



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 560

**HIDROQUÍMICA E CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA
(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) DOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E
PIRABAS NOS MUNICÍPIOS DE SÃO FRANCISCO DO PARÁ
E IGARAPÉ AÇU, NORDESTE DO PARÁ**

Dissertação apresentada por:

**BEATRIZ PINHEIRO PANTOJA DE OLIVEIRA
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro (UFPA)**

**BELÉM
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48h Oliveira, Beatriz Pinheiro Pantoja de
Hidroquímica e caracterização isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) dos
sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas nos municípios de São
Francisco do Pará e Igarapé-Açu, nordeste do Pará. / Beatriz
Pinheiro Pantoja de Oliveira. — 2019.
xix, 83 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Recursos Hídricos. 2. Hidrogeoquímica. 3. Geoquímica
Isotópica. 4. Sistema Aquífero Barreiras. 5. Sistema Aquífero
Pirabas. I. Título.

CDD 551.908115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

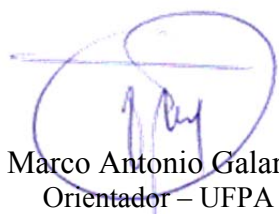
**HIDROQUÍMICA E CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA
(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) DOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E
PIRABAS NOS MUNICÍPIOS DE SÃO FRANCISCO DO PARÁ
E IGARAPÉ AÇU, NORDESTE DO PARÁ**


**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
BEATRIZ PINHEIRO PANTOJA DE OLIVEIRA**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, linha de pesquisa GEOCRONOLOGIA E
GEOLOGIA ISOTÓPICA**

Data de Aprovação: 16 / 08 / 2019

Banca Examinadora:


Prof. Marco Antonio Galarza Toro
Orientador – UFPA


Prof. Candido Augusto Veloso Moura
Membro – UFPA


Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva
Membro – MPEG

Aos meus pais,
Antonio Carlos e Joaquina Oliveira.

AGRADECIMENTOS

À Deus, Nossa Senhora, São Judas Tadeu, Santa Edwiges e Santa Terezinha pela intercessão e Graças alcançadas desde o início de tudo.

A minha família, por todo suporte que me deram em todos os momentos de minha vida, pelo apoio logístico e de materiais emprestados, pelo esforço em me ajudar em todas as horas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao PPGG, UFPA, PROEX pelo apoio logístico e financeiro para as campanhas iniciais de reconhecimento da área.

Ao PPGCA, na pessoa da professora Aline Meiguins, pelo apoio durante as campanhas de campo, cedendo o equipamento de multiparâmetros de análise de água, além da visita ao campo, contribuindo com valiosos conselhos e discussões, para uma abordagem mais integrada nas geociências e, em especial, aos recursos hídricos.

Aos amigos que ajudaram nas etapas de campo, com muito companheirismo, amizade e bom humor: Jean Bizet, Larissa Silva, Rosanny Lima, Lino Machado, Antonio Neto, Rayleno Oliveira, Sabrina Silva, Rayara Silva, Marcelo Antonio, Isabele Barros, Jully Afonso, o meu muito obrigada!! Vocês me ajudaram muito a cumprir esta etapa.

Às meninas, amigas do laboratório, de pesquisa, de ensinamentos, me ajudando nas discussões: Adriana Bordalo, Elma Oliveira, Professora Andreia Cardoso, Bruna Nogueira, a minha gratidão por terem compartilhado o que de mais importante levamos da vida: o aprendizado. Sempre guardarei com muito carinho os gestos e palavras de vocês.

Ao orientador, professor Marco Antonio Galarza Toro pela oportunidade de me deixar trabalhar com recursos hídricos e pelo apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor José Augusto Correa Martins, por todo suporte laboratorial e acadêmico na área de hidroquímica, o meu muito obrigada pelo apoio e confiança!

Ao estimado Francisco de Assis Matos de Abreu por ter inspirado este trabalho, pelo direcionamento que precisei para chegar onde estou. Obrigada pelo carinho e consideração de sempre!

À Eletronorte, na pessoa da Darilena Porfírio que analisou as amostras para cromatografia de íons, no Laboratório de Águas e Efluentes vinculado ao Processo ENFQ- Ensaio químicos de óleo isolante lubrificante e combustível do centro de tecnologia da Eletronorte Eletrobras.

Ao técnico Afonso Quaresma pela amizade, apoio e empenho que foram fundamentais durante o trabalho de campo, sempre contribuindo com comentários, sugestões, paciência, sempre acolhendo os meus pedidos e convidados de campo. Aos técnicos dos laboratórios Natalino Ferreira, Leila Hanna que se disponibilizaram a passar seus conhecimentos.

À prefeitura de São Francisco do Pará, na pessoa do senhor Elielson e do seu Raimundo, por toda atenção dispensada à procura de poços profundos na região, pelo apoio durante todas as campanhas logísticas, assim como, aos proprietários dos poços particulares que gentilmente cederam os dados e permitiram a coleta de dados e água para o presente trabalho.

Ao SAE, no município de Igarapé Açu, na pessoa da Carol e do Joanielson, que foram excepcionais colocando à disposição o banco de dados da Associação e ajudando também na localização dos poços no município

Aos órgãos que colaboraram com informações de dados geológicos e construtivos de poços, sendo o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, a Fundação Nacional da Saúde - FUNASA, Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS pela cessão de dados de poços.

“Bendize, ó minha alma, ao Senhor,
E todo o meu ser, Seu Santo Nome!
Bendize ó minha alma ao Senhor,
Não te esqueça de nenhum de seus favores!”
Salmo 102

RESUMO

A região norte do Brasil é privilegiada em recursos hídricos, tanto superficial quanto subterrâneo. Recentemente o aproveitamento de água subterrânea aumentou, já que pode ser captado no local de consumo. Na mesorregião nordeste do Pará, o volume de dados hidrogeológicos se concentra na região metropolitana da capital Belém, que conta com um sistema de abastecimento misto, ou seja, com captação de água superficial (Rio Guamá) e subterrânea. Entretanto, são nos demais municípios, tais como os estudados neste trabalho, que o sistema de abastecimento é integralmente feito por água subterrânea. Assim, faz-se muito necessário, todo e qualquer levantamento que contribua para o melhor conhecimento dos mananciais subterrâneos que servem o nordeste do Pará. Os principais aquíferos neste contexto são: o Sistema Pirabas – SP (carbonático), Sistema Barreiras – SB (siliciclástico). Estudos anteriores mostraram por meio da hidrogeoquímica e da geoquímica isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) a interação entre estes dois importantes reservatórios subterrâneos, e que estes podem ter uma conexão hidráulica através de falhas e fraturas, resultantes da neotectônica presente no NE do Pará. Dessa forma, neste trabalho estuda-se a água subterrânea nos municípios São Francisco do Pará e Igarapé Açu, no período de quinze meses, acompanhando a sazonalidade desta região, a fim de averiguar interações que os aquíferos possam apresentar, nos períodos de recarga. A partir de uma triagem do Sistema de Águas Subterrâneas (SIAGAS), e de campanhas logísticas, foram selecionados 9 poços, sendo 5 rasos (~ 30 a 60 m) e 4 profundos (~ 80 a 135 m). As campanhas se deram de outubro de 2017 até janeiro de 2019, sendo três coletas no período seco, e três no período chuvoso. Medidas físico-químicas foram tomadas em campo, tais como temperatura, pH, condutividade elétrica. As análises hidroquímicas foram feitas no Laboratório de Hidroquímica do Instituto de Geociências, sendo determinados a alcalinidade total pelo método titulométrico, a sílica e o ferro total pelo método espectrofotométrico; as análises cromatográficas foram feitas no Laboratório de Análises da Eletronorte, e as concentrações medidas por cromatografia dos íons: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , F. As concentrações de Sr^{2+} foram obtidas no ICP-MS (*ICap-Q*) e a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no MC-ICP-MS (*Neptune*) do laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Pará (Pará-Iso). Os resultados foram submetidos a tratamentos estatísticos para mostrar correlações e agrupamento de elementos. Os parâmetros físico-químicos dos sistemas aquíferos não mostraram variações significativas ao longo do ciclo hidrológico. A temperatura média variou de 27,6 a 27,4°C, a condutividade de 28 a 154 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e o pH entre 4,0 – 5,5 (SB) e 6,0 – 7,2 (SP). As concentrações de $\text{Fe}_{(t)}$ (mg/L) variaram de 0,0 a 2,2 (SB) e 0,0 a 3,3; a SiO_2 (mg/L) 0,8 a 13,6 (SB) 5,4 a 21,0 (SP); HCO_3^{-} (mg/L) 0,0 a 9,0 (SB) e de 0,0 a 81,3 (SP). As

concentrações dos íons tiveram resultados (em mg/L) como Na^+ 1,78 a 22,15 (SB) e 2,34 a 7,29 (SP); K^+ 0,14 a 1,81 (SB) e 1,05 a 1,58 (SP); Mg^{+2} 0,34 a 0,99 (SB) e 1,49 a 3,81 (SP); Ca^{+2} 0,07 a 3,22 (SB) e 12,26 a 26,93 (SP); Cl^- 3,18 a 37,24 (SB) e 3,71 a 16,88 (SP); NO_3^- 0,10 a 10,33 (SB) e 0,00 e 1,20 (SP); SO_4^{2-} 0,94 a 12,17 (SB) e 1,84 a 6,62 (SP); F^- 0,00 a 0,02 (SB) e 0,05 a 0,11 (SP) e, o Sr^{2+} 0,006 a 0,018 (SB) e 0,045 a 0,146 (SP). A partir do diagrama Piper, verificou-se que no aquífero Barreiras predomina a fácies Na-Cl e pH ácido, em média 4,7, com contribuição de água meteórica e/ou antropogênica, fator que aumenta a vulnerabilidade do aquífero; já a água do Aquífero Pirabas, predomina uma fácies Ca-Mg- HCO_3 e pH acima de 6,0 em média, sendo fortemente influenciada pela dissolução do carbonato, o aquífero tem regime confinado, fator que diminui a sua vulnerabilidade à contaminação. O diagrama Stiff indica que os substratos em interação com a água são de arenito, folhelho, calcário e dolomito. Os metais que podem apresentar caráter tóxico e cumulativo à saúde humana, não foram detectados em níveis significativos. A razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de cada amostra teve tendência linear ao longo do tempo, e as amostras individualmente apresentaram pouca variação nas suas razões isotópicas. De acordo com os valores de razão isotópica obtidos, são separados três aquíferos: o Pirabas Inferior que se mantém nos períodos seco e chuvoso entre 0,709138 e 0,709333, assim como o Pirabas Superior se manteve entre 0,710413 e 0,711013; já o Aquífero Barreiras demonstrou uma variação diferenciada no período chuvoso, evidenciando uma pequena interação com água da chuva, e os valores ficaram entre 0,710687 e 0,714903. O tratamento estatístico multivariado (PCA), juntamente com o diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ mostraram que os Aquíferos se comportam de maneira independente. Em relação aos poços, apesar de terem sido preparados para evitar contaminação, a manutenção destes é de certa forma insatisfatória, de modo que em alguns pontos de coleta há indícios contaminação por ação antrópica. No nordeste do Estado do Pará, o contato superior da Formação Pirabas com a Formação Barreiras é bastante discutido, e varia ao longo da Plataforma Bragantina. Há trabalhos que descrevem como contato discordante, ou como uma interdigitação faciológica e ainda, os que defendem variações locais. Neste caso em estudo, a complexidade lenticular desses aquíferos, que se intercalam com camadas impermeáveis impedem a comunicação hidráulica, o que explica, a diversificação geoquímica da água, e o comportamento de aquífero do tipo confinado.

Palavras-Chave: Recursos Hídricos. Hidrogeoquímica. Geoquímica Isotópica. Sistema Aquífero Barreiras. Sistema Aquífero Pirabas.

ABSTRACT

The northern region of Brazil is privileged in water resources, both superficial and underground. Recently the use of groundwater has increased, since it can be captured in the place of consumption. In the northeastern meso-region of Pará, the volume of hydrogeological data is concentrated in the metropolitan region of the capital Belém, which has a mixed supply system, that is, with surface water (Guamá River) and groundwater. However, in the other municipalities, such as those in this study, that the water supply system is made entirely by groundwater. Thus, it is very necessary, any and all surveys that contribute for a better knowledge of the underground resources which serves the northeastern state of Pará. The main aquifers in this context are: the Pirabas System - SP (carbonate host rock), Barreiras System - SB (siliciclastic host rock). Previous studies have shown, through hydrogeochemistry and isotope geochemistry ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), the interaction between these two important underground reservoirs, and they showed a hydraulic connection through faults and fractures, resulting from the neotectonic present in NE of Pará. Thus, in this work, groundwater is studied in the municipalities of São Francisco do Pará and Igarapé Açu, in the period of fifteen months, following the seasonality of this region, in order to investigate interactions that the aquifers may present during recharge periods. From a screening of the Groundwater System (SIAGAS) and logistic campaigns, 9 wells were selected, being 5 shallow (~ 30 to 60 m) and 4 deep (~ 80 to 135 m). The campaigns took place from October 2017 until January 2019, three collections in the dry period and three in the rainy season. Physical-chemical measurements were taken in the field, such as temperature, pH, electrical conductivity. The hydrochemical analyzes were performed in the Laboratory of Hydrochemistry of the Institute of Geosciences, being determined the total alkalinity by the titration method, the silica and the total iron by the spectrophotometric method; the chromatographic analyzes were performed at the Eletronorte Analytical Laboratory, and the concentrations measured by chromatography of the ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , F^{-} . The concentration of Sr^{2+} was obtained in the ICP-MS (*ICap-Q*) and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio in the ICP-MS (*Neptune*) of the Geochronology Laboratory of the Federal University of Pará (Pará-Iso). The results were submitted to statistical treatments to show correlations and grouping of elements. The physical-chemical parameters of the aquifer systems did not show significant variations during the hydrological cycle. The mean temperature varied from 27.6 to 27.4°C, the conductivity from 28 to 154 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and the pH from 4.0-5.5 (SB) and 6.0-7.2 (SP). The concentrations of Fe (t) (mg / L) ranged from 0.0 to 2.2 (SB) and 0.0 to 3.3; SiO_2 (mg / L) 0.8 to 13.6 (SB) 5.4 to 21.0 (SP); HCO_3^{-} (mg / L) 0.0 to 9.0 (SB) and from 0.0 to 81.3 (SP). The concentrations of ions had results (in mg / L) as Na^{+}

1.78 at 22.15 (SB) and 2.34 at 7.29 (SP); K^+ 0.14 to 1.81 (SB) and 1.05 to 1.58 (SP); Mg^{+2} 20.34 to 0.99 (SB) and 1.49 to 3.81 (SP); Ca^{+2} 0.07 to 3.22 (SB) and 12.26 to 26.93 (SP); Cl^- 3.18 to 37.24 (SB) and 3.71 to 16.88 (SP); NO_3^- 0.10 to 10.33 (SB) and 0.00 and 1.20 (SP); SO_4^{2-} 0.94 to 12.17 (SB) and 1.84 to 6.62 (SP); F^- 0.00 to 0.02 (SB) and 0.05 to 0.11 (SP) and, Sr^{2+} 0.006 to 0.018 (SB) and 0.045 to 0.146 (SP). From the Piper diagram, it was verified that in the Barreiras aquifer predominates the Na-Cl facies and acid pH, on average 4.7, with contribution of meteoric and / or anthropogenic water, a factor that increases the vulnerability of the aquifer; and the water of the Pirabas aquifer, predominates Ca-Mg- HCO_3 facies and pH above 6.0 on average, being strongly influenced by the dissolution of the carbonate, the aquifer has a confined regime, a factor that reduces its vulnerability to contamination. The Stiff diagram indicates that substrates in interaction with water are sandstone, shale, limestone and dolomite. Metals that may be toxic and cumulative to human health were not detected at significant levels. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotopic ratio of each sample had a linear trend over time, and the individual samples showed little variation in their isotopic ratios. According to the obtained isotopic ratio values, three aquifers are separated: the Lower Pirabas which remains in the dry and rainy periods between 0.709138 and 0.709333, as well as the Upper Pirabas remained between 0.710413 and 0.711013; the Barreiras Aquifer demonstrated a differentiated variation in the rainy season, evidencing a small interaction with rainwater, and values were between 0.710687 and 0.714903. The multivariate statistical treatment (PCA), along with the $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. $1/Sr$ have shown that the Aquifers behave independently. Regarding the wells, although they have been prepared to avoid contamination, the maintenance of these wells is somewhat unsatisfactory, so that at some collection points there are indications contamination by anthropic action. In the northeast of the State of Pará, the upper contact of the Pirabas Formation with the Barreiras Formation is quite discussed, and varies along the Bragantina Platform. There are works that describe as discordant contact, or as a faciological interdigitation and still, those that defend local variations. In this case study, the lenticular complexity of these aquifers, which are interspersed with impermeable layers, impede hydraulic communication, which explains the geochemical diversification of the water and the confined type aquifer behavior.

Key words: Water Resources. Hydrogeochemistry. Isotope Geochemistry. Barreiras Aquifer System. Pirabas Aquifer System.