

GEOQUÍMICA DA SUPERFÍCIE: ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Sonia Maria Barros de Oliveira¹

Palavras-chave: geoquímica da superfície, petrogênese supérgena, prospecção geoquímica, ciência ambiental.

RESUMO

Este trabalho analisa o estágio atual em que se encontram as pesquisas nos três grandes campos de atuação da geoquímica da superfície: petrogênese dos materiais do ciclo exógeno, prospecção geoquímica e estudos ambientais. Além disso, indica as possíveis linhas de desenvolvimento dessa disciplina, enfatizando a importância da quantificação das interações entre as geosferas no equacionamento dos problemas relacionados às mudanças globais.

ABSTRACT

This article analyses the present state of scientific research concerning the three main aspects of Surface Geochemistry: petrogenesis of exogenic cycle products, geochemical exploration and environmental studies. Moreover, it points out the possible trends of development of this discipline, with special emphasis on the importance of quantifying geosphere interactions in interpreting phenomena related to global changes.

INTRODUÇÃO

Na conceituação clássica de ciclo geoquímico, distingue-se um elo exógeno, que compreende os fenômenos do intemperismo, sedimentação e diagênese, em oposição a um elo endógeno, que abrange os fenômenos do magmatismo e metamorfismo. Os fenômenos exógenos, objeto da geoquímica da superfície, poderiam ser descritos como o resultado da interação entre a biosfera, atmosfera, hidrosfera e as partes mais superficiais da crosta.

Em linhas gerais, esse esquema continua válido, porém atualmente dá-se ênfase especial às relações entre os dois elos do ciclo. Assim, vêm sendo levadas em consideração, por exemplo, a reciclagem, em larga escala, dos materiais crustais (FYFE, 1984), a interação água do mar/basaltos das dorsais médio-oceânicas (EDMOND et al., 1979) e vem se reconhecendo que até as flutuações climáticas estão relacionadas, em última instância, à atividade tectônica (BERNER & LASAGA, 1989). Uma outra mudança significativa na apreciação do ciclo diz

¹ Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

respeito aos impactos da atividade biológica na geoquímica do ambiente superficial. Embora assinalada desde Vernadsky, a influência da biosfera na distribuição dos elementos na superfície da Terra foi largamente subestimada. Finalmente, a percepção de que a atividade humana é capaz de alterar drasticamente os fluxos entre os vários reservatórios da superfície constitui, talvez, a novidade mais perturbadora das últimas décadas.

Os principais campos de atuação da geoquímica da superfície compreendem:

- ▶ o estudo petrogenético dos produtos do intemperismo e da sedimentação, que se estende naturalmente ao estudo metalogenético das jazidas supergênicas;
- ▶ a prospecção geoquímica;
- ▶ os estudos ambientais.

PETROGÊNESE E METALOGÊNESE SUPERGÊNICAS

Hoje em dia é inconcebível investigação petrogenética ou metalogenética que dispense a geoquímica. A modelagem dos fenômenos que dão origem às rochas e aos minérios está assentada no conhecimento da composição química dos materiais representativos de cada etapa do processo. E o detalhamento dos modelos requer uma escala de observação cada vez mais refinada, que depende da aplicação de técnicas analíticas sofisticadas, como a microscopia eletrônica de transmissão e de varredura com microanalisador, o que permite a caracterização de partículas ao nível de algumas dezenas de angstrom. Outras técnicas, como a espectroscopia de elétrons (ESCA), levam à determinação da composição química das camadas atômicas mais externas de uma superfície, permitindo, assim, uma descrição mais acurada dos materiais (McINTYRE, 1984). Tudo isso é especialmente relevante quando se trata de produtos do ciclo supérgeo, materiais muitas vezes microcristalinos ou mal cristalizados.

PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA

Uma das mais tradicionais aplicações da geoquímica de superfície, a prospecção geoquímica baseia-se no princípio de que os materiais aflorantes como solos, sedimentos de corrente, águas e vegetação refletem quimicamente os materiais de profundidade.

Desenvolvida no mundo ocidental a partir do final da segunda guerra, principalmente na Inglaterra e nos EUA, a prospecção geoquímica evoluiu rapidamente, sobretudo a partir dos anos 60, com uma maior possibilidade de geração de dados analíticos, através da espectrofotometria de absorção atômica, e com a aplicação dos computadores no tratamento de dados. Nos últimos anos, a capacidade analítica dos laboratórios aumentou ainda mais com o uso da espectrometria

de plasma (ICP), e houve grande progresso no desenvolvimento de técnicas computacionais como, por exemplo, a cartografia automática e a estatística robusta para detecção de "outliers".

Mas o avanço mais significativo deu-se no terreno conceitual: a prospecção geoquímica deixou de ser uma técnica mais ou menos empírica de descoberta de minérios para começar a operar com modelos conceituais mais rigorosos, baseados na compreensão da dinâmica específica dos processos superficiais que atuam em determinada área. Assim, levando em conta a distribuição espacial e a história das coberturas, foram desenvolvidos modelos de prospecção especialmente adequados, por exemplo, a ambientes lateríticos (MAZZUCHELLI, 1986).

ESTUDOS AMBIENTAIS

Neste domínio, caracteristicamente de colaboração interdisciplinar, as aplicações da geoquímica da superfície abrangem os problemas de contaminação ou poluição dos solos, águas e ar, e sua relação com a saúde animal, vegetal e humana. Ao geoquímico da superfície cabe principalmente a tarefa de desenvolver a conceituação de anomalia geoquímica em um determinado ambiente, e de discutir sua origem, se litogênica ou antropogênica.

A cartografia geoquímica, tanto para remontar à fonte das anomalias, como, para no caso de conhecida a fonte, monitorar a evolução da anomalia no tempo, vem sendo extremamente utilizada. Na Inglaterra, por exemplo, foram elaboradas cartas de distribuição de 24 elementos químicos, incluindo metais pesados, em sedimentos de corrente, a várias escalas e até à escala do país como um todo. Essas cartas têm servido ao planejamento das atividades ligadas à agricultura e aos recursos hídricos, além de subsidiar os estudos de saúde pública (HOWARTH & THORNTON, 1983).

Na agricultura, as cartas dão uma primeira indicação das áreas onde pode haver problemas relativos à toxidez ou à carência de certos elementos químicos para as plantas e os animais (THORNTON, 1983). Com relação aos recursos hídricos, os estudos hidrológicos e de suprimento de água são largamente beneficiados pela existência desses mapas geoquímicos, principalmente nos casos em que há correlação significativa entre os teores dos elementos neles assinalados e seus teores nas águas. Assim, as cartas dão indicações preliminares da composição das águas, orientando na escolha das estações de amostragem, e sugerindo quais os elementos a serem analisados (HOWARTH & THORNTON, 1983).

A respeito de saúde humana e geoquímica, é geralmente difícil demonstrar uma relação de causalidade, dadas, entre outros fatores, a impossibilidade de realizar experimentação e a fragilidade das evidências epidemiológicas. No entanto, alguns casos bem documentados mostram relações evidentes entre doença e ambiente, como, por exemplo, a correlação positiva entre baixo teor de flúor e alta incidência de cárie dentária, ou entre a deficiência de iodo e um aumento do volume da tireóide (CROWNSE et al., 1983).

PERSPECTIVAS FUTURAS

Pode-se dizer que os avanços previstos no desenvolvimento da geoquímica da superfície estão voltados, de uma maneira geral, para a quantificação da interação entre as geoesferas (FYFE, 1981). Para atingir esse objetivo será necessária uma abordagem dinâmica, que contemple não só a determinação dos teores dos elementos em cada reservatório, mas que seja capaz de quantificar os fluxos entre os reservatórios. Com relação aos teores dos elementos, mais do que valores globais, importará distinguir as espécies químicas presentes, através de métodos analíticos específicos e de modelagem termodinâmica. Na determinação dos fluxos dos elementos entre os vários reservatórios, o uso de isótopos estáveis como traçadores das trajetórias percorridas é bastante promissor (KYSER, 1987). Aos isótopos estáveis, por outro lado, estará também reservado um grande campo de aplicação como ferramentas na reconstituição dos paleoambientes (BIRD et al., 1992). Quanto aos isótopos instáveis, técnicas de desenvolvimento recente como, por exemplo, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ permitirão a determinação da duração dos episódios intempéricos (VASCONCELOS et al., 1992), com importantes aplicações nas reconstituições paleoclimáticas. O papel da matéria orgânica como importante agente redistribuidor dos elementos na superfície da Terra (SCHNITZER, 1983) precisará ser mais bem equacionado.

Essa aproximação globalizante, que liga geoquímica e geodinâmica, e que tem como objetivo estabelecer o balanço da alteração, erosão, sedimentação e diagênese na escala da Terra como um todo, vem se desenhando a partir dos trabalhos de GARRELS e colaboradores, desde a década de 70. Recentemente alguns livros foram publicados com essa perspectiva, como, por exemplo, TARDY, 1986, BERNER & BERNER, 1987 e GREGOR et al., 1988. O aprofundamento do estudo dos ciclos geoquímicos globais vem se orientando no sentido de se considerar também a dimensão temporal, avaliando os fluxos entre os reservatórios no passado e no presente, através de monitoramento que permita definir sequências históricas. Dessa maneira, será possível, finalmente, discriminar a influência humana do ciclo natural dos fenômenos, como, por exemplo, no caso do efeito estufa e do adelgaçamento da camada de ozônio na atmosfera.

A prospecção geoquímica se orientará para os metais preciosos e para os elementos de alta tecnologia. Para a determinação de anomalias cada vez mais sutis, requerida à medida em que as jazidas vão se tornando mais difíceis de serem encontradas, o tratamento de dados através de sistemas especialistas, que permitem uma maior interação entre o computador e o usuário, deverá se generalizar (HOWARTH & GARRET, 1986). Os novos caminhos da interpretação geoestatística incluirão, com certeza, a investigação do caráter fractal das paisagens geoquímicas, com reflexos no estabelecimento de critérios para a seleção de áreas mais favoráveis, utilizando-se de amostragem de baixa densidade (BOLVIKEN et al., 1992).

No que concerne especificamente os métodos analíticos, pode-se prever o aperfeiçoamento da espectrometria de plasma, com o desenvolvimento de equipamentos menores e capazes de

analisar amostras sólidas (THOMPSON, 1983). O ICP-MS já provê precisão moderada, a baixo custo, na determinação de razões isotópicas (HALL, 1992) e a ativação neutrônica constitui método altamente sensível de análise não destrutiva, em matrizes inorgânicas e orgânicas (HOFFMAN, 1992). Ambos os métodos apresentam tendência de avanço significativo em termos do drástico abaixamento dos limites de detecção.

Com as perspectivas de colaboração interdisciplinar, já hoje nítidas no horizonte do geoquímico da superfície, será necessário cuidar para que sua formação contemple, além de uma visão globalizante, característica da Geologia enquanto ramo da História Natural, uma sólida cultura científica básica. Só assim esse profissional estará à altura do desafio que lhe será proposto: estabelecer um diálogo frutífero com cientistas de áreas afins.

AGRADECIMENTOS

Este texto foi bastante beneficiado das opiniões dos Profs. A.J. Melfi, B.R. Figueiredo e M.C. Serrano Pinto, a quem expresso meus agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNER, E.K. & BERNER, R.A. The global water cycle: geochemistry and environment. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987, 397p.
- BERNER, R.A. & LASAGA, A.C. Modeling the geochemical carbon cycle. *Scientific American*, New York, vol. 260, n° 3, p.54-61, march 1989.
- BIRD, M.I.; LONGSTAFFE, F.J.; FYFE, W.S. & BILDGEN, P. Oxygen-isotope systematics in a multiphase weathering system in Haiti. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, USA, vol.56, p.2831-2838, July 1992.
- BOLVIKEN, B.; STOKKE, P.R.; FEDER, J. & JOSSANG, T. The fractal nature of geochemical landscapes. *Journal of Geochemical Exploration*, The Netherlands, vol.43, n° 2, p.91-109, April 1992.
- CROWNSE, R.G.; PORIES, W.J.; BRAY, J.T. & MAYER, R.L. Geochemistry and man: health and disease. In: THORNTON, I (ed.) *Applied environmental geochemistry*: London Academic Press, 1983, 501p.
- EDMOND, J.M.; MEASURES, C.; Mc DUFF, R.E.; CHAN, L.H.; COLLIER, R., GRANT, B.; GORDON, L.I. & CORLISS, J.B. Ridge crest hydrothermal activity and the balance of the major and minor elements in the ocean: the Galapagos data. *Earth Planetary Scientific Letters*, Amsterdam, vol.46, n° 1, p.1-18, december 1979.

- FYFE, W.S. The environmental crisis: quantifying geosphere interactions. *Science*, Washington D.C., vol.213, n° 4503, p.105-110, 1981.
- _____. The geochemical cycle. In: FLEET, M.E. *Mac short course handbook*, 10, Canadá. Min. Assoc. p.1-14, 1984.
- GREGOR, C.B.; GARRELS, R.M.; MACKENZIE, F.T. & MAYNARD, J.B. Chemical cycles in the evolution of the Earth. John Wiley & Sons, New York, 1988. 276p.
- HALL, G.E.M. Inductively coupled plasma mass spectrometry in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, The Netherlands, vol.44, n° 1-3, p.201-249, 1992.
- HOFFMAN, E.L. Instrumental neutron activation in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, The Netherlands, vol.44, n° 1-3, p.297-319, 1992.
- HOWARTH, R.J. & GARRET, R.G. The role of computing in applied geochemistry. In: THORNTON, I. & HOWARTH, R.J. *Applied geochemistry in the 1980's*. London, Graham & Trotman, 1986, 347p.
- HOWARTH, R.J. & THORNTON, I. Regional geochemical mapping and its application to environmental studies. In: THORNTON, I. *Applied Environmental Geochemistry*. London, Academic Press, 1983. 501p.
- KYSER, T.K. (ed.). Short course in stable isotope geochemistry of low temperature fluids. Canadá, Min. Assoc., Canadá, May 1987. (*Mac Short Course Handbook*, 13).
- MAZZUCHELLI, R.H. A perspective on the application of geochemistry in mineral exploration south of the Equator. In: THORNTON, I. & HOWARTH, R.J. *Applied Geochemistry in the 1980's*, London, Graham & Trotman, 1986, 347p.
- McINTYRE, N.S. Modern methods of surface analysis and microanalysis. Canada, Min. Assoc. Canadá, p.169-195, 1984. (*Mac Short Course Handbook*, 10).
- SCHNITZER, M. Soil organic matter: its role in the environment. Canadá, Min. Assoc. Canadá, p.237-267, 1984. (*Mac Short Course Handbook*, 10).
- TARDY, Y. Le cycle de l'eau: climats, paléoclimats et géochimie globale. Masson, Paris, 1986. 335p.
- THOMPSON, M. Analytical methods in applied environmental geochemistry. In: THORNTON, I. (ed.) *Applied environmental geochemistry*. London, Academic Press, 1983, 501p.
- THORNTON, I. Geochemistry applied to agriculture. In: THORNTON, I. (ed.) *Applied environmental geochemistry*. London, Academic Press, 1983, 501p.
- VASCONCELOS, P.M.; BECKER, T.A.; RENNE, P.R. & BRIMHALL, G. H. Age and duration of weathering by $40\text{K}/40\text{Ar}$ and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ analysis of potassium-manganese oxides. *Science*, Washington D.C., vol.259, p.451-455, 1992.