

## Estudo da Dinâmica do Fluxo de Água na Bacia do Rio Jacuípe por Meio de Traçadores Ambientais

Andrea Sousa Fontes

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia — UFRB  
andreafontes@ufrb.edu.br

Maria do Rosário Zucchi, Yvonilde Dantas Pinto Medeiros, Antonio Expedito Gomes de Azevedo

Universidade Federal da Bahia — UFBA  
maria.zucchi@gmail.com; yvonild@ufba.br; expedito@ufba.br

Recebido: 13/03/09 – revisado: 01/05/10 - aceito: 07/07/11

---

### RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo entender a dinâmica do fluxo de água e a interação entre águas superficiais, subterrâneas e meteóricas, na bacia hidrográfica do rio Jacuípe, drenando uma área de 12.163 km<sup>2</sup> na região semi-árida baiana, por meio da utilização de traçadores ambientais. O escoamento superficial na bacia do rio Jacuípe apresenta uma tendência de enriquecimento em isótopos pesados de montante a jusante, com pico no reservatório de São José do Jacuípe, o que reflete a ação da evaporação ao longo da bacia e a interferência de aproveitamentos hídricos nos cursos d'água. Os resultados mostram a grande contribuição das águas meteóricas para o escoamento do rio e provimento dos reservatórios durante o período chuvoso, entretanto durante o período seco o escoamento é predominantemente de contribuição subterrânea e de águas armazenadas nos reservatórios.

**Palavras-Chave:** dinâmica de fluxo, semi-árido, traçadores ambientais.

---

### INTRODUÇÃO

O semi-árido nordestino do Brasil é caracterizado por uma grande variação temporal e espacial da precipitação, ocorrendo a estação chuvosa num único período de 3 a 5 meses no ano e por pouca ou nenhuma vazão de escoamento nos rios durante a maior parte do ano. O atendimento a demanda da população dessa região é um desafio constante na busca de se atingir um nível satisfatório de convivência com essas características climáticas. Assim, o conhecimento detalhado do ciclo hidrológico, principalmente do escoamento superficial e subterrâneo se faz essencial para promover condições adequadas de vida e desenvolvimento no semi-árido.

Estudos recentes (Vorosmarty e Meybeck, 2004) sugerem que os impactos de armazenamentos, desvios e redirecionamento de escoamento para atendimento à demanda por água, hidrelétricas e irrigação podem superar os impactos das recentes e antecipadas mudanças climáticas nas vazões. Conseqüências desses efeitos incluem mudanças na frequência e extensão de escoamentos, transporte de sedimentos, alteração na recarga de aquíferos e

degradação da qualidade da água em ecossistemas hídricos, o que geralmente resultam em disputas políticas ou conflitos de usuários (montante - jusante).

Segundo (Vitvar e Aggarwal, 2007) os fluxos dos rios conduzem uma memória integrada dos processos hidrológicos numa bacia e desde 1960, os isótopos são usados para traçar caminhos de poluentes e perdas por evaporação em rios. Segundo Kendall e Coplen (2001) há uma correlação entre as características isotópicas das precipitações e das águas dos rios, sugerindo que, em grandes escalas, os valores isotópicos nas águas de rios geralmente trazem informações da composição isotópica das precipitações.

Como uma grande fração da chuva retorna para atmosfera pela evaporação, o valor isotópico residual no fluxo do rio, quando monitorado regularmente, contém informações sobre o ciclo hidrológico e o tempo de trânsito. A hidrologia utiliza isótopos ambientais estáveis e radioativos como ferramenta para obter informações sobre a circulação e o tempo de trânsito da água no ciclo hidrológico. Neste contexto, diferentes isótopos estáveis de um mesmo elemento apresentam comportamentos dis-

tintos, produzindo uma separação parcial entre os isótopos leves e pesados chamado de fracionamento isotópico.

Segundo Vitvar e Aggarwal (2007) a vazão dos rios carrega uma memória integrada dos processos hidrológicos numa bacia. O uso de isótopos estáveis do hidrogênio e oxigênio como traçadores em estudos hidrológicos vem expandindo-se ao longo das últimas cinco décadas. Com a descrição da variação sistemática das precipitações no mundo (Craig, 1961; Dansgaard, 1964), estes isótopos são utilizados no desenvolvimento de teorias descritivas do fracionamento isotópico durante a evaporação (Craig e Gordon, 1965); na aplicação e validação em estudos de evaporação em reservatórios (Dincer, 1968; Gat, 1970; Dansgaard, 1964; Machavarán e Krishnamurthy, 1994; Gibson et al., 1996; Gibson, 2002); nos estudos do comportamento do escoamento superficial (Hitchon e Krouse, 1972; Moore, 1989; Cameron et al., 1995; Gibson e Prowse, 2002); e na separação dos componentes do hidrograma (Wels et al., 1991; Laudon e Slaymaker, 1997; Buttle e Peters, 1997).

Uma extensa revisão da aplicação dos traçadores isotópicos para estudos hidrológicos foi publicado por Mook e Vries (2001) e uma avaliação no progresso da pesquisa em hidrologia isotópica com foco na contribuição dos estudos canadenses foi realizada por Gibson et al. (2005).

No semi-árido do nordeste brasileiro essa metodologia de investigação vem sendo aplicada para estudos relativos a água superficial no que se refere a processos de salinização de açudes, perdas por evaporação e interação rio-aquífero (Santiago, 1984; Pereira, 2006; Gomes et al., 2007).

Bennet (2008) realizou comparação entre métodos da hidrometria com a abordagem isotópica. Neste trabalho as concentrações dos isótopos estáveis do hidrogênio e do oxigênio foram utilizadas no aprimoramento de estimativas de produção de água para cálculos de entrada de poluente em reservatórios. Os resultados indicaram que a rede hidrométrica falha em capturar a variabilidade hidrológica em sistemas sensíveis como pequenos lagos evaporados e com baixo escoamento afluente. Estimativas baseadas em isótopos capturam o comportamento da produção de água extremamente baixa em áreas planas e desconectadas e o comportamento da produção de água extremamente alta em outras áreas por ter fortes conexões com o fluxo subterrâneo.

Essa conexão com o fluxo subterrâneo tem recebido destaque na gestão de recursos hídricos, conforme a Resolução nº 15/2001 do Conselho

Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, que exige uma formulação de diretrizes para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) considerando a interdependência das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas. Os instrumentos de gestão definidos na PNRH e os mecanismos de implantação são diversos e vem exigindo uma identificação detalhada dos corpos de água superficiais e subterrâneos e suas interconexões, a exemplo da recente Resolução nº 91/2008, que dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos.

No presente trabalho foi feito um estudo da dinâmica de fluxo de água na bacia do rio Jacuípe, representativa do semi-árido baiano, integrante da Rede de Hidrologia do Semi-árido (REHISA). Foram consideradas interações das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas, utilizando os isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério como traçadores para aplicabilidade na gestão das águas dessa região.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Jacuípe totaliza uma área de drenagem de 12.163 km<sup>2</sup>, com 36 municípios parcial ou totalmente inseridos. O rio Jacuípe é o maior contribuinte do rio Paraguaçu, com escoamento no sentido geral oeste-leste. Essa bacia tem grande importância para o Estado da Bahia, apresentando uma complexidade elevada de gerenciamento e planejamento dos seus recursos hídricos, devido principalmente a: i) intermitência do rio principal em quase todo seu curso, ii) à existência de dois importantes reservatórios (França e São José do Jacuípe), iii) à intensa atividade industrial no trecho baixo e, iv) ao alto grau de comprometimento das vazões regularizadas pelas barragens no atendimento às demandas.

O rio Jacuípe possui comprimento total de 437 km, nasce na Chapada Diamantina, no município de Morro do Chapéu, atravessa a região semi-árida, até a confluência com o rio Paraguaçu nas proximidades do lago da Barragem de Pedra do Cavalo, situando-se na parte central norte da bacia do rio Paraguaçu (Figura 1).

A bacia está inserida totalmente na região semi-árida. No entanto, as características no relevo permitem que existam variações climáticas ao longo da bacia, apresentando maiores teores de umidade nas suas extremidades devido à proximidade da Chapada Diamantina nas suas nascentes, e ao Re-

côncavo próximo à confluência com o rio Paraguaçu.

A partir de Morro do Chapéu, no sentido oeste-leste, até São José do Jacuípe, chove anualmente entre 600 mm e 800 mm. Sua parte central apresenta, todavia, regiões onde as chuvas são muito escassas. A partir de São José do Jacuípe até Riachão do Jacuípe, as chuvas médias anuais são inferiores a 700 mm, chegando a 400 mm anuais. Em direção ao Recôncavo, a partir de Riachão do Jacuípe, os totais anuais de chuva voltam a aumentar, chegando a 1.300 mm próximo à barragem de Pedra do Cavalo, onde o rio Jacuípe desemboca no rio Paraguaçu. O trimestre mais seco está compreendido entre os meses de agosto e outubro, sendo o mês de setembro, em média, o mais crítico.

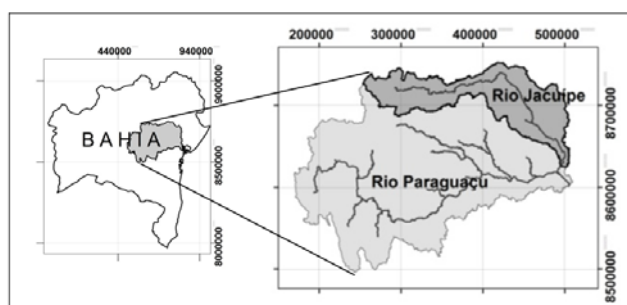


Figura 1 - Localização da Bacia do rio Jacuípe

A tipologia climática segundo Thorntwaite, publicada em SEI (2007) apresenta para a região próxima a nascente (Morro do Chapéu) clima subúmido a seco (C1dA') e para o restante da bacia clima semiárido (Dd'A') com regime pluviométrico sem estação definida.

A geologia da bacia do rio Jacuípe é bastante diversificada, apresentando rochas com idades desde o Arqueano até o Recente. O embasamento está relacionado com a unidade geotectônica denominada de Cráton de São Francisco. Apresentando geologia da região predominantemente o embasamento cristalino, complexo metassedimentar e coberturas sedimentares.

## METODOLOGIA

A amostragem na bacia do rio Jacuípe teve início em junho de 2006. Foram realizadas cinco campanhas de campo para coleta de amostras de águas meteóricas, superficiais e subterrâneas objeti-

vando a análise da composição isotópica ao longo do rio principal e seus afluentes principais. Foram amostradas águas de chuva, subterrâneas, superficiais e armazenadas nos reservatórios (Figura 2 e Tabela 1).

O fracionamento isotópico pode ocorrer com a mudança na composição isotópica pela transição de um componente de um estado físico para outro (água líquida para vapor d'água), ou em outro componente (dióxido de carbono em carbono orgânico de uma planta), ou pode se manifestar como uma variação na composição isotópica entre dois componentes em equilíbrio químico (bicarbonato dissolvido e dióxido de carbono).

No ciclo hidrológico o deutério (D) e o  $^{18}\text{O}$  são traçadores perfeitos, cujas abundâncias relativas variam em função do percurso da água.

A abundância relativa da amostra é medida por espectrometria de massa e expressa em partes por mil (‰) com relação ao padrão de referência internacional (VSMOW - Vienna Standard Mean Ocean Water):

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}) / R_{\text{padrão}} \times 10^2$$

onde  $R$  é a razão isotópica, entre os isótopos pesados e os mais leves (mais abundantes), ou seja,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e D/H

Na ocorrência da evaporação, as águas residuais ficam mais enriquecidas em isótopos pesados, apresentando valores de  $\delta(\text{‰})$  mais positivos ao longo do percurso. Na condensação ocorrida para a formação das nuvens ocorre o inverso, as moléculas pesadas da água condensam-se mais facilmente, deixando o vapor residual mais pobre em isótopos pesados, apresentando valores de  $\delta(\text{‰})$  mais negativos.

A metodologia utilizada para a coleta das águas e estocagem das amostras procedeu de acordo com as instruções da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) (UNESCO/IAEA, 2002). Para a coleta da água de chuva foram utilizados coletores com adição de óleo mineral para evitar a evaporação. A coleta foi realizada mensalmente em frascos totalmente preenchidos e devidamente fechados..

Para determinar a razão deutério-hidrogênio (D/H), foi utilizado o método apresentado por Brand (Brand et al., 2000), que propôs a redução de uma alíquota de água a centenas de graus Celsius. Alíquotas de aproximadamente 1,0  $\mu\text{l}$  de cada amostra de água são injetadas em um reator

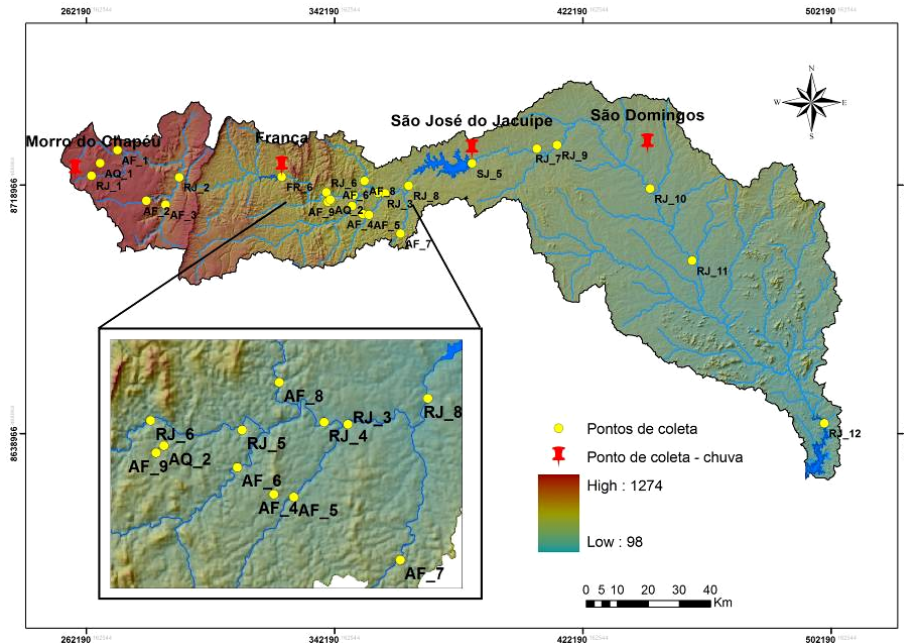


Figura 2 - Pontos amostrados na bacia do rio Jacuípe e afluentes

Tabela 1 - Pontos de coleta na bacia do rio Jacuípe

Ponto	LOCALIDADE
RJ_1	Nascente principal - Morro do Chapéu
RJ_2	Cachoeira Domingos Lopes - nascente perene
RJ_3	Manguinhas - barramento Rio Jacuípe
RJ_4	Rio Jacuípe - estrada Várzea do Poço
RJ_5	Rio Jacuípe (Cigana)
RJ_6	Rio Jacuípe (Palmeirinha)
RJ_7	Rio Jacuípe - Estrada terra - Gavião/SJ
RJ_8	Rio Jacuípe - Morrinhos
RJ_9	Rio Jacuípe - Ponte - Gavião
RJ_10	Rio Jacuípe - Barreiros (10 km Nova Fátima)
RJ_11	Rio Jacuípe - Ponte - Riachão do Jacuípe
RJ_12	Rio Paraguaçu - Ponte - Feira de Santana
FR_6	Descarga de fundo reservatório França
SJ_5	Descarga de fundo reservatório São José
AF_1	Rio Barra do Ligeiro
AF_2	Rio Ferro Doido
AF_3	Barragem do Angelim - Rio Preto
AF_4	Açude Umbuzeiros (perto rio dos Patos)
AF_5	Rio dos Patos - afluente
AF_6	Rio do Ouro - afluente
AF_7	Rio sanharó (vertedouro açude) - afluente
AF_8	Rio Grande - afluente
AF_9	Riacho minação
AQ_1	Fazenda Oiti - poço
AQ_2	Fazenda Boa Vista - minação - afluente

*HDevice* da Finningam, onde ocorre a reação de oxidação do cromo a 850°C, com conseqüente liberação do H<sub>2</sub>.

A metodologia analítica utilizada para se determinar o δ<sup>18</sup>O na água é a proposta por Epstein e Mayeda (1953), que consiste no equilíbrio isotópico entre o gás carbônico e a água (CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) numa temperatura, geralmente, de 25,0±0,1°C, por pelo menos 8h. O CO<sub>2</sub> resultante desse equilíbrio foi injetado em uma linha de purificação de CO<sub>2</sub> de alto vácuo, onde foram retiradas as impurezas (umidade e gases).

Após estes procedimentos as amostras de H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> foram analisadas em espectrômetro de massa, onde foram obtidos valores de δD e δ<sup>18</sup>O.

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.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Análise temporal do escoamento na Bacia do rio Jacuípe*

Os pontos de coleta estão distribuídos na bacia em regiões de embasamento cristalino e metassedimentos (Figura 3).

Na primeira campanha, realizada em julho de 2006, foram percorridos trechos do rio principal e afluentes da nascente, com a finalidade de caracterizar o comportamento global da bacia. Neste ano as chuvas ocorreram distribuídas entre os meses de março e abril, num total de 352 mm e a coleta realizada em julho ainda refletiu a influencia desse evento chuvoso no escoamento de base de acordo com os valores isotópicos encontrados. De acordo com a Tabela 2 e a Figura 3, o ponto RJ\_2, a 65 km da nascente, já demonstrava os efeitos do fracionamento isotópico pela evaporação das águas meteóricas, com valores mais positivos em 13‰ para o δD do que a nascente principal localizada no ponto RJ\_1.

Nessa campanha foi verificado o enriquecimento das águas ao longo do rio, principalmente após o reservatório de São José, os valores de δD variaram de -2‰ (reservatório de França) para +20‰ (reservatório de São José do Jacuípe). A barragem de Angelim (AF\_3), apesar de ter um grande espelho d'água exposto, não apresentava águas afetadas pela evaporação, indicando contribuição permanente do rio Preto com escoamento regido pelas águas subterrâneas. O rio Ferro Doido (AF\_2) apre-

sentou nesse período águas mais afetadas pela evaporação que a da barragem de Angelim e seu curso d'água não apresentava fluxo suficiente para atingir o rio principal, indicando que seu escoamento não é dominado pela água subterrânea. O reservatório de França, nesse período, traz um valor isotópico que reflete as águas negativas da sua área de drenagem sujeitas a exposição da evaporação, tornando-as mais positivas que águas da chuva. Já o reservatório São José apresenta águas mais afetadas pela evaporação devido o tempo de residência de suas águas de aproximadamente quatro meses (Fontes, 2008).

Na segunda campanha, realizada em novembro de 2006, foi feito o monitoramento dos principais afluentes do trecho do rio Jacuípe entre os reservatórios de França e São José e incluída a análise da água de uma nascente (AQ\_2) no trecho médio da bacia para comparação com os resultados obtidos nos rios.

Na campanha de novembro de 2006 verifica-se que a composição isotópica das águas não seguiu a tendência natural de enriquecimento ao longo do curso do rio, mas apresenta valores influenciados pelas chuvas que ocorreram no final de outubro e início de novembro na região média e baixa da bacia.

O afluente rio do Ouro (AF\_6), mais extenso afluente do rio Jacuípe, foi amostrado nessa campanha e apresentou valores isotópicos próximos ao da chuva ocorrida em França em outubro (δD=-3‰). Entretanto, não houve escoamento suficiente para atingir o rio principal. Para os pontos FR\_6, AF\_3 e SJ\_5 não houve alteração por representarem amostragem nos reservatórios que devido ao tempo de residência e ao grande volume de água armazenada nos reservatórios não sofreram renovação com as chuvas recentes. Nesse trecho observou um pequeno enriquecimento nos isótopos pesados devido a influência mais significativa da evaporação.

Na terceira campanha, realizada em abril de 2007, foi feita a caracterização do período chuvoso da região, com os afluentes escoando e atingindo o rio principal. Foram identificados cinco afluentes no trecho entre os reservatórios de França e São José do Jacuípe. Esse período também foi caracterizado pelo vertimento dos reservatórios.

Verificou-se uma redução dos valores isotópicos das nascentes, refletindo as recargas dos aquíferos pelas chuvas negativas de fevereiro de 2007 (δD=-44‰). Entretanto apesar de contribuir para valores mais negativos nas águas armazenadas na barragem do Angelim (AF\_3), conferiram valores mais positivos para a Cachoeira Domingos Lopes, que antes apresentava fluxo proveniente de águas

Tabela 2 - Valores isotópicos por campanha

Ponto	5/7/2006		7/11/2006		12/12/2006	
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RJ_1	-3,2	-20	-	-	-	-
RJ_2	-0,9	-7	-3,2	-19	-	-
RJ_3	-0,9	-4	-0,4	-2	-	-
RJ_4	-	-	-0,4	0	-	-
RJ_5	-	-	-0,5	0	-	-
RJ_6	-	-	-	-	-	-
RJ_7	-	-	-0,3	-1	-	-
RJ_8	-	-	-1,7	-8	-	-
RJ_9	3,8	18	-0,4	0	0,7	0
RJ_10	-	-	-	-	0	-1
RJ_11	-	-	-	-	0,4	0
RJ_12	-	-	-	-	-0,5	-5
FR_6	-0,6	-2	0,2	1	0,7	4
SJ_5	4,1	20	3,8	19	3,2	21
AF_1	-1,5	-8	-0,2	0	-	-
AF_2	-0,9	-4	3,7	14	-	-
AF_3	-1,1	-7	1,8	10	-	-
AF_4	-	-	6,4	30	-	-
AF_5	-	-	-	-	-	-
AF_6	-	-	-1,5	-8	-	-
AF_7	-	-	-	-	-	-
AF_8	-	-	-	-	-	-
AQ_1	-4,1	-25	-4	-25	-	-
AQ_2	-	-	-1,4	-5	-	-

Ponto	21/4/2007		1/8/2007		9/11/2007	
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
RJ_1	-	-	-	-	-	-
RJ_2	-1,8	-12	-3	-17	-3,0	-17
RJ_3	-1,2	-10	-0,3	-5	1,4	7
RJ_4	-1,4	-10	-0,4	-2	0,6	-1
RJ_5	-1,8	-14	-0,8	-4	0,0	-5
RJ_6	-2	-13	-0,7	-4	-0,1	-6
RJ_7	-	-	-	-	-	-
RJ_8	-0,9	-7	0,7	2	4,4	17
RJ_9	3,8	17	3,2	14	-	-
RJ_10	-	-	-	-	-	-
RJ_11	1,8	4	3,8	15	4,4	21
RJ_12	-0,5	-5	-0,8	-6	-0,6	-7
FR_6	-	-	-2,2	-16	-1,1	-9
SJ_5	4,1	19	2,6	12	4,4	11
AF_1	-2,3	-18	4,2	19	13,4	63
AF_2	-2,3	-19	-1,2	-11	2,2	9
AF_3	-2,2	-18	-0,2	-5	-	-
AF_4	-	-	-	-	-	-
AF_5	-0,5	-7	-	-	9,1	32
AF_6	-0,6	-5	2,3	9	6,9	30
AF_7	2,4	9	5,3	24	10,5	47
AF_8	1,4	4	5,4	21	-	-
AQ_1	-	-	-	-	-	-
AQ_2	-1,4	-12	-1,6	-11	-	-

subterrâneas com valores mais empobrecidos e passaram a receber contribuição do escoamento superficial (mais positivo). Com a ocorrência das chuvas esta cachoeira passa a receber contribuições do escoamento superficial da área de drenagem.

As águas do rio Jacuípe permanecem empobrecidas até a entrada do reservatório de São José. Apenas os afluentes com reservatórios guardam valores mais positivos devido ao efeito da evaporação. O reservatório de São José elevou seu nível significativamente o que necessitou a abertura total das válvulas de descarga de fundo. Isso gerou em Gavião (RJ\_9) o escoamento das águas afetadas pela evaporação do reservatório (isotopicamente mais enriquecidas). Em Riachão do Jacuípe (RJ\_11) a influência desse reservatório na vazão do rio Jacuípe apresenta-se menos significativa, devido a contribuição das águas das chuvas.

Em agosto de 2007 foi realizada a quarta campanha, repetindo o monitoramento dos pontos da campanha anterior. Neste período os afluentes não atingiam mais o rio principal, ficando apenas a

presença do escoamento subsuperficial que ainda contribuía para o escoamento do rio principal. A descarga de fundo do reservatório do França (FR\_6) demonstra uma renovação completa das águas de acordo com os resultados isotópicos desta campanha, uma vez que a descarga de fundo passa a apresentar os valores isotópicos da vazão aflente ao lago.

A quinta campanha, realizada em novembro de 2007, possibilitou a caracterização do período mais seco da região para a presente pesquisa, com as nascentes secas e a vazão do rio reduzida, assim como os níveis dos reservatórios. O  $\delta\text{D}$  variou de -19 ‰ no ponto RJ\_2 (Cachoeira Domingos Lopes), ponto que reúne as nascentes do rio, a +21 ‰ no ponto RJ\_11 (Riachão do Jacuípe), refletindo a ação da evaporação ao longo da bacia.

No trecho alto da bacia apenas a Cachoeira Domingo Lopes (RJ\_2) apresentava vazão e com  $\delta\text{D}$  negativo, indicando que seu escoamento no período seco é proveniente de lençóis subterrâneos que na bacia apresentou valores -25 ‰ para o  $\delta\text{D}$ . A Barra-

gem Angelim (AF\_3) apresentou uma elevação nos valores isotópicos, diferentemente do que foi observado na primeira campanha, indicando uma redução nos níveis dos aquíferos, que contribuíam para manter uma água acumulada mais empobrecida em isótopos pesados, e revelando a ação da evaporação em suas águas. Nessa campanha observa-se um enriquecimento nos valores isotópicos das águas dos afluentes pela ação da evaporação. Apenas os reservatórios com elevado tempo de residência de suas águas apresentaram redução dos isótopos pesados no ponto coletado (FR\_6 e SJ\_5) referente à suas descargas de fundo.

Nessa campanha foi observado valores mais empobrecidos em isótopos pesados para o FR\_6, indicando a contribuição maior das águas superficiais armazenadas para o fluxo do rio em relação ao período referente a campanha anterior.

#### *Análise espacial do escoamento na Bacia do rio Jacuípe*

O escoamento superficial na bacia do rio Jacuípe apresenta uma tendência de enriquecimento de montante a jusante com pico no reservatório de São José, conforme apresentado na Figura 4.

A nascente perene do rio fica na Cachoeira Domingos Lopes (RJ\_2), lugar que reúne as diversas nascentes intermitentes desse rio, com contribuição permanente do rio Preto, que percorre alguns trechos em cavernas.

No trecho do rio entre os reservatórios de França e São José, a composição isotópica da água tem um comportamento similar entre os lugares de Palmeirinhas (RJ\_6) e Cigana (RJ\_5), não havendo variação espacial, apenas temporal. Após as chuvas de fevereiro, na campanha de abril, os valores isotópicos desses pontos refletiam a composição da chuva. Na próxima campanha (agosto/2007) a evaporação tornou a água mais positiva nesse trecho indicando que não há contribuição da água subterrânea e ocorrência de mistura na vazão do rio.

No próximo ponto de análise, RJ\_4, perto da localidade de Umbuzeiros, o rio Jacuípe recebe em período de chuvas intensas a contribuição do seu maior afluente que trazem águas mais positivas que o rio principal, o rio do Ouro (AF\_6), assim como do rio Grande (AF\_8) que também é positivo, mas não tem sua vazão sustentada por muito tempo. AF\_6 apresentou -5 ‰ para o valor de  $\delta D$  em abril de 2007, enquanto o rio principal apresentava -14 ‰, já o AF\_8 apresentava +4 ‰.

A comparação entre os pontos RJ\_3 e RJ\_4, distante 3 km um do outro, possibilita verificar a contribuição do afluente rio dos Patos (AF\_5) e o

impacto de pequenos reservatórios ao longo do rio, uma vez que RJ\_3 é amostrado no lago do reservatório de Manguinhas.

Após a ocorrência de chuvas intensas os valores de  $\delta$  são próximos aos das chuvas e desse afluente que tem caráter efêmero. No período de transição, quando as chuvas são mais escassas e positivas ( $\delta D = +5$  ‰), o rio fica com águas mais afetadas pela evaporação que o reservatório de França.

A marca isotópica em RJ\_3, apesar de ser referente a águas armazenada em um reservatório de pequeno porte, nas primeiras campanhas apresentou um empobrecimento em  $\delta D$  em relação ao ponto anterior. Nas campanhas seguintes verifica-se um aumento do  $\delta D$ , que passa de -10 ‰ em abril para +7 ‰ em novembro, enquanto que em RJ\_4 passa de -10 ‰ em abril para -1 ‰ em novembro. Essa variação reflete a influência do barramento de Manguinhas existente neste trecho do rio.

Na campanha de agosto, quando o nível dos aquíferos ainda está refletindo as chuvas de fevereiro de 2007, o ponto RJ\_3 mostra-se mais negativo que RJ\_4, indicando contribuição ou mistura com águas mais profundas, portanto mais empobrecidas em isótopos pesados.

Próximo a localidade de Morrinhos, depois do barramento de Manguinhas (RJ\_3), foi amostrado o ponto RJ\_8, aonde a água vem mais afetada pela evaporação, indicando que não há mais contribuição predominante da água do reservatório de França para o fluxo do rio neste ponto.

Entre RJ\_3 e RJ\_8 houve um enriquecimento em deutério de +3 ‰ nesta campanha. Seu comportamento fica então caracterizado por acompanhar a composição das águas meteóricas, pois no período de chuvas mais intensas fica mais negativa e no período de chuvas escassas mais positivas, como ocorre com as próprias águas dessas chuvas. Reflete ainda a evaporação ocorrida na sua área de drenagem. Na campanha de novembro de 2007 a variação entre as composições isotópicas do deutério entre RJ\_3 e RJ\_8 foi de +10 ‰.

Em abril de 2007 (terceira campanha) o ponto RJ\_8 recebeu contribuição do afluente rio Sanharol (AF\_7), entretanto apresenta composição isotópica similar a da chuva, sendo a vazão formada predominantemente por essas águas pluviais, com menor contribuição do AF\_7, uma vez que o rio Sanharol, tem águas mais enriquecidas em isótopos pesados, devido à alta residência das águas no reservatório localizado em seu curso. No ponto amostrado próximo a cidade de Gavião (RJ\_9), há uma entrada de água enriquecida logo após o período de

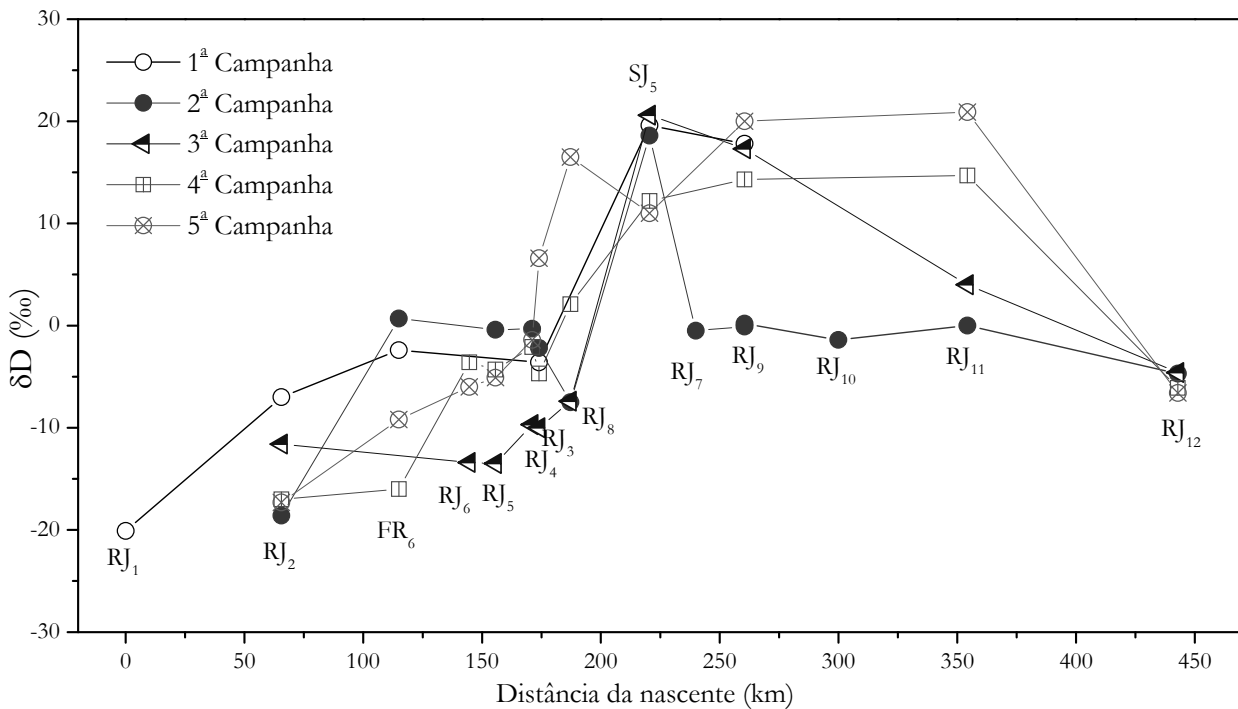


Figura 4 - Variação do  $\delta D$ ‰ ao longo do rio Jacuípe nas cinco campanhas.

chuva. Isso ocorre indicando que o fluxo é proveniente do reservatório e que em novembro de 2006 foi proveniente da chuva ocorrida só nessa área, misturada com as águas vindas do reservatório. O tempo de escoamento desse ponto relativo à contribuição de chuvas intensa foi inferior a três meses no período de investigação de acordo com as visitas a campo realizadas e os afluentes que contribuem para esse ponto pararam de correr em aproximadamente um mês. Em abril de 2007, confirma-se a influência da barragem nesse ponto, que apresenta valores de +17 ‰, contrastando com os valores negativos dos demais pontos do rio e compatível com o valor de +19 ‰ medido na descarga de fundo do São José.

Em Riachão do Jacuípe (RJ<sub>11</sub>), devido à maior área de drenagem, as águas ficam menos positivas, até que águas do reservatório sejam predominantes na vazão dessa seção. No encontro com o rio Paraguaçu (RJ<sub>12</sub>) as águas do rio Jacuípe são mais volumosas e no período estudado não foram percebidas variações nos valores de  $\delta$ .

Os valores de  $\delta D$  para águas subterrâneas ficaram entre -25 e -17 ‰. Já os afluentes do rio Jacuípe apresentaram valores em média mais enriquecidos, com exceção do período de chuvas intensas, quando o escoamento de toda bacia apresentou  $\delta D$  entre -5 a -14 ‰, influenciadas pela água de chuva

confirmando que o escoamento em região semi-árida é resposta direta a ocorrência de chuvas.

Para a caracterização das águas superficiais da bacia do rio Jacuípe no período estudado foi utilizada a linha de evaporação local definida por Fontes (2008), que reflete as características de bacias do semi-árido com predominância de águas evaporadas em seus mananciais, inclusive na época mais chuvosa e úmida. A linha de evaporação local (LEL) tem inclinação de 4,8 (valor médio de todas as campanhas), valor esperado no semi-árido para águas que sofreram evaporação. A Figura 5 ilustra a LMG e a LEL para a Bacia do rio Jacuípe.

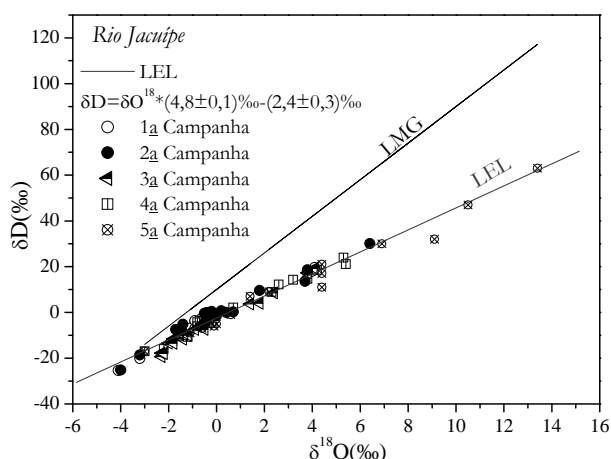
Tabela 3 - Valores ajustados do  $\delta D$ (‰)  $\times$   $\delta^{18}O$  (‰) para as quatro campanha e valor médio.

Bacia do Jacuípe	Ajuste linear	R
1ª Campanha	$(5,2 \pm 0,2) \cdot \delta^{18}O - (1,3 \pm 0,5) \text{‰}$	0,99
2ª Campanha	$(4,9 \pm 0,2) \cdot \delta^{18}O - (0,7 \pm 0,5) \text{‰}$	0,98
3ª Campanha	$(5,5 \pm 0,2) \cdot \delta^{18}O - (3,8 \pm 0,4) \text{‰}$	0,99
4ª Campanha	$(4,9 \pm 0,2) \cdot \delta^{18}O - (2,4 \pm 0,4) \text{‰}$	0,99
5ª Campanha	$(4,7 \pm 0,2) \cdot \delta^{18}O - (3,7 \pm 1,1) \text{‰}$	0,99
LEL	$(4,8 \pm 0,1) \cdot \delta^{18}O - (2,4 \pm 0,3) \text{‰}$	0,99



Tabela 4 - Resumo da origem do escoamento nos pontos monitorados ao longo do rio Jacuípe.

Ponto	Localidade	Origem predominante do escoamento	
		Período chuva intensa	Período seco
RJ_1	Nascente	água subterrânea	água subterrânea
RJ_2	Cachoeira Domingos Lopes	chuva	água subterrânea
RJ_3	Manguinhas	chuva e rio dos Patos	água armazenada e água subterrânea
RJ_4	Umbuzeiro	chuva, rio do Ouro e rio Grande	área de drenagem
RJ_5	Cigana	chuva	reservatório FR
RJ_6	Palmeirinha	chuva	reservatório FR
RJ_7	Gavião	chuva	reservatório SJ
RJ_8	Morrinhos	chuva e rio Sanharol	área de drenagem
RJ_9	Gavião	reservatório SJ	reservatório SJ
RJ_10	Barreiros	chuva	reservatório SJ
RJ_11	Riachão do Jacuípe	chuva	área de drenagem
RJ_12	Ponte - Feira de Santana	rio Paraguaçu	rio Paraguaçu

Figura 5 - Diagrama do  $\delta D(\text{‰}) \times \delta^{18}O(\text{‰})$  dos pontos amostrados durante as quatro campanhas no rio Jacuípe.

O coeficiente de correlação de 0,99, para a linha de evaporação local, indica que os valores de  $\delta D(\text{‰})$  e  $\delta^{18}O(\text{‰})$  estão bem correlacionados, inclusive os valores parciais indicados na Tabela 3.

A Tabela 4 sintetiza a origem do escoamento nos pontos monitorados ao longo do rio Jacuípe.

As linhas de evaporação local (referente as águas superficiais) na bacia do rio Jacuípe apresentam inclinação menor que 8, indicando que são águas mais evaporadas, corroborando com o resultado de Matsui (1978), para a bacia do rio Pajeú (PE), que foi de  $\delta D(\text{‰}) = 6,4 \delta^{18}O + 5,5\text{‰}$ ; e de Phil-

lips et al. (2002), para a bacia do Rio Grande, região árida no sudoeste dos EUA, que foi de  $\delta D(\text{‰}) = 5,1 \delta^{18}O - 28\text{‰}$ .

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesse trabalho possibilitam o entendimento do fluxo de água em bacias hidrográficas e interação entre águas superficiais, subterrâneas e meteóricas em cenários com rios de fluxo intermitente, chuvas concentradas em curtos períodos com eventos chuvosos extremos.

A variação espaço-temporal dos isótopos permitiu estabelecer a origem do escoamento nos pontos amostrados do rio principal identificando as inferências das águas subterrâneas e meteóricas.

No trecho próximo a nascente, verifica-se a predominância da contribuição da água subterrânea, entretanto foi observado presença de poços que interferem no fluxo superficial fazendo com que o rio Jacuípe, no trecho alto, tenha seu escoamento mantido predominantemente na ocorrência de chuva.

Os resultados mostram a grande contribuição das águas meteóricas para o escoamento do rio e provimento dos reservatórios durante o período chuvoso, entretanto durante o período seco o escoamento é predominantemente de contribuição subterrânea (principalmente próximo a nascente) e

provenientes das águas armazenadas nos reservatórios.

Este entendimento da dinâmica de fluxo das águas da bacia do rio Jacuípe pode contribuir com a gestão dos recursos hídricos desta área, que deve ser definida de acordo com as diretrizes do CNRH, subsidiando o processo de tomadas de decisão embasado no comportamento do rio principal, considerando a interdependência das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPESB, FINEP, CT-HIDRO e a Rede de Hidrologia do semi-árido – REHISA pelo suporte.

## REFERÊNCIAS

- Bennet K.E., Gibson J. e McEachern, P. M. 2008. Water-yield estimates for critical loadings assessment: comparisons of gauging methods versus an isotopic approach. *Can. J. Fish. Aquat.*, 65:83–99.
- 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.
- Buttle J. e Peters D. 1997. Hydrograph separation using isotopic and geochemical tracers: a re-evaluation, *Hydrological Processes*, 11:557–573.
- Cameron E.M., Hall G.E.M., Veizer J. e Krouse H.R. 1995. Isotopic and elemental hydrogeochemistry of a major river system; Fraser River, British Columbia, Canada, *Chemical Geology*, 122:149–169.
- Craig H. 1961. Isotope variations in meteoric waters, *Science*, 133:1702–1703.
- Craig H. e Gordon L.I. 1965. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere, *Marine Geochemistry, Narragansett Marine Laboratory, University of Rhode Island*, 3:277–374.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopic in Precipitation. *Tellus*, 16:436–468.
- Dincer T. 1968. The use of oxygen-18 and deuterium concentrations in the water balance of lakes. *Water Resources Research*, 4:1289–1305.
- Epstein, S. and Mayeda, T. (1953). Variation of  $^{18}\text{O}$  content of water from natural sources. *Geochem. and Cosmochem. Acta* 4, 213.
- Fontes, A. S. (2008). Vulnerabilidade à salinização das águas superficiais da bacia do rio Jacuípe por meio de traçadores ambientais. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. 193p.
- Gat J. 1970. Environmental isotope balance of lake tiberias, Isotopes. In: *Hydrology*. IAEA: Vienna, Austria, pp. 151–162.
- Gibson J.J. 2002. Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow arctic lakes using non-steady isotope mass balance. *Journal of Hydrology*, 264:242–261.
- Gibson J.J. e Prowse T. 2002. Stable isotopes in river ice: identifying primary over-winter streamflow signals and their hydrological significance. *Hydrol. Process.*, 16:873–890.
- Gibson J.J., Edwards T., Birks S., St Amour N., Buhay W., McEachern P., Wolfe B. e Peters D. 2005. Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrol. Process*, 19:303–327.
- Gibson, J.; Edwards, T. e Prowse, T. (1996) Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation, *Hydrological Processes*, 10:1369–1382.
- Hitchon B. e Krouse H. 1972. Hydrogeochemistry of surface waters of the mackenzie river drainage basin, canada-iii. stable isotopes of oxygen, carbon and sulphur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36:1337–1357.
- Kendall C. e Coplen T. 2001. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the united states, *Journal Hydrol. Processes*, 15:1363–1393.
- Laudon H. e Slaymaker O. 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: and alpine example. *Journal of Hydrology*, 201:82–101.
- Machavarán M. & Krishnamurthy R. 1994. Earth surface evaporative processes: a case study from the great lakes region of the united states based on deuterium excess in precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:4279–4283.
- Matsui, E (1978) Origem da dinâmica da salinização da água do nordeste brasileiro – Bacia do Pajeú – PE, Tese de Doutorado em solos e nutrição de plantas, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Mook W.G. & Vries J.J. 2001. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*. vol. 1, International Agency of Atomic Energy.
- Moore R. 1989. Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, southern laurentians, Quebec. *Journal of Hydrology*, 112:135–148.
- Phillips, F.M., Hogan, J., Mills, S.K., and Hendrickx, J.M.H. 2002. *Environmental Tracers for Assessing Water and Salt Balances in Arid-Region River Basins*. Dubai International Conference. On Water Resources

- and Integrated Management in the Third Millennium, Dubai, UAE. Acesso em: 02/2009. Disponível em: [http://www.sahra.arizona.edu/research/TA2/2\\_7.html](http://www.sahra.arizona.edu/research/TA2/2_7.html)
- SEI – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (2007). Disponível em: <<http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/cartogramas>> Acessado em novembro de 2010.
- 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>.
- Wels C., Cornett R. & LaZerte B. 1991. Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of Hydrology*, 122:253–274.
- Vitvar T. & Aggarwal P. 2007. Global Network is launched to monitor isotopes in rivers. *Eos Trans. AGU*, 88:1–2.
- Vorosmarty C. & Meybeck M. 2004. Responses of continental aquatic systems at the global scale: New paradigms, new methods, in *Vegetation, Water, Humans and Climates*, Springer, Heidelberg, Germany.

### ***Study of Water Flux Dynamics in the Jacuípe River Basin Using Environmental Tracers***

#### **ABSTRACT**

*This research aims at the study of water flux and interaction of surface water, ground water and meteoric water in the Jacuípe river basin, a 12,163 km<sup>2</sup> area representative of the semiarid region in State of Bahia, using environmental tracers. The results show the potential of environmental tracers to understand the hydrologic cycle in the study area which has insufficient hydrologic measured data. The runoff in the Jacuípe river basin shows a trend of heavy isotope enrichment downstream with a maximum value in São José do Jacuípe reservoir, which reflects the evaporation effect over the river basin and the interference of stream exploitation. The results shows the contribution of meteoric waters to runoff and reservoir supply when heavy rainfall occurs, but in the dry season the runoff is mainly from groundwater contributions and water supply in reservoirs.*

*Key-words: Flux dynamics, semi-arid, environmental tracers.*