



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

PPGG0200 - ISÓTOPOS ESTÁVEIS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES COM ÊNFASE EM SISTEMAS HIDROTERMAIS

Carga horária total: 45 – CR

Professor: Evandro L. Klein (CPRM / PPGG-UFPA)

SÚMULA: O curso enfatiza os princípios básicos da geoquímica dos isótopos estáveis, tradicionais e não tradicionais. Nas aulas iniciais são revisados o histórico e conceitos básicos, seguindo-se com os princípios científicos por trás da disciplina de geoquímica dos isótopos estáveis, com ênfase no fracionamento isotópico. Estudos de casos serão apresentados para demonstrar como essa disciplina pode ser usada em conjunto com dados geológicos e com outras técnicas para compreender processos geológicos diversos, incluindo hidrotermalismo/formação de depósitos minerais, petrologia e evolução do sistema Terra. As técnicas analíticas convencionais e modernas comumente usadas são também discutidas, assim como futuras tendências. Exercícios práticos de cálculo e interpretação geológica são enfatizados. Ao final do curso, os alunos estarão providos de uma base suficiente para a compreensão do potencial e das limitações das aplicações dos isótopos estáveis.

ESTRUTURA DO CURSO

1. Histórico da geoquímica dos isótopos estáveis e revisão de conceitos básicos (isótopos, parâmetros estatísticos)
2. Princípios da geoquímica dos isótopos estáveis: definições, notação, padrões, abundância.
3. Técnicas analíticas e de extração: convencionais *off-line* e on-line uso do laser, análise por ICP-MS, espectrômetros.
4. Fracionamento isotópico: em equilíbrio, cinético, efeito Rayleigh, fracionamento independente da massa.
5. Fator de fracionamento isotópico: definição e aspectos teóricos, determinação, fatores que influenciam o fator de fracionamento.
6. Geoquímica isotópica de O, H, C, S em sistemas hidrotermais.

7. Isótopos não tradicionais (Z, Fe, Cu, Cr etc...) em sistemas hidrotermais.
8. Principais reservatórios naturais com aplicação na metalogênese.
9. Cálculo da composição isotópica de paleofluidos.
10. Geotermometria isotópica: geotermômetros, calibração, exercícios.
11. Isótopos estáveis e alteração hidrotermal: balanço de massa, reações fluido/rocha
12. Avaliação de equilíbrio e desequilíbrio isotópico, diagramas $\delta^{18}O$ e $\delta^{34}S$
13. Isótopos estáveis em sistemas ortomagmáticos, magmático-hidrotermais, metamórficos, baciais, deformação.
14. Processos metalogenéticos e isótopos estáveis (mistura de fluidos, separação de fases).
15. Modelamento isotópico aplicado à gênese de depósitos minerais
16. Isótopos estáveis e proveniência sedimentar.
17. Aplicação conjunta de isótopos estáveis e radiogênicos.
18. Exercícios práticos (cálculos, interpretação).
19. Estudos de casos.
20. Visita ao laboratório de isótopos estáveis do Pará-Iso (equipamentos, método da diluição isotópica).
21. Avaliação (prova escrita e/ou seminário).

BIBLIOGRAFIA BÁSICA

- Campbell, A.R.; Larson, P.B. 1998. Introduction to stable isotope applications in hydrothermal systems. In: Richards, J.P., Larson, P.B. (eds.), *Techniques in hydrothermal ore deposits*. 173-193. (Reviews in Economic Geology, 6).
- Claire, M.W., et al. 2014. Modeling the signature of sulfur mass-independent fractionation produced in the Archean atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 141, 365-380.
- Coplen, T.B.; Hopple, J.A.; Böhlke, J.K.; Peiser, H.S.; Rieder, S.E.; Krouse, H.R.; Rosman, K.J.R.; Ding, T.; Vocke Jr., R.D.; Révész, K.M.; Lamberty, A.; Taylor, P.; De Bièvre, P. 2002. Compilation of minimum and maximum isotope ratios of selected elements in naturally occurring terrestrial materials and reagents. USGS Water-Resources Investigations Report 01-4222, 98 p.
- Criss, R.E. 1999. Principles of stable isotope distribution. Oxford University Press.

Eiler, J.M. et al. 2014. Frontiers of stable isotope geosciences. *Chemical Geology*, 372, 119-143. Faure, G. 1986. *Principles of isotope geology*. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 589 p. Hoefs J. 1997. *Stable isotope geochemistry*. Springer-Verlag, 201, p. Johnson, C.M.; Beard, B.L.; Albarède, F. 2004. *Geochemistry of non-traditional stable isotopes*.

Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 55.

Kyser, T.K. 1987 *Stable isotope geochemistry of low temperature fluids*. Mineralogical Association of Canada, p. 287-336. (Short Course, v. 13).

Ohmoto, H., and Goldhaber, M. 1997. Sulfur and carbon isotopes, In H. L. Barnes (ed.) *Geochemistry of*

Hydrothermal Ore Deposits 3rd Ed., Wiley, New York, p. 517-612.

Ohmoto, H. & Rye, R.O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes H.L. (ed) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, John Wiley & Sons, p. 509-567.

Pirajno, F. 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer.

Rollinson H.R. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. New York, Longman Scientific & Technical, 352 p.

Seal, R.R. 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61, 633- 677.

Sharp, Z. 2006. *Stable isotope geochemistry*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 344 pp.

Taylor, H. P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits, In H. L. Barnes (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* 3rd Ed., Wiley, New York, p. 229-302.

Valley, J.W.; Taylor Jr., H.P.; O'Neil, J.R. 1986. *Stable isotopes in high temperature geological processes*.

Mineral. Soc. America, p. 91-127. (*Reviews in Mineralogy*, 16).

Valley J.W. & Cole D.R. 2001. *Stable Isotope Geochemistry*. Mineralogical Society of America, p. 1-81. (*Reviews in Mineralogy and Geochemistry* v. 43).

Wagner, T., Williams-Jones, A.E., Boyce, A. 2005. Stable isotope-based modeling of the origin and genesis of an unusual Au-Ag-Sn-W epithermal system at Cirotan, Indonesia. *Chemical Geology*, 219: 237-260.

Wilkinson, J.J., Weiss, D.J., Mason, T.F.D, Coles, B.J. 2005. Zinc isotope variation in hydrothermal systems: preliminary evidence from the Irish Midlands ore field. *Economic Geology*, 100: 583-590.

Endereços de interesse na internet:

www.nist.gov (National Institute of Standards and Technology) www.iaea.org (International Atomic Energy Agency) <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig> (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

<http://www.ggl.ulaval.ca/cgi-bin/isotope/generisotope.cgi/> (Universidade Laval –
Calculador eletrônico on-

line de fracionamento isotópico)

Evandro L. Klein

CPRM/Serviço Geológico do

Brasil Av Dr. Freitas, 3645

66095-110 Belém-PA

fone 91 3182 1334

celular 9605 2974

e-mail: **evandro.klein@gmail.com**