ALGUMAS CARACTERÍSTICAS ISOTÓPICAS E QUÍMICAS DOS AQUÍFEROS SUPERFICIAIS E PROFUNDOS DA REGIÃO DE IGUATU (CE) *

CLEUTON FREIRE **, HORST FRISCHKORN ***, MARIA MARLUCIA FREITAS SANTIAGO **
e JOAQUIM RAUL FERREIRA TORQUATO ****

ABSTRACT Waters from dams, rivers, creeks, and deep and shallow wells in an area of 3 370 km² around Iguatu (Ceará) have been analyzed. Samples were taken in January and August 1978 from a total of 35 locations. Carbon-14 ages of deep wells range from about 17 000 years to modern with seasonal variations, indicating a mixture of a deep old component with modern waters. This conclusion is confirmed by the ¹⁸O results. Shallow wells show a strong rainwater influence. The chemical character of waters from wells is the same as that of the Orós dam. A classification of suitability for domestic use and irrigation is given.

INTRODUÇÃO A bacia hidrográfica da região de Iguatu constitui a mais importante das bacias existentes no médio Jaguaribe por conter as barragens de Orós e Lima Campos, reservatórios de grande influência tanto para a irrigação a montante, ao longo do vale, como para o abastecimento de água para a população.

O reconhecimento de aquíferos, quer subterrâneos, quer superficiais, pode ser feito utilizando diversos métodos, sendo de evidenciar entre eles os que usam traçadores naturais.

Este trabalho tem por base o estudo das concentrações relativas de oxigênio-18 e carbono-14, através das quais se podem inferir informações úteis ao estudo do meio ambiente e reconhecimento das características do aquífero. No caso presente, pretendemos tirar conclusões relacionadas com a estrutura dos aquíferos, infiltrações e condições de fluxo.

A composição dos isótopos estáveis de oxigênio-18 tem sido crescentemente utilizada na caracterização de massas de água e na indicação de suas origens (Dansgaard, 1964, Friedman *et al.* 1964, Gat 1971, etc.). As variações na abundância desse isótopo natural em águas de subsuperfície, quando comparadas com as de precipitação, permitem avaliar a origem destas águas, bem como as interações que podem ocorrer com lagos e rios.

A utilização do radiocarbono natural na datação de águas subterrâneas foi inicialmente sugerida por Munnich (1957), uma vez que com ele se podem obter informações essenciais para o reconhecimento de um aquífero ou complementar os dados, resultantes do emprego de oxigênio-18, os quais, isoladamente, não são suficientes ou levam a interpretações ambíguas (Gat 1971). Contudo, mesmo que as idades das águas determinadas através do método de carbono-14 não sejam reais, podem ser utilizadas no entendimento do estudo sobre a evolução hidroquímica das águas.

Além das medidas de oxigênio-18 e carbono-14 foram determinadas as concentrações dos cátions Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ e dos ânions Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, e NO₃⁻, com a finalidade de integrar e complementar as interpretações dos dados existentes.

GEOLOGIA DA ÁREA A área estudada situa-se na região do médio Jaguaribe, ocupando parte dos municípios de Iguatu e Orós, compreendida entre os meridianos 38°50'00" oeste e os paralelos 6°05'00" e 6°30'00" sul, sobre uma área aproximada de 3 370 km².

Predomina na área um clima quente e úmido, característico da região ao norte da Chapada do Araripe. Apresenta altitudes médias de 240-250 metros, atingindo esporadicamente cotas de 500 metros. Sua pluviosidade varia de 600 a 800 milímetros anuais.

As indicações geológicas, a seguir descritas, foram extraídas do *Projeto Rio Jaguaribe* (DNPM 1979) e atualizadas sempre que necessário.

Embasamento Cristalino (Pré-Cambriano Médio) Na área em estudo, o embasamento cristalino, de idade pré-cambriana, ocorre em duas faixas envolvendo a bacia de Iguatu a nordeste e a sul. São constituídas por gnaisses bandeados de composição diversa, típicos da fácies almandina-anfibolito. Por vezes ocorrem gnaisses facoidais, passando a migmatitos oftálmicos. Cortando este conjunto, é comum a presença de rochas filonianas básicas (diabásio) e ácidas (granito fino, aplitos e pegmatitos).

Grupo Ceará (Pré-Cambriano Superior) Constitui-se em uma sequência ectínica com quartzitos na base, seguidos de gnaisses e/ou xistos e filitos e lentes carbonáticas posicionadas ora no topo da unidade, ora na base dos metapelitos.

Na região de José de Alencar, acima do quartzito basal, ocorrem gnaisses finos microfacoidais e com finas faixas feldspáticas. No contato superior dos gnaisses com xistos

* Financiado pelo Banco do Nordeste do Brasil S.A

** Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 3011, CEP 60000, Fortaleza, CE, Brasil

*** Departamento de Engenharia Hidráulica da Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 2554, CEP 60000, Fortaleza, CE, Brasil. Apoiado pelo KFA, Julich, e CIM, Frankfurt (Alemanha)

**** Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 3011, CEP 60000, Fortaleza, CE, Brasil

encontram-se lentes e bolsões de magnesita com talco, associados às vezes com dolomita. A parte superior da sequência é formada por andalusita, xistos com porfiroblastos milimétricos de cordierita e sillimanita, que passam superiormente a filitos micáceos no topo. Nas demais áreas falta o gnaíse.

Grupo Rio do Peixe (Cretáceo Inferior) FORMAÇÃO ANTENOR NAVARRO Serve de base para o Grupo Rio do Peixe, repousando diretamente sobre o embasamento cristalino e em discordância angular com ele. Na área em estudo, ocorre próximo à Lagoa do Barro Alto e no seu prolongamento numa faixa com direção nordeste até às proximidades da localidade de Jerimum.

A sequência apresenta na base um nível de sedimentos imaturos, mal selecionados, angulosos, incluindo brechas e conglomerados brechóides com seixos de rochas cristalinas, em quantidade subordinada, seixos e calhaus de quartzo com dimensões superiores a 6-8 cm. A matriz é de areia grosseira, mal selecionada, arcoseana, com acabamento pouco distinto e tons creme, cinzentos e róseos.

Sobre este pacote, ocorrem arenitos grosseiros e conglomeráticos, arcoseanos, de tons creme e avermelhados, apresentando então estratificação cruzada. São compostos por quartzo e feldspato e um pouco de mica, envolvidos por uma matriz arenosa com cimento argiloso, por vezes silicoso. Intercaladamente, ocorrem por vezes leitos de siltitos e argilitos variegados e arenitos de granulação fina de tons creme e avermelhados.

Em direção ao topo, passam gradativamente para sedimentos arenosos mais finos e mais maduros com cimento síltico-argiloso; podem ocorrer leitos finos de argilitos e siltitos, e localmente aparecem níveis carbonáticos impuros, às vezes fossilíferos.

A espessura de formação é muito variável de local para local, podendo atingir 1350 metros na bacia do Brejo das Freiras. Em Lima Campos e Icó, as espessuras foram estimadas respectivamente em 300 e 390 metros e, em Iguatu, a espessura máxima de 400 metros ocorre no extremo sudoeste da bacia próximo à falha da Serra do Torto. Na área em estudo os principais afloramentos situam-se próximo e a oeste da Vila de José de Alencar.

FORMAÇÃO SOUSA O mapa geológico (Fig. 1), por uma questão de escala, apresenta o Grupo Rio do Peixe indiviso. Esta unidade ocorre exclusivamente nas bacias mais profundas, como as de Iguatu, Lima Campos e Icó. Estão assentes em concordância com os sedimentos inferiores (Formação Antenor Navarro) através de uma passagem gradacional.

É caracterizada por uma sucessão variável de camadas finas e paralelas de componentes argilosos e carbonáticos, passando até a arenitos finos (raramente grosseiros). Na base e no topo podem ocorrer esporadicamente níveis conglomeráticos. As suas cores são sempre vivas, predominando o amarelo, o vermelho e o roxo.

A seção mais espessa desta formação está na Bacia de Sousa, a qual é estimada em 120 metros. Nas bacias de Iguatu e Lima Campos, ela é pouco espessa e encontra-se a profundidades estimadas respectivamente em 800 e 450

metros. Na área em estudo, os principais afloramentos ocorrem próximos às vilas de Palestina, José de Alencar e Gadelha.

Nas bacias de Iguatu e Lima Campos, os sedimentos bastante imaturos estão quase totalmente caulinizados e os restos de fósseis, especialmente de ostrácodes, peixes e restos vegetais, são muito abundantes.

Formação Moura (Terciário/Quaternário) Esta formação ocorre, e está preservada, na chapada do mesmo nome, entre as localidades de Iguatu e Vila de José de Alencar. Ali se encontra a sequência completa em atitude sub-horizontal. Na base, aparece um conglomerado de espessura variável recoberto por um pacote de areia avermelhada de espessura variável mas sempre inferior a 40 metros. Esta última unidade litológica por vezes está total ou parcialmente ausente devido a processos erosivos intensos.

O contato com os sedimentos inferiores da Formação Sousa é nitidamente discordante, com um ângulo de discordância da ordem de 10 a 15 graus com inclinação para NW ou NE. Topograficamente as rochas da Formação Moura, por vezes, especialmente ao sul, formam escarpas de até 40 metros com a planície aluvial.

O conglomerado basal é polimítico, constituído por seixos e calhaus de quartzo, quartzitos e raramente rochas cristalinas. Os diâmetros variam de 1 a 25 cm e a matriz é constituída por material síltico-arenoso de coloração avermelhada a creme. A sua espessura é pequena, nunca ultrapassando três metros, podendo mesmo ficar reduzida a 30-50 cm.

A passagem do conglomerado para as areias superiores é mais ou menos brusca. A areia superior é gradada, com diâmetros maiores junto à base e mais finos no topo. Na sua parte basal é bem estratificada e, à medida que se caminha para cima, a estratificação vai desaparecendo e o pacote fica homogêneo. A sequência litológica é composta por elementos um pouco imaturos, com grãos variando entre angulosos e subarredondados. Os feldspatos estão caulinizados.

Estes sedimentos são tidos como depósitos correlatos da fase de aplainamento plio-pleistocênica correlacionável à Superfície Velhas.

Aluviões Recentes (Quaternário) Aluviões ocorrem ao longo das margens do rio Jaguaribe, apresentando-se na região do Iguatu com dimensões da ordem de 15 x 12 quilômetros. Nos vales mais largos, são constituídas por areias grosseiras, em geral quartzosas, e no leito de estiagem a granulação dos detritos é mais grosseira, mostrando uma zanação vertical com diminuição do tamanho do grão à medida que se caminha para níveis mais elevados. A oeste de Iguatu, pequenas depressões topográficas deram lugar à formação de lagoas residuais temporárias onde se acumulam sedimentos mais finos formados por areias quartzosas, siltes argilosos, argilas e materiais orgânicos.

METODOLOGIA Carbono-14 O carbono é recolhido sob a forma de carbonato de bário por precipitação dos bicarbonatos e do dióxido de carbono dissolvidos na água, quando nela adicionamos hidróxido de bário.

Figura 1 - Mapa geológico simplificado

O conhecimento da quantidade de água necessária para a obtenção de carbono é feito no local de coleta, quando, através de titulação, conhecemos os teores de CO_2 e bicarbonato suficientes para fornecer a quantidade mínima de 1 grama de carbono. Com os devidos cuidados para que o CO_2 do ar não entre na reação, colocam-se 60,0 l de água num depósito de polietileno e adiciona-se 1,0 l de solução saturada de Ba(OH)_2 para cada depósito a ser utilizado.

No laboratório, a amostra na forma de BaCO_3 é transformada num gás para determinação do teor de C^{14} , no caso o acetileno, que é obtido em duas etapas; na primeira, o carbono aparece na forma de CO_2 e a partir deste se dá a obtenção do acetileno.

Para as medidas de C^{14} , foi utilizado um contador Geiger Müller, sistema Geyh (Landesanstalt für Boden-

forschung, Hannover, Alemanha). Os resultados são expressos em porcentagem do carbono moderno:

$$\% \text{ C moderno} = \frac{A - A_f}{0,9 (A_p - A_f)},$$

sendo A, A_p e A_f , respectivamente, as atividades de amostra, padrão (NBS) e ruído de fundo e em t anos antes de 1950,

$$t = 8033 \ln (1/\% \text{ moderno}),$$

correspondendo à idade aparente. O erro na idade foi calculado com a expressão

$$\sigma_t = 8033 \sqrt{\frac{\sigma_A^2 + \sigma_f^2}{(A - A_f)^2} + \frac{\sigma_p^2 + \sigma_f^2}{(A_p - A_f)^2} + \frac{2\sigma_f^2}{(A - A_f)(A_p - A_f)}},$$

sendo σ_A , σ_p , σ_f , respectivamente, o desvio-padrão de amostras, padrão e ruído de fundo.

Oxigênio-18 As análises isotópicas foram feitas em um espectrômetro de massa AEI, modelo MS 20 de campo constante 4,5 K Gauss com setor magnético de 180° de deflexão, raio de curvatura de 50,8 mm e com duplo coletor de íons. Na preparação de amostras, utilizou-se o processo de equilíbrio de CO₂ com H₂O. Os resultados são expressos em δ¹⁸O‰ em relação ao padrão SMOW com um erro de ± 0,2‰.

Análise Química Na determinação dos elementos maiores, foram utilizados os seguintes métodos: potenciografia (para os íons de cálcio, magnésio e cloro), potenciometria (para as medidas de bicarbonato), fotometria de chama (para os íons de sódio e potássio) e espectrofotometria (para o nitrato e sulfato).

RESULTADOS E DISCUSSÕES Chuvas Chuvas individuais variam bastante na composição isotópica, devido especialmente ao efeito de quantidade. Com valores apresentados na Tab. 1, vê-se este efeito bastante acentuado nos dias 20/5 em Iguatu e 21/5 em Orós, onde as quantidades de chuva e os valores de σ são respectivamente 4,0 mm e +0,4‰ em Iguatu e 59,7 mm e -2,5‰ em Orós. Este efeito pode ainda ser observado na Fig. 2, onde se apresenta num gráfico a quantidade precipitada em relação aos valores de σ¹⁸O. Para testar o "efeito de quantidade", foi feita uma regressão linear que forneceu uma reta com as características:

$$\sigma^{18}\text{O} \text{‰} = 0,4P - 0,3; r = -0,81,$$

onde P é a precipitação em milímetros e r é o coeficiente de correlação.

Tabela 1 – Valores de δ¹⁸O‰ e precipitação em Iguatu e Orós em 1978

Local	Dia	δ ¹⁸ O‰	P (mm)	Local	Dia	δ ¹⁸ O‰	P (mm)
Iguatu	10/5	-0,6	14,7	Orós	10/5	-0,3	5,2
Iguatu	16/5	-0,7	9,5	Orós	21/5	-2,5	59,7
Iguatu	20/5	+0,4	4,0	Orós	28/6	-1,6	14,3
Iguatu	28/6	-1,1	4,8	São Pedro	06/5	-1,0	15,0

Figura 2 – Variação de δ¹⁸O‰ em função da quantidade de água precipitada

Águas Superficiais OXIGÊNIO-18 Num corpo de água como o açude Orós, ramificado e com muitos lugares rasos e profundos, não pode ser homogênea a concentração de oxigênio-18, esperando-se variações fortes de local

para local. Conforme pode ser verificado na Tab. 2 e nas Figs. 3 e 4, as coletas foram efetuadas a distâncias variadas em relação à parede da barragem, sendo de 0 a cerca de 29 quilômetros.

Por meio de observações dos dados disponíveis podemos concluir que:

- Os valores de σ¹⁸O no local mais afastado (Várzea Grande, ponto 8) são semelhantes, quer em janeiro, quer em agosto e, como esse ponto se encontra quase na foz do rio Jaguaribe, este valor de σ¹⁸O ≅ 1,0‰, semelhante aos encontros no ponto 12 (rio Jaguaribe-Iguatu, Tab. 3), é compatível com águas continentais de origem não meteórica, podendo portanto ser considerado como o valor das águas transportadas pelo rio.
- Em janeiro o valor de +0,6‰ poderá ser tomado como o mais provável da composição média da água contida

Tabela 2 – Valores de δ¹⁸O‰ no açude Orós com a distância x(km) da barragem, em 1978.

Local (Nº no mapa)	δ ¹⁸ O‰		X (km)
	Jan.	Ago.	
01. Palestina	1,2	3,1	14,7
02. Sítio Barroca	—	0,7	18,0
03. Conceição do Vicentes	0,9	2,0	22,1
04. Vila Guassurê	0,6	1,3	9,5
05. Bandeira	—	1,1	25,0
06. Jequí	1,4	3,0	15,1
07. Fechado	1,6	1,5	26,5
08. Várzea Grande	0,9	0,8	28,6
09. Barragem-Orós	0,5	2,8	0,0
10. Barroso	1,0	1,3	20,1

Tabela 3 – Valores de δ¹⁸O‰ em águas fluviais em 1978

Local (Nº no mapa)	δ ¹⁸ O‰		
	Jan.	Mai.	Ago.
12. Rio Jaguaribe (Iguatu)	0,9	-2,3	0,7
13. Rio Truçu	-2,0	-2,2	0,9
14. Barra do Truçu	-1,3	—	-0,3
15. Rio Jaguaribe (Barro Alto)	-0,6	-2,0	-0,2
16. Riacho da Gangorra	-0,8	—	-3,5

Figura 3 – Variação dos valores de δ¹⁸O‰ em função da distância da parede do açude

em até 10 km de distância da barragem do açude Orós (local onde está a maior quantidade de água), uma vez que este valor está entre 0,5 na barragem e 0,7 a 10 quilômetros dela (ver Fig. 3).

- A variação em janeiro, entre 0,5 na barragem e 1,2 a 30 km (ver Fig. 3) desta, é explicável pelo maior enriquecimento nas partes rasas mais afastadas da barragem por efeito da evaporação, como em 1, 6 e 7 localizados em reentrâncias afastadas da alimentação superficial pelos rios (ver Fig. 4). Mesmo nos locais próximos à embocadura do rio observou-se o efeito, pois a chuva

precipitada em janeiro de 1978 (ver Fig. 5) foi escassa.

- Já em agosto (ver Fig. 3) a tendência é invertida por causa da influência dos rios, resultando também numa maior dispersão dos dados.
- Na coleta de janeiro (Tab. 3), o rio Truçú (amostra 13) apresenta o valor $\sigma O^{18} = -2,0\text{‰}$, indicando água proveniente de uma chuva local, enquanto o rio Jaguaribe (amostra 12) traz água que já sofreu evaporação, como indica o valor elevado de σ . Estas águas se misturam na Barra do Truçú (amostra 14), resultando num valor de $-1,3\text{‰}$.

Figura 4 – Mapa de localização das amostras

Figura 5 - Precipitação em milímetros em Orós e Iguatu durante os anos de 1977 a 1979

Em maio, no fim da época chuvosa, as águas dos rios foram homogeneamente de características pluviais, enquanto em agosto mudaram para superficiais, com exceção do riacho da Gangorra (amostra 16), que apresenta água proveniente de uma chuva.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Da primeira coleta realizada em janeiro de 1978 (Tab. 4), analisaram-se três amostras de açudes, duas retiradas no Orós (amostras 1 e 9) e uma no Lima Campos (amostra 11). Essas amostras classificam-se quimicamente como bicarbonatada-sódica (amostra 1) e bicarbonatadas-mistas (amostras 9 e 11) (ver Fig. 6). Na coleta de agosto, além das três amostras já mencionadas, foram colhidas mais oito, que se apresentaram predominantemente bicarbonatadas-sódicas (ver Fig. 7).

As amostras dos rios Truçú (amostra 13) e Jaguaribe nas localidades de Iguatu (amostra 12) e Barro Alto (amostra 15) eram, na coleta de janeiro, bicarbonatadas-mistas (ver Tab. 5). Em agosto, suas composições foram alteradas, passando as duas primeiras (amostras 13 e 12) a bicarbonatadas-sódicas, enquanto a amostra de Barro Alto passou a mista-sódica.

Pode-se explicar a mudança na composição química dessas águas atendendo-se aos tipos de solos encontrados

Figura 6 - Diagrama de Piper com as águas coletadas em janeiro

em seu percurso, ou ao fato de receberem influências de alguns riachos. A chuva pode também ser o fator responsável por esta variação. Além das três amostras já citadas, foram analisadas amostras coletadas no encontro das águas dos rios Jaguaribe e Truçú (Barra do Truçú, amostra 14) e no riacho da Gangorra (amostra 16), próximo à Vila de José de Alencar, onde as águas são bicarbonatadas-sódicas e bicarbonatadas-mistas, respectivamente.

Tabela 4 - Concentrações (ppm) de cátions e ânions nos açudes Orós e Lima Campos nas coletas de janeiro e agosto de 1978

Nº no mapa	Cátions								Ânions							
	Janeiro				Agosto				Janeiro				Agosto			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
1	23,0	7,9	25,0	7,0	22,8	8,7	28,0	7,2	33,7	4,0	128,1	3,5	36,9	5,0	128,1	<1,0
2	—	—	—	—	16,7	6,9	76,0	4,0	—	—	—	—	29,5	0,0	253,8	<1,0
3	—	—	—	—	24,4	3,7	35,0	6,2	—	—	—	—	40,6	0,0	119,6	<1,0
4	—	—	—	—	20,9	7,6	52,0	6,0	—	—	—	—	36,9	20,0	141,6	<1,0
5	—	—	—	—	20,5	7,2	24,0	5,5	—	—	—	—	36,1	4,0	106,0	<1,0
6	—	—	—	—	20,5	7,6	24,0	6,2	—	—	—	—	36,9	0,0	117,0	<1,0
7	—	—	—	—	21,3	8,3	28,0	6,2	—	—	—	—	43,3	0,0	123,0	<1,0
8	—	—	—	—	21,6	9,9	28,0	6,7	—	—	—	—	38,9	1,0	123,0	<1,0
9	20,7	8,6	22,0	6,0	9,6	1,5	60,0	6,7	31,6	4,0	114,6	1,3	28,3	0,0	141,5	9,0
10	—	—	—	—	13,6	4,4	46,0	6,2	—	—	—	—	32,6	0,0	152,5	5,4
11	22,3	7,9	23,0	6,5	12,0	6,3	23,0	7,2	30,2	3,0	123,2	2,2	34,0	20,0	68,0	3,5

Tabela 5 – Concentrações (ppm) de cátions e ânions nos rios e riachos nas coletas de janeiro e agosto de 1978

Nº no mapa	Concentrações (ppm)															
	Janeiro				Agosto				Janeiro				Agosto			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
12	22,2	6,7	19,0	5,0	32,0	10,1	44,0	5,7	22,0	12,0	106,1	5,3	51,6	7,2	176,9	<1,0
13	8,4	2,5	5,0	5,5	32,7	15,6	82,0	6,5	12,0	0,0	37,8	18,6	106,9	0,0	205,0	<1,0
14	—	—	—	—	28,5	11,0	46,0	6,0	—	—	—	—	59,0	45,0	122,0	<1,0
15	20,4	6,6	20,0	4,0	19,2	5,8	46,0	5,5	30,9	1,0	102,4	7,0	70,1	20,0	81,4	2,2

Poços Amazonas OXIGÊNIO-18 Foram coletadas oito amostras de águas de poços amazonas (amostras 17 e 24) (ver Tab. 6). Nota-se uma forte influência das chuvas, uma vez que na coleta de janeiro, como era esperado, apresentam baixos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e mais altos na coleta de agosto, quando as águas estiveram sujeitas à evaporação. O valor médio de $\delta^{18}\text{O}$ para todos os poços é de $-2,9\text{‰}$ na primeira coleta e de $0,01\text{‰}$ na segunda.

Tabela 6 – Valores de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ em poços amazonas nas coletas de janeiro e agosto de 1978

Local (Nº no mapa)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$		Local (Nº no mapa)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	
	Jan.	Ago.		Jan.	Ago.
17. Sítio Tanques	-3,3	-2,4	21. Várzea Redonda	-4,6	-2,8
18. Antonico	-4,0	-0,2	22. Sítio Garrote	-1,3	-1,0
19. Sítio Mulungu	-3,8	-1,1	23. Faé	-0,6	-0,3
20. Lagoa Redonda	-2,1	-0,8	24. Sítio Gadelha	-3,5	-0,3

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Foram também determinadas suas composições químicas na coleta de agosto de 1978. As amostras apresentaram-se predominantemente bicarbonatadas-sódicas (amostras 17, 19, 20, 21 e 22) enquanto as demais cloretadas-sódicas (amostras 18, 23 e 24) (ver Fig. 7 e Tab. 7).

Poços Profundos OXIGÊNIO-18 Os resultados das determinações do conteúdo relativo de oxigênio-18 em águas de poços profundos (amostras de 26 a 36) são mostrados na Tab. 8. Nota-se que todas as águas variaram sua concentração em ^{18}O entre as duas coletas; no entanto, o grupo não tem características homogêneas, embora o valor médio de $-2,0\text{‰}$ fique o mesmo. Nos poços 27,

Tabela 7 – Análise química dos poços amazonas, na coleta de agosto de 1978

Local Nº no mapa)	Concentrações (ppm)							
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
17. Sítio Tanques	32,3	23,8	240,0	2,5	213,9	105,0	355,0	<1,0
18. Antonico	39,6	14,8	156,0	6,5	254,5	0,0	179,3	<1,0
19. Sítio Mulungu	21,6	10,0	58,0	4,5	66,4	20,0	146,4	<1,0
20. Lagoa Redonda	28,9	35,1	66,0	6,7	92,2	0,0	296,5	3,0
21. Várzea Redonda	24,2	8,3	60,0	5,5	70,5	24,0	122,8	<1,0
22. Sítio Garrote	14,0	7,2	200,0	6,0	29,9	0,0	589,2	<1,0
23. Faé	206,4	101,1	624,0	10,0	1010,8	760,0	107,4	11,0
24. Sítio Gadelha	2,0	2,7	52,0	36,0	63,8	50,0	12,7	31,0

Figura 7 – Diagrama de Piper com as águas coletadas em agosto

28, 30, 31 e 36, o valor de σ aumentou de janeiro para agosto, enquanto baixou nos poços 26, 29, 34 e 35. É notável que os poços de Quixelô (28 e 29), apesar de serem próximos um do outro, pertencem a grupos diferentes.

CARBONO-14 A Tab. 9 apresenta os resultados das medidas de carbono-14 em águas de poços profundos da região estudada nos dois períodos de coleta, janeiro e agosto de 1978.

A faixa dos percentuais de carbono-14 apresentada na coleta de janeiro foi de 11,7% a 88,0%, que corresponde a "idades" de 17 232 a 1 032 anos respectivamente.

Tabela 8 – Valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$ em poços profundos nas coletas de janeiro e agosto de 1978

Local (Nº no mapa)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$		Local (Nº no mapa)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$	
	Jan.	Ago.		Jan.	Ago.
26. São Pedro	-0,4	-2,9	31. Cajazeiras	-3,9	-1,7
27. Barro Alto	-2,1	-0,6	32. Vila Penha	-3,0	-0,7
28. Quixelô (abastecimento)	-1,8	-1,4	33. Iguatu	-0,6	—
29. Quixelô (chafariz)	-0,1	-2,6	34. Varzinha	-3,8	-4,2
30. Estrada	-2,9	-1,9	35. Palestina	-2,4	-2,9
			36. Floresta	-3,1	-2,3

Tabela 9 – Medidas de carbono-14 em poços na região de Iguatu

Local (Nº no mapa)	% Moderno		t (anos)	
	Janeiro	Agosto	Janeiro	Agosto
26. São Pedro	70,5 ± 0,8	—	2805 ± 95	—
27. Barro Alto	79,9 ± 0,8	—	1802 ± 80	—
28. Quixelô (abastecimento)	88,0 ± 0,9	90,0 ± 1,3	1032 ± 90	844 ± 118
29. Quixelô (chafariz)	32,8 ± 0,6	55,4 ± 0,8	8965 ± 142	4740 ± 126
30. Estrada	40,0 ± 0,6	—	6593 ± 103	—
31. Cajazeiras	77,2 ± 1,1	—	2076 ± 112	—
32. Vila Penha	19,1 ± 0,7	19,8 ± 0,5	13321 ± 295	13.009 ± 193
33. Iguatu	11,7 ± 0,3	39,9 ± 1,2	17232 ± 229	7.371 ± 241
34. Fazenda Varzinha	25,6 ± 0,5	42,4 ± 0,8	10948 ± 175	6877 ± 163
35. Vila Palestina	—	51,8 ± 1,3	—	5.276 ± 205
36. Vila Floresta	—	131,4 ± 1,8	—	Moderna

No segundo período, em agosto, observou-se um intervalo de 19,8% a 131,4%, correspondendo a “idade” de 13 000 anos à “moderna”. Observa-se então que:

- todos os poços têm idades diferentes e
- todos mostram variações sazonais,

donde se conclui que as águas são misturas de águas velhas com águas modernas. Por isso, os valores indicam um grau de mistura e não uma idade real.

Verifica-se que, entre os poços que mais sofreram recarga, está aquele localizado em Iguatu (poço com 60 metros), cuja amostra de janeiro apresentou idade aproximadamente de 17 232 anos e, no mês de agosto, de 7 371 anos. Com esses dados, podemos afirmar que a água subterrânea em Iguatu está sendo fortemente influenciada pelas águas superficiais, provavelmente pelo açude Orós. Supondo uma mistura de componentes de 17 200 anos e de moderna, esta mudança na idade é equivalente a uma mistura com aproximadamente 30% de água moderna. (No entanto, onde podemos ter o caráter químico das águas conservado, verificamos que as águas subterrâneas nessa região como as da barragem apresentam, em sua maioria, uma semelhança na classificação química, sendo predominantemente a bicarbonatada-sódica.)

O poço que menos sofreu recarga foi o de Vila Penha (32 metros de profundidade), onde na coleta de janeiro a água apresentou idade de 13 321 anos e, em agosto, de 13 009 anos. Essa diferença fica dentro da faixa de erro experimental.

As águas dos poços na localidade de Quixelô também indicaram recargas recentes; a água do chafariz (29) variou de 8 965 anos, na primeira coleta, para 4 740 anos na segunda, enquanto a do poço de abastecimento (28) variou de 1 032 a 844 anos. Essa pequena “idade” apresen-

tada na água deste último poço pode ser devida à influência do riacho Antonico, que nas proximidades do poço dá origem a uma pequena barragem. Vale notar que esses poços distam um do outro cerca de 400 metros, sendo que o do chafariz tem a abertura superior da boca do poço localizada a uns 20 metros mais alto em relação ao de abastecimento e suas profundidades são de 105 metros e 80 metros, respectivamente.

A presença de uma falha (ver Fig. 1) poderá explicar as diferenças de idades. Possivelmente a caixa de falha está preenchida por material argiloso (pouco permeável), fazendo com que os aquíferos mantenham um equilíbrio químico independente por não permitirem uma livre circulação de água. Os valores de σO^{18} destes dois pontos também indicam águas diferentes (ver Tab. 8).

O poço da Fazenda Varzinha (com 36 metros de profundidade) apresentou também alteração na idade da água, passando de 10 948 anos para 6 877 anos (Tab. 9), e as águas do poço da Vila Floresta (com 15 metros de profundidade), nas duas coletas, apresentaram-se com idades “modernas”, donde podemos concluir que esses poços sofreram influência de infiltrações recentes. No caso do poço da Vila Floresta, esta recarga é predominante, podendo isso ser devido a sua profundidade e localização próxima ao rio Jaguaribe (ver Fig. 4).

Na Vila de Palestina (com 20 metros), foi realizada somente uma coleta para medidas de carbono-14, em agosto, e a idade da água foi de 5 276 anos. Para os poços de São Pedro (55 metros), Barro Alto (60 metros), Estrada (142 metros) e Cajazeiras (100 metros), as idades apresentadas para o primeiro período de coleta foram de 2 805, 1 802, 6 593 e 2 076 anos, respectivamente.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Das águas de poços profundos, apenas uma modificou sua classificação química, no caso a de São Pedro (ver nº 26 na Tab. 10 e Figs. 6 e 7), onde sua composição mudou de bicarbonatada-mista para bicarbonatada-sódica; as demais continuaram cloretadas-sódicas (amostras de Barro Alto e Cajazeiras) e bicarbonatadas-sódicas (Quixelô, abastecimento e chafariz, Estrada, Vila Penha, Iguatu, Varzinha e Floresta). A amostra de Palestina também se apresentou bicarbonatada-sódica.

Com base nos dados apresentados nas tabelas de medidas de oxigênio-18, carbono-14 e análise hidroquímica, verifica-se que os poços em sua maioria receberam contribuição de águas do açude Orós.

Classificação Química para Uso Doméstico Por meio de comparações dos valores apresentados nas tabelas de química com os limites adotados internacionalmente para a classificação da potabilidade das águas (ver Tab. 11), constatou-se para as amostras da primeira coleta que:

- as águas de Barro Alto (amostra 27) não atendiam aos limites exigidos, em relação ao sódio, cloreto e bicarbonato;
- o teor de sódio na água de Varzinha (amostra 34) apresentava-se em excesso;
- havia alta concentração de nitrato nas águas de Cajazeiras (amostra 31);

Tabela 10 – Concentrações (ppm) de cátions e ânions em poços profundos em janeiro e agosto de 1978

Nº no mapa	Concentrações (ppm)															
	Janeiro				Agosto				Janeiro				Agosto			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
26	68,5	31,6	30,0	16,0	41,1	23,1	82,0	8,7	82,3	30,0	244,0	15,5	99,9	14,5	283,0	4,0
27	130,8	118,4	1151,0	1,0	91,3	55,4	760,0	1,2	2021,0	46,0	580,0	12,0	1294,8	0,0	420,0	2,0
28	25,6	19,3	114,0	7,4	26,6	5,3	35,5	6,0	134,0	7,5	245,2	<1,0	45,8	0,0	128,8	<1,0
29	20,7	11,2	92,0	4,0	59,8	34,9	110,0	4,0	20,1	6,0	322,0	4,0	181,6	50,0	244	8,5
30	26,1	31,7	160,0	4,2	38,1	28,9	208,0	12,2	82,0	65,0	418,4	10,0	70,9	54,0	640,0	<1,0
31	61,5	36,6	109,0	36,0	44,2	35,1	82,0	55,0	201,4	00,0	85,4	300,0	199,9	150,0	66,4	10,0
32	28,4	13,2	49,0	4,4	5,2	1,2	110,0	2,5	43,2	13,0	198,3	<1,0	15,6	65,5	212,3	1,3
33	14,6	4,9	160,0	4,6	15,2	7,0	150,0	20,0	74,4	29,0	323,3	10,0	72,4	14,0	350,0	12,9
34	10,0	8,1	235,0	< 0	9,6	7,0	200,0	1,0	57,6	140,0	276,9	<1,0	52,1	55,0	408,2	21,0
35	—	—	—	—	16,0	22,6	90,0	14,0	—	—	—	—	26,4	0,0	379,4	<1,0
36	11,5	2,5	140,0	<1,0	14,0	9,5	34,0	4,7	16,6	45,5	346,4	<1,0	39,7	24,0	120,0	<1,0

Tabela 11 – Concentrações (ppm) máximas de cátions e ânions toleradas nas águas para uso doméstico

Cátions	Máximos tolerados (ppm)	Ânions	Máximos tolerados (ppm)
Cálcio	150 a 200	Sulfato	250
Magnésio	150	Bicarbonato	500
Sódio	200	Nitrato	45
Cloreto	250		

- as demais amostras tinham as concentrações dos elementos maiores abaixo do limite máximo.

Para as amostras coletadas em agosto nota-se:

- um excesso de bicarbonato nas águas do riacho da Gangorra (amostra 16);
- que as águas dos poços amazonas em Sítio Tanques (amostra 17), Antonico (amostra 18), Sítio Garrote (amostra 22) e Faé (amostra 23) apresentaram, respectivamente, altos teores de sódio; sódio e bicarbonato; e cálcio, sódio, cloro e sulfato;
- em águas de poços profundos nas localidades de Barro Alto (amostra 27) e Estrada (amostra 30), verificou-se a presença excessiva de sódio e cloreto para a primeira, e sódio e bicarbonato para a segunda, enquanto na Fazenda Varzinha (amostra 34) o teor de sódio apresentou-se no limite permissível;
- para as amostras não mencionadas, valores inferiores àqueles apresentados na Tab. 11.

Classificação Química para Uso na Irrigação Com base nas características químicas de uma água é possível concluir sobre o seu uso adequado para a irrigação. Neste trabalho foi usada a classificação americana descrita por Logan (1965) (Fig. 8), onde a razão de adsorção de sódio, SAR, é definida por meio das concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺ e de Na⁺ pela expressão:

$$SAR = \sqrt{\frac{Na}{(Ca + Mg)/2}}$$

Figura 8 – Classificação das águas para irrigação

Os parâmetros C e S crescem respectivamente com os valores da salinidade e da razão SAR; C₁, C₂ e C₃ se referem a salinidades fraca, média e alta, e S₁ e S₂ a águas fracamente e mediantemente sódicas.

Das dezesseis amostras coletadas em janeiro, três (12, 13 e 14), as de rios, foram do tipo (C₁-S₁), ou seja, bom para irrigar a maioria das culturas e quase todos os tipos de solos. Sete, as do açude (1, 9 e 11), e quatro de poços profundos (26, 29, 32 e 36) foram do tipo (C₂-S₁), bom para o cultivo de plantas com fraca tolerância salina. Das outras amostras de poços profundos, quatro (28, 30, 31 e 33) foram do tipo (C₃-S₁), utilizável somente para plantas de boa tolerância salina e em solos bem drenados. Finalmente, as amostras de Barro Alto (27) e Varzinha (34) foram, respectivamente, dos tipos (C₅-S₂) e (C₃-S₂), que só devem ser utilizados em culturas de palmeiras e em solos com textura grossa.

Na coleta de agosto, todas as amostras de açude (1 a 11) continuaram do tipo (C_2-S_1), que foi a mesma classificação das amostras de rios (12 a 15), de poços amazonas (19 a 24) e de alguns poços profundos (26, 28, 33, 35 e 36). As amostras do riacho Gangorra (16), de dois poços amazonas (17 e 18) e de três poços profundos (29, 30 e 31) foram do tipo (C_3-S_1). As amostras dos poços profundos restantes tiveram a classificação (C_3-S_2) (24 e 34), (C_2-S_2) (32), (C_4-S_1) (23) e (C_4-S_2) (27). Estes resultados mostram que houve modificação na classificação das águas somente nos poços profundos 27, 28, 29, 32 e 33.

CONCLUSÕES Através dos resultados obtidos no estudo das amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas, pode-se concluir que:

- Os poços amazonas refletem as variações sazonais, sendo influenciados diretamente pelas chuvas. A contribuição do açude Orós é menos pronunciada neste tipo de poço.

- Os poços profundos também mostram fortes mudanças sazonais, nas "idades" (C-14) e na composição isotópica (O-18), demonstrando uma recarga apreciável dos aquíferos. Os valores de $\sigma^{18}O$ indicam águas superficiais como fonte desta recarga. Existem dois grupos de poços, um que responde rapidamente às mudanças sazonais, e outro, que reage com uma grande defasagem.
- As águas a seguir relacionadas não atendem aos limites exigidos na classificação de potabilidade; nos poços profundos: Barro Alto e Varzinha nas duas coletas, Cajazeiras em janeiro e Estrada em agosto; nos poços amazonas: Sítio Tanques, Antonico, Sítio Garrote e Faé em agosto.
- As águas de maneira geral podem ser usadas para irrigação, algumas com restrições ao tipo de cultura e solo, sendo a água de Barro Alto não aconselhável para qualquer tipo de cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DANSGAARD, W. — 1964 — Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16 : 436-467.
- DNPM — 1979 — *Projeto Rio Jaguaribe*. Brasília, Ministério de Minas e Energia. 144 p. Geologia Básica n.º 1.
- FRIEDMAN, I., REDFIELD, A. C., SHOEN, B., & HARRIS, J. — 1964 — The variation of the deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle. *Rev. of Geophysics*, 2 : 177-224.
- GAT, J. R. — 1971 — Comments on the stable isotope methods in regional groundwater investigations. *Water Resources Research*, 7 : 980-993.

- LOGAN, J. — 1965 — *The interpretation of chemical analyses of water*. Recife, U. S. Agency for Internat. Development.
- MUNNICH, K. O. — 1957 — Messung des ^{14}C gehaltes von hartem Grundwasser. *Naturwiss*, 44 : 32.

MANUSCRITO

Recebido em 01 de março de 1983

Revisão aceita em 24 de janeiro de 1984