

Caracterização Isotópica e Estimativa da Evaporação Usando Isótopos Estáveis nos Reservatórios de França e São José do Jacuípe, Região do Semi-árido Baiano

Alexandre Barreto Costa, Maria do Rosário Zucchi; Antonio Expedito Gomes de Azevedo;
Aderval Barros da Silva;
Universidade Federal da Bahia
abc@ufba.br; maria.zucchi@gmail.com; expedito@ufba.br; aderval.barros@gmail.com

Andrea Sousa Fontes
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
asfontes@gmail.com

Christian Pereira Lopes dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Catu – BA
cplsgs@gmail.com

Recebido: 18/09/08 - revisado: 09/02/09 – aceito: 10/05/10

RESUMO

Neste trabalho foram medidas as razões isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H e a condutividade elétrica, em amostras de água dos reservatórios de França e de São José do Jacuípe, localizados na sub-bacia do Rio Jacuípe, amostradas em outubro (2003), junho (2004), setembro (2004) e março (2005) em vários pontos do lago das barragens. Os resultados mostraram que o reservatório de França apresenta uma composição isotópica espacialmente homogênea, variando ao longo do tempo, exceto por um ponto onde a variação é de pequena amplitude, tendo como possível causa a surgência de água subterrânea. Os resultados do reservatório de São José mostraram uma grande variação espacial, indicando uma maior heterogeneidade na composição isotópica dessa barragem em cada amostragem. Os valores isotópicos locados no diagrama $\delta\text{D} \times \delta^{18}\text{O}$ se distribuem em torno de retas com coeficientes angulares menores que o da linha meteórica global. Os coeficientes angulares dessas retas são muito próximos, indicando semelhanças nos processos de evaporação e do efeito do fracionamento cinético no enriquecimento isotópico da água dos reservatórios, correspondente a uma temperatura média de 25 °C e de 75 % de umidade relativa do ar. Baseado na variação isotópica observada no reservatório de França entre as amostragens de junho e setembro de 2004, período em que a precipitação foi desprezível, foi calculado uma taxa de evaporação de $3,7 \pm 0,7$ mm/dia. As boas correlações entre os valores de condutividade e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ mostraram que o processo de evaporação tem uma contribuição importante na salinização do reservatório de França. Para o reservatório de São José não existe boa correlação entre estes parâmetros, indicando que além do processo de evaporação o afluxo de água salina tem uma contribuição na salinização desse reservatório.

Palavras-Chave: Evaporação; condutividade; reservatório.

INTRODUÇÃO

A região semi-árida configura o cenário mais crítico no que se refere à escassez hídrica, necessitando de dados e informações para implantação de uma gestão que vise a racionalização do uso de suas águas com base na sua realidade hidroclimática. O clima da região é caracterizado pela insuficiência de precipitações (500 a 700 mm/ano) e pelas altas

taxas de evaporação (2.000 mm/ano). Além de escassas, as chuvas apresentam-se extremamente irregulares quanto à sua distribuição temporal e espacial. Essa combinação gera rios intermitentes com estações sem escoamento que podem levar de seis a nove meses ou até todo o ano quando ocorrem secas severas. O resultado é a baixa disponibilidade de água para o ecossistema e fragilidade dos sistemas econômicos que dependem destas precipitações.

Para garantir o atendimento das demandas de água nos períodos de seca, aproveitando-se a água excedente dos meses úmidos, tem-se como prática a construção de reservatórios. No semi-árido, mais de 70 mil açudes foram construídos para atender as demandas, apresentando significativas perdas de água por evaporação e elevada concentração de sais. Dessa forma, o conhecimento das perdas por evaporação de maneira criteriosa tem grande influência na determinação do volume disponível para os diversos usos e garantia de atendimento das demandas de água. A redução desses efeitos da evaporação na quantidade e qualidade da água disponível em reservatórios é importante aliada para a garantia da preservação das fontes de abastecimento no semi-árido.

Entretanto, a evaporação é um fenômeno complexo que depende das condições atmosféricas, da disponibilidade hídrica local e das características da superfície do corpo d'água. A evaporação em reservatórios ainda sofre influência da geometria destes, profundidade e área inundada, e da composição da água armazenada. A carência de dados para estudos dessa natureza dificulta esse processo.

Numa abordagem isotópica, a evaporação de um corpo d'água produz um enriquecimento dos isótopos mais pesados na sua fração residual. Esse enriquecimento depende das condições em que ocorre a evaporação sendo importante a participação de efeitos cinéticos que ocorrem nas situações de não-equilíbrio. Para fazer uma estimativa da evaporação do corpo, é utilizada a equação de Rayleigh que é descrita por $R=R_0 f^{(\alpha-1)}$, onde R_0 é a razão isotópica inicial, R é a razão isotópica final, f é a fração residual e α é o fator de fracionamento, composto pelo fator de fracionamento de equilíbrio que é inversamente proporcional à temperatura média local acrescida do fator de fracionamento cinético, que depende da umidade relativa do ar no local (Gonfiantini, 1986).

Uma das aplicações desse conceito é no balanço hídrico, através da modelagem da dinâmica de um reservatório e do tempo de residência da água, realizando comparações quantitativas das composições isotópicas. Nessa modelagem levam-se em conta, principalmente, parâmetros como: precipitação, escoamento superficial, fluxo da água subterrânea e a água perdida devido ao processo de evaporação (Marfia et. al. 2004). A maior dificuldade do balanço hídrico está na determinação destas grandezas de forma precisa. Em geral é feita uma estimativa da água evaporada, usando os isótopos estáveis da água (Gibson, 2002).

O balanço de massa e o balanço isotópico para um lago bem misturado, assumindo uma densidade da água como constante, pode ser escrita por:

$$dV/dt = I - Q - E \quad (1)$$

$$d(V\delta_L)/dt = I\delta_I - Q\delta_Q - E\delta_E \quad (2)$$

Onde V é o volume do reservatório, t é o tempo, dV é a variação de volume no tempo dt , I é a combinação do escoamento superficial e subterrâneo de entrada, Q é a combinação do escoamento superficial e subterrâneo de saída, E é a evaporação, e δ_L , δ_I , δ_Q e δ_E são as composições isotópicas de cada termo do balanço.

Com relação à origem dos sais nos solos de regiões semi-áridas existem interpretações de que, entre outros, os fatores climáticos agem no transporte e deposição dos aerossóis marinhos no solo, posteriormente lixiviam e transportam os sais e, por fim, concentram estes nos corpos d'água superficiais e subterrâneos (Santiago, 1984).

Características da área estudada:

A região de estudo está situada na bacia do rio Jacuípe, englobando os reservatórios de França e São José do Jacuípe, localizados na zona semi-árida do Estado da Bahia conforme ilustrado na figura 1. Tal área está inserida na bacia do rio Paraguaçu que é, dentre os rios que desembocam na Baía de Todos os Santos, aquele que possui a maior bacia de drenagem, sendo assim o maior contribuinte nas descargas de água doce.

A bacia rio Jacuípe está localizada em uma região de clima semi-árido, sujeita à escassez e irregularidade das precipitações pluviométricas. Esta bacia é caracterizada pela insuficiência das suas disponibilidades hídricas para satisfação das demandas humanas e atendimento às atividades econômicas vinculadas à água. O sistema hidrográfico regional é caracterizado pela predominância de cursos d'água intermitentes, com vazões condicionadas à ocorrência de chuvas, sendo que muitos deles apresentam águas salobras, impróprias para consumo humano (SRH, 2002).

A barragem de França está localizada entre os municípios de Miguel Calmon e Piritiba, em terras do município de Piritiba, a cerca de 500 m a montante da localidade de França. O reservatório tem capacidade de $24,0 \times 10^6$ m³ e ocupa uma área de espelho d'água de 4,97 km², dados estes referidos ao nível normal na cota 512 m, que corresponde à cota

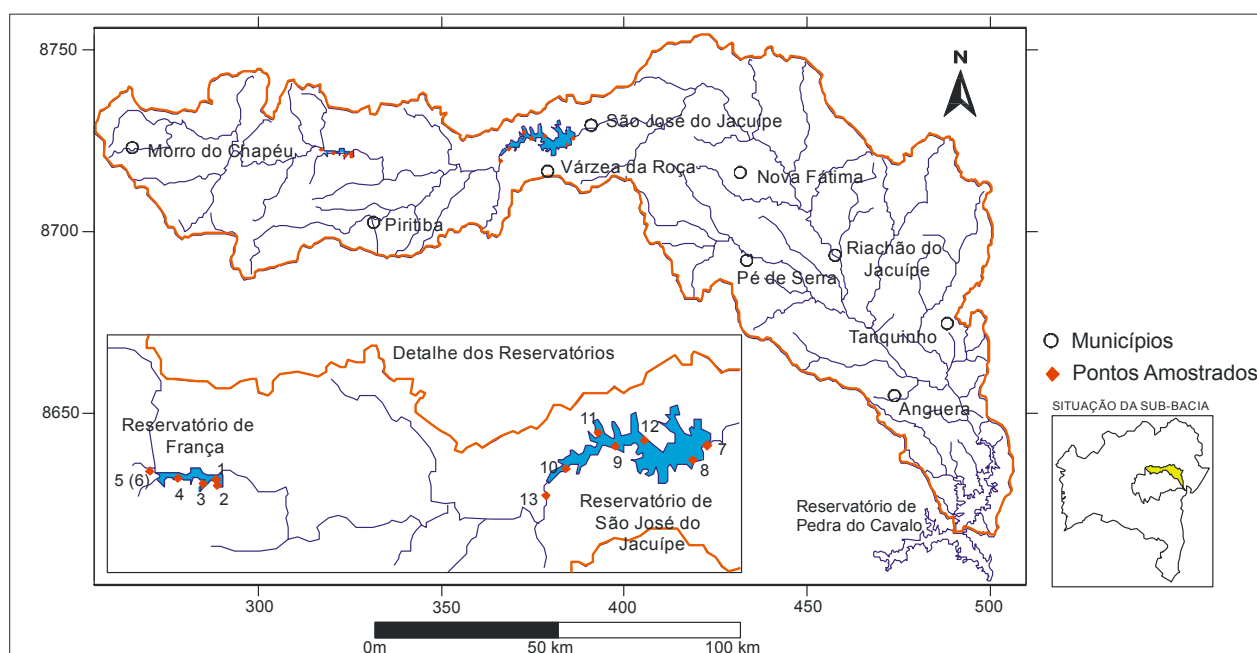


Figura 1-Localização da área de estudo e dos pontos amostrados.

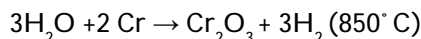
da crista do vertedouro da barragem. Quanto ao clima, o São José apresenta um clima pouco mais quente e seco (cota de 391 m) em relação ao França. O volume médio de operação da barragem é de $148,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ com um espelho d'água correspondente de $20,45 \text{ km}^2$. Conseqüentemente, a barragem do São José apresenta um espelho d'água relevantemente superior ao do França. No contexto dos estudos das barragens de França e São José do Jacuípe, destaca-se a grande interferência existente entre esses dois barramentos. Antes da implantação da barragem de França, a área total da bacia hidrográfica contribuinte para a Barragem de São José do Jacuípe era da ordem de 4.330 km^2 . Com a implantação da barragem de França, em 1995, cuja área da bacia hidrográfica é de 2.030 km^2 , cerca de 53% da área da bacia hidrográfica contribuinte para a Barragem de São José do Jacuípe passou a ter influência da operação da barragem de França. Por outro lado, as águas da bacia hidrográfica que alimentam o reservatório de França são doces, enquanto as águas que continuaram a alimentar o reservatório de São José do Jacuípe são salinas, necessitando, este açude, de receber grande volume das águas de França para compensar os excessos salinos. No entanto, a barragem de França vem apresentando crescentes demandas de água, comprometendo grande parte da descarga efluente para o rio Jacuípe, o que tende a

inviabilizar a reversão do grau de salinidade da água no açude de São José do Jacuípe. Esta constatação justifica todos os esforços para aumentar as disponibilidades das águas – em volume e qualidade - no açude de França (SRH, 2002).

Metodologia de Análise:

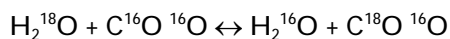
As amostragens de água nos reservatórios foram realizadas, levando em consideração a sazonalidade, nos meses de outubro (2003), junho (2004), setembro (2004) e março (2005) em vários pontos das barragens. A primeira campanha ocorreu logo depois de um período longo de estiagem, enquanto a segunda campanha ocorreu cinco meses após grandes precipitações em janeiro de 2004 (início do período seco). A terceira coleta se deu no período seco e a quarta coleta, no final do período chuvoso. A coleta e armazenamento das amostras foram realizados de acordo com as metodologias da IAEA (U-NECSO/IAEA, 2002). As determinações geográficas das coordenadas foram realizadas utilizando-se GPS. As informações físico-químicas das amostras foram obtidas *in situ*, com instrumentos previamente calibrados.

Para determinar a razão deutério-hidrogênio (D/H), foi utilizado o método apresentado por Brand et al. (2000), que propôs a transformação da água em hidrogênio através da redução da água a centenas de graus Celsius com Cromo metálico. Alíquotas de $\approx 1,0 \mu\text{l}$ de cada amostra de água são injetadas em um reator (HDevice da Thermofinnigan), onde ocorre a reação de oxidação do cromo a 850°C , com conseqüente liberação do H_2 , como pode ser visto abaixo:



O H_2 liberado entra no espectrômetro de massas onde é analisado com respeito a um gás referência de H_2 .

A técnica utilizada para determinar os valores de $\delta^{18}\text{O}$ na água é a proposta por Epstein e Mayeda (1953), que consiste no equilíbrio isotópico entre o gás carbônico e a água ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$). A reação de equilíbrio isotópico ocorre da seguinte maneira:



Na metodologia utilizada, são colocados 3 ml de água e 5 ml de CO_2 , com pressão um pouco acima de 1 atm, em uma seringa de vidro com uma gota de ácido sulfúrico para ajudar na reação. Essas seringas são acondicionadas em um banho ultratermostático numa temperatura de $25,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ por pelo menos 8 h. O CO_2 resultante desse equilíbrio é extraído para uma linha de purificação de CO_2 de alto vácuo, sendo posteriormente levado para o espectrômetro de massas onde é feita a leitura.

Os valores de δD e $\delta^{18}\text{O}$ são obtidos com respeito a um padrão de referência internacional e expressos em partes por mil (‰) de acordo com a seguinte relação:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (3)$$

Onde R é a razão isotópica, entre os isótopos pesados e os mais leves (mais abundantes), como por exemplo: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H.

Como referencial e para controle da qualidade das medidas, foram utilizados padrões secundários acompanhando cada lote, que é composto de amostras com composição isotópica conhecida e referenciada em relação ao VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

Resultados e Discussão:

A tabela 1, mostra os dados de temperatura, condutividade elétrica, deutério, oxigênio e excesso de deutério dos pontos amostrados em cada campanha.

A figura 2 mostra a evolução dos valores de δD e $\delta^{18}\text{O}$ dos pontos amostrados nas 4 campanhas nos reservatórios de França (Fr) e São José do Jacuípe (SJ), respectivamente. Como pode ser observada, a primeira campanha (out/2003) mostrou valores isotópicos mais altos que as demais, evidenciando um processo evaporativo das águas no período. Na segunda campanha (jun/04), os valores se mostraram, em média, mais baixos que os demais. Observa-se que no reservatório de França o ponto 4 apresenta uma tendência a preservar o seu valor isotópico, tendo como possível causa alimentação neste ponto por surgência de águas subterrâneas, enquanto os outros pontos obedecem a um comportamento isotópico concordante com os períodos amostrados. De acordo com os dados isotópicos, verifica-se que o comportamento dos dois reservatórios é distinto devido a dois fatores principais: dimensão dos reservatórios e qualidade da vazão afluente aos reservatórios.

A figura 3 mostra o comportamento das linhas locais de evaporação dos reservatórios de França e São José do Jacuípe, respectivamente, em relação à linha meteórica global (LMG), cuja equação é: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961; Dansgaard, 1964). O excesso de deutério "d" também é obtido com base nessa equação, ou seja: $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$. As linhas locais de evaporação, obtidas através do ajuste linear do gráfico $\delta\text{D} \times \delta^{18}\text{O}$, foram de $\delta\text{D} = 6,37\delta^{18}\text{O} - 6,68$ com uma correlação significativa $R = 0,96$ ($P < 0,0001$) para o reservatório de França, e de $\delta\text{D} = 6,36\delta^{18}\text{O} - 7,85$ com uma correlação de $R = 0,98$ ($P < 0,0001$). Em relação à linha meteórica global, verifica-se, devido suas menores inclinações, que as águas foram afetadas por processos de fracionamento cinético. Comparando as linhas locais dos reservatórios, pode-se observar que os coeficientes angulares de ambas as retas são muito próximos, indicando semelhanças nos processos de evaporação e recarga dos mesmos durante o período de estudo.

A salinização de águas de reservatórios pode ter várias causas. Dentre elas a geologia da região onde eles ou seus tributários estão localizados e os processos evaporativos que eles sofrem. A dependência da salinidade com a evaporação pode ser avaliada pela correlação dos valores de condutividade com os isotópicos. Devido ao fracionamento isso-

Tabela 1 – Valores dados de temperatura (°C), condutividade elétrica (mS/cm), composição isotópica de deutério δD (‰), composição isotópica de oxigênio $\delta^{18}O$ (‰) e excesso de deutério d (‰) dos pontos amostrados em cada campanha.

Ponto	Local	Campanha 1					Campanha 2					Campanha 3					Campanha 4				
		Temp	Cond	δD	$\delta^{18}O$	d	Temp	Cond	δD	$\delta^{18}O$	d	Temp	Cond	δD	$\delta^{18}O$	d	Temp	Cond	δD	$\delta^{18}O$	d
1	França	28,2	0,560	16	4,0	-16	26,4	0,312	-32	-3,2	-6,4	26,8	0,314	-23	-2,1	-6,2	30,3	0,318	-9	-0,1	-8,2
2	França	26,1	0,561	16	4,0	-16	25,4	0,315	-32	-3,1	-7,2	25,9	0,317	-19	-2,0	-3	29,2	0,318	-9	0,2	-10,6
3	França	26,3	0,570	17	4,3	-17	26,7	0,312	-31	-3,0	-7	24,6	0,319	-19	-1,8	-4,6	29,4	0,307	-9	0,0	-9
4	França	26,4	0,401	5	1,3	-5	25	0,304	-10	-0,4	-6,8	26,9	0,384	4	0,7	-1,6	30,1	0,297	-8	-0,3	-5,6
5	França	26,5	0,472	9	2,1	-8	25,8	0,307	-27	-2,9	-3,8	26,1	0,324	-18	-1,9	-2,8	29,6	0,187	-12	-1,7	1,6
6	França	-	-	-	-	-	23,5	0,346	-9	-1,3	1,4	23	0,364	0	0,3	-2,4	29,7	1,022	-11	2,1	-27,8
7	São José	25,5	2,020	17	3,8	-13	25,4	1,861	-3	1,1	-11,8	23,5	1,671	1	0,9	-6,2	26,6	1,709	5	2,1	-11,8
8	São José	-	2,120	17	3,7	-13	25,3	1,851	-4	0,8	-10,4	23,9	1,670	-1	1,5	-13	28,7	1,950	4	2,1	-12,8
9	São José	-	2,160	19	4,0	-13	26,6	1,721	-18	-1,2	-8,4	25,1	1,687	-2	0,7	-7,6	28,6	1,966	6	2,4	-13,2
10	São José	26,4	1,670	18	3,5	-10	26,6	2,109	-15	-1,0	-7	25,9	1,766	1	1,2	-8,6	29,6	1,997	5	2,6	-15,8
11	São José	29,5	2,200	20	4,3	-14	26,5	1,727	-19	-1,6	-6,2	26,2	1,693	-2	0,7	-7,6	29,7	2,050	6	3,1	-18,8
12	São José	-	-				25,9	1,771	-12	-0,6	-7,2	24,8	1,679	-2	0,7	-7,6	29,9	2,040	-6	-0,2	-4,4
13	São José	-	-				27,0	1,927	-3	0,1	-3,8	28,1	2,120	18	4,0	-14	30,4	1,070	-7	0,2	-8,6
Poço	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,4	1,523	-21	-3,1	3,8

tópico que ocorre no processo de evaporação, a água residual em um reservatório é mais enriquecida em isótopos pesados (^{18}O e D). Como consequência da evaporação, a concentração de sais dissolvidos por volume de água irá aumentar. Esta análise leva à conclusão que boas correlações entre estes parâmetros mostram influência da evaporação na salinização.

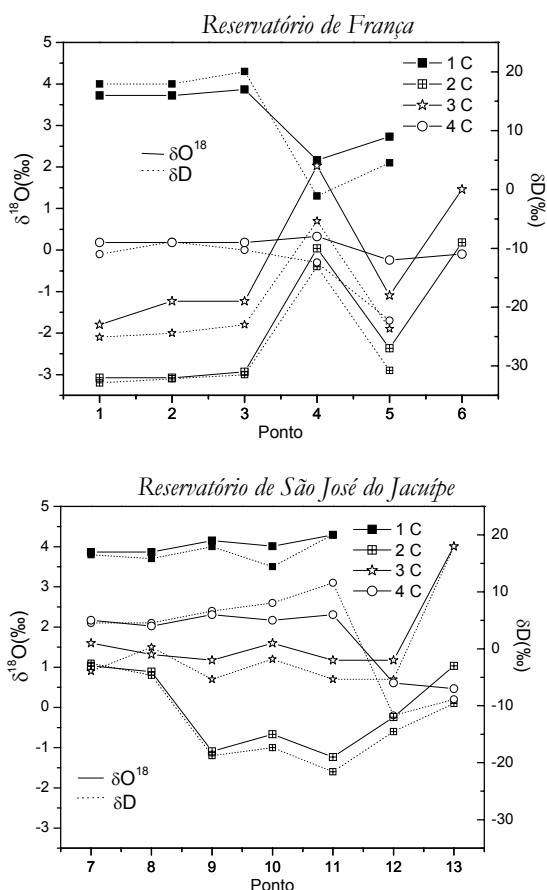


Figura 2 - Evolução dos valores de δD e $\delta^{18}\text{O}$ dos pontos amostrados nas quatro campanhas nos reservatórios de França e São José do Jacuípe,

No reservatório de França, as perdas por fracionamento cinético, refletidas na composição isotópica da água mais enriquecida em isótopos pesados, tiveram papel importante na variação dos teores de sais. Isso é comprovado pela análise da correlação entre os valores de condutividade e os valores de $\delta^{18}\text{O}$, obtendo-se para barragem do França uma correlação, maior que $R=0,9$, exceto os correspondentes a amostragem de junho de 2004, em consequência da situação atípica de grande precipi-

tação com baixos valores isotópicos, ocorridas no início de 2004, ver tabela 2. Esse comportamento pode ser explicado pela dimensão do reservatório que possibilita a renovação da água armazenada e baixos teores de sais nas vazões afluentes, atribuindo uma dinâmica de salinidade fortemente relacionada aos eventos de precipitação e ao fenômeno da evaporação. No reservatório de São José do Jacuípe, não houve boa correlação (tabela 2) entre os valores de condutividade e os valores de $\delta^{18}\text{O}$. Estas correlações revelam que o processo de evaporação tem uma contribuição restrita na salinização desse reservatório, indicando a existência de outros mecanismos de salinização que contribuem significativamente para estes altos valores de condutividade (salinidade), tais como impacto de extração de sais de solos salinizados por águas superficiais e afluência de água subterrânea salinizada nas vizinhanças dessa barragem.

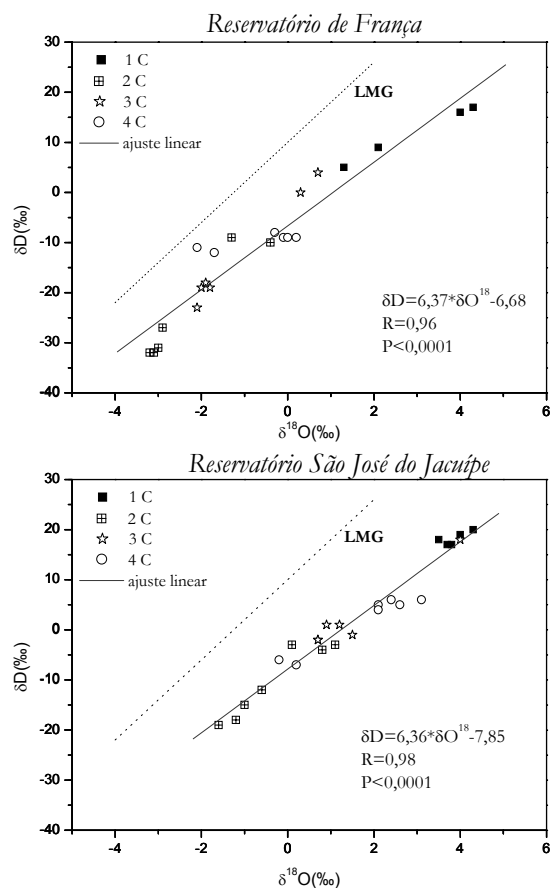


Figura 3 - Comportamento da linha local de evaporação (cheia) dos reservatórios de França e São José do Jacuípe em relação à linha meteórica global (LMG, pontilhada).

Simulação da destilação Rayleigh para estimativa de umidade e evaporação dos reservatórios:

A partir da equação de Rayleigh para a evolução isotópica de um corpo de água em evaporação, incluindo além do fracionamento isotópico de equilíbrio líquido-vapor, o fracionamento cinético em função da umidade relativa do ar, foram calculadas as linhas de evaporação para uma faixa de valores em torno das condições médias de temperatura e umidade relativa do ar características da região. Sendo $\alpha_{v,l}$ o fator de fracionamento vapor-líquido e f_{residr} representando a fração residual no reservatório, ou seja, o que sobrou de água no reservatório em relação ao volume inicial, depois de uma determinada porção evaporada.

Nesta simulação, foram utilizados na modelagem os pontos entre a segunda e terceira campanha, pois neste período cujas coletas foram realizadas em 2 e 3/06/2004 e 17 e 18/09/2004, as precipitações foram irrelevantes bem como as entradas e saídas de água no reservatório. Fazendo estas considerações, é possível utilizar este intervalo para estimar a porção de água evaporada neste período para comparar o enriquecimento isotópico da água das barragens e a fração do volume evaporado correspondente a essa variação isotópica nos reservatórios, utilizando a versão simplificada das equações (1) e (2), ou seja:

$$dV/dt = - E \tag{4}$$

$$d(V\delta_L)/dt = - E\delta_E \tag{5}$$

A figura 5 mostra a simulação da destilação Rayleigh em diferentes temperaturas (Silva, 2007). Com base nessas considerações foi calculada a evolução isotópica de um corpo de água e, de posse dos resultados simulados, foram feitos gráficos δD versus $\delta^{18}O$ nas temperaturas de 20,0°C, 25,0°C e 30,0°C e, nestes gráficos foram obtidos valores de coeficientes angulares para as umidades relativas de 70%, 75%, 80% e 85%. Comparando os valores destes coeficientes angulares com os obtidos nas linhas de evaporação e com os valores médios de temperatura e umidade de cada um dos reservatórios, pode-se notar que o coeficiente angular de 6,36 obtido no reservatório de São José, corresponde ao mesmo coeficiente obtido na simulação para uma temperatura de 25,0°C e umidade de 80%. Estes valores concordam com os valores médios de temperatura e umidade da região que são, segundo dados da Secretaria de Recursos Hídricos da Bahia, de 25,0°C e 78,5%. Para o reservatório de França, cujo coeficien-

te da linha de evaporação foi de 6,37, foi utilizado o valor da simulação correspondente a 20,0°C e umidade relativa do ar de 75% que concordam com os valores médios da região, com 20,0°C e 74,8%.

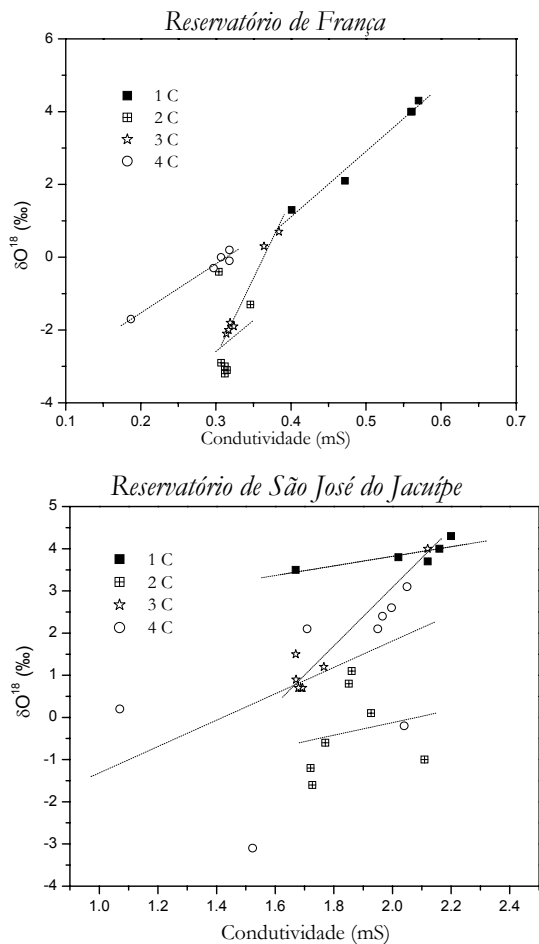


Figura 4 – Correlação entre condutividade e $\delta^{18}O$ nos reservatórios.

Tabela 2 – Inclinação da reta e correlação entre condutividade e $\delta^{18}O$ nos reservatórios.

Reservatório	Período	$\delta O^{18} = A + B * Cond$	R
FRANÇA	OUT 2003	-6,1 + 18,0* Cond	0,99
	JUN 2004	-7,7 + 17,1* Cond	0,22
	SET 2004	-15,5 + 42,8* Cond	0,99
	MAR 2005	-1,5 + 3,6* Cond	0,91
SÃO JOSÉ	OUT 2003	1.5 + 1.1* Cond	0.80
	JUN 2004	-3.1 + 1.5* Cond	0.20
	SET 2004	-10.8 + 6.9* Cond	0.96
	MAR 2005	-4.49 + 3.12* Cond	0.52

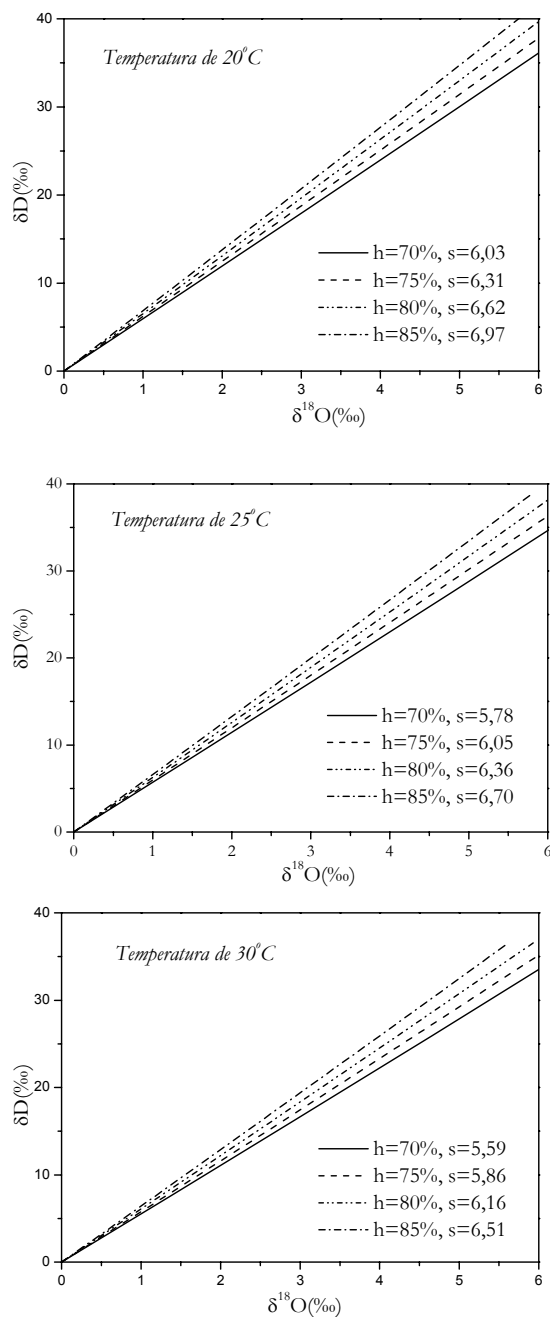


Figura 5 - Simulação da destilação Rayleigh para diferentes valores de umidade relativa do ar nas temperaturas de 20, 25 e 30°C.

Para fazer a estimativa de evaporação dos reservatórios de França e São José, foram utilizados os parâmetros citados anteriormente para os dois e obtida, através da simulação Rayleigh, a fração residual para a variação isotópica do oxigênio entre as campanhas em todos os pontos coletados nos reser-

vatórios, permitindo obter um valor médio e a variação nos pontos amostrados.

Foi estimada a evaporação nos pontos de coleta dos reservatórios de França e São José através do enriquecimento isotópico do $\delta^{18}\text{O}$. O valor médio e o desvio padrão obtidos para evaporação do reservatório do França foi de $3,7 \pm 0,7$ mm/dia. Estes valores corroboram com os de Santiago (1984) que, utilizando valores isotópicos, estimou a evaporação nos açudes Pereira de Miranda (CE) encontrando os valores médios 5,0 mm/dia (1980), 4,2 mm/dia (1981) e 3,2 mm/dia (1982) e no açude de Caxitoré (CE), encontrando os valores médios 5,0 mm/dia (1980), 4,2 mm/dia (1981). Esses valores também corroboram com os encontrados por Fontes et. al. (2004) sendo 2,65 a 4,75 mm/dia para açudes da região da bacia experimental do rio Cedro próxima à bacia do França nos meses de Junho e Julho de 2004 utilizando diferentes métodos de medida de evaporação. Fontes (2008) utilizando cálculo de evaporação pelo processo de Rayleigh estimou a evaporação em mensal desses açudes no período de julho a outubro de 2007 taxas de 2,6-3,4 mm/dia.

Os resultados do São José mostraram uma grande variação nos valores de evaporação obtidos em cada ponto amostrado, não oferecendo uma estimativa válida. Este resultado indica que, possivelmente, uma maior heterogeneidade no comportamento evaporativo das águas com relação aos pontos amostrados afetou a composição isotópica das águas da barragem. Este fato pode ser explicado devido ao tamanho do São José ser maior que o do França, possibilitando uma maior heterogeneidade da composição isotópica das águas nos pontos de coleta.

CONCLUSÕES

Observa-se que, no reservatório de França o ponto 4 apresenta uma tendência a preservar o seu valor isotópico, tendo como possível causa alimentação neste ponto por surgência de águas subterrâneas, enquanto os outros pontos obedecem a um comportamento isotópico concordante com os períodos amostrados.

As linhas locais de evaporação, obtidas através do ajuste linear do gráfico $\delta\text{D} \times \delta^{18}\text{O}$ são afetadas pelo fracionamento cinético, evidenciado pelas menores inclinações com relação à linha meteórica global. Comparando as linhas locais dos reservatórios, pode-se observar que os coeficientes angulares

de ambas as retas são muito próximos, indicando semelhanças nas condições de evaporação dos meses no período de estudo.

Foi obtida uma correlação significativa entre os valores de condutividade elétrica e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ para o reservatório do França ($R=0,95$ e $P<0,0001$) mostrando que o processo de evaporação tem uma contribuição importante na salinização desses reservatórios. Este comportamento pode ser explicado pela dimensão do reservatório, que possibilita a renovação da água armazenada, e por baixos teores de sais nas vazões afluentes, atribuindo uma dinâmica de salinidade fortemente relacionada aos eventos de precipitação e ao fenômeno da evaporação. O reservatório de São José do Jacuípe mostra uma maior inércia das águas armazenadas na mudança da salinidade e composição isotópica. Dessa forma não houve boa correlação ($R=0,55$ e $P=0,014$) entre os valores de condutividade elétrica e os valores de $\delta^{18}\text{O}$. Este resultado revela que o processo de evaporação tem uma contribuição relativa restrita na salinização desse reservatório, indicando que as contribuições de fontes externas de sais são significativas.

O valor médio encontrado para estimativa de evaporação do reservatório do França foi de $3,7\pm 0,7$ mm/dia, na faixa de evaporação encontrada por outros autores. Os resultados do São José mostraram uma grande variação nos valores de evaporação obtidos, não oferecendo uma estimativa válida deste parâmetro na barragem. Este resultado indica que, possivelmente, haja uma maior heterogeneidade na composição isotópica das águas da barragem do São José, enquanto que o reservatório de França se apresenta mais homogêneo. Esta heterogeneidade é provavelmente devida a grande diferença entre seus tamanhos e, conseqüentemente, à estratificação horizontal e/ou vertical na barragem de São José.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPESB e SRH pelo suporte.

REFERÊNCIAS

- BRAND, W. A.; AVAK, H.; SEEDORF, R.; HOFMANN, D. e CONRADI, T. (2000) New methods for fully automated isotope ratio determination from hydrogen at the natural abundance level, *Geoph. Prosp.*, 28:967-976.
- CRAIG, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 133 (3466): 1702-1703.
- DANSGAARD, W. (1964) Stables Isotopes in precipitation, *Tellus*, 16 (4): 436-468.
- EPSTEIN, S. AND MAYEDA, T. (1953). Variation of ^{18}O content of water from natural sources. *Geochem. and Cosmochem. Acta* 4, 213.
- FONTES, A. S.; ALVARES, D.; MEDEIROS, Y.D.P.. Avaliação Preliminar da Evaporação nos Açudes da Bacia Experimental do Rio do Cedro. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (2004) São Luis. Gestão Democrática e Sustentável das Águas.
- FONTES, A. S. (2008) Vulnerabilidade à salinização das águas superficiais da Bacia do Rio Jacuípe por traçadores ambientais. Tese de Doutorado em Geofísica da Universidade Federal da Bahia.
- GIBSON, J.; (2002) Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow arctic lakes using non-steady isotope mass balance, *J. Hydrol.*, 264: 242-261.
- GONFIANTINI, R., (1986) Environmental isotopes in lake studies. In: P. Fritz and J. Ch. Fontes (Eds.) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol 2, The Terrestrial Environment, B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands: 113-168.
- MARFIA, A. M.; KRISHNAMURTHY, R. V.; ATEKWANA, E. A. e PANTON, W. F. (2004) Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America, *Applied Geochemistry*, 19:937-946.
- SANTIAGO, M. M. F. (1984) Mecanismos de Salinização em Regiões Semi-áridas. Estudo dos Açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- SILVA, ADERVAL BARROS DA (2007) - Caracterização isotópica e balanço hídrico nos reservatórios de França e de São José do Jacuípe. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, Curso de Pós-graduação em Geofísica.
- SRH (2002) Relatório Interno.
- UNESCO/IAEA Series on Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications, Edited by W.G. Mook, Vol.III Surface Waters, 2002. Disponível em: <http://www.iaea.or.at/programmes/ripc/ih/volumes/volumes.html> .

Isotopic Characterization And Estimated Evaporation Using Stable Isotopes In The França And São José do Jacuípe Reservoirs, In The Bahian Semi-Arid Region

ABSTRACT

This paper reports the isotopic composition ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of water samples from two reservoirs in Jacuípe River, a tributary of Paraguaçu River. The reservoirs were sampled at several points in October/2003, June/2004, September/2004 and March/2005. Results indicate that the isotopic composition of the França reservoir is spatially homogeneous, varying in time, except at one sampling point where the isotopic composition stay nearly constant in time, probably due to local upwelling of groundwater. The São José reservoir has a nonuniform isotopic composition. The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ shows a good correlation, with regression lines with angular coefficients smaller than in the global meteoric line. The angular coefficients for the regression line of both reservoirs are very close, indicating similar evaporation processes in their areas, compatible with isotopic enrichment due to evaporation at an average temperature of 25 °C and 75 % of relative humidity of the air. Based on the isotopic variation observed in the França reservoir between June and September of 2004, a period when precipitation was negligible, an evaporation rate of 3.7 ± 0.7 mm/day was calculated. The good correlation between electric conductivity and $\delta^{18}\text{O}$ values for the França reservoir indicates evaporation as an important factor for the salinization of that reservoir. For the São José reservoir that is not a good correlation, indicating that besides evaporation the influx of saline waters contributes to the salinization of this reservoir.

Key-words: *evaporation, conductivity, reservoir.*