

GEOCRONOLOGIA E GEOQUÍMICA PELO MÉTODO DOS TRAÇOS NUCLEARES. ALGUNS EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO EM GEOLOGIA APLICADA.

G. Poupeau^{1,2,3}
E. Soliani Jr.^{1,3}

RESUMO

Discute-se, neste artigo, um certo número de aplicações típicas do "método dos traços nucleares" em Geocronologia, em Geoquímica e em Geofísica.

Em Geocronologia, após uma revisão dos princípios da datação por Traços de Fissão (TF) e dos tipos de eventos geológicos passíveis de mensuração por este método, apresenta-se algumas aplicações típicas em metalogenia e nos domínios da Geologia do Petróleo.

Em Geoquímica, as utilizações atuais do método dos traços estão ligadas à detecção de jazidas e ao tratamento de minerais de urânio, seja através do emprego de técnicas de cartografia do urânio sobre lâminas petrográficas, seja de técnicas de prospecção, em escala de campo, baseadas na detecção das emanações de radônio-222 (²²²Rn).

Em Geofísica, uma aplicação importante diz respeito à detecção e previsão de tremores de terra através de uma vigilância contínua das emanações de ²²²Rn nas proximidades das zonas de alto risco.

RESUMÉ

On discute dans cet article un certain nombre d'applications typiques de la "méthode des traces nucléaires" en Géochronologie, en Géochimie et en Géophysique.

En Géochronologie, après un rappel des principes de la datation par Traces de Fission (TF) et des types d'événements géologiques mesurables par cette méthode, on présente quelques applications typiques en métallogénie et dans les domaines de la Géologie du Pétrole.

En Géochimie, les utilisations actuelles de la méthode des traces sont liées à la détection de gisements et au traitement de minéraux d'uranium, par l'emploi soit de techniques de cartographie de l'uranium sur lames pétrographiques, soit de techniques de prospection à l'échelle du terrain, basées sur la recherche d'émanations de radon-222 (²²²Rn).

En Géophysique, une application importante concerne la détection et la prévision des tremblements de terre au moyen d'une surveillance continue des émanations en ²²²Rn au voisinage de zones à haut risque.

ABSTRACT

Various applications of the "Nuclear Track Method" to Applied Geology and case studies are presented.

¹Instituto de Geociências e Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Institut Dolomieu de Géosciences, Université "Joseph Fourier" e Unité Associée n° 69 du CNRS, Grenoble, France.

In Geochronology, after a short review of the fission-track (FT) dating principles and main uses, one discuss some typical applications to Metallogeny and Petroleum Geology.

In Applied Geochemistry, the track method is used for uranium prospection and uranium-ore studies, via, respectively, field measurements of radon-222 (^{222}Rn) emanations and uranium-FT micromapping in petrographical thin sections.

In Geophysics, important applications are the detection and prediction of earthquakes via the continuous record of ^{222}Rn emanations along major faults.

INTRODUÇÃO

Os sólidos isolantes (minerais, vidros naturais ou artificiais, plásticos, etc.) são conhecidos por se comportarem como retentores de traços de fissão. Eles são capazes, dentro de certas condições, de registrar as trajetórias de partículas nucleares (FLEISCHER et al., 1975). Tais materiais dielétricos, no entanto, não apresentam todos a mesma sensibilidade. Assim, os minerais não gravam mais do que as trajetórias ("traços") de íons suficientemente pesados. Uma consequência importante desta restrição implica no fato de que a única fonte de traços dentro dos minerais terrestres resume-se à fissão do urânio ($Z=92$), que é utilizada em geocronologia (Fig. 1). Por seu lado, os plásticos são muito mais sensíveis, uma vez que podem registrar os traços advindos da emissão de partículas alfa ($Z=2$), o que permite a sua utilização na detecção do radônio-222 presente nos solos e, assim, utilizá-lo como traçador natural de processos geoquímicos e geofísicos importantes.

O objetivo deste artigo é o de apresentar alguns desenvolvimentos recentes deste método dos "traços de fissão" nos domínios da geologia aplicada à prospecção e à avaliação de recursos minerais, bem como na previsão dos abalos sísmicos.

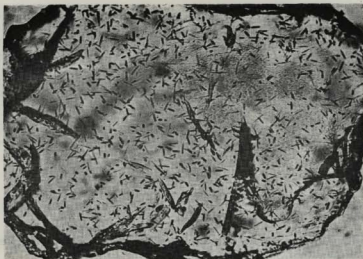


Figura 1 - Traços de fissão fósseis em apatita de um granito do Arco de Rio Grande (RS), com comprimentos máximos da ordem de 15 micra.

PRINCÍPIOS DA DATAÇÃO POR TRAÇOS DE FISSÃO

O urânio-238 conhece dois modos de desintegração nuclear: ou pela emissão de uma partícula alfa ou pela fissão espontânea, sendo que esta segunda modalidade de decaimento é muito menos importante, uma vez que ocorre na proporção média de um evento para cerca de 2 milhões de desintegrações alfa (Fig. 2).

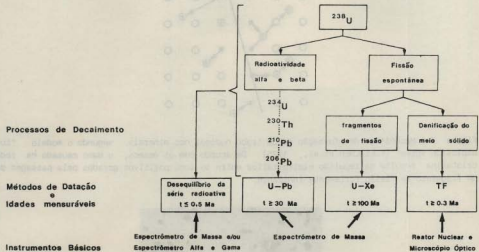


Figura 2 - Modos de decaimento do urânio-238 e suas possíveis utilizações em geocronologia.

Durante a fissão espontânea, o átomo de urânio se parte em dois íons filhos que são ejetados segundo sentidos opostos. Estes dois "fragmentos" de fissão são fortemente ionizantes (de 18 a 20 cargas positivas em média) e se separam com uma energia cinética da ordem de 200 Megaelétron-Volts. Dentro de um mineral, estes dois fragmentos que se repelem provocam uma desorganização profunda da rede cristalina ao longo das suas trajetórias ou "traços" (Fig. 3). O diâmetro da zona fortemente perturbada é da ordem de 0,01 a 0,02 micron e seu comprimento é geralmente correlacionável à densidade do mineral considerado. Desta forma, um traço será tanto mais longo quanto menor a densidade do mineral afetado.

Os traços "latentes", assim produzidos, são invisíveis ao microscópio óptico, mas mostram-se relativamente reativos a um tratamento químico moderado, podendo ser ampliados, por dissolução preferencial, os diâmetros dos traços que atingem a superfície de um mineral até um valor superior a 0,3 micron. Com isto, os mesmos podem agora ser observados com o auxílio de um microscópio óptico. O comprimento máximo dos traços, observável à microscopia óptica, varia de cerca de 11 micra, para os zircões (densidade de 4 a 4,7), a aproximadamente 22 micra no caso das micas ($d = 3,3$ - Fig. 4).

A densidade (ou seja, o número de traços/centímetro quadrado) de traços de fissão fósseis (Df) que se pode observar em um mineral depende, por sua vez, da idade do mesmo e de seu teor

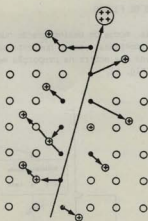


Figura 3 - Mecanismo de formação de um traço nuclear nos minerais, segundo o modelo "ion explosion spike" (FLEISCHER et al., 1975). De acordo com os mesmos, o dano causado na rede cristalina resulta da repulsão eletrostática entre os íons positivos gerados pela passagem de um fragmento de fissão fortemente ionizante.



Figura 4 - Traços de fissão induzidos em moscovita. A forma losangular da seção transversal dos traços se deve a super-revelação dos mesmos. A largura da foto corresponde a 150 micra, aproximadamente.

em urânio. Consegue-se determinar esta última grandeza através de uma irradiação do material em questão por neutrons térmicos, em um reator nuclear. Este procedimento provoca a fissão induzida (DI) do urânio-235 e, então, sabendo-se que a razão isotópica $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$, na natureza, é uma constante, pode-se calcular uma "idade traços de fissão" a partir da medida das densidades dos traços de fissão fósseis (Df238), dos induzidos (DI235) e da dose (Φ) de neutrons térmicos, segundo a equação:

$$t = A \ln (1 + B \cdot Df238/DI235 \cdot \Phi) \quad (1)$$

onde A e B são constantes (ver, por exemplo, FLEISCHER et al., 1975).

Podendo ser a dose de neutrons medida a partir da densidade dos traços de fissão induzidos em um vidro "standard" (cujo conteúdo em urânio é conhecida), a determinação de uma idade TF restringe-se à medida de três densidades de traços e necessita, como único equipamento, após a irradiação, de um bom microscópio óptico (para maiores informações ver, por exemplo, POUPEAU, 1981a, b).

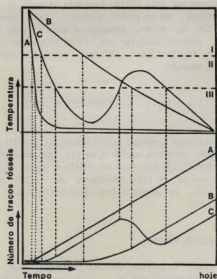
D QUE SE PODE DATAR POR TRAÇOS DE FISSÃO?

Em princípio, todo vidro vulcânico ou todo mineral, que contenha uma quantidade suficiente de urânio, pode ser datado por TF. Os traços de fissão não são estáveis nestes materiais, nas condições geológicas, a não ser abaixo de uma determinada temperatura, isto é, passa-se de uma situação de perda completa dos traços, para uma de retenção total, variando-se apenas alguns poucos graus centígrados. Este restrito intervalo tem sido referido na literatura como "temperatura de bloqueio", uma grandeza dependente da taxa de resfriamento da rocha (DODSON, 1973, 1979). O método dos traços de fissão permitiria, então, determinar a época da passagem do mineral analisado por uma dada isoterma, ao longo de um processo de resfriamento regional (Fig. 5), ou estimar a idade de mineralizações supergênicas.

Para as rochas vulcânicas, onde o resfriamento se deu de maneira "instantânea" (Fig. 5A), este evento coincide com a época da extrusão das mesmas e o valor temporal obtido pode referir-se à sua gênese. Neste caso, o método dos TF permite datar materiais rochosos bastante diferentes como tufo vulcânicos, ignimbritos, obsidiana, seja a partir de minerais pesados dos tipos apatita, esfeno e zircão, seja a partir do próprio vidro vulcânico.

No caso de resfriamentos lentos ou complexos (Fig. 5B e C), entre 0.1°C/Ma e 30°C/Ma, ingressa-se nos domínios da tectônica. Aqui pode-se estimar o estilo de resfriamento sofrido pela área pesquisada e as taxas de soergimento/erosão de uma cadeia montanhosa recente do tipo alpino/andino ou de porções de um escudo antigo, entre os 270°C e os 100°C. Associado aos métodos de datação K-Ar e Rb-Sr, o método dos traços de fissão permite, por exemplo, a análise da história térmica de um maciço de rochas metamórficas entre cerca de 500°C e menos de 100°C. Em adição, se pode saber, graças à medida do comprimento dos traços, se o último resfriamento, entre 270°C e 60°C, foi monótono ou não (WAGNER, 1979a, 1988).

De igual modo, a colocação de intrusões superficiais (subvulcânicas ou batolíticas supracrustais) ou de mineralizações supergênicas podem ser datadas pelo método dos traços. Para tanto, necessita-se (a) que dentro destas unidades existam minerais apropriados a este tipo de análise e que a temperatura de intrusão tenha sido suficientemente alta para provocar a reconstrução da rede cristalina e, conseqüentemente, o desaparecimento dos traços de fissão espontâneos dentro dos minerais da rocha encaixante e que (b), desde a sua colocação, a temperatura tenha se mantido abaixo da temperatura de bloqueio de seus minerais.



- I - Zona de instabilidade dos traços;
 II - Zona de estabilidade parcial;
 III - Zona de estabilidade.

- A - Resfriamento rápido;
 B - Resfriamento lento;
 C - Resfriamento complexo.

Figura 5 - Influência da taxa de resfriamento crustal sobre a retenção dos traços de fissão nos minerais (WAGNER, 1979a, com modificações). Idades significativas TF podem também ser obtidas no caso C, com a ajuda da medida dos comprimentos dos traços (ver texto e referências in cluídas).

O método dos traços de fissão permite uma precisão de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$ (1σ) para idades compreendidas entre 10^3 anos a 10^9 anos. Os diferentes aspectos do método dos traços de fissão evocados a seguir foram recentemente discutidos em detalhe por diversos autores, entre os quais destacamos WAGNER (1979b), NAESER (1976, 1979) e POUPEAU (1981b).

AS DATAÇÕES POR TRAÇOS DE FISSÃO NA GEOLOGIA APLICADA

A aplicação do método dos traços de fissão na prospecção de minérios ou na geologia do petróleo é relativamente recente. Os poucos resultados atualmente disponíveis deixam já

vislumbrar uma ampla gama de possibilidades nestes domínios, como revelam os exemplos a seguir comentados.

Datação por TF e prospecção mineira - numerosos tipos de mineralizações secundárias, com interesse econômico, originam-se em regime hidrotermal. Quando tais fenômenos ocorrem em regime termal frio ($>250^{\circ}\text{C}$), o método dos TF é seguramente o único que pode permitir uma avaliação da zona termicamente afetada pelas soluções mineralizantes quentes, isto é, do volume de rocha ou dos locais de concentração do minério. Esta propriedade de tal metodologia foi demonstrada por NAESER (1985) para os distritos mineiros de Rico e de Gilman, nos Estados Unidos.

O distrito de Gilman, no Colorado, é bem conhecido por sua produção de zinco. A mina mais rica é cortada por um sill de extensão regional e idade de 70 Ma. Nas vizinhanças imediatas desta mina, as idades TF das apatitas (com temperatura de bloqueio de $105 \pm 10^{\circ}\text{C}$) e dos zircões (T_b da ordem de 200°C) são concordantes e fornecem valores próximos de 35 Ma, sugerindo que a mineralização em zinco se deu nesta época. No entanto, a 1,5 km do corpo mineralizado, as idades TF dos zircões do sill mostram-se ainda afetadas por um rejuvenescimento considerável, fornecendo valores temporais de 45 Ma. Isto indica que a anomalia térmica portadora da mineralização em pautas se estende bem além das ocorrências atualmente conhecidas. A cartografia por TF das dimensões de tal anomalia térmica poderia servir de guia para sondagens futuras.

Uma situação similar foi encontrada na região de Rico, também no Colorado, distrito mineiro de metais preciosos e metais não ferrosos. Lá, as rochas componentes do distrito encontram-se injetadas por sills de latito porfirítico à hornblenda. As idades TF de amostras destes sills, coletadas a 6 km do centro do distrito, revelaram ser de 20 Ma e de 65 Ma para, respectivamente, as apatitas e os zircões. Estas idades são cada vez mais jovens à medida que se aproxima do centro do distrito, onde as mesmas convergem para valores da ordem de 5 Ma. Pode-se então supor que as mineralizações econômicas do distrito de Rico originaram-se durante o Plioceno. A distribuição das idades TF ao redor dos jazimentos conhecidos poderia, também aqui, ser utilizada para a prospecção de novas ocorrências.

Termocronometria e termobarometria de jazidas minerais - os minerais das jazidas hidrotermais são frequentemente ricos em inclusões fluídas. O estudo destas últimas fornece, classicamente, informações sobre as condições termobarométricas de colocação de tais jazimentos. Dentro de certas situações favoráveis, as fases minerais filonianas, portadoras de inclusões fluídas, são também susceptíveis de serem datadas por TF. É o caso, por exemplo, das apatitas da ganga dos filões mineralizados a tungstênio do distrito de Panasqueira, em Portugal. As medidas combinadas de inclusões fluídas/TF (KELLY & WAGNER, 1977) permitiram restringir os modelos possíveis de "mise-en-place" desta ocorrência e de inseri-lo em um contexto geodinâmico geral.

O distrito de Panasqueira constitui, de acordo com nosso conhecimento, a única jazida até agora estudada tanto por suas inclusões fluídas, quanto pelo método dos traços de fissão, constituindo-se em um exemplo a ser seguido.

Termocronometria de bacias sedimentares e prospecção de petróleo - este modo de utilização dos TF foi desenvolvido, no início dos anos 80, por Gleadow e colaboradores, na Austrália, segundo diversos artigos por eles publicados. Os princípios de tal procedimento encontram-se detalhados em GLEADOW et al. (1983).

As aplicações do método dos traços de fissão na reconstituição da história térmica das bacias sedimentares e na pesquisa de petróleo repousam, em grande parte, sobre o fato de que o intervalo de estabilidade térmica parcial dos traços nas apatitas corresponde, aproximadamente, ao intervalo térmico de transformação e maturação da matéria orgânica em óleo mineral. De fato, em regime isotermal, os traços de fissão nas apatitas começam a desaparecer a cerca de 60°C e são totalmente eliminados a 120°C , no período de 1 milhão de anos. Em

outros termos, com um gradiente geotérmico de 30°C/km, os TF fósseis das apatitas detríticas dos níveis arenosos começam a diminuir em comprimento a partir de 2 km de profundidade, ao longo de uma sondagem, e fornecem uma idade igual a zero a cerca de 4 km, sendo este intervalo de profundidade o adequado para a gênese e maturação do petróleo, no exemplo dado (TISSOT & MELTE, 1978; PERRDON, 1980). Foi uma dinâmica desta ordem que foi encontrada nas apatitas de uma perfuração de 5 km de profundidade efetuada pela PETROBRÁS S.A. nos domínios da Bacia do Espírito Santo (POUPEAU et al., 1986 - Fig. 6).

As apatitas de sondagens petrolíferas não são portadoras apenas de mensagens termométricas. Elas são também minerais detríticos, e como tais, as idades TF de cristais individuais de apatitas de níveis superficiais, onde a temperatura jamais atingiu os 60°C, são características das suas rochas-mãe. Foi assim que se pode reconhecer pelo menos duas áreas-fontes continentais e uma terceira constituída por ilhas oceânicas de origem vulcânica para as apatitas dos níveis situados a 740 e 1330m de profundidade (POUPEAU et al., op. cit.).

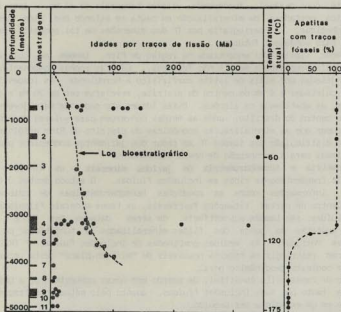


Figura 6 - Distribuição das idades TF em apatitas detríticas provenientes de 11 níveis estratigráficos de sondagem realizada na plataforma continental do Espírito Santo. Cada ponto representa a idade medida sobre um cristal de 100 micras. Observa-se que, abaixo de 3000 metros, as idades TF são inferiores às idades bioestratigráficas e tendem a zero. Nos níveis de 6 a 11, a grande maioria dos cristais de apatitas (não representados na figura) nem mesmo apresentam traços de fissão (ver coluna da direita), face ao efeito do gradiente geotérmico local (simplificado de POUPEAU et al., 1986).

Além disso, para as bacias continentais atualmente exumadas, onde houve a alternância de fases de sedimentação e de erosão, GLEADOW et al. (1983) mostraram que a medida do comprimento dos traços de fissão espontâneos das apatitas detriticas é capaz de fornecer informações sobre as migrações verticais de isothermas críticas para a maturação da matéria orgânica.

Por outro lado, os episódios de distensão crustal provocam seguidamente a injeção de diques e de sills, muitas vezes numerosos, nas seqüências sedimentares acumuladas nas bacias. Se estes corpos magmáticos forem suficientemente espessos (algumas dezenas a centenas de metros) e interestratificarem-se com as camadas sedimentares em níveis próximos à superfície, como, por exemplo, na Bacia Amazônica, eles poderão ter um efeito considerável na maturação da matéria orgânica a profundidades onde a temperatura ambiente, devida ao gradiente geotérmico, fosse insuficiente para transformá-la em petróleo. Na maioria das vezes, é muito difícil avaliar tais efeitos a partir dos coeficientes de condutividade térmica dos sedimentos nas vizinhanças dos sills face ao fato de não conhecermos o regime de circulação dos fluidos dentro das rochas no momento da intrusão destes corpos.

Deste modo, um estudo por TF das apatitas e dos zircões detriticos coletados a diferentes distâncias destas unidades ígneas poderia permitir a mensuração da influência da circulação de fluidos na transferência de calor e, em conseqüência, o volume de sedimentos termicamente afetados por temperaturas superiores a 60°C.

O método dos traços de fissão tem, assim, um papel específico a desempenhar nas avaliações das reservas petrolíferas potenciais de uma bacia. Aplicado conjuntamente a vários minerais detriticos, portadores de diferentes temperaturas de bloqueio para a reconstituição da rede cristalina e desaparecimento dos traços, ele fornece as bases para a história da evolução térmica de tais bacias (GLEADOW et al., 1983).

EMPREGO DOS TRAÇOS DE FISSÃO NA GEOQUÍMICA DO URÂNIO

Além da geocronologia, o método dos traços permite estudar a microdistribuição do urânio nas rochas. Basta, para tanto, irradiar em reator nuclear uma lâmina delgada polida de petrografia sobre a qual se fixa, à maneira da lâmina, um "detector externo" constituído por uma folha de mica ou de plástico muito pobre em urânio. Uma certa parcela dos fragmentos de fissão induzidos do ^{235}U , produzidos nas proximidades da superfície (<10 micra) do material rochoso aderido à lâmina, é ejetada em direção ao detector auxiliar, originando nele os traços latentes. Após a revelação dos mesmos, volta-se a superpor-se o detector à lâmina delgada, conseguindo-se, assim, "cartografar" o urânio dentro da amostra, à escala de uma dezena de micra (e.g., POUPEAU et al., 1973 - Fig. 7) e determinar os seus teores nas diferentes fases minerais da rocha até o nível do ppb.

Jazimentos de Urânio - a microdistribuição do urânio nas rochas portadoras de quaisquer teores deste elemento (ver, por exemplo, DOSTAL & CAPEDEI, 1978) e nas jazidas explotáveis, tem sido largamente estudada pelo método dos traços de fissão desde os anos 70. Ele apresenta a vantagem de poder ser utilizado em combinação com o estudo petrográfico e de chegar a conclusões quanto à gênese de um jazimento (e.g., ZIELINSKI, 1980; BOMBER et al., 1986 ou qualquer dos numerosos artigos publicados pelo periódico "Economic Geology").

A datação de jazidas de urânio por TF não foi considerada senão que recentemente. Em geral, face à paragenese destas ocorrências e à distribuição do urânio, modificações metodológicas específicas precisam ser elaboradas. Soluções originais para estes problemas têm sido propostas por WEILAND et al. (1980) e ROSENBERG & HOOPER (1982).

Jazimentos de Fosfato - no curso da última década, o aumento de preço dos óxidos de urânio levou à reconsideração de fontes alternativas deste metal. Deste ponto de vista, os fosfatos sedimentares representam um grande interesse uma vez que, em geral, contêm da ordem

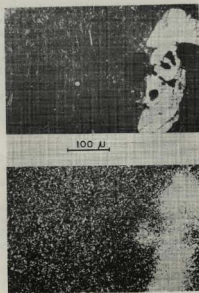


Figura 7 - Distribuição do urânio em rocha traquito-riolítica de Afar (Etiópia). No alto, lâmina petrográfica e, abaixo, traços de fissão induzidos do urânio, obtidos em detector plástico (Makrofol fixado sobre a lâmina), durante irradiação em réator nuclear (POUPEAU et al., 1973). O urânio, nesta rocha, concentra-se de maneira relativamente homogênea na matriz (Barra de escala = 100 micra).

de 30 ppm a 260 ppm de urânio e hoje é comum o seu aproveitamento industrial, feito em algumas usinas por via úmida, durante a fabricação do ácido fosfórico (Engineering and Mining Journal, 1975). Estudos recentes sugerem que métodos seletivos de extração do urânio, que não necessitam mais de uma dissolução completa da rocha, são já previsíveis. Deste modo, durante a calcinação de fosfatos utilizados na preparação de fertilizantes, constatou-se que o urânio é fortemente remobilizado, às vezes com mudança de valência (oxidação), podendo sofrer migrações seguidas de eventuais reconcentrações em certas fases minerais até teores de 1 a 2%. As migrações do urânio acontecem a temperaturas $> 800^{\circ}\text{C}$ e, acima dos 900°C , ele pode ser extraído pela ação de ácidos diluídos (STEIN et al., 1982).

Neste tipo de pesquisa, o conhecimento da microdistribuição do urânio por TF, antes e após cada tratamento das amostras, permite compreender os processos de concentração do elemento. Antes de tudo, um estudo para a localização fina do urânio contribui para o esclarecimento dos mecanismos de concentração primária e secundária naturais (e.g., HASSAN et AL-MALEH, 1976). Ao longo das etapas sucessivas de calcinação, ele permite otimizar as condições de preparação dos fosfatos possibilitando um melhor rendimento durante a extração química seletiva do metal (STEIN et al., 1982).

APLICAÇÃO DOS TRAÇOS DE FISSÃO NA PROSPECÇÃO DO URÂNIO

Esta aplicação utiliza, de um lado, a propriedade que têm certos tipos de plástico de reter os traços gerados pela emissão de partículas alfa durante os fenômenos naturais de decaimento radioativo (FLEISCHER et al., 1975). Por outro lado, se vale também do fato de um dos descendentes radioativos do ^{238}U , o ^{222}Rn (com um período $T = 3.82$ dias), ser um gás nobre, ou seja, um radioisótopo quimicamente inerte, capaz de migrar por distâncias consideráveis antes de novamente desintegrar-se pela emissão de uma partícula alfa. Desta maneira, uma jazida de urânio não aflorante pode perfeitamente ser detectada através de uma anomalia positiva de ^{222}Rn nas proximidades da superfície do solo.

O método dos traços permite, com certa facilidade, localizar tais anomalias de ^{222}Rn com a ajuda de detectores de partículas alfa distribuídos segundo uma malha definida em uma superfície, detectores estes constituídos de alguns centímetros quadrados de folhas de plástico sensível, colocadas no fundo de recipientes que são emborcados em escavações da ordem de 50 cm de profundidade (Fig. 8). Um tempo de exposição de algumas semanas é, em geral, suficiente para produzir nos plásticos um número de traços nucleares facilmente detectável sob um microscópio óptico.

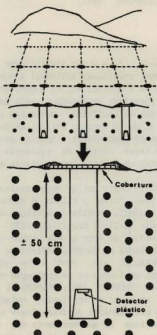


Figura 8 - Malha de vigilância das emissões do radônio-222 nos solos e detalhe da instalação de um detector plástico no fundo de uma escavação da ordem de 50 cm. A distância entre os pontos de observação é variável em função da área total em estudo e do grau de detalhe desejado.

Este procedimento extremamente econômico, proposto por GINGRICH (1975), permite a detecção de concentrações de urânio situadas às vezes a até 100 m de profundidade (GINGRICH & FISCHER, 1976).

OS TRAÇOS DE FISSÃO NA PREVISÃO DE ABALOS SÍSMICOS

Os tremores de terra são freqüentemente precedidos de um aumento na emissão de ^{222}Rn nas proximidades da superfície de um terreno, às vezes detectável a distâncias consideráveis do epicentro, da ordem de 100 e até mesmo de 1000 km.

Um controle contínuo das emissões de ^{222}Rn nas vizinhanças de falhas ativas representaria, assim, um princípio de previsão de abalos com importantes potencialidades.

Malhas de vigilância, baseadas na utilização de detectores plásticos, tais como descritos no item precedente, têm sido instaladas em diversas zonas de riscos, como, por exemplo, nos Estados Unidos, a partir de 1975 (MOGRO-CAMPERO & FLEISCHER, 1977) e na Turquia, desde 1983 (FRIEDMANN et al., 1988). Embora se saiba que emissões de ^{222}Rn na superfície dos terrenos podem ser localmente controladas por diversos parâmetros, notadamente meteorológicos, parece que mudanças nas concentrações deste gás são correlacionáveis aos abalos sísmicos com magnitude > 3 (FLEISCHER & MOGRO-CAMPERO, 1985).

CONCLUSÕES

O método dos traços de fissão, face a sua simplicidade instrumental, baixo custo e qualidade dos resultados fornecidos, revelou-se aplicável a numerosos domínios das Ciências da Terra. Em Geologia Aplicada ele já é operacional há alguns anos nos campos da Metalogenia ou da Geologia do Petróleo, seja para fins de datação, seja para prospecção ou avaliação de reservas potenciais. Nos domínios da Geofísica, por outro lado, com a previsão de abalos sísmicos, o método encontra-se ainda em estágio inicial de desenvolvimento. Nesta área, a partir dos resultados presentemente disponíveis, pode-se pensar que, em regime climático árido, a previsão de tremores de terra, através da vigilância contínua das emissões de ^{222}Rn em zonas de risco, poderia obter um certo sucesso para os eventos de magnitude igual ou superior a 4.

No curso dos anos 80, os autores deste artigo desenvolveram diversos programas de datação por TF na região SE do Brasil. Desta forma, o estudo de rochas metamórficas na cidade do Rio de Janeiro permitiu detectar a influência térmica da abertura do "rift" do Atlântico Sul (110 - 80 Ma) sobre litologias geradas no Ciclo Brasileiro (650 - 500 Ma) (FONSECA & POUPEAU, 1984). No sul do país, nos domínios do Arco de Rio Grande (RS), obtém-se as idades de sua estruturação, como embasamento da Bacia do Paraná, refletindo uma fase importante da evolução tectônica desta sinéclise (POUPEAU et al., 1985). Em adição, mostramos uma possível utilização das datações por traços de fissão na determinação da história térmica de uma bacia sedimentar ou de uma margem passiva (POUPEAU, 1982; POUPEAU et al., 1986).

Os estudos acima referidos, em curso de ampliação, notadamente com datações de crátons antigos, com alguns resultados preliminares já disponíveis sobre o Cráton do São Francisco (TEIXEIRA et al., 1985), permitiram um aprimoramento dos nossos conhecimentos sobre o resfriamento de escudos antigos, bem como da evolução geotectônica das grandes bacias sedimentares brasileiras. Neste sentido, tais dados são complementares às medidas termocronométricas clássicas obtidas pelos métodos K-Ar e Rb-Sr sobre minerais, às quais seguidamente estão associados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOMBER, B.J.; LEDGER, E.G.; TIEH, T.T. (1986) Ore petrology of a sedimentary uranium deposit, Live Oak, County, Texas. *Economic Geology*, 81:131-142.
- DODSON, M.H. (1973) Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40:259-274.
- DODSON, M.H. (1979) Theory of cooling ages. In: JAGER, E. & HUNSIKER, J.C. (eds.) *Lectures in isotope geology*. Berlin, Springer, p.194-202.
- DOSTAL, J. & CAPEDEI, S. (1978) Uranium in metamorphic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66:409-414.
- FLEISCHER, R.L. & MOGRO-CAMPERO, A. (1985) Association of subsurface radon changes with earthquake. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49:1061-1107.
- FLEISCHER, R.L.; PRICE, P.B.; WALKER, R.M. (1975) *Nuclear tracks in solids*. Berkeley, University of California Press. 604p.
- FONSECA, A. & POUPEAU, G. (1984) Datações por traços de fissão de algumas rochas metamórficas na região da cidade do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. Rio de Janeiro, SBG. v.5, p.321-332.
- FRIEDMANN, H.; ARIC, K.; GUTDEUSTCH, R.; KING, C.-Y.; ALTAY, C. (1968) Radon measurements for earthquake prediction along the North Anatolian Fault Zone: a progress report. *Tectonophysics*, 152:209-214.
- GINGRICH, J.E. (1975) Results from a new uranium exploration method. *Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME*, 258:61-64.
- GINGRICH, J.E. & FISCHER, J.C. (1976) Uranium exploration using the track-etch method. In: EXPLORATION OF URANIUM ORE DEPOSITS. *International Atomic Energy Agency, Proceedings Series*, (434):213-227.
- GLEADOW, A.J.W.; DUDDY, I.R.; LOVERING, J.F. (1983) Fission-track analysis: a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. *APEA Journal*, 23(1):93-102.
- HASSAN, M. & AL-MALEH, K.A. (1976) La répartition de l'uranium dans les phosphates du Sénonien dans le Nord-Ouest syrien. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Sciences de l'Académie des Sciences*, série D: Sciences Naturelles, 282(9):811-814.
- KELLY, M.C. & WAGNER, G.A. (1977) Paleothermometry by combined application of fluid inclusion and fission-track methods. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, (1):1-15.
- LARGE scale uranium recovery from phosphoric acid looks promising (1975) *Engineering and Mining Journal*, 176(11):32.

- MCGRO-CAMPERO, A. & FLEISCHER, R.L. (1977) Subterrestrial fluid convection: a hypothesis for long-distance migration of radon within the earth. *Earth and Planetary Science Letters*, **34**(2):321-325.
- NAESER, C.W. (1976) Fission-track dating. U.S. Geological Survey. Open File Report, (76-190):68p.
- NAESER, C.W. (1979) Fission-track dating and geological annealing of fission-tracks. In: JAGER, E. & HUNZIKER, J.C. (eds.) *Lectures in isotope geology*. Berlin, Springer. p.156-169.
- NAESER, C.W. (1985) Fission-track dating applied to mineral exploration. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **10**:422.
- PERRODON, A. (1980) Géodynamique pétrolière: genèse et répartition des gisements d'hydrocarbures. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration Production Elf-Aquitaine. Mémoire*, (2):381p.
- POUPEAU, G. (1981a) Fission track dating. *Ciência e Cultura*, **33**(3):325-352.
- POUPEAU, G. (1981b) Precision, meaning and accuracy of Fission track ages. *Proceedings Indian Academy of Sciences, Earth Planetary Science*, **90**:403-436.
- POUPEAU, G. (1982) Fission-track dating methods for metamorphic rocks and intracratonic basins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., Salvador, 1982. *Anais*. Salvador, S.B.G. v.4, p.442-450.
- POUPEAU, G.; BAITELLI, R.; GUIMARRES, P.P.D.; KHOURY, M.T.F.C. (1986) Some fission-track studies in Petrobrás core 1-ESS-51 (Espírito Santo Basin, Brazil): a report. *Relatório Interno*. Petrobrás. 38p. (Inédito).
- POUPEAU, G.; SELO, M.; CHEMINEE, J.L. (1973) Repartition de la méthode des traces de fission dans la série volcanique de l'Erta. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles*. Academie des Sciences, Paris, **278**:405-409.
- POUPEAU, G.; SOLIANI Jr., E.; KAWASHITA, K.; BAITELLI, R.; BERBERT, M.; CESAR, M.F. (1985) Um perfil geocronológico (K-Ar/Traços de Fissão) leste-oeste no Escudo Sul-rio-grandense. In: SIMPOSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2., Florianópolis, SBG - núcleos RS-SC e PR. p.308-321.
- ROSENBERG, P.E. & HOOPER, R.L. (1982) Fission-track dating of sandstone-type uranium deposits. *Geology*, **10**:481-485.
- STEIN, M.; STARINSKY, A.; KOLODNY, Y. (1982) Behaviour of uranium during phosphate ore calcination. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **32**:834-847.
- TEIXEIRA, W.; FONSECA, A.C.; POUPEAU, G.; PADILHA, A.V.; ZAPPAROLLI, L.H.; KAWASHITA, K.; KHOURY, M.C. (1985) Esboço da evolução geotectônica da parte sul do Cráton do São Francisco: uma interpretação com base nos dados Rb-Sr, K-Ar, Pb-Pb e traços de fissão. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3., Belo Horizonte, 1985. Belo Horizonte, SBG. núcleo MG. p.28-44.

- TISSOT, B. & WELTE, D.H. (1978) *Petroleum formation and occurrence*. Berlin, Springer. 538p.
- WAGNER, G.A. (1979a) Correction and interpretation of fission-track ages. In: JAGER, E. & HUNZIKER, J.C. (eds.) *Lectures in isotope geology*. Berlin, Springer. p.170-177.
- WAGNER, G.A. (1979b) Fission-track ages and their geological interpretation. *Nuclear Tracks*, 5:15-25.
- WAGNER, G.A (1988) Apatite fission-track geochrono-thermometer to 60°C: projected length studies. *Chemical Geology* (Isotope Geoscience Section), 72:145-153.
- WEILAND, E.F.; LUDWING, K.R.; NAESER, C.W.; SIMMONS, E.C. (1980) Fission-track dating applied to uranium mineralization. U.S. Geological Survey. *Open-File Report*, (80-380):57p.
- ZIELINSKY, R.A. (1980) Uranium in secondary silica: a possible exploration guide. *Economic Geology*, 75:592-602.