

PREFÁCIO

Aplicações de Isótopos em Estudos Hidrológicos e Ambientais

Didier Gastmans, Silvio Hiruma, Sibebe Ezaki, Roberto Eduardo Kirchheim

A superfície da Terra possui cerca de 71% de sua superfície ocupada por oceanos, que concentram mais de 95% de toda a água existente e que exercem um papel importante tanto no controle climático, representando a principal fonte de água para a formação das chuvas, como na circulação das águas no ciclo hidrológico, pois conformam o nível de base para toda a água que circula pelos continentes. Apesar de todo esse volume armazenado, e de sua importância, os oceanos não são a principal fonte de água potável destinada ao consumo humano, ainda que localmente, devido à baixa disponibilidade hídrica, essas águas sejam dessalinizadas para o abastecimento.

As águas subterrâneas armazenadas em aquíferos, invisíveis à maioria das pessoas, constituem a principal reserva de água doce e potável disponível para o consumo. Essas águas são responsáveis pelo abastecimento de importantes parcelas da população mundial e da produção econômica em muitas partes do globo (FOSTER *et al.* 2002, AESCHBACH-HERTIG & GLEESON 2012, JASECHKO *et al.* 2017, HIRATA *et al.* 2019, PERRONE & JASECHKO 2019). Entretanto, o caráter subterrâneo e a noção de grandeza dos reservatórios fazem com que muitas vezes sua disponibilidade seja superestimada, levando a uma exploração predatória dos aquíferos. Exemplos de esgotamento de aquíferos são observados em várias partes do planeta (MENDE *et al.* 2007, GLEESON *et al.* 2015, SZILAGYI 2018, PERRONE & JASECHKO 2019).

Além de representarem uma importante fonte de abastecimento das necessidades humanas, recentemente, outros aspectos relacionados à sua importância no ciclo hidrológico têm sido considerados na questão da sustentabilidade ambiental, transformando-se em tema de relevância para a comunidade científica, instituições de preservação ambiental e agências governamentais (SÁNCHEZ-MURILLO & DURÁN-QUESADA 2019). É inegável o papel das águas subterrâneas na manutenção de diversos ecossistemas terrestres e sua relação com as águas superficiais. As variações climáticas impõem consequências nas condições de recarga dos aquíferos, ao passo que ações antropogênicas alteram suas condições naturais de qualidade e disponibilidade, evidenciando a necessidade de uma abordagem multidisciplinar para a compreensão de sistemas complexos e frágeis. Trata-se de uma condição indispensável para a implementação de políticas públicas de gestão integrada dos recursos hídricos.

Essas novas perspectivas e visões mais holísticas do ciclo hidrológico e da gestão, associadas aos riscos cada vez mais aparentes de escassez hídrica, devido às mudanças climáticas e à superexploração dos aquíferos, têm levado os pesquisadores a “repensar” as águas subterrâneas muito além da questão simples do abastecimento e da determinação das capacidades dos aquíferos em atender essas necessidades.

Dentre as novas técnicas que vêm sendo incorporadas aos estudos hidrológicos, destacam-se as técnicas isotópicas. Apesar de algumas delas serem bastante antigas e sendo amplamente aplicadas como ferramenta corriqueira em pesquisas ao redor do mundo, ainda constituem uma fronteira do conhecimento, cujos desenvolvimentos recentes seguem apontando novos caminhos e trazendo luz à compreensão das dinâmicas das águas subterrâneas.

Nesse sentido é importante mencionar a contribuição de textos clássicos como o livro “*Environmental Isotopes in Hydrogeology*” (CLARK & FRITZ 1997) e o compêndio publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) intitulado “*Environmental Isotopes in the hydrological Cycle: Principles and Applications*” (MOOK 2000), bem como a recente revisão recentemente publicada por JASECHKO

(2019), sobre a aplicação de isótopos de hidrogênio, oxigênio e carbono em estudos de águas subterrâneas.

Deve-se ressaltar o papel importante da Seção de Hidrologia da AIEA, como disseminador e fomentador da utilização de técnicas isotópicas em estudos relacionados a recursos hídricos, fornecendo todo o apoio e suporte técnico para a ampla disseminação mundial dessas técnicas.

Em território brasileiro, apesar da existência de um bom número de grupos de pesquisa nessa área, o uso e a aplicação de técnicas isotópicas ainda são pouco expressivos. Este fato pode ser associado ao reduzido número de laboratórios dedicados a aplicação de isótopos em estudos hidrológicos, assim como à falta de conhecimento em relação as possibilidades de sua utilização.

Nesse sentido, o lançamento dessa série de artigos em *Derbyana*, reveste-se de fundamental importância. São fornecidas nesta série, de forma acessível e em sua maioria em idioma português, as bases teóricas atualizadas para abrir caminhos de incorporação destas técnicas isotópicas em estudos atuais e futuros. É importante salientar que as revisões aqui apresentadas não limitam os conhecimentos apenas às águas subterrâneas. Os fundamentos teóricos revistos nos 10 artigos publicados nesse volume fornecem subsídios suficientes para a aplicação de isótopos em outras áreas da hidrologia e ciências ambientais, constituindo material de referência e acessível à consulta de todos os interessados.

Em um cenário no qual as mudanças climáticas vêm produzindo alterações nas relações entre os distintos reservatórios do ciclo hidrológico (ABBOTT *et al.* 2019, STEPHENS *et al.* 2020), a utilização de isótopos estáveis de hidrogênio, oxigênio e carbono fornece elementos importantes na compreensão das relações existentes entre as águas subterrâneas e o clima. Os aspectos que permeiam essas relações foram objeto das contribuições de Gastmans *et al.* e de Novello *et al.* Novas perspectivas de compreensão das condições climáticas pretéritas na recarga de águas subterrâneas também podem ser avaliadas com a aplicação de Gases Nobres e seus isótopos, aspecto apresentado no trabalho de Kirchheim *et al.*

A utilização sustentável das águas subterrâneas e a gestão responsável dos aquíferos, assim como a compreensão da sua interação com rios e lagos, dependem da determinação dos tempos de residência das águas, informação indispensável na calibração de modelos numéricos de fluxo e de transporte (SANFORD 2011, MOLÉNAT *et al.* 2013, AGGARWAL *et al.* 2015). Esses modelos vêm sendo amplamente utilizados nos estudos de aquíferos brasileiros (a escalas variadas), porém ainda sem a incorporação desta importante variável.

Nessa edição esses aspectos são abordados em quatro trabalhos, que versam sobre a utilização de isótopos radioativos, possibilitando a determinação de um largo espectro de tempos de residência. A utilização de trítio na determinação dos tempos de residência de águas recentes, ainda que tenha aplicação limitada devido às baixas concentrações observadas na precipitação, teve especial interesse no início das aplicações isotópicas pós testes nucleares. As possibilidades de sua aplicação, mesmo com as baixas concentrações desse isótopo, são abordadas no trabalho de Silva *et al.*

Como forma de superar essa limitação, o isótopo radioativo de hidrogênio vem sendo utilizado em combinação com o isótopo estável de hélio (^3He), que representa o produto do decaimento radioativo do trítio. Essa utilização conjunta abre novas perspectivas na compreensão de processos recentes no ciclo hidrológico, envolvendo contaminação de águas subterrâneas e a interação entre rios e aquíferos. Apesar da complexidade e da inexistência de laboratórios no Brasil, uma ampla revisão sobre as bases teóricas e perspectivas de aplicação em aquíferos é apresentada por Gilmore *et al.*

Águas mais antigas, que representam a maior parte das águas subterrâneas do planeta (GLEESON *et al.* 2015), necessitam da utilização de isótopos com tempos de meia vida maiores, como o ^{14}C , já amplamente utilizado em diversos estudos hidroge-

ológicos no Brasil, conforme apresentado por Silva Jr. *et al.* Com o desenvolvimento de novas técnicas analíticas mais sensíveis, novos traçadores para temas de residência maiores começaram a ser usados de forma complementar ao método ^{14}C . Kirchheim *et al.* apresentam resultados pioneiros na datação de águas antigas no Sistema Aquífero Guarani, utilizando o ^{81}Kr e o ^4He .

Em função de sua utilização como fertilizante agrícola, importante fonte difusa, ou seu acúmulo como dejetos humano/animal, em sistemas sépticos, conformando importante fonte pontual, o nitrogênio é o contaminante das águas (superficiais e subterrâneas) mais disseminado ao redor do globo e motivo de preocupação para todos os gestores de recursos hídricos. Neste contexto a utilização de isótopos de nitrogênio constitui ferramenta importante na busca pela determinação das origens de contaminação de aquíferos. Trata-se de uma aplicação bastante disseminada no mundo, mas ainda de caráter esporádico no Brasil. O trabalho de Varnier *et al.* traz relevante contribuição ao tema e, além de extenso levantamento de uso deste isótopo em casos de contaminação de aquíferos na América Latina, apresenta as bases teóricas para a utilização da técnica.

A interação das águas subterrâneas com as rochas constituintes do arcabouço do aquífero, associada diretamente à movimentação da água em subsuperfície e às inúmeras possibilidades de misturas entre águas com histórias diversas, pode ser compreendida a partir da utilização combinada de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas. É relevante a contribuição que os isótopos radiogênicos de estrôncio e chumbo podem aportar na compreensão da relação existente entre a rocha constituinte do aquífero e as águas subterrâneas, como indicado nesse volume pelos trabalhos de Quaggio *et al.* e Mancini & Bonotto.

A interação das águas subterrâneas com outros reservatórios, como rios e os oceanos, pode ser avaliada a partir da utilização da combinação de vários traçadores isotópicos. Entretanto, a contribuição trazida pelos isótopos de rádio e radônio possui importância ímpar pois a existência de sistemas portáteis de medição em campo torna potencializa a disseminação da técnica, tema abordado na revisão de Godoy.

É interessante notar que todos os colaboradores nesse volume, com atuação importante na utilização de técnicas isotópicas, apontam para a falta de dados e informações que cubram todos os isótopos e, principalmente, todas as unidades aquíferas do território brasileiro. Infelizmente essa rede isotópica, que começa a se estender por outros ramos da ciência, como as aplicações forenses, ainda pode ser considerada incipiente para fazer frente às necessidades de gestão dos recursos hídricos no século 21, e aos desafios propostos pelas mudanças climáticas à humanidade, em sua busca pelo desenvolvimento sustentável e responsável do planeta.

Esse volume pode representar o primeiro contato de vários dos leitores com inúmeras técnicas isotópicas, esperamos com isso criar terreno fértil para que os isótopos passem a ser incorporados com mais frequência nos estudos hidrológicos. O compartilhamento de informações e as parcerias interinstitucionais representa um caminho para quebrar o paradigma de que a água subterrânea é um recurso natural invisível e escondido, passando a ser algo tangível e apto de compreensão mínima.

Artigos publicados nessa edição:

GASTMANS, D.; GARPELLI, L.N.; SANDOS, V.; LIMA, C.; QUAGGIO, C.S.; SANTAROSA, L.V.; KIRCHHEIM, R.E. 2021 Contribuição dos isótopos estáveis da água (H e O) no conhecimento dos aquíferos brasileiros: estado da arte e perspectivas futuras.

NOVELLO, V.F.; CAMPOS, M.C.; CHIESSI, C.M.; MACEDO, G.; PESSENDA, L.C.R.; GOMES, T.; UTIDA, G.; CRUZ, F.W. 2021. Aplicação de isótopos estáveis de carbono no estudo das mudanças climáticas e ambientais.

- VARNIER, C.; SHHOGUSOFF, A.V.; HIRATA, R.; ARAVENA, R. 2021. Uso dos isótopos ^{15}N e ^{18}O em nitrato e a sua importância em estudos de contaminação de aquíferos urbanos na América Latina.
- SILVA, A.F.P.; COTA, S.D.S.; MOREIRA, R.M. 2021. Aplicações de Trítio na determinação de tempos de residência no ciclo hidrológico.
- GILMORE, T.; CHERRY, M.; GASTMANS, D.; HUMPHREY, E.; SOLOMON, D.K. 2021. The $^3\text{H}/^3\text{He}$ groundwater age-dating method and applications.
- SILVA Jr., G.C.; PITA, R.C.S.; CUNHA, F.C.M.B.; SILVA, T.A. 2021. Aplicação do isótopo radioativo de Carbono (^{14}C) na determinação de tempos de residência em aquíferos.
- KIRCHHEIM, R.E.; CHANG, K.H.; GASTMANS, D.; EZAKI, S.; STRADIOTO, M.R. 2021. Aplicação de gases nobres e seus isótopos na Hidrogeologia.
- GODOY, J.M.O. 2021. Aplicação de isótopos de Rádio e Radônio em estudos do aporte de águas subterrâneas para rios e região costeira.
- MANCINI, L.H.; BONOTTO, D.M. 2021. Contribuição dos isótopos naturais de Urânio no estudo da movimentação das águas subterrâneas.
- QUAGGIO, C.S.; GASTMANS, D.; MARTINS, V.T.S. 2021. O que os isótopos de Estrôncio nos ensinam sobre as águas subterrâneas.

Referências

- ABBOTT, B.W.; BISHOP, K.; ZARNETSKE, J.P.; MINAUDO, C.; CHAPIN, F.S.; KRAUSE, S.; HANNAH, D.M.; CONNER, L.; ELLISON, D.; GODSEY, S.E.; PLONT, S.; MARÇAIS, J.; KOLBE, T.; HUEBNER, A.; FREI, R.J.; HAMPTON, T.; GU, S.; BUHMAN, M.; SARA SAYEDI, S.; PINAY, G. 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7): 533-540. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>
- AESCHBACH-HERTIG, W.; GLEESON, T. 2012. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience*, 5(12): 853-861. <https://doi.org/10.1038/ngeo1617>
- AGGARWAL, P.K.; MATSUMOTO, T.; STURCHIO, N.C.; CHANG, H.K.; GASTMANS, D.; ARAGUAS-ARAGUAS, L.J.; JIANG, W.; LU, Z.-T.; MUELLER, P.; YOKOCHI, R.; PURTSCHERT, R.; TORGERSEN, T. 2015. Continental degassing of ^4He by surficial discharge of deep groundwater. *Nature Geoscience*, 8(1): 35-39 <https://doi.org/10.1038/ngeo2302>
- CLARK, I.; FRITZ, P. 1997. *Environmental isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, 1st Edition, 325 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. 2002. *Proteção da qualidade da água subterrânea*. Banco Mundial, Washington, D.C., Edição brasileira: Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda., 105 p.

- GLEESON, T.; BEFUS, K.M.; JASECHKO, S.; LUIJENDIJK, E.; CARDENAS, M.B. 2015. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9: 161-167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S.S.; VILLAR, P.C.; MARCELLINI, L. 2019. *Estudo de águas subterrâneas*. Instituto Trata Brasil, 19 p.
- JASECHKO, S. 2019. Global isotope Hydrogeology – review. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 835-965. <https://doi.org/10.1029/2018RG000627>
- JASECHKO, S.; PERRONE, D.; BEFUS, K.M.; BAYANI CARDENAS, M.; FERGUSON, G.; GLEESON, T.; LUIJENDIJK, E.; MCDONNELL, J.J.; TAYLOR, R.G.; WADA, Y.; KIRCHNER, J.W. 2017. Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination. *Nature Geoscience*, 10(6): 425-429. <https://doi.org/10.1038/ngeo2943>
- MENDE, A.; ASTORGA, A.; NEUMANN, D. 2007. Strategy for groundwater management in developing countries: a case study in northern Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 334(1-2): 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.016>
- MOLÉNAT, J.; GASCUEL-ODOUX, C.; AQUILINA, L.; RUIZ, L. 2013. Use of gaseous tracers (CFCs and SF6) and transit-time distribution spectrum to validate a shallow groundwater transport model. *Journal of Hydrology*, 480: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.043>
- MOOK, W.G. 2000. *Environmental isotopes in hydrological cycle – principles and applications*. IHP-V Technical Documents in Hydrology, n° 39, UNESCO-IAEA. 596 p. Disponível em: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_publication_hydroCycle_en.html
- PERRONE, D.; JASECHKO, S. 2019. Deeper well drilling an unsustainable stopgap to groundwater depletion. *Nature Sustainability*, 2(8): 773-782. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0325-z>
- SÁNCHEZ-MURILLO, R.; DURÁN-QUESADA, A. M. 2019. Preface to stable isotopes in hydrological studies in the tropics: ecohydrological perspectives in a changing climate. *Hydrological Processes*, 33(16): 2160-2165. <https://doi.org/10.1002/hyp.13305>
- SANFORD, W. 2011. Calibration of models using groundwater age. *Hydrogeology Journal*, 19(1): 13-16. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0637-6>
- STEPHENS, G.L.; SLINGO, J.M.; RIGNOT, E.; REAGER, J.T.; HAKUBA, M.Z.; DURACK, P.J.; WORDEN, J.; ROCCA, R. 2020. Earth's water reservoirs in a changing climate. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476(2236): 20190458. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0458>
- SZILAGYI, J. 2018. Anthropogenic hydrological cycle disturbance at a regional scale: state-wide evapotranspiration trends (1979–2015) across Nebraska, USA. *Journal of Hydrology*, 557: 600-612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.062>