

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO
MINERAL

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

RELATÓRIO DE ATIVIDADES 2020

PROGRAMA NACIONAL DE APLICAÇÕES ISOTÓPICAS NA HIDROLOGIA
PROJETO DE INOVAÇÃO DO DEHID/DHT/SGB-CPRM



DEZEMBRO / 2020

DOCUMENTO EM EDITORAÇÃO

RELATÓRIO DE ATIVIDADES 2020

PROGRAMA NACIONAL DE APLICAÇÕES ISOTÓPICAS NA HIDROLOGIA– PROJETO DE INOVAÇÃO DO DEHID/DHT/SGB-CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

Diretoria de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

Assessoria de Assuntos Internacionais

Maria Glícia da Nóbrega Coutinho

Departamento de Hidrologia

Frederico Cláudio Peixinho

Divisão de Hidrologia Aplicada

Adriana Dantas Medeiros

Coordenação Executiva

Roberto Eduardo Kirchheim / Andrea Segura Franzini

Equipe Técnica

Patricia Wagner Soterio, Luna Gripp Simoes Alves, Bernardo Luiz Ferreira de Oliveira, Janaina Simone Neves Miranda, Priscila Souza Silva, Jussara Socorro CuryMaciel, Ana Cristina Bomfim Peixoto, Luciano Trasel, Rejane Bao, Karine Pickbrenner, George Rodrigues De Sousa Araujo, Fabio Araujo da Costa, Robson de Carlo da Silva, Rafael Diego Diniz Bezerra de Albuquerque, Roberto Fernandes de Paiva, Gilberto Nunes Barreto, Vitor Hugo Serravalle Reis Rodrigues, Amilton de Castro Cardoso, Homero Reis de Melo Junior, Manoel Imbiriba Junior, Herculy Pessoa e Castro, Jean Ricardo da Silva Nascimento, Bruna Karoline de Sena Silva, Sandy Mayone Ribeiro, Mauro Campos Trindade, Vivian Athaydes Canello Fernandes, Marcio Costa Abreu, Segura Franzini, Andrea, Guilherme Nogueira Santos, Eduardo Lazaroto, Daniele Tokunaga Genaro, Katarina Rempel, Castrolago Silva Barbosa, Vanesca Sartorelli, Idembergue Barroso de Moura, Victor Hugo da Mota Paca

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	HISTÓRICO	5
3.	TÉCNICAS ISOTÓPICAS	6
4.	ESTRUTURA DO PROGRAMA	9
5.	PRODUTOS	13
6.	ASPECTOS DE INOVAÇÃO	19
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	27
8.	AGRADECIMENTOS	29
9.	BIBLIOGRAFIA	30

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da Ciência e Inovação o SGB-CPRM vem articulando desde 2014 arranjos institucionais assim como atividades técnicas específicas para consolidar-se como instituição líder nacional no tema das aplicações isotópicas na hidrologia. Atualmente o SGB-CPRM conta com um Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia. Trata-se de um programa consolidado que apoia e complementa os demais projetos operacionais da DHT. O objetivo geral do Programa é o de assimilar, testar, desenvolver e difundir as valiosas aplicações isotópicas na hidrologia (desde a chuva, águas superficiais e subterrâneas) como uma ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos no País.

O Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia, albergado dentro da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial – DHT do SGB-CPRM consolidou-se formalmente em 2015, ano marco para a execução de atividades isotópicas em hidrologia. A cada novo ano, há uma repactuação de metas e novo alinhamento para manter as ações coerentes com as estratégias da DHT e recursos financeiros e pessoais disponíveis. Em virtude da execução das ações de caráter isotópico em território nacional, com benefícios perceptíveis em escala continental, a empresa possui atualmente a condição de Centro Colaborativo da AIEA. Significa o reconhecimento institucional por parte da AIEA como instituição parceira, capaz de auxiliar na difusão de técnicas nucleares para fins pacíficos, neste caso, de uso das técnicas isotópicas na hidrologia. Maiores informações sobre Centros Colaborativos e a AIEA podem ser encontrados em: www.iaea.org/about/partnerships/collaborating-centres, ou www.iaea.org/sites/default/files/18/05/collaborating-centres-reference-guide.pdf.

O objetivo maior da atuação do SGB-CPRM como Centro Colaborativo da AIEA é usar e difundir a aplicação de técnicas isotópicas na hidrologia e assumir papel de liderança técnica no país e na América do Sul. Trata-se, portanto, de um grande desafio a ser assumido pela empresa, e, que tem o propósito de

identificar problemas e apresentar soluções na área de recursos hídricos utilizando a hidrologia isotópica.

Considerando sua solidez institucional e capacidade/qualidade profissional, além da ampla capilaridade em todo o território nacional, a CPRM reúne as condições ideais para exercer liderança técnica nacional e continental na metodologia isotópica aplicada à hidrologia. Através da sua equipe de especialistas, a CPRM vem executando uma série de ações na área dos recursos hídricos, onde o refinamento isotópico agrega expressivo valor e coloca a empresa na vanguarda científica. Ressalta-se também o espírito de liderança conquistado pela CPRM no âmbito continental, onde a mesma tem assumido protagonismo em importantes iniciativas. Através destas inserções, a CPRM consolida-se também como instituição apta para difusão das técnicas isotópicas em território Sul-americano. Abrem-se oportunidades de parcerias institucionais nacionais e internacionais importantes e janelas de capacitação imprescindíveis para avançar no cumprimento da missão corporativa.

2. HISTÓRICO

A partir da aproximação institucional entre AIEA e a SGB-CPRM a partir de 2014, foi estendido um convite formal para que o SGB-CPRM exercesse a função de Centro Colaborativo para a difusão das técnicas isotópicas aplicadas à hidrologia. A realização de um curso de capacitação em hidrogeologia isotópica ministrado pela AIEA no SGB-CPRM consolidou a parceria. Aceito o desafio por parte do SGB-CPRM, de transformar-se em Centro Colaborativo, através de Ato da Presidência (no 092/PR/15 de 14/04/2015) foi conformado um Grupo de Trabalho (GT) constituído para discutir e definir, conceitual e estruturalmente, o modelo deste Centro Colaborativo (CC) e apresentar um plano de ação detalhado, alinhado ao conteúdo programático definido pela IAEA e aos projetos em andamento do próprio SGB-CPRM. A primeira reunião técnica do GT ocorreu em 14/05/2015 na sede do SGB-CPRM e, já em agosto de 2015, durante uma missão técnica formal da AIEA ao Brasil, foi apresentada e discutida a primeira versão do Plano Estratégico. Durante 2015 a 2019 o SGB-CPRM exerceu formalmente a função de CC, período no qual, o programa foi formalmente

internalizado constituído, através de dotação financeira exclusiva, e executado de forma sistemática.

Ressalta-se que, do ponto de vista financeiro, a função de CC implica em expressiva contrapartida da AIEA, apoio estratégico fundamental para tornar a aplicação de técnicas isotópicas uma prática corrente nas ações da CPRM e com isso difundi-las no país e no continente. Esta contrapartida da AIEA envolve o custeio das determinações analíticas isotópicas na rede de laboratórios credenciados, no envio de técnicos de excelência para ministrar os cursos de capacitação no Brasil e na aceitação de colaboradores da CPRM em cursos sobre técnicas isotópicas ministrados no exterior.

A Figura 1 ilustra esquematicamente o histórico de consolidação do referido Programa.

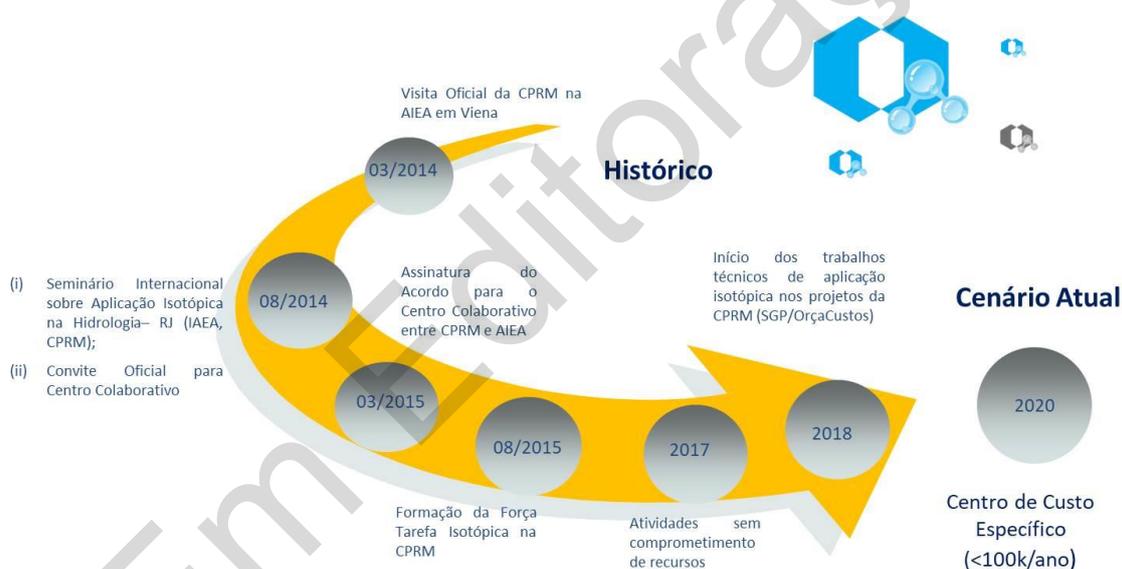


Figura 1. Histórico do Programa no SGB-CPRM

3. TÉCNICAS ISOTÓPICAS

A utilização de isótopos ambientais em estudos hidrológicos no Brasil teve início no final da década de 60 e início da década de 70. Inicialmente os objetos de estudo eram a região semiárida nordestina, seguida da região amazônica e, finalmente, a região sudeste (Kirchheim et al, 2018). Estes estudos pioneiros

foram motivados pela necessidade de entender os processos de salinização, os mecanismos de recarga e as idades das águas subterrâneas em áreas semiáridas e densamente povoadas (Gat et al., 1968). As iniciativas isotópicas centradas na região sudeste tiveram como mote a determinação das assinaturas da chuva e das águas subterrâneas, incluindo amostras das Formações Botucatu e Pirambóia. Ressalta-se que já havia na época o entendimento do potencial aquífero de ambas as unidades (Matsui, 1971). A partir deste momento, nota-se uma disseminação ampla do emprego da isotopia na hidrologia. Novos aquíferos são estudados e técnicas complementares foram desenvolvidas.

A compreensão hidrológica é um elemento-chave para a tomada de decisões e no aprimoramento da gestão sustentável dos recursos hídricos. Isso requer uma abordagem interdisciplinar e holística, com uma perspectiva de longo prazo (Vörösmarty et al. 1997). Nesse contexto, a Hidrologia isotópica corresponde a uma técnica nuclear utilizada para rastrear os movimentos da água no ciclo hidrológico (IAEA 1983). As aplicações isotópicas são diversas e têm sido decisivas para o melhor entendimento do ciclo hidrológico, sempre a partir de um enfoque integrado. O acoplamento de técnicas isotópicas às metodologias de modelamento hidroquímico e hidrodinâmico é irreversível.

Os isótopos estáveis do H e do O são os mais utilizados no estudo dos processos hidrológicos. A perspectiva trazida à tona pela abordagem dos multi-traçadores é salutar e envolve o uso de outros isótopos. A Figura 2 ilustra os isótopos de H e O e sua abundância na natureza e fornece informações complementares dos demais isótopos naturais.



Elemento químico	Isótopo	Fração molar		Padrão internacional	R _{padrão} (‰)
		Abundância relativa	Variação natural		
Hidrogênio	¹ H	0,99984426	0,999816-0,999974	VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water)	² H/ ¹ H
	² H (D)	0,00015574	0,000026-0,000184		0,0001558
Oxigênio	¹⁶ O	0,99762906	0,997380-0,997760	VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water)	¹⁸ O/ ¹⁶ O
	¹⁷ O	0,00037900	0,000370-0,000400		
	¹⁸ O	0,00200040	0,001880-0,002220		
Nitrogênio	¹⁴ N	0,99633700	0,995790-0,996540	Nitrogênio atmosférico, N ₂ (AIR)	¹⁵ N/ ¹⁴ N
	¹⁵ N	0,00366300	0,003460-0,004210		
Carbono	¹² C	0,98892200	0,988530-0,990370	Viena Pee Dee Belemnite (VPDB)	¹³ C/ ¹² C
	¹³ C	0,01107800	0,009630-0,011470		
Enxofre	³² S	0,95040740	0,944540-0,952810	Canyon Diablo Troilite (CDT)	³⁴ S/ ³² S
	³³ S	0,00748690	0,007300-0,007930		
	³⁴ S	0,00429599	0,039760-0,047340		

Figura 2. Informações básicas dos isótopos naturais. Modificado de Gastmans (notas de disciplina UNESP) e Barbosa et al. 2018.

A compreensão das variações de concentração das diferentes espécies isotópicas em sistemas naturais e sua comparação com padrões absolutos e/ou com variações isotópicas regionais permite determinar, entre outros: (i) A origem das águas, (ii) A identificação de mecanismos de salinização, (iii) A definição de áreas de recarga, (iv) A determinação de misturas de unidades aquíferas, (v) Os tempos de trânsito das águas subterrâneas, (vi) A interação água-rocha; (vii) A interação água subterrânea-água superficial, (viii) O balanço hídrico e dinâmica de bacias hidrográficas, (ix) A dinâmica de sedimentação e intemperismo em bacias hidrográficas, (x) A origem de contaminantes, etc.

De acordo com Barbosa et al. 2018, a razão para a qual os isótopos estáveis são úteis nos estudos hidrológicos é que as reações físico-químicas entre as várias espécies causam um fracionamento dos isótopos do mesmo elemento entre os reagentes e produtos. A base científica para o fracionamento isotópico foi inicialmente desenvolvida por Urey (1947). Nesse trabalho pioneiro foi demonstrado que o fracionamento isotópico pode ser representado por uma troca de isótopos (e.g. ¹⁶O e ¹⁸O) entre duas espécies/fases moleculares. Processos de fracionamento físico (em função de variáveis como peso,

densidade) que ocorrem nos sistemas naturais (como por exemplo na evaporação, condensação e precipitação da água no ciclo hidrológico), são responsáveis em promover diferenciações isotópicas e conceder as águas o que denomina-se de assinatura isotópica. A Figura 3 ilustra conceitualmente este cenário.

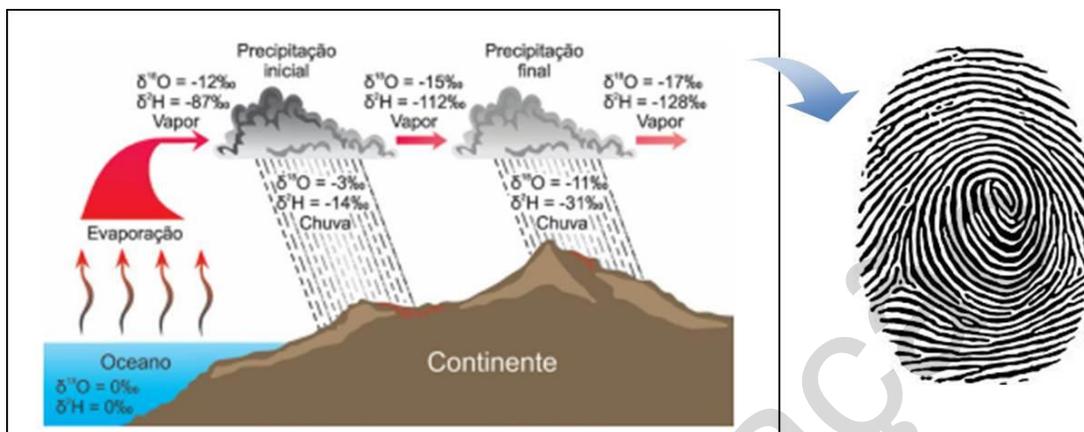


Figura 3. Esquema do ciclo global da água, destacando o papel do fracionamento na modificação do conteúdo isotópico $\delta^{18}\text{O}$ entre os reservatórios naturais de água, conferindo-lhes uma assinatura isotópica (Modificado de Barbosa et al., 2018).

4. ESTRUTURA DO PROGRAMA

O referido programa é constituído de componentes que por sua vez são formados por atividades estratégicas. Cada uma destas atividades destacadas possui uma breve descrição de caráter técnico-operativa. A Figura 4 cita as componentes e as linhas de ação de como o programa foi concebido.



Figura 4. Componentes do Programa e linhas ação estratégicas.

O Quadro 1 identifica as atividades estratégicas dentro de cada componente compondo um programa específico para os próximos 04 anos, no qual são reconhecidas as metas e os produtos a serem alcançados. A partir da leitura do Quadro pode-se perceber que o programa consiste em atividades que abarca o ciclo hidrológico como um todo, mas ao mesmo tempo buscam alicerças bases sólidas do ponto de vista analítico, capacitação, geração de produtos inovadores. A articulação institucional, seja com parceiros nacionais e ou internacionais é fundamental.

Quadro 1. Atividades estratégicas do Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia

Componentes	Atividades	Entregas	Cronograma	Resultados / Impactos	Indicadores de Desempenho
TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO	Está em desenvolvimento na CPRM o Programa Nacional para Uso de Isótopos em Hidrologia, onde dentre os objetivos principais constam as atividades de capacitação. A aplicação de isótopos na hidrologia é importante ferramenta para otimização da avaliação e gestão dos recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - 06 (seis) treinamentos internos/cursos sobre o uso de isótopos em hidrologia para equipe da CPRM; - 03 (três) cursos internos sobre técnicas avançadas (como uso de traçadores e modelagem); - 03 (três) participações promovendo sessão de discussão sobre aplicações de isótopos em hidrologia no âmbito de Conferências Nacionais sobre Águas Subterrâneas e Recursos Hídricos. - 01 Simpósio sobre aplicações de isótopos em hidrologia ao nível continental (Serviços Geológicos de países vizinhos); - Continuação da participação da CPRM nos treinamentos internacionais sobre isótopos organizados pela AIEA. 	<p>2020-2021</p> <p>2020-2022</p> <p>2020-2024</p> <p>2023</p> <p>2020-2024</p>	A CPRM torna-se instituição de referência, capaz de promover e colaborar com a AIEA em disseminar o uso de isótopos na hidrologia no país e no continente sul-americano	<ul style="list-style-type: none"> - Número de treinamentos / eventos em isotopia básica. - Número de técnicos treinados da CPRM. - Número de instituições envolvidas em colaboração. - Acessibilidade no site da CPRM sobre informações do uso de isótopos na hidrologia.
AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE ANALÍTICA	A CPRM dispõe de uma rede de laboratórios analíticos regionais, porém ainda não trabalha com técnicas isotópicas.	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de projetos e submissão de propostas às agências de fomento para montagem de instalações analíticas para de isótopos estáveis na CPRM 	2020-2024	Prover ao LAMIN condições de atendimento da demanda de análises isotópicas em água nos projeto em desenvolvimento na CPRM.	<ul style="list-style-type: none"> - Número de equipamentos instalados e em operação. - Número de amostras processadas ao ano; - Adequação a padrões e testes de qualidade.
DISSEMINAÇÃO TÉCNICAS ISOTÓPICAS	Disseminação do conhecimento sobre o uso de isótopos estáveis na hidrologia visando à avaliação e a gestão dos recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Publicações específicas (Memorial Técnico) para cada uma das 10 GNIP's instalada no território nacional; - 15 (quinze) artigos técnicos- científicos publicados em revistas nacionais e/ ou internacionais; - Disponibilização de dados isotópicos em água no banco de dados e acessibilidade no site da CPRM. 	<p>2020-2024</p> <p>2020-2024</p> <p>2020-2024</p>	Disseminação das técnicas isotópicas no uso de isótopos estáveis em água visando a avaliar a gestão dos recursos hídricos. Amplo acesso à comunidade científica e usuários das informações.	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Memoriais técnicos das Estação GNIP's publicados. - Número de artigos técnico-científico publicados em revistas nacionais e/ou internacionais; - Acessos a dados isotópicos em água no site da CPRM.
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE CHUVA - GNIP	A Cooperação AIEA-CPRM tem propiciado ao Brasil monitorar a assinatura isotópica das águas de chuvas por meio das estações de coleta da rede GNIP, sob a responsabilidade da CPRM.	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção, operação e monitoramento de 10 (dez) estações, já instaladas, da Rede GNIP; - Instalação de 07 (sete) novas estações para comporem a rede GNIP, no território nacional; 	<p>2020-2024</p> <p>2020-2022</p> <p>2021-2022</p>	Coleta de dados isotópicos em amostras de água de chuva coletadas em estações GNIPs como apoio para a gestão da disponibilidade, da dinâmica e da segurança hídrica no contexto Continental.	<ul style="list-style-type: none"> - Banco de dados com informações disponíveis. - Número de novas estações GNIP instaladas. - Dados disponíveis na rede oficial GNIP/ AIEA.

	Algumas das estações GNIP possuem coleta para trítio.	--Instalação de 03 (três) novas estações para comporem a rede GNIP em áreas de fronteiras. - Banco de dados disponível em nível nacional e no repositório GNIP da AIEA.	2020-2024		
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - RIMAS	Avaliações de estudos isotópicos nos aquíferos monitorados pela Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS)	- Análises de 600 (seiscentas) amostras de águas subterrâneas da RIMAS; - Avaliação isotópica em 20 (vinte) aquíferos com dados disponibilizados em publicação institucional; - Elaboração e publicação de 01 (um) atlas com a distribuição isotópica nas águas subterrâneas em contexto nacional.	2020-2024 2024 2024	Avaliações de isótopos em 20 aquíferos regionais no país com informações disponíveis para pesquisa pela comunidade científica e tomadores de decisão permitindo melhores práticas de gestão d'água.	- Banco de dados com informações disponíveis; - Número de poços de monitoramento/ amostras analisadas; - Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão e impacto positivo na resolução de conflitos
PROJETO PILOTO DE MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE RIOS - GNIR	A CPRM e a AIEA iniciarão ações de monitoramento isotópico em rios no território nacional. Em forma de projeto piloto o programa inicia com o Rio Amazonas, São Francisco e Paraná.	- Coleta e análise isotópica de 400 (quatrocentas) amostras de águas dos 3 Rios indicados; - Elaboração de 03 (três) Manuais de monitoramento de coleta de amostras para os 3 (três) rios indicados.	2020-2024 2021	Aprimoramento da avaliação da dinâmica das águas nas bacias monitoradas, e desenvolvimento de ferramentas para a gestão.	- Banco de dados com informações disponíveis; - Número de amostras Analisadas; - Número de relatórios e <i>papers</i> publicados; - Número de rios com monitoramento isotópico (GNIR).
AVALIAÇÃO ISOTÓPICA NO PROJETO PILOTO URUCUIA	O uso da isotopia em muito contribuirá para o entendimento da dinâmica dos recursos hídricos no Aquífero Urucuia.	- 200 (duzentas) amostras coletadas e analisadas para isótopos estáveis em águas superficiais e subterrâneas na região do Urucuia; - Elaboração de 01 (um) Relatório de Avaliação Isotópica do Aquífero Urucuia.	2020-2024 2020-2024	Entendimento da dinâmica e da origem da água contribuindo para gestão integrada de recursos hídricos na escala da bacia.	- Número de amostras analisadas; - Banco de dados com informações disponíveis; - Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão.
AVALIAÇÕES ISOTÓPICAS EM ÁREAS PRIORITÁRIAS	Avaliações isotópicas específicas em aquíferos de áreas urbanas de alta prioridade devido a conflitos de qualidade e quantidade	- 300 amostras de água coletadas (rios e águas subterrâneas) em projetos específicos relacionados à dinâmica das águas subterrâneas em áreas prioritárias de conflitos hídricos. - Relatórios de avaliações isotópicas em aquíferos de área urbanas.	2020-2024 2020-2024	Entendimento da dinâmica e origem da água contribuindo para a gestão integrada dos recursos hídricos sob o ponto de vista de quantidade e qualidade em regiões urbanas.	- Número de amostras analisadas; - Banco de dados com informações disponíveis; - Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão e impacto positivo na resolução de conflitos de recursos hídricos em áreas urbanas.

5. PRODUTOS

Os anos de anteriores, principalmente os anos de 2018 a 2019, trouxeram conquistas de extremo valor técnico para o SGB-CPRM. Entre estas, vale destacar:

- ✓ 10 GNIPs instaladas e operantes coletando chuva mensal;
- ✓ 400 amostras de chuva coletadas e 200 analisadas;
- ✓ 06 GNIP's já doadas ao SGB-CPRM aguardando despacho internacional;
- ✓ 08 Equipes locais constituídas (04 técnicos em média em cada equipe);
- ✓ >150 Colaboradores treinados em técnicas isotópicas relacionadas a isótopos estáveis;
- ✓ >500 Amostras RIMAS coletadas com 300 analisadas;
- ✓ >100 amostras coletas para isótopos de gases nobres;
- ✓ 08 Colaboradores treinados em cursos de excelência em instituições de prestígio no exterior;
- ✓ Grande número de publicações de impacto (incluindo premiações e participação nos mais importantes congressos mundiais da área;
- ✓ 04 Colaboradores realizando doutorado utilizando diretamente abordagens isotópicas;
- ✓ Partícipe de 4 grupos de pesquisa junto ao CNPQ;
- ✓ Encaminhamento das propostas de aquisição do primeiro analisador isotópico da CPRM (Los Gatos);
- ✓ Encaminhamento assinatura do Acordo entre a AIEA e o SGB-CPRM para a formalização da parceria como Centro Colaborativo da AIEA na área de aplicações isotópicas na hidrologia.
- ✓ 04 Propostas de projetos envolvendo componentes isotópicas com recursos internacionais e parceiros nacionais aprovados.

A Figura 5 fornece o cenário da Rede de Monitoramento GNIP consolidada nos anos recentes em território nacional e as Figura 6 e 7 ilustram a dimensão alcançada pelo Programa de Isotopia junto à comunidade internacional.

Estação	Isótopos Estáveis	Trítio ^3H	$\Sigma\text{ppt/m}$ (mm), T (°C) e P_{ar} (%)	Data Início
Araraquara-SP (UNESP)	✓	✓	✓	10/13
São Paulo-SP (USP)	✓	✓	✓	10/16
Belo Horizonte-MG (CDTN)	✓	✓	✓	10/06
Porto Alegre-RS	✓		✓	07/17
São Gabriel do Oeste-MS	✓		✓	07/17
Manaus-AM	✓	✓	✓	08/18
Recife-PE	✓	✓	✓	09/18
Salvador-BA	✓		✓	09/18
Belém-PA	✓	✓	✓	11/18
Porto Velho-RO	✓		✓	11/18
Teresina-PI	✓		✓	12/18
Goânia-GO	✓		✓	12/18
Barreiras-BA	✓	✓	✓	02/19
Fortaleza-CE	✓		✓	2021
Cuiabá-MT	✓	✓	✓	2021
Santarém-PA	✓		✓	2021
Boa Vista-RR	✓		✓	2021
Palmas-TO	✓		✓	2021
Rio de Janeiro-RJ	✓		✓	2021



Figura 5. Rede atual de monitoramento isotópico de chuva operada pela CPRM. Em verde a programação de instalação para 2021. Imagens das estações e dos treinamentos realizados.



Figura 6. Reunião de lideranças de Centros Colaborativos do mundo todo em Viena. SGB-CPRM é um dos 03 Centros Colaborativos do mundo no tema água. Observar o painel de entrada do maior encontro bianual de aplicações isotópicas do mundo (realizado na AIEA). A seta que sai do Brasil é a GNIP da CPRM de Porto Alegre e no mapa estão marcadas todas as 10 estações em operação. Nas imagens menores, aprecia-se a sede da AIEA e as entregas das primeiras amostras de chuva coletadas e analisadas pela AIEA

IAEA Helps Brazil Strengthen Isotope Monitoring of Precipitation
 Aleksandra Peeva, IAEA Department of Nuclear Sciences and Applications

The CPRM team after the set-up of the Recife isotope monitoring station. This rainfall totalizer will be used to collect samples, whose isotopic signature will provide valuable additional data for the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). (Photo: R. Kirchheim/CPRM). Since the beginning of this year, the IAEA has been working with the Brazilian Geological Survey (CPRM) and the Brazilian National Water Agency (ANA) to help strengthen the country's network to observe the isotopic composition of precipitation and use this data to determine the availability of fresh water across the country. Five stations equipped with specifically-suited rain samplers have already been set-up across Brazil and five more will be installed by the end of 2018. The first rain samples have been collected and delivered for isotope analysis to the IAEA Hydrology laboratory in Vienna this month. Interpreting changes in isotope ratios in precipitation allows scientists to determine changes in rainfall patterns and learn where, when and how groundwater is recharged. Rainfall patterns and their relationship with groundwater recharge is essential for understanding the impact of climate change on water availability (see Isotope hydrology). "In such a diverse and huge country like Brazil, water is unevenly distributed. Most of the electricity is produced from hydroelectric power. Brazil's agriculture is heavily dependent on water availability," said Roberto Kirchheim, a hydrogeologist with CPRM. On a global level, strengthening a central network for precipitation monitoring in Brazil will enable scientists to better assess the grand scheme of air masses' movements and improve interpretation of past climate records, which can help them predict future events linked to climate change. Brazil - like many other countries in the region - has lately been experiencing unusual extreme weather conditions, such as floods and droughts. The IAEA has been coordinating the GNIP since 1960. The data available through this unique network is used by researchers and practitioners in hydrological, climatological and environmental studies (illustration: IAEA). "Having ten monitoring stations across Brazil, covering a large part of the Latin American region, will improve the spatial coverage available to scientists locally and globally. This information will help countries in the region improve their use of isotopes in water resources assessment," said IAEA isotope hydrologist Luda Ortega. CPRM scientists and projects leaders have been trained to handle and interpret precipitation isotope data at the IAEA Hydrology Laboratory in Vienna. The initiative is a pilot project, which will be expanded to other countries in the Latin American and Caribbean region over the next five years.

Articulação Institucional

Centro Colaborativo da AIEA

IAEA Collaborating Centre

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)
Geological Survey of Brazil

Collaboration on
Water resources assessment and management

Objectives

- To facilitate a closer interaction between existing research centres with expertise in the use of advanced hydrological-geochemical methods and national institutes with a clear mandate in water resources management, such as the CPRM. In many developing countries, most water resources assessment projects are carried out using exclusively conventional hydrological methods (mainly measuring amount of precipitation, river discharge rates and groundwater levels), not benefitting of the use and application of more advanced methods, such as isotope hydrology.
- To contribute and promote the integration of isotope hydrology tools and methods into on-going and future hydrological assessments among water resources professionals through various activities. CPRM activities will help other Member States to conduct similar groundwater assessment and enhance the management of their water resources.

CPRM
 Serviço Geológico do Brasil

CPRM
 Av. Pasteur, 404 Urca
 22 290-255 Rio de Janeiro
 BRAZIL

www.cprm.gov.br

www.iaea.org/topics/collaborating-centres
collaborating-centres@iaea.org

Figura 7. Divulgação sobre o SGB-CPRM no site das Nações Unidas-AIEA e portfolio do SGB-CPRM no site da AIEA reconhecendo como Centro Colaborativo.

Em função das várias impossibilidades trazidas à tona pela situação da pandemia no mundo todo, muitas atividades previstas tiveram de ser postergadas, tornando o ano de 2020 como repleto de desafios. As principais atividades que sofreram impactos foram:

- A postergação das campanhas de campo de monitoramento isotópico dos Rios Amazonas e São Francisco;
- A postergação do treinamento de colega do SGB-CPRM (devidamente aprovado para tal) no curso avançado de isótopos de gases nobres em Viena;
- A postergação do treinamento de colega do SGB-CPRM (devidamente aprovado para tal) no curso de técnicas laboratoriais para isótopos estáveis na Costa Rica.
- Ambos os laboratórios isotópicos que fornecem os resultados das amostras de água (chuva e poços de monitoramento) encerraram temporariamente suas atividades. Significa que os resultados das análises (devidamente coletadas) não puderam ser gerados.

Ainda assim, o ano de 2020 trouxe conquistas muito significativas, entre elas:

- A finalização das avaliações isotópicas relacionadas a isótopos estáveis e gases nobres em todo o aquífero SAG no território brasileiro, por meio da Tese de Doutorado do pesquisador do SGB-CPRM Roberto Kirchheim (a ser defendida em fevereiro de 2021);
- A aprovação do CTC da pesquisa de Doutorado conduzida pela pesquisadora Andrea Franzini, valendo-se de isótopos para o estudo das recargas no Aquífero Bauru em território Brasileiro;

- As coletas de chuva a partir das 10 estações GNIP operantes no País foram corajosamente mantidas (apesar da não obrigatoriedade de mantê-las). Este fato foi considerado um marco importante, comemorado inclusive na gerência do programa GNIP na AIEA em Viena;
- Prosseguimento dos trâmites para desembaraço de novas 06 estações GNIP, originalmente doadas à ANA, mas repassadas para a responsabilidade do SGB-CPRM;
- Prosseguimento dos trâmites para a aquisição do Analisador Isotópico Los Gatos a partir do Projeto Meta 2, via Banco Mundial;
- Preparação de todo o material e conteúdo sobre isotopia a ser lançado no *site* do SGB-CPRM.

Foi um ano de trabalho interno intenso no sentido de fortalecer o programa em seus aspectos formais e estruturais. As parcerias com ANA, UNESP, Universidade Federal Fluminense foram fortalecidas. O Acordo entre AIEA e SGB-CPRM que estabelece a parceria como Centro Colaborativo teve avanços em prol de sua assinatura, prevista para os próximos meses.

A produção científica foi composta dos seguintes documentos:

- ✓ Brazilian Journal of Biosystems Engineering v. 14(3) 253-263, 2020 253
APLICAÇÃO DO MODELO PIRFICT NO BANCO DE DADOS DA RIMAS
G. L. Barbosa, R. Kirchheim, G. N. Santos, R. L. Manzione; W. A. L. Zanetti.
- ✓ Environmental Science and Policy 114 (2020) 384–393. Diplomatic Advances and Setbacks of the Guarani Aquifer System in South America
Ricardo Hirataa, Roberto Eduardo Kirchheim, Alberto Manganelli.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.07.020>
- ✓ Brazilian Journal of Water Resources, RBRH, Porto Alegre, v. 25, e45, 2020. Hydrological responses in equatorial watersheds indicated by Principal Components Analysis (PCA) – study case in Atrato River Basin (Colombia). Sebastián Balbín Betancur , Didier Gastmans, Katherine

Vásquez Vásquez, Lucas Vituri Santarosa, Vinícius dos Santos & Roberto Eduardo Kirchheim

- ✓ Águas Subterrâneas, v. 34, n. 3, p. 264-274, 2020. 2. Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande Do Sul. Guilherme Casarotto Troian; Pedro Antonio Roehe Reginato; Ricardo Giumelli Marquezan; Roberto Kirchheim
- ✓ Environmental Earth Sciences. Assessment of Groundwater Recharge along the Guarani Aquifer System Outcrop Zone in São Paulo State (Brazil): An important tool towards integrated. Lucas Vituri Santarosa, Didier Gastmans, Tatiana Penteado Sitolini, Roberto Eduardo Kirchheim, Sebastian Balbin Betancur, Marcelo E. Dias Oliveira, José Cláudio Viégas Campos, Rodrigo Lilla Manzione, Artigo aprovado.
- ✓ Revista do Instituto Geológico. Contribuição dos Isótopos Estáveis da Água (H e O) no Conhecimento dos Aquíferos Brasileiros: Estado da Arte e Perspectivas Futuras. Didier Gastmans, Lucas Vituri Santarosa, Roberto Eduardo Kirchheim e Rodrigo Lilla Manzione. Artigo aprovado.

Os trabalhos submetidos a congressos foram os seguintes:

Trabalhos Submetidos para o Second International UNESCO Conference on transboundary aquifers ISARM II “Challenges and the way forward” Paris, 2021:

- ✓ The bumpy road towards transboundary groundwater management: The case of the Guarani Aquifer System in South America: Roberto Kirchheim, Ricardo Hirata e Alberto Manganelli.
- ✓ Recent contributions of combined ^{81}Kr and ^4He chronometers to Transboundary Guarani Aquifer System: Results of IAEA Coordinated Research Project : Roberto Kirchheim, Takuya Matsumoto, Hung K. Chang, Dider Gastmans, Roger D. Gonçalves, Márcia R. Stradioto, Luis J. Araguás-Araguás and Lucia Ortega.
- ✓ Transboundary or not transboundary: The case of the Guarani Aquifer System in the Cuareim River basin between Brazil and Uruguay: Vitor Malagutti, Roberto Kirchheim, Alexandra Suhogusoff, Alberto Malagutti.

- ✓ The Permo-Carboniferous Aquifer between Brazil and Uruguay: In search of the transboundary: Flora Cezimbra, Roberto Kirchheim, Alberto Manganelli, Gerardo Veroslavsky.
- ✓ The Amazon Transboundary Aquifer System: Convert Knowledge into Cooperation: Roberto Kirchheim, Isabelle Van der Beck, Diogo Riveira.

6. ASPECTOS DE INOVAÇÃO

Através do programa de isotopia, de suas atividades estratégicas e do alcance alcançado em termos de articulação nacional e internacional foi possível experimentar um cenário ímpar de inovação. Esta inovação materializa-se na geração de informação de dados primários de elevada demanda no meio científico nacional e internacional. É o caso dos dados isotópicos de chuva de caráter mensal em todo o território nacional, por exemplo. Para que a inovação se locuplete 04 elementos são considerados fundamentais:

- i. Capacitação técnica dos colaboradores e incorporação das técnicas isotópicas nos mais variados programas operativos hidrológicos da SGB-CPRM, complementando-os e agregando valor aos mesmos;
- ii. Organização e fortalecimento institucional analítico com equipamentos próprios, fato que coloca a SGB-CPRM em posição de destaque e liderança em projetos de cooperação;
- iii. Articulação Institucional com parceiros nacionais e internacionais, traduzido de forma concreta no número de projetos aprovados como líder científico e ou como partícipe científico;
- iv. Desenvolvimento de projetos específicos e pioneiros com aportes metodológicos inovadores e geração de resultados concretos.

De forma a ilustrar o recém-exposto, serão apresentados de forma sucinta e objetiva exemplos concretos de informação e produtos gerados em 2020.

CASO 1: Projeto de Doutorado do colaborador Roberto Kirchheim na área de hidrogeologia isotópica, devidamente aprovado pela CTC. Geração de dados isotópicos de Gases Nobres para o Sistema Aquífero Guarani no país todo. Dados inéditos e de alto pioneirismo no mundo todo, onde poucos sistemas

aquíferos possuem este tipo de dado. Dados sistematizados com base em modelagem e aplicação de técnica inédita de combinação de dados de ^{81}Kr com ^4He para obtenção de tempos de residência das águas subterrâneas. A modelagem com gases nobres fornece além do mais as paleotemperaturas de recarga, ou seja, as temperaturas do ar e do solo à época que estas águas (coletadas hoje em poços tubulares de SAG confinado) estavam envolvidas nos processos de recarga.

As Figuras 8 e 9 ilustram a técnica e os resultados obtidos.



Figura 8. Fluxograma dos procedimentos operacionais para a amostragem de água subterrânea para análise de GN.



Figura 9. Instalações analíticas do Laboratório IHL para GN na AIEA, Viena: A/B: dispensa de amostras com tubos de cobre; C/D- Linha de extração de gás; E- Espectrômetro de Massa.

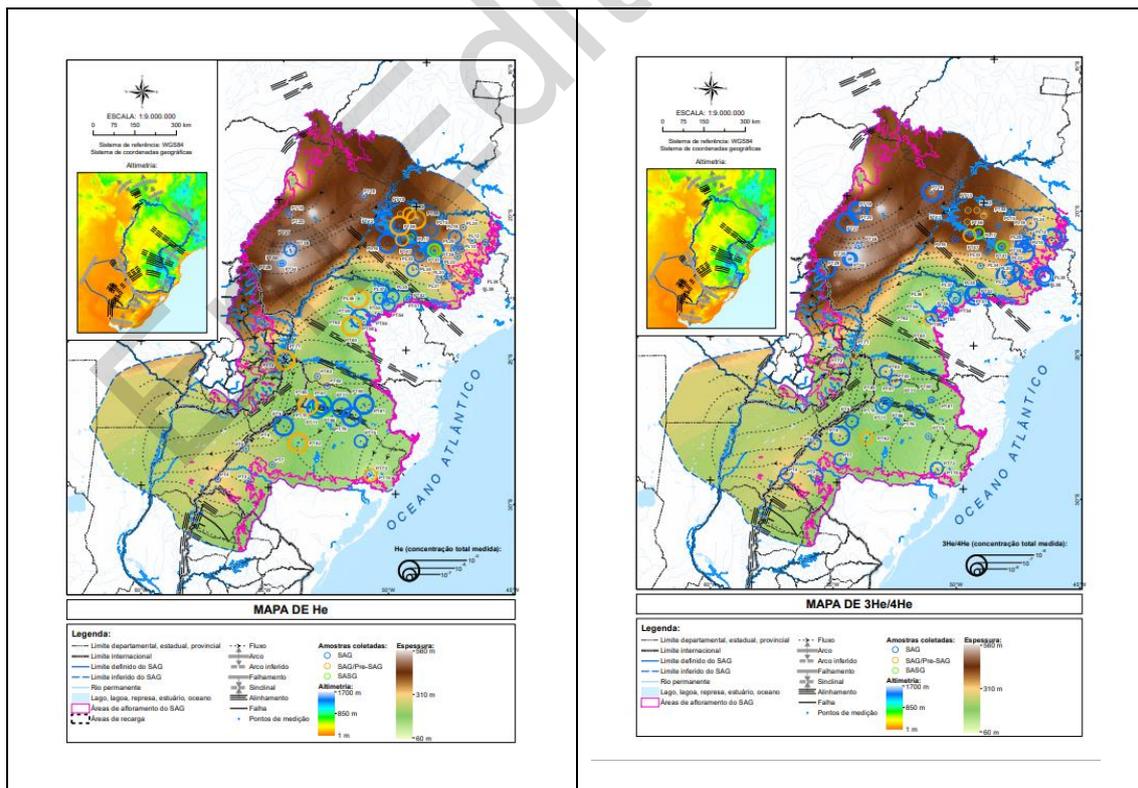


Figura 10. Distribuição de ⁴He e ³He/⁴He no SAG fornecendo informações sobre circulação regional das águas subterrâneas e tempos de residência.

Exemplo de Publicação Recente e submetida ao Congresso Mundial de Aquíferos Transfronteiriços UNESCO, Paris 2012.

Recent contributions of combined ^{81}Kr and ^4He chronometers to characterize groundwater flow patterns in the transboundary Guarani Aquifer System

Roberto Kirchheim, Takuya Matsumoto, Hung K. Chang, Didier Gastmans, Roger D. Gonçalves, Márcia R. Stradioto, Luis J. Araguás-Araguás, Takuya Matsumoto, and Lucia Ortega.

The Guarani Aquifer System (GAS) extends for 1,088,000 km² and covers considerable areas of Brazil (8%), Argentina (8%), Paraguay (21%), and Uruguay (21%). It is the most important aquifer within the South American continent and one of the largest transboundary aquifers in the world. The hydrogeology of the GAS has been studied since the 1970s, a time frame that coincides with the wider use of isotope hydrology tools in South America. Stable and radiogenic isotope applications in hydrology were consolidated during the 1980s, with the support of the IAEA, when new applications based on stable isotopes and dating approaches using with radiogenic isotopes were introduced. The conceptual model describing the hydrological functioning of the GAS has evolved from a large homogeneous aquifer to a segmented and heterogeneous groundwater system, where regional fluxes are controlled by its compartmentalization and geological structures. Recent analytical efforts coordinated by IAEA, focused on the use of dissolved noble gas led to new findings on the GAS regional groundwater flow patterns and hydrochemical evolution. Samples collected from deep confined areas allowed the application of combined ^{81}Kr and ^4He chronometers. Groundwater samples collected for ^4He analysis along different flow lines, depths and distances from recharge areas revealed heterogeneities and cross-formational groundwater mixing with overlying and underlying units. Groundwater age dating using ^4He and long-lived radionuclides offered additional constraints for the conceptual groundwater flow model. As a result, lower groundwater recharge rates for the GAS have been estimated to be at least one order of magnitude lower than previously considered. In 2010, the four countries signed the Guarani Aquifer Treaty, an essential move to foster international cooperation on groundwater. The new modeled age distribution, therefore, is a huge step towards the sound management of this common transboundary aquifer.

CASO 2: Geração de produto de caracterização isotópica do SAG. Desenvolvimento do *isoscape* de ^{18}O e ^2H para o SAG com dados obtidos do Programa de Isotopia da CPRM em parceria com a Rede RIMAS, complementado por dados da Tese supracitada e dados bibliográficos históricos. A Figura 11 ilustra o resultado alcançado a partir da interpolação de 511 amostragens de isótopos estáveis para o SAG, incluindo RIMAS.

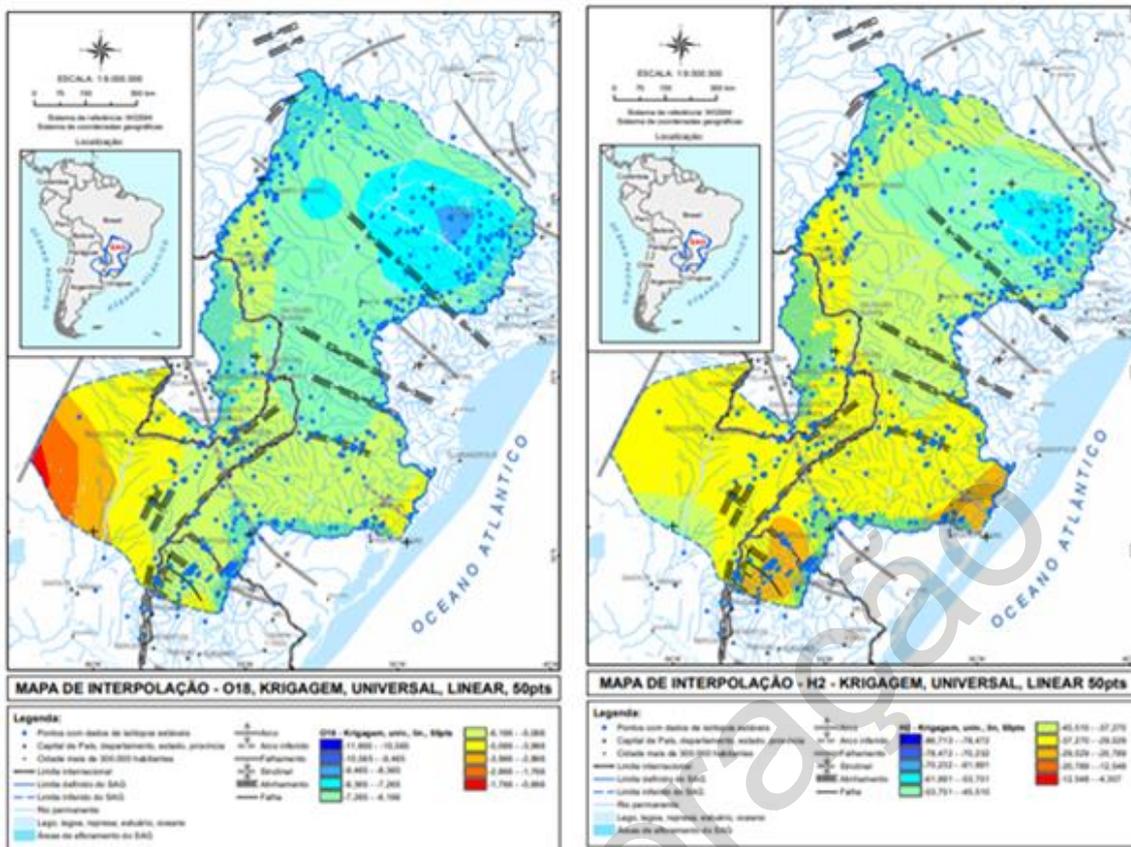


Figura 11. Distribuição espacial de ^{18}O e ^2H no SAG denotando a influência dos grandes agentes climáticos nas assinaturas isotópicas respectivas.

CASO 3: Determinação da Reta Meteórica Local de chuva para GNIP de Porto Alegre e correlação entre assinaturas isotópicas da chuva em dados isotópicos da Rede RIMAS do sul do Brasil. É um exemplo emblemático do que será realizado para cada uma das GNIP's operantes da rede do SGB-CPRM. A Figura 12 fornece a comparação dos dados históricos com os dados gerados recentemente pelo Programa de Isotopia.

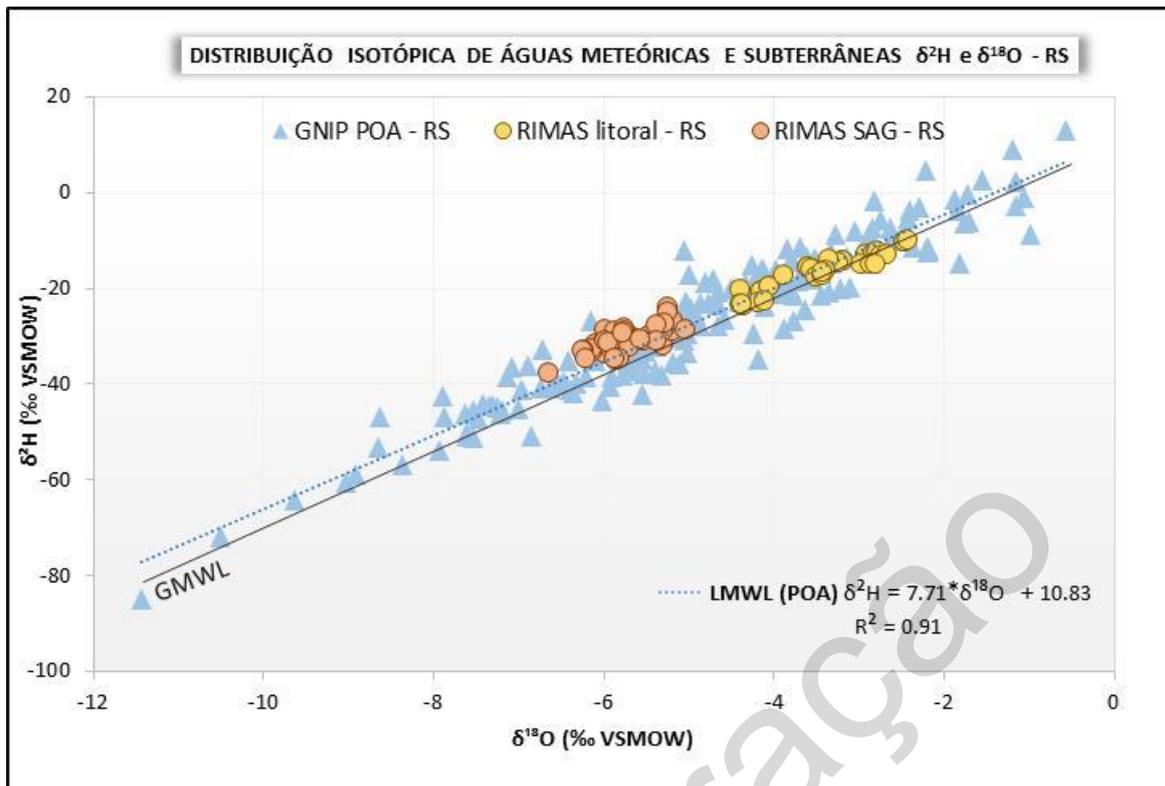


Figura 12. Gráfico de correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de águas meteóricas e subterrâneas do Rio Grande do Sul. Amostras meteóricas de Porto Alegre espacializadas pelos marcadores triangulares em azul; amostras do RIMAS da porção litoral do Rio Grande do Sul, indicadas por círculos em amarelo; amostras do RIMAS do Rio Grande do Sul (SAG) indicadas por círculos em vermelho. O gráfico de dispersão linear contém a Linha Meteórica Local de Porto Alegre (LMWL) ($\delta^2\text{H} = 7.7065 * \delta^{18}\text{O} + 10.834$), a Linha Meteórica Global (GMWL) ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) para a melhor compreensão do comportamento isotópico das amostras local.

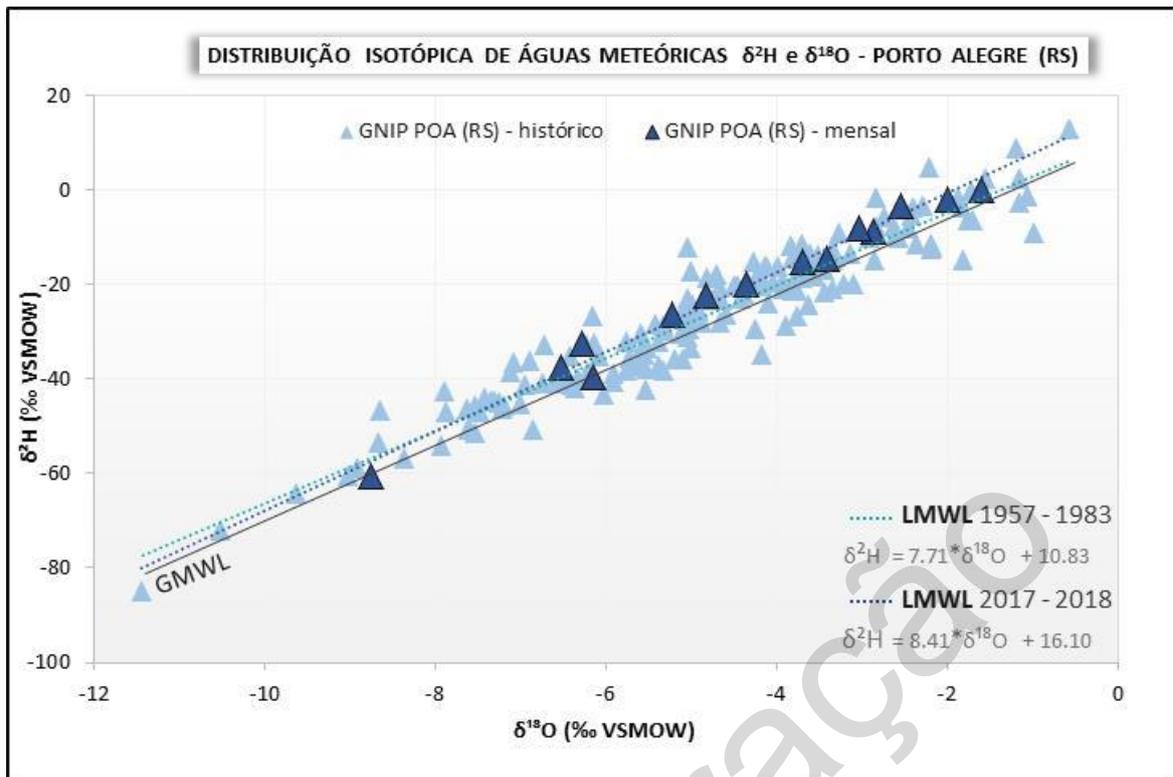


Figura 13. Gráfico de correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras meteóricas (chuva) de Porto Alegre (RS) representadas por dados históricos da *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP) de 1957 a 1983, indicadas pelos marcadores triangulares em azul claro, e dados mensais de 2018 a 2019, indicadas pelos marcadores em azul escuro. O gráfico de dispersão linear contém a Linha Meteórica Local de Porto Alegre, para os dados históricos (LMWL) ($\delta^2\text{H} = 7.71 * \delta^{18}\text{O} + 10.83$) e para os mensais ($\delta^2\text{H} = 8.41 * \delta^{18}\text{O} + 16.10$), a Linha Meteórica Global (GMWL) ($\delta^2\text{H} = 8.0 * \delta^{18}\text{O} + 10.0$)

CASO 4. Termo de referência para a aquisição do Primeiro Analisador Isotópico do SGB-CPRM. O equipamento a ser adquirido via Projeto Banco Mundial Meta 2 será o Espectrômetro de Massa marca Los Gatos.

Analisador Isotópico baseado em absorção a laser para fornecer medições simultâneas e contínuas de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{17}\text{excesso O}$ em água doce (chuva, rios, lagos, canais e água subterrânea). O equipamento precisa ter dimensões adequadas para ser instalado em bancadas em ambientes com temperaturas variando de 0°C a 45°C , não sendo necessário gás comprimido para obter desempenho.

O equipamento precisa ser robusto o suficiente para suportar a vibrações, pequenos choques físicos e variações de temperatura e pressão. Ao mesmo tempo, deve ter um design simples permitindo manutenção quando requerida.

Requer-se alta velocidade de análise (cerca de 100 segundos por injeção), de forma a que em procedimento padrão com 06 injeções por amostra, possa processar 80 amostras/dia. Requer-se robustez contra interferências e efeitos de matriz, graças à nossa abordagem de "varredura de comprimento de onda" (ajuste contínuo do laser para resolver bandas de absorção completas e, portanto, coleta de todas as informações de pico de superfície). Através desta estratégia, o equipamento deve prover: alta especificidade, acurácia e precisão superior, amplo espectro dinâmico linear, simplicidade e capacidade de calibração.

O equipamento tem que mostrar-se não dependente de alinhamento ótico hiper crítico e não ser afetado por "shifts" menores e pela presença de poeira, sendo todo o conjunto montado com componentes simples e de relativo baixo custo. Desta forma usuários com treinamento mínimo podem facilmente limpar e substituir componentes (incluindo bloco injetor e célula de medição) em pouco tempo e sem impactos no desempenho. O equipamento deve operar de forma a prover scannerização contínua em espectro estendido à baixa resolução de frequência MHz permitindo ao software identificar e corrigir presença de interferências e sombreamentos espectrais.

Incluído no equipamento deve estar um sistema de injeção manual (capazes de albergar 216 alíquotas composto de pacotes de software interno e hardware que permitam a total integração e automação da entrada de alíquotas de 2 ml com controle de temperatura no injetor), kit de iniciação com auto-injetor (incluindo secador de ar, seringas, 1 pacote de 50 alíquotas com caps e pacote de septas, 5 removedores de septa, padrões de água com 30ml de diferentes deltas, 1 monitor de 19", Teclado e mouse), bomba externa, software de pós-processamento para processamento rápido de dados e identificação / sinalização de contaminantes em água líquida, permitindo a detecção espectroscópica de contaminações e corrigi-las, sem precisar passar pelas etapas de pré-tratamento da amostra que alteram a amostra. Todo o conjunto dever ser acompanhado de instalação e treinamento técnico. Exige-se fornecimento e garantia.

O equipamento analisador isotópico fornecido pela Los Gatos possui características únicas que atendem a demanda para a qual foi designado. O Serviço Geológico do Brasil inaugura com esta aquisição uma nova frente de serviços analíticos. Trata-se de uma iniciativa pioneira que está vinculada ao Programa Nacional de Aplicações Isotópicas da Diretoria de Recursos Hídricos e Planejamento Territorial. Por ser uma facilidade analítica, obviamente, a relação com a rede de Laboratórios do SGB é igualmente direta. A aquisição de um analisador isotópico e a sua colocação em operação faz parte de uma estratégia de expansão do referido programa. Contar com a possibilidade de prestar serviços aos múltiplos projetos do próprio SGB e, ao mesmo tempo, apoiar a iniciativas de outras instituições públicas nacionais e ou estaduais é fundamental. Criam-se sinergias e articulam-se parcerias.

O equipamento Los Gatos é de fácil operação e fácil instalação, duas condições absolutamente indispensáveis e fundamentais no atual cenário do referido programa. Sua portabilidade em bancada e ocupando pouco volume satisfaz o espaço disponível a ele destinado no laboratório do CECOPOMIM da SUREG-SP (onde o mesmo será instalado). Trata-se de um equipamento robusto e resistente a pequenas vibrações (importante, pois o laboratório encontra-se próximo de via com intensa circulação de veículos e sujeito a pequenas trepidações). Sua manutenção é simples e compatível com o grau de instrução dos técnicos que dispomos no CECOPOMIM. Além do mais, a fabricante possui forte presença técnica no Estado de São Paulo com capacidade de suporte e manutenção que empresas concorrentes não detêm. Esta presença institucional de apoio nos primeiros passos de uma estratégia analítica como esta, acaba fazendo uma diferença enorme e precisa ser valorada. Outro argumento considerado decisivo é o fato de o equipamento pretendido não precisar usar gás comprimido para alcançar desempenho. Significa afirmar que sua operação é amplamente facilitada e que não requer alterações físicas no layout do local onde o mesmo será instalado. Toda e qualquer necessidade de obras neste sentido colocaria em risco o objetivo da aquisição. Requer-se um equipamento que se adeque ao espaço e condições atuais disponíveis. Significa afirmar que o referido equipamento deve possuir velocidade de injeção, calibragem e análise que permita aos operadores acompanhar o processo do início ao fim para um determinado conjunto de amostras. Diferentemente da iniciativa privada e por força do contrato de trabalho dos operadores não existe aqui a prerrogativa de avançar horas de trabalho, além do estabelecido recém. O equipamento Los Gatos possui 02 modos de velocidade e mantém a sensibilidade analítica desejada a um satisfatório número de injeções.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A compreensão de processos hidrológicos a partir de dados isotópicos, seja em superfície ou em subsuperfície, prescinde de informações a respeito da composição isotópica da precipitação, em diversas escalas espaço-temporal. Ainda que a rede GNIP tenha tido uma boa abrangência espacial em território nacional, sua interrupção nos anos 1980 dificultou o avanço nessa área.

A retomada recente da operação da rede de monitoramento da composição isotópica da precipitação por meio da instalação de 10 estações GNIP para coleta da precipitação isotópica mensal (^{18}O , ^2H e ^3H), em operação desde 2018 e com mais de 12 estações em plano de instalação através de uma parceria entre Serviço Geológico do Brasil-CPRM e a Agência Nacional de Águas (ANA) e com apoio da AIEA, é relevante e irá produzir informação capaz de suprir as necessidades de diversos estudos hidrogeológicos que venham a ser realizados.

A existência de uma rede é um passo importante sem dúvida, mas faz-se necessário evoluir em linhas de investigação consideradas essenciais: (i) na determinação dos tipos de chuva incluindo análise detalhada de eventos extremos e ciclones; (ii) Estudos sobre o tempo de residência do vapor amazônico na atmosfera e sua relação com o desmatamento e a composição isotópica de vapor e chuva; (iii) Estudos de precipitação sobre a região Nordeste (principalmente no semiárido) e sul do país, tendo em vista os limites da atuação da umidade amazônica. Ressalta-se aqui que a determinação das retas meteóricas locais para estas regiões pode contribuir de maneira mais efetiva na comparação com os demais reservatórios, melhorando o entendimento sobre os processos de recarga dos aquíferos.

A integração entre a composição isotópica da precipitação e a das águas subterrâneas, tanto em escala regional, quanto em escala local, ainda pouco explorada em estudos locais, pode acrescentar muito a compreensão de processos climáticos e suas relações com a recarga, presente e pretérita, das águas subterrâneas, devendo ser investigada e incorporada nos estudos futuros.

As relações entre as variações climáticas e eventos extremos e a recarga das águas subterrâneas no território nacional, devem ser abordadas em estudos hidrogeológicos de maneira a possibilitar a identificação de controles estacionais sobre a infiltração da água. Nesse sentido, dados de monitoramento de níveis d'água subterrânea, advindas das inúmeras redes existentes, como a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) da CPRM, poderão contribuir de maneira significativa na compreensão desses processos e fornecer subsídios, associados a monitoramento hidrológico, para a elaboração de balanços hídricos em diversas escalas, avaliar os processos de interação entre águas subterrâneas e superficiais, fornecendo importantes informações para a gestão integrada dos recursos e avaliação da resiliência hídrica de inúmeras bacias hidrográficas.

Mesmo com o grande aporte de conhecimento trazido pelos isótopos de H e O sobre as condições regionais de circulação das águas subterrâneas e suas relações, estimadas ainda que preliminarmente, com condições climáticas pretéritas e atuais da recarga, várias questões ainda permanecem em aberto no cenário nacional. Neste sentido, a utilização de isótopos estáveis de H e O, associada a outros traçadores, como gases nobres, por exemplo, irá aportar elementos adicionais na avaliação de misturas entre águas com tempos de residência distintos, assim como na reconstituição climática de paleorrecargas, especialmente entre os aquíferos das grandes bacias sedimentares (Amazonas, Paraná e Araripe, por exemplo). Além disso, menciona-se aqui o excesso de deutério como sendo uma variável isotópica de segunda ordem de relevante importância na interpretação de processos hidrológicos e que, até o presente momento, não vem sendo analisada de maneira consistente na maior parte dos estudos.

A sistematização de informações relativas a composição isotópica da precipitação e das águas subterrâneas, também abrem precedentes para ampliação de estudos relativos a composição isotópica de águas superficiais. Nesse sentido iniciativas como a GNIR (Global Network of Isotopes in Rivers), em implantação no Brasil, pode auxiliar no desenvolvimento de pesquisas que considerem a conexão entre águas subterrâneas e superficiais. Esses estudos ainda são muito incipientes no Brasil, e dependentes do conhecimento detalhado

do comportamento de cada uma dessas fontes para interpretações de processos hidrológicos. Estudos isotópicos em bacias hidrográficas visam compreender: a variabilidade espacial (distribuição dos sistemas aquíferos) e temporal (período de predominância das fontes) das águas subterrâneas (fluxo de base) e das precipitações (escoamento direto) na formação das vazões; tempo de residência; processos evaporativos; efeitos da antropização nas bacias, separação de hidrogramas, entre outros.

Cada uma das atividades constituintes do Programa Nacional de Isotopia possui produtos específicos, cuja concretização efetiva é fundamental e soma-se de forma complementar e convergente para o alcance dos benefícios institucionais. Trata-se de um programa de caráter transversal e integrador forçando que o ciclo hidrológico seja abordado de forma sistêmica e não fragmentada. O projeto de implantação do Centro Cooperativo da AIEA na América do Sul, condicionado pelo emprego das técnicas isotópicas, é um grande desafio assumido pela CPRM e representa um marco histórico para a empresa. Representa uma oportunidade ímpar para o desenvolvimento de pesquisas de vanguarda na área de recursos hídricos, além da consolidação de alianças com instituições nacionais e internacionais que atuam no mesmo propósito.

8. AGRADECIMENTOS

Um programa institucional não se desenvolve sem a perseverança, aporte e apoio de muitas pessoas. Os agradecimentos aqui expressos são inicialmente para os colegas técnicos que entenderam a importância do programa e se engajaram no mesmo com comprometimento. São vários nomes e esperamos que todos estejam contemplados na contracapa deste relatório. Obviamente todo este esforço foi orquestrado por toda uma Diretoria Executiva, em especial a DHT, incluindo a todos, uma vez que o referido programa tem caráter transversal. O agradecimento se estende à ASSUNI canal através do qual se realiza a possibilidade concreta e formal de envolvimento de parceiros internacionais. Entre os parceiros internacionais, ressalta-se o papel indutor e fomentador da AIEA como revestido de imenso valor e merecedor de toda a

distinção possível. Da mesma forma, em âmbito nacional reconhece-se aqui o apoio e a parceria indispensável da ANA, UNESP e USP.

9. BIBLIOGRAFIA

AIEA Work Plan signed March 30, 2015;

AIEA Invitation to participate – Collaborative Centers;

AIEA - Groundwater Sampling Procedures for Isotope Hydrology;

AIEA - Environmental isotopes in the hydrological cycle Principles and Applications, Water resources Programme, International Atomic Energy Agency and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Vol. 1 – 6;

Gat, J.R. et al., 1968. Aplicações potenciais de técnicas isotópicas e geoquímicas aos problemas hidrológicos do Nordeste brasileiro. Relatório à Comissão de Energia Atômica e à SUDENE. 28p.

Didier Gastmans, Lucas Vituri Santarosa, Roberto Eduardo Kirchheim e Rodrigo Lilla Manzione. Artigo aprovado Revista do Instituto Geológico. Contribuição dos Isótopos Estáveis da Água (H e O) no Conhecimento dos Aquíferos Brasileiros: Estado da Arte e Perspectivas Futuras.

Matsui, E. et al., 1976. Isotopic hydrology in the Amazonia: Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through ^{18}O concentrations. Water Resources 12(4), 781-785, 1976.

Matsui, E. et al., 1971. Medida da Variação Natural da Relação D/H em Amostras de Água. Boletim Científico-001, CENA.

Matsui, E. et al., 1980. Distribuição de deutério (^2H) nas águas superficiais e subterrâneas no Brasil. Energia Nuclear e Agricultura, 2: 149-165.

Memorando nº. 009/DHT/2015 de 07/04/2015: Centro Colaborativo do IAEA – Constituição de Grupo de Trabalho;

Memorando nº. 133/DEHIDE/2015 de 30/06/2015: Instalação de Estação de Monitoramento de Isótopos em Água de Chuva;

Natanael da Silva Barbosa¹; Natali da Silva Barbosa¹, Lucas de Queiroz Salles
1 Métodos de avaliação de isótopos estáveis ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) na Hidrologia: uma
revisão, TERRÆ DIDÁTICA 14-2, 2018.

Salati, E. et al., 1971. Estudo preliminar das Concentrações de ^{18}O e D em
Águas do Nordeste Brasileiro. Boletim Científico BC-002. CENA/USP/CNEN,
30p.

Salati, E. et al., 1979, Recycling in the Amazon Basin: an isotopic study. Water
Resources Research, Vol. 15, No5: 1250-1258.

Salati, E. et al. 1974. Environmental Isotopes Used in a Hydrogeological Study
of Northeastern Brazil, In Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, Vol. I,
IAEA - VIENNA, p 259-283.

Silveira, C. S. et al, 2002. O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos
Hidrogeológicos no Brasil: Uma Resenha Crítica. Anuário do Instituto de
Geociências - UFRJ Volume 25 / 2002.

Silva, R.B.G. 1983. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do
aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, USP-São
Paulo, 133p.