

## ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE ÁGUA NA PESQUISA EM IRRIGAÇÃO

CÉSAR DE OLIVEIRA FERREIRA SILVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Recursos Hídricos e Isótopos Ambientais, Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Avenida 24 A, 1515, CEP 13506-900 Rio Claro, São Paulo, Brasil, cesar.of.silva@unesp.br.

### 1 RESUMO

Essa nota científica apresenta a conceituação e aplicações das técnicas isotópicas para pesquisa e desenvolvimento em irrigação, especialmente no contexto de escassez hídrica. Destaque é dado aos métodos Keeling Plot e Isotopic Mass Balance (IMB). A nota traz conceitos e termos elementares aplicadas a problemas reais na pesquisa em irrigação, bem como reflexões sobre os elementos das diferentes modelagens e suas aplicações, e perspectivas sobre os usos presentes e futuros destas técnicas.

**Keywords:** hidrologia, isótopos de água, agricultura, ensino, pesquisa

SILVA, C.O.F.  
STABLE WATER ISOTOPES IN IRRIGATION RESEARCH

### 2 ABSTRACT

This scientific note presents the conceptualization and applications of isotopic techniques for irrigation research and development, especially in the context of water scarcity. The Keeling plot and isotopic mass balance (IMB) methods are highlighted. The note provides elementary concepts and terms applied to real problems in irrigation research, as well as reflections on the elements of the different models and their applications and perspectives on the present and future uses of these techniques.

**Keywords:** hydrology, water isotopes, agriculture, teaching, research

### 3 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos na agricultura tem se tornado um desafio crítico diante do aumento da demanda por alimentos e da crescente escassez hídrica. A irrigação representa a principal consumidora de água doce em diversos países, o que exige soluções inovadoras e ferramentas de monitoramento cada vez mais precisas para garantir sua sustentabilidade (Silva, 2023). Nesse

contexto, a aplicação de técnicas isotópicas tem emergido como uma abordagem promissora para estudar e otimizar os processos hídricos em sistemas agrícolas.

As técnicas isotópicas permitem rastrear o caminho da água no ambiente com base nas assinaturas isotópicas dos elementos, especialmente os isótopos estáveis de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e hidrogênio ( $\delta^2\text{H}$ ). Esses isótopos fornecem informações detalhadas sobre a origem, movimentação e evaporação da água no solo e nas plantas. Ao

aplicar esses métodos na irrigação, torna-se possível avaliar a eficiência do uso da água, entender as perdas por evaporação e identificar o comportamento de diferentes estratégias de manejo hídrico.

Esta nota científica visa apresentar os fundamentos e aplicações práticas das técnicas isotópicas na pesquisa em irrigação, com foco especial nos métodos Keeling Plot e Balanço Isotópico de Massa (Isotopic Mass Balance – IMB). Ambos os métodos oferecem vantagens específicas para a análise de processos hídricos em escala de campo. Além de explorar conceitos fundamentais e terminologias associadas, o artigo propõe reflexões sobre os desafios e as oportunidades de uso dessas ferramentas em diferentes cenários agrícolas.

#### 4 TERMINOLOGIA E TÉCNICAS ISOTÓPICAS

O uso de isótopos estáveis em estudos hidrológicos envolve o entendimento de termos e conceitos fundamentais. Os isótopos são variantes de um mesmo elemento químico que diferem em número de nêutrons, mantendo as propriedades químicas semelhantes. No caso da água, os isótopos mais utilizados são o deutério ( $\delta^2\text{H}$ ) e o oxigênio-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ). A razão isotópica dessas espécies é expressa em notação delta ( $\delta$ ), comparada a um padrão internacional (VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water).

As técnicas isotópicas empregadas em estudos de irrigação visam identificar mudanças na composição isotópica da água em função de processos físicos como evaporação, percolação e transpiração. A análise da assinatura isotópica da água coletada em diferentes pontos (água de irrigação, solo, planta e atmosfera) permite inferir processos dominantes de perda ou redistribuição da água no sistema. Em ambientes agrícolas, essas técnicas auxiliam na avaliação da eficiência de métodos de

irrigação, como gotejamento, aspersão ou sulco.

Entre as técnicas disponíveis, duas se destacam por sua aplicabilidade em campo e por fornecerem interpretações quantitativas dos processos hídricos: o método Keeling Plot, que permite estimar a composição isotópica de fontes de evaporação, e o método de Balanço Isotópico de Massa, que avalia o fracionamento isotópico em sistemas abertos ou fechados. Ambas as técnicas se complementam, permitindo um diagnóstico mais completo dos processos de uso e perda de água nos sistemas agrícolas irrigados.

#### 5 USO DA TÉCNICA KEELING PLOT EM IRRIGAÇÃO

O método Keeling Plot é amplamente utilizado para identificar a assinatura isotópica de fontes que contribuem para uma mistura, como a evaporação da água do solo ou da vegetação. A técnica se baseia na relação linear entre a razão isotópica da mistura e o inverso da concentração do composto (no caso, vapor d'água). A extração da linha de regressão permite determinar a assinatura isotópica da fonte evaporativa dominante, sendo uma ferramenta valiosa para estudos em ambientes irrigados.

Na pesquisa em irrigação, o Keeling Plot permite estimar a contribuição da evaporação da água do solo para o vapor atmosférico, distinguindo-a da transpiração vegetal. Isso é fundamental para diferenciar as perdas hídricas que não contribuem para o crescimento das plantas e, portanto, não são desejáveis. Aplicado em conjunto com sensores meteorológicos e coletas em campo, o método auxilia na quantificação das perdas por evaporação sob diferentes sistemas e manejos de irrigação. Yuan *et al.* (2020) propõem métodos baseados no gráfico de Keeling para estimar a composição isotópica do vapor de água

ambiente, oferecendo melhorias na precisão das estimativas em ecossistemas terrestres.

## 6 USO DA TÉCNICA DE BALANÇO DE MASSA EM IRRIGAÇÃO

O Balanço Isotópico de Massa (Isotopic Mass Balance – IMB) é uma abordagem quantitativa para analisar a evolução isotópica da água em um sistema. Ele parte do princípio de conservação da massa e leva em consideração os efeitos de fracionamento isotópico associados à evaporação. No contexto da irrigação, o IMB permite estimar a fração da água aplicada que é perdida por evaporação e transpiração, além de fornecer subsídios para otimizar a aplicação de água. Putman *et al.* (2024), por exemplo, avaliam o Modelo Nacional de Água dos EUA, revelando contribuições de irrigação agrícola não representadas no escoamento fluvial, por meio de análises isotópicas. Bisht *et al.* (2024) avaliam processos hidrogeoquímicos para uso na irrigação e identifica fontes potenciais de contaminação por nitrato na água subterrânea, utilizando isótopos estáveis de nitrogênio.

Uma aplicação típica do IMB em campo envolve a coleta de amostras de água de diferentes compartimentos (água aplicada, água no solo em profundidades variadas, água transpirada pelas plantas) e sua análise isotópica. A partir disso, é possível montar equações de balanço que descrevem as transformações sofridas pela água no sistema irrigado. Com isso, pesquisadores conseguem identificar os pontos críticos de perda e avaliar a eficiência de estratégias de irrigação. Vallet-Coulomb *et al.* (2017) utilizam dados combinados de isótopos estáveis e cloreto para inferir fluxos de retorno de irrigação em um aquífero mediterrâneo, destacando a importância das técnicas isotópicas na gestão de recursos hídricos subterrâneos.

A integração do IMB com outros dados, como umidade do solo, condutividade elétrica e informações meteorológicas, amplia sua aplicabilidade e aumenta a robustez das conclusões. A técnica tem sido empregada com sucesso em culturas como milho, arroz e cana-de-açúcar, contribuindo para o aprimoramento do manejo da irrigação em diferentes contextos climáticos e edafológicos. Zhang, Wang e Liu (2022) utilizam isótopos estáveis para determinar a aplicação ideal de água de irrigação em um campo de milho, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas isotópicas, especialmente o Keeling Plot e o Balanço Isotópico de Massa, oferecem ferramentas poderosas para a análise dos processos hidrológicos em sistemas de irrigação. Sua aplicação contribui significativamente para a compreensão dos fluxos de água, identificação de perdas e aumento da eficiência hídrica, elementos essenciais diante do cenário de escassez. Avanços nas tecnologias de sensoriamento e análise isotópica prometem ampliar ainda mais as possibilidades de uso dessas ferramentas, integrando-as ao manejo de precisão na agricultura irrigada.

## 8 REFERÊNCIAS

- BISHT, M.; SHRIVASTAVA, M.; LAL, K.; VARGHESE, C. Evaluation of hydrogeochemical processes for irrigation use and potential nitrate contamination sources in groundwater using nitrogen stable isotopes in Southwest, India: A case study. *Water, Air, & Soil Pollution*, Dordrecht, v. 235, n. 6, article 324, 2024.

VALLET-COULOMB, C.; SÉRAPHIN, P.; GONÇALVÈS, J.; RADAKOVITCH, O.; COGNARD-PLANCQ, A.; CRESPY, A.; BABIC, M.; CHARRON, F. Irrigation return flows in a Mediterranean aquifer inferred from combined chloride and stable isotope mass balances. **Applied Geochemistry**, Amsterdã, v. 86, p. 92-104, 2017.

PUTMAN, A. L.; LONGLEY, P. C.; McDONNELL, M. C.; REDDY, J.; KATOSKI, M.; MILLER, O. L.; BROOKS, J. R. Isotopic evaluation of the National Water Model reveals missing agricultural irrigation contributions to streamflow across the western United States. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 28, n. 13, p. 2895-2918, 2024.

SILVA, C.O. F. Inteligência artificial na pesquisa em irrigação e drenagem. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 2, p. 417-426, 2023.

YUAN, Y.; DU, T.; WANG, H.; WANG, L. Novel Keeling-plot-based methods to estimate the isotopic composition of ambient water vapor. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 24, n. 9, p. 4491-4501, 2020.

ZHANG, Y.; WANG, L.; LIU, W. The use of stable isotopes to determine optimal application of irrigation water in a maize field. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 480, n. 1/2, p. 1-15, 2022.