

ORIGEM DA ÁGUA NO LENÇOL DE FORTALEZA

Horst Frischkorn¹; Peter Horn²; Maria Marlúcia Freitas Santiago³ &

Luiz Alberto Ribeiro Mendonça³

Resumo – O abastecimento de água de Fortaleza é baseado na importação de cerca de 5,3 m³/s provenientes de açudes alimentados por água oriundas de áreas onde o embasamento cristalino aflora. Devido à falta de um sistema abrangente de esgoto, a maior parte da água no lençol da cidade é infiltrada através das fossas. Com a implantação do projeto SANEAR, que visa a instalação de esgoto em quase toda a área urbana, esta recarga do lençol é desviada diretamente para o mar. Em consequência, o lençol de Fortaleza pode sofrer drásticas mudanças. Medidas de O-18 e de Sr-87/ Sr-86 na água de abastecimento, na chuva e na água do lençol são usadas para avaliar a parcela de água importada no lençol de Fortaleza, que é da ordem de 30%.

Abstract – Public water supplies to Fortaleza are based on the importation of about 5.3 m³/s from dams that receive water from the crystalline interior of the State. Due to the absence of a sewage system, the major part of this is being injected into the water-table at present. After the installation of the sewage system through the SANEAR-project, this contribution will be channeled directly to the ocean. Consequently, the water table of Fortaleza will suffer drastic changes. Measurements of O-18 and Sr-87/Sr-86 in the supply water, in local rainfall and in the water table of Fortaleza are being used in the evaluation of the fraction of water imported into the water-table of Fortaleza, that turns out to be about 30%.

Palavras-chave – oxigênio-18; estrôncio-87; saneamento.

INTRODUÇÃO

O Governo do Estado do Ceará está implantando, no Município de Fortaleza, desde 1995, o Projeto SANEAR que visa a instalação de saneamento básico em aproximadamente 95% da área. Até então, somente 13% da área era dotada com saneamento. Esta expansão da rede de esgotos, que significa a re-exportação da água importada pela CAGECE, tem consequências para a hidrologia da área.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, Caixa Postal 6018, CEP 60451-970, Fortaleza, CE, Tel.: (0xx85)288.9775, Fax: (0xx85)288.9627, e-mail: cariri@ufc.br.

² Maximilians Universität, Munique - Alemanha.

³ Departamento de Física da UFC, Tel.: (0xx85)288.9913, Fax: (0xx85)288. 9450, e-mail: marlucia@fisica.ufc.br.

Uma rápida avaliação da situação mostra que o problema existe: Fortaleza é abastecida, pela CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará) com aproximadamente $5,3\text{m}^3/\text{s}$, provenientes de açudes no interior do Ceará. Desta vazão, cerca de 40% são “perdidas” em transito por vazamentos e por “consumo não autorizado”. Portanto, $3,2\text{m}^3/\text{s}$ chegam aos destinatários. Estima-se que, destes, 60% têm como destino final a fossa, alimentando o lençol freático. Desta maneira, o lençol de Fortaleza recebe uma recarga artificial, por águas importadas, de aproximadamente $1,9\text{m}^3/\text{s}$ ou $6 \cdot 10^7 \text{m}^3/\text{ano}$.

A pluviosidade de Fortaleza é de cerca de 1300 mm/ano o que resulta em um volume de $1,3 \cdot 10^9 \text{m}^3/\text{ano}$ sobre a área urbana de aproximadamente 1000km^2 (dos quais 336km^2 são da sede). Adotando como base uma infiltração de 10% (o que parece justificável pelos solos arenosos, a existência (ainda) de lagoas e pelo fato da área impermeabilizada cobrir somente cerca de 1/3 da área), resulta uma recarga da ordem de $13 \cdot 10^7 \text{m}^3/\text{ano}$. Desta forma constata-se que aproximadamente 30% provem da recarga pela água de abastecimento. Com a conclusão do projeto SANEAR irá faltar esta contribuição, afetando seriamente o lençol de Fortaleza.

Testamos esta hipótese usando dois métodos, diferentes e independentes, da hidrologia de isótopos ambientais:

- o primeiro usa a razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ do oxigênio como traçador para águas que sofreram evaporação, como acontece com as águas estocadas nos açudes da CAGECE;
- o segundo explora a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que marca as águas de acordo com o ambiente geoquímico no qual se mineralizam.

As bacias hidrográficas que alimentam os açudes Gavião e Riachão/Pacoti do sistema de abastecimento de Fortaleza situam-se no cristalino onde rochas gnáissicas e graníticas afloram (Figura 1). As águas destes açudes, aduzidas para a região urbana, têm $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ muito diferente das águas de chuva acumuladas no lençol de Fortaleza.

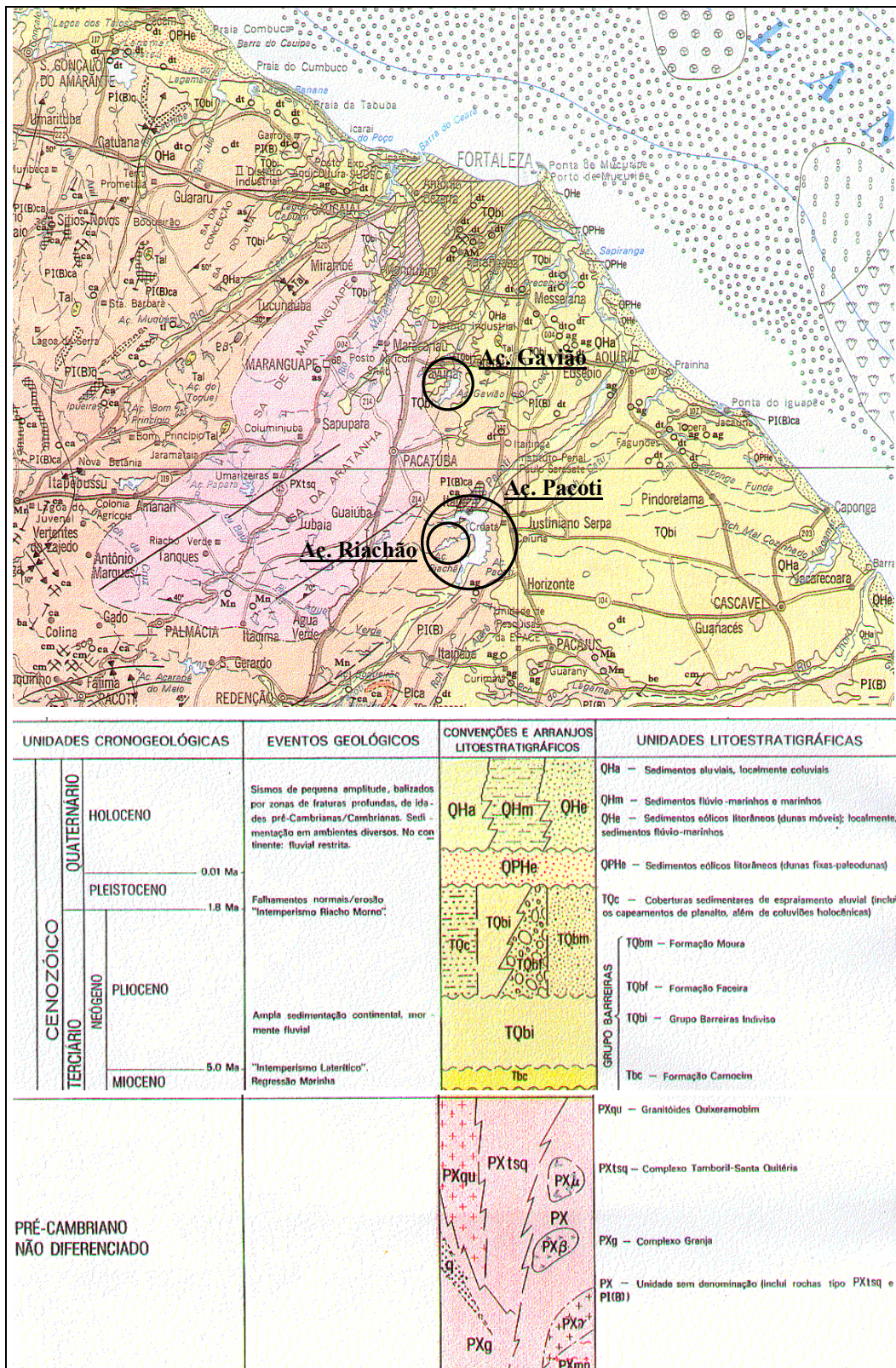


Figura 1 – Mapa geológico com localização dos açudes do sistema de abastecimento de Fortaleza.

METODOLOGIA

Oxigênio-18

O aproveitamento de isótopos ambientais na hidrologia iniciou-se no final da década de 60 depois de Dansgaard publicar seu trabalho pioneiro “Stable Isotopes in Precipitation” [1], onde apresentou análises das razões isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$ para aproximadamente 40 locais cujas temperaturas médias anuais variam de -50°C até $+25^\circ\text{C}$. O empobrecimento das chuvas em isótopos pesados foi descrito em relação ao padrão “Standard Mean Ocean Water – SMOW” usando a nomenclatura do “valor de $\delta\text{‰}$ ” definido por

$$\delta\text{‰} = \frac{Ra - Rp}{Rp} * 10^3, \quad (1)$$

onde, Ra e Rp são as razões isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/^1\text{H}$ para a amostra e para a água padrão respectivamente. Desde então um grande numero de trabalhos usando métodos de isótopos ambientais tem sido publicado, dentre estes os desenvolvidos pelo Grupo de Hidrologia Isotópica da UFC, que há 25 anos, estuda a paleoclimatologia do Nordeste e a salinização de águas subterrâneas e superficiais [2], [3] e [4].

Em águas sujeitas a processos de transições de fase (evaporação/condensação e fusão/congelamento) com remoção da fase final, ocorrem mudanças em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Neste trabalho estudamos o enriquecimento em ^{18}O pela evaporação, em relação às chuvas, das águas estocadas nos açudes de abastecimento de Fortaleza.

O valor médio ponderado da chuva (monitorada pela Agência Internacional de Energia Atômica/ IAEA durante 1968 a 1976) é de $\delta^{18}\text{O} \approx -2,52\text{‰}$ [5]. Medidas anteriores [6] e deste trabalho mostram que as águas pluviais infiltram rapidamente nos solos arenosos de Fortaleza sem modificação significativa de sua composição isotópica pela evaporação atingindo, portanto, o lençol freático com este $\delta^{18}\text{O}$.

Em contraste, a água dos açudes é marcada pela evaporação que eleva a concentração de ^{18}O . Medidas de ^{18}O em amostras de água da CAGECE, feitas em 1988, produziram uma média de $\delta^{18}\text{O} = +3,07\text{‰}$, com o valor mais baixo de $+2,64\text{‰}$ em junho, após a entrada de águas novas, e o mais alto de $+4,7\text{‰}$, no final da época seca (Figura 2). Como o erro de uma medida de $\delta^{18}\text{O}$ é menor que $0,1\text{‰}$, podemos afirmar que as contribuições para a recarga do aquífero de Fortaleza proveniente da chuva, de um lado, e da água dos açudes, importada pela CAGECE são significativamente diferentes isotopicamente. Assim, é possível determinar sua razão de mistura, através do valor médio ponderado, δ_3 , dos componentes com δ_1 e δ_2 com pesos “a” e “1-a”, respectivamente:

$$\delta_3 = a\delta_1 + (1 - a)\delta_2, \quad (2)$$

$$\text{com } a = \frac{\delta_3 - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2}.$$

As medidas de ^{18}O desta pesquisa foram feitas, por espectrometria de massa, pela Hydroisotop GmbH, em Schweitenkirchen/ Alemanha, seguindo procedimentos padronizados, descritos na literatura especializada [7] e [8].

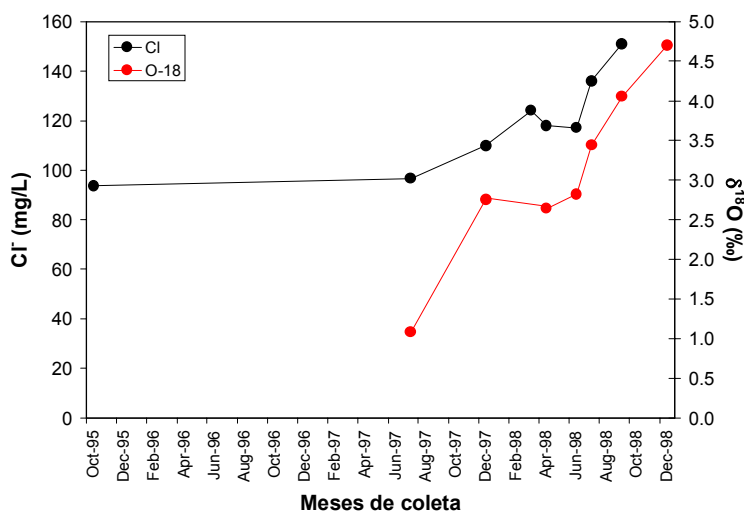


Figura 2 - Cl⁻ e $\delta^{18}\text{O}$ vs. tempo em amostras do abastecimento de água da CAGECE.

Estrôncio

Estrôncio é encontrado na natureza com quatro isótopos estáveis: ^{84}Sr (0,56%), ^{86}Sr (9,86%), ^{87}Sr (7,0%) e ^{88}Sr (82,58%). O isótopo ^{87}Sr , produzido pelo decaimento β^- do isótopo de rubídio de mesmo número de massa, ^{87}Rb (meia vida $4,9 \cdot 10^{10}$ a), ocupa um lugar especial. Na geoquímica, as razões isotópicas do radiogênico ^{87}Sr e de seu “núcleo-mãe” ^{87}Rb , em relação ao não-radiogênico, primordial ^{86}Sr , são usadas na datação de rochas.

Como estrôncio forma cátions bivalentes Sr^{++} , ele substitui com facilidade Ca^{++} em carbonatos, sulfatos, feldspatos e outros minerais. Assim, junto com o cálcio, o estrôncio participa nas reações entre água e rocha do aquífero. A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostrou-se [9], [10] e [11] um indicador útil para interações água/rocha e um bom traçador do movimento de água no aquífero e da origem da salinidade.

De acordo com a literatura [12], a água do mar tem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,709$ enquanto rochas continentais se situam entre 0,710 e 0,740. Em chuva costeira como a de Fortaleza, gerada, principalmente, pela nucleação por aerossóis marinhos, espera-se um valor perto da água do mar, enquanto as águas dos açudes no cristalino, importadas para Fortaleza pela CAGECE, devem ser marcadas pelos gnaisses e granitos de seu ambiente. Nas chuvas de Fortaleza, a razão média foi 0,71089 e na água da CAGECE encontramos um valor médio de 0,71749 (Tabela 1). Água de

chuva infiltrada em dunas apresenta 0,71314. A diferença entre estes valores é grande devido a altíssima precisão das medidas, com erro menor que 0,005%.

Sendo R_1 e R_2 as razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nos componentes de mistura, C_1 e C_2 as respectivas concentrações de estrôncio e “x” e “(1-x)” as suas frações volumétricas, então a razão isotópica, R_3 , da mistura é dada por

$$xc_1R_1 + (1-x)c_2R_2 = (xc_1 + (1-x)c_2)R_3. \quad (3)$$

As medidas foram feitas pelo Dr. Peter Horn no Instituto de Mineralogia, Petrologia e Geoquímica da Ludwig – Maximilians – Universidade de Munique/ Alemanha (IMPG). As concentrações de elementos traços foram determinados por AES (Atomic Emission Spectrophotometry) e AAS (Atomic Absorption Spectro-photometry) de chama. As razões isotópicas foram medidas com um espectrômetro de massa FINNIGAN MAT 261 seguindo procedimentos de ID-TIMS (Isotope Dilution – Thermionic Mass Spectrometry) [13] e [14].

Hidroquímica

A química de parte das amostras, marcadas por “*” na tabela 1, foi feita em Fortaleza pelo NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial) e o restante foi medido no IMPG da Universidade de Munique.

Tabela 1 – Identificação e caracterização química e isotópica das amostras

Amostra	Data coleta	Concentração (mg/L)						$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (‰)
		Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Sr^{++}	Cl^-		
Hotel Colonial									
HC1	6/98	1970	88,8	200,7	75,0	2,00	2360	-0,57	0,70933
HC2	7/98	-	-	-	-	-	-	-0,67	-
Leste/Oeste									
LO1	12/97	50,2	19,5	20,9	38,5	0,30	83,4	-1,96	-
LO2*	3/98	320	65	22,2	37,6	-	497	-	-
LO3	4/98	58,5	18,0	19,0	34,2	0,32	62,2	-2,51	0,71429
LO4	6/98	63,0	17,0	17,6	29,9	0,20	49,9	-2,76	-
LO5	7/98	52,2	15,6	17,3	30,4	0,23	62,9	-2,60	-
LO6	8/98	55,1	16,6	18,2	32,9	0,24	71,6	-2,66	-
LO7	10/98	46,3	16,5	19,0	35,4	0,25	75,0	-2,52	-
LO8	12/98	-	-	-	-	-	-	-2,52	-
Sanear									
S0*	10/95	9,0	3,4	-	-	0,015	-	-	0,71170
S1	7/97	86,4	77,7	21,4	29,3	0,24	117,0	-	0,71676
S2	7/97	113,6	30,8	28,0	27,1	0,38	156,0	-1,48	0,71921
S3	12/97	91,3	24,7	21,9	47,6	0,30	111,0	-1,43	0,71515
S4*	3/98	62	56	26,3	10,1	-	131,0	-	-
S5*	3/98	151	56	59,1	6,1	-	154,0	-	-
S6	4/98	83,3	21,9	18,9	33,8	0,20	118,0	-2,08	0,71512
S7	6/98	88,5	18,9	12,8	9,5	0,10	47,2	-1,99	-
S8	7/98	84,5	25,6	21,2	20,6	0,29	126,0	-0,35	-
S9	8/98	51,5	10,5	16,3	42,1	0,23	91,4	-0,57	-
S10	8/98	72,2	10,8	18,1	31,9	0,21	107,0	-1,02	-
Sta. Edwirges									
SE1	4/98	89,7	22,0	17,2	28,1	0,38	132	-1,50	0,71574
SE2	6/98	85,2	22,4	17,7	27,3	0,2	92,7	-1,43	-
SE3	7/98	82,4	21,2	16,0	22,0	0,24	108	-1,65	-
SE4	8/98	82,6	20,2	15,9	23,2	0,25	105	-1,50	-
SE5	10/98	87,9	18,3	11,8	16,3	0,19	96,6	-2,04	-
SE6	12/98	-	-	-	-	-	-	-2,09	-
Edifício Ellery									
EE0*	10/95	91,0	10,5	-	-	0,17	-	-	0,71434
EE1	12/97	52,9	7,7	20,8	9,0	0,24	75,8	-1,52	0,71433
EE2*	3/98	40	15	21,6	16,2	-	91,0	-	-
EE3	4/98	51,4	7,7	21,0	9,6	0,24	84,2	-	-
EE4	6/98	53,9	8,1	20,4	9,9	0,15	71,5	-0,70	0,71438
EE5	7/98	55,9	7,8	20,1	10,7	0,18	98,3	-0,60	-
EE6	9/98	57,5	7,9	20,6	10,7	0,17	89,7	-0,27	-
EE7	10/98	60,9	7,7	20,7	10,6	0,15	96,6	-0,18	-
EE8	12/98	-	-	-	-	-	-	-0,55	-

* Análises químicas feitas em Fortaleza

Tabela 1 – Identificação e caracterização química e isotópica das amostras (continuação)

Amostra	Data	Concentração (mg/L)						$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (‰)
		Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Sr^{++}	Cl^-		
CAGECE									
LI0*	10/95	45,0	4,6	-	-	0,07	93,7	-	0,71754
LI1	7/97	46,4	4,4	10,6	9,3	0,24	96,6	+1,08	0,71651
LI2	12/97	54,0	5,5	13,5	9,4	0,24	110,0	+2,76	-
LI3*	3/98	52,0	8	15,0	16,6	-	124,0	-	-
LI4	4/98	60,2	4,9	14,1	10,6	0,28	118,0	+2,64	0,71705
LI5	6/98	69,8	5,3	16,8	11,8	0,2	117,0	+2,82	0,71880
LI6	7/98	76,3	5,7	18,6	14,0	0,23	136,0	+3,44	-
LI7	9/98	94,3	6,5	22,0	15,5	0,29	151,0	+4,05	-
LI8	12/98	-	-	-	-	-	-	+4,70	-
Casa Luiz									
CL1	7/97	112,7	39,4	17,6	68,6	0,46	123,0	-1,70	0,71502
CL2	6/98	87,1	29,1	18,7	50,4	0,25	106,0	-	-
CL3	6/98	-	-	-	-	-	-	+0,81	-
CL4	9/98	69,7	19,1	10,8	28,1	0,20	84,5	-0,48	-
CL5	10/98	73,9	19,9	10,8	29,0	0,19	89,7	-0,51	-
CL6	12/98	-	-	-	-	-	-	-0,06	-
Casa M. Aurélio									
MA	7/97	99,1	11,3	16,0	24,8	0,20	149,0	-	0,71257
Beira Mar									
BM	4/98	67,5	15,8	19,8	40,5	0,34	104,0	-	0,71211
Dunas									
DU	4/98	7,7	1,48	1,7	1,05	0,12	16,0	-2,55	0,71314
Chuva									
C*	11/95	7,4	1,1	-	-	0,012	13,1	-	0,71089
Mar									
M+	-	10850	399	1290	413	7,6	19500	-	0,70923

* Análises químicas feitas em Fortaleza
+ Valor de Faure [15]

LOCAIS DE AMOSTRAGEM

Foram tomadas amostras de água de abastecimento pela CAGECE, água subterrânea rasa e profunda e de chuva nos locais indicados na figura 3 e na tabela 2.



Figura 3 – Mapa de Fortaleza com os locais de amostragem. Onde: LO - Av. Leste - Oeste, SE - Posto Sta. Edwirges, EE - Ed. Ellery, MA - Casa Marco Aurélio, CL - Casa Luiz, LI – CAGECE (água de fornecimento) HC - Hotel Colonial, C - Chuva, S1... - Bombeamentos de rebaixamento do projeto SANEAR.

Tabela 2 – Caracterização dos pontos de amostragens

Amostra	Local	Bairro	Prof. (m)	NE (m)	Distância ao mar (m)
HC1 a HC2	Colonial Praia Hotel	Meireles	25,0	-	80
LO1 a LO9	Av. Leste-oeste	Barra do Ceará	12,0	3,0	-
S0	SANEAR	Parque Araxá	4,0	-	-
S1	SANEAR	Pirambú	3,5	-	-
S2	SANEAR	Álvaro Weyne	3,5	-	-
S3	SANEAR	Cristo Redentor	4,0	-	-
S4	SANEAR	Montese	3,0	-	-
S5	SANEAR	Montese	2,5	-	-
S6	SANEAR	Vila Elery	3,5	-	-
S7	SANEAR	Monte Castelo	3,5	-	-
S8	SANEAR	Álvaro Weyne	3,5	-	-
S9	SANEAR	São Geraldo	3,5	-	-
S10	SANEAR	Parquândia	4,0	-	-
SE1 a SE6	Sta. Edwirges	Pirambú	30,0	-	50
EE0 a EE8	Edifício Ellery	Meireles	35,0	12,0	80
LI0 a LI8	Loja Iolanda	Parreão	-	-	-
CL1 a CL6	Casa Luiz	Parque Araxá	10,0	5,0	-
MA	Casa Marco Aurélio	Amadeu Furtado	15,0	2,5	-
BM	Beira Mar	Meireles	-	-	5
DU	Beach Park	Porto das dunas	110,0	97,0	600
C (chuva)	Praça Portugal	Meireles	-	-	-

RESULTADOS

Foram medidas as razões isotópicas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e as concentrações de Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Sr^{++} e Cl^- . Os resultados encontram-se na tabela 1, juntos com a denominação da amostra e a data da coleta.

A amostra do Hotel Colonial, próximo ao mar, com mais que 2000 mg/L, sugere intrusão marinha. Como a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,70933 coincide até a terceira casa decimal com a do mar (0,70923) confirma a hipótese de intrusão marinha. Também as razões dos outros elementos em relação ao cloreto são próximas às marinhas – porém levemente elevadas. O valor de $r\text{Na}^{++}/r\text{Cl}^-$ de 0,83 é nitidamente elevado em relação ao do mar (0,556), provavelmente porque o cloro foi sub-avaliado.

Esta amostra é a única que denuncia uma intrusão marinha. Os locais Sta. Edwirges (SE) e Ed. Ellery (EE), embora igualmente pertos do mar, e mesmo o chuveiro da praia (BM) não revelam influência direta de água do mar.

As amostras da Av. Leste-Oeste apesar da proximidade do mar ($\approx 500\text{m}$), têm razões elevadas de $r\text{Ca}^{++}/r\text{Na}^+$ (0,60), $r\text{Ca}^{++}/r\text{Cl}^-$ (0,48) e $r\text{Mg}^{++}/r\text{Cl}^-$ (0,28), indicando influência predominante terrestre, possivelmente por carbonatos. Igualmente, as altas razões $r\text{K}^+/r\text{Cl}^-$ (0,26) e $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$

(0,84) documentam a influência limitada do mar (com razões, respectivamente de 0,04; 0,02; 0,07; 0,02 e 0,56).

Todas estas razões variam em larga faixa, mostrando que trata-se de águas rasas que sofrem várias influências, das quais a mais forte é a das chuvas como revelam os valores $\delta^{18}\text{O}$ negativos e iguais aos da chuva.

As amostras indicadas com S de SANEAR foram retiradas do bombeamento de rebaixamento do lençol para instalação do sistema de esgotos em vários locais da cidade e em profundidades entre 2,5 e 4,5 metros. São águas rasas com grande variação de condições hidrogeológicas o que leva a uma larga gama de valores para todos os parâmetros. O mesmo vale para os locais Casa Luiz (CL) e Casa Marco Aurélio (MA) que igualmente captam águas rasas. Ficou claro, assim, que, com este tipo de amostragem, precisa-se de um número muito elevado de amostras para obter resultados representativos. Concentramos então nosso esforço em locais perto do mar, no sopé das Dunas, onde poços profundos exploram o fluxo integrado de água doce para o mar.

As amostras de Sta. Edwirges apresentam valores estáveis, nas concentrações absolutas e também nas razões dos elementos. Isso significa que são valores médios no tempo e no espaço; portanto, bons representantes das águas desta parte da cidade interceptadas pelo poço antes de desaguar no mar.

Também as amostras do Edifício Ellery são marcadas pela alta constância nas concentrações absolutas e nas razões dos elementos. Considerando os erros experimentais, praticamente todas as amostras deram resultados iguais. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varia somente na quinta casa decimal durante um intervalo de 3 anos! Aqui, como também no local Posto Sta. Edwirges, conseguimos amostrar uma parte do fluxo integrado, independente das mudanças sazonais na pluviosidade e na qualidade da água de fornecimento.

As águas de abastecimento pela CAGECE formam um grupo cuja característica é o crescimento dos elementos maiores Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , e Ca^{++} como também de $\delta^{18}\text{O}$ durante o período de observação (Figura 2). O fato das concentrações não baixarem após o período chuvoso, no início de 1998, ilustra a baixa pluviosidade que não levou a uma renovação significativa da água nos reservatórios.

Na figura 2 vê-se o paralelismo entre O-18 e Cl^- , o que revela que o aumento na concentração dos elementos é causado pela evaporação (que marca $\delta^{18}\text{O}$ pois deixa a água remanente enriquecida em O-18). Porém, plotando Cl^- vs. Na^+ (Figura 4) observa-se que a reta não passa pela origem das coordenadas, mas apresenta um excesso de Cl^- ou então, um déficit de Na^+ . A segunda possibilidade é muito mais razoável, pois fontes isoladas de Cl^- são improváveis. Processos de

troca iônica com produtos do intemperismo de rochas do embasamento cristalino oferecem uma explicação, como exemplificado pela transformação de montmorilonita para caolinita:

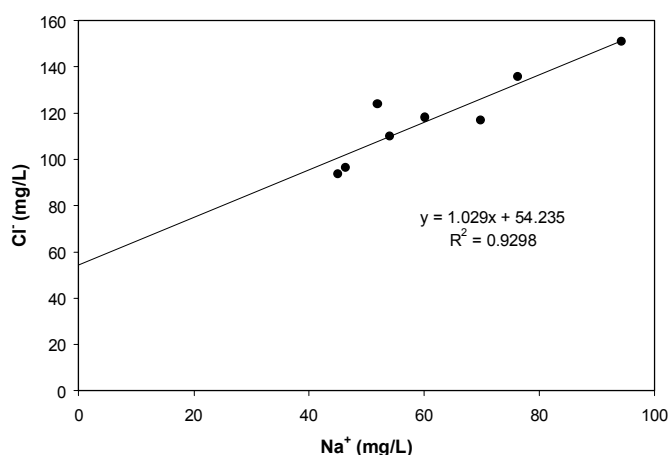
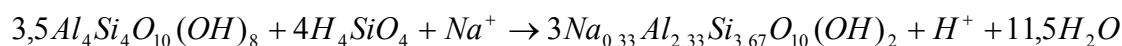


Figura 4 – Na⁺ vs. Cl⁻ para amostras da CAGECE

É interessante uma sinopse com a relação Cl⁻ vs. Na⁺ para águas costeiras representadas na figura 5, onde a reta passa, praticamente pela origem das coordenadas, indicando fraca influência de reações de troca iônica.

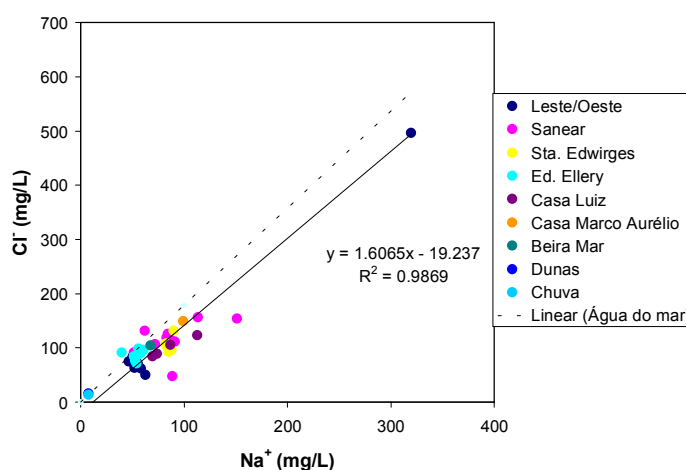


Figura 5 – Na⁺ vs. Cl⁻ para todas as amostras exceto da CAGECE

As relações elevadas de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, nas águas da CAGECE, entre 0,71651 e 0,71880 com média de 0,71749 se explicam pela influência do ambiente granítico das bacias hidrográficas dos açudes. São os valores maiores de todas amostras. Igualmente extremos são os valores de δ¹⁸O, variando entre +1,08‰ e +4,70‰ com valor médio de 3,07‰. A grande diferença entre estes

valores e o da chuva permitem a aplicação de $\delta^{18}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ como traçadores para a água da CAGECE no lençol.

A amostra de dunas DU provém das dunas ao leste de Fortaleza onde não existe outra fonte de recarga senão a chuva. Tomada a uma profundidade de 97m no aquífero virgem, representa a recarga média plurianual pelas chuvas. O valor $\delta^{18}\text{O} = -2,55\text{‰}$ deve, portanto, caracterizar o valor médio das chuvas infiltradas. É praticamente idêntico aos $-2,52\text{‰}$ encontrados pela IAEA [5] como média ponderada para o intervalo de 1968 a 1976. Porém, esta coincidência tem que ser considerada como casual, já que o erro da medida é da ordem de 0,1‰. Também, as águas infiltradas representam uma amostragem “viciada” das chuvas, pois a infiltração prefere eventos de maior pluviosidade enquanto chuvas fracas evaporam. Como chuvas intensas têm um $\delta^{18}\text{O}$ mais negativo (“Efeito de quantidade”, $-0,7\text{‰}/100\text{ mm}$ para chuvas mensais de Fortaleza [5]), água subterrânea formada por infiltração direta de água de chuva tem, normalmente, $\delta^{18}\text{O}$ mais negativo que as chuvas. Este efeito é observado, por exemplo, em algumas amostras da Av. Leste-Oeste, com o mais baixo de $-2,76\text{‰}$ na amostra LO4.

A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da amostra das dunas é 0,71314 enquanto a chuva (C) apresenta somente 0,71089, valor este muito perto da água do mar (0,70923). A semelhança é causada pela nucleação por aerossóis marinhos na formação das chuvas.

Para representar o componente “chuva” no lençol de Fortaleza, preferimos usar o estrôncio da amostra Dunas, pois integra em si a interação da água de chuva com um solo típico. Baseando-se na amostra C de chuva, seria necessário trabalhar, na interpretação do estrôncio, com pelo menos três componentes: água de chuva, solo e água da CAGECE. Assim, a amostra Dunas (DU) pode ser usada para representar a “chuva”, nos cálculos de mistura de dois componentes, tanto pelo $\delta^{18}\text{O}$ (de $-2,55\text{‰}$) como pelo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (de 0,71314).

CÁLCULOS DE MISTURA

Tomamos como base os valores de $\delta^{18}\text{O} = -2,55\text{‰}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,71314$ para chuva infiltrada (amostra Dunas (DU)) e $\delta^{18}\text{O} = +3,07\text{‰}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,71748$ para água da CAGECE (valor médio das amostras LI 1 a 8) e as equações (2) e (3). Os resultados são expressos na forma de “fração de água da CAGECE” na mistura (Tabela 3) e visualizadas nas curvas de misturas nas figuras 6 e 7.

Tabela 3 - Valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e fração de água da CAGECE.

Amostra	$\delta^{18}\text{O}$ médio	Fração de água da CAGECE (%)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ média	Fração de água da CAGECE (%)
Hotel Colonial	-0,62	*	0,70933	*
Leste-Oeste	-2,60	0	0,71429	15
SANEAR	-1,27	23	0,71559	39
Sta. Edwirges	-1,70	15	0,71574	42
Ed. Ellery	-0,64	34	0,71435	16
CAGECE	+3,07	100	0,71748	100
Casa Luiz	-0,39	38	0,71502	27
Casa Marco Aurélio	-	-	0,71257	0
Beira Mar	-	-	0,71211	0
Dunas	-2,55	0	0,71314	0

* Intrusão marinha

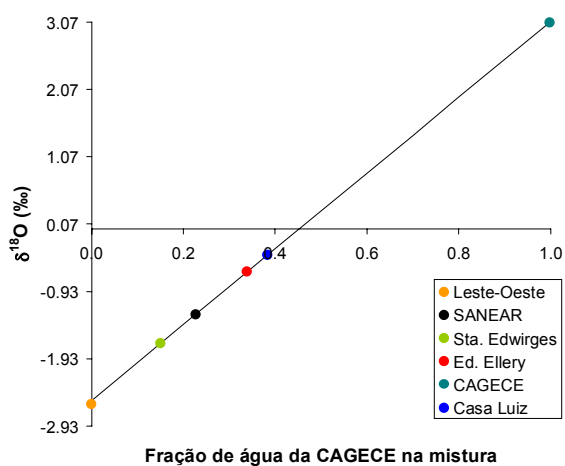


Figura 6 - Reta de mistura de $\delta^{18}\text{O}$ para água de chuva (-2,55‰) e água da CAGECE (+3,07‰)

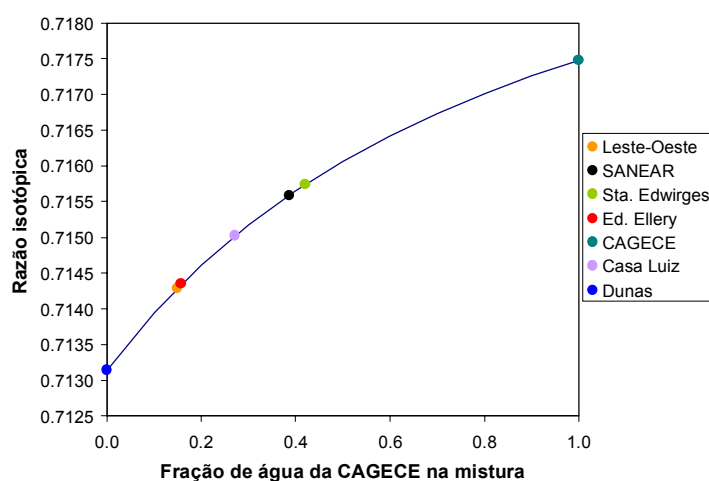


Figura 7 – Curva de mistura de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para água de chuva (0,71314) e água da CAGECE (0,71748).

A amostra Hotel Colonial (HC) foi excluída do cálculo por apresentar como terceiro componente de mistura a água do mar. As amostras Casa Marco Aurélio (MA) e Beira Mar (BM) têm valores de estrôncio menores que o membro final inferior da mistura, “chuva infiltrada”. Isto significa que representam águas pluviais que não atingiram o equilíbrio com o solo; não são amostras de água subterrânea propriamente dito. Elas provem de locais de freqüente inundação que acumulam água de chuva não somente na época de chuvas, mas mesmo em eventos chuvosos fracos isolados. O mesmo vale para as amostras LO1 a LO9 na Av. Leste-Oeste, onde o trânsito durante chuvas é muitas vezes impossibilitado e onde o próprio SANEAR refez a drenagem várias vezes tentando resolver o problema de inundação da pista. Neste caso, o valor $\delta^{18}\text{O}$ coincide, dentro da margem de erros, com o da água de chuva.

Para estes erros de coleta (que na época não foram reconhecíveis como tais, já que foram identificados, depois através da composição isotópica) não incriminarem os métodos, eliminamos os locais Hotel Colonial, Av. Leste-Oeste, Casa Marco Aurélio e Beira Mar da avaliação da fração da mistura, que se baseia, então, somente nos locais SANEAR, Sta. Edwirges, Ed. Ellery e Casa Luiz, onde foram coletadas águas subterrâneas de verdade.

Comparando os valores para os métodos do $\delta^{18}\text{O}$ e da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ constata-se que, embora não haja discrepâncias na ordem de magnitude nem diferenças sistemáticas, os resultados divergem. Isto é de se esperar, pois os métodos são completamente independentes: $\delta^{18}\text{O}$ traça o grau de evaporação sofrida pela água, enquanto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ traça o ambiente hidrogeológico na origem da água.

Porém, calculando valores médios, mais representativos, para cada um dos dois métodos, obtêm-se 28% de contribuição de água da CAGECE no lençol de Fortaleza para $\delta^{18}\text{O}$ e 31% para a razão isotópica do estrôncio.

CONCLUSÕES

Os traçadores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostram-se ferramentas valiosas na identificação da razão de mistura binária dos componentes “chuva infiltrada” e “água da CAGECE” no lençol de Fortaleza, pois as diferenças nestes parâmetros são muito maiores que os erros de medida. Os resultados indicam que aproximadamente 30% da água são águas importadas pela CAGECE, injetadas no lençol via fossas.

Com a implantação do sistema de esgotos, pelo projeto SANEAR, em praticamente toda a área de Fortaleza, esta parcela vai sofrer uma redução drástica que corresponde a algo da ordem $6 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$. A eliminação desta contribuição resultará em um rebaixamento do lençol com conseqüências para

- o desempenho dos poços existentes,
- a sustentação de construções,
- as propriedades mecânicas dos solos e
- a posição da interface água doce/ água do mar na orla marítima, com uma possível intrusão marinha.

Não acreditamos que estes efeitos se manifestarão de um modo dramático e traumático, mas trata-se de “efeitos colaterais” de um projeto absolutamente necessário que é o SANEAR. Possivelmente, a re-injeção de água usada, especialmente na orla marítima para formar uma “cortina de água doce”, seria uma medida para minimizar danos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FUNCAP, pelo financiamento das análises isotópicas e da visita de um dos autores (Peter Horn) à Fortaleza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - DANSGAARD, W. **Stable isotopes in precipitation**. In: TELLUS XVI, 4., 1964.
- 2 - FRISCHKORN, H., SANTIAGO, M. M. F. **Será que foi sempre assim? Sobre a história climática do Nordeste**. In: REV. ENG., v. 11, p. 77 – 85. 1994. ISSN - 992x.
- 3 - STUTE, M., FORSTER, M., FRISCHKORN, H., SEREJO, A. N. C., CLARK, J. F., SCHLOSSER, P., BROECKER, W. S., BONANI, G. **Cooling of tropical Brazil (5°C) during the last glacial maximum**. In: SCIENCE, v. 269, p. 379 – 383. 1995.
- 4 - SANTIAGO, M. F., SILVA, C. M. S., MENDES FILHO, J., FRISCHKORN, H. **Characterization of groundwater in the Cariri (Ceará/Brazil) by environmental isotopes and electric conductivity**. In: RADIOCARBON, v. 39(1), p. 49 – 60. 1997.
- 5 - IAEA. **Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation**. Technical Reports Series, 206. Viena-Áustria: IAEA, 1981.
- 6 - FRISCHKORN, H. Medidas isotópicas para a determinação da água e seu tempo de residência no lençol de Fortaleza. In: CONGR. BRAS. ÁG. SUBT., 3., 1984, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1984.
- 7 - MOSER, H., RAUERT, W. **Isotopenmethoden in der Hydrologie**. Berlin/Stuttgart-Alemanha: Gebrüder Borntraeger, 1980. ISBN 3-443-1012-1.
- 8 - CLARK, I., FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrology**. New York: Lewis Publishers, 1997. ISBN 1-56670-249-6.

- 9 - YANG, C., TELMER, K., VEIZER, J. **Chemical dynamics of the St. Lawrence riverine system.** In: GEOCH. COSMOCH. ACTA, v. 60, p. 851 – 866. 1996.
- 10 - BULLEN, T. D., KRABBENHOFT, D. P., KENDALL, C. **Kinetic and mineralogic controls on the evolution of groundwater chemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin, USA.** In: GEOCH. COSMOCH. ACTA, v. 60, p. 1807 – 1821. 1996.
- 11 - SCHOLTIS, A., PEARSON JR., F. Z., LOOSLI, H. H., EICHINGER, L., WABER, H. N., LEHMANN, B. E. Integration of environmental isotopes, hydrochemical and mineralogical data to characterize groundwater from a potential repository site in central Switzerland. In: ISOTOPES IN WATER RESOURCE MANAGEMENT, IAEA SYMPOSIUM, 336. **Anais...** Vienna: IAEA, 1995. P. 263 – 280.
- 12 - FAURE, G. **Principles and applications of geochemistry.** New York: Macmillan Publishing Company, 1992.
- 13 - ALFASSI, Z. B. **Determination of trace elements.** New York: VCH Verlagsgesellschaft, 1994.
- 14 - BIRCK, J. L. **Precision K-Rb-Sr isotopic analysis: application to Rb-Sr chronology.** In: CHEM. GEOL., v. 56, p. 73 – 83. 1986.