Sua composição isotópica depende das rochas fontes das crostas continentais e oceânicas que contribuem para a sua incorporação nas águas do mar. Da mistura desse estrôncio com aquele já presente no meio ambiente resultam as variações da sua composição isotópica, registradas principalmente nas rochas carbonáticas e evaporíticas formadas no Proterozóico e no Fanerozóico. As razões para a homogeneização isotópica do estrôncio nos oceanos tem muito a ver com o seu longo tempo de residência, da ordem de 5×10^6 anos, quando comparado com o tempo de mistura das águas oceânicas, de cerca de 10^3 anos.

Atualmente, a razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ do estrôncio contido na água do mar é considerada como igual a $0,70906 \pm 0,00003$, que representa a média derivada de centenas de análises feitas por diversos pesquisadores, e foi confirmado por Burke *et al.* (1982), a partir de 42 análises de carbonatos marinhos recentes recolhidos em vários locais do mundo.

Certamente, uma importante causa dessas variações está relacionada à maior razão Rb/Sr observada na crosta continental siálica, em relação às rochas de origem mantélica (rochas básicas e crosta oceânica). Esse fato permite inferir que a transferência constante do estrôncio derivado das rochas fontes continentais tende a aumentar a razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ dos oceanos. Nos períodos de grandes rifteamentos continentais, associados a quebras de supercontinentes, o predomínio de formação de rochas magmáticas básicas tende a produzir diminuição das razões $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ dos carbonatos marinhos depositados na época. Por outro lado, os períodos de encontro de placas e de consequente acresção continental tendem a aumentar a razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ devido à maior exposição superficial de rochas siálicas da crosta continental.

Curvas de variações da razão $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ de rochas carbonáticas marinhas, durante a evolução do tempo geológico, têm sido construídas por diversos autores. As causas dessas variações têm sido amplamente discutidas na literatura. Armstrong (1971) admitiu que as razões $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ dos oceanos mostraram aumento relativo durante os episódios de glaciação continental, quando houve a aceleração da erosão de áreas dos escudos pré-cambrianos. Outros autores observaram que essa razão aumenta depois de períodos relacionados a orogêneses, possivelmente devido à erosão subsequente. A diminuição dessa razão, durante o Mesozóico, estaria relacionada à abertura do Oceano Atlântico, quando da quebra do Gondwana, onde se pronunciaram as atividades vulcânicas associadas ao espalhamento do assoalho oceânico.

As curvas apresentadas por Veizer & Compston (1976); Veizer *et al.* (1983) e Demaiffe & Fieremans (1981) (Figura 6.15) e por Gorokhov *et al.* (1995) (Figura 6.16) abrangem rochas de idades pré-cambrianas. Burke *et al.* (1982) analisaram 786 amostras de carbonatos marinhos e construíram a curva de variações da razão Sr⁸⁷/ Sr⁸⁶ para as rochas fanerozóicas (Figura 6.17).

Para a construção dessas curvas e sua comparação com as razões obtidas para as rochas carbonáticas analisadas, é fundamental que seja assumida a premissa de que as razões ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr das rochas carbonáticas marinhas representem a razão ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr da água do mar, quando da sua precipitação. Portanto, deve-se selecionar as rochas a serem analisadas no sentido de serem constituídas essencialmente por carbonato de cálcio, próximo de 100% de calcita, e não terem sofrido alterações posteriores à sua formação, tais como dolomitização, recristalização e eventos termodinâmicos, já no campo do metamorfismo, que tendem a alterar a composição isotópica original do estrôncio.

Outras aplicações das variações das composições isotópicas do oxigênio - ($\delta^{18}\text{O}$) = $^{16}\text{O} / ^{18}\text{O}$ - e do carbono - ($\delta^{13}\text{C}$) = $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ - em carapaças de organismos fósseis e em rochas carbonáticas, e do enxofre - ($\delta^{34}\text{S}$) = $^{32}\text{S} / ^{33}\text{S}$ - em galenas, têm sido utilizadas não só para reportar variações climáticas vigentes na época da sedimentação como, também, para determinações cronoestratigráficas. Neste último caso, são consideradas as importantes variações climáticas e tectônicas que marcam, com razoável precisão, determinados momentos da evolução do tempo geológico.

6.2.3 MÉTODO RADIOMÉTRICO K / Ar

A aplicação do método K/Ar nas rochas sedimentares, em termos de idades convencionais e isocrônicas, tem se limitado à fração granulométrica com dimensões inferiores a duas micra, onde predominam os argilominerais neoformados e/ou transformados no ambiente deposicional. Essas idades, em linhas gerais, são concordantes com aquelas obtidas pela aplicação do método Rb/Sr em argilominerais e, normalmente, indicam a idade de um evento termodinâmico atuante durante a diagênese da rocha sedimentar (Thomaz-Filho & Bonhomme, 1979; Lee *et al.*, 1985; Hauer *et al.*, 1986; Bonhomme *et al.*, 1988). Essa constatação abre as perspectivas da viabilidade de obter-se resultados significativos em rochas de idades mesozóica e terciária, campo de aplicação pouco satisfatória do método Rb/Sr.

A Figura 6.18, de Aronson & Hower (1976), mostra as idades obtidas pelo método K/Ar no sistema fração fina, no caso considerando a fração granulométrica inferior a 0,1 micra, separada de amostras de sedimentos argilosos da Costa do Golfo (Texas). Os valores dessas idades são mais elevados próximo à superfície, refletindo, muito provavelmente, a influência de herança detritica da área fonte. Com o aumento da profundidade, e o avanço das transformações diagenéticas, as idades tendem a decrescer de valor, seja pela perda de argônio, seja pela absorção de potássio pelos argilominerais. A partir da profundidade de 3600 a 3700 metros, os valores das idades se mantêm aproximadamente constantes. Tal fato sugere uma provável paralisação dos processos de trocas químicas entre os argilominerais e o meio circundante. Essas idades, concentradas ao redor de um mesmo valor, representam o momento em que ocorreu o evento diagenético homogeneizador do sistema fração fina. Duas interpretações são plausíveis para essa idade:

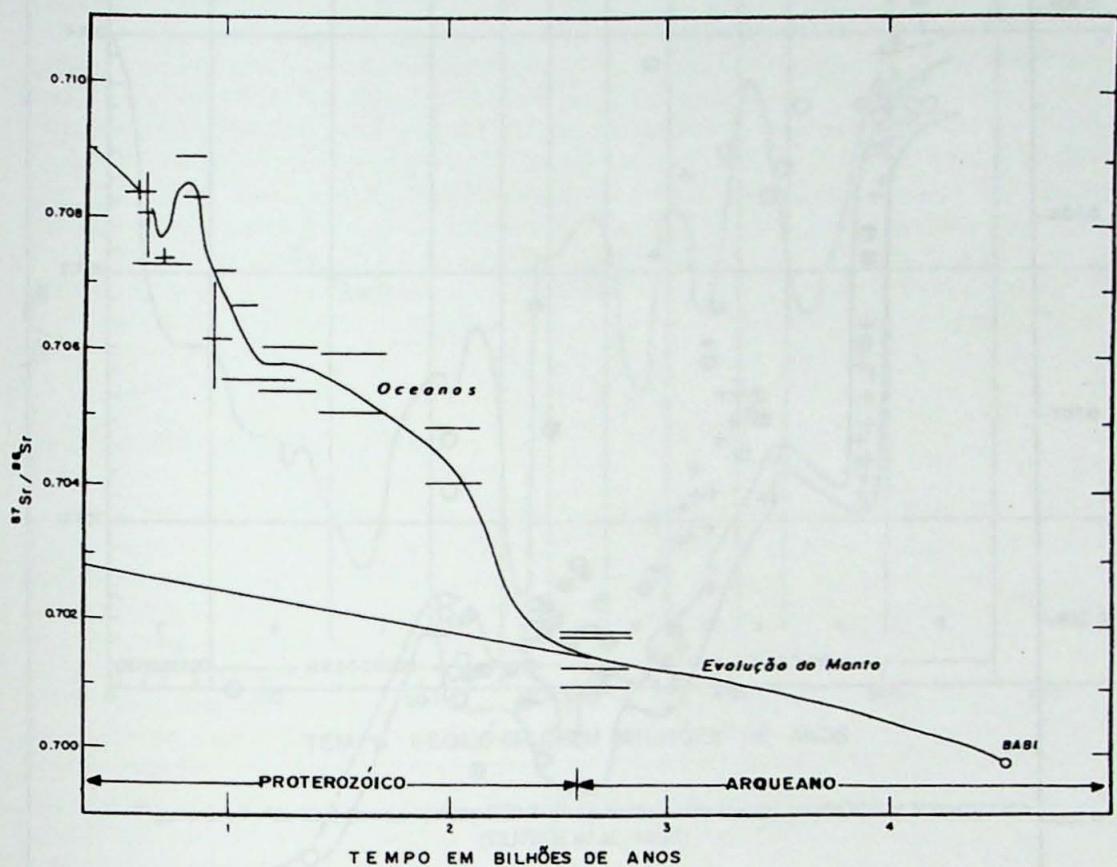


Figura 6.15 - Variações da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em carbonatos marinhos de idade pré-cambriana. Os dados sugerem que a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nos oceanos durante o arqueano era bastante semelhante à do manto até cerca de 2,5 Ga. A razão mostra uma tendência para aumentar até atingir valores da ordem de 0,7090 no final do proterozoico. O mergulho da curva de evolução do Sr no manto, que a figura mostra durante o arqueano. É o resultado do empobrecimento em Rb que o manto apresentava durante aquele tempo por causa da formação de magmas e o consequente crescimento da crosta continental.

(VEIZER & COMPSTON, 1976; VEIZER *et al.*, 1983 e DEMAIFEE & FIEREMANS, 1981)

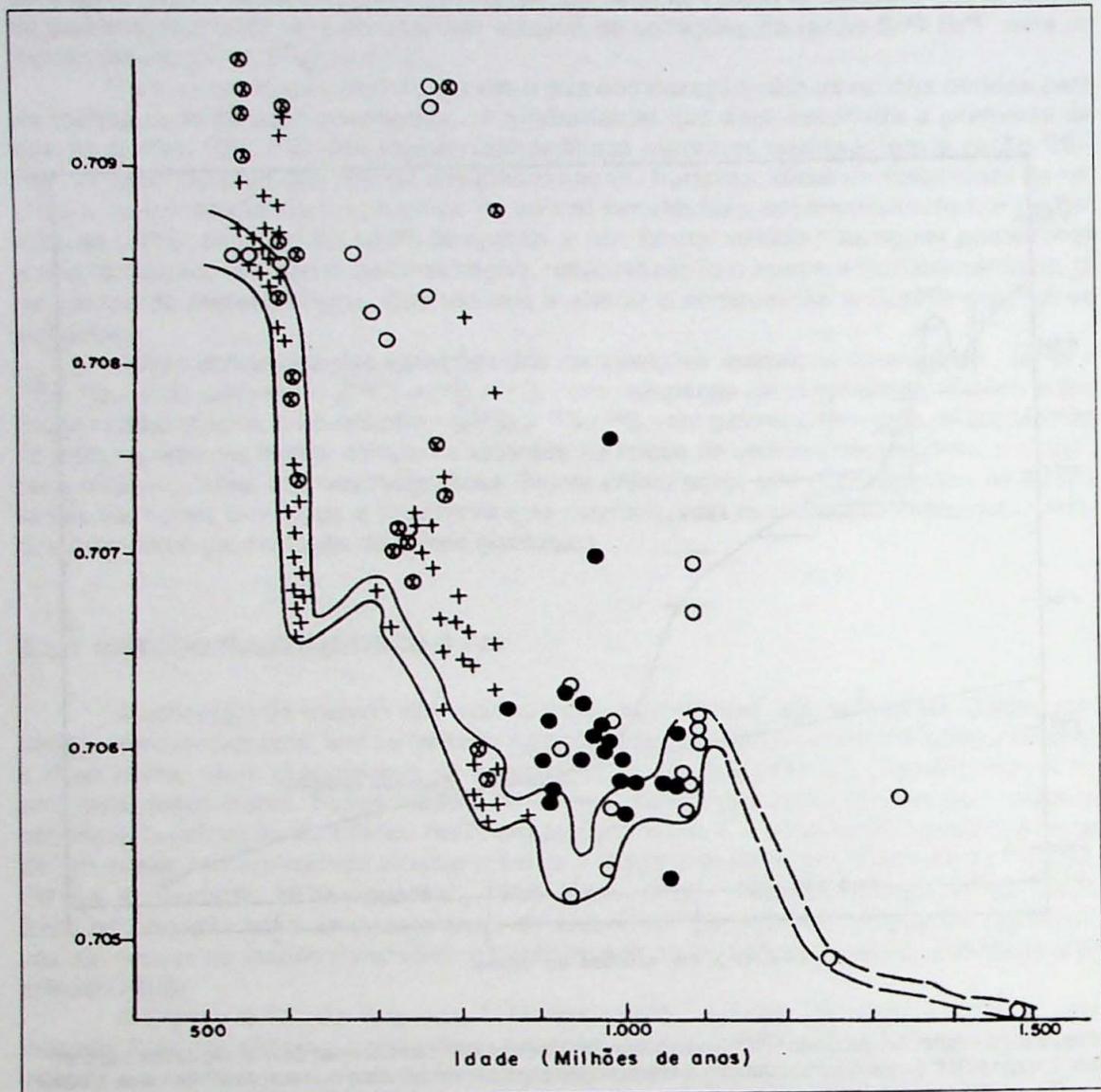


Figura 6.16 - Variações da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da água do mar no proterozóico superior e no cambriano inferior (as linhas restringem os valores mais representativos). (GOROKHOV *et al.* 1995)

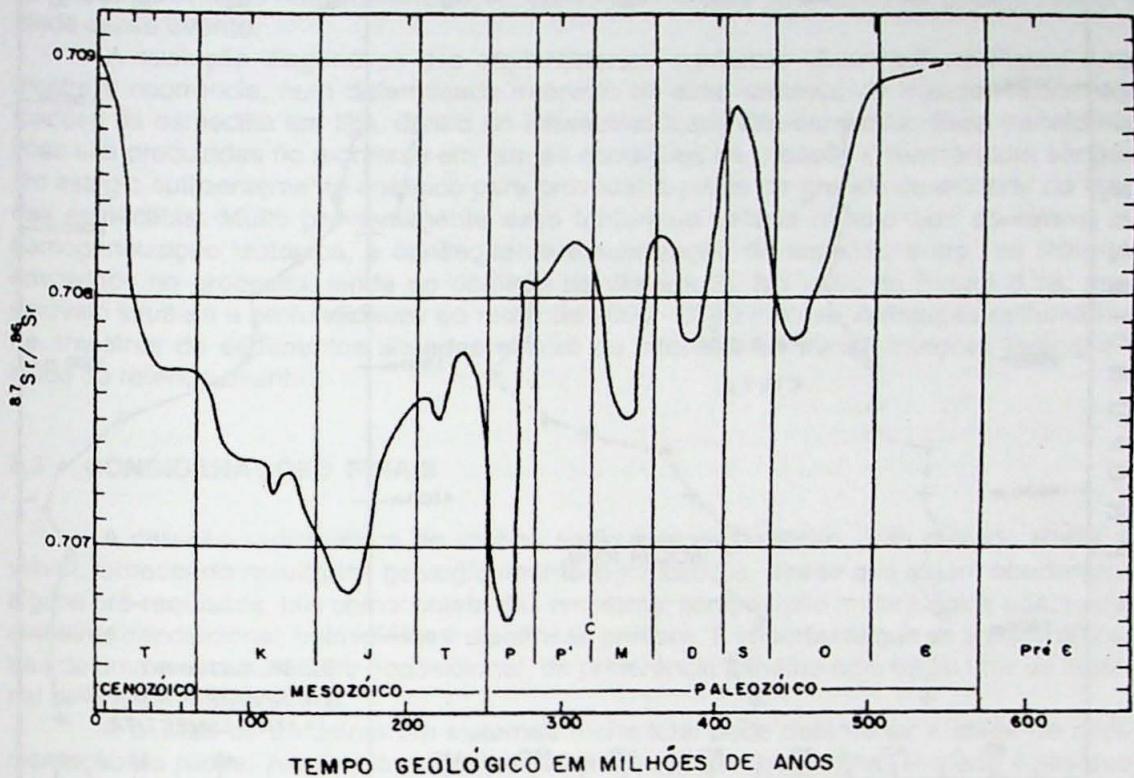


Figura 6.17 - Variações nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de carbonatos marinhos de idade fanerozóica.
(BURKE *et al.*, 1982)

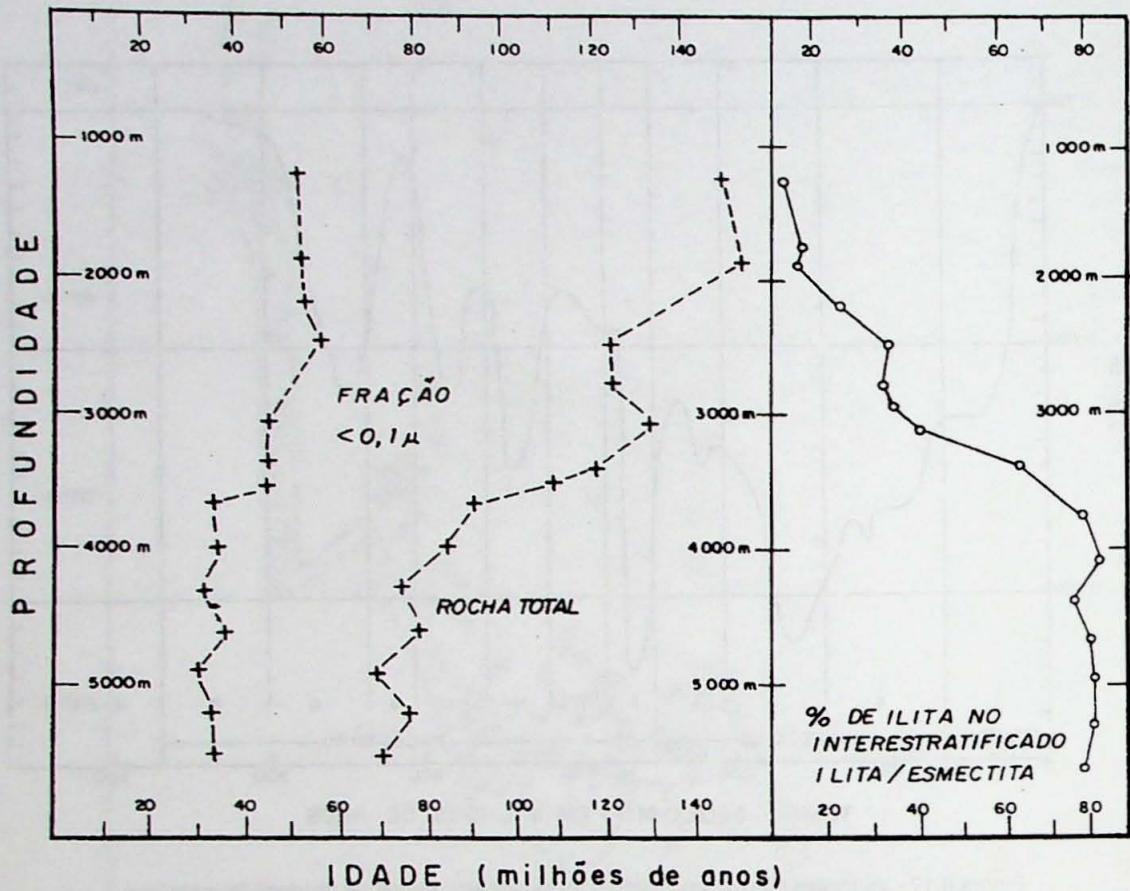


Figura 6.18 - Esquerda: Idades K/Ar versus profundidade para a fração <0,1 μ e rocha total do folhelho.
Direita: Curva do crescimento da porcentagem da ilita no interestratificado I-S versus profundidade de soterramento.

OBS.: Amostras de sedimentos da costa do Golfo (Texas - Poço CWRU-6)
(Modif. de ARONSON & HOWER, 1976)

a - se, ao se estabilizar o sistema fração fina, houve perda total do elemento químico radiogênico (argônio) herdado, a análise de apenas uma amostra poderá indicar a idade de fechamento do sistema e, consequentemente, do momento do evento homogeneizador;

b - se o evento homogeneizador não foi suficientemente intenso para produzir a perda total do argônio, ou seja, permitiu, ainda, a permanência de vestígios desse elemento herdado, a idade obtida será mais velha que a do evento homogeneizador. Nesse caso, a aplicação do método das isócronas K/Ar, utilizando mais de uma amostra, poderá indicar a idade desse evento.

A evolução diagenética dos argilominerais, conforme observado na Figura 6.18, mostra a ocorrência, num determinado intervalo de soterramento, de marcantes transformações da esmectita em ilita, dentro do interestratificado ilita-esmectita. Essa transformações são produzidas no momento em que as condições de pressão e temperatura atingem um estágio suficientemente enérgico para provocar a perda de grande quantidade de água das esmectitas. Muito provavelmente esse fenômeno estaria relacionado ao evento de homogeneização isotópica, e consequente estabilização do sistema, entre os minerais envolvidos no processo, ainda no domínio da diagênese. No caso da Figura 6.18, esse intervalo situa-se a profundidades ao redor de 3000 - 3700 metros. A datação radiométrica de amostras de sedimentos situadas abaixo do intervalo de transformações indicaria a idade do referido evento.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A datação radiométrica de rochas sedimentares pelíticas, pelo método Rb/Sr, é viável, fornecendo resultados geologicamente significativos, desde que sejam obedecidos alguns pré-requisitos, tais como: coleta das amostras; composição mineralógica adequada; ambiente deposicional; halomírolise; e diagênese precoce. É importante que se analise amostras de uma mesma unidade deposicional, de preferência folhelho com baixo teor de material de granulometria siltica.

A análise de amostras em sistemas rocha total pode determinar a idade de sedimentação da rocha. As amostras analisadas em sistemas fração fina, lixiviado e resíduo podem indicar a idade de algum evento termodinâmico ocorrido durante a evolução diagenética da rocha. Esse evento, muito provavelmente, deve estar relacionado com a brusca transformação da esmectita em ilita, no interestratificado ilita-esmectita, que ocorre durante o soterramento da rocha.

A utilização das razões $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ de carbonatos marinhos tem propiciado, principalmente nos últimos anos, a possibilidade de datação de rochas sedimentares, por comparação com curvas padrões dessas variações já construídas tanto para o tempo Fanerozóico como para o Proterozóico.

O método radiométrico K/Ar tem sido aplicado em sistemas fração fina das rochas sedimentares no sentido de determinar a idade de eventos diagenéticos a que estiveram sujeitas, inclusive permitindo sua aplicação em rochas mesozóicas e mais recentes, onde o método radiométrico Rb/Sr apresenta limitações.

6.4 BIBLIOGRAFIA

- ALLSOPP, H.L. & KOLBE, P. - 1965 - Isotopic age determination on the Cape Granite and intruded Malmesbury sediments, Cape Peninsula, South Africa - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **29**: 1115-1130.
- ARMSTRONG, R.L. - 1971 - Glacial erosion and the variable isotopic composition of strontium in sea water - *Nature, Phys. Sci.*, **230**:132-133.

- ARONSON, J.L. & HOWER, J. - 1976 - Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments: radiogenic argon evidence - *Geol. Soc. of Am. Bull.*, **87**: 738-744.
- ASMERON, Y.; JACOBSEN, S.B.; KNOLL, A.H.; BUTTERFIELD, N.J. & SWETT, K. - 1991 - Strontium isotopic variations of Neoproterozoic seawater: Implications for crustal evolution - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **55**: 2883-2894.
- BISCAYE, P.E. & DASCH, E.J. - 1971 - The rubidium, strontium, strontium-isotope system in deep-sea sediments: Argentina Basin - *J. Geophys. Res.*, **76**(21): 5087-5096.
- BOFINGER, V.M. & COMPSTON, W. - 1967 - A reassessment of the age of the Hamilton Group, New Group, New York and Pennsylvania, and the role of inherited radiogenic Sr⁸⁷ - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **31**: 2353-2359.
- BOFINGER, V.M.; COMPSTON, W. & VERNON, M.J. - 1968 - The application of acid leaching to the Rb-Sr dating of a Middle Ordovician shale - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **32**: 823-833.
- BONHOMME, M. - 1976 - Mineralogie des fractions fines et datation Rb-Sr dans le Groupe Bambui (MG - Brésil) - *Rev. Bras. 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.
- BONHOMME, M. & SEGONZAC, G.D. de - 1962 - Mesures d'âge par la méthode rubidium-strontium dans les schistes de Steige (Vosges Septentrionales) - *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, **15** (4): 129-137.
- BONHOMME, M.; LUCAS, J. & MILLOT, G. - 1964 - Signification des déterminations isotopiques dans la géochronologie des sédiments - *Sciences de la Terre*, **10** (3-4): 539-565.
- BONHOMME, M.; WEBER, F. & FAURE-MERCURET, M. - 1965 - Age par la méthode rubidium-strontium des sédiments du Bassin de Frannoëville - *Serv. Carte Géol. Als. Lorr. Bull.*, **21**: 249-252.
- BONHOMME, M. & PRÉVÔT, L. - 1968 - Application de la méthode rubidium-strontium à l'étude de l'âge radiométrique de quelques dépôts devonodinantiens du Massif de la Bruche (Vosges du Nord) - *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, **21** (4): 219-247.
- BONHOMME, M. & CLAUER, N. - 1972 - Possibilités d'utilisation stratigraphique des datations directes rubidium-strontium sur les minéraux et les roches sédimentaires - colloque sur les Méthodes et Tendances de la Stratigraphie - *Mém. Bur. Rech. Géol. Minières*, **77**: 943-950.
- BONHOMME, M.; APRAHAMIAN, J.; CABY, R.; MIZUSAKI, A.M.P. & THOMAZ-FILHO, A. - 1988 - Three examples of radiogenic argon excess in diagenetic, anchimetamorphic and high pressure metamorphic environments - *Abstracts - Intern. Conf. "Geochemical Evolution of the Continental Crust"* - Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil, 175-185.
- BROOKINS, D.G.; CHAUDHURI, S. & DOWLING, P.L. - 1968 - The isotopic composition of strontium in Permian limestones, eastern Kansas - *Chem. Geol.*, **4** : 439-444.
- BROOKINS, D.G.; CHAUDHURI, S. & DULEKOZ, E. - 1970 - Rb-Sr isotopic age of Eskridge shale (Lower Permian), Eastern Kansas - *Sediment. Geol.*, **4**: 103-115.
- BURKE, W.H.; DENISON, R.E.; HETHERINGTON, E.A.; KOEPNICK, R.B.; NELSON, N.F. & OTTO, J.B. - 1982 - Variation of seawater 87Sr/86Sr throughout Phanerozoic time - *Geology*, **10**: 516-519.
- CLAUER, N. - 1975 - Géochimie isotopique du strontium. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain - *Mém. Sci. Géol.*, **45**: 256 p.
- CLAUER, N. - 1979a - The strontium isotopic composition of recent smectites and the synsedimentary isotopic homogenization - In: European Colloq., Proceedings IV, Paris, p. 16,
- CLAUER, N. - 1979b - Relationship between the isotopic composition of strontium in newly formed continental clay minerals and their source material - *Chem. Geol.*, **27**: 115-124.
- CLAUER, N. - 1981 - Strontium and argon isotopes in naturally weathered biotites, muscovites and feldspars - *Chem. Geol.*, **31**: 325-334.

- CLAUER, N. - 1982 - Rubidium-Strontium method applied to sediments: certitudes and
incertitudes - In: ODIN, G.S. (ed.), *Numerical dating in stratigraphy*, New York, Wiley, 1,
245-276.
- CLAUER, N. & BONHOMME, M. - 1974 - Isotopic homogenization of strontium in clays -
Intern. Meet. for Geochron., Cosmochron and Isotope Geology.
- CLAUER, N.; HOFFERT, M.; GRIMAUD, D. & MILLOT, G. - 1975 - Composition isotopique
du strontium d'eaux interstitielles extraites des sediments récents: un argument en faveur
de l'homogénéisation isotopique des minéraux argileux - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **39**:
1579-1582.
- CLAUER, N.; HOFFERT, M. & KARPOFF, A.M. - 1982 - The Rb-Sr isotope system as an
index of origin and diagenetic evolution of southern Pacific red clays - *Geoch. et Cosmoch.
Acta*, **46**: 2659-2664.
- COMPSTON, W. & PIDGEON, R.T. - 1962 - Rubidium-strontium dating of shales by the
total-rock method - *J. Geophys. Res.*, **67**(9): 3493-3502.
- CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K. & THOMAZ-FILHO, A. - 1978 - Applicability of the rubidium-
strontium method to shales and related rocks - AAPG - Studies in Geology n° 6 -
Contributions to The Geologic Time Scale, 93-117.
- CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K. et alii - 1985a - Sistematica Rb/Sr em rochas sedimentares
argilosas do Paleozóico da Bacia Amazônica - *Anais II Simp. de Geol. da Amazônia*,
Belém (PA), 94-105
- CORDANI, U.G.; THOMAZ-FILHO, A.; BRITO NEVES, B.B. & KAWASHITA, K. 1985b - On
the applicability of the Rb/Sr method to argillaceous sedimentary rocks: some examples
from Precambrian sequences of Brazil - *Giornale di Geologia*, ser. 3: **471/1-2**: 253-280.
- DASCH, E.J. - 1969 - Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments and
sedimentary rocks - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **33**: 1521-1552.
- DASCH, E.J.; HILLS, F.A. & TUREKIAN, K.K. - 1966 - Strontium isotopes in deep-sea
sediments - *Science*, **153**: 295-297.
- DEMAIFFE, D. & FIÈREMANS, - 1981 - Strontium isotopic geochemistry of the Mbiji Mayi
and Kundelungu kimberlites (Zaire, central Africa) - *Chem. Geo.*, **31**: 311-324.
- DEPAOLO, D.J. & INGRAM, B.L. - 1985 - High-resolution stratigraphy with strontium isotopes
- *Science*, **227**: 938-941.
- DERRY, L.A.; KETO, L.S.; JACOBSEN, S.B.; KNOLL, A.H. & SWETT, K. - 1989 - Sr isotopic
variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland - *Geoch.
et Cosmoch. Acta*, **53**: 2331-2339.
- ELDERFIELD, H. - 1986 - Strontium isotope stratigraphy - *Palaeogeogr. Palaeoclim.
Palaeocol.*, **57**: 71-90.
- FAURE, G. - 1986 - *Principles of Isotope Geology* - New York, John Wiley & Sons, Inc.,
Second Edition, 589 pp.
- FAURE, G. & POWELL, J.L. - 1972 - *Strontium isotope - Geology*, Springer Verlag, NY, 188p.
- FAURE, G. & CHAUDHURI, S. - 1967 - *The geochronology of the Keweenawan rocks of
Michigan and origin of the copper deposits* - Final Report, Grants GP-3090, GA-470 - The
National Science Foundation, Washington, 41 p.
- GOROKHOV, I.M.; SEMIKHATOV, M.A.; BASKAROV, A.V.; KUTYAVIN, E.P.; MEL'NIKOV,
N.N.; SOCHAVA, A.V. & TURCHENKO, T.L. - 1995 - Sr isotopic composition in Riphean,
Vendian, and Lower Cambrian Carbonates from Siberia - *Stratigraphy and Geological
Correlation*, **3** (1): 1-28.
- HART, S.R. & TILTON, G.R. - 1966 - The isotope geochemistry of strontium and lead in Lake
Superior sediments and water - *Geoph. Mon.*, **10**, The Earth Beneath the Continents,
127-137.
- HAUER, T.V.; BONHOMME, M. et alii - 1986 - Analysis K/Ar de phyllites fines des formations
détritiques de L'Indus au Ladakh (Inde); mise en évidence de l'âge éocène supérieur
du métamorphisme - *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. **302**, ser. II, **6**: 325-330.

- JORGENSEN, N.O. & LARSEN, O. - 1980 - The strontium isotopic composition of Maastrichtian and Danian chalk - *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **28**: 127-129.
- KAWASHITA, K. - 1972 - *O método Rb-Sr em rochas sedimentares - aplicação para as bacias do Paraná e Amazonas* - Tese de Doutoramento - Inst. de Geoc. da USP, 111p.
- KAWASHITA, K.; THOMAZ-FILHO, A.; SATO, K.; KAWASHITA, M.Y. & BABINSKI, M. - 1993 - Idade do Grupo Bambuí (MG) com base em isótopos de Carbono, Oxigênio, Estrôncio e Enxofre - II Congr. de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto, Portugal.
- KAWASHITA, K.; KAWASHITA, M.Y.; PETRONILHO, L.; SATO, K. & RODRIGUES, M.S. - 1994 - Lixiviação progressiva e seletiva de Sr em carbonatos. Sua importância e aplicação em carbonatos do Grupo Bambuí - In: Congr. Bras. Geol., 38, Camboriú, *Bol. Resumos Expandidos*, **2**: 399-400.
- KAWASHITA, K.; THOMAZ-FILHO, A.; BRITO-NEVES, B.B.; CORDANI, U.G.; MACEDO, M.H.F. & SOLIANI-JUNIOR, E. - 1996 - Reavaliação das idades Rb/Sr do Grupo Una com base na composição isotópica do Sr em carbonatos - Congr. Bras. Geol., 39, Salvador (BA), *Anais*, vol. **6**: 533-535.
- KUBLER, B. - 1964 - Les argiles, indicateurs de métamorphisme - Rev. Inst. Français du Pétrole e Ann. des Combustibles Liquides, **19** (10): 1093-1112.
- KUBLER, B. - 1966 - La cristallinité de l'œillite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme: étages tectoniques - Colloque de Neuchâtel, 105-122.
- LEE, M.; ARONSON, J.L. & SAVIN, S.M. - 1985 - K/Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendas Sandstone, Netherlands - *AAPG Bull.*, **69**(9): 1381-1385.
- MACEDO, M.H.F. - 1982 - *Les systèmes isotopiques rubidium-strontium et potassium-argon dans les argiles extraites des sédiments carbonatés. Application à la datation du Proterozoïque sédimentaire du Brésil dans les Etats de Bahia et Santa Catarina* - Tese de Doutorado - Strasbourg - Univ. Louis Pasteur, França, 119 p.
- MACEDO, M.H.F. & BONHOMME, M. - 1984 - Contribuição à cronoestratigrafia das Formações Caboclo, Bebedouro e Salitre na Chapada Diamantina (BA) pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. - *Rev. Bras. Geociências*, **14** (3): 153-163.
- MISI, A. & VEIZER, J. - 1996 - Chemostratigraphy of neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irene Basin, Brazil - Congr. Bras. Geol., 39, Salvador (BA).
- MIZUSAKI, A.M.P. - 1992 - *Comportamento do Rb e do Sr em sedimentos recentes - Implicações na datação radiométrica de rochas sedimentares* - Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências da USP, 140 p.
- MORTON, J.P. - 1985 - Rb/Sr dating of diagenesis and source age of clays in upper Devonian black shales of Texas - *Geol. Soc. of Am. Bull.*, **96**: 1043-1049.
- MUKHOPADHYAY, B. & BROOKINS, D.G. - 1976 - Strontium isotopic composition of the Madera Formation (Pennsylvanian) near Albuquerque, New Mexico - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **40**: 611-616.
- PARENTI COUTO, J.G.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; IYER, S.S. & MORAES, N.M.P. - 1981 - Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí, com base em análises isotópicas de Sr e Rb - *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo, **11**(1). 5-16.
- PERRY, E.A. & TUREKIAN, K.K. - 1974 - The effects of diagenesis on the redistribution of strontium isotopes in shales - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **38**: 929-935.
- PETERMAN, Z.E.; HEDGE, C.E. & TOURTELLOT, H.A. - 1970 - Isotopic composition of strontium in sea water throughout Phanerozoic time - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **34**: 105-120.
- SINGER, A. & MULLER, G. - 1983 - Diagenesis in argillaceous sediments - In: LARSEN, G. & CHILINGAR, G.V. (eds), *Diagenesis in sediments and sedimentary rocks*, **2**, Amsterdam, Elsevier, 115-211.
- STARINSKY, A.; BIELSKY, B.; LAZAR, B.; WAKSHAL, E. & STEINITZ, S. - 1980 - Marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the Jurassic to Pleistocene: evidence from groundwaters in Israel - *Earth Planet. Sci. Letters*, **47**: 75-80.

- THOMAZ-FILHO, A. - 1976 - *Potencialidades do método Rb-Sr para datação de rochas sedimentares argilosas* - Tese de Doutoramento - Inst. de Geoc. da USP, 128p.
- THOMAZ-FILHO, A. & BONHOMME, M. - 1979 - Datation isotopiques Rb/Sr et K/Ar dans le Group Bambui, São Francisco (MG) au Brésil. Phase métamorphique brésilienne synchrone de la première phase panafricaine - *C.R. Acad. Sci. Ser. D*, 1221-1224.
- THOMAZ-FILHO, A.; CORDANI, U.G. & KAWASHITA, K. - 1976 - Aplicação do método Rb-Sr na datação de rochas sedimentares argilosas da Bacia do Paraná - *Anais do 29º Congr. Bras. de Geologia*, Belo Horizonte.
- THOMAZ-FILHO, A. & LIMA, V.Q. - 1981 - Datação radiométrica de rochas sedimentares pelíticas pelo método Rb/Sr - *Bol. Técn. Petrobrás*, Rio de Janeiro, **24**(2): 109-119.
- TREMBA, E.L.; FAURE, G.; KATSIKATSOS, G.C. & SUMMERSON, C.H. - 1975 - Strontium isotope composition in the Tethys Sea, Euboea, Greece - *Chem. Geol.*, **16**: 109-120.
- VEIZER, J. & COMPSTON, W. - 1974 - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of seawater during the Phanerozoic - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **38**: 1461-1484.
- VEIZER, J. & COMPSTON, W. - 1976 - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Precambrian carbonates as a index of crustal evolution - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **40**: 904-914.
- VEIZER, J.; COMPSTON, W.; CLAUER, N. & SCHIDLOWSKI, M. - 1983 - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Late Proterozoic carbonates: evidence for a "mantle" event at 900 Ma ago - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **47**: 295-302.
- WHITNEY, P.R. & HURLEY, P.M. - 1964 - The problem of inherited radiogenic strontium in sedimentary age determinations - *Geoch. et Cosmoch. Acta*, **28**: 425-436.
- WICKMAN, F.W. - 1948 - Isotope ratios - A clue to the age of certain marine sediments - *Journal of Geology*, **56**: 61-66.

Original recebido em 22/09/96
Aceite para publicação em 08/10/96