

XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O USO DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS NA PROVÍNCIA PETROLÍFERA DE URUCU, REGIÃO AMAZÔNICA, BRASIL

Paulo Galvão¹; Eliene Lopes de Souza²; Roseli de Almeida²; Cleane do Socorro Pinheiro³; Marcus Paulus Martins Baessa⁴; Marcio Roberto Santos Cabral¹

Resumo – A área de estudo é a Província Petrolífera de Urucu, município de Coari/AM. A pesquisa contribui para o conhecimento hidrogeológico da região norte do Brasil, onde pesquisas sobre isótopos ainda são incipientes. O objetivo foi determinar, via isótopos estáveis ¹⁸O e ²H, interrelações entre águas superficiais e subterrâneas para compreender a origem da recarga do lençol freático e descarga do aquífero. Amostras de água da chuva, água superficial e subterrânea foram coletadas entre junho de 2008 e maio de 2009 para as análises dos isótopos estáveis. Os resultados mostraram águas superficiais tipicamente leves e com origem meteórica. A recarga das águas subterrâneas é por infiltração de chuva direta, com a evaporação primária antes de atingir o lençol freático no Sistema Aquífero Içá-Solimões.

Palavras-Chave – Isótopos estáveis; hidrogeologia; região amazônica.

Abstract – The study area is the Urucu Oil Province, municipality of Coari/AM. The research contributes to the hydrogeological knowledge in the northern region of Brazil, where researches on isotopic are still incipient. The goal was to determine, via ¹⁸O and ²H stable isotopes, interrelationships between surface water and groundwater in order to understand the origin of groundwater recharge and aquifer discharge. Samples of rainwater, superficial water and groundwater were collected between June 2008 and May 2009 for stable isotopic analyzes. The results showed superficial waters typically light and with meteoric origin. The groundwater recharge is by direct rainfall infiltration with primary evaporation before reaching the water table in the Içá-Solimões Aquifer System.

Keywords – Stable isotopes; hydrogeology; Amazon region.

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Morro do Cruzeiro Campus, Ouro Preto/MG, BR, 35400-000 (hidropaulo@gmail.com)

² Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Rua Augusto Corrêa 1, Guamá, CEP 66075-110, Belém, PA, BR (eliene@ufpa.br)

³ Instituto de Meio Ambiente e Ordenamento Territorial do Estado do Amapá, Macapá/AP, BR (cleanessp@gmail.com)

⁴ Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, Rio de Janeiro/RJ, BR (marcus.baessa@petrobras.com.br)

1 – INTRODUÇÃO

O uso de isótopos estáveis na hidrogeologia começou na década de 50, com os trabalhos pioneiros de Urey et al. e Epstein e Mayeda (Clark e Fritz, 1997). Com o tempo, esses estudos mostraram eficácia para investigar sistemas hidrológicos complexos em uma gama de escalas espaciais e temporais, fornecendo informações quantitativas sobre interações entre águas subterrânea e de superfície.

No Brasil, os primeiros estudos hidrogeológicos usando isótopos estáveis começaram no fim dos anos 60 e início dos anos 70 nas regiões nordeste, sudeste e amazônica (Silveira e Silva Junior, 2002). Na região Nordeste, foram desenvolvidos estudos para saber a origem e os mecanismos de recarga de aquíferos, salinização, tempo de trânsito e idade das águas (Gat et al., 1968; Ferreira de Melo et al., 1969; Campos, 1971; Prado e Bedmar, 1976; Salati et al., 1979a; Santiago et al., 1990; Silva et al., 1996; Batista et al., 1998; Costa Filho et al., 1998). Na região Sudeste, especialmente no estado de São Paulo, o consumo de água subterrânea estimulou a caracterização isotópica em grandes aquíferos, como o Aquífero Guarani (Silva et al., 1985; Kimmelman et al., 1988; 1989; Martins, 2010).

Estudos na região amazônica tiveram como objetivos calcular a vazão dos rios Negro e Solimões e estimar contribuições no rio Amazonas (Matsui et al., 1972). Em paralelo, foi analisada a composição isotópica de precipitações para confecção da reta meteórica local. A conclusão foi que a chuva na região está condicionada, em parte, por processos de evapotranspiração (Dall'Olio et al., 1979; Salati et al., 1979b; Matsui et al., 1983; Leopoldo et al., 1982; 1984; Gonfiantini, 1985). Outros estudos sobre o ciclo hidrológico e interações água subterrânea-superficial foram realizadas (Reis et al., 1977; Matsui et al., 1980; Mortatti et al., 1987; Lopes, 2005).

O principal objetivo da pesquisa foi determinar, via análises de isótopos estáveis ^{18}O e ^2H , as interrelações entre águas superficial e subterrânea na Província Petrolífera de Urucu, município de Coari/AM, a fim de compreender a origem da recarga do lençol freático e descarga do aquífero. Esse entendimento é importante em eventuais contaminações, o que pode degradar os recursos hídricos. Amostras de águas da chuva, superficial e subterrânea foram coletadas entre junho de 2008 e maio de 2009 para as análises dos isótopos estáveis ^{18}O e ^2H .

2 – ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Base Operacional Geólogo Pedro Leopoldo de Moura (BOGPM), na Província Petrolífera de Urucu, Coari/AM. A área está a 650 km a sudoeste de

Manaus, capital do estado (Figura 1). Esta província é conhecida pela grandeza do empreendimento, tornando-se um verdadeiro enclave no meio da floresta amazônica.

Esta região tropical é caracterizada pela alta precipitação (entre 2.250 e 2.750 mm/ano), onde o inverno geralmente começa em outubro, com os maiores índices de precipitação em janeiro, fevereiro e março. A temperatura média anual é de 25°C, com flutuação sazonal média de cerca de 1°C. A umidade relativa do ar é bastante elevada, entre 85 e 90% (Galvão, 2011).

A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Urucu, tendo como drenagem principal o rio Urucu, afluente do rio Solimões, que desemboca no Lago Coari. Na BOGPM, há dois córregos (Tartaruga e Onça), que desaguam suas águas no rio Urucu (Galvão, 2011).

Geologicamente, a BOGPM situa-se na Bacia Sedimentar Solimões, de idade paleozoica, caracterizada por cinco sequências deposicionais sedimentares: Ordoviciano, Siluriano-Devoniano, Devoniano-Carbonífero, Carbonífero-Permiano, Cretáceo e Terciário-Quaternário (Caputo, 1984; Caputo e Silva, 1991; Eiras et al., 1994). A área localiza-se nos sedimentos das sequências Cretáceo e Terciário-Quaternário, representados pelas seguintes formações, da base para o topo: 1) Formação Alter do Chão: arenitos friáveis de granulação grossa e de ambiente deposicional continental, de fácies de planícies e leques aluviais (Caputo et al., 1971; 1972; Caputo, 1984); 2) Formação Solimões: sucessão de pelitos cinza claros e cinza esverdeados, maciços e laminados, com linhitos intercalados em camadas de 2 a 10 m de espessura, e arenitos finos a grossos, sub-angulares a sub-arredondados, sugerindo ambiente deposicional fluvial meandrante e lagos formados por canais abandonados (Caputo, 1984; Cruz, 1987); e 3) Formação Içá: arenitos finos a médios e siltitos, com ocorrências ocasionais de conglomerados (Nogueira, 2003).

Hidrogeologicamente, as formações Solimões e Içá, que podem alcançar 100-120 m de espessura, constituem um bom reservatório de água na região. As intercalações entre esses arenitos com lentes de argilas permitem que, em certas áreas, haja uma individualização entre dois aquíferos que são hidraulicamente ligados e de tipo semi-confinado. Trata-se do Sistema Aquífero Içá-Solimões (SAIS) (Galvão, 2011). Logo abaixo, o Aquicludo Solimões é constituído por argilitos de 150-180 m de espessura, tendo o contato inferior com o Aquífero Alter do Chão, este caracterizado por arenitos grossos, de boa porosidade efetiva e permeabilidade (Galvão et al., 2012). A geometria do SAIS tem forma convexa na parte superior e espessura entre 50 e 100 m. Os parâmetros hidráulicos estimados são: transmissividade: 3×10^{-3} m²/s; coeficiente de armazenamento: 5×10^{-4} ; e condutividade hidráulica: 1×10^{-4} m/s. A superfície potenciométrica apresenta direção de fluxo geral das águas subterrâneas NNW-SSE, convergindo para o Rio Urucu. Um cone de depressão no centro da BOGPM é comum, devido às alterações do fluxo natural das águas subterrâneas induzidas por poços com altas taxas de bombeamentos (Galvão et al., 2012).

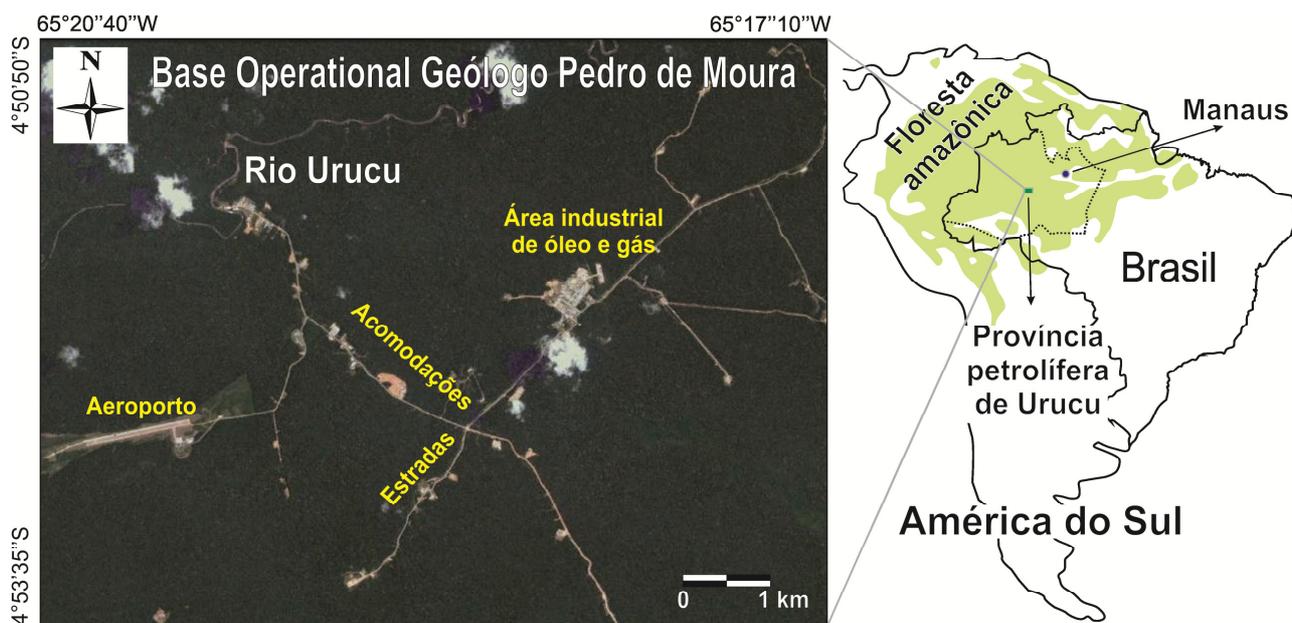


Figura1 – Localização, em coordenadas geográficas, da Província Petrolífera de Urucu, apresentando as características da área de estudo (modificado do Google Earth).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de isótopos de águas de chuva, superficiais e subterrâneas foram coletadas entre os meses de junho de 2008 e maio de 2009. As amostras de chuva representam acumulados mensais para confeccionar a Reta Meteórica Local de Urucu (RMLU) de um ano hidrológico (Figura 2). Dois garrafões de polipropileno (5 L) interligados um ao outro foram usados. Para manter a temperatura e evitar a penetração de luz solar, esses garrafões foram colocados dentro de caixas térmicas. O primeiro garrafão possuía um funil para recolher a água da chuva. Quando esse primeiro garrafão ficava completamente cheio, a água da chuva começava a fluir para o segundo garrafão. Uma mangueira de silicone também foi ligada aos garrafões para equilibrar a pressão e impedir a troca com o ar atmosférico. Este método seguiu as instruções da Rede Global de Isótopos em Precipitação (*Global Network of Isotopes in Precipitation - GNIP*), onde a evaporação e perda de isótopos mais leves são negligenciáveis (IAEA/WMO, 2004).

As amostras de águas superficiais foram coletadas em dois córregos: Onça e Tartaruga (Figura 2). As amostras foram coletadas a partir de uma ponte, coletando águas do centro desses córregos.

As amostras de água subterrânea foram feitas em 5 poços (PT-01, 11, 15, 17 e 22) utilizados para suprir a Província Petrolífera de Urucu (Figura 2). Não houve amostragem nos meses em que esses poços estavam em manutenção (outubro de 2008 e janeiro de 2009). Com o objetivo de

analisar águas do aquífero e evitar a coleta de água estagnada, as amostragens foram feitas após a remoção de vários volumes de água via bombas instaladas nos poços.

A principal preocupação com as amostras foi evitar o fracionamento pós amostragem. Foram utilizados frascos de polipropileno (30 mL), sendo esses completamente preenchidos com amostras, evitando bolhas de ar no interior, seguindo os procedimentos de Martins et al. (2010). Todas as amostras foram analisadas para ^{18}O e ^2H no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA-USP), Piracicaba/SP. As amostras foram analisadas no Picarro L2130i e normalizadas de acordo com as normas internas de água para laboratório previamente calibrados em relação ao Padrão Médio da Água de Oceano de Viena (*Vienna Standard Mean Ocean Water – VSMOW*).

Os resultados foram expressos em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, onde $\delta_{\text{amostra}} (\text{‰}) = ((R_{\text{amostra}} / R_{\text{padrão}}) - 1) \times 1000$, onde R é D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. As precisões analíticas foram $\pm 0,09 \text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $\pm 0,9 \text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$. Todos os resultados foram comparados com a Reta Meteórica Global (RMG), linearmente relacionada pela equação proposta por Craig (1961): $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$.

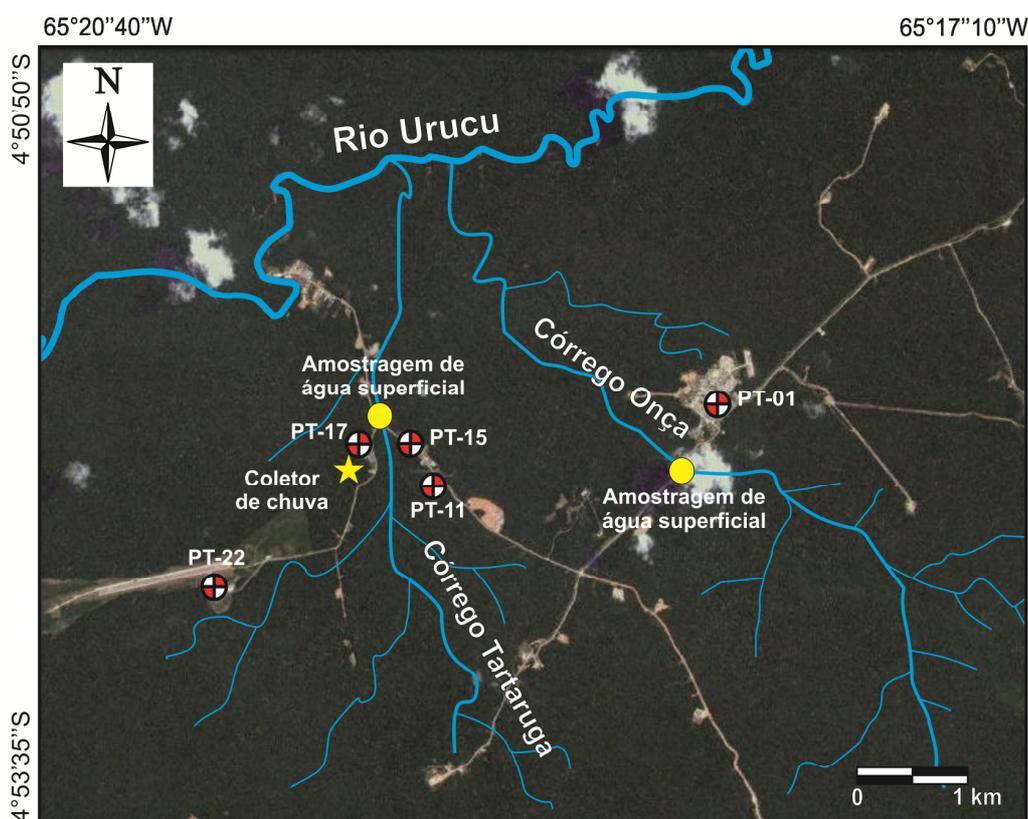


Figura 2 – Localização dos pontos de amostragens de água de chuva (coletor de chuva), águas subterrâneas (poços de abastecimentos) e de águas superficiais (córregos Onça e Tartaruga).
(modificado do Google Earth).

4 – RESULTADOS

4.1 – Águas de chuva

A estação chuvosa ocorre de dezembro a maio, com precipitação média de 1.521 mm, correspondendo a 65,3% da precipitação anual. As menores precipitações ocorrem de junho a setembro, com 806 mm, 34,7% do total anual. A temperatura média anual é de 25,8°C, tendo o mês junho o menor valor (25,3°C) e setembro o maior (26,3°C) (Galvão, 2011) (Figura 4). A partir da comparação entre precipitações e desvios relativos mensais de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, observou-se que em março de 2009 ($\delta^2\text{H} = -80,2\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = -11,9\text{‰}$) e abril de 2009 ($\delta^2\text{H} = -94,2\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = -13,8\text{‰}$) houve desvios menores tanto para ^2H quanto para ^{18}O (Figura 4 e Tabela 1). Estes valores, indicativos de água com baixas concentrações de isótopos pesados (água leve), coincidem com os meses com maiores quantidades de chuva. Por outro lado, maiores desvios, que indicam águas mais pesadas, foram registrados em setembro de 2008 ($\delta^2\text{H} = 19,8\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = 1,7\text{‰}$) e novembro de 2008 ($\delta^2\text{H} = 13,4\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = 0,3\text{‰}$) (Figura 4 e Tabela 1). Essa relação entre composições isotópicas de água de chuva e precipitações da região já era esperado, pois há um esgotamento dos isótopos pesados quando a precipitação aumenta (água tornando-se mais leve).

4.2 – Águas superficiais

A variação isotópica anual de água superficial no córrego Onça variou entre $\delta^2\text{H} = -20,90$ para $-64,30\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -4,38$ para $-9,90\text{‰}$. No córrego Tartaruga, a variação isotópica ficou entre $\delta^2\text{H} = -15,00$ para $-59,20\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -3,21$ a $-8,97\text{‰}$ (Figura 5 e Tabela 1). As águas superficiais apresentaram a mesma relação inversa entre taxas de precipitação e concentrações isotópicas visto na Figura 4 (Figura 5). No inverno, houve depleção na concentração de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, enquanto que no verão, houve enriquecimento isotópico. Isto pode ser interpretado como evaporação da água na superfície, perdendo isótopos mais leves, ou o tipo de chuva que contribui nesses córregos.

4.3 – Águas subterrâneas

A variação isotópica anual das águas subterrâneas foram: PT-01 ($\delta^2\text{H} = -31,10$ a $-34,80\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -5,49$ a $-5,93\text{‰}$); PT-11 ($\delta^2\text{H} = -24,10$ a $-32,50\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -4,15$ a $-5,93\text{‰}$); PT-15 ($\delta^2\text{H} = -27,30$ a $-32,90\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -4,76$ a $-5,79\text{‰}$); PT-17 ($\delta^2\text{H} = -28,20$ a $-32,60\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -4,33$ a $-6,16\text{‰}$); e PT-22 ($\delta^2\text{H} = -25,10$ a $-27,40\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O} = -4,55$ a $-5,26\text{‰}$) (Figura 6 e Tabela 1). Em geral, essas águas coletadas tanto nas zonas profundas e rasas do Sistema Aquífero Içá-Solimões não mostraram um padrão significativo relativo aos períodos de alta ou baixa precipitação, como foram observados nas águas da chuva e superficiais. No entanto, ambas as águas provenientes das

zonas mais rasas (PT-17: 40 m; PT-22: 40 m) e das zonas mais profundas do aquífero (PT-01: 91m; PT-15: 120 m) mostraram um pequeno enriquecimento isotópico no verão, reduzindo as concentrações de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ durante o inverno (água tornando-se mais leve). Esse comportamento segue a mesma tendência observada nas águas de chuva e superficiais, entretanto com uma variação menos acentuada. A exceção foi o PT-11, da zona mais profunda (110 m), onde foi visto um empobrecimento isotópico no verão e um enriquecimento significativo no inverno.

Tabela 1. Concentrações mensais isotópicas de águas pluviais, águas superficiais (córregos Onça e Tartaruga) e águas subterrâneas (PT-01, 11, 15, 17 e 22), de junho de 2008 a maio de 2009.

Tipos de amostras	Local	Isótopos estáveis (‰)	2008							2009				
			Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
Chuva	BOGPM	$\delta^{18}\text{O}$	-6.7	-3.5	-2.2	1.7	-	0.3	-8.5	-	-9.4	-11.9	-13.8	-9.6
		$\delta^2\text{H}$	-33.8	-12.6	0.1	19.8	-	13.4	-52.8	-	-57.4	-80.2	-94.2	-63.4
Águas superficiais	Tartaruga	$\delta^{18}\text{O}$	-7	-4.9	-3.2	-4.2	-	-3.9	-5.6	-	-6.4	-7.8	-8.9	-6.9
		$\delta^2\text{H}$	-32	-28.1	-15	-22.8	-	-18.7	-28.9	-	-37.1	-50.8	-59.2	-43.4
	Onça	$\delta^{18}\text{O}$	-6.4	-5.5	-4.6	-4.4	-	-4.4	-5.3	-	-6.1	-8.6	-9.9	-6.9
		$\delta^2\text{H}$	-31.9	-28.9	-20.9	-22.2	-	-21.1	-28.6	-	-36.7	-56.5	-64.3	-40.8
Águas subterrâneas	PT-01 (91m*)	$\delta^{18}\text{O}$	-	-5.8	-5.5	-5.5	-	-	-5.5	-	-5.7	-5.6	-5.9	-5.9
		$\delta^2\text{H}$	-	-32.9	-31.7	-31.5	-	-	-31.1	-	-31.1	-31.4	-33.3	-34.8
	PT-11 (110m*)	$\delta^{18}\text{O}$	-5.9	-5.6	-5.5	-5.5	-	-5.9	-5.8	-	-4.1	-4.1	-4.9	-4.9
		$\delta^2\text{H}$	-28.8	-30.6	-30.5	-30.1	-	-32	-32.5	-	-24.1	-24.1	-27.6	-27.3
	PT-15 (120m*)	$\delta^{18}\text{O}$	-5.6	-4.9	-5.1	-4.7	-	-5.1	-4.7	-	-5.1	-4.8	-5.5	-5.8
		$\delta^2\text{H}$	-32.3	-28.7	-30.9	-27.3	-	-28	-28.1	-	-31.5	-30	-29.4	-32.9
	PT-17 (40m*)	$\delta^{18}\text{O}$	-5.5	-5.2	-5.1	-4.5	-	-4.3	-5.7	-	-5.8	-5.8	-6.1	-6.1
		$\delta^2\text{H}$	-32	-30.4	-29.4	-28	-	-28.5	-32.2	-	-31.4	-32.6	-32.6	-32.6
PT-22 (40m*)	$\delta^{18}\text{O}$	-4.8	-4.5	-5.1	-4.9	-	-5.2	-5.3	-	-	-4.9	-	-4.6	
	$\delta^2\text{H}$	-26.2	-25.1	-26.6	-26	-	-27.3	-27.3	-	-	-27.4	-	-26.2	

* = profundidade da zona filtrante;

- = sem amostragem, devido a problemas técnicos do poço, ou por estar em manutenção.

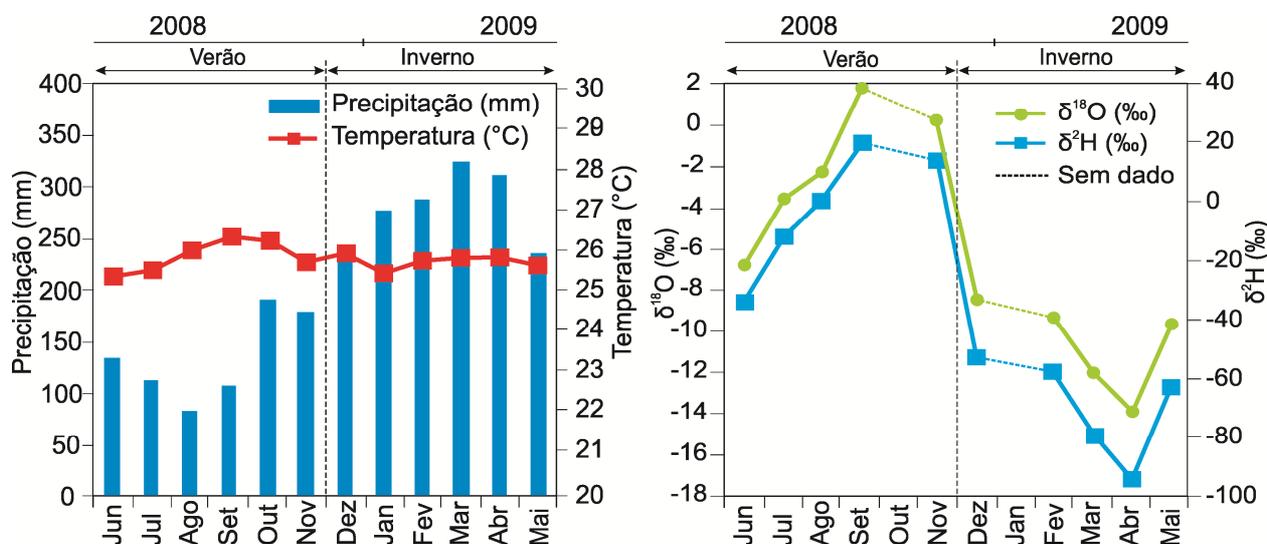


Figura 4. Comparação entre dados climáticos e concentrações isotópicas de chuva, mostrando uma relação inversa entre precipitação e concentrações isotópicas.

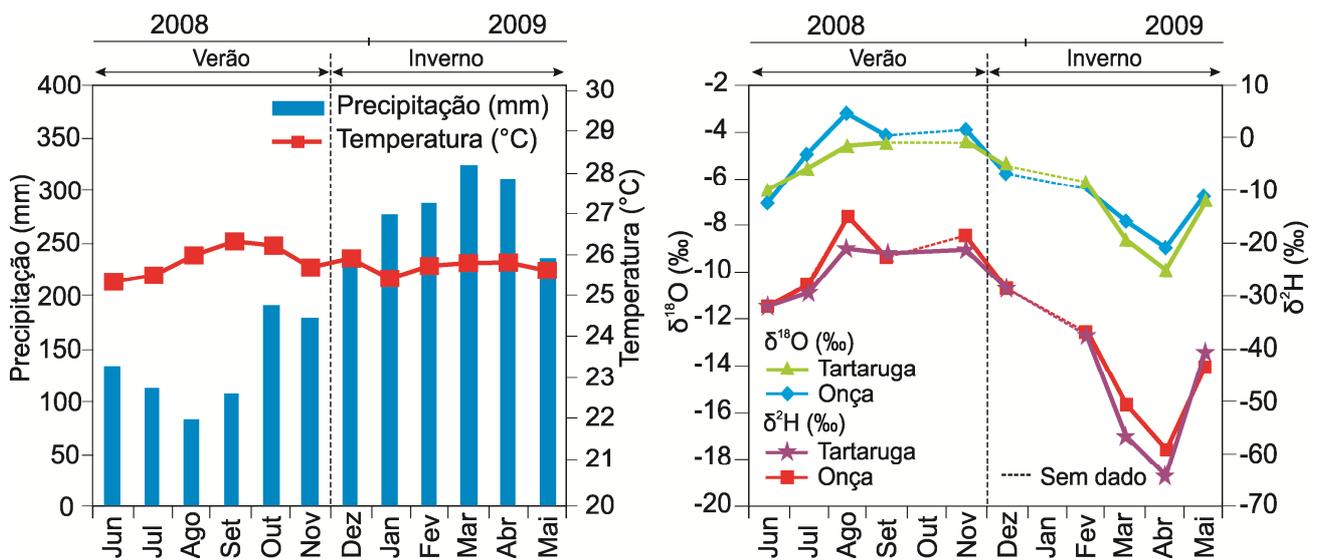


Figura 5. Variação anual de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para águas superficiais nos córregos Onça e Tartaruga, mostrando uma relação inversa entre precipitação e concentrações isotópicas.

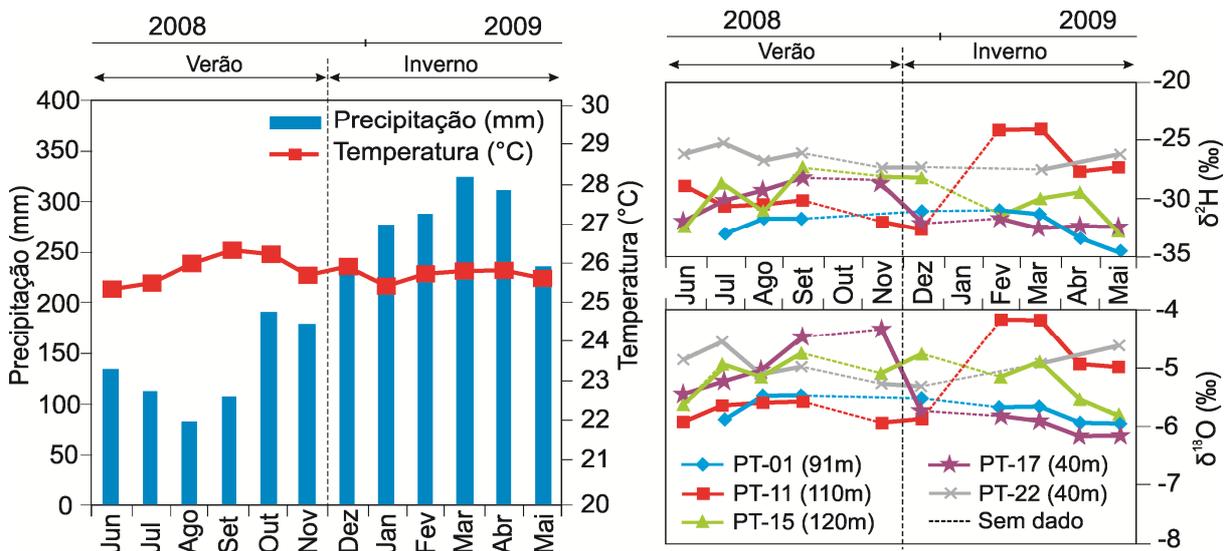


Figura 6. Precipitação anual e variação isotópica de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para amostras de água subterrânea para zonas profundas (PT-01, 11, 15) e rasas (PT-17 e 22).

5 – DISCUSSÕES

5.1 – Relações entre águas de chuva, superficiais e subterrâneas

Os valores isotópicos para a água da chuva, que representam a Reta Meteorica Local de Urucu (RMLU), foram comparados com a Reta Meteorica Global (RMG), bem como com a Reta Meteorica da Ilha do Marajó (RMIM) (Reis et al., 1977), esta última localizada no estado do Pará, cerca de 1800 km a noroeste de Urucu, de clima semelhante (Figura 7). Os resultados mostraram semelhanças entre essas retas, onde a inclinação da RMLU indicou proximidade com a RMG e

RMIM. No entanto, a RMLU possui valores um pouco mais negativos, indicando águas ligeiramente mais leves, devido Urucu estar mais longe do oceano, causando maior fracionamento isotópico.

As concentrações isotópicas para a água superficial em Urucu mostraram que a maioria das amostras está plotada entre a RMLU e RMG, sugerindo águas tipicamente leves e de origem meteórica (Figura 8), confirmando contribuições de águas pluviais nos córregos.

Outra comparação foi feita com as águas do rio Amazonas, coletadas na Ilha do Marajó (Reis et al. 1977). Foram vistas semelhanças entre as águas do rio Amazonas e as de Urucu, com as últimas ligeiramente mais leves. É possível deduzir que as águas superficiais em Urucu são também de origem meteórica, provenientes de regiões distantes do oceano. O fato de Urucu ter precipitação mais leve em comparação com a Ilha do Marajó (Figura 7) também explica águas superficiais mais leves, em comparação com águas do rio Amazonas.

A água subterrânea em Urucu tem um padrão diferente em relação a RMLU e RMG. A maioria das amostras está plotada entre essas retas, com alguns pontos nas retas ou perto delas (Figura 9). Esta situação mostra a possibilidade de processos de fracionamento secundário, como evaporação antes da infiltração ou troca isotópica dentro do aquífero. O fato de todas as amostras apresentarem esse comportamento indicam recargas de precipitação local.

Uma comparação foi feita com as águas subterrâneas coletadas na Ilha do Marajó e na cidade de Monte Alegre (Lopes, 2005), localizado na mesma região (Figura 9). Em Monte Alegre, as amostras apresentaram semelhanças com a RMG, sugerindo origem meteórica atual. Na Ilha do Marajó, amostras colhidas a uma profundidade de 80 m mostraram composições isotópicas mais pesadas, refletindo diferentes fontes de água do aquífero. Amostras coletadas a 5,5 m mostraram composições isotópicas mais leves, semelhantes às águas meteóricas. Em Urucu, não foi observada variação isotópica significativa entre águas de diferentes zonas do aquífero, sugerindo que as águas subterrâneas em Urucu provavelmente se originam da mesma fonte de água.

Comparando as águas de chuva, superficial e subterrâneas no mesmo gráfico (Figura 10), a recarga do lençol freático em Urucu é originado a partir de precipitação local, explicado pela proximidade das amostras na RMLU. As amostras estão plotadas logo abaixo da reta local, sugerindo evaporações prévias destas águas meteóricas, esgotando-as isotopicamente, até atingir o lençol freático do Sistema Aquífero Içá-Solimões.

Não foram observadas diferenças de assinaturas isotópicas entre as zonas rasa e profunda do aquífero, indicando apenas uma fonte de água de recarga na área de estudo. A assinatura isotópica das águas subterrâneas também coincide com as amostras coletadas nos córregos Tartaruga e Onça, indicando contribuições subterrâneas nas descargas nesses córregos e, portanto, no rio Urucu.

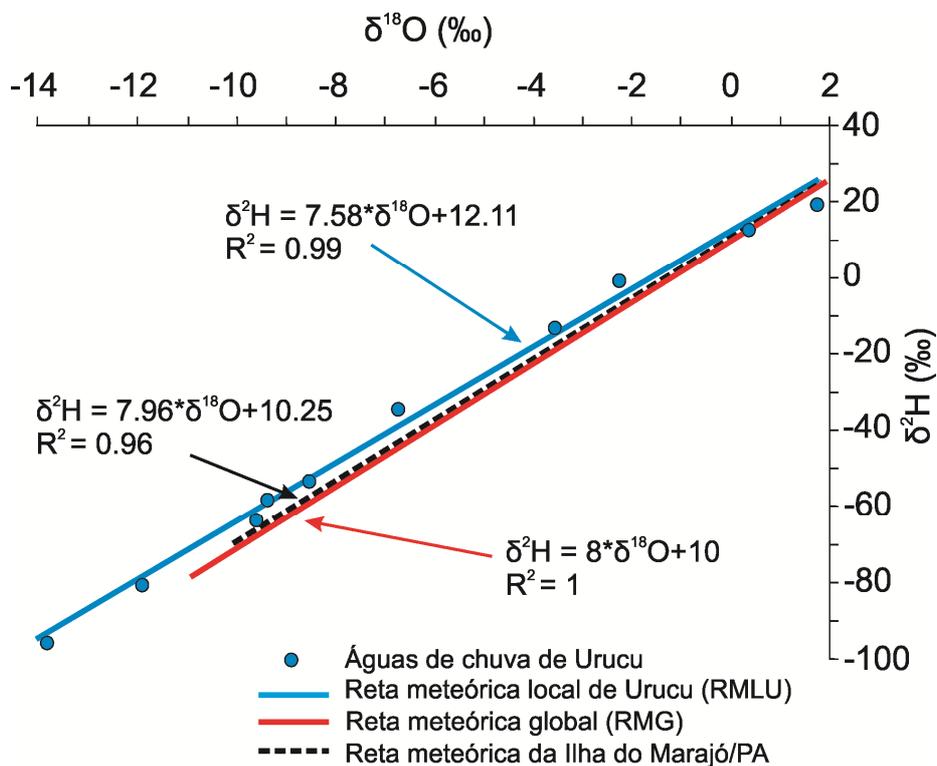


Figura 7. Reta meteórica Local de Urucu (RMLU) em comparação com a Reta Meteórica Global (RMG) e Reta Meteórica da Ilha do Marajó (RMIM). Os resultados mostraram semelhanças entre essas retas, onde a RMLU é pouco mais negativa, indicando águas ligeiramente mais leves.

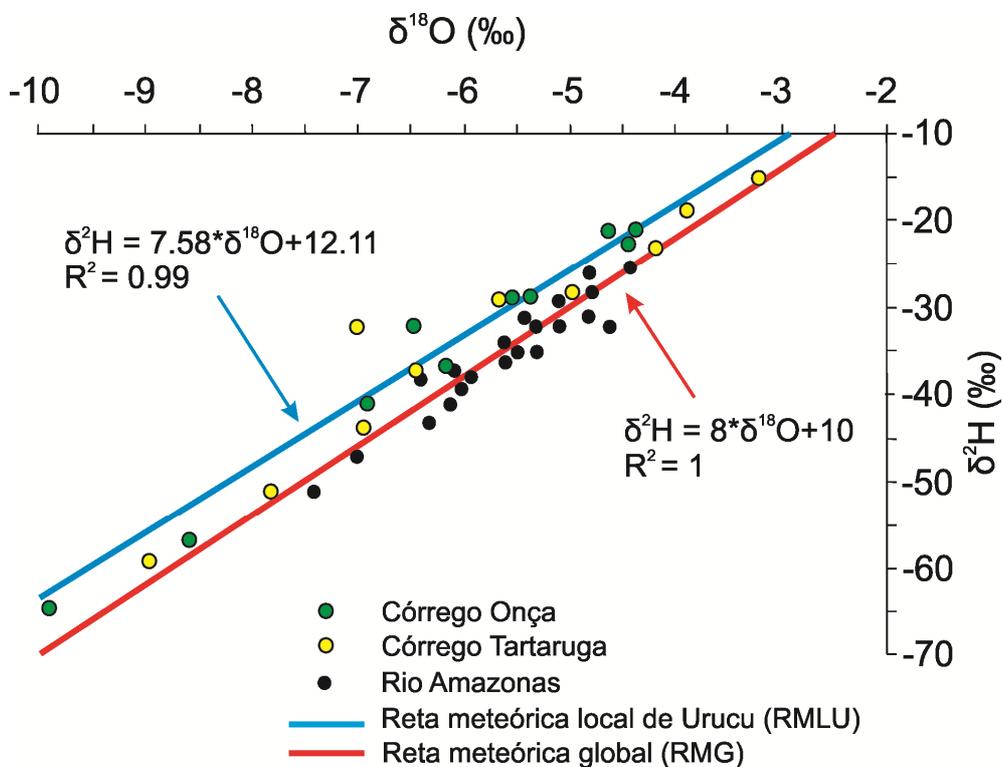


Figura 8. Concentrações isotópicas das águas dos córregos Onça e Tartaruga em comparação com a RMLU, a RMG e as águas do rio Amazonas, coletados na Ilha de Marajó. As águas dos córregos são tipicamente leves, mostrando uma origem meteórica.

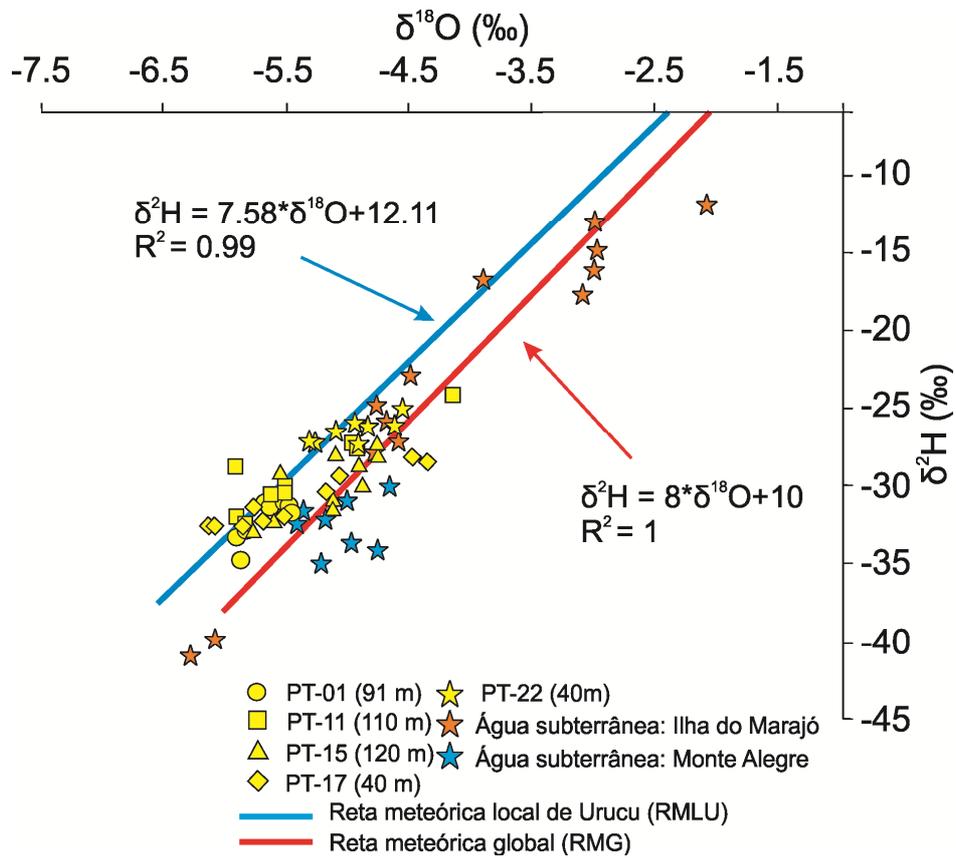


Figura 9. Comparação entre amostras de águas subterrâneas coletadas na Ilha de Marajó, na cidade de Monte Alegre e em Urucu.

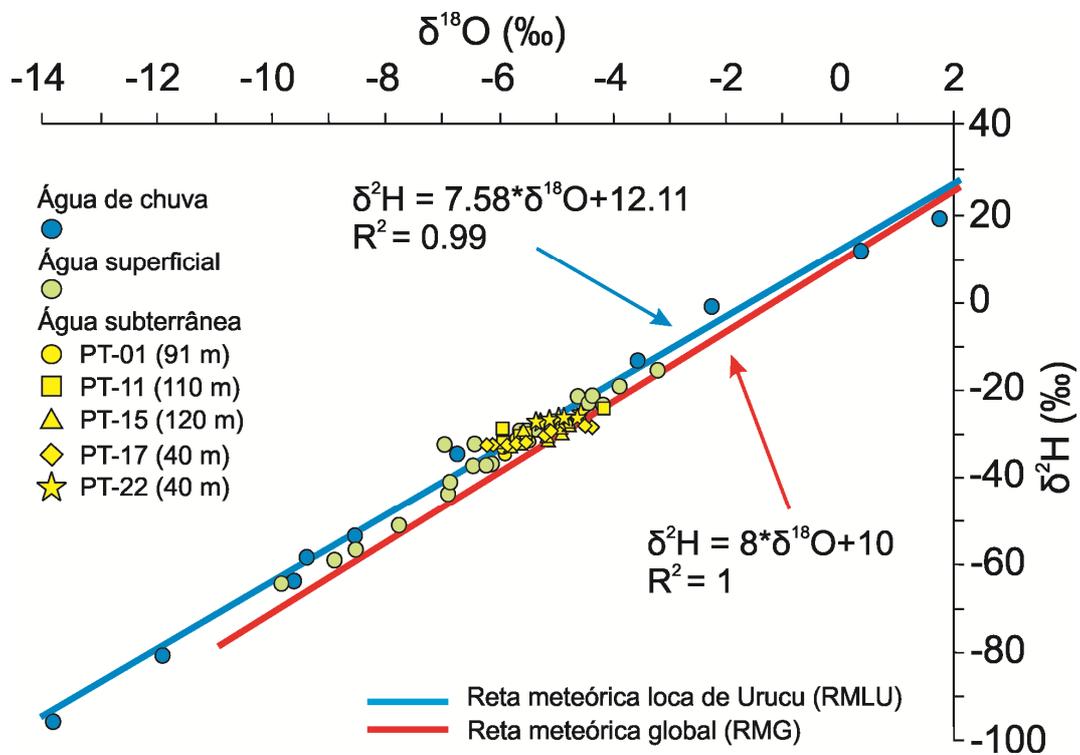


Figura 10. Comparação entre as amostras de águas de chuva, superficiais e subterrâneas coletadas em Urucu.

6 – CONCLUSÕES

Os valores isotópicos para água de chuva indicaram uma proximidade entre as retas meteóricas global e da Ilha do Marajó. Entretanto, a reta meteórica local de Urucu é mais negativa, sugerindo águas ligeiramente mais leves devido à localização da área de estudo estar mais longe do oceano, causando maior fracionamento isotópico.

As águas superficiais em Urucu são tipicamente águas leves e de origem meteórica, o que confirmam as contribuições de águas pluviais nos córregos Onça e Tartaruga.

A recarga do lençol freático é via infiltração direta de chuva. No entanto, a água de recarga pode ter sofrido alguma evaporação primária na zona não saturada antes de atingir o lençol freático do Sistema Aquífero Içá-Solimões.

Não foram observadas diferenças de assinaturas isotópicas entre as zonas rasa e profunda do Sistema Aquífero Içá-Solimões, sugerindo apenas uma fonte de recarga neste sistema, via precipitação. As semelhanças de assinaturas isotópicas entre as águas subterrânea e superficial indicaram contribuições também subterrâneas nos córregos Tartaruga e Onça e, portanto, também no rio Urucu, à jusante.

Agradecimentos – Petrobras S.A. e as Universidades Federais do Pará e de Pernambuco.

7 – REFERÊNCIAS

- BATISTA, J. R. X., Santiago, M. M. F., Frischkorn, H., Mendes Filho, J., e Foster, M., 1998. Isótopos ambientais na água subterrânea de Picos - PI. In: Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 10, São Paulo. CD-ROM. São Paulo, ABAS.
- CAMPOS, M. M., 1971. Levantamento preliminar de teores de trítio em águas do Nordeste brasileiro. Relatório do IPR, Belo Horizonte. 10p.
- CAPUTO, M. V., Rodrigues, R., e Vasconcelos, D. N. N., 1971. Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas. Belém, Petrobras. Relatório Interno.
- CAPUTO, M. V., Rodrigues, R., e Vasconcelos, D. N. N., 1972. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: Histórico e Atualização. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26. Belém, SBG. Anais, v.3, p.35-46.
- CAPUTO, M. V., 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brasil. Santa Barbara, University of California . 586p. (PhD Thesis).*

- CAPUTO, M. V., e Silva, O. B., 1991. Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. In: G.P. Raja Gabaglia, E.J. Milani. *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p. 169-193.
- CLARK, I., e Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York, CRC Press. 328p.
- COSTA FILHO, W. D., Santiago, M. M. F., Costa, W. D., e Mendes Filho, J., 1998. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife. In: Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 10, São Paulo. CD-ROM. São Paulo, ABAS.
- CRAIG, H., 1961. *Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters*. *Science* 133, 1702–1703.
- CRUZ, N. M. C., 1987. Quitinozoários da Bacia do Solimões, Brasil. Belém, Convênio CPRM/Petrobras. Relatório Interno.
- DALL'OLIO, A., Salati, E., Azevedo, C. T., e Matsui, E., 1979. Modelo de fracionamento isotópico da água na bacia Amazônica (Primeira aproximação) *Acta Amazonica*, 9: 675-687.
- EIRAS, J. F., Becker, C. R., Souza, E. M., Gonzaga, F. G., Silva, J. G. F, e Daniel, L. M. F., 1994. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, p.17-45.
- FERREIRA DE MELO, F. A., Rebouças, A. C., Gat, J. R., Mazor, E., 1969. *Preliminary Isotope survey of water sources in Northeastern Brazil*. SUDENE, Spec. Report 18.
- GALVÃO, P. H. F., 2011. Caracterização hidrogeológica dos aquíferos da formação Solimões na base operacional geólogo Pedro de Moura, província petrolífera de Urucu (AM). Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 148p.
- GALVÃO, P. H. F., Demétrio, J. G. A., Souza, E. L., Pinheiro, C. S. S., e Baessa, M. P. M., 2012. Hidrogeologia e geometria dos aquíferos das formações cretáceas Içá e Solimões, Bacia Paleozoica do Solimões, na região de Urucu, Amazonas. *Brazilian Journal of Geology*.
- GAT, J. R., Mazor, E., e Mercado, A., 1968. Aplicações potenciais de técnicas isotópicas e geoquímicas aos problemas hidrológicos do Nordeste brasileiro. Relatório à Comissão de Energia Atômica e à SUDENE. 28p.
- GONFIANTINI, R., 1985. *On the isotopic composition of precipitation in tropical stations*, *Acta Amazonica*, 15: 121-139.
- IAEA/WHO., 2004. *Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database*. Disponível em: <http://isohis.iaea.org>.
- KIMMELMANN, A. A., Rebouças, A. C., e Santiago, M. M. F., 1988. ^{14}C dating of the Botucatu aquifer system in Brazil. In: *Inst. Radiocarbon Conf., 13 Dubrovnik, Iugoslávia. Abstracts. Dubrovnik*, p. 110.

- KIMMELMANN, A. A., Silva, E., Rebouças, A. C., Santiago, M. M. F., e Silva, R. B. G., 1989. *Isotopic study of the Botucatu aquifer system in the brazilian portion of theParaná basin. In: Regional Seminar for Latin America on the Use of Isotope Techniques in Hydrology, Ciudad de México. Abstracts. Ciudad de México, OIEA, p. 51-71.*
- LEOPOLDO, P. R., Matsui, E., Salati, E., Franken, W., e Ribeiro, M. N. G., 1982. Composição isotópica da água de chuva e da água do solo em floresta amazônica do tipo terra firme, região de Manaus. *Acta Amazonica*, 12: 7-13.
- LOPES, E. C. S., 2005. Estudos hidrogeoquímicos e geofísicos da região da braquidobra de Monte Alegre/PA. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Belém. 75p.
- MARTINS, V. T. S., Babinski, M., Hirata, R. C. A., Cruz, F. W., e Karmann, I., 2010. *Stable isotopes (^{18}O and ^2H) of precipitation in an urban area of São Paulo, southeast Brazil. In: VII South American Symposium on Isotope Geology, Brasília. Anais VII South American Symposium on Isotope Geology.*
- MATSUI, E., Salati, E., Brinkmann, W. L. F., e Friedman, J., 1972. Vazões relativas dos rios Negro e Solimões através das concentrações de ^{18}O . *Acta Amazonica*, 2: 31-46.
- MATSUI, E., Azevedo, C. T., e Salati, E., 1980. Distribuição de deutério (^2H) nas águas superficiais e subterrâneas no Brasil. *Energia Nuclear e Agricultura*, 2: 149-165.
- MATSUI, E., Salati, E., Ribeiro, M. N. G., Reis, C. M., Tancredi, A. C. S. N. F, e Gat, J. R., 1983. *Precipitation in the Central Amazon basin: - The isotopic composition of rain and atmospheric moisture at Belém and Manaus. Acta Amazonica*, 13: 307-369.
- MORTATTI, J., Martinelli, L. A., Matsui, E., Victoria, R. L., e Richey, J. E., 1987. *Isotopic variation of oxygen in the water of river Solimões/Amazon and its main tributaries. Energia Nuclear e Agricultura*, 8: 14-23.
- NOGUEIRA, A. C. R., Arai, M., Horbe, A. M., Silveira, R. R., e Silva, J. S., 2003. A Influência marinha nos depósitos da Formação Solimões na região de Coari (AM): Registro da transgressão miocênica na Amazônia ocidental. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 8, Manaus, SBG, Resumos Expandidos.
- PRADO, E. B., e Bedmar, A. P., 1976. *Aportación de diversas técnicas isotópicas al estudio hidrogeológico de la cuenca de Maranhão (Brasil). Hidrologia, abril-julio: 65-79.*
- REIS, C. M., Tancredi, A. C. F. N. S., Matsui, E., e Salati E., 1977. Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de O-18 e D. *Acta Amazonica*, 7: 209-222.
- SALATI, E., Leal, J. M., e Campos, M. M., 1979a. Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrogeológico do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE. Série Hidrogeologia, nº 58. 55p.

- SALATI, E., Dall'Olio, A., Matsui, E., e Gat, J. R., 1979b. *Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study*. *Water Resources Research*, 15: 1250-1258.
- SANTIAGO, M. F., Frischkorn, H., e Serejo, A. N., 1990. Estudo isotópico das águas do Cariri. In: Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 4, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre, ABAS, p.338-342.
- SILVA, C. M. S. V., Santiago, M. F., Frischkorn, H., e Mendes Filho, J., 1996. Distinção entre águas das aluviões e águas profundas nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte - CE. CD-ROM. In: Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 9, 1996, Salvador. CD-ROM São Paulo, ABAS.
- SILVA, R. B. G., Kimmelman, A. A., e Rebouças A. C., 1985. Estudo hidrogeoquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu - resultados parciais para a região norte da bacia do Paraná. In: Simp. Reg. De Geologia, 5, 1985, São Paulo. Atas São Paulo. v.2, p.489-502.
- SILVEIRA, C. S., e Silva Junior, G. C., 2002. O uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos no Brasil: uma resenha crítica. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. Vol. 25.