

ESTUDO HIDROQUÍMICO-AMBIENTAL DO AQUÍFERO ALUVIONAR DO BAIXO
JAGUARIBE, ITAIÇABA – CEARÁ

Maria Elisângela da Silva NOBRE

Diolande Ferreira GOMES

Sônia Maria Silva VASCONCELOS

Horst FRISCHKORN

Inácio Ocinaí de LIMA NETO

Sara Karoline FERREIRA

Daniel de Ponti SOUZA

RESUMO

No interior do estado do Ceará, as águas subterrâneas são consideradas fontes importantes de abastecimento hídrico, principalmente, as provindas de aluviões. O município de Itaiçaba (CE), inserido na Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, embora provido de água tratada, também utiliza água subterrânea para seu abastecimento. A região do baixo Jaguaribe apresenta extensas áreas agrícolas e de carcinicultura, que somadas à ausência de saneamento de esgoto municipal, podem acarretar problemas de contaminação de águas e salinização. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas a partir dos parâmetros físico-químicos e fornecer dados preliminares sobre a concentração de metais pesados nas águas. Para o entendimento do processo de recarga foram efetuadas medidas do isótopo $\delta^{18}\text{O}$ e realizado o balanço hídrico. Adotou-se valores de referência para avaliar o nível de contaminação das águas estabelecidos pela legislação brasileira. Todas as amostras analisadas apresentaram algum parâmetro de qualidade de água com valor acima do permitido para águas potáveis, com destaque para a turbidez, nitrato, ferro e sólidos totais dissolvidos. Os metais Al, Ba, Mn e Ni foram detectados em todas as amostras, porém em concentrações geralmente abaixo do limite estabelecido para águas potáveis. Os valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ indicaram a infiltração de água evaporada em poços na área de carcinicultura, o que pode, pontualmente, contribuir com o aporte de sais e contaminantes, juntamente com o precário sistema de saneamento. Os resultados isotópicos demonstram a entrada no aquífero aluvionar das águas da chuva e superficiais provenientes da lixiviação do solo salinizado, aumentando a condutividade elétrica. Não foi identificada a relação da salinidade com intrusão marinha na área estudada.

Palavras-chave: Aquífero aluvionar; Isótopos; Metais; Carcinicultura.

ABSTRACT

HYDROCHEMICAL-ENVIRONMENTAL STUDY OF THE LOW JAGUARIBE ALLUVIAL AQUIFER, ITAIÇABA – CEARÁ. In the countryside of the state of Ceará, groundwater is considered an important source of water, mainly from alluvial plains. The city of Itaiçaba (CE), located in the low Jaguaribe hydrographic basin, although supplied with treated water, relies on groundwater for its water supply. In the low Jaguaribe region, large shrimp farms and plantations are present, which together with poor sanitation can cause contamination and salinization. The objective of this study was to evaluate the quality of surface waters and groundwater, analyzing the physical and chemical parameters, and to provide preliminary data on the concentration

of heavy metals. For understanding the recharge process, $\delta^{18}\text{O}$ was measured and the water balance was carried out. The reference values established by the Brazilian legislation were used to assess the level of water contamination. For all samples, some parameters of water quality were higher than those allowed for drinking water, among them, turbidity, nitrate, Fe, and total dissolved solids. Al, Ba, Mn, Ni metals were observed in all samples, but in concentrations generally below those recommended for drinking water. The positive values of $\delta^{18}\text{O}$ indicated the infiltration of evaporated water into wells located in the shrimp farming area, which may, together with the poor sanitation, contribute to the input of salts and contaminants. The isotopic results show the entry of rainwater and surface waters from leaching of the salinized soil into the alluvial aquifer, increasing therefore the electrical conductivity. The relationship between salinity and saltwater intrusion in the studied area was not identified.

Keywords: Alluvial aquifer; Isotopes; Metals; Shrimp farming.

1 INTRODUÇÃO

Boa parte dos estudos voltados para as áreas de recursos hídricos subterrâneos recaem sobre o seu uso mais nobre, o consumo humano, visando, principalmente, a preocupação com a exploração racional e sustentável da água, frente à grande demanda ocasionada pelo aumento da população global e contaminação dos mananciais superficiais.

No Ceará, especificamente no interior do Estado, as águas subterrâneas são consideradas fontes preciosas de abastecimento hídrico, principalmente, em áreas sedimentares e aluvionares localizadas ao longo de rios e/ou nos limites litorâneos, que são as principais fontes de água subterrânea de boa qualidade. Já os poços em áreas cristalinas captam, geralmente, águas salobras com teor em sólidos dissolvidos totais muito acima do permitido para consumo humano (GOMES 2005).

Os aluviões, por possuírem boa permeabilidade e porosidade e nível estático raso, constituem-se como uma fonte alternativa de fácil acesso para exploração de água subterrânea. Por outro lado, são exatamente estas características que favorecem a migração de poluentes, tornando estas áreas vulneráveis à contaminação. Os poluentes podem ser oriundos das diversas atividades, tais como a agricultura e a carcinicultura, além da precária rede de esgotamento. Em 2011 a região apresentava extensas áreas de aquicultura, com grande volume de atividades voltadas para a criação de camarão, contabilizando 55 fazendas de carcinicultura nos municípios de Russas, Quixeré, Jaguaruana e Itaiçaba (LEITÃO *et al.* 2011), cujo processo contínuo de descarga, resultante da renovação da água dos tan-

ques de criação, pode acarretar problemas ao meio ambiente, como eutrofização, alteração estrutural de comunidades biológicas e contaminação por metais pesados. Segundo BOYD (1995), a atividade de carcinicultura ocasiona prejuízos ao meio ambiente, principalmente, relacionados à dispersão de metais pesados oriundos da alimentação artificial e dos fertilizantes utilizados como suplementos dos nutrientes fornecidos aos crustáceos.

O Município de Itaiçaba está localizado às margens do rio Jaguaribe e possui rede de distribuição de água tratada pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), mas não dispõe de esgotamento sanitário para a população, que faz uso de fossas sépticas e negras. Detectou-se, ainda, o despejo das águas residuárias em valas no solo e no rio, contribuindo para o aumento da carga poluidora na drenagem e nos aquíferos.

A água subterrânea captada por poços privados é utilizada para diversos fins, como carcinicultura, agricultura, pecuária e, inclusive, para o consumo humano. Na proximidade com a área do estuário, onde a diminuição do fluxo do rio é ocasionada pelas barragens, há diversos poços que captam água subterrânea para a atividade de carcinicultura, que pode estar associada à intrusão marinha no aluvião.

BARBOSA (2004) realizou pesquisas hidroquímicas, concentrando-se apenas no aluvião do rio Jaguaribe na sede do município de Itaiçaba, constatando, principalmente, o aporte de sais ao rio Jaguaribe no período de estiagem.

CHAGAS & NOBRE (2010) também realizaram pesquisas hidroquímicas no município, em 21 poços amostrados ao longo do rio, desde sua

sede até o limite municipal. No período da pesquisa o município sofreu com cheias que inundaram boa parte da zona urbana, sendo constatada contaminação antrópica, principalmente, pelo nitrato relacionado ao efluente das fossas sépticas. Estes autores também realizaram as primeiras medições dos teores de brometo nessas águas, objetivando o reconhecimento da intrusão salina, entretanto, sem uma conclusão precisa. Provavelmente, a área escolhida para amostragem pode não ter sido a mais adequada para se detectar altas concentrações de brometo.

Os estudos de monitoramento da salinidade do rio e avaliação da potabilidade dos recursos hídricos no município são muito relevantes, visto que muitos poços são explorados de forma indiscriminada e, muitas vezes, em condições sanitárias

insatisfatórias, gerando fontes potenciais de contaminação aos aquíferos e, conseqüentemente, prejuízo à saúde dos seus usuários.

Com o intuito de aprofundar os conhecimentos sobre a qualidade da água subterrânea desse município e os fatores que causam mudanças em sua composição e concentração, o presente trabalho teve como objetivo a sua caracterização físico-química e isotópica (^{18}O), tendo em vista o crescente desenvolvimento da região.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Itaiçaba encontra-se na porção nordeste do Ceará e está inserido na região do Baixo Jaguaribe (Figura 1), distando cerca de 129 km de Fortaleza.

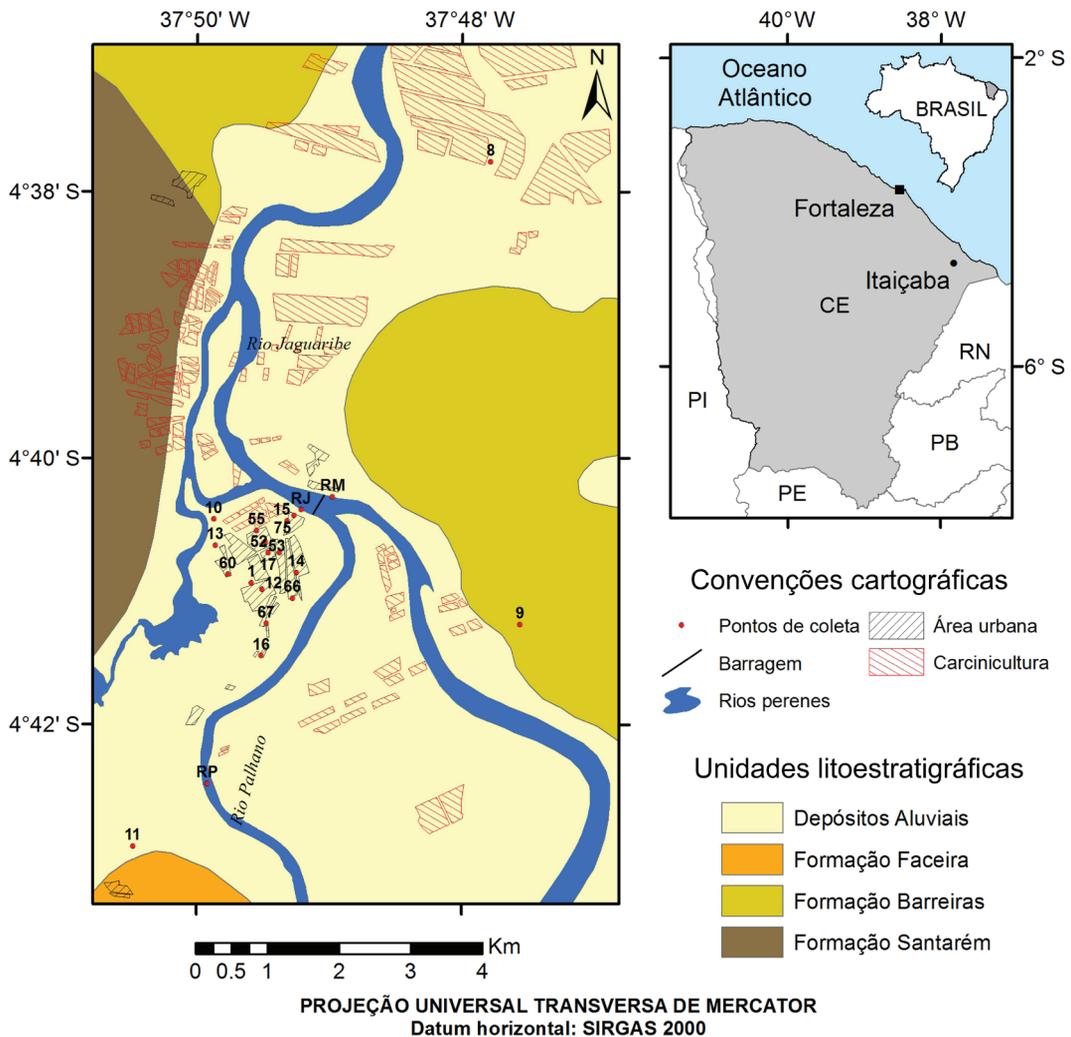


FIGURA 1 – Mapa de localização da área de estudo no município de Itaiçaba (CE) e seu contexto geológico (Modificado de CPRM 2003).

Segundo a CAGECE (*apud* CPRM 1998), 74% da população urbana era atendida com água oriunda de 4 poços tubulares, com adução de 45 m³/h. Atualmente, de acordo com o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE 2012) e a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH/CE 2012), cerca de 92% do município dispõe de cobertura de abastecimento de água, mas sem instalações de rede de esgotos, o que pode prejudicar a qualidade dos mananciais subterrâneos. Os tipos de esgotamentos sanitários utilizados são representados por: rede pluvial (0,13%), fossa séptica (3,19%) e outros (92,43%).

Do ponto de vista geomorfológico, a área apresenta duas unidades morfoestruturais, representadas pela Depressão Sertaneja e a Chapada do Apodi. Do ponto de vista geológico parte da área está na Bacia Potiguar cretácea e coberturas sedimentares cenozoicas, que incluem depósitos das Formações Faceira e Barreiras e sedimentos das planícies fluviais, sendo as mais expressivas as formadas pelos rios Jaguaribe e Banabuiú (CPRM 2003, SOUZA *et al.* 2006). Os depósitos aluviais correspondem a cerca de 60% a 70% da geologia da área estudada e são representados por sedimentos areno-argilosos recentes, que margeiam a calha dos principais rios e riachos da região. Nos baixos cursos apresentam granulação fina a média, areia argilosa e, às vezes, horizontes predominantemente argilosos (SRH 2002, BARBOSA 2004).

Já os domínios hidrogeológicos são caracterizados por rochas cristalinas do Grupo Orós, coberturas sedimentares e depósitos aluvionares (EMBRAPA 2006). As rochas cristalinas predominam em profundidade, representando o que se conhece por aquífero fissural, e as coberturas sedimentares compreendem manchas isoladas de sedimentos detríticos (SRH 2012).

De acordo com o IPECE (2012) o clima da região é classificado como Tropical Quente Semiárido brando, com pluviosidade total anual média de 935,9 mm e temperaturas médias anuais entre 26 °C a 28 °C. A rede hidrográfica reflete as condições climáticas da região, onde os rios são intermitentes e fluem somente em épocas chuvosas, com ápice nos meses de fevereiro a abril. Na estiagem eles secam e permanecem com água somente nas áreas em que o mar avança sobre o leito do rio, podendo vir a salinizar o aquífero aluvial devido à infiltração a partir do rio salobro, dependendo do gradiente hidráulico entre o rio e o aquífero.

3 FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO

No município de Itaiçaba as fontes potenciais de contaminação para os corpos d'água estão relacionadas às atividades da carcinicultura, agrícola e agropecuária e aos efluentes municipais, em função da emissão de altas cargas de nutrientes, material em suspensão e da matéria orgânica liberada para as águas costeiras (JONES *et al.* 2001, ARAÚJO *et al.* 2006). A criação de camarões em cativeiros é uma atividade de interesse econômico implantada na região estuarina do rio Jaguaribe, que engloba os municípios de Aracati, Fortim e Itaiçaba, com 122 empreendimentos (ABCC 2005, IBAMA 2005). Devido à contínua renovação de água, essa atividade gera descarga de efluente contendo restos alimentares, fertilizantes (suplementos de nutrientes), fezes, exúvia e microrganismos mortos provindos do material residual orgânico e sólido (pele e cabeça do camarão). Além do aspecto lamoso dos sedimentos de fundo dos tanques, as cargas residuais nos viveiros, sedimentos do fundo do tanque e efluentes de despesca acarretam problemas ao meio adjacente como a eutrofização e contaminação por metais pesados (Cu, Zn, Pb). Impactos relacionados com a salinização de aquífero, supressão de manguezais e mata ciliar também foram detectados em diversos estudos (BOYD 1995, BERGHEIM & ASCARGD 1996, SANTOS 2005, LACERDA 2006, LOPES 2006, LEITÃO & LIMA 2006, MEIRELLES *et al.* 2007, TORRES 2009).

As atividades agrícola e agropecuária vêm contribuindo para a degradação dos solos e da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, em decorrência da eliminação de esterco de animais, aplicação de fertilizantes e uso de pesticidas nos solos. O trecho ao longo do rio Jaguaribe, entre as barragens do açude Castanhão e de Itaiçaba, corresponde a um agropólo de cultivo com irrigação implantado pela Secretaria da Agricultura e Pecuária do Estado do Ceará (SEAGRI); no período de 2003-2004, ARAÚJO *et al.* (2006) constataram diminuição da qualidade das águas deste rio.

Soma-se à questão da contaminação das águas, a problemática da salinização dos solos associada à ação da evaporação decorrente do clima quente, uso agrícola e irrigação, que elevam os teores de sais nas águas subterrâneas e superficiais em função da lixiviação do solo em épocas chuvosas.

O município não possui rede de coleta e tratamento de esgoto, sendo utilizado o sistema de fossas negras e fossas sépticas. As águas residuárias e esgotos infiltram no solo e atingem as águas subterrâneas, tendo como principais contaminantes os compostos ricos em nitrogênio, fósforo, patógenos, além de outras substâncias como graxas, óleos, sais, metais, agentes quelantes, sedimentos etc. (CASTANY 1975, FEITOSA 2008, MANAHAN 2013).

4 METODOLOGIA

Foram realizadas três campanhas para coleta de amostras de águas de poços e dos rios Jaguaribe e Palhano (Figura 1), abrangendo períodos de estiagem e chuva: nos anos de 2012 (março e agosto) e 2013 (abril). As amostras foram submetidas às análises físico-químicas e químicas para íons maiores e menores e classificadas quanto ao tipo hidroquímico, segundo Diagrama de Piper.

As técnicas analíticas utilizadas foram métodos titulométricos, potenciométricos, espectrofotométricos e fotometria de chama, determinando-se: dureza, alcalinidade, íons maiores, compostos nitrogenados, brometo, pH e condutividade elétrica (CE). A determinação da amônia iniciou-se em campo com a adição de reagentes logo após a coleta e as medidas de pH e CE foram realizadas em campo. Todas essas análises seguiram os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA 2005) e foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Ambiental (LGA) do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. Os sólidos totais dissolvidos (STD) foram obtidos a partir da soma dos íons maiores, incluindo o nitrato (NO_3^-), e também calculados pelo programa Qualigraf (MÖBUS 2013).

A concentração dos elementos-traço de Al, Ba, Cr, Mn, Ni e Pb foi determinada pelo método da espectrometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite, no LGA.

O ^{18}O é um isótopo estável do oxigênio, ou seja, não sofre decaimento radioativo, encontra-se nas águas naturalmente em quantidades abundantes suficientes que permitem seu uso como marcador. A razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ nas precipitações decresce com a distância à costa, com o aumento da altitude, com a diminuição da temperatura e com a quantidade de chuva. Quando o solo é muito permeável, as águas pluviais se infiltram

rapidamente, recarregando os reservatórios subterrâneos, sem que a evaporação atue, e a pouca água que fica em superfície se evapora. Desta forma não ocorre modificação isotópica importante, e a água subterrânea deverá apresentar composição isotópica correspondente à média ponderada das composições isotópicas das precipitações. No entanto, de acordo com SALATI *et al* (1971) diversos fatores podem determinar a composição isotópica de águas subterrâneas, entre os quais: a) mistura com água de origem não-meteorica; b) influência de águas fósseis; c) trocas isotópicas entre a água e minerais dos aquíferos. Este isótopo foi utilizado no presente estudo para identificar se a fonte de contaminação salina nas águas é marinha ou originada por processos de evaporação. Para determinação do isótopo natural estável ^{18}O , as amostras foram enviadas para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) e o método aplicado foi o *Cavity Ring-down Spectroscopy* (CRDS). Para o estudo da interação mar-rio-aquífero foram determinadas razões iônicas, isotópicas e concentração de brometo.

Para o cálculo do balanço hídrico e da evapotranspiração potencial foi empregado o método de Thornthwaite & Mather *apud* VASCONCELOS (1999), utilizando-se os dados de precipitação e de temperatura obtidos com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, correspondente ao período de 32 anos (1981 a 2012). A evapotranspiração real foi estimada considerando a capacidade de retenção de água no solo (CAD) como sendo 100 mm. Como produto do balanço hídrico estimou-se a água disponível para recarga subterrânea em um ano hidrológico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço hídrico

Pela avaliação dos dados referentes ao Balanço Hídrico (Tabelas 1 e 2), observou-se que o período mais seco ocorre, em geral, de agosto a novembro, não ocorrendo infiltração efetiva no aquífero; quando chove, toda água precipitada é evaporada ou absorvida pelo solo, alimentando a zona vadosa. Em contrapartida, o período chuvoso no município tem seu ápice de março a abril e é responsável pela recarga do aquífero. Os anos mais expressivos em termos de precipitação, na série histórica (1981 a 2012),

TABELA 1 – Cálculos do balanço hídrico do município de Itaiçaba (1981 a 2012).

MÊS	Tm (°C)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
Janeiro	27,0	12,5	1,06	152,2	76,6	-75,6	0,0	76,6	0,0
Fevereiro	25,1	11,2	0,95	106,0	104,2	-1,8	0,0	104,2	0,0
Março	25,4	11,4	1,04	120,9	181,3	60,4	60,4	120,9	0,0
Abril	25,3	11,4	1,00	114,7	167,4	52,7	100,0	114,7	13,1
Mai	25,6	11,6	1,02	121,8	100,3	-21,5	78,5	100,3	0,0
Junho	24,5	10,8	0,99	101,6	40,3	-61,3	17,2	40,3	0,0
Julho	24,5	10,8	1,02	104,7	16,7	-88,0	0,0	16,7	0,0
Agosto	25,3	11,4	1,03	118,1	1,1	-117,0	0,0	1,1	0,0
Setembro	26,7	12,3	1,00	138,1	0,1	-138,0	0,0	0,1	0,0
Outubro	27,3	12,8	1,05	156,6	0,6	-156,0	0,0	0,6	0,0
Novembro	28,3	13,5	1,03	173,9	2,2	-171,7	0,0	2,2	0,0
Dezembro	28,0	13,3	1,06	172,5	9,2	-163,3	0,0	9,2	0,0
Total				1581,0	700,0			586,8	13,1

Tm: Temperatura média; Im: Índice térmico mensal; K: Fator de correção da latitude; ETP: Evapotranspiração Potencial; PPT: Precipitação Total; C: Constante do solo; ETR: Evapotranspiração Real; Ie: Infiltração Efetiva.

TABELA 2 – Cálculos do balanço hídrico no ano de 2012, do município de Itaiçaba.

MÊS	Tm (°C)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
Janeiro	27,0	12,5	1,06	152,2	15,7	-136,5	0,0	15,7	0,0
Fevereiro	25,1	11,2	0,95	106,0	251,9	145,9	100,0	106,0	45,9
Março	25,4	11,4	1,04	120,9	80,8	-40,1	59,9	80,8	0,0
Abril	25,3	11,4	1,00	114,7	30,8	-83,9	0,0	30,8	0,0
Mai	25,6	11,6	1,02	121,8	0,0	-121,8	0,0	0,0	0,0
Junho	24,5	10,8	0,99	101,6	0,0	-101,6	0,0	0,0	0,0
Julho	24,5	10,8	1,02	104,7	0,0	-104,7	0,0	0,0	0,0
Agosto	25,3	11,4	1,03	118,1	0,0	-118,1	0,0	0,0	0,0
Setembro	26,7	12,3	1,00	138,1	0,0	-138,1	0,0	0,0	0,0
Outubro	27,3	12,8	1,05	156,6	0,0	-156,6	0,0	0,0	0,0
Novembro	28,3	13,5	1,03	173,9	0,0	-173,9	0,0	0,0	0,0
Dezembro	28,0	13,3	1,06	172,5	0,0	-172,5	0,0	0,0	0,0
Total				1581,0	379,2			233,3	45,9

Tm: Temperatura média; Im: Índice térmico mensal; K: Fator de correção da latitude; ETP: Evapotranspiração Potencial; PPT: Precipitação Total; C: Constante do solo; ETR: Evapotranspiração Real; Ie: Infiltração Efetiva.

foram os de 1985 e 2009 com, respectivamente, 2.098 mm e 1.612,8 mm.

A infiltração eficaz calculada para o município em estudo, de acordo com o método do balanço hídrico, foi de 13 mm m⁻², que corresponde a cerca de 2% da precipitação média histórica (1981- 2012). O resultado alcançado para o ano de 2012 demonstra que houve uma infiltração eficaz de 46 mm m⁻², correspondendo a 12% da precipitação anual. Isso foi gerado devido ao total de chuva no mês de fevereiro de 2012.

Embora a recarga hídrica anual, em média, tenha sido insignificante, em período de elevada pluviometria ocorre infiltração a partir da chuva, como observado a partir dos valores de isótopos dos poços (principalmente do grupo 1), conforme se constatará no item 5.3.

5.2 Águas superficiais

Salinidade, pH e turbidez

A escassez de chuva na região nos últimos anos é refletida sobre a qualidade da água dos mananciais, os quais tendem a salinizar a ponto de tornarem-se impróprios ao abastecimento para consumo humano. No rio Jaguaribe (ponto RM), à montante da barragem de Itaiçaba, a salinidade da água expressa pela condutividade elétrica apresentou um teor médio de 938 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo que nas duas primeiras amostragens (março e agosto de 2012) a condutividade foi em torno de 440 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e, oito meses depois (abril/2013), passou para 1933 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Esta elevação se deve ao baixo total pluviométrico apresentado no ano de 2012 (379,2 mm) e à evaporação favorecida

pela barragem do rio, além da quantidade de despejos dos efluentes municipais e de diversas carcinoculturas ao longo do rio (Figura 1).

No rio Palhano (ponto RP), o processo evaporativo foi mais intenso do que o verificado no rio Jaguaribe, visto que a condutividade elétrica, ao longo do tempo, aumentou 6 vezes, da primeira para última coleta. Os valores variaram de 1036 (água doce) a 5940 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (água salobra), com média elevada de 2921 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabela 3), evidenciando maior tempo de residência da água.

Quanto ao pH, as águas foram geralmente neutras a alcalinas (Tabela 3). Os valores mais baixos foram encontrados na primeira amostragem (março/2012), 6,9, e nas seguintes (agosto/2012 e abril/2013) houve uma tendência a aumentar, com o valor máximo observado de 8,5.

Devido ao fraco aporte de sedimentos e circulação da água, ocasionando, portanto, a sedimentação das partículas ao longo do tempo, a turbidez foi sempre baixa e com valor máximo de 15 UNT (Tabela 3). No entanto, com a continuidade da redução do volume de água do rio pela evaporação, a turbidez aumentará devido ao crescimento de microalgas, tornando a água bruta de difícil tratamento para o abastecimento.

Elementos maiores, nitrogênio e fosfato

A partir dos resultados das análises químicas as amostras de água (RM, RJ e RP) foram classi-

ficadas como do tipo cloretada sódica, e apenas a do rio Palhano, na terceira amostragem, classificou-se como cloretada sódica cálcica. A classificação demonstra, basicamente, águas homogêneas sem mistura com outras fontes, como visto na figura 2.

Segundo a classificação de sólidos totais dissolvidos realizada pelo programa Qualigraf (MÖBUS 2003), as amostras do rio Jaguaribe à montante e à jusante da barragem são de águas doces. Apenas na terceira amostragem o rio Jaguaribe, à montante (RM), concentrou sais, passando para a classe salobra, e a do rio Palhano (RP) passou de salobra para salgada.

Na terceira amostragem observou-se que o rio Jaguaribe (RM) apresenta teores de sódio e cloreto de 534 mg L^{-1} e 304 mg L^{-1} , respectivamente, portanto, acima do padrão para Águas Doces - Classe 2 estabelecido pelo CONAMA (BRASIL 2005), as quais são destinadas ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional. Contribui para o processo da salinização da água, a precipitação de sais na camada superior do solo, devido à evaporação, os quais são lixiviados para os rios nas primeiras chuvas, além das possíveis fontes de contaminação. A tabela 3 apresenta as concentrações dos elementos maiores obtidas nas três campanhas.

Os compostos nitrogenados, nitrato e amônia, não apresentaram níveis detectáveis. Já o fosfato nas duas primeiras amostragens, apresentou concentra-

TABELA 3 – Características físicas e químicas (concentrações em mg L^{-1}) das águas superficiais dos rios Jaguaribe e Palhano (março e agosto/2012 e abril/2013).

Ponto	pH (a 25°C)	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (UNT)		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Br ⁻	Fe(t)	N-NO ₃	N-NH ₃ ,4	Alcalinidade Total	Dureza Total
			STD	500														
CONAMA 357			100	500		250	250					1,4		0,3	10			
RM - média	7,80	938	11	671	136	231	31	137	88	22	23	0,6	0,6	0,3	<0,1	<0,1	112	152
Mar/12	7,63	441	8	310	128	78	7	52	9	22	12	0,6	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	105	104
Ago/12	8,05	439	14	314	128	82	6	54	10	16	13	0,6	0,3	0,2	<0,1	<0,1	105	96
Abr/13	7,72	1933	ND	1389	153	534	80	304	245	29	44	ND	0,8	0,3	1	<0,1	125	256
RJ - média	8,13	449	15	410	125	85	7	97	310	20	14	0,7	0,4	0,2	<0,1	<0,1	102	108
Mar/12	7,84	449	13	425	118	86	7	58	9	21	13	0,7	0,5	0,2	<0,1	<0,1	97	108
Ago/12	8,54	453	15	312	123	82	6	55	10	19	12	0,6	0,4	0,2	<0,1	<0,1	101	96
Abr/13	8,13	467	ND	513	133	86	7	179	71	21	16	ND	0,4	0,2	1	<0,1	109	120
RP - média	7,20	2921	12	1706	46	1076	63	151	209	87	60	0,7	1,5	1,3	<0,1	<0,1	38	465
Mar/12	6,9	1036	11	584	64	274	8	163	18	22	7	0,6	0,8	1,6	<0,1	<0,1	53	84
Ago/12	8,1	1787	13	1100	54	665	42	213	14	61	44	0,7	1,2	0,3	<0,1	<0,1	44	336
Abr/13	6,62	5940	ND	3425	20	2290	139	77	594	178	128	ND	2,4	1,9	<0,1	<0,1	16	976

RM: Rio Jaguaribe à montante da barragem de Itaipaba; RJ: Rio Jaguaribe à jusante da barragem de Itaipaba; RP: Rio Palhano; ND: Não determinado; <0,1: inferior ao limite de detecção.

ções entre 0,12 e 0,17 mg L⁻¹, não sendo detectado na última amostragem (Tabela 3). Isso sugere que os efluentes da carcinicultura, em algum período, podem estar contribuindo no processo de eutrofização dos mananciais superficiais, devido o aporte de efluentes com nutrientes. De acordo com RIBEIRO *et al.* (2014), os insumos utilizados na atividade carcinicultura são: ração, fertilizantes e antibióticos.

O resultado para o íon brometo só apresentou flutuações nos valores à montante, mas não chegando a 1 mg L⁻¹, exceto para o rio Palhano, com o teor de 2,4 mg L⁻¹, na terceira campanha, porém não sendo anormal, visto que suas águas são salobras (Tabela 3).

Pelo exposto, percebe-se que os rios Palhano e Jaguaribe se diferem, principalmente, quanto ao nível de salinidade. O rio Palhano apresenta maiores valores de condutividade elétrica, devendo-se, provavelmente, à sua baixa vazão.

Elementos-traço

As amostras apresentaram para o alumínio teores entre 140 µg L⁻¹ e 525 µg L⁻¹ (Tabela 4), portanto, acima do valor máximo permitido pelo CONAMA, estabelecido em 100 µg L⁻¹. Os teores indicam concentração e dispersão do elemento, possivelmente, influenciados pelos períodos e quantidade de precipitação. As maiores concentrações em Al foram detectadas nas amostras com baixo pH do rio Palhano.

Os teores dos elementos bário, chumbo, manganês e níquel foram sempre inferiores ao estabelecido pela Resolução nº 357 do CONAMA para Classe 2 e o cromo não apresentou teores quantificáveis (Tabela 4).

TABELA 4 – Concentração de metais tóxicos (em µg L⁻¹) nas águas de cursos d'água de Itaiçaba.

<i>Amostras</i>	<i>Bário</i>	<i>Alumínio</i>	<i>Manganês</i>	<i>Níquel</i>	<i>Chumbo</i>	<i>Cromo</i>
CONAMA 357	700	200	100	25	10	50
RM - Mar/12	177	376	41	19	11	<0,82
RM - Abr/13	113	140	40	19	12	<0,82
RJ - Mar/12	389	194	39	11	23	<0,82
RJ - Abr/13	123	283	47	21	12	<0,82
RP - Mar/12	250	409	40	6	68	<0,82
RP - Abr/13	543	525	65	10	33	<0,82

<LQ: inferior ao limite de quantificação; RM: Rio Jaguaribe à montante da Barragem; RJ: Rio Jaguaribe à jusante da Barragem; RP: Rio Palhano

5.3 Águas subterrâneas

Na área de estudo foram coletadas amostras de 20 poços, dos tipos tubular (amostras 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 52, 53, 55, 60, 62, 67 e 75), chafariz (amostras 1, 9 e 66), e amazonas (amostras 11 e 16). Desses, 19 estão no Aquífero Aluvionar, e um na Formação Barreiras (Figura 1). Nas três campanhas de amostragem foi medido o nível estático dos poços, que variou entre 2,6 e 5,4 m.

pH, salinidade e turbidez

As amostras do aquífero aluvionar apresentaram valores de pH entre 6,15 e 6,90 (Tabela 5), geralmente abaixo dos valores encontrados para os rios da área, que teve como valor máximo 8,54. Apenas no poço 9 o pH da água foi permanentemente muito abaixo, com média de 3,87 ± 0,03 e, dessa forma, imprópria para consumo humano (Tabela 5). A água ácida favorece a dissolução de metais, como o alumínio, presente no solo.

A água subterrânea apresentou grande variação da salinidade entre os poços, expressa pela condutividade elétrica. Os valores médios ficaram entre 317 e 3.808 µS cm⁻¹. Dos 20 poços, apenas oito apresentaram águas doces (STD < 500 mg L⁻¹), o restante correspondeu a águas salobras. Já para um mesmo poço, a variação foi pequena, sendo que o coeficiente de variação resultante das três amostragens ficou entre 2 e 20%, não sendo observada uma nítida variação na salinidade em função das chuvas ocorridas no período de amostragem.

Os pontos 8 e 55 apresentaram excepcional condutividade elétrica e podem estar sofrendo influência da proximidade a fazendas de carcinicultura, em área estuarina. Outra hipótese é a interferência da intrusão salina nas águas subterrâneas nestes pontos.

A circulação lenta da água subterrânea e a renovação deficiente por infiltração de águas de chuva tendem a concentrar sais no aquífero. Além disso, a elevada salinidade encontrada nas águas superficiais contribui continuamente no enriquecimento em sais das águas subterrâneas do aluvião, assim como a lixiviação do solo, seco e com crostas de sais, durante o processo de infiltração das escassas chuvas.

A turbidez da água dos poços variou de 2,4 a 16,8 UNT e em apenas 22% das amostras a turbidez foi igual ou inferior a 5 UNT (Tabela 5). A turbidez pode prejudicar a potabilidade da água, principalmente se as partículas coloidais em suspensão estiverem associadas a agrotóxicos e metais

TABELA 5 – Características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas (março e agosto/2012 e abril/2013).

Nº do Poço	Campanha	pH (a 25 °C)	CE (µS/cm)	Turbidez (UNT)	mg L ⁻¹														Alcalinidade	Dureza Total
					STD	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Br ⁻	Fe(t)	N-NH ₃ ,4	N-NO ₃			
1	Mar/12	6,81	321	7,6	244	108	39	26	39	4	19	9	0,7	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	89	84	
	Ago/12	6,44	307	6,0	261	113	35	8	32	1	21	7	0,7	0,4	<0,1	<0,1	2	93	80	
	Abr/13	6,67	323	ND	300	133	47	7	46	38	21	9	ND	0,6	<0,1	<0,1	2	109	88	
8	Mar/12	6,44	5000	7,5	2221	79	609	321	766	150	152	141	0,6	3,6	<0,1	<0,1	22	65	968	
	Ago/12	6,36	2880	9,0	1740	64	655	312	335	46	136	68	0,6	1,9	0,3	<0,1	23	53	624	
	Abr/13	6,67	3530	ND	2267	94	947	367	244	409	131	76	ND	3,4	1,1	<0,1	15	77	644	
9	Mar/12	3,91	531	4	256	4	96	13	64	18	10	12	0,6	0,5	<0,1	<0,1	14	3	76	
	Ago/12	3,83	440	8,6	672	2	88	17	47	16	8	9	0,5	0,2	0,1	<0,1	3	1	56	
	Abr/13	3,87	451	ND	234	1	80	24	56	48	6	10	ND	0,3	0,1	<0,1	10	0,8	56	
10	Mar/12	6,59	568	6	451	153	104	5	96	12	22	19	0,5	0,8	0,5	<0,1	<0,1	125	136	
	Ago/12	6,67	848	9	672	246	157	58	98	8	51	22	0,5	0,7	0,7	<0,1	3	202	220	
	Abr/13	6,72	818	ND	665	271	137	7	91	89	34	36	ND	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	222	236	
11	Mar/12	6,15	970	7	526	39	243	23	132	47	16	18	0,5	1,2	<0,1	<0,1	5	32	116	
	Ago/12	6,18	978	7	586	44	237	43	123	37	14	15	0,5	0,8	<0,1	<0,1	11	36	100	
	Abr/13	6,47	837	ND	537	59	209	33	105	110	8	12	ND	0,7	<0,1	<0,1	2	48	72	
12	Mar/12	6,42	710	4	454	113	108	32	77	4	45	28	0,5	1,1	<0,1	<0,1	15	93	228	
	Ago/12	6,55	684	6	499	138	113	53	54	1	48	20	0,5	0,7	<0,1	<0,1	9	113	204	
	Abr/13	6,49	762	ND	552	163	127	38	75	69	54	26	ND	0,8	<0,1	<0,1	11	133	244	
13	Mar/12	6,49	1503	6	989	187	362	13	289	18	26	71	0,5	1,4	<0,1	<0,1	0,6	154	360	
	Ago/12	6,52	1299	17	866	281	301	8	157	7	58	33	0,5	0,7	1,0	<0,1	0,6	230	280	
	Abr/13	6,60	1077	ND	813	271	229	3	114	124	26	46	ND	0,3	0,8	<0,1	<0,1	222	256	
15	Mar/12	6,84	946	7	688	227	164	35	163	32	40	16	1,0	1,6	<0,1	0,1	2	186	168	
	Ago/12	6,90	734	8	530	197	129	23	103	4	27	12	0,7	0,5	0,2	<0,1	<0,1	162	120	
	Abr/13	6,60	514	ND	450	153	100	8	81	76	19	13	ND	0,4	0,1	<0,1	<0,1	125	104	
16	Mar/12	6,96	1895	13,4	1199	158	542	36	320	32	50	52	0,6	2,0	1,1	<0,1	0,6	129	340	
	Ago/12	6,51	1771	13,7	1142	143	595	36	232	4	56	40	0,6	1,8	1,0	<0,1	2	117	308	
	Abr/13	6,42	2580	ND	1726	246	767	82	204	304	32	91	ND	6,8	0,6	<0,1	2	202	460	
17	Mar/12	6,62	944	5	552	163	131	58	69	32	56	25	0,6	3,1	<0,1	<0,1	19	133	244	
	Ago/12	6,61	874	11	655	182	121	81	81	25	58	17	0,5	0,3	0,2	<0,1	16	149	216	
	Abr/13	6,63	961	ND	748	227	147	81	104	108	59	22	ND	0,2	<0,1	<0,1	8	186	240	
52	Mar/12	6,58	2180	7	1241	306	180	122	415	32	45	84	0,6	ND	<0,1	0,1	2	250	464	
	Ago/12	6,51	1973	7	1477	276	540	124	249	15	90	44	0,5	ND	0,1	<0,1	27	226	408	
	Abr/13	6,38	776	ND	1243	261	405	93	159	203	72	50	ND	ND	<0,1	1,8	14	214	388	
53	Mar/12	6,27	601	5,4	484	123	112	13	96	6	26	16	0,5	1,1	<0,1	<0,1	2	101	132	
	Ago/12	6,29	561	6,2	395	123	96	25	65	4	30	11	0,5	0,4	0,4	<0,1	5	101	120	
	Abr/13	6,45	667	ND	459	163	119	24	86	83	30	16	ND	0,1	0,2	<0,1	4	133	144	
55	Mar/12	6,46	509	7,3	436	153	84	7	83	4	27	12	0,7	0,5	<0,1	<0,1	3	125	120	
	Ago/12	6,49	533	6,2	371	143	90	5	60	2	27	11	0,6	0,2	0,1	<0,1	3	117	112	
	Abr/13	6,52	553	ND	459	163	98	8	77	71	26	16	ND	0,4	0,1	<0,1	1	133	132	
60	Mar/12	6,64	1819	7,2	1361	212	419	108	352	32	37	83	0,5	2,1	<0,1	<0,1	9	174	436	
	Ago/12	6,52	1885	7,5	1387	222	520	146	215	10	120	34	0,4	0,6	<0,1	<0,1	21	182	440	
	Abr/13	6,40	1922	ND	1275	222	444	124	159	203	29	95	ND	0,6	<0,1	<0,1	12	182	468	
62	Mar/12	6,51	2050	4,4	1316	222	474	114	320	61	26	100	0,5	2,0	<0,1	<0,1	22	182	480	
	Ago/12	6,49	1758	3,2	1308	212	499	143	207	1	78	45	0,4	<0,1	0,1	<0,1	21	174	384	
	Abr/13	6,35	1871	ND	1298	237	431	145	163	213	42	69	ND	0,5	<0,1	<0,1	11	194	392	
66	Mar/12	6,75	1245	3,0	913	306	196	78	226	32	45	30	0,6	0,9	<0,1	<0,1	4	250	236	
	Ago/12	6,82	1055	6,5	858	266	235	87	139	6	56	17	0,5	0,1	<0,1	<0,1	5	218	212	
	Abr/13	6,91	1417	ND	1062	276	280	98	142	170	56	40	ND	0,1	<0,1	<0,1	6	226	308	
67	Mar/12	6,54	532	2,4	331	104	110	9	64	4	29	12	0,5	0,8	<0,1	<0,1	<0,1	85	124	
	Ago/12	6,32	619	7,5	401	118	127	16	58	3	51	5	0,5	0,4	0,1	<0,1	<0,1	97	148	
	Abr/13	6,29	833	ND	623	158	182	28	95	95	42	23	ND	1,9	0,5	<0,1	<0,1	129	200	
75	Mar/12	6,84	1056	15,5	810	315	149	50	195	18	50	29	0,6	1,4	<0,1	<0,1	2	259	244	
	Ago/12	6,86	867	5,3	712	291	125	47	99	11	58	16	0,5	1,0	0,1	<0,1	8	238	212	
	Abr/13	6,27	823	ND	709	276	129	32	102	104	45	20	ND	0,4	0,1	<0,1	1	226	196	

pesados; de acordo com VILAGINÈS (2003), em média 90% das substâncias tóxicas, minerais ou orgânicas, são adsorvidas a essas partículas.

Os valores máximos de ferro total foram encontrados nas amostras 16 (1,1 mg L⁻¹, março/2012) e 13 (1,0 mg L⁻¹, abril/2013). Nas outras amostras o teor em ferro foi geralmente em torno de 0,1 mg L⁻¹, portanto dentro do recomendado para águas potáveis.

Elementos maiores e nitrogênio

As amostras de águas subterrâneas, nas três campanhas, foram predominantemente classificadas como cloretadas sódicas, assim como as águas dos cursos d'água superficiais da área (Figura 2). Isso já é um indicativo da baixa precipitação pluviométrica ocorrida nos anos em que foram coletadas as amostras. A primeira e a segunda campanha para coleta de amostras foi realizada em 2012 e nesse ano a precipitação total anual foi de apenas 379,2 mm; em 2013, quando foi realizada a terceira campanha, o total anual de precipitação foi ainda menor, de 211 mm.

Os valores mínimos e máximos nos teores de cloreto permaneceram praticamente constantes; a

média dos resultados para cada período ficou em torno de 224 mg L⁻¹ no primeiro campo, 260 mg L⁻¹ no segundo e 271 mg L⁻¹ no terceiro (Tabela 5). Percebe-se um aumento gradual na concentração em cloreto e em outros sais, fazendo com que algumas amostras passem da classe doce (0 - 500 mg L⁻¹ de STD) para classe salobra (500 - 1500 mg L⁻¹). Quando a água circula lentamente no aquífero e a renovação (recarga) é deficiente a água tende a concentrar sais devido a dissolução dos minerais. Porém, entre os íons maiores presentes na água subterrânea, apenas o cloreto é o elemento que raramente está presente na rocha. Assim, sua presença na área está associada a dissolução de crostas salinas que se formam na superfície do solo durante prolongados períodos de seca e que progressivamente salinizam a água do solo, devido a taxa de evaporação ser maior que a taxa de precipitação.

Quanto ao uso da água para consumo humano, considerando o limite de 1000 mg L⁻¹ de STD, observou-se que 25% dos poços captam águas permanentemente fora do padrão.

Em alguns dos poços, com STD acima de 1000 mg L⁻¹, o brometo apresentou concentrações acima de 1 mg L⁻¹, chegando a 6,8 mg L⁻¹. Essas concentrações poderiam estar relacionadas a mis-

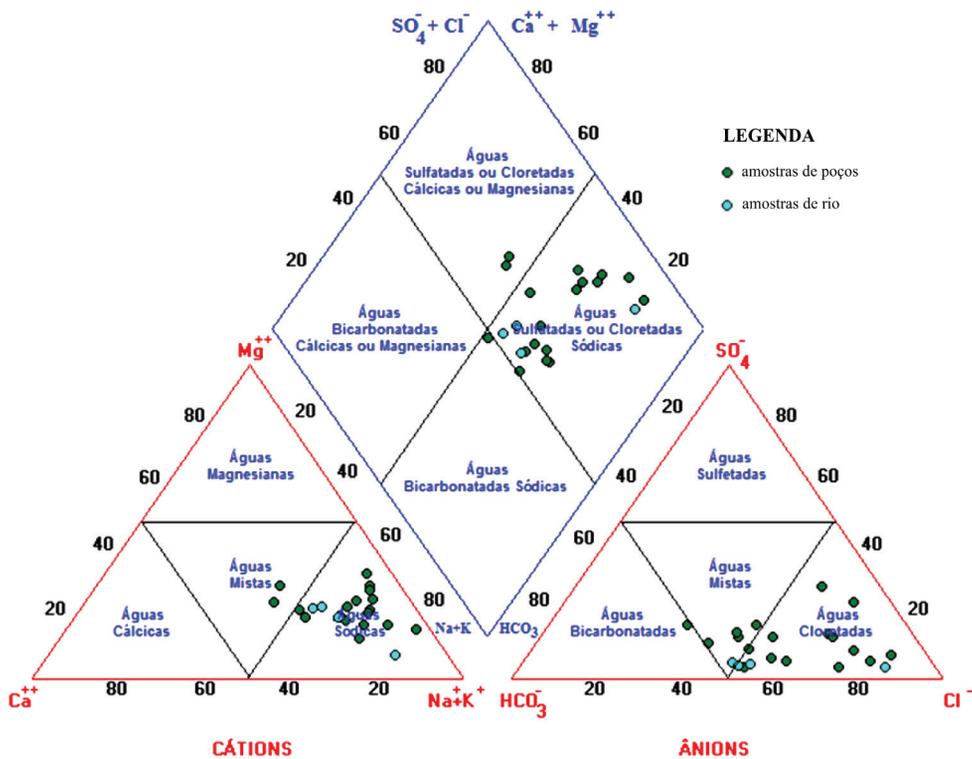


FIGURA 2 – Classificação das águas do aquífero aluvial e do Rio Jaguaribe coletadas no município de Itaiçaba (agosto de 2012).

tura com água marinha, visto que na época de estiagem prolongada, o mar avança sobre o leito do rio até a barragem de Itaiçaba, como já observado por BARBOSA (2004). Por outro lado, nesses poços observa-se enriquecimento em todos os elementos maiores, portanto a presença do brometo está mais relacionada a um processo evaporativo das águas doces superficiais do que com a contribuição marinha. Além disso, nos poços com maiores teores de brometo, poços 8 e 16, por exemplo, a razão Cl/Br não foi semelhante à da água do mar, ou seja, aproximadamente 288 em massa (McPHAIL *et al.* 2017).

O monitoramento do nitrogênio-nitrato (N-NO₃), entre 2009 (CHAGAS & NOBRE 2010) e 2012/2013 (esta pesquisa), de modo geral, mostrou que as concentrações sofreram alterações, mas sem haver tendência a aumentar ou diminuir (Figura 3). Cada poço tende a manter sua concentração dentro de um intervalo de valores e, considerando os 20 poços amostrados foi verificado que apenas dois (Poços 8 e 62) permaneceram, nas três campanhas, com valores acima de 10 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻, embora, em média, 8 poços apresentaram água com concentração acima deste valor (Tabela 5).

A origem do nitrato na água está comumente relacionada à intensificação da atividade agrícola, devido os resíduos animais e fertilizantes contêm nitrogênio; nas áreas onde não existe sistema adequado de esgotamento sanitário, como na área estudada, ocorre infiltração a partir de fossas sépticas e negras. Mas a baixa densidade demográfica verificada, aliada às concentrações de nitrato e de amônia (não detectada nas amostras), indicam que

fontes poluidoras sanitárias não são as principais, mostrando a necessidade de estudos aprofundados para identificar a fonte de nitrogênio nas águas.

Elementos traços

A dissolução do alumínio nas águas naturais pode ser influenciada pelo valor de pH mais ácido. Esse processo pode ser observado nas amostras do poço 9, as quais apresentaram concentrações anômalas em alumínio, entre 0,7 e 1,8 mg L⁻¹ (Tabela 4). Este ponto de coleta se refere a um chafariz localizado em um vilarejo à montante da barragem, em área de cultivo agrário e litologia pertencente à Formação Barreiras, cuja composição é formada por minerais areno-argilosos e solos lateríticos. O pH encontrado foi o mais ácido (média de 3,87), distinto das demais amostras de água, podendo estar concentrando o elemento, oriundo do solo, devido à dissolução na água ácida de percolação. O teor de Al encontrado classifica a água do poço 9 como imprópria para o consumo humano. Nos demais poços a concentração encontra-se, geralmente, abaixo de 200 µg L⁻¹ (Tabela 6). De acordo com FENZL (1988), nas águas subterrâneas a fonte de alumínio mais importante são as argilas e somente em águas ácidas (pH < 4) o alumínio atinge 1 mg L⁻¹, teor já considerado elevado.

O bário, elemento comum nas amostras, tanto subterrâneas (Tabela 6) como superficiais (Tabela 4), apresentou concentração entre 60 e 1000 µg L⁻¹, excedendo o limite de 700 µg L⁻¹ para águas potáveis em quatro poços (9, 11, 13 e 17). Como na área de estudo inexistem indústrias e efluentes in-

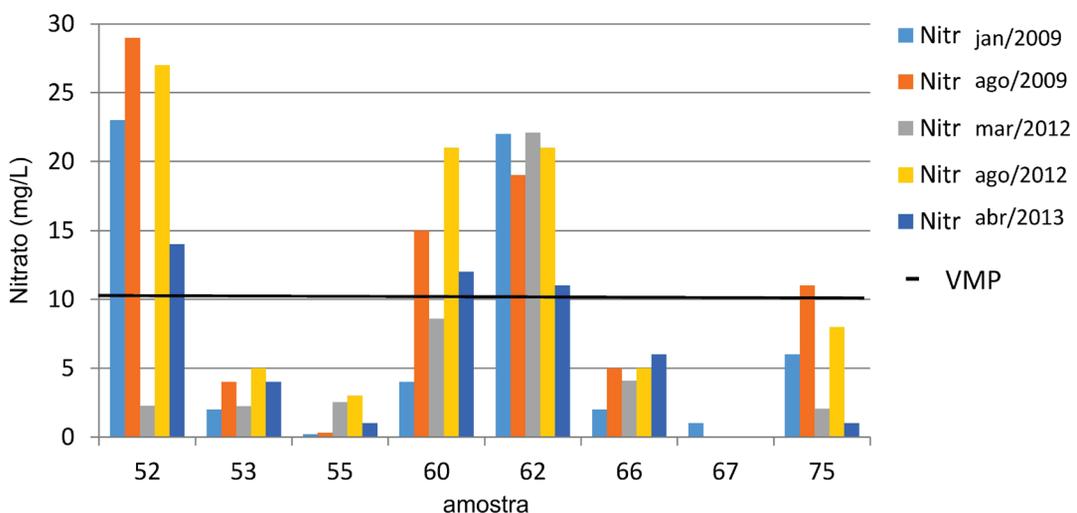


FIGURA 3 – Evolução temporal do teor de N-NO₃⁻ nas águas subterrâneas do aquífero aluvionar.

dustriais, estes teores de bário podem revelar o seu nível natural na água, assim como para os demais metais tóxicos.

As concentrações de cromo nas águas apresentaram-se abaixo do limite de quantificação do método para todas as amostras. Já para o elemento Pb, seis amostras apresentaram teor acima de $10 \mu\text{g L}^{-1}$, dentre elas novamente o poço 9, o chafariz, confirmando sua qualidade inadequada ao consumo humano. A Portaria 2914/2011 no seu Artigo 39º, §4º, admite valores para o manganês acima do VMP, porém que não ultrapasse $0,4 \text{ mg L}^{-1}$. Todas as amostras apresentaram manganês e algumas com valores anômalos, entre $1,4$ e $2,0 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores médios dos metais potencialmente tóxicos analisados, de todas as amostras de água subterrâneas dos 22 poços, mostram a seguinte relação de abundância: $\text{Ba} > \text{Mn} > \text{Al} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$, sem considerar os valores anômalos de Al e Mn, a concentração dos dois é aproximada e, portanto, mais de acordo com o que se observa nas águas naturais.

$\delta^{18}\text{O}$ das águas subterrâneas

Como forma de complementar a hidroquímica, utilizou-se a determinação do isótopo ambiental

^{18}O para interpretações sobre a origem e dinâmica da recarga aquífera.

Os resultados foram agrupados de acordo com os possíveis processos associados à origem da água subterrânea (Tabela 7), tendo como referência os valores de $\delta^{18}\text{O}$ das chuvas de Fortaleza (IAEA 1981) (Tabela 8) e do rio Jaguaribe (Tabela 9) e dados de pluviometria da área.

Nos cursos de água da área, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam de $2,77\%$, no período chuvoso, até $6,19\%$ no período seco (Tabela 9). Portanto, muito acima dos valores das chuvas regionais e, consequentemente, dos aquíferos recarregados pelas chuvas locais (Tabela 9), como evidenciado pelos poços do Grupo 2 (Tabela 7).

O Grupo 1 apresenta os valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas, com o mínimo de $-5,73\%$, mais baixos que os valores médios de longo prazo esperados para a chuva (Tabela 8), indicando menor contribuição de águas de chuva recentes ou de águas superficiais evaporadas. Os poços 1, 12, 17 (próximos entre si) e 9 (no lado oposto da cidade) demonstram relação com aquífero de litologia distinta, associada ao embasamento cristalino (e/ou seu manto de alteração) ou aquífero sedimentar (Barreiras), onde a infiltração de águas é menor ou mais lenta do que no aquífero aluvionar.

TABELA 6 – Concentração de metais tóxicos (em $\mu\text{g L}^{-1}$) nas águas subterrâneas de Itaipaba.

Elemento	Bário		Alumínio		Manganês		Níquel		Chumbo	
Portaria 2914/2011	700		200		100		70		10	
nº Campanha Poço	Mar/2012	Abr/2013								
	1	163	117	159	44	245	450	22	39	<LQ
7	432	ND	91	ND	53	ND	42	ND	<LQ	NC
8	63	111	154	52	1.264	1.649	65	95	39	76
9	762	829	1.811	742	71	95	75	71	9	20
10	582	171	133	<LQ	1.705	1.895	24	34	<LQ	<LQ
11	995	1.055	139	51	5	15	51	32	<LQ	<LQ
12	543	340	122	70	5	20	49	47	<LQ	<LQ
13	678	947	43	102	1.520	1.850	64	65	<LQ	<LQ
14	774	ND	129	ND	33	ND	17	ND	<LQ	ND
15	586	186	85	82	10	28	26	9	<LQ	<LQ
16	681	636	61	48	380	600	<LQ	4	9	52
17	823	834	66	153	120	320	8	<LQ	<LQ	<LQ
52	613	520	28	60	190	230	5	8	9	10
53	415	135	115	<LQ	4	4	15	19	<LQ	<LQ
55	401	232	88	59	1.979	2.090	33	43	<LQ	<LQ
60	604	337	75	<LQ	21	18	33	33	9	20
62	461	274	114	<LQ	78	42	28	8	17	8
66	704	360	<LQ	38	18	45	45	40	9	10
67	699	192	86	149	78	82	7	46	<LQ	<LQ
75	895	110	132	80	228	188	8	45	<LQ	<LQ

<LQ: inferior ao limite de quantificação; ND: não determinado.

TABELA 7 – Agrupamento dos poços segundo o resultado de $\delta^{18}\text{O}$.

Grupo	Faixa de valores	Período seco (ago/2012)	Período chuvoso (abr/2013)	Processo
1	-5,73 e -4,25	Poços: 1, 8, 9, 12, 17	Poços: 1, 9, 12, 17	Efeito quantidade
2	-3,75 e -1,15	Poços: 11, 16, 52, 53, 60, 62, 66, 67	Poços: 8, 16, 52, 60, 62, 66, 67	Recarga direta atual
3	-0,99 e 4,02	Poços: 10, 13, 15, 55, 75	Poços: 10, 11, 13, 15, 53, 55, 75	Infiltração de água evaporada

TABELA 8 – Médias mensais de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e dos totais mensais das chuvas em Fortaleza – CE.

Meses	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Chuva (mm)	124	182	330	372	314	170	114	36	19	18	16	27
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-1,09	-1,84	-2,66	-3,34	-3,43	-2,90	-2,06	-0,90	-0,45	-1,19	-1,11	-0,98

Fonte: IAEA (1981).

TABELA 9 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) do rio Jaguaribe.

Amostra	Período seco (ago/2012)	Período chuvoso (abr/2013)
RM	6,19	2,96
RJ	3,23	2,77

RM: Rio Jaguaribe à montante da barragem; RJ: Rio Jaguaribe à jusante da barragem.

Um percentual significativo das intensas chuvas do ano de 2009, ocasião na qual o município enfrentou uma inundação, pode estar armazenado na área que compreende os poços do Grupo 3, sem interferência da água evaporada do rio.

O Grupo 2 é composto por poços tubulares localizados um pouco afastados do rio, mas ainda dentro da zona urbana e que podem estar sendo influenciados pela litologia aluvionar, de fácil infiltração. Os valores intermediários apresentados para estes poços podem indicar uma mistura entre águas de chuva e águas superficiais sujeitas à evaporação antes da infiltração, de origens distintas e armazenadas no aquífero.

O Grupo 3 consiste de poços tubulares (10, 13, 15, 53, 75) localizados próximos ao rio Jaguaribe, ou algum outro curso d'água. Por apresentarem teores de $\delta^{18}\text{O}$ menos negativos até positivos, os poços devem se encontrar em áreas onde ocorre infiltração de águas de rio, apresentando contribuição de suas águas superficiais e, portanto, enriquecidas pela evaporação.

O poço 55 (Grupo 3) localiza-se na vizinhança de uma carnicultura e, de acordo com dados pesquisados, os tanques na região em estudo precisam ser constantemente reabastecidos de água devido à alta taxa de infiltração no solo, podendo chegar a 40 mm dia⁻¹ em solos franco-siltosos com 50% de porosidade. A maioria dos viveiros é construída

sem nenhum tipo de revestimento (FIGUEIRÊDO *et al.* 2006). Desta forma, o manancial subterrâneo poderia estar sendo alimentado, também, por esse tipo de água, o que justificaria os elevados valores de $\delta^{18}\text{O}$ para o poço 55 (1,76‰ e 4,02‰), alcançando valores até mais positivos do que as águas do rio Jaguaribe, para o mesmo período, indicando maior atuação da evaporação sobre os tanques de carnicultura.

Ao se analisar a figura 4, constata-se que o aquífero local não reage rapidamente à variação sazonal, como já indicado pelo tipo dominante de água, Cl-Na, pois não houve expressiva variação nos teores de $\delta^{18}\text{O}$ entre o período de estiagem e o chuvoso. Pode-se concluir que alguns poços (1, 9, 12, 17) captam águas com teores mais negativos sem influência de alimentação pelo rio; e, outros, captam águas de mistura entre o aquífero, o rio e as chuvas, principalmente os mais próximos aos cursos d'água, identificando áreas de fácil recarga.

O aquífero aluvionar da região estudada demonstrou, portanto, a entrada de águas superficiais provenientes da lixiviação do solo salinizado em períodos de chuva, aumentando a condutividade elétrica. Isso também foi observado por SILVA *et al.* (1996) em Crato e Juazeiro do Norte - CE e por BATISTA *et al.* (1998) em Picos - PI.

COSTA FILHO *et al.* (1998a) associaram a recarga dos aquíferos na Região Metropolitana de Recife ao processo interno de salinização, mas não à salinização proveniente da intrusão de cunha salina. COSTA FILHO *et al.* (1998b) determinaram valores de $\delta^{18}\text{O}$ variando de -2,2‰ a +0,6‰ dos

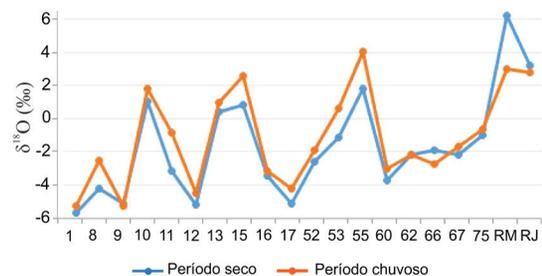


FIGURA 4 – Comparação nos teores médios de $\delta^{18}\text{O}$ entre o período seco e chuvoso.

aquíferos Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, em Recife - PE e também demonstram a origem relacionada a águas evaporadas pelas curvas de correlação $\delta^{18}\text{O}$ x $\delta^2\text{H}$.

6 CONCLUSÕES

As águas da região, tanto superficiais como subterrâneas, são predominantemente cloretadas-sódicas. Dos 20 poços analisados, apenas dois apresentaram qualidade da água adequada ao consumo humano, tendo em vista os parâmetros investigados. O principal parâmetro de qualidade de água que está em desacordo com a legislação é a turbidez. Desse modo, as águas necessitam ser filtradas para que sejam destinadas para consumo.

A contaminação por nitrato, apesar de localizada, merece ser investigada e eliminada para evitar a dispersão no aquífero, que é naturalmente vulnerável à contaminação por ser raso e do tipo sedimentar. Também se fazem necessários estudos para definir a fonte do nitrogênio, se provenientes de fertilizantes ou de fossas.

Os metais não demonstraram níveis preocupantes na área de estudo, mas pontualmente, foram detectadas concentrações acima do permitido para consumo para o manganês, ferro, chumbo, bário e alumínio, cujas origens não foram conclusivas quanto a serem provenientes de fonte natural ou antropogênica, sendo necessários estudos geoquímicos. O Ponto 9, onde se encontra o chafariz, requer maior atenção, uma vez que é o local onde foram detectados os teores mais elevados.

Segundo os cálculos do balanço hídrico, nota-se que o excedente hídrico concentra-se entre os meses de fevereiro e abril, quando a precipitação é maior que a evapotranspiração ($P > ETP$). O déficit hídrico ocorre entre os meses de maio a dezembro. A disponibilidade hídrica anual para recarga subterrânea é de 13 mm (série histórica de 31 anos).

Além da recarga direta, o aquífero recebe contribuição de águas superficiais, como constatado pelos valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos em poços, indicando mistura.

As análises isotópicas permitiram identificar 3 grupos de águas subterrâneas, o primeiro com teores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ e sem influência de alimentação pelo rio (Grupo 1). O segundo, com valores intermediários, em poços um pouco afastados do rio, indicando a mistura das águas subterrâneas com águas de chuva e águas superficiais sujeitas à evaporação antes da infiltração. E o terceiro grupo, com teores menos negativos até positivos de poços

próximos a rios, que também sofrem influência do rio, apresentando características mais marcantes da água evaporada, mostrando inclusive relação com as fazendas de carcinicultura.

O aquífero aluvionar da região estudada demonstrou a entrada de águas superficiais provenientes da lixiviação do solo salinizado em períodos de chuva, aumentando a condutividade elétrica. Não foi identificada relação da salinidade com intrusão marinha, pelos dados isotópicos obtidos, assim como os resultados de brometo nas águas superficiais também não a confirmaram.

A pressão ambiental que a área tem sofrido pelas precárias instalações de infraestrutura de saneamento básico do município, somados aos empreendimentos de irrigação e carcinicultura, requerem medidas de acompanhamento e controle, sob risco de comprometimento dos usos múltiplos dessa água, inclusive no tocante à sua potabilidade, tais como: redução na perfuração de novos poços, impermeabilização de fossas negras, instalação de rede de esgoto, controle dos efluentes descartados no rio, proteção dos poços, instalação de poços de monitoramento na área da carcinicultura, impermeabilização dos tanques, entre outras.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO. 2005. Censo da carcinicultura nacional de 2004. Disponível em <http://www.abccam.com.br>. Acessado em 10 jan. 2014.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. L.S. Clesceri, A.E. Greenberg & A.D. Eaton (Eds.) American Public Health Association, Washington D.C., 21th ed.
- ARAÚJO, F.F.V.; CASTRO, M.A.H.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. 2006. Avaliação de impactos dos efluentes da carcinicultura em trecho do Rio Jaguaribe por meio de simulação. *In*: M.F.Rosa, R.S. Gondim, M.C.B. Figueirêdo (Eds.) Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará. Fortaleza, EMBRAPA Agroindústria Tropical, Cap. 6, p.151-176.
- BARBOSA, A.B. 2004. Caracterização hidroquímica dos mananciais subterrâneos e superficiais na região do Baixo Jaguaribe no município de Itaipava-CE. Departamento de Geologia, Cen-

- tro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Relatório de Graduação.
- BATISTA, J.R.X.; SANTIAGO, M.M.F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J.; FOSTER, M. 1998. Isótopos ambientais na água subterrânea de Picos - PI. *In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10, São Paulo, CD-ROM.
- BERGHEIM, A.; ASGARD, T. 1996. Waste production from aquaculture. *In: D.J. Baird, M.C.M. Beveridge, L.A. Kelly, J.F. Muir (Eds.) Aquaculture and Water Resource Management*. Oxford, Blackwell, p. 50-80.
- BRASIL. 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.
- BOYD, C.E. 1995. Water quality management and aeration in shrimp farming. American Soybean Association & US Wheat Association, Alabama, 70 p.
- CASTANY, G. 1975. Prospección y exploración de las aguas subterráneas. Omega, Barcelona, 738 p.
- CHAGAS, G.S.; NOBRE, M.E.S. 2010. Avaliação da qualidade das águas subterrâneas no Aluvião da sub-bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe do Município de Itaipaba – CE. Departamento de Geologia, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Relatório de Graduação.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL 1998. Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Águas Subterrâneas do Ceará. Diagnóstico do Município de Itaipaba. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16200/Rel_Itai%C3%A7aba.pdf.pdf?sequence=1. Acessado em: 25 mai. 2012.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2003. Atlas de geologia e recursos minerais do Ceará: Sistema de informações geográficas - SIGE. Escala 1:500.000, CD-ROM.
- COSTA FILHO, W.D.; SANTIAGO, M.M.F.; MENDES FILHO, J.; COSTA, W.D. 1998a. Concentração salina das águas subterrâneas na Planície do Recife. *In: ABAS, SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO NORDETES*, 3, Recife, p. 124-131.
- COSTA FILHO, W.D.; SANTIAGO, M.M.F.; COSTA, W.D.; MENDES FILHO, J.; 1998b. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife. *In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10, São Paulo, 10 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2006. Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará. Editores técnicos: Morsyleide de Freitas Rosa, Rubens Sonsol Godim, Maria Cléa Brito de Figueiredo. Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, 404 p.
- FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM, LABHID, Rio de Janeiro, 3ª ed. revisada e ampliada, 812 p.
- FENZL, N. 1988. Introdução à Hidrogeoquímica. Editora Universitária da UFPA, Belém, 190 p.
- FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ARAÚJO, L.F.P.; ROSA, M.F. 2006. Avaliação dos impactos ambientais como instrumento para o desenvolvimento sustentável da carcinicultura em águas interiores. *In: M.F. Rosa, R.S. Godim, M.C.B. Figueiredo (Eds.) Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará*. Fortaleza, Embrapa Agroindústria Tropical, cap. 5, p.103-150.
- FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E ESTATÍSTICA. Boletim Pluviométrico do município de Itaipaba. Série histórica. Disponível em <http://www.funceme.br>. Acessado em 15 ago. 2013.
- GOMES, D.F. 2005. Estudo hidroquímico, isotópico e da dinâmica do nível estático das águas subterrâneas e superficiais da região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Tese de Doutorado, 218 p.
- IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1981. Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation. IAEA, Vienna, 253 p. (Technical Reports Series, 206).
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. 2005. Diagnóstico da Carcinicultura no Estado do Ceará. Brasília/DF, Diretoria de Proteção Ambiental (DIPRO), Diretoria de Licenciamento e Qualidade Ambiental (DI-

- LIQ) e Gerência Executiva do Ceará (GEREX-CE), vol. I, 177 f., vol. II (mapas).
- IPECE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. 2012. Anuário Estatístico. Perfil Básico Municipal – Itaipaba.
- JONES, A.B.; DENNISON, W.C.; PRESTON, N.P. 2001. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: A laboratory scale study. *Aquaculture*, 193: 155-178. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00486-5)
- LEITÃO, R.C.; CAVALCANTE, R.R.R.; RIBEIRO, E.M.; CLAUDINO, R.L.; MACIEL, N.M.; ROSA, M.F. 2011. Reuso da água da despesca na produção de camarão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(12): 1314-1320.
- MANAHAN, S.E. 2013. Química Ambiental. Bookman, Porto Alegre, 9ª ed., 944 p.
- McPHAIL, D.C.; CARITAT, P.; SHORT, M.A. 2017. Continental-scale variation in chloride/bromide ratios of wet deposition. *Science of the Total Environment*, 574. 1533-1543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.161>
- MÖBUS, G. 2003. Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, Fortaleza. Disponível em <http://www.funceme.br>. Acessado em 25 jan. 2012.
- RIBEIRO, L.F.; SOUZA, M.C.M.B.N.; BARROS, F. 2014. Desafios da carcinicultura: aspectos legais, impactos ambientais e alternativas mitigadoras. *Gestão Costeira Integrada*, 14(3): 365-383. <https://doi.org/10.5894/rgci453>
- SALATI, E.; GUSMÃO, G.A.; MATSUI, E.; CERVELLINI, A. 1971. Estudo preliminar das concentrações de ¹⁸O e D em águas do nordeste brasileiro. Piracicaba: CENA-ESALQ-USP, 30 p. (Boletim Científico, 2). Disponível em: http://www.cena.usp.br/biblioteca/repositorio/boletim_cientifico_002.pdf.
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ - SRH. Atlas eletrônico dos recursos hídricos e meteorológicos do Ceará. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br>. Acessado em 25 set. 2012.
- SILVA, C.M.S.V.; SANTIAGO, M.F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J. 1996. Distinção entre águas dos aluviões e águas profundas nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte - CE. CD-ROM. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9, Salvador, CD-ROM.
- SOUZA, M.J.N.; OLIVEIRA, V.P.V.; NASCIMENTO, F.R.; CORREIA, L.J. 2006. Diagnóstico geoambiental do Baixo Jaguaribe. In: M.F. Rosa, R.S. Gondim, M.C.B. Figueiredo (Eds.) *Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe*, Ceará. Fortaleza, Embrapa Agroindústria Tropical, cap. 2, p. 25-45.
- VASCONCELOS, S.M.S. 1999. Recarga do aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza-CE. São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 100 p.
- VILAGINÈS, R. 2003. Eau, environnement et santé publique: Introduction à l'hydrologie. Editions Tec & Doc, Paris, 2ª éd.

Endereço dos autores:

Maria Elisângela da Silva Nobre, Diolande Ferreira Gomes, Sônia Maria Silva Vasconcelos, Inácio Ocina de Lima Neto, Sara Karoline Ferreira e Daniel de Ponti Souza – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Av Humberto Monte s/n, Bloco 912/913, Campus do Pici, CEP 60455-970, Fortaleza, CE. *E-mails:* elisininobre@hotmail.com, dfreire68@gmail.com, smaria@ufc.br, inacioneto@ufc.br, sarakferreira@outlook.com, danieldeponti@hotmail.com

Horst Frischkorn – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Av Humberto Monte s/n, Bloco 912/913, Campus do Pici, CEP 60455-970, Fortaleza, CE. *E-mail:* cariri@ufc.br

Artigo submetido em 28 de dezembro de 2017, aceito em 27 de outubro de 2018.