

CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONEXÃO HIDRÁULICA PROFUNDA DE UM AQUÍFERO NÃO CONFINADO EM ZONAS DE FALHA A PARTIR DE DADOS ISOTÓPICOS, NE/BRASIL

Leandson Roberto Fernandes de **Lucena**¹, Mateus Delatim **Simonato**²

(1 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Departamento de Geofísica, leandson.ufrn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7713-861X>, 2 – Universidade de São Paulo-USP, Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas-CEPAS, mdsimonato@tritium.com.br, <https://orcid.org/0000-0003-0534-6644>)

Resumo: O Aquífero Barreiras, de caráter predominante não confinado, é particularmente afetado pela estruturação geológica na faixa costeira do nordeste brasileiro. Seu substrato hidrogeológico é representado por uma sequência carbonática de idade mesozóica, o qual apresenta características de aquitardo na sua porção superior. Nesse contexto, a ocorrência de águas bicarbonatadas no Aquífero Barreiras, em detrimento de águas cloretadas sódicas típicas desse manancial, são creditadas à interações com o topo do aquitardo carbonático, seja na forma de dissolução, seja na forma de drenança vertical ascendente, ambas nas proximidades de zonas de falha. No presente estudo, contudo, objetivou-se contribuir na análise do impacto dessa estruturação regional em conexões hidráulicas, sobretudo aquelas de caráter mais profundo entre os contextos mesozoico e cenozoico, as quais estariam igualmente proporcionando misturas de águas no âmbito do Aquífero Barreiras. A metodologia foi fundamentada na análise de isótopos ambientais $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ e sobreposição dessas informações com o contexto tectono-estrutural regional previamente caracterizado. Os resultados preliminares revelam assinaturas isotópicas características dos mananciais mesozoicos em amostras obtidas em poços no Aquífero Barreiras, particularmente nas proximidades de falhas regionais profundas. Essa conexão hidráulica seria incrementada pelo caráter transtensional dessas falhas, as quais podem atuar como zonas de alívio de pressão em subsuperfície.

Palavras-chave: Aquífero Barreiras-Brasil; falhas; assinatura isotópica.

**CONSIDERATIONS ABOUT DEEP HYDRAULIC CONNECTION OF AN
UNCONFINED AQUIFER IN FAULT ZONES FROM ISOTOPIC DATA,
NE/ BRAZIL**

Abstract: The Barreiras Aquifer has a majorly unconfined character, and is particularly affected by the geological structures in the coastal strip of northeastern Brazil. Its hydrogeological substrate is represented by a carbonate sequence of Mesozoic age, which presents characteristics of aquitard in its upper portion. In this context, the occurrence of bicarbonate waters in the Barreiras Aquifer, to the detriment of sodium chlorinated waters typical of this source, are credited to interactions with the top of the carbonatic aquitard, either in the form of dissolution or in the form of upward vertical drainage, both in the next to faults zones. In the present study, the objective was to contribute to the analysis of the impact of this regional structuring on hydraulic connections, especially those of a deeper character between the Mesozoic and Cenozoic contexts, which would also be providing water mixtures within the Barreiras Aquifer. The methodology was based on the analysis of environmental isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ and overlapping of this information with the previously characterized regional structuring context. Preliminary results reveal isotopic signatures characteristic of Mesozoic source in samples obtained from wells in the Barreiras Aquifer, particularly next to deep regional faults. This hydraulic connection would be increased by the transtensional character of these faults, which can act as pressure relief zones in the subsurface.

Keywords: Barreiras Aquifer-Brazil; faults; isotopic signature.

**CONSIDERACIONES SOBRE LA CONEXIÓN HIDRÁULICA PROFUNDA DE UN
ACUÍFERO NO CONFINADO EN ZONAS DE FALLAS A PARTIR DE DATOS
ISOTÓPICOS, NE/BRASIL**

Resumen: El Acuífero Barreiras, de carácter predominantemente no confinado, se ve particularmente afectado por la estructura geológica en la franja costera del noreste de Brasil. Su sustrato hidrogeológico está representado por una secuencia de carbonatos de edad Mesozoica, que presenta características de acuitardo en su porción superior. En este contexto, la ocurrencia de aguas bicarbonatadas en el Acuífero Barreiras, en detrimento de las aguas cloruradas sódicas típicas de este manantial, se atribuyen a las interacciones con la parte superior del acuitardo carbonatado, ya sea en forma de disolución o en forma de filtración

vertical ascendente, siempre en las cercanías de las zonas de fallas. En el presente estudio, sin embargo, el objetivo fue contribuir en el análisis del impacto de esta dicha estructura regional en las conexiones hidráulicas, especialmente aquellas de carácter más profundo entre los contextos Mesozoico y Cenozoico, las cuáles también estarían proporcionando mezclas de agua dentro del Acuífero Barreiras. La metodología se basó en el análisis de los isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ y la superposición de esta información con el contexto tectono-estructural regional previamente caracterizado. Los resultados preliminares revelan firmas isotópicas características de manantiales mesozoicos de muestras obtenidas de pozos en el Acuífero Barreiras, particularmente en las cercanías de fallas regionales profundas. Esta conexión hidráulica sería incrementada por el carácter transtensional de estas fallas, que pueden actuar como zonas de alivio de presión en el subsuperficie.

Palabras clave: Acuífero Barreiras-Brasil; fallas; firma isotópica.

1. Introdução

Estudos realizados sobre a influência de uma estrutura frágil de aquíferos de natureza cristalina se confundem com o desenvolvimento da hidrogeologia como ciência (LUCENA 2005). O trabalho que inicialmente limitava ou priorizava uma abordagem direta na associação de fraturas com poços produtivos nesses terrenos passou a incorporar outros parâmetros na pesquisa (LUCENA et al. 2013; MEDEIROS et al. 2010; SOUZA et al. 2019). Dentre esses parâmetros podem ser citados variações dos campos de tensão ao longo do tempo geológico, principalmente tensões neotectônicas, influência de diferentes litologias sob fraturamento na produtividade de poços, além de estimativas de condutividade hidráulica e modelagem matemática de fluxo em áreas fraturadas (FREEZE E CHERRY 1979, BLACK 1994, FERNANDES E RUDOLPH 2001; MEDEIROS et al. 2010; BALL et al. 2010).

Por outro lado, pesquisas sobre a influência da estruturação frágil em áreas sedimentares clásticas normalmente envolvem a caracterização de parâmetros adicionais, incluindo variabilidade da condutividade hidráulica e transmissividade dos meios porosos e sua relação com zonas de falha (LACHMAR et al. 2002, BENSE E BALEN 2004, BENSE AND PERSON 2006, CAINE AND MINOR 2009). Outros autores também relatam o papel da topografia e falhas associadas na recarga de aquíferos estruturalmente isolados, usando modelos numéricos 3D (GREEN et al. 2010, BALL et al. 2014). No entanto, em termos de

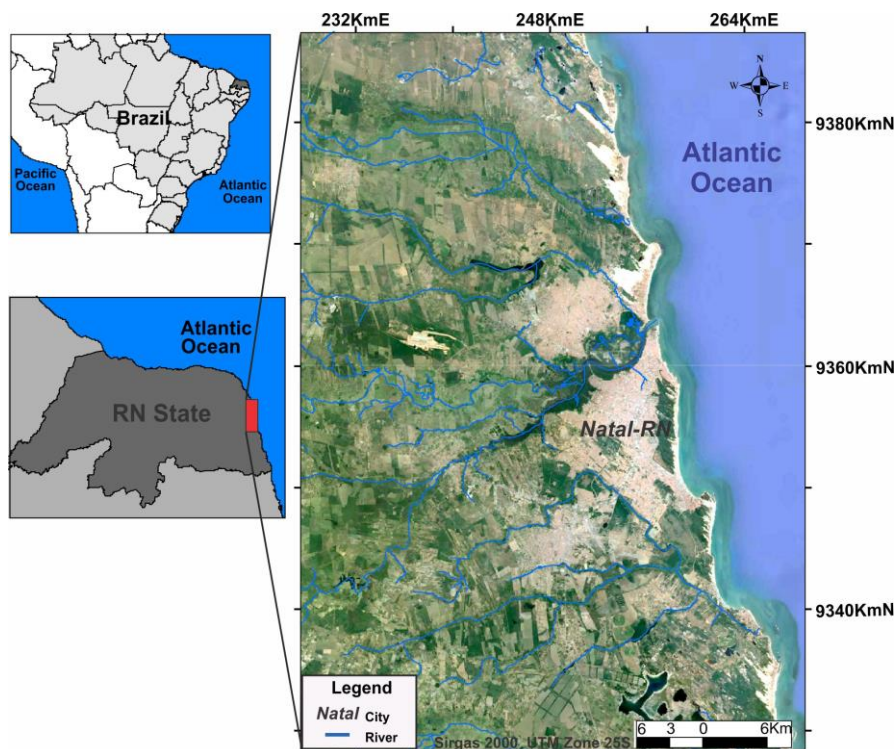
estudos envolvendo substanciais extensões superficiais, o parâmetro mais proeminente diz respeito às variações da geometria do aquífero devido à cinemática de falhas (SOUZA et al 2019; NUNES et al. 2020).

Nesta conjuntura, algumas pesquisas desenvolvidas no Nordeste do Brasil evidenciaram que a estrutura regional tem forte influência no contexto hidrogeológico e petrofísico, principalmente naqueles terrenos sedimentares de idade Cenozóica (LUCENA 2005, BALSAMO et al. 2010, RODRIGUES et al. 2011, LUCENA et al. 2013). Esses estudos mostraram, dentre outros aspectos, a delimitação de áreas com alta transmissividade devido ao aumento da espessura saturada causada pela compartimentação estrutural local do Aquífero Barreiras e da Formação homônima (de idade Terciária-Quaternária).

Tal relação foi sugerida pelo aumento substancial do fluxo em poços de uma única bateria que se aproxima e penetra no domínio de um proeminente graben local (LUCENA 2005). Conforme relatado, no mesmo contexto do Aquífero Barreiras, poços localizados fora do graben e com espessura saturada reduzida apresentaram vazões de até 30m³/h, enquanto aqueles localizados dentro do graben e com espessuras saturadas maiores apresentaram vazões de até 100m³/h. Esses estudos também sugeriram o fluxo de água subterrânea condicionado por barreiras laterais semipermeáveis (Aquitardo Cretáceo) relacionadas a estruturas de falha. Lucena et al. (2006) também relata a possibilidade de que falhas profundas na crosta e de caráter cinemático transtensional possam causar conexões hidráulicas entre aquíferos rasos e profundos. Balsamo et al. (2010) caracterizaram em termos petrofísicos um aumento da porosidade e permeabilidade intrínseca na zona de dano das falhas extensionais na Formação Barreiras e redução substancial desses parâmetros nesses núcleos de falha. Da mesma forma, Chen et al. (2014) relataram que o fluxo de água subterrânea aumenta nas proximidades de zonas de falha, enquanto que Hussien et al. (2017) encontraram evidências de falhas conectando aquíferos rasos e profundos.

A presente pesquisa, por outro lado, teve como objetivo contribuir na análise da influência do condicionamento estrutural regional no contexto do Aquífero Barreiras, enfatizando conexões hidráulicas profundas decorrentes de falhas, utilizando-se dados isotópicos. A área de estudo está localizada no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, incluindo a capital Natal e adjacências (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Organização: Autores

2. Metodologia

A caracterização fisiográfica, geológica e hidrológica da área foi baseada na revisão e atualização de publicações, produtos cartográficos e de sensoriamento remoto disponíveis da área de estudo.

A Agência Nacional de Águas do Brasil-ANA, em estudos no âmbito da faixa leste do Rio Grande do Norte, contemplou uma caracterização preliminar dos isótopos ambientais dos aquíferos mesozóicos e Barreiras (ANA, 2012). Os resultados da análise dos isótopos de oxigênio e hidrogênio foram reinterpretados no presente estudo, objetivando-se analisar a influência do contexto estrutural regional na assinatura isotópica dessas águas subterrâneas. Adicionalmente, isótopos ambientais foram usados como ferramenta auxiliar na avaliação preliminar do condicionamento estrutural de eventuais conexões hidráulicas entre os aquíferos reportados. Nesse aspecto, avaliou-se assinaturas isotópicas de amostras coletadas ao longo de zonas de falhas regionais, comparando-se com amostras coletadas em outras partes do Aquífero Barreiras e aqueles de idade mesozóica.

Isótopos ambientais são amplamente aplicados em estudos hidrogeológicos, especialmente oxigênio e hidrogênio. Seu comportamento estável no ciclo da água, abundância em sistemas hidrogeológicos e a diferença na massa atômica mensurável entre os elementos isotópicos permitem que eles sirvam como traçadores de água, possibilitando estudos acerca da origem, trajetória de fluxos e processos de recarga (CLARK E FRITZ 1997).

Isótopos ambientais estáveis são medidos como a razão dos dois isótopos mais abundantes de um elemento. O fracionamento modifica a relação pelos processos de evaporação e precipitação, bem como pela interação rocha-água subterrânea. As concentrações isotópicas são expressas como a diferença entre as razões medidas da amostra (a) e da referência (p) sobre a razão medida da referência. Os resultados são expressos como partes por mil (‰) usando a notação delta (δ), conforme mostrado na equação 1 (CLARK E FRITZ 1997):

$$\delta^{18}O_a = \left\{ \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_a}{(^{18}O/^{16}O)_p} \right] - 1 \right\} \times 1.000\text{‰ VSMOW (Equação 1)}$$

A interpretação dos resultados isotópicos é realizada com base nas distribuições dos resultados em um gráfico de correlação “ $\delta^{18}O$ VSMOW vs δ^2H VSMOW” em comparação com os dados obtidos com a linha d’água meteórica. Nesse caso, adotou-se a reta meteórica de Ceará-Mirim/RN, calculada a partir dos dados disponibilizados pela Rede Global de Isótopos na Precipitação do Programa de Recursos Hídricos da AIEA e da Organização Meteorológica Mundial - OMM. Amostras de chuva do programa de monitoramento da IAEA foram coletadas mensalmente de dezembro/1961 a dezembro/1982 na estação de medição de chuva de Ceará-Mirim/RN, localizada a 50 km da área de estudo, totalizando 226 valores de $\delta^{18}O$ e δ^2H (IAEA 2001, IAEA / WMO 2017).

As amostras de água foram coletadas em frascos de 100 ml, com células de fluxo colocadas diretamente nos poços. Durante o procedimento de coleta, foram medidos in situ os parâmetros temperatura, pH e STD (sólidos totais dissolvidos), sendo a coleta efetuada após a estabilização dos parâmetros monitorados. A amostragem e análise isotópica foram realizadas pela ANA (2012), incluindo amostras de água de poços produtores, poços escavados e nascentes distribuídas ao longo da área de estudo.

As análises isotópicas, realizadas no Laboratório de Isótopos Ambientais-EIL da Universidade de Waterloo (Canadá), foram realizadas por espectrometria de massa de razão

isotópica, sendo as amostras utilizadas para a determinação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ preparadas utilizando o método de equilíbrio $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ e a reação da água com o superaquecimento do zinco metálico, respectivamente. Os resultados são relatados com precisão de $\delta^{18}\text{O} \pm 0,2 \text{ ‰}$ e $\delta^2\text{H} \pm 0,8 \text{ ‰}$.

Os dados de poços foram obtidos a partir do banco de dados da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SEMARH), Companhia de Abastecimento de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN) e empresas privadas de perfuração de poços.

3. Contexto Geológico

A coluna estratigráfica consiste em duas sequências básicas: uma não aflorante, envolvendo o embasamento cristalino Pré-cambriano e rochas sedimentares da bacia mesozóica, ambas detectadas em perfis de poços na área; e uma aflorante, representada pela sedimentação cenozóica.

O embasamento cristalino é constituído por granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses, correlacionados ao Complexo Caicó (BEZERRA 1998). As rochas mesozóicas compreendem basicamente duas unidades: uma arenítica (basal) e outra calcária (topo), com arenitos intercalados. Considerando esse domínio Mesozóico, associado à Bacia Pernambuco-Paraíba, tem-se, respectivamente, as formações Beberibe (arenitos) e Gramame (carbonatos) ou associado à Bacia Potiguar com as formações Açú (arenitos) e Jandaíra (carbonatos) (LUCENA 2005, NASCIMENTO SILVA et al. 2011).

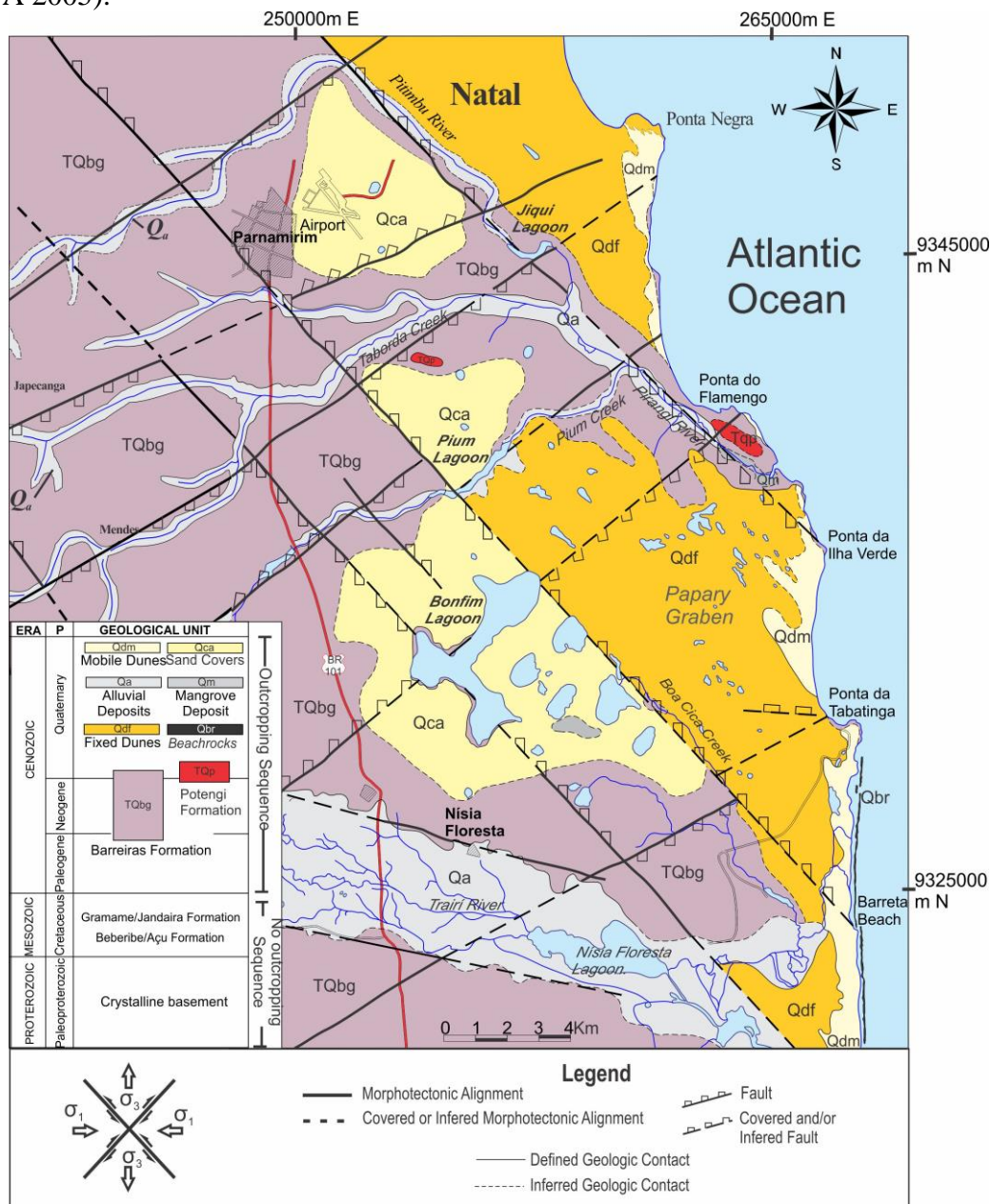
A porção aflorante envolve a coluna sedimentar Cenozóica da região, representada por rochas sedimentares conglomeráticas a argilo-arenosas da Formação Barreiras, de origem fluvial, além da Formação Potengi de origem eólica, ambas de idade terciária-quadernária, capeada por coberturas quadernárias diversas que incluem beachrocks, sedimentos de praia sub-recentes e atuais, depósitos aluviais e eólicos (dunas), mangues e coberturas arenosas indiferenciadas.

A caracterização estrutural regional, abordada em estudos prévios como Bezerra (1998), Lucena (2005), Nogueira et al. (2010), Bezerra et al. (2014), Alves e Lucena (2021), entre outros, juntamente com levantamentos restritos ao entorno da bacia do rio Pirangi, foi realizada por meio da análise conjunta de investigações geológicas, geomorfológicas

(topografia e hidrografia), gravimétricas e de campo. Esses estudos mostraram uma estrutura complexa na área caracterizada nas direções principais NW-SE, NE-SW (com base na análise gravimétrica, geomorfológica e de campo) e E-W (evidenciada em análises geomorfológicas e de campo).

Em linhas gerais, o arcabouço tectônico-estrutural foi interpretado como sendo o resultado de sucessivas reativações através de um campo de tensão em que os eixos de alongamento e compressão máxima estão orientados aproximadamente NS e EW, respectivamente, sendo esta compressão resultante do empurrão da cadeia meso-Atlântica (Ferreira 1997, Bezerra 1998). Nesse contexto, as estruturas regionais mais proeminentes, assinaladas nas direções nordeste e noroeste, apresentam-se como de natureza transtensional (LUCENA 2005, NOGUEIRA et al. 2010, BEZERRA et al. 2014), ocasionando um cenário tectônico-estratigráfico com horsts e grabens. Lucena (2005) também destaca um graben proeminente, delimitado por duas falhas regionais na direção NW e abrangendo parte dos municípios de Nísia Floresta e Parnamirim-RN, denominado Graben Papary. Esta estrutura, a julgar pela modelagem gravimétrica realizada, apresenta uma anomalia de até -4 mGal e espessura mínima de 600 m para a sequência estratigráfica sedimentar (mesozóica e cenozóica). Na Figura 2, tem-se o mapa geológico simplificado da região costeira sul de Natal-RN, destacando-se o Graben Papary no sudeste da área (modificado de LUCENA 2005).

Figura 2 – Mapa geológico simplificado da região costeira sul de Natal-RN (modificado de LUCENA 2005).



4. Contexto Hidrogeológico

O Aquífero Barreiras abastece a maioria das cidades do litoral leste do Rio Grande do Norte, incluindo a capital Natal. O limite de base deste aquífero é o contato com a sequência carbonática mesozóica não aflorante da região, reconhecida em poços e composta por rochas arenoso-argilosas calcíferas de baixa transmissividade, ou mesmo o embasamento cristalino em áreas próximas de contato deste último com o bacia sedimentar costeira (Melo 1995,

Lucena 2005). O Aquífero Barreiras apresenta vazões elevadas, principalmente localizadas em áreas com elevada espessura da Formação homônima, conforme observado em alguns poços da região sul de Natal e Parnamirim-RN (vazões de 100 m³/h).

Os valores de transmissividade hidráulica relatados por Lucena (2005) são $2,8 \times 10^{-3}$ a $9,2 \times 10^{-3}$ m²/s na área de estudo e região circundante. Alves et al. (2016) relata transmitividade média e condutividades hidráulicas de $5,9 \times 10^{-3}$ m²/s e $2,8 \times 10^{-4}$ m/s, respectivamente, para essa mesma área. Valores de condutividade hidráulica de 10^{-3} m/s, também são citados por Lucena et al. (2016) em outros aquíferos de natureza arenítica próximos à área relatada.

Em relação à condição hidrodinâmica, o Aquífero Barreiras é predominantemente não confinado, embora possa apresentar semiconfinamentos, principalmente na região sul de Natal até a divisa com o Estado da Paraíba. O comportamento semiconfinado está relacionado à presença de horizontes argilosos intercalados com os arenitos da sequência sedimentar (LUCENA 2005). Toda a área de estudo mostra uma ampla relação entre as fontes subterrâneas e superficiais. Contribuições perenes para canais de rios locais são creditadas à natureza influente do aquífero. Essa influência também é evidente em lagoas da área, dentre as quais Jiqui e Pium, sendo estas aproximadamente regularizada do ponto de vista de volume armazenado (LUCENA et al. 2008).

Em termos hidroquímicos, as águas do Aquífero Barreiras são predominantemente cloretadas sódicas, embora com ocorrência de águas bicarbonatadas mistas (LUCENA 2005; STEIN et al. 2019). Nesse último caso, Stein et al. (2019) propõem que essas ocorrências de águas bicarbonatadas decorrem da interações com o aquífero carbonático (embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras), através da drenança vertical ascendente ou da dissolução do maciço carbonático quando o fluxo subterrâneo intercepta barreiras semipermeáveis do aquífero derivadas de falhas locais.

5. Resultados e discussão

A caracterização dos isótopos ambientais, na forma de ferramenta auxiliar na avaliação da influência de falhas em possível fluxo vertical ascendente das águas subterrâneas, foi realizada em amostras de água do Aquífero Barreira e dos aquíferos Mesozóicos relativos aos aquíferos Açu e Jandaira. O sistema hidrogeológico foi definido

pela correlação com as formações litoestratigráficas homônimas. As informações dos poços utilizados para coleta de água subterrânea são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Poços amostrados para análise isotópica; W.L.: nível estático; D.W.L.: nível dinâmico.

Well_id	Coord. E	Coord. N	Aquifer	Well depth (m)	WL (m)	DWL (m)	Screen depth top (m)	Screen depth bottom (m)	Aquifer thickness (m)
NAT0593	245.505	9.352.430	Barreiras Deep	81	20.9	28.0	44	77	80
NAT1821	256.478	9.353.126	Barreiras Deep	100	17.1	18.6	59	97	100
NZF0103	267.263	9.329.626	Barreiras Deep	95	16.9	56.0	56	94	100
NZF0111	264.670	9.324.008	Barreiras Deep	94	54.0	57.0	70	90	95
PAR0142	250.347	9.344.112	Barreiras Deep	74	25.3	38.0	52	64	75
PAR0160	261.467	9.341.404	Barreiras Deep	80	4.0	8.0	56	76	80
SGA0050	244.220	9.362.794	Barreiras Deep	73	22.1	28.8	48	60	73
MAC0193	238.217	9.341.058	Barreiras Shalow	51	7.2	11.5	18	48	48
NZF0018	259.383	9.321.740	Barreiras Shalow	40	15.2	24.7	17	37	39
SGA0016	242.980	9.359.702	Barreiras Shalow	27	0.5	10.4	11	23	26
SJM0045	250.311	9.323.856	Barreiras Shalow	20	2.1	7.6	10	18	19
SJM0095	253.048	9.327.966	Barreiras Shalow	36	0.7	3.1	14	35	36
SJM0187	247.607	9.333.668	Barreiras Shalow	42	7.9	20.0	20	40	39
MTA0120	244.410	9.329.358	Barreiras dug well	10	6.6	-	-	-	>10
NAT0976	250.107	9.353.446	Barreiras dug well	12	-	-	-	-	>12
NZF0235	254.316	9.332.835	Barreiras dug well	10	-	-	-	-	>10
NZF0288	267.188	9.330.090	Barreiras dug well	15	-	-	-	-	>15
NZF0347	260.628	9.340.631	Barreiras dug well	25	24.6	-	-	-	>25
SGA0443	230.925	9.365.397	Barreiras dug well	15	4.5	-	-	-	>15
NAT0630	247.519	9.355.476	Barreiras spring	-	15.0*	-	-	-	-
CRM0155	224.902	9.374.642	Mesozoic (Açu)	102	56.7	60.5	74	90	26
SGA0034	234.937	9.365.266	Mesozoic	122	2.0	55.5	72	101	-

(Açu)									
CRM0062	228.364	9.373.336	Mesozoic (Jand./Açu)	62	10.2	37.4	54	60	18

No litoral leste do Rio Grande do Norte, as chuvas se concentram nos meses de março a julho (LUCENA 2005). A proximidade do Oceano Atlântico contribui para a formação de massas úmidas movendo-se de leste para oeste, com precipitação média anual de cerca de 1.600 mm na faixa litorânea, diminuindo para oeste, com média anual de cerca de 900 mm nas regiões de fronteira da bacia sedimentar costeira com o embasamento cristalino. Este comportamento hidroclimatológico proporciona o fracionamento isotópico na direção do movimento das massas úmidas, favorecendo a precipitação de água constituída por isótopos de maior massa atômica (^{18}O) em áreas com chuvas mais intensas, próximas ao litoral, e causando sua diminuição no sentido oeste.

O Aquífero Barreiras possui sua recarga derivada da infiltração de águas pluviais em áreas de maior elevação topográfica, principalmente no setor oeste da Formação Barreiras. Por outro lado, regiões com coberturas arenosas quaternárias favorecem a infiltração de chuvas e possuem intensa conexão hidráulica com o Aquífero Barreiras ao longo da costa, justificando a denominação local Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, em detrimento de se considerar aquíferos separados (MELO 1995, LUCENA 2005).

Os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para vinte amostras de água do Aquífero Barreiras, considerando diferentes profundidades e posicionamentos de filtros, além de uma amostra do Aquífero Jandaíra e duas amostras do Aquífero Açu são apresentados na Tabela 2. Na Figura 3, tem-se a disposição dos pontos de amostragem na costa leste do Rio Grande do Norte, enquanto que a Figura 4 exibe o gráfico " $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW". A caracterização dos isótopos ambientais da água meteórica no Ceará-Mirim (IAEA 2001) é plotada no gráfico na Figura 4A indicando variações das razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ de $-6,25\text{‰} \pm 0,2\text{‰}$ a $0,6\text{‰} \pm 0,2\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}$ de $-39,2\text{‰} \pm 0,8\text{‰}$ a $17,4\text{‰} \pm 0,8\text{‰}$. Essa elevada variação é interpretada como resultado do fracionamento causado pela evaporação marinha, embora também seja influenciada pela evaporação da água das lagoas locais e pelo fracionamento das fases evaporadas (Figura 4A).

As razões isotópicas de amostras de águas subterrâneas, Reta Meteórica Global (GMWL), Reta Meteórica Local de Ceará-Mirim (CMMWL) e suas razões isotópicas de

amostras de água meteórica são exibidas no gráfico " $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW" (Figura 4B). A caracterização isotópica da água do Aquífero Barreiras apresentou resultados de $\delta^{18}\text{O}$ variando de -3,73 ‰ a -2,53 ‰, com média de -2,88 ‰ e mediana de -2,84 ‰; e resultados de $\delta^2\text{H}$ variando de -10,90 ‰ a -5,51 ‰, com média de -7,31 ‰ e mediana de -6,94 ‰. As amostras dos aquíferos mesozóicos apresentaram valores variando de -3,07 ‰ a -3,17 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -10,24 ‰ a -14,65 ‰ para $\delta^2\text{H}$. Os resultados isotópicos variam $\delta^{18}\text{O}$ 2,98 ‰ e $\delta^2\text{H}$ 7,17 ‰ no Aquífero Barreiras e $\delta^{18}\text{O}$ 0,1 ‰ e $\delta^2\text{H}$ 4,41 ‰ nos aquíferos Mesozóicos.

Tabela 2 – Resultados analíticos dos isótopos de oxigênio e hidrogênio.

Well_id	Aquifer	$\delta^{18}\text{O}$ VSMOW	$\delta^2\text{H}$ VSMOW	Temp °C	pH	TDS mg/L
NAT0593	Barreiras Deep	-2.89	-6.33	29.31	5.33	42
NAT1821	Barreiras Deep	-2.93	-6.37	28.63	5.11	143
NZF0103	Barreiras Deep	-2.76	-7.25	29.36	4.69	54
NZF0111	Barreiras Deep	-3.15	-7.32	29.68	4.06	99
PAR0142	Barreiras Deep	-3.12	-5.86	29.46	5.65	138
PAR0160	Barreiras Deep	-2.86	-5.51	30.77	6.27	65
SGA0050	Barreiras Deep	-2.86	-6.56	28.46	4.78	79
MAC0193	Barreiras Shalow	-2.82	-9.74	30.42	4.28	55
NZF0018	Barreiras Shalow	-2.53	-6.16	31.21	5.82	127
SGA0016	Barreiras Shalow	-2.75	-8.07	29.03	5.91	121
SJM0045	Barreiras Shalow	-2.87	-7.23	27.29	5.69	197
SJM0095	Barreiras Shalow	-2.67	-5.99	29.04	4.76	187
SJM0187	Barreiras Shalow	-2.80	-7.35	29.35	4.95	36
MTA0120	Barreiras-dug well	-2.79	-10.90	28.99	4.92	62
NAT0976	Barreiras-dug well	-2.57	-6.64	29.93	4.37	62
NZF0235	Barreiras-dug well	-2.84	-6.36	28.62	4.86	43
NZF0288	Barreiras-dug well	-2.69	-6.08	29.16	4.71	180
NZF0347	Barreiras-dug well	-3.15	-7.71	29.75	4.38	23
SGA0443	Barreiras-dug well	-2.83	-8.36	29.23	5.37	289
NAT0630	Barreiras-spring	-3.73	-10.49	30.13	5.61	189
CRM0155	Mesozoic (Açu)	-3.16	-10.24	28.88	6.96	971
SGA0034	Mesozoic (Açu)	-3.07	-10.33	29.21	7.29	207
CRM0062	Mesozoic (Jand./Açu)	-3.17	-14.65	30.08	8.06	317

Figura 3 – Localização de pontos de amostragem de água subterrânea para análise isotópica no litoral leste do Rio Grande do Norte.

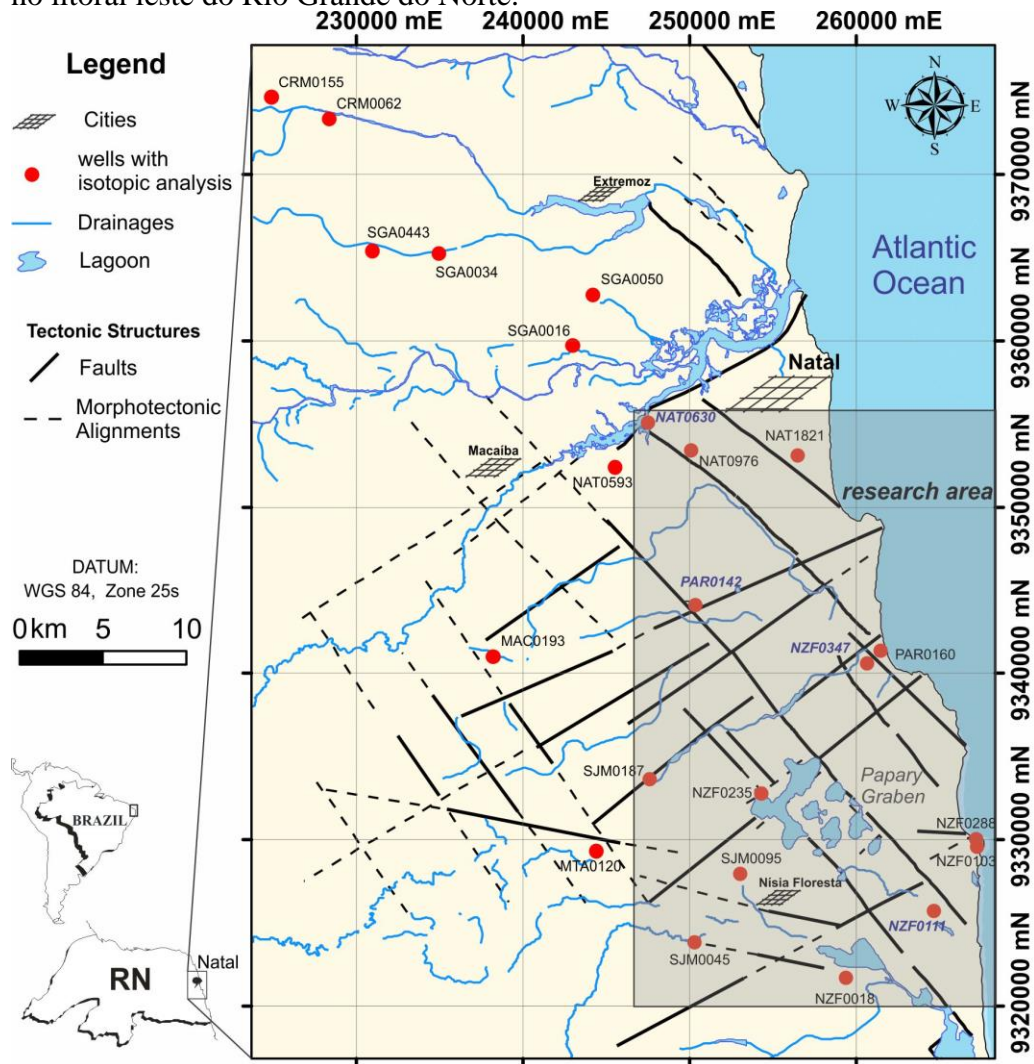
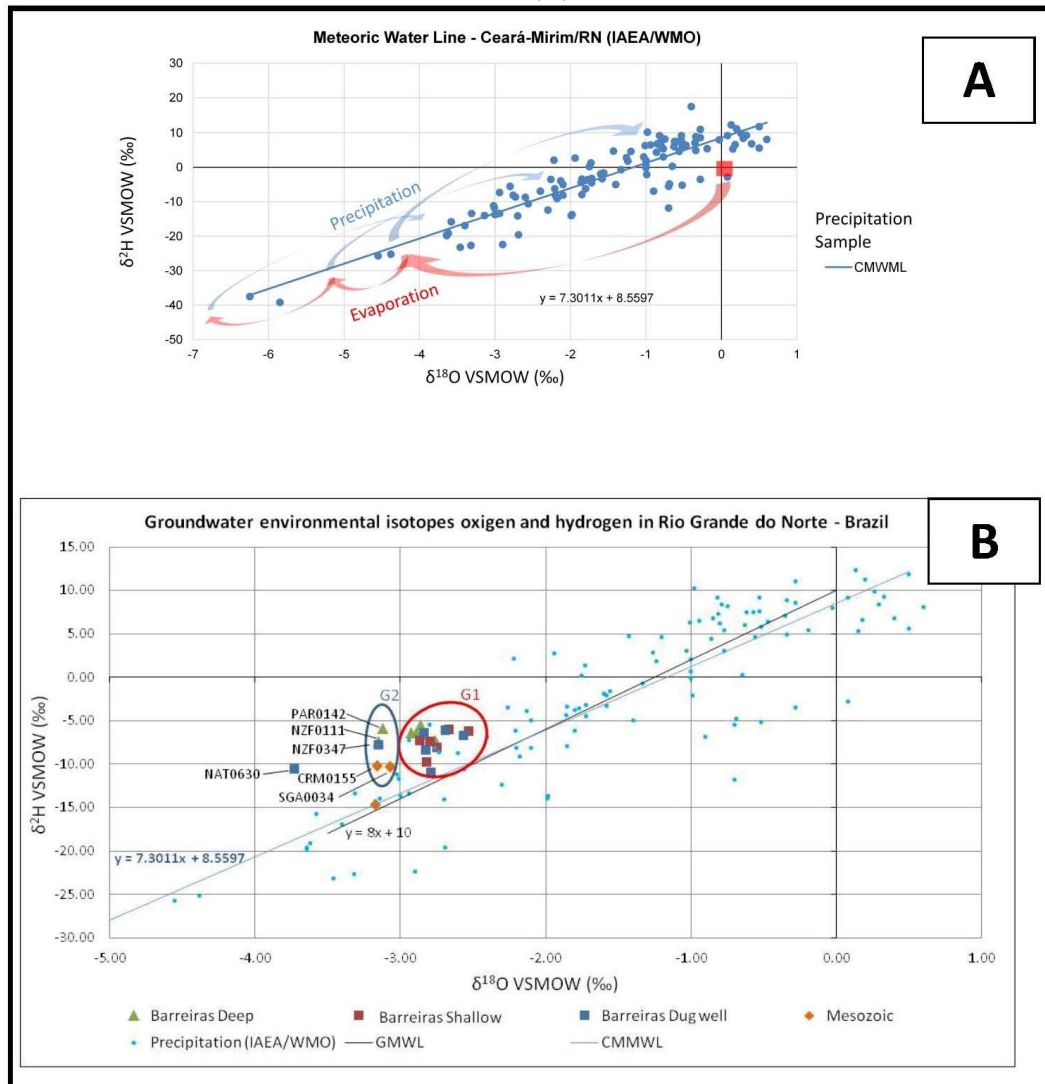


Figura 4 – Razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ de amostras de chuva mensal e sua fração isotópica derivada de processos naturais de evaporação e precipitação (A); Resultados isotópicos " $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW" e o padrão de assinatura isotópica do Aquífero Barreiras na costa leste do Rio Grande do Norte (B).



A água subterrânea apresenta uma ligeira variação nas razões de isótopos em comparação com a ampla variação nas razões de isótopos da água meteórica. Tal comportamento pode sugerir condições climáticas muito específicas relacionadas à recarga do aquífero ou alguma variação sazonal das razões de isótopos que não puderam ser detectadas por um único episódio de amostragem de água subterrânea.

Os resultados isotópicos representados no gráfico " $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW" permitiram distinguir dois conjuntos (Figura 4B). O conjunto G1 é formado por águas

subterrâneas com maiores razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$, semelhante à assinatura isotópica de um pequeno grupo de precipitações. Este aspecto sugere um pequeno fracionamento dentro do Aquífero Barreiras, uma vez que as amostras de poços tipo amazonas (rasos), por exemplo, e tubulares (profundos), em geral, apresentam razões isotópicas similares.

O conjunto G2 e a amostra isolada NAT0630, por outro lado, grupos de água com maior fracionamento, apresentaram $\delta^{18}\text{O}$ menor que -3 ‰ e não possuem assinatura semelhante à de precipitação isotópica. Este conjunto de amostras inclui uma grande diversidade na origem: aquíferos mesozóicos (CRM0155, SGA0034), poços profundos do Aquífero Barreiras (PAR0142, NZF0111), poço amazonas (NZF0347) e uma nascente na Formação Barreiras (NAT0630). No entanto, uma característica comum entre as amostras do Aquífero Barreiras e o conjunto G2 são as localizações geográficas desses poços amostrados, estando estes posicionados muito próximos ou mesmo situados sobre grandes lineamentos estruturais regionais associados às falhas, os quais são responsáveis pela compartimentação da bacia sedimentar costeira (LUCENA 2005, NOGUEIRA et al. 2010, BEZERRA et al. 2014, ALVES e LUCENA 2021). Apesar de se tratar de dados preliminares, essas características de proximidade de zonas de falha e assinaturas de isótopos semelhantes aos aquíferos mesozóicos, conduzem à interpretação de provável fluxo de água subterrânea influenciado por zonas de falha.

Dentre as amostras do Aquífero Barreiras listadas na Tabela 1, destacadas em azul na Figura 3 e inseridas no gráfico da Figura 4, aquelas identificadas como NAT0630 (nascente), NZF0111 (poço de produção), NZF0347 (poço amazonas) e PAR0142 (poço de produção) apresentaram valores anômalos $\delta^{18}\text{O}$ comparados a outros valores detectados neste aquífero. Essas amostras possuem assinaturas isotópicas consistentes com valores de $\delta^{18}\text{O}$ detectados em amostras de aquíferos infra-Barreiras, correspondendo ao fracionamento isotópico empobrecido em ^{18}O .

As causas efetivas de tal comportamento de fracionamento não podem ser totalmente compreendidas devido ao estágio preliminar de assinaturas isotópicas na região. No entanto, deve-se destacar a similaridade de assinaturas isotópicas entre águas de diferentes origens e fracionamento quando comparadas a outras águas subterrâneas, principalmente considerando a posição geográfica dessas amostras perto de falhas importantes na bacia sedimentar costeira.

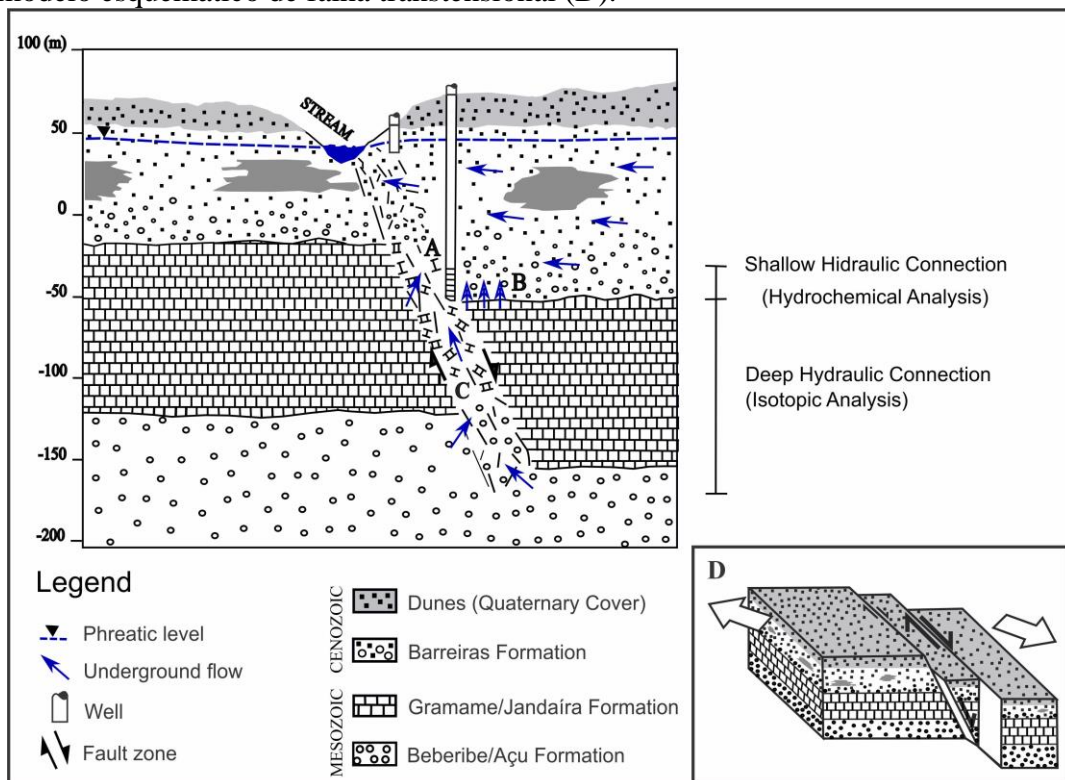
Ressalta-se que as áreas de afloramento desses aquíferos localizam-se a oeste da área de afloramento da Formação Barreiras (e seu aquífero homônimo) e mais distantes da região litorânea. Nas regiões centrais de ocorrência do Aquífero Barreiras encontram-se valores intermediários de $\delta^{18}\text{O}$, bem como algumas áreas de descarga na região costeira que misturam riachos locais enriquecidos em ^{18}O com fluxos regionais de água da região oeste com valores empobrecidos em ^{18}O .

As amostras NAT0630 e NZF0347 estão localizadas em diferentes posições da estrutura que limita o Graben Papary (LUCENA 2005) a oeste, enquanto as amostras NZF0111 e PAR0142 localizam-se nas proximidades da falha que delimita o referido graben a oeste (Figura 3). O caráter transtensional dessas falhas, representando áreas de alívio de pressão, somado à semelhança da assinatura isotópica dessas diferentes amostras do Aquífero Barreiras e sistemas infra-Barreiras, sugerem uma conexão hidráulica entre tais contextos. Dessa forma, a assinatura isotópica semelhante das amostras, relativamente empobrecidas em ^{18}O , pode indicar o condicionamento do fluxo do lençol freático causado por essas estruturas e a mistura de água entre as unidades aquíferas. Nesse último caso, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ relativamente empobrecidos podem sugerir fluxos de água ascendentes provenientes das unidades infra-Barreiras.

Esses resultados confirmam pesquisas anteriores (LUCENA 2005, NOGUEIRA et al. 2010, ALVES e LUCENA 2021) de que essas falhas são profundas na crosta, seccionando completamente a sequência sedimentar regional mesozóica e cenozóica. Assim, além da interação entre o Aquífero Barreiras e a porção superior do aquífero carbonático, causando enriquecimento em bicarbonatos, proposto por Stein et al. (2019), as águas desse aquífero podem ser submetidas a misturas com aquíferos profundos ao longo de zonas de falha de caráter transtensional. Esse aspecto também é corroborado por Balsamo et al. (2010) que caracterizaram elevadas porosidades e permeabilidades intrínsecas nas zonas de dano dessas falhas no contexto da Formação Barreiras. A relação entre falhas profundas e aumento de porosidade/permeabilidade, certamente também somado a pressões de confinamento, é igualmente sugerida por relatório interno de poço da CAERN, o qual relata uma perfuração exploratória realizada nas proximidades da borda de outro expressivo graben regional (Graben Canguaretama, cerca de 40 km ao sul desta área de pesquisa), que atingiu a sequência arenítica mesozóica, resultando em um poço artesiano jorrante.

Na Figura 5 apresenta-se uma síntese dos modelos propostos para a ocorrência de águas bicarbonatadas no Aquífero Barreiras, bem como misturas resultantes de ligações hidráulicas rasas e profundas, sendo esta última sugerida por análises isotópicas.

Figura 5 – Síntese dos modelos propostos para a ocorrência de águas bicarbonatadas no contexto do Aquífero Barreiras, devido a descontinuidades estruturais: dissolução do maciço carbonático por escoamento perpendicular às barreiras semipermeáveis (A), drenagem vertical ascendente na parte superior porção da aquitarda cretácea (B) e ascensão de águas mais profundas do aquitardo e outros aquíferos mesozóicos em áreas de falhas transtensionais (C); modelo esquemático de falha transtensional (D).



É importante ressaltar a necessidade de novas avaliações isotópicas com vistas a ampliar a grade de amostragem de águas subterrâneas e pluviométricas, bem como análises isotópicas para datação de águas visando um embasamento mais aprofundado e consistente dos modelos ora propostos. Outro aspecto acerca dessas considerações é a possibilidade da utilização conjunta de dados de condutividade elétrica das águas do Aquífero Barreiras, uniformizando-se as características dos poços amostrados (poços tubulares com o posicionamento de filtros mais profundos na captação), os quais podem igualmente corroborar

conexões entre aquíferos rasos e profundos através da caracterização de águas mais mineralizadas nas zonas de falha.

6. Conclusões

- A análise dos dados isotópicos ora apresentada sugere que as águas do Aquífero Barreiras podem adicionalmente sofrerem misturas com águas de sistemas infra-Barreiras, através de conexões hidráulicas profundas ao longo de zonas de falha, em detrimento apenas da configuração de conexões mais rasas, reportadas em pesquisas prévias, entre a porção inferior do aquífero e o topo de seu substrato carbonático nessas zonas de falha.
- A semelhança entre as assinaturas isotópicas de algumas amostras do Aquífero Barreiras com aquelas dos aquíferos infra-Barreiras (Açu e Jandaíra) reforça a ocorrência de ligações hidráulicas entre esses sistemas hidrogeológicos. Os pontos de amostragem com impressão digital isotópica atípica no Aquífero Barreiras, particularmente em relação ao $\delta^{18}\text{O}$, acham-se situados ao longo das falhas que limitam o graben Papary. Essa conexão hidráulica parece ser favorecida devido ao caráter transtensional dessas estruturas, as quais seccionam toda a bacia sedimentar costeira do Rio Grande do Norte. Em geral, esses resultados corroboram com estudos anteriores que reconheceram elevadas porosidades e permeabilidades, bem como alívio de pressão em áreas de falhas transtensionais, embora com ênfase naquelas mais expressivas e profundas (também identificadas em pesquisas anteriores por meio de anomalias gravimétricas proeminentes).
- Embora as interpretações alcançadas neste estudo sejam consistentes com estudos anteriores, os autores ressaltam que os resultados isotópicos ainda são preliminares e devem ser aprofundados com estudos posteriores, contemplando igualmente dados de condutividades elétricas das águas que corroborem a hipótese de conexões hidráulicas entre aquíferos rasos e profundos. As conclusões ora reportadas justificam a expansão das análises isotópicas em poços no âmbito do Aquífero Barreiras, bem como aqueles localizados nas áreas de afloramento dos aquíferos Mesozóicos (Açu/Beberibe e Jandaíra/Gramame) e nas proximidades de falhas regionais proeminentes.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Águas do Brasil-ANA pela disponibilização dos dados isotópicos utilizados no desenvolvimento do presente artigo, os quais se acham inseridos no Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana de Natal, disponível no site da agência.

8. Referências

- ALVES, R.S.; MELO, J.G.; SILVA, C.T.X.L.; OLIVEIRA, C.C.C. (2016) Recursos hídricos subterrâneos da região de Parnamirim, RN: uso das águas e potencialidades. *Revista Águas Subterrâneas*, V.30 (1): 37-52. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28486>.
- ALVES, R.S.; LUCENA, L.R.F. (2021) Uso de dados hidrogeofísicos e modelos numéricos como alternativa na otimização de locações de poços em um aquífero não confinado. *Revista Águas Subterrâneas*, V.35 (1): 51-64. <https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.29987>.
- ANA, (2012) *Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Nata (RMN)*. Relatório Final. Volume 2: Avaliação da Urbanização e de Outras Atividades Antrópicas Impactantes nas Águas Subterrâneas. Agência Nacional de Águas, Gov. Brasil. ANA/SERVMAR. Brasília, DF. 250 p. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=424&currTab=simple>
- BALL, L. B., SHEMIN, GE., CAINE, J. S., REVIL, A., JARDANI, A., (2010) Constraining fault-zone hydrogeology through integrated hydrological and geoelectrical analysis. *Hydrogeology Journal*, 18, 1057-1067. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0587-z>.
- BALL, L.B., CAINE, J.S., GE, S. (2014) Controls on groundwater flow in a semiarid folded and faulted intermountain basin. *Water Resources Research*, 50. <https://doi.org/10.1002/2013WR014451>.
- BALSAMO, F., STORTI, F., SALVINI, F., SILVA, A.T., LIMA, C.C., (2010) Structural and petrophysical evolution of extensional fault zones in low-porosity, poorly lithified sandstones of the Barreiras Formation, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 32, 1806 - 1826. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.10.010>.
- BENSE, V. F., BALEN, R. B., (2004) The effect of fault relay and clay smearing on groundwater flowpatterns in the Lower Rhine Embayment. *Basin Research*, 16, 397-411. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00238.x>.

- BENSE, V.F., PERSON, M.A., (2006) Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, 42, W05421, 18 PP. <https://doi.org/10.1029/2005WR004480>.
- BEZERRA, F.H.R., (1998) *Neotectonics in Northeastern Brazil*. Ph.D. Thesis, University of London.
- BEZERRA, F.H.R.; ROSSETTI, D.F.; OLIVEIRA, R.G.; MEDEIROS, W.E.; BRITO NEVES, B.B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F.C.C.; DANTAS, E.L.; ANDRADES FILHO, C.; GOES, A.M., (2014) Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics* 614: 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.021>.
- BLACK, J.H., (1994) Hydrogeology of fractured rocks - a question of uncertainty about geometry. *Applied Hydrogeology*, 3, 56-70. <https://doi.org/10.1007/s100400050049>.
- CAINE, J.S., MINOR, S.A. (2009) Structural and geochemical characteristics of faulted sediments and interferences on role of water in deformation, Rio Grande Rift, *New Mexico*. *GSA Bulletin*, v. 121, n° 9/10, p. 1325-1340. <https://doi.org/10.1130/B26164.1>.
- CHEN, J., LIU, X., SUN, X., SU, Z., YONG, B. (2014) The origin of groundwater in Zhangye Basin, northwestern China, using isotopic signature. *Hydrogeology Journal*, 22: 411-424. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1051-7>.
- CLARK, I., FRITZ, P., (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Raton, NY. 311 p.
- FERNANDES, A.J., RUDOLPH, D.L., (2001) The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9: 151-167. <https://doi.org/10.1007/s100400000103>.
- FERREIRA, J.M., (1997) *Sismicidade e esforços no Nordeste do Brasil*. São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Astrofísica e Geologia, Universidade de São Paulo. 126 p.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ. 604 pp.
- GREEN, G., WATT, E., ALCOE, D.; COSTAR, A.; MORTIMER, L. (2010) *Groundwater flow across regional scale faults*. Department for Water, Technical Report 2010/15, Government of South Australia. 117p. Accessible in: <http://www.waterconnect.sa.gov.au/TechnicalPublications>.

HUSSIEN, H. M., KEHEW, A. E., AGGOUR, T., KORANY, E., ABOTALIB, A. Z., HASSANEIN, A., & MORSY, S. (2017) An integrated approach for identification of potential aquifer zones in structurally controlled terrain: Wadi Qena basin, Egypt. *Catena*, 149: 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.032>.

IAEA, (2001) *Environmental Isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications*. Volume I: Introduction – Theory, methods, review. Willem G. Mook. International Atomic Energy Agency. Vienna. 164 p. Available in: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global_cycle/Environmental%20Isotopes%20in%20the%20Hydrological%20Cycle%20Vol%201.pdf. Downloaded on September, 5th, 2012.

IAEA, WMO. (2017) *International Atomic Energy Agency, World Meteorological Organization*. Global Network of Isotopes in Precipitation - GNIP Database. Available at WISER (Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval): <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>. Accessed December 17th, 2017.

LACHMAR, T.E., BRADBURY, K.K., EVANS, J., (2002) Structure and hydrogeology of deformed sedimentary bedrock aquifers, western summit county, Utah. *Environmental & Engineering Geoscience*, 8, 219-236. <https://doi.org/10.2113/8.3.219>.

LUCENA, L.R.F., (2005) *Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi-RN*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná-UFPR.

LUCENA, L.R.F., ROSA FILHO, E.F., HINDI, E.C. (2006) O controle estrutural no Aquífero Barreiras - área da bacia do Rio Pirangi-RN. *Revista Águas Subterrâneas*, V. 20 (1): 83-98. <https://doi.org/10.14295/ras.v20i1.9715>.

LUCENA, L.R.F.; MEDEIROS, J.D.; SANTOS, N.C.F. (2008) A disponibilidade hídrica das lagoas Jiqui e Pium e o caráter efluente em relação ao Aquífero Barreiras-litoral sul de Natal-RN. *Revista Águas Subterrâneas*, V. 22 (1): 59-72. <https://doi.org/10.14295/ras.v22i1.17023>.

LUCENA, L.R.F.; OLIVEIRA JR., J.G.; MEDEIROS, W.E.; QUEIROZ, M.A. (2013) The potential of the Barreiras Aquifer in lower course of the Doce River, Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil - integration of hydrogeological and geophysical data. *Brazilian Journal of Geophysics*, 31(1): 43-57. <https://doi.org/10.1590/rbgf.v31i1.245>.

LUCENA L.R.F.; DA SILVA, L.R.D.; VIEIRA, M.M.; CARVALHO, B.M.; XAVIER JUNIOR, M.M. (2016) Estimating hydraulic parameters of Açú-Brazil aquifer using the

computer analysis of micrographs. *Journal of Hydrology* 535: 61-70.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.025>.

MEDEIROS, W.E.; NASCIMENTO, A.F.; ALVES DA SILVA, F.C.; DESTRO, N.; DEMÉTRIO, J.G.A. (2010) Evidence of hydraulic connectivity across deformation bands from field pumping tests: Two examples from Tucano Basin, NE Brazil. *Journal of Structural Geology* 32: 1783-1791. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.08.019>.

MELO, J. G., (1995) *Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal/RN – Zona Sul*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO SILVA, M.V.; ALCIDES, N.S.; FERREIRA, V.P.; NEUMANN, V.H.; BARBOSA, J.A.; PIMENTEL, M.M; LACERDA, L.D. (2011) Cretaceous-Paleogene transition at the Paraíba Basin, Northeastern, Brazil: Carbon-isotope and mercury subsurface stratigraphies. *Journal of South American Earth Science*, 32: 379-392.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.014>.

NOGUEIRA, F.C., BEZERRA, F.H.R., FUCK, R.A., (2010) Quaternary fault kinematics and chronology in intraplate northeastern Brazil. *Journal of Geodynamics*, 49: 79-91.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.11.002>.

NUNES, L. M. G.; LUCENA, L. R. F.; NASCIMENTO SILVA, C. C. (2020) Reserve evaluation of a fault-conditioned aquifer: the Barreiras Aquifer in the coastal region of NE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*. 50(1): e20180127, <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020180127>.

RODRIGUES, M.A.C., LUCENA, L.R.F., SOUZA, I.V.F., (2011) Preliminary geometric model of the Barreiras Aquifer derived from hydrogeophysics data at the Catu basin, NE Brazil. In: *International Congress of The Brazilian Geophysical Society, XII*, Rio de Janeiro. Expanded Abstract. Rio de Janeiro, CD-Rom.

SOUZA, I. V. F.; LUCENA, L. R. F.; BEZERRA, F. H. R.; DINIZ FILHO, J. B. (2019) Use of hydrogeophysical data to determine the role of faults in the geometry of the Barreiras Aquifer, Brazil. *BJGEO*, 49(2): e20170141. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920170141>.

STEIN, P., CABRAL, N.M.T., MANOEL FILHO, J., LUCENA, L.R.F. (2019) Efeito da descontinuidade estrutural na hidrogeoquímica do Aquífero Barreiras no nordeste do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, V. 33 (1): 45-57. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29225>.