



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURA DE ÁGUAS ENTRE O SISTEMA BARREIRAS E
PIRABAS COM BASE NA ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E
HIDROGEOQUÍMICA EM ANANINDEUA, BELÉM E BACKGROUNDS EM
BENEVIDES E CAPANEMA, PARÁ**

**Dissertação apresentada por:
OLAVO BILAC QUARESMA DE OLIVEIRA FILHO
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro**

**BELÉM
2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

O48i Oliveira Filho, Olavo Bilac Quaresma

Investigação de mistura de águas entre o sistema Barreiras e Pirabas com base na assinatura isotópica de Estrôncio (Sr) e hidrogeoquímica em Ananindeua, Belém e backgrounds em Benevides e Capanema, Pará / Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho; Orientador: Marco Antonio Galarza Toro – 2012
xvi, 82 f.: il.

Dissertação (mestrado em geoquímica e petrologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2012.

1. Hidrologia. 2. Isótopos de Sr. 3. Hidrogeoquímica. 4. Aquífero Barreiras. 5. Aquífero Pirabas. 6. Pará. I. Galarza Toro, Marco Antonio, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22° ed.: 551.48098115



**Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências**

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURA DE ÁGUAS ENTRE O
SISTEMA BARREIRAS E PIRABAS COM BASE NA
ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E
HIDROGEOQUÍMICA EM ANANINDEUA, BELÉM E
BACKGROUNDS EM BENEVIDES E CAPANEMA, PARÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

OLAVO BILAC QUARESMA DE OLIVEIRA FILHO

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área
de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

Data de Aprovação: 31/05/2012

Banca Examinadora:

**Prof. MARCO ANTONIO GALARZA TORO
(Orientador – UFPA)**

**Prof. DANIEL MARCOS BONOTTO
(Membro – UNESP)**

**Prof. CANDIDO AUGUSTO VELOSO MOURA
(Membro - UFPA)**

Dedico este trabalho a toda minha família, que me deu apoio quando mais precisei, e a todas as outras pessoas que me apoiaram nesses anos de luta, em especial a minha amada Giselle Santiago.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao longo do trajeto de criação e desenvolvimento do Mestrado.

Sinceros Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pelo custeio de diárias e ajuda de custo para as campanhas de coleta de amostras, sem o referido auxílio, tornar-se-ia impossível a aquisição de dados da aludida dissertação.

Muitos e elogiosos agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro, por está sempre ao meu lado no trabalho, nos bons momentos e nos difíceis, também. Por não ser um trabalho apoiado por projetos de pesquisa, seu poder de auxílio foi fundamental para desenvolvimento do trabalho, configurando-se figura ímpar dentro do Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica.

Agradeço a Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências, sobretudo ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARÁ-ISO) pela infra-estrutura disponibilizada e atenção conferida durante o processo de obtenção de dados.

Agradeço ao Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa, pela cessão dos laboratórios de Cromatografia, Hidroquímica e Análises Químicas para análises de cunho hidrogeoquímico, bem como utilização de reagentes, materiais e corpo técnico para obtenção de dados e desenvolvimento da respectiva dissertação.

A minha querida amiga Graziela Jones, pelo apoio irrestrito nas campanhas de coletas, pelo carinho e compreensão em momentos chaves do trabalho.

A equipe do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), composta pelo MSc. Wilson Rocha, MSc. Diogo Santos, pelo auxílio fundamental na confecção dos mapas nessa dissertação.

Finalmente, agradeço ao Sr. Gilmar, Gerente de Operações do Setor COSANPA (Unidade BR) e para a Srt^a. Evelyn, Técnica em Saneamento (Unidade SAAEB), bem como todos os síndicos dos condomínios e amigos que fiz ao longo desta jornada, que sem o apoio do mesmo seria inviável a aquisição de dados no trabalho.

“A satisfação está no esforço e não apenas na realização final”

Mahatma Gandhi

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Até a década de 70 acreditava-se que a região nordeste do Pará, assim como outras áreas de idade cenozóica no Brasil, fosse estável, sem indícios de tectonismo recente. Entretanto, investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições e estruturas tectônicas que caracterizaram o processo neotectônico do nordeste do Pará. Concomitante ao exposto, estudos em águas foram realizados na Região Metropolitana de Belém e demonstram a vulnerabilidade de aquíferos mais profundos por processos neotectônicos, sugerindo misturas entre os aquíferos Barreiras e Pirabas. Resultados obtidos a partir da variação sazonal revelam aquíferos de características hidrogeoquímicas distintas, destacando-se os parâmetros pH (4,27 a 6,19 no Barreiras; 7,00 a 8,02 no Pirabas), Condutividade Elétrica (11,1 a 92,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Barreiras; 222 a 406 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Pirabas), Sólidos Totais Dissolvidos (10 a 87 mg/l no Barreiras; 105 a 181 mg/l no Pirabas), Cl^- (0,18 a 0,42 meq/l no Barreiras; 0,05 a 0,12 meq/l no Pirabas), Na^+ (0,24 a 0,50 meq/l no Barreiras; 0,05 a 0,18 meq/l no Pirabas), Mg^{2+} (0,001 a 0,061 meq/l no Barreiras; 0,68 a 0,128 meq/l no Pirabas), Ca^{2+} (0,01 a 0,33 meq/l no Barreiras; 1,78 a 2,53 meq/l no Pirabas) e Sr^{2+} (0,0002 a 0,0066 meq/l no Barreiras; 0,016 a 0,023 meq/l no Pirabas), todos com notável variação entre os sistemas aquíferos abordados. Os resultados das análises a partir da matriz de correlação entre os sistemas aquíferos (Barreiras e Pirabas) nos períodos seco e chuvoso mostraram índices de correlação (r) acima de 0,8 em vários parâmetros estudados, evidenciando uma relação direta de contribuição entre os aquíferos. Com relação às fácies hidrogeoquímicas são divididas em 2 tipos: 1) aquífero Barreiras, período seco, as amostras comportam-se como águas do tipo Cl^- - Na^+ , subdivididas nos tipos Cl^- - Na^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-} e Cl^- - Fe^{2+} - Na^+ ; enquanto no período chuvoso temos águas do tipo Cl^- - Na^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-} e Cl^- - Na^+ - Ca^{2+} , salientado-se a menor estabilidade deste aquífero sendo sua fácies tipicamente de *input* de água meteórica, alterando o tipo da água conforme o ciclo hidrológico e 2) aquífero Pirabas, tanto no período seco quanto no chuvoso comportou-se como água do tipo HCO_3^- - Ca^{2+} , mostrando grande estabilidade da fácies hidrogeoquímica. O diagrama de composição do tipo Schöller para os aquíferos Barreiras e Pirabas, a partir do modelamento hidrogeoquímico a 10%, indica mistura das amostras desses aquíferos. As análises isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostram, de forma geral, que as águas do aquífero Barreiras são mais radiogênicas (continental) que as do aquífero Pirabas (marinha). Destaca-se que no período chuvoso, em geral, há homogeneização nas razões isotópicas obtidas (abaixo de 0,71), corroboradas pela razão isotópica da água da chuva (0,705316), sugerindo misturas entre os sistemas aquíferos estudados. A partir dos diagramas de dispersão

de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -STD é possível observar o tipo de processo que controla o sistema aquífero (no caso do Barreiras apresenta-se o intemperismo dos silicatos, enquanto no Pirabas apresenta-se a dissolução da calcita). Os resultados da análise discriminante utilizando os parâmetros isotópicos e hidrogeoquímicos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Cl⁻-SO₄²⁻-K⁺-Mg²⁺) sugerem uma excelente discriminação das amostras do Barreiras e Pirabas no período chuvoso, assim como as análises de PCA utilizando $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -SO₄²⁻-K⁺ indicam misturas entre os sistemas aquíferos no período chuvoso. A combinação dos resultados isotópicos e parâmetros hidrogeoquímicos no período seco e chuvoso com base na assinatura isotópica do Sr, estatística multivariada, diagrama de Schöller e análises de correlação sugerem processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, corroborando com os estudos estruturais. Os mesmos que indicam a mobilidade das águas desses aquíferos em misturar-se, principalmente pelas feições neotectônicas existentes na Região Metropolitana de Belém.

Palavras-Chave: Hidrologia. Isótopos de Sr. Hidrogeoquímica. Aquífero Barreiras. Aquífero Pirabas. Pará.

ABSTRACT

Until the 70's was believed that the northeastern region of Para, as well as other areas of Cenozoic age in Brazil was stable, without evidence of recent tectonics. However, field investigations and remote sensing analysis identified features and tectonic structures that characterize the neotectonic process this region. Concomitant with the above studies were performed in water in the metropolitan area of Belem and demonstrate the vulnerability of aquifers deeper by neotectonic processes, suggesting mixing between Barreiras and Pirabas aquifers. Results obtained from the seasonal variation reveal distinct hydrogeochemical characteristics, the parameters pH (4,27 to 6,19 in Barreiras; 7,00 to 8,02 in Pirabas), Electrical Conductivity (11,1 to 92,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Barreiras; 222-406 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Pirabas), Total Dissolved Solids (10-87 mg/l in Barreiras, 105-181 mg/l in Pirabas), Cl^- (0,18 to 0,42 meq/l in Barreiras; 0,05 to 0,12 meq/l in Pirabas), Na^+ (0,24 to 0,50 meq/l in Barreiras; 0,05 to 0,18 meq/l in Pirabas), Mg^{2+} (0,001 to 0,061 meq/l in Barreiras; from 0,68 to 0,128 meq/l in Pirabas), Ca^{2+} (0,01 to 0,33 meq/l in Barreiras; 1,78 to 2,53 meq/l in Pirabas) and Sr^{2+} (0,0002 to 0,0066 meq/l in Barreiras; 0,016 to 0,023 meq/l in Pirabas), all data with considerable variation between the aquifer systems. The analysis results from the correlation matrix between the aquifer systems in dry and wet periods showed correlation coefficients (r) above 0,8 on various parameters studied, suggesting a direct contribution from the aquifers. Regarding the hydrogeochemical facies are divided in two types: 1) Barreiras aquifer, dry period, the samples behave as water-type $\text{Cl}^- \text{Na}^+$, divided in two types Cl-Na-Ca-SO_4 and Cl-Fe-Na ; while it have water during the rainy season of the type $\text{Cl-Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ and Cl-Na-Ca , pointed to lower stability of this aquifer and its facie typically input of meteoric water, changing the type of water as the water cycle and 2) Pirabas aquifer, both in the dry season and the rainy behaved like water type $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, showing great stability of hydrogeochemistry facie. The diagram Schöller type composition for Barreiras and Pirabas aquifers, from 10% hydrogeochemistry modeling indicates mixture of these samples aquifers. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic show in general the waters of Barreiras aquifer are more radiogenic (continental) that the aquifer Pirabas (Navy). It's noteworthy that during the rainy season in general there is homogeneity in the isotopic ratios obtained (below 0,71), corroborated by the isotope ratio of rainwater (0,705316), suggesting mixing between aquifers studied. As the scatter plots of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -STD is possible to see the type of process that controls the aquifer (in the Barreiras case shows the weathering of the silicate, while in Pirabas shows the dissolution of the calcite). The results of discriminant analysis using isotopic and hydrogeochemical parameters

($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Cl^- - SO_4^{2-} - K^+ - Mg^{2+}) suggest an excellent breakdown of Barreiras and Pirabas samples during the rainy season, as well as analyzes using PCA ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SO_4^{2-} - K^+) indicate mixtures between the aquifer systems in the rainy season. The combined results of isotopic and hydrogeochemical parameters in dry and rainy season based on the Sr isotopic signature, multivariate statistics, Schöller diagram and correlation analyzes suggest mixing processes, especially in the rainy season between Barreiras and Pirabas aquifers, corroborating structural studies. They indicate the mobility of water in these aquifers mix, mainly by neotectonic features existing in the metropolitan region of Belém.

Keywords: Hydrology. Sr Isotopes. Hydrogeochemistry. Barreiras Aquifer. Pirabas Aquifer. Pará.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Mapa de localização e de amostragem da área de trabalho (Belém – Distrito de Icoaraci, Ananindeua e Capanema), mostrando os pontos de *backgrounds*. 4

CAPÍTULO 3

- Figura 2 Estruturas paleogenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Sequência Pirabas-Barreiras. Falhas transcorrentes dextrais NE-SW seccionam as falhas normais. 10
- Figura 3 Surgimento de várias estruturas romboédricas transtensivas controladas por falhas transcorrentes dextrais E-W, normais NW-SE reativadas, transcorrentes dextrais NE-SW e falhas normais N-S..... 11
- Figura 4 Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências..... 12
- Figura 5 Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais..... 13

CAPÍTULO 5

- Figura 6 Poço Pirabas, referente à amostra BP-01, no residencial Raimundo Jinkings... 20
- Figura 7 Reservatórios comuns a todos os pontos de amostragem em poços profundos. 21
- Figura 8 Local de Amostragem de Poço Barreiras, observar a boa construção do mesmo, assim impedindo o input de contaminantes..... 22

CAPÍTULO 6

- Figura 1 Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais..... 30
- Figura 2 Mapa de localização e pontos de amostragem das sub-áreas de estudo..... 30
- Figura 3 Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso... 32
- Figura 4 Diagramas de Composição de Schöller período: A) seco B) chuvoso..... 32
- Figura 5 Modelamento geoquímico a partir do Diagrama de Schöller..... 33

CAPÍTULO 7

- Figura 1 Aspectos Geométricos Tridimensionais do Sistema Aquífero do Município de Belém..... 42
- Figura 2 Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências..... 43
- Figura 3 Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais..... 44
- Figura 4 Mapa de localização e de amostragem da área de trabalho (Belém – Distrito de Icoaraci, e Ananindeua), mostrando os pontos de *backgrounds* Benevides e Capanema..... 45
- Figura 5 Poço Pirabas, referente à amostra PB-01..... 46
- Figura 6 Local de Amostragem de Poço Barreiras, observar a boa construção do mesmo, assim impedindo o input de contaminantes..... 47
- Figura 7 Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso... 51
- Figura 8 Diagramas de Composição de Schöller período: A) seco e B) chuvoso..... 54
- Figura 9 Modelamento geoquímico a partir do Diagrama de Schöller..... 56

Figura 10	Diagramas de dispersão STD x $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ períodos: a) seco e b) chuvoso.....	60
Figura 11	Análise de Discriminante nos dois principais períodos climáticos da região....	61
Figura 12	Diagramas PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ períodos: a) seco e b) chuvoso.....	62
Figura 13	Diagramas PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+$ períodos: a) seco e b) chuvoso.....	63

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.....	6
Tabela 2	Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.....	7

CAPÍTULO 4

Tabela 3	Razões Isotópicas de Sr em diversos ambientes e na água	18
----------	---	----

CAPÍTULO 6

Tabela 1	Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.....	29
Tabela 2	Composição química das águas dos Aquíferos Barreiras e Pirabas, e backgrounds em Capanema e Benevides.....	31
Tabela 3	Matriz de Correlação ($p < 0,05$) dos principais parâmetros hidrogeoquímicos dos aquíferos Barreiras e Pirabas, períodos A) Seco e B) chuvoso.....	32

CAPÍTULO 7

Tabela 1	Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.....	41
Tabela 2	Composição química das águas dos Aquíferos Barreiras e Pirabas, e backgrounds em Capanema e Benevides.....	50
Tabela 3	Matriz de Correlação ($p < 0,05$) dos principais parâmetros hidrogeoquímicos dos aquíferos Barreiras e Pirabas.....	53
Tabela 4	Razões Isotópicas de Sr em diversos ambientes.....	57
Tabela 5	Razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dos aquíferos Barreiras e Pirabas nos períodos sazonais.....	59

LISTA DE ABREVIACÕES

RMB – Região Metropolitana de Belém

SAAEB – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém

COSANPA – Companhia de Saneamento do Pará

TIMS – Espectrômetro de Massa de Termo Ionização

ICP-MS – Espectrometro de Massa com fonte de Plasma Acoplado Indutivamente

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIACÕES	xiv
CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	4
2.1 ÁREAS DE ESTUDO: MUNICÍPIOS DE BELÉM (DISTRITO DE ICOARACI), ANANINDEUA, BENEVIDES E CAPANEMA	4
2.1.1 Localização	4
2.1.2 Características Ambientais	5
CAPÍTULO 3	6
3.1 GEOLOGIA DAS SUB-ÁREAS	6
3.2 NEOTÊCTONICA DO NORDESTE PARAENSE E DE BELÉM	9
3.3 HIDROGEOLOGIA	13
3.3.1 Sistema Pós-Barreiras	14
3.3.2 Sistema Barreiras	14
3.3.3 Sistema Pirabas	14
3.4 PROBLEMÁTICA	15
CAPÍTULO 4	16
4.1 OBJETIVOS	16
4.1.1 Geral	16
4.1.2 Específicos	16
4.2 GEOLOGIA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO E SUA IMPORTÂNCIA NA IDENTIFICAÇÃO DE MISTURAS EM ÁGUAS	16
CAPÍTULO 5	20
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS	20
5.1.1 Poços Pirabas	20
5.1.2 Poços Barreiras	21
5.2 ANÁLISES ISOTÓPICAS DE SR	22
5.2.1 Procedimentos de Campo	22
5.2.2 Procedimentos Laboratoriais para Sr	22
5.3 ANÁLISES QUÍMICAS	23
5.3.1 Procedimentos de Campo	23
5.3.2 Procedimentos Laboratoriais	23
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	24

CAPÍTULO 6	26
6.1 MISTURA DE ÁGUAS ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ, COM BASE EM DADOS HIDROGEOQUÍMICOS	26
CAPÍTULO 7	36
7.1 ASSINATURA ISOTÓPICA DE Sr E HIDROQUÍMICA DOS SISTEMAS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ: UM CASO DE MISTURA DE AGUAS SUBTERRANEAS	36
CAPÍTULO 8	68
8.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	70
ANEXOS	74
ANEXO A - CICLO HIDROLÓGICO COMPLETO PARA CADA PARÂMETRO	75

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A água é fundamental para os seres vivos, tão importante que nela surgiram às primeiras formas de vida, a evolução dos seres vivos sempre foi dependente da água. De fato, há grande quantidade de água distribuída no planeta, porém menos de 3% da água do mundo é doce, restando menos de 1% para o consumo (Matta 2002).

Os recursos hídricos são explorados em demanda crescente para diversas finalidades, muitas vezes fruto do crescimento desordenado, soma-se a isso, falta de políticas públicas que busquem menor impacto na qualidade das águas (Matta 2002).

Dentro desse contexto inserem-se várias capitais e distritos brasileiros, tal qual a Região Metropolitana de Belém (RMB), com uma população próxima a 2.000.000 de habitantes e diversos problemas, quer seja a distribuição de moradias como as condições sanitárias da região. Matta (2002), Cabral (2004), Costa (2004) e Paranhos (2010) destacaram os riscos de contaminação de aquíferos devido à ocupação desordenada, bem como características geológicas peculiares na RMB (consideram-se os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Benevides).

Dentre as características geológicas peculiares, Costa (2004) e Palheta (2008) enfatizaram a influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos dos dois principais sistemas de águas subterrâneas na RMB (Sistema Barreiras e Pirabas). A coerente importância desses arranjos quanto à recarga, na qual o tratamento integrado das informações levantadas permitiu estabelecer a direção de estiramento da Bacia Pirabas - Barreiras como NW-SE, e conseqüentemente a das falhas normais NE-SW que se instalaram. Sendo as falhas normais, as superfícies potenciais de menor pressão, constituíram-se num dos locais de maior favorabilidade para a recarga dos aquíferos por elas interceptados. Daí decorre uma grande preocupação no que diz respeito à possibilidade de contaminação desses aquíferos por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, haja vista muitas delas estarem completamente oneradas pela ocupação humana sejam pela urbanização ou por atividade agrícola.

Estudos em águas já realizados demonstram a vulnerabilidade de aquíferos mais profundos por processos neotectônicos citados, sugerindo misturas entre os aquíferos Barreiras e Pirabas, dentre os quais, destaca-se o trabalho de Paranhos (2010) utilizando a hidroquímica no sistema aquífero Pirabas em Icoaraci, sugerindo possível mistura entre os aquíferos.

Concomitante a hidrogeoquímica, o estudo a partir de isótopos vem se desenvolvendo de forma crescente devido à modernização e aumento da precisão de equipamentos para essa finalidade como o TIMS (Espectrômetro de Massa de Termo Ionização) e ICP-MS (Espectrometro de Massa com fonte de Plasma Acoplado Indutivamente), possibilitando aplicação de diversos elementos químicos, tais como U, Pb, Sr, Nd para análise da composição isotópica e geocronologia.

O elemento estrôncio (Sr) possui grande aplicabilidade em estudos de águas através da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, como em intrusão de água do mar e origem de águas (Jorgensen *et al.* 2008). A composição isotópica do Sr nas águas são peculiares em cada ambiente, isto é, ambientes diferentes como o caso da formação siliciclástica correspondente a formação Barreiras, apresentará composição isotópica de Sr nas águas diferenciada de um ambiente siliciclástico e carbonático representado pela formação Pirabas.

O estudo isotópico nos Estados da região norte é relativamente recente, sendo que os estudos utilizando a geoquímica isotópica e a hidrogeoquímica são bastante escassos (Allégre *et al.* 1996, Bordalo *et al.* 2007, Queiroz *et al.* 2009).

A área de estudo compreende quatro sub-áreas: 1º – No distrito de Icoaraci em Belém onde foram amostrados 3 poços da SAAEB (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém), com poços de profundidade média de 150 a 270 metros, correspondentes ao sistema aquífero Pirabas, bem como 3 poços rasos, referentes ao sistema aquífero Barreiras; 2º – No município de Ananindeua, 3 poços profundos da COSANPA (Companhia de Saneamento do Pará), com poços de profundidade média similar aos poços da SAAEB (Aquífero Pirabas), mais 3 poços rasos nessa região, 3º – No município de Capanema, 2 poços rasos (15 a 40 metros), local de reconhecida recarga para o sistema aquífero Pirabas, 4º – No município de Benevides, em 1 poço raso de (25 metros), local de reconhecida recarga do aquífero Barreiras.

Dessa forma, foram realizados estudos da composição isotópica de estrôncio, bem como análises hidrogeoquímicas nas quatro sub-áreas citadas visando a caracterização dessas águas e eventuais misturas que nelas ocorram (Sub-áreas de Icoaraci e Ananindeua).

Este documento foi elaborado seguindo o modelo de dissertação com integração de artigos. Desta forma, o corpo central da tese apresenta dois artigos científicos submetidos a periódicos nacionais, apresentados neste documento na forma de capítulos (capítulos 6 e 7). Os capítulos com os artigos são precedidos por um texto integrador, o corpo de texto da dissertação, que inclui a apresentação da pesquisa, localização da área de estudo, contexto geológico e neotectônico, a geologia isotópica do estrôncio, bem como a apresentação da problemática, os objetivos traçados e materiais e métodos usados para alcançar os objetivos.

O capítulo final (capítulo 8), sumariza de forma integrada as discussões e as conclusões alcançadas nos dois artigos científicos e no desenvolvimento da dissertação como um todo.

Os artigos serão apresentados de acordo com a seguinte ordem:

Capítulo 6 - Artigo “**Mistura de águas entre os Aquíferos Barreiras e Pirabas em Ananindeua e Belém, Pará, com base em dados hidrogeoquímicos**”. Submetido para publicação à *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Este artigo apresenta dados inéditos sobre a hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas em Ananindeua e Belém com backgrounds em Benevides e Capanema, Pará. Os dados apresentados permitiram definir com base na hidrogeoquímica misturas entre os dois aquíferos.

Capítulo 7 – Artigo “**Assinatura Isotópica de Estrôncio (Sr) e Hidroquímica dos sistemas Barreiras e Pirabas em Ananindeua e Belém, Pará: Um caso de mistura de águas subterrâneas**”. Submetido para publicação à *Revista Águas Subterrâneas*. Este artigo aborda os aspectos da assinatura isotópica de Sr e hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas em Ananindeua e Belém com backgrounds em Benevides e Capanema, Pará. Os dados apresentados permitiram indicar a mistura das águas dos aquíferos estudados.

CAPÍTULO 2

2.1 ÁREAS DE ESTUDO: MUNICÍPIO DE BELÉM (DISTRITO DE ICOARACI), ANANINDEUA, BENEVIDES E CAPANEMA

2.1.1 Localização

Pode-se dividir em 4 (quatro) sub-áreas de estudo, a primeira é o distrito de Icoaraci, inserido na Região Metropolitana de Belém, Estado do Pará (Figura 1). Esse distrito conta com uma população de quase 300.000 habitantes e é abastecido pelos sistemas isolados de captação subterrânea operacionalizados pelo SAAEB.

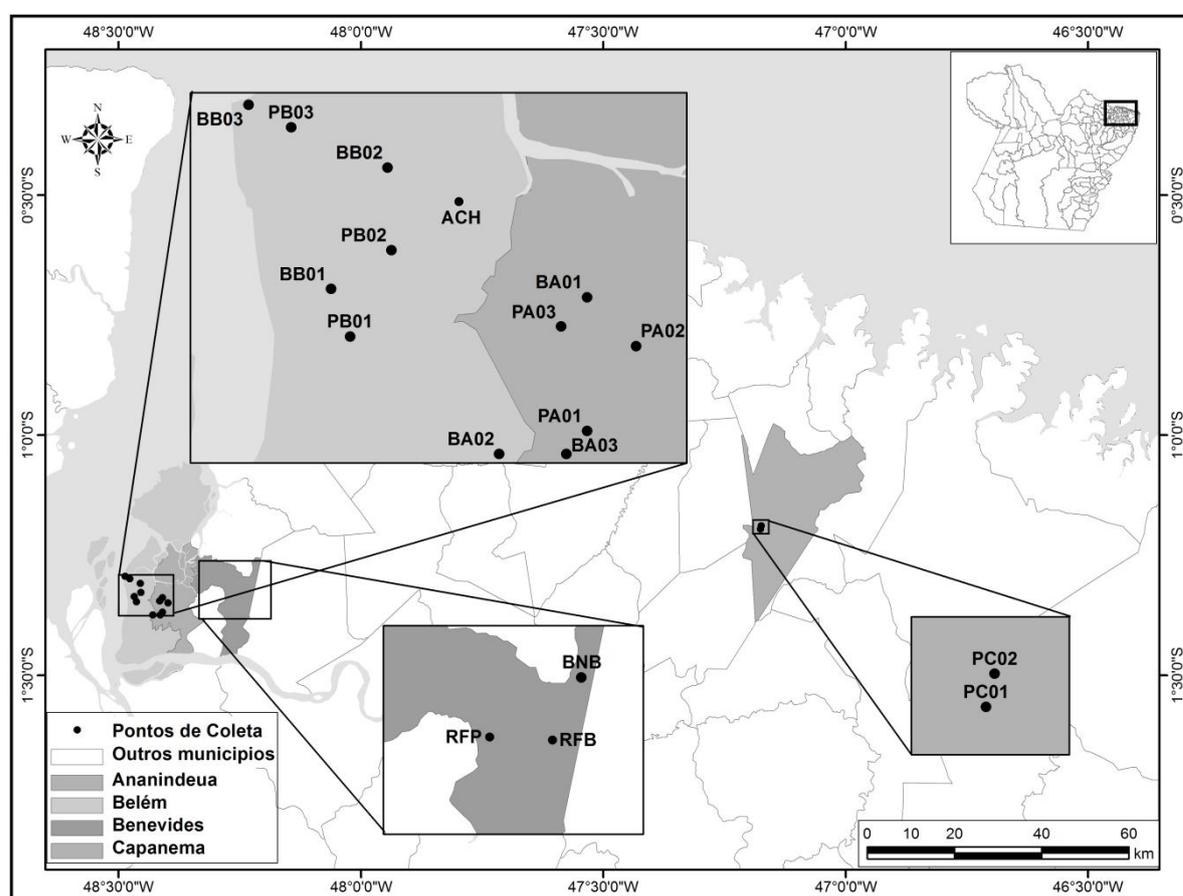


Figura 1 – Mapa de localização e de amostragem da área de trabalho (Belém – Distrito de Icoaraci, Ananindeua e Capanema), mostrando os pontos de *backgrounds*. Nomenclatura: PC (Aqüífero Pirabas - Poços Capanema) / BNB (Aqüífero Barreiras - Poço Benevides) / BB (Aqüífero Barreiras - Poços Belém) / BA (Aqüífero Barreiras - Poços Ananindeua) / PB (Aqüífero Pirabas - Poços Belém) / PA (Aqüífero Pirabas - Poços Ananindeua) / RFB (Rocha Formação Barreiras / RFP (Rocha Formação Pirabas) / ACH (Água da Chuva).

Fonte: (IBGE 2000).

O município de Ananindeua compreende uma área de 176 km² aproximadamente. Situa-se entre as coordenadas geográficas 01°13' e 01°27' de latitudes sul e 48°19' e 48°26' de

longitudes oeste de Greenwich. A sede municipal dista cerca de 19 km, em linha reta, do Forte do Castelo, ponto mais alto da cidade de Belém. O Município de Ananindeua limita-se ao sul com o rio Guamá, a norte com Mosqueiro, a oeste com o sítio urbano de Belém e a leste com o Município de Marituba, seu abastecimento dá-se por poços profundos da COSANPA. Outra sub-área de relevância ao trabalho é o município de Benevides localizado na RMB, suas coordenadas geográficas estão em 01°21'41" de latitudes sul e 48°14'41" de longitude oeste de Greenwich.

A quarta sub-área de estudo é o Município de Capanema que se situa a 150 Km da capital do Estado do Pará, às margens da rodovia federal BR-316, à altura das coordenadas 01°12'00" S e 47°10'30" W (Figura 1).

2.1.2 Características Ambientais

A região nordeste do Pará situa-se no domínio de clima equatorial úmido, tipo Af, segundo a classificação de Köppen (SUDAM 1984).

As características climáticas médias anuais apresentam os seguintes valores (DNMET 1992): Temperatura média: 25,9° C; Precipitação pluviométrica total: 2893,1 mm; Evaporação Total: 771,6 mm; Umidade Relativa do ar: 84,0 %; Insolação total: 2.219,8h.

A vegetação original foi de Floresta Tropical Úmida Perenefolia, com grande heterogeneidade na composição das espécies florestais. Os principais tipos incluem Vegetação de Floresta Densa, associada aos terrenos mais elevados e Vegetação de Várzea, de áreas baixas ou inundáveis. Devido à ação antrópica, a floresta primitiva foi progressivamente alterada na sua cobertura original, sendo a maior parte desflorestada devido à urbanização. Ocorrem ainda Florestas Secundárias, Áreas de Campos e Áreas de Capoeiras, onde originalmente assentava-se a floresta original. As sub-áreas de estudo são ocupadas atualmente por vegetação gramínea.

Quanto à sua pedologia, apresenta latossolos amarelos, de textura variada e concrecionário laterítico; latossolos amarelos de textura média. Solos hidromórficos gleizados de textura variada; e podzol hidromórfico.

CAPÍTULO 3

3.1 GEOLOGIA DAS SUB-ÁREAS

A região nordeste do Pará apresenta uma cobertura sedimentar sobrejacendo a um embasamento cristalino, o qual apresenta rochas de variados graus de metamorfismo, como gnaisses, quartzitos, xistos e filitos.

Abaixo se segue a integralização de dados proposto por Sauma Filho (1996), no qual a seqüência sedimentar do Terciário compreende o Grupo Barreiras de origem essencialmente continental e a Formação Pirabas, de origem marinha (Tabela 1).

Tabela 1 - Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	SEDIMENTOS MODERNOS	Sedimentos recentes quartzosos com matéria orgânica; argila, silte e areia.
		PLEISTOCENO	PÓS-BARREIRAS	Sedimentos areno-argilosos inconsolidados, quartzosos, siltico-argilosos com arenitos ferruginosos intercalados.
	TERCIÁRIO	MIOCENO-PLIOCENO	FORMAÇÃO BARREIRAS	Arenitos de granulometria variada, mal selecionados, argilosos, intercalados a siltitos e argilosos de cores variadas, tendo-se ainda níveis de concreções ferruginosas.
		OLIGO-MIOCENO	FORMAÇÃO PIRABAS	Calcários e margas, intercalados com folhelhos cinza-esverdeados e arenitos calcíferos.

Fonte: (Sauma Filho 1996).

As unidades geológicas da região Metropolitana de Belém são representadas pelos sedimentos modernos, pós-barreiras, barreiras e pirabas. Segundo Costa *et al.* (1996) a deposição destas unidades foi particularmente controlada pela formação e reativação de falhas

normais e transcorrentes. Rossetti (2001) aborda que também houve contribuição a partir de mudanças climáticas que geraram flutuações do nível relativo do mar.

Outras proposições da litoestratigrafia na região Bragantina são abordadas, e considerando basicamente estudos sedimentológicos e paleontológicos, Rossetti (2001) integralizou informações sobre as diversas formações e propôs uma divisão seqüenciada para a região nordeste do Pará, no qual engloba todas as sub-áreas de estudo e regiões de background (Tabela 2).

Tabela 2 - Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará.

ÉPOCA		UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQUÊNCIA DEPOSICIONAL	
PLIOCENO-QUATERNÁRIO		PÓS-BARREIRAS	C	
		MIOCENO		SUPERIOR
MÉDIO	FORMAÇÃO BARREIRAS SUPERIOR-MÉDIO			B
				DS 2
INFERIOR	Formação Barreiras Inferior			A
OLIGOCENO SUPERIOR		Formação Pirabas		
		PALEOSSOLO BAUXÍTICO-LATERÍTICO	DS 1	

Fonte: (Rossetti 2001).

Seqüência A: Compreende a Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras. Esta seqüência representa a passagem gradual lateral e ascendente dos depósitos Pirabas para os sedimentos do Barreiras. As fases finais da sedimentação Pirabas e o início da deposição Barreiras são considerados de idade contemporânea (Costa *et al.* 1993, Góes *et al.* 1990, Rossetti 2001, Palheta 2008);

Seqüência B: corresponde a parte intermediária e superior da Formação Barreiras;

Seqüência C: representa os sedimentos pós-barreiras.

Os depósitos areno-argilosos de coloração amarelada, mais antigos, de idade Pleistocênica têm sido referidos como Pós-Barreiras (Silva & Lowenstein 1988). São sedimentos areno-argilosos (Sá 1969), geralmente maciços, entretanto podem ser observadas estruturas de deposição de dunas eólicas (Costa *et al.* 1993), apresentando espessuras variadas. Costa & Horbe (1995) afirmam que esta formação origina-se do desmantelamento e formação *in situ* da unidade Barreiras.

Separaram-se da Formação Barreiras por meio de discordância erosiva marcado por horizonte laterítico imaturo (Costa 1991, Rossetti 2001).

Segundo Matta (2002) esta unidade cobre cerca de 60 a 70% da área estudada e é representada predominantemente por sedimentos inconsolidados, sobretudo arenosos, que variam de creme-amarelados, amarelos e totalmente brancos, com alguma fração de argila, granulometria variando de fina a média e sem estrutura sedimentar aparente, aparecendo seixos milimétricos de quartzo leitoso, dispostos caoticamente, além de concreções ferruginosas.

O Grupo Barreiras é constituído por argilas, siltes, areias, cascalhos, arenitos, siltitos, conglomerados, níveis de concreções ferruginosas, arenito ferruginoso. Encontra-se distribuído amplamente no litoral norte do Brasil. Costa *et al.* (1993), Góes & Truckenbrodt (1980), Rossetti *et al.* (1989), Palheta (2008) definem a formação como depósitos siliciclásticos constituídos por uma variedade de rochas onde se destacam arenitos maciços e estratificados, argilitos laminados e maciços, pelitos e conglomerados.

Rossetti *et al.* (1989) caracterizaram várias litofáceis: argilosa com laminação plano-paralela, argilosa maciça; arenosa sem estruturação aparente; arenosa com estratificação cruzada acanalada; arenosa com ondulâncias cavalgantes ascendentes; arenosa grossa e conglomeráticas; conglomeráticas; conglomerática com seixos de argilas; blocos de arenitos ferruginoso, apresentando de forma intermitente seixos de quartzos. São ambientes que sugerem deposição atribuída a ambientes transicionais do tipo estuarino, a partir de análise faciológicas e polinomórficas, sendo que a deposição de sua parte inferior pode ter ocorrido a partir do Mioceno (Arai *et al.* 1988, Arai *et al.* 1994, Rossetti *et al.* 1989, Rossetti *et al.* 1990, Rossetti 2001).

Sotoposta ao Grupo Barreiras encontra-se a Formação Pirabas, esta aflora no nordeste do Pará, de forma destacada nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas. É constituída por calcários, areias, argilas, margas, arenitos, siltitos, argilitos, depositados em

ambiente marinho, durante o Mioceno, ricamente fossilífera (Oliveira *et al.* 2001, Matta 2002, Paranhos 2010).

Segundo Góes *et al.* (1990), a formação Pirabas possui sete litofácies: biocalcirudito, biocalcarenito não estratificado, biocalcarenito, estratificado, marga, folhelho verde, biohermito e calcilitito.

Estudos, principalmente paleoambientais apontam um ambiente deposicional nerítico raso, de águas límpidas agitadas, de proximidades litorâneas de mar aberto, de costa baixa, e clima quente (Ferreira & Cunha 1957, Góes *et al.* 1990, Costa *et al.* 1993).

3.2 NEOTÊCTONICA DO NORDESTE PARAENSE E DE BELÉM

Até a década de 70 acreditava-se que a região nordeste do Pará, assim como outras áreas de idade cenozóica no Brasil, fosse estável, sem indícios de tectonismo recente (Palheta 2008). Entretanto, investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições e estruturas tectônicas que caracterizaram uma nova perspectiva quanto ao processo neotectônico do nordeste do Pará (Costa 2004, Palheta 2008, Abreu 2012). Foram realizados estudos no qual estabeleceram relações de neotectonismo com diversas áreas da Amazônia (Borges *et al.* 1995, Costa *et al.* 1991, Costa 1996, Costa *et al.* 1996, Costa 2004, Palheta 2008).

Duas grandes movimentações neotectônicas caracterizaram a região nordeste do Pará (Bemerguy *et al.* 1995), considerando os intervalos:

a) Mioceno – Plioceno

As manifestações neotectônicas, na região nordeste do Pará, em geral, são caracterizadas pelo desenvolvimento de estruturas transtensivas (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

As falhas transtensivas ocorrem nas regiões da ilha de Marajó, Belém, Ipixuna do Pará e zonas litorâneas. Segundo Palheta (2008) compreendem falhas mestras normais, lítricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE, as quais estruturam a bacia na qual foram depositados os sedimentos da seqüência Pirabas-Barreiras.

Segundo Costa *et al.* (1996) e Palheta (2008), a evolução tectonossedimentar dessa bacia de afastamento é relacionada a duas fases (Figura 2).

- 1) Avanço do mar Pirabas controlado pelas falhas normais (NW-SE) e conseqüentemente a sedimentação dos carbonatos da Formação Pirabas.

- 2) Movimentações sucessivas ao longo das falhas normais, que geraram a deposição da seqüência siliciclástica da Formação Barreiras. As falhas transcorrentes dextrais NE-SW, que também atuaram durante a evolução da bacia, podem ser responsáveis pelo controle da distribuição das seqüências sedimentares na direção NW-SE.

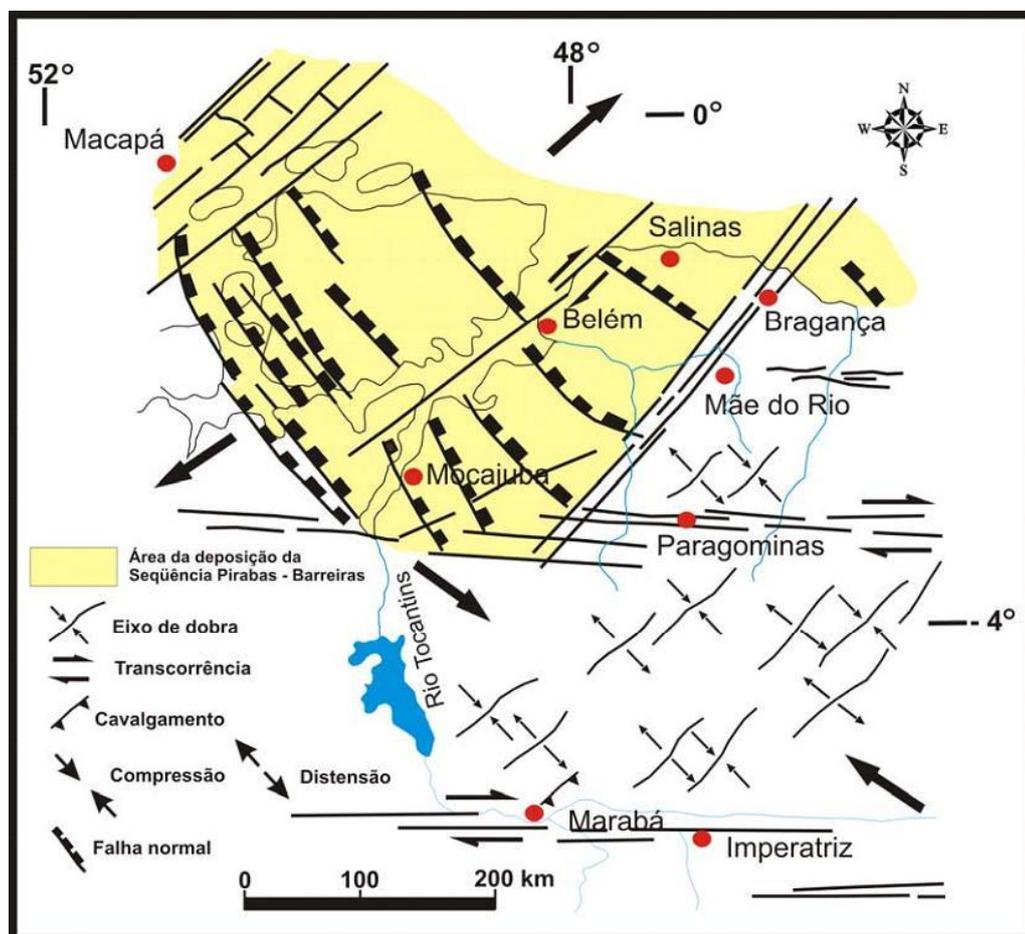


Figura 2 – Estruturas paleogenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Seqüência Pirabas-Barreiras. Falhas transcorrentes dextrais NE-SW seccionam as falhas normais.

Fonte: (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

b) Pleistoceno – Holoceno

Durante essa Época, ocorreu o surgimento no nordeste paraense de diversas estruturas romboédricas transtensivas, de dimensões variadas, assimétricas e simétricas, representadas por falhas transcorrentes dextrais E-W que se interligam por meio de falhas normais NW-SE, NNW-SSE e N-S, definindo bacias de afastamento (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

Segundo Palheta (2008) a movimentação das falhas normais provocou a distribuição, em faixas alternadas, das formações Ipixuna e Barreiras. Expôs isolada a Formação Pirabas em meio a Formação Barreiras; promoveu o basculamento da Ilha de Marajó; possibilitou a

deposição da seqüência Pós-Barreiras; gerou formação de arcos, de cotovelos, de segmentos retos, de capturas e de segmentos meandранtes na rede de drenagem (Figura 3).

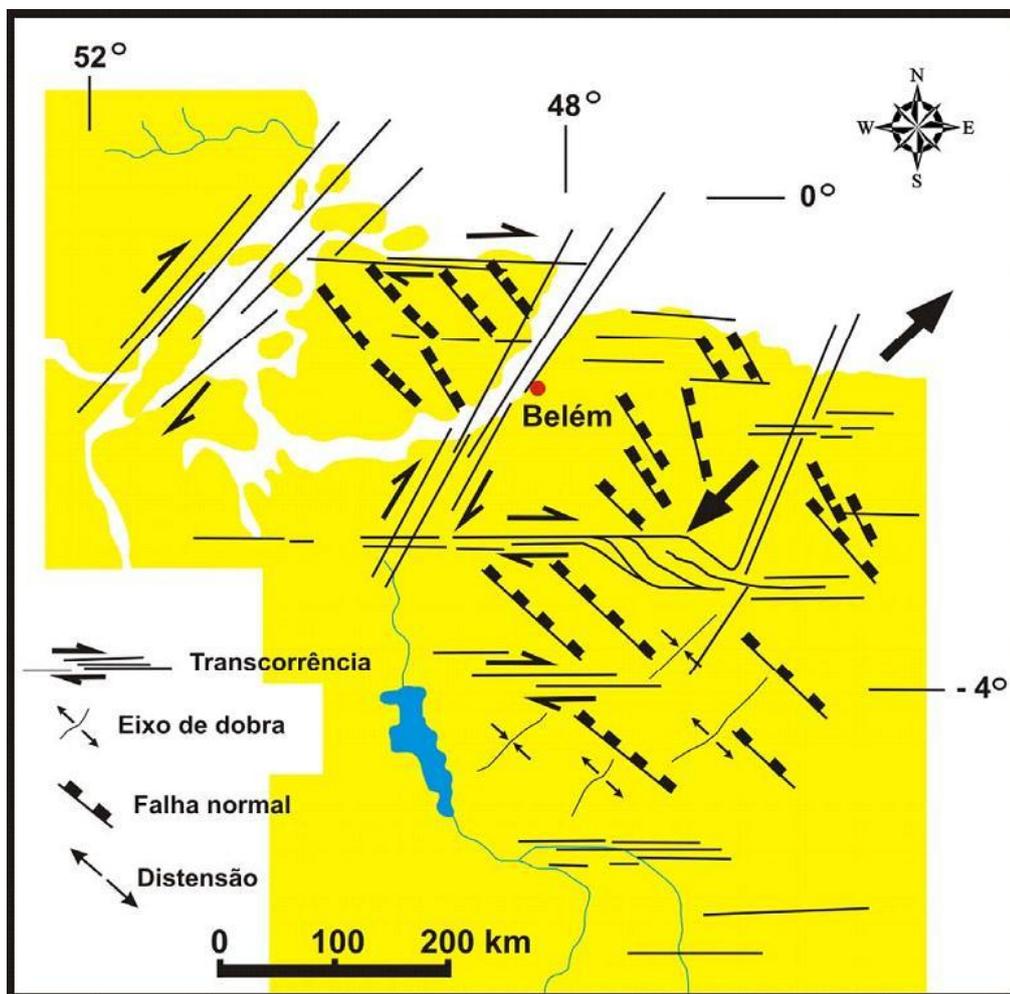


Figura 3 – Surgimento de várias estruturas romboédricas transtensivas controladas por falhas transcorrentes dextrais E-W, normais NW-SE reativadas, transcorrentes dextrais NE-SW e falhas normais N-S. Fonte: (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

Segundo Igreja *et al* (1990), a região de Belém é definida por duas direções principais de feixes de falhas:

A) Zonas normais NE-SW

Segundo Palheta (2008) são falhas normais N50°-60°E com mergulhos fortes para NW. São caracterizadas por rotações nas camadas sedimentares impostas nas estruturas primárias e nos níveis lateríticos da Formação Barreiras, com inclinações de até 30° em direção ao continente, no sentido SE.

B) Zonas Transferente NW-SE

Palheta (2008) afirma que são falhas transcorrentes dispostas nas direções N45°-55°W com mergulhos subverticais que recortam litotipos, principalmente argilosos. Estas falhas são

definidas por estruturas hidroplásticas como cataclasitos foliados descontínuos, porções elipsoidais menos deformadas posicionadas ao longo das zonas transcorrentes, e fragmentados de argilitos gerados por interseção de falhas.

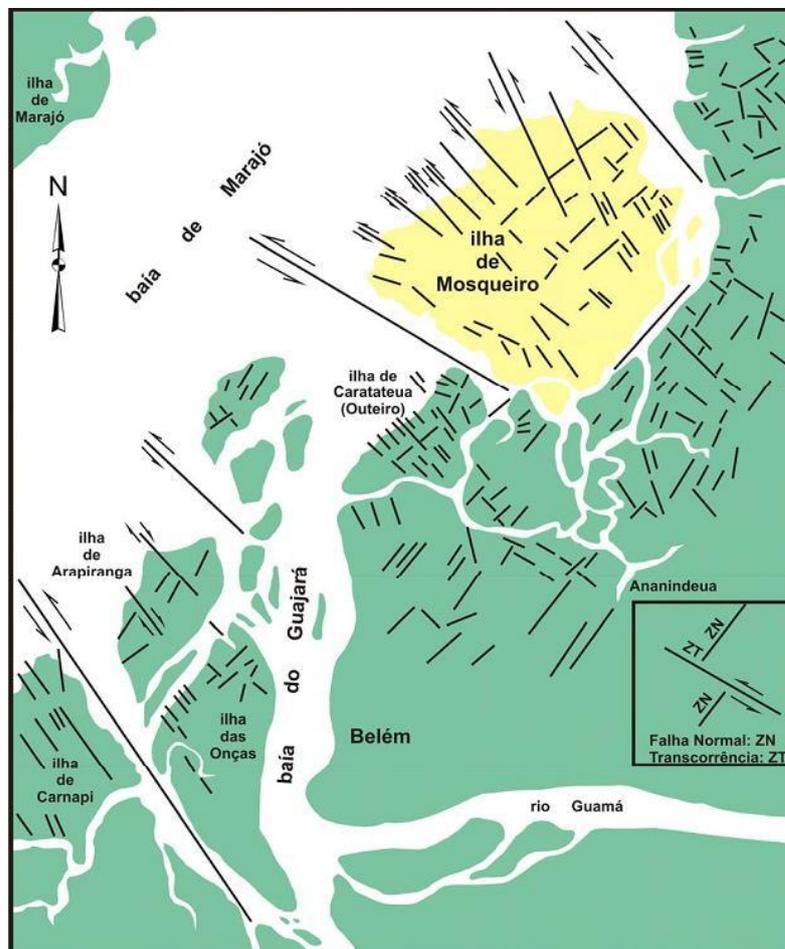


Figura 4 – Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências.
Fonte: (Igreja *et al.* 1990, Palheta 2008).

Considerando o estudo de Igreja *et al.* (1990), as falhas normais (NE-SW) permitiram regionalmente posicionar a direção NW-SE como a de maior estiramento. De posse dessa informação, Igreja *et al.* (1990) elaboraram um modelo esquemático do arranjo neotectônico da região de Belém e adjacências, conforme Figura 4.

A partir do estudo de Costa (2004), o qual se baseia na análise de drenagem da região metropolitana de Belém e a geometria dos aquíferos a partir de falhas normais, pode-se evidenciar a influência da neotectônica devido à similaridade de arranjo conforme Figura 5. Segundo Pinheiro (2009), a correlação de poços situados em um mesmo bloco individual demonstrou que as camadas geológicas que ocorrem em cada um deles têm atitudes distintas, certamente influenciadas pela atuação de processos neotectônicos.

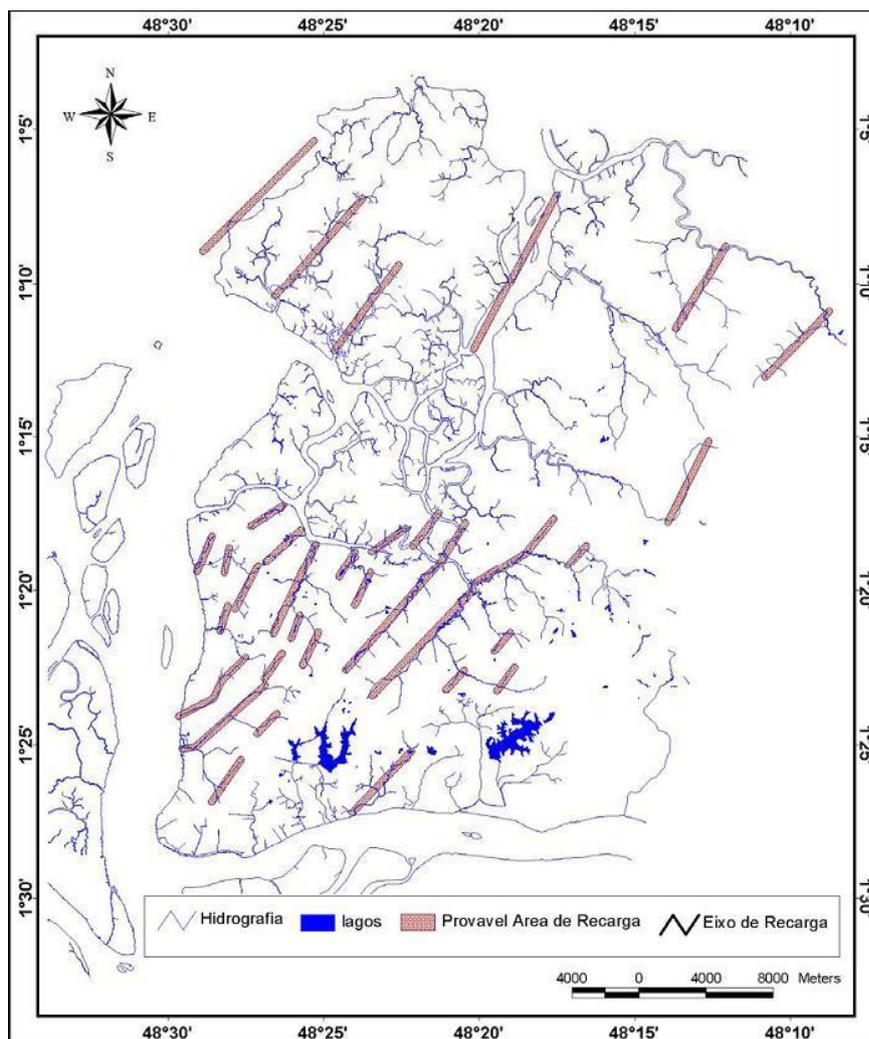


Figura 5 – Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais.

Fonte: (Costa 2004).

Por serem as falhas normais superfícies potenciais de menor tensão, elas se constituem um dos locais mais favoráveis para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas, pois as falhas e fraturas abertas são condutos dos sistemas hidrogeológicos.

Abreu (2012) aponta através de estudo morfoestrutural realizado em Castanhal-PA que as falhas estruturais no nordeste do Pará configuram importantes condutos para a recarga dos sistemas hidrogeológicos.

3.3 HIDROGEOLOGIA

Os principais sistemas hidrogeológicos no nordeste Paraense, de forma geral são conhecidos como sistema hidrogeológico Pós-Barreiras, sistema hidrogeológico Barreiras e o sistema hidrogeológico Pirabas, localizados em rochas das formações homônimas (Carvalho 2001, Matta 2002, Cabral 2004, Paranhos 2010).

3.3.1 Sistema Pós-Barreiras

É formado por camadas de rochas argilo-arenosas, inconsolidadas, que ocorrem até os primeiros 25 metros de profundidade. Esses aquíferos apresentam um fraco potencial hidrogeológico (Oliveira *et al.* 2001, Matta 2002, Paranhos 2010). Apresentam caráter livre a semiconfinado, mostrando grande vulnerabilidade atestada por altos índices de nitrato e amônia (Matta 2002, Cabral 2004).

3.3.2 Sistema Barreiras

Aparece em profundidades de 25 a 90 metros, com camadas aquíferas em torno de 70 metros de profundidade, de natureza livre a confinada, neste caso pela presença de camadas argilosas sucessivamente intercaladas com areias, com vazões entre 10 e 70 m³/h. Possui certo grau de vulnerabilidade, e um dos principais problemas é o teor excessivo de ferro (acima de 0,3 mg/L), fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde nº 2.914/2011 (Matta 2002, Cabral 2004).

3.3.3 Sistema Pirabas

Definida como uma unidade composta pelos sedimentos marinhos, fossilíferos da Formação Pirabas (Matta 2002). Os níveis desse aquífero ocorrem em intervalos de 70 até 259 metros de profundidade (Oliveira *et al.* 2001). São subdivididos em Pirabas Superior e Inferior, com vazões de até 600 m³/h, além do qual são aquíferos de notável qualidade, com pH próximo à neutralidade, classificadas como cálcico-magnesianas-bicarbonatadas (Carvalho 2001).

Do ponto de vista da qualidade das águas, apresentam água de boa qualidade, não havendo restrição para o consumo humano. O conteúdo de sólidos totais dissolvidos oscila entre 242 e 383 mg/L, a dureza total (em CaCO₃) varia entre 110 a 235 mg/L, com uma média de 165 mg/L CaCO₃ (Paranhos 2010), segundo a classificação de Boyd (1990), são águas moderadamente dura a dura. O manganês e o ferro, dependendo da área onde o poço foi construído mostram concentrações baixas (Paranhos 2010).

3.4 PROBLEMÁTICA

Segundo Costa (2004), a RMB possui arranjos geométricos dos aquíferos sob grande influência da neotectônica regional, assim, supõe-se em termos geológicos um terreno bastante fraturado. O trabalho de Paranhos (2010), o qual envolve a hidroquímica aponta possível conexão hidráulica entre o sistema Barreiras e o Pirabas.

Juntamente aos trabalhos citados cresce a quantidade de estudos na área geoquímica isotópica como o de Bordalo *et al.* (2007) e Queiroz *et al.* (2009), que demonstram o potencial do Sr (Estrôncio) para análises em misturas, com enfoque maior em intrusão de água do mar (Jorgensen *et al.* 2008). A assinatura isotópica em diferentes ambientes formados, tal qual são os ambientes do sistema aquífero Barreiras (sedimentos continentais) e Pirabas (sedimentos marinhos), apresentam diferenças de composição isotópica, e assim, revelando padrões diferentes, e, caso ocorra misturas, padrões mais homogêneos entre si. Soma-se a essa questão o advento de equipamentos mais sofisticados, como o ICP-MS, e assim, abrem-se as possibilidades para o uso da referida ferramenta.

Os trabalhos realizados até o momento quanto à questão de misturas, basearam-se em estudos hidroquímicos, sem um estudo que aponte a assinatura isotópica, o qual seria um parâmetro bastante confiável para estudos do porte, e ainda não foram feitos estudos comparativos com um background confiável para o estudo isotópico da zona de recarga dessa região, sem influência de misturas (a zona de recarga do aquífero Pirabas é na região de Capanema, praticamente, sem a influência do Barreiras e na região de Benevides, para efeito comparativo ao Barreiras Belenense), gerando incertezas sobre a ocorrência ou não de misturas.

Considerando o exposto no parágrafo anterior, esta dissertação busca a análise da geoquímica isotópica (utilizando os isótopos de Sr) e a hidrogeoquímica para identificação de possíveis misturas entre os aquíferos Barreiras e Pirabas.

CAPÍTULO 4

4.1 OBJETIVOS

4.1.1 Geral

O objetivo principal é identificar possíveis misturas entre os sistemas Barreiras e Pirabas, através da geoquímica isotópica (utilizando os isótopos de Sr) e a hidrogeoquímica clássica nas sub-áreas de Icoaraci e Ananindeua, bem como na região de Benevides e Capanema (para fins comparativos da região de recarga do aquífero Pirabas) durante um ciclo hidrológico completo.

4.1.2 Específicos

- Caracterizar hidroquimicamente a região de Icoaraci e Ananindeua;
- Utilizar o potencial dos isótopos de estrôncio para caracterizar misturas de águas;
- Verificar a composição isotópica de Sr (bem como as suas concentrações) com a finalidade de caracterizar os sistemas aquíferos e suas possíveis misturas;
- Do ponto de vista hidrogeoquímico, determinar as proporções das misturas, estabelecer fácies hidrogeoquímicas,
- Permitir a melhor compreensão do mecanismo de interação e a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos nas sub-áreas estudadas;

4.2 GEOLOGIA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO E SUA IMPORTÂNCIA NA IDENTIFICAÇÃO DE MISTURAS EM ÁGUAS

Segundo Faure (1986), o estrôncio (Sr) é um elemento químico membro do grupo dos metais alcalinos terrosos (Grupo II-A), no qual consistem: Berílio, Magnésio, Cálcio, Estrôncio, Bário e Rádio. Seu raio iônico ($1,13\text{Å}$) é próximo ao do cálcio ($0,99\text{Å}$) substituindo o cálcio em minerais como plagioclásio, apatita e carbonato de cálcio, especialmente aragonita.

O Sr está presente em águas naturais em quantidades variáveis. Nos oceanos apresenta uma concentração média de 7,7 mg/L (Faure 1986). Nos rios da Amazônia a concentração de Sr no material em suspensão varia de 40 a 176 mg/L, e em solução situa-se entre 4,3 e 39 $\mu\text{g/L}$ (Allégre *et al.* 1996, Banner 2004). A concentração de Sr em águas subterrâneas varia de

6 a 980 $\mu\text{g/L}$ (Banner *et al.* 1994, Bullen *et al.* 1996), e a concentração relatada em águas pluviais varia de 96 a 874 $\mu\text{g/L}$ (Herut *et al.* 1993).

O estrôncio tem quatro isótopos estáveis que ocorrem naturalmente, ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr e suas abundâncias isotópicas são 0,56%, 9,87%, 7,04% e 82,53%, respectivamente. A abundância (isotópica) dos isótopos de estrôncio são variáveis por causa da formação de ^{87}Sr radiogênico através do decaimento natural do ^{87}Rb , dessa forma, a composição isotópica de estrôncio em rocha ou mineral depende da idade e da quantidade de rubídio presente no meio (Faure 1986). O valor da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dissolvido na água meteórica é aproximadamente 0,7092 (Faure 1986, Jorgensen & Holm 1994, Woods *et al.* 2000, Négrel & Petelet-Giraud 2005). Essa razão é considerada homogênea devido ao longo tempo de residência do Sr nos oceanos, da ordem de 5×10^6 anos, quando comparado com o tempo de mistura das águas oceânicas, de cerca de 10^3 anos (Banner 2004).

A composição isotópica do Sr nas águas naturais é variável e depende da idade e da razão Rb/Sr das rochas que essas águas percolam ou escoam, bem como da solubilidade relativa dos diferentes minerais que podem estar em contato com essas águas (Bordalo *et al.* 2007). A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no material em suspensão dos rios da Amazônia varia entre 0,7132 e 0,7564, enquanto que no material dissolvido esta razão é mais baixa e varia de 0,7087 a 0,7144 (Queiroz *et al.* 2009), em rios no nordeste Chinês a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varia entre 0,7111 a 0,7154 (Xu *et al.* 2009). Allégre *et al.* (1996) explicam que pelo fato do material dissolvido conter uma parte significativa de Sr derivado de águas pluviais, que possuem razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mais baixa. Os valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das águas pluviais situam-se, aproximadamente, entre 0,707 e 0,709. Valores entre 0,7079 e 0,7091 foram obtidos para a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de águas pluviais em Israel (Herut *et al.* 1993), porém valores de 0,7091 a 0,7103 encontrados em águas de chuva em Beijing (China), os quais são maiores do que a razão isotópica da água do mar, sugerem a presença de fontes de estrôncio radiogênico (Xu *et al.* 2009).

Montgomery *et al.* (2006) destacaram valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,7059 provenientes de rochas vulcânicas do Carbonífero em Dunbartonshire na Escócia, enquanto que no aquífero Dalradian de Aberdeenshire apresentou Sr mais radiogênico no valor de 0,7207, atribuindo a diferença de composição isotópica em águas de rochas a partir de rochas mais antigas tendo maior assinatura radiogênica de Sr que aquelas de rochas mais jovens.

Banner *et al.* (1994) explicaram que a variação da razão isotópica de Sr em águas subterrâneas é similar àquela de águas superficiais. A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ é uma mistura da composição isotópica do Sr da água de recarga com a composição isotópica da rocha que a água percola. Nas águas subterrâneas da Austrália Collerson *et al.* (1988) encontraram valores

da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variando entre 0,70446 e 0,71176. Os valores mais baixos foram interpretados como a mistura entre a água de recarga do aquífero australiano com rochas ígneas máficas cenozóicas, que possuem uma assinatura isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ juvenil. A Tabela 3 apresenta algumas razões isotópicas conhecidas.

Tabela 3 – Razões Isotópicas de Sr em diversos ambientes.

Ambientes	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Fonte
Crosta Continental	0,7123	Allegre <i>et al.</i> (1996)
Carbonatos Marininhos Fanerozóicos	0,707 - 0,709	Banner (2004)
Água do Mar Atual	0,7092	Banner (2004)
Chuva em áreas oceânicas	0,7092	Capo <i>et al.</i> (1992)
Chuva em área urbana (Beijing, China)	0,7103	Xu <i>et al.</i> (2009)
Sedimentos em Suspensão do Rio Amazonas	0,7109	Banner (2004)
Sedimentos em Suspensão do Rio Negro	0,71622	Gaillardet <i>et al.</i> (1997)
Sedimentos em Suspensão do Rio Trombetas	0,73229	Gaillardet <i>et al.</i> (1997)
Média das rochas dos Andes	0,70566 - 0,70951	Rollinson (1993)

Segundo Christian *et al.* (2011) na área de Austin, Texas, encontrou-se um forte contraste na composição isotópica Sr entre a água municipal da região e água em bacias com pouco desenvolvimento urbano. O Sr dissolvido em água corrente de oito bacias hidrográficas em Austin tem uma vasta gama de composições de isótopo de Sr, com razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70778 - 0,70918$. Nas bacias mais urbanizadas, o balanço de massa de Sr indica que aproximadamente 90% do fluxo de base são compostas de água de fontes antropogênicas. Isótopos de Sr também podem ser aplicados para identificar limites no grau de urbanização, na qual o fluxo e a qualidade da água são afetadas. Langman & Ellis (2010) demonstram a utilidade da abordagem de isótopos de Sr para resolver a evolução geoquímica das águas subterrâneas em um aquífero que tem uma relação complexa com os aquíferos sotopostos e a aplicabilidade destes isótopos como indicadores da alteração das águas fonte de influências naturais ou antropogênicas

A variação na composição isotópica do Sr tem sido usada para determinar a fonte de Sr de um corpo de água em particular, a história geoquímica dessas águas (interação rocha-água) e, principalmente, o potencial de mistura dessas águas (Lyons *et al.* 1995). Palmer & Edmond (1992) estudaram a composição isotópica do Sr em diferentes bacias de drenagem, para investigar os mecanismos que resultam no aumento da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas águas dos rios. Naftz *et al.* (1997) usaram $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para identificar a fonte salina em um aquífero de água doce no Estado de Utah, nos Estados Unidos. Lyons *et al.* (1995) usaram os isótopos de Sr

para determinar a mistura de água subterrânea com água salobra em uma zona costeira na Austrália.

Bordalo *et al.* (2007) testaram a potencialidade da ferramenta isotópica de estrôncio em três regiões da zona bragantina, revelando valores de 0,71027 a 0,71364 no poço da região do Acarajó, refletindo maior contribuição de Sr radiogênico compatível com o ambiente continental (Barreiras), já no Pântano Salino aonde se encontra um ambiental transicional os valores das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variam de 0,70959 a 0,70984; e no “Furo do chato” localizado no ambiente de mangue intermaré, revela a influência marinha nas águas subsuperficiais com valores de 0,70914 a 0,70933.

Jorgensen *et al.* (2008) com o objetivo de investigar intrusão de água do mar destacaram valores em aquíferos não-confinados na costa da Dinamarca que representam mistura de águas a partir da água do mar, aquífero arenoso e aquífero calcário, sugerindo razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,7092, 0,7094 e 0,7082, respectivamente.

CAPÍTULO 5

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostragens foram realizadas em regime bimestral desde Julho-Agosto de 2010 a Maio-Junho de 2011 caracterizando um ciclo hidrológico completo, contemplando os meses chuvosos e meses mais secos. Considerando o referido período, totalizou-se (6) seis campanhas de coleta. Utilizando os dados fornecidos pela DNMET (1992), consideraram-se as campanhas de Julho-Agosto/2010, Setembro-Outubro/2010 e Maio-Junho/2011, como período seco, enquanto Novembro-Dezembro/2010, Janeiro-Fevereiro/2011 e Março-Abril/2011 como período chuvoso.

Para estudo isotópico e da química das águas do aquífero Barreiras e Pirabas, em Ananindeua e Icoaraci, foram escolhidos 3 poços em cada unidade aquífera: em Ananindeua foram utilizados 3 poços profundos da COSANPA e 3 poços rasos de particulares; em relação a Icoaraci, foram utilizados 3 poços profundos da SAAEB, bem como 3 poços rasos de particulares, totalizando 6 amostras em cada sub-área, 12 amostras no total (cada campanha de coleta), foram realizados ainda coletas de 2 amostras em poços rasos em Capanema (Aquífero Pirabas) e em 1 poço raso de Benevides (Aquífero Barreiras).

Complementa-se com análises química e isotópica 1 análise de água da chuva dentro do período da amostragem, bem como análises isotópicas da rocha aquífera (na seções aquíferas do Barreiras e Pirabas).

5.1.1 Poços Pirabas

As amostragens em poços pirabas referem-se a empresas públicas com finalidade de abastecimento público, a ilustração abaixo (Figura 6) refere-se o poço PB-01, da SAAEB, destaca-se que as amostras foram coletadas próximas a saída de água do poço, através de registro lateral.



Figura 6 – Poço Pirabas, referente à amostra PB-01, no residencial Raimundo Jinkings.

Este poço especificamente atinge 248 metros de profundidade, garantindo boa proteção do aquífero e menor possibilidade de contaminação.

Todos os poços da COSANPA E SAAEB são armazenados em reservatórios, variando de 10 a 20 m³ o qual é posteriormente distribuída a população local (Figura 7).



Figura 7 – Reservatórios comuns a todos os pontos de amostragem em poços profundos.

5.1.2 Poços Barreiras

Na escolha dos poços Barreiras, além do fato das sub-áreas no qual apresentam a questão neotectônica, foi observado a questão sanitária do poço, para prejudicar o mínimo possível nas análises químicas. Sabe-se que a maioria dos poços rasos sofre a interferência antrópica, devido à descarga de esgotos lançadas em fossas e sumidouros, contaminando o aquífero Barreiras na sua parte médio-superior.

Abaixo se encontra a ilustração de um poço raso (Figura 8), no qual apresenta parâmetros observados pela legislação ambiental vigente, apresentando laje de proteção e fossa/esgoto em distância segura.



Figura 8 – Local de Amostragem de Poço Barreiras, observar a boa construção do mesmo, assim impedindo o *input* de contaminantes.

5.2 ANÁLISES ISOTÓPICAS DE SR

As análises isotópicas, cromatográficas e hidroquímicas foram realizadas utilizando as infra-estruturas dos Laboratórios de Geologia Isotópica (Para-Iso), de Hidroquímica e de Cromatografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Pará.

6.3.1 Procedimentos de Campo

As amostras destinadas à análise isotópica de estrôncio (Sr) foram filtradas em filtros de Marca Millipore de 0,45 μm , acidificadas com HNO_3 -bidestilado a pH em torno de 2 e estocadas em garrafas de polietileno de 250 mL refrigeradas (Négrel & Petelet-Giraud 2005, Bordalo *et al.* 2007, Négrel *et al.* 2010).

6.3.2 Procedimentos Laboratoriais para Sr

Baseando-se na metodologia implantada no Laboratório de Geologia Isotópica por Bordalo *et al.* (2007) para determinação da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas, evaporou-se 200 ml de amostra quando de proveniência do Barreiras, 100 ml de amostra quando de

proveniência do Pirabas (devido a diferença da quantidade de estrôncio dissolvido na amostra), 500 ml de água da chuva.

Quanto à análise das rochas da formação Barreiras e Pirabas, utilizou-se o método de abertura de rocha total, no qual utilizou-se 1 ml HF-bidestilado, 0,5 ml de HNO₃-bidestilado (13 N) e 0,5 ml de HClO₄.

Posteriormente, todas as amostras (tanto as amostras de água, quanto as de rocha) foram solubilizadas com 1 mL de HNO₃-bidestilada 3,5 mol/L, para separação cromatográfica do Sr com resina Sr.spec. A seguir, adiciona-se a cada amostra 1 mL de HNO₃** concentrado (3%), e são levadas para análises num espectrômetro de massa (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS, Modelo Neptune), onde foram feitas as leituras das amostras. As razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr foram normalizadas para ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0,1194 e o fracionamento de massa foi corrigido no modo exponencial. A concentração de Estrôncio das amostras foi determinada através da mistura com traçador de Sr (⁸⁶Sr/⁸⁴Sr = 0,054998; ⁸⁷Sr/⁸⁴Sr = 0,021387; ⁸⁸Sr/⁸⁴Sr = 0,165433). Para a precisão analítica utilizou-se o padrão SRM-987 que forneceu uma razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de 0,710272 ± 0,000020 (2σ, média de 14 leituras) e os brancos totais de Sr ficaram entre 2,72 e 3,28 ng.

5.3 ANÁLISES QUÍMICAS

5.3.1 Procedimentos de Campo

A partir de técnicas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB 1987), dá-se a utilização de garrafas de polietileno com tampa de enroscar e volume de 100 e 500 mL, lavadas inicialmente com solução ácida e em seguida com água deionizada. Esse procedimento evita qualquer tipo de contaminação proveniente do frasco.

Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos *in situ* (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos) e então acondicionadas em baixa temperatura para transporte até o laboratório de Hidroquímica da UFPA.

5.3.2 Procedimentos Laboratoriais

Determinaram-se os parâmetros químicos por meio das metodologias recomendadas pela APHA (1995) e CETESB (1978):

a) Bicarbonato

Inicialmente é encontrada a alcalinidade total, determinada através do método titulométrico com H_2SO_4 (0,02N), padronizado, pipetando 100 mL das amostras e o mesmo volume aplicado para um branco obtido com água destilada. Como indicadores foram usados a fenolftaleína e o alaranjado de metila, e os resultados expressos em mg/L de CaCO_3 (Rodier 1981). A concentração de bicarbonato foi determinada a partir dos valores numéricos da alcalinidade total, que são multiplicados pela constante 1,22 (Custódio & Llamas 1976).

b) Ferro Total

Utilizou-se o método da orto-fenantrolina, com a determinação espectrofotométrica de ferro, espectrofotômetro marca BECKMAN DU-6 com $\lambda = 510$ nm em cubeta de 1 cm. Nesse método, o ferro solúvel é reduzido a ferro ferroso com hidroxilamina em meio ácido e, em seguida, tratado com orto-fenantrolina em pH 3,2 a 3,3. A coloração do complexo vermelho-alaranjado é independente do pH (faixa 3 a 9). A concentração de ferro total é obtida mediante curva de calibração a partir de padrões pré-estabelecidos (CETESB 1978).

c) Sílica

A concentração de sílica é obtida utilizando o método de Grasshoff (1964) combinando reagentes, ácido ascórbico e ácido oxálico pelas seguintes razões: (i) para reduzir o excesso de molibdato presente, (ii) para reduzir a influência do fosfato presente na amostra.

d) Cátions e Ânions

As concentrações de cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- e SO_4^{2-}) foram determinadas por cromatografia líquida utilizando-se cromatógrafo de íons DIONEX DX-120. Para a análise de cátions utilizou-se coluna catiônica (CSRS ULTRACS12A DIONEX), eluente 20 Mm MSA (Ácido Metanosulfônico) e fluxo 1,0 mL min^{-1} . Para análise dos ânions utilizou-se coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 DIONEX), como eluente solução 3,5 mM Na_2CO_3 /1,0 mM NaHCO_3 e fluxo 1,2 mL min^{-1} .

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a interpretação dos resultados obtidos nas diferentes etapas de trabalho laboratorial nos laboratórios de Geologia Isotópica e de Hidroquímica, utilizou-se os seguintes softwares:

- Software “Excel” para estatística básica e produção dos respectivos gráficos.
- Software “Statistica 9.0” para estatística básica e multivariada, e produção dos respectivos gráficos. (StatSoft 2009).
- Software AQUACHEM – Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting (1977) version 3.7, para análise de estatística multivariada.

CAPÍTULO 6

6.1 MISTURA DE ÁGUAS ENTRE OS SISTEMAS AQÜÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ, COM BASE EM DADOS HIDROGEOQUÍMICOS

Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho

Marco Antonio Galarza

Submetido: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**

De: RBRH (rbrh@abrh.org.br);

Para: olavo1501@yahoo.com.br;

Assunto: RBRH – Enviado para Revisão;

Sistema de Apoio à RBRH

ACUSANDO RECEBIMENTO

Prezado Senhor:

Recebemos o artigo enviado por Vossa Senhoria, intitulado "MISTURA DE ÁGUAS ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ, COM BASE EM DADOS HIDROGEOQUÍMICOS" submetido a RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

Este artigo foi enviado a dois revisores para avaliação. Assim que recebermos as análises comunicaremos o resultado a Vossa Senhoria.

Informamos, outrossim, que de acordo com as novas normas adotadas pela Associação, os artigos deverão ter no máximo 10 páginas editadas no padrão da revista. As páginas excedentes terão um custo de R\$ 150,00 (cento e cinquenta reais) por página. Sendo que o máximo de páginas aceitas será de 20 (vinte).

Agradecemos o envio do trabalho e estamos a disposição para qualquer esclarecimento necessário.

Atenciosamente,

Comitê Editorial da RBRH

TÍTULO DO TRABALHO: MISTURA DE ÁGUAS ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ, COM BASE EM DADOS HIDROGEOQUÍMICOS

¹Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho, ²Marco Antonio Galarza

¹*Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Bairro Guamá, 66075-110, Belém, PA – Brasil. Caixa-Postal: 8608.*

²*Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Laboratório de Geologia Isotópica. Rua Augusto Correa 01 - Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso). Guamá. 66075-110 - Belém, PA – Brasil. Caixa-Postal: 8608.*

¹olavo1501@yahoo.com.br, ²antogf@ufpa.br

RESUMO: Amostras coletadas nos principais aquíferos da região nordeste do Pará mostram características distintas entre si, no aquífero Barreiras o íon dominante é Na⁺ (regime de precipitações) e no aquífero Pirabas é o Ca⁺ (contribuição litológica). Estudos estatísticos mostram boas correlações entre os sistemas aquíferos ($\geq 0,8$) e no modelamento geoquímico há clara evidência de conexão hidráulica entre aquíferos, devido ao formato de distribuição da composição de cada amostra em linhas paralelas no diagrama de Schöller e da convergência dos resultados da composição de amostras do Barreiras no Pirabas modeladas a 10%, sugerindo misturas entre os aquíferos estudados. A mistura de águas é mais evidente no período chuvoso.

Palavra-Chave: Água Subterrânea, Aquíferos Barreiras e Pirabas, Hidrogeoquímica.

ABSTRACT: Samples collected in the main aquifers in northeastern Pará show different characteristics, in aquifers Barreiras the dominant ion is Na⁺ (precipitation regime) and aquifers Pirabas is the Ca⁺ (lithological contribution). Statistical studies show good correlation between the aquifer systems (≥ 0.8) and geochemical modeling shows clear evidence of hydraulic connection between the aquifers due to the size of distribution of composition of each sample in parallel lines the diagram Schöller and convergence results the composition of Barreiras samples in Pirabas shaped to 10%, suggesting mixtures between the aquifers studied. The mixture of water is most evident in the rainy season.

Keyword: Groundwater, Barreiras and Pirabas Aquifers, Hydrogeochemistry.

INTRODUÇÃO

A água é fundamental para os seres vivos, tão importante que nela surgiram às primeiras formas de vida. Há grande quantidade de água distribuída no planeta, porém menos de 3% da água do mundo é doce, restando menos de 1% para o consumo (aquiíferos) (Matta 2002).

A Região Metropolitana de Belém (RMB) possui uma população superior a 2.000.000 de habitantes e vários problemas oriundos da ocupação desordenada, diversos autores destacaram os riscos de contaminação de aquííferos devido à ocupação desordenada. (Cabral, 2004; Costa, 2004, Matta, 2002; Paranhos, 2010).

Na região do nordeste Paraense, os dois principais sistemas aquííferos explorados são o sistema Barreiras, cujos aquííferos estão alojados unicamente em rochas siliciclásticas, e sotoposto a ele o sistema Pirabas, composto por aquííferos formados por rochas calcárias e rochas siliciclásticas (Paranhos, 2010), Os aquííferos citados possuem excelente aproveitamento para abastecimento de água da população da RMB.

Estudos demonstram a vulnerabilidade destes aquííferos mais profundos por processos geológicos (investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições e estruturas tectônicas caracterizadas por falhas normais e transcorrentes em regiões de recarga) (Paranhos, 2010). As falhas normais nas superfícies potenciais de menor pressão constituíram-se num dos locais de maior favorabilidade para a recarga dos aquííferos por elas interceptados. (Paranhos, 2010).

Decorre-se então grande preocupação no que diz respeito à possibilidade de contaminação desses aquííferos por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, haja vista a possibilidade de comunicação hidráulica entre os sistemas aquííferos, sendo que as águas para abastecimento público da cidade são originadas do aquíífero Pirabas.

PARTE EXPERIMENTAL

Caracterização da Área

O Grupo Barreiras é constituído por argilas, siltes, areias, cascalhos, arenitos, siltitos, conglomerados, níveis de concreções ferruginosas, arenito ferruginoso. Encontra-se distribuída amplamente no litoral norte do Brasil. Diversos autores (Costa et al, 1993; Góes et al, 1980; Palheta, 2008; Rossetti et al, 1989) definem a formação representada por depósitos siliciclásticos constituídos por uma variedade de rochas onde se destacam arenitos maciços e estratificados, argilitos laminados e maciços, pelitos e conglomerados (Tabela 1).

Sotoposta ao Grupo Barreiras encontra-se a Formação Pirabas, esta aflora no nordeste do Pará, de forma destacada nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas. É constituída por calcários, areias, argilas, margas, arenitos, siltitos, argilitos, depositados em ambiente marinho, durante o Mioceno, ricamente fossilífera (Matta, 2002; Oliveira et al, 2001; Paranhos, 2010).

Através de estudos principalmente paleoambientais, apontam um ambiente deposicional nerítico raso, de águas límpidas agitadas, de proximidades litorâneas de mar aberto, de costa baixa, e clima quente (Costa et al, 1993; Ferreira & Cunha, 1957; Góes et al, 1990).

O sistema hidrogeológico na área estudada divide-se basicamente em Pós-barreiras (25 metros iniciais), Barreiras (de 25 a 90 m) e Pirabas (de 90 a 270 m) (Tabela 1).

O aquíífero Barreiras apresenta camadas aquííferas em torno de 70 metros, de natureza livre a confinada, presença de camadas argilosas sucessivamente intercaladas com areias, com vazões entre 10 e 70 m³/h. Seu principal problema o teor excessivo de ferro (acima de 0,3 mg/L), fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde (Cabral, 2004; Matta, 2002).

O aquíífero Pirabas apresenta camadas aquííferas em torno de 220 a 270 metros, de natureza confinada, com vazões de até 600 m³/h, além do qual são aquííferos de notável qualidade, com pH próximo à neutralidade, com dureza moderadamente dura a dur (Paranhos, 2010), classificadas como cálcico-magnesianas-bicarbonatadas (Carvalho, 2001).

Tabela 1. Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará (Sauma Filho, 1996).

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	SEDIMENTOS MODERNOS	Sedimentos recentes quartzosos com matéria orgânica; argila, silte e areia.
		PLEISTOCENO	PÓS-BARREIRAS	Sedimentos areno-argilosos inconsolidados, quartzosos, siltico-argilosos com arenitos ferruginosos intercalados.
	TERCIÁRIO	MIOCENO-PLIOCENO	FORMAÇÃO BARREIRAS	Arenitos de granulometria variada, mal selecionados, argilosos, intercalados a siltitos e argilosos de cores variadas, tendo-se ainda níveis de concreções ferruginosas.
		OLIGO-MIOCENO	FORMAÇÃO PIRABAS	Calcários e margas, intercalados com folhelhos cinza-esverdeados e arenitos calcíferos.

Neotectônica do Nordeste Paraense e de Belém

Até a década de 70 acreditava-se que a região nordeste do Pará fosse estável, sem indícios de tectonismo recente. Entretanto, após investigações de campo e análise por sensoriamento remoto (Costa, 2004, Palheta, 2008) identificaram feições e estruturas tectônicas que caracterizaram uma nova perspectiva quanto ao processo neotectônico do nordeste do Pará. Foram realizados estudos no qual estabeleceram relações de neotectonismo com diversas áreas da Amazônia (Palheta, 2008, Pinheiro, 2009, Abreu, 2012).

No nordeste do Pará, existiram duas movimentações (Palheta, 2008): 1. Falhas transtessivas no Mioceno-Plioceno; 2. Falhas normais e transcorrentes no Pleistoceno-Holoceno (Figura 1).

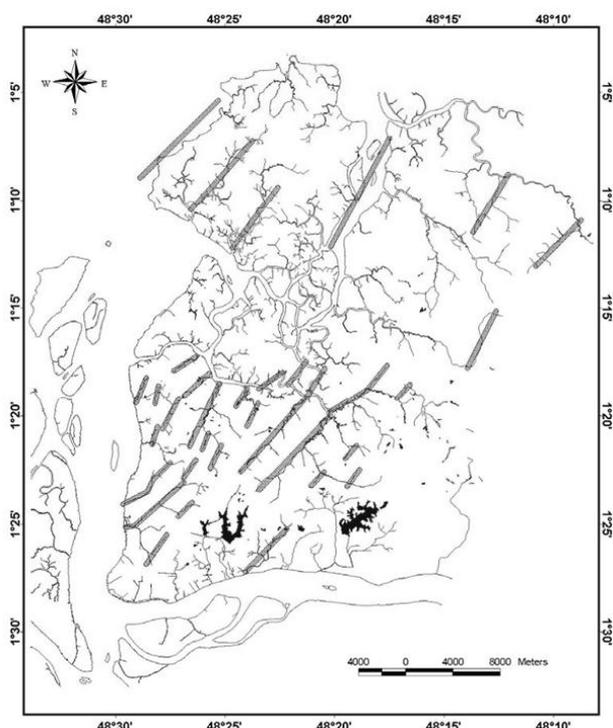


Figura 1. Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais (Costa, 2004).

Baseando-se na análise de drenagem da região metropolitana de Belém e a geometria dos aquíferos a partir de falhas normais (Figura 1), pôde-se evidenciar a influência da neotectônica devido à similaridade de arranjo³.

A correlação de poços situados em um mesmo bloco individual demonstra que as camadas geológicas que ocorrem em cada um deles têm atitudes distintas, certamente influenciadas pela atuação de processos neotectônicos (Pinheiro, 2009).

Por serem falhas normais superfícies potenciais de menor tensão, elas se constituem em um dos locais mais favoráveis para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas, pois as falhas e fraturas abertas são condutos dos sistemas hidrogeológicos, suscitando a possível conexão hidráulica entre o sistema Barreiras e Pirabas.

Abreu (2012) aponta através de estudo morfoestrutural realizado em Castanhal-PA que as falhas

estruturais no nordeste do Pará configuram importantes condutos para a recarga dos sistemas hidrogeológicos.

Amostragem

A área de estudo é o conjunto de duas localidades: Belém (Distrito de Icoaraci), inserido na RMB, que possui população de quase 300.000 habitantes e é abastecido pelos sistemas de captação subterrânea da SAAEB (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém). O município de Ananindeua compreende uma área de 176 km² e população próxima a 500.000 habitantes, situa-se entre as coordenadas geográficas 01°13' e 01°27' de latitudes sul e 48°19' e 48°26' de longitude oeste a Greenwich, este município é abastecido por águas da COSANPA (Companhia de Saneamento do Pará).

As amostragens foram realizadas em regime bimestral desde Julho-Agosto de 2010 a Maio-Junho de 2011 caracterizando um ciclo hidrológico completo contemplando os meses chuvosos e meses mais secos. Considerando o referido período, totalizou-se (6) seis campanhas de coleta. Por tratar-se de uma zona tropical, não há estações definidas, havendo um período de maior e outro de menor precipitação pluviométrica. O período seco compreende de Julho a Outubro, enquanto o período chuvoso situa-se de Dezembro a Abril, com meses intermediários em Novembro e Maio (DNMET, 1992).

Para estudo químico das águas do aquífero Barreiras e Pirabas, em Ananindeua e Belém (Distrito de Icoaraci), foram escolhidos 3 poços em cada unidade aquífera: em Ananindeua foram utilizados 3 poços profundos da COSANPA e 3 poços rasos de particulares; em relação a Icoaraci, foram utilizados 3 poços profundos da SAAEB, bem como 3 poços rasos de particulares, totalizando 6 amostras em cada sub-área, 12 amostras no total (cada campanha de coleta).

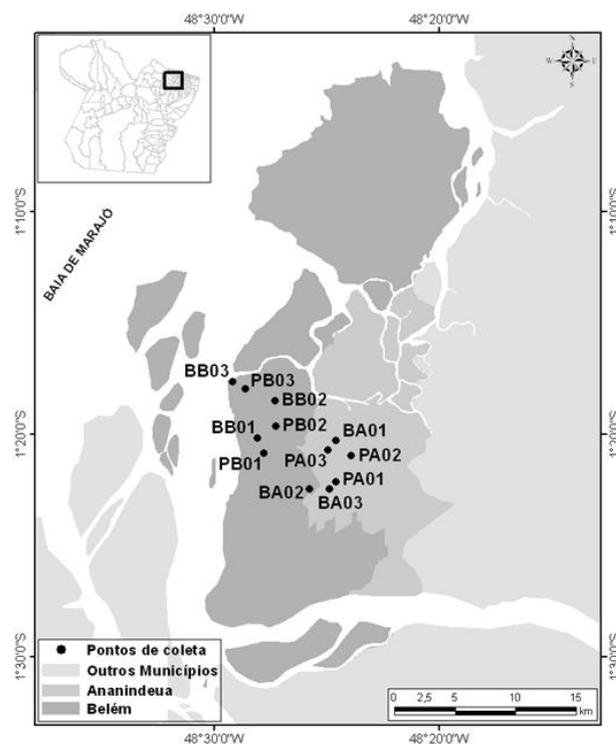


Figura 2. Mapa de localização e pontos de amostragem das sub-áreas de estudo (IBGE, 2010).

A nomenclatura das siglas da Figura 2 são as seguintes: BB (Aqüífero Barreiras - Poços Belém) / BA (Aqüífero Barreiras - Poços Ananindeua) / PB (Aqüífero Pirabas - Poços Belém) / PA (Aqüífero Pirabas - Poços Ananindeua).

Análises Químicas e Estatísticas

Utilizaram-se garrafas de polietileno com tampa de enroscar e volume de 100 mL (Ferro total) e 500 mL (demais parâmetros por método titulométrico e cromatografia iônica), lavadas inicialmente com solução ácida e em seguida com água deionizada. Esse procedimento evita qualquer tipo de contaminação proveniente do frasco (CETESB, 1987).

Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos *in situ* (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos) e então acondicionadas em baixa temperatura para transporte até o Laboratório de Hidrogeoquímica da UFPA.

A concentração de (HCO_3^-) foi determinado a partir dos valores numéricos da alcalinidade total (Custodio, 1976).

Para ferro total utilizou-se o método da orto-fenantrolina, com a determinação espectrofotométrica de ferro (CETESB, 1978). A concentração de sílica é obtida combinando reagentes, ácido ascórbico e ácido oxálico (Grasshoff, 1964).

Para cromatografia líquida, as amostras foram filtradas em filtros de Marca Millipore de 0,45 μm , e estocadas em garrafas de polietileno de 100 mL para posterior análise.

As concentrações de cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- e SO_4^{2-}) foram determinadas por cromatografia líquida utilizando-se cromatógrafo de íons DIONEX DX-120. Para a análise de cátions utilizou-se coluna catiônica (CSRS ULTRACS12A DIONEX), eluente 20 Mm MSA (Ácido Metanosulfônico) e fluxo 1,0 mL min^{-1} . Para análise dos ânions utilizou-se coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 DIONEX), como eluente solução 3,5 mM Na_2CO_3 /1,0 mM NaHCO_3 e fluxo 1,2 mL min^{-1} . Para o cálculo do balanço de massa iônico (ΔIon), considerou-se a seguinte fórmula (Custodio, 1976):

$$\sum \text{Ion} (\%) = \frac{\sum 100 * (r \text{ cátions} - r \text{ ânions})}{\sum (r \text{ cátions} + r \text{ ânions})}$$

As amostras no aqüífero Barreiras apresentaram balanço iônico no valor médio de 8,8%, enquanto que no aqüífero Pirabas a média foi de 4,7%. A diferença se dá pela maior concentração de íons no Pirabas, fruto de águas com tempo maior de percolação e dissolução de elementos químicos neste aqüífero.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição Química

A Tabela 2 apresenta os valores das amostras em poços dos sistemas aqüíferos Barreiras e Pirabas coletadas no verão e no inverno (Julho de 2010 a Junho de 2011).

Os valores de pH das amostras apresentam grande diferença entre os sistemas aqüíferos, variando no aqüífero Barreiras de 4,3 a 6,2, atingindo no aqüífero

Pirabas valores entre 7,0 e 8,0. Os valores no Barreiras refletem a disponibilidade de H^+ , principalmente na forma de Ácido Silícico ($2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$), no caso do Pirabas o valor é fortemente contribuído pela presença de bicarbonato oriundo da dissolução da calcita ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$).

A condutividade no sistema Barreiras varia de 11,10 a 92,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto no Pirabas os valores são de 222,0 a 406,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de STD seguem a mesma tendência da condutividade nos aqüíferos amostrados, reforçando a diferença do tempo de percolação nestes aqüíferos, no qual as águas do Pirabas são mais antigas que a do Barreiras.

Tabela 2. Anexo

Comparando os resultados da RMB com amostras de outras regiões no qual afloram o aqüífero Barreiras (Benevides) e aqüífero Pirabas (Capanema), encontram-se diferenças físico-químicas marcantes.

Quanto ao Barreiras, aos valores de referência (backgrounds) apresentaram-se mais ácidas, com menor quantidade de íons dissolvidos, conseqüentemente, menor valor de STD e condutividade elétrica mais baixa, essa tendência se apresentou em todos os parâmetros com exceção da Sílica que apresentou ligeiro aumento da concentração.

Entretanto nos backgrounds de Capanema, a tendência foi inversa, com amostras mais básicas, maior quantidade de íons dissolvidos, maior valor de STD e condutividade elétrica maior, sendo que o parâmetro de exceção novamente foi a sílica, apresentando menor concentração que nas amostras da RMB.

A partir dos diagramas trilíneares de Piper confeccionados no Software Aquaquem v 3.7 for Windows (AQUACHEM, 1997) observa-se que a fácies hidroquímica predominante no Barreiras é a Cl^- - Na^+ devido a contribuição majoritária da precipitação pluviométrica, enquanto que no Pirabas predomina a fácies HCO_3^- - Ca^{2+} influenciados principalmente pela litologia (Fenzl, 1988).

A diferença de sílica dissolvida entre os aqüíferos dá-se pela hidrólise dos silicatos. Devido à reação ser lenta e de baixa solubilidade (Ramage, 2005), a concentração de sílica aumenta com o tempo de percolação no aqüífero, ocorrendo maiores concentrações de sílica no Pirabas.

A variação sazonal mostra que os aqüíferos possuem pouca sensibilidade quanto ao período climático (Figura 3a e 3b). Destaca-se que no período chuvoso há uma variação maior do tipo de fácies, indicando maior suscetibilidade destes aqüíferos quanto à ação intempérica natural e ação de cunho antropogênico, conforme observado na Figura 3 a partir da mudança de fácies de poços no aqüífero Barreiras (aqüífero raso).

É importante apontar a seguinte tendência iônica no aqüífero Barreiras: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Fe}^{2+}$ para os cátions e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ para os ânions. Neste caso, os cátions possuem concentrações químicas controladas por minerais feldspáticos, como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e albita ($2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), que a partir do intemperismo nas rochas, geram a Caulinita

($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), principal produto do intemperismo encontrado no aquífero Barreiras. Quanto aos ânions, apresenta-se o Cl^- como íon principal, fruto da precipitação pluviométrica e a sua conservação em subsuperfície, destacando ainda o NO_3^- , elemento comum em aquíferos que sofrem ação antrópica direta, devido à carga de detergentes e esgotos a partir de fossas e sumidouros.

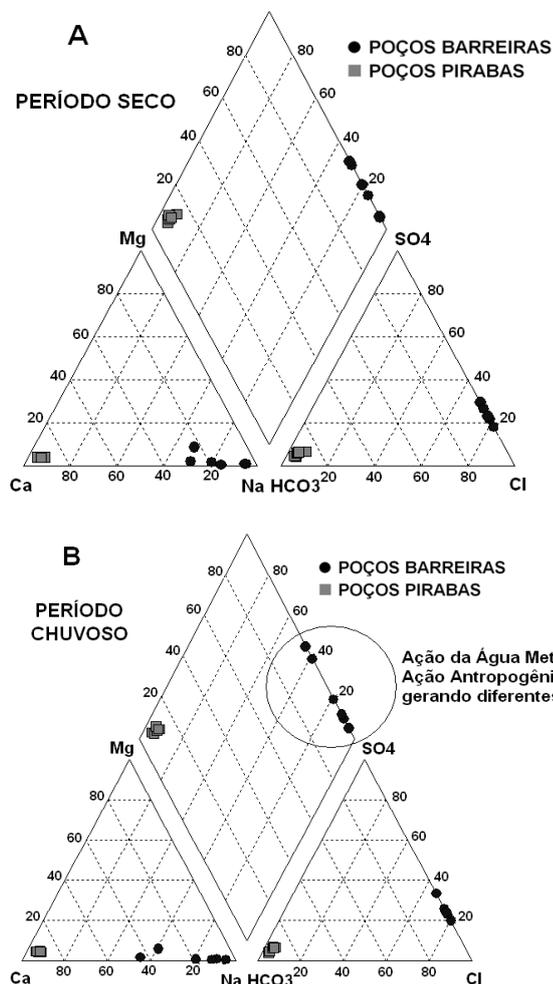


Figura 3. Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso.

No aquífero Pirabas é encontrada a seguinte tendência: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Fe}^{2+} > \text{Sr}^{2+}$ para cátions e $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ para ânions. Os cátions apresentam a contribuição de minerais como a calcita (CaCO_3) e dolomita (MgCaCO_3), e os ânions refletem o ambiente carbonático e o seu produto da dissolução (HCO_3^-).

A partir da análise de correlação, evidencia-se excelente relação entre os sistemas aquíferos estudados. A análise se deu a partir da junção de dados dos poços do Barreiras e Pirabas no mesmo período de amostragem, no caso, seco e chuvoso.

O enriquecimento de íons nestas águas é proporcional ao aumento de sólidos totais dissolvidos e por consequência o aumento da condutividade.

As Tabelas 3a e 3b (considerando $r \geq 0,80$) apresentam excelentes correlações entre Cl e Na ($r = 0,95$ e $0,93$), Cl e Mg ($r = -0,88$ e $-0,81$), Cl e Ca ($r = -0,94$ e $-0,89$), Cl e Sr ($r = -0,87$ e $-0,84$), Na e Mg ($r = -0,94$ e $-0,92$), Na e Ca ($r = -0,97$ ambos), Na e Sr ($-0,96$ ambos), K

e Mg , Ca , Sr ($r = 0,86$, $0,83$ e $0,86$, respectivamente, estas correlações somente no chuvoso), Mg e Ca ($r = 0,97$ e $0,98$), Mg e Sr ($r = 0,97$ ambos), Ca e Sr ($r = 0,98$ e $0,99$). Estas correlações relevantes estão associadas a sua afinidade química e as diversas reações que liberam os íons para o meio aquoso, além do qual reforçam a ligação hidráulica entres os dois aquíferos (considerando o aspecto de proporcionalidade que neles se apresentam).

Tabela 3. Anexo

Modelamento Hidrogeoquímico

A partir de diagramas de composição do tipo Schöller, pode-se representar sistemas convencionais de águas subterrâneas. A seguir encontram-se as composições das águas nos dois períodos climáticos.

Nas Figuras 4a e 4b, encontram-se os padrões característicos em cada tipo de aquífero, no período seco e chuvoso há predominância do íon Ca^{2+} com mais de 46% da soma dos íons no aquífero Pirabas, enquanto que no aquífero Barreiras o íon mais principal é o Na^+ atingindo 37% da soma total de íons. Nas duas situações o íon dominante controla o pH do respectivo aquífero resultando em águas ácidas no Barreiras e águas próximas a neutralidade no Pirabas.

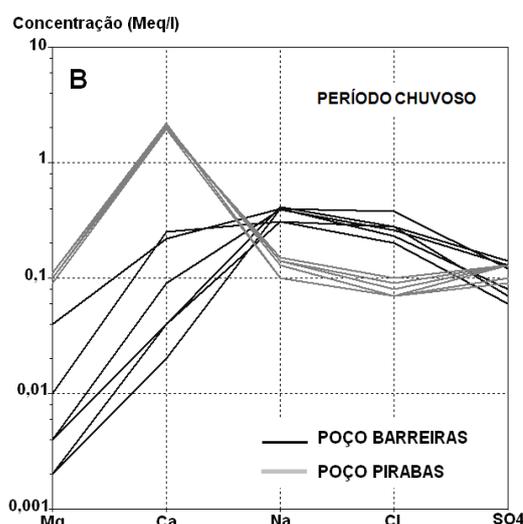
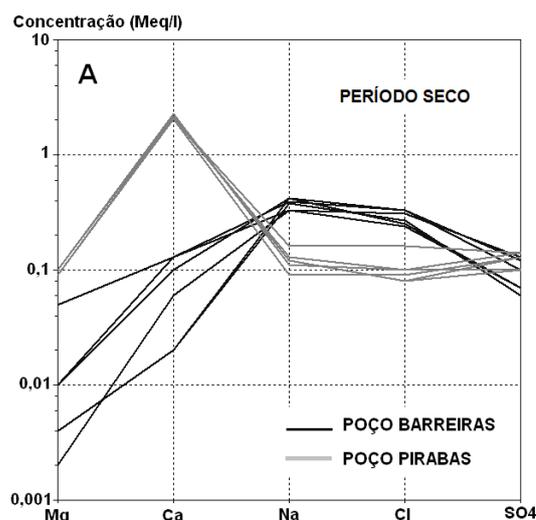


Figura 4. Diagramas de Composição de Schöller período: A) seco B) chuvoso

Ressalta-se o comportamento em leque (Paranhos, 2010 nos dois sistemas aquíferos, apresentando valores em linhas paralelas, demonstrando mais de um tipo de água, no caso “águas de misturas”, pois se fossem apenas um tipo de água, as linhas estariam praticamente sobrepostas e o padrão gráfico seria outro (Mazor, 2004).

A Figura 4 mostra o modelamento geoquímico com o auxílio do Software AquaChem v 3.7 (AQUACHEM, 1997), utilizando as médias em cada ponto de coleta (3 amostras do período seco no respectivo ponto de coleta; e 3 amostras do período chuvoso no respectivo ponto de coleta). Nota-se que as amostras do aquífero Pirabas possuem maior estabilidade não possuindo tanta variabilidade entre os poços amostrados, entretanto no aquífero Barreiras as amostras tendem a ser mais variáveis, devido sua maior exposição ao input atmosférico neste aquífero (aquífero mais próximo da superfície).

Utilizando a ferramenta “Mix Samples” contida no programa citado, é possível calcular o grau de mistura entre as águas. No caso estudado, a percentagem de misturas em 10% assemelha-se com as amostras do Pirabas, apresentando concentrações concordantes com o conjunto de parâmetros para amostras deste aquífero. Ressalta-se que este grau de interação foi resultado da modelagem no software considerando 10% da concentração química dissolvida na amostra do Barreiras com 90% da concentração química dissolvida na amostra do Pirabas no período chuvoso.

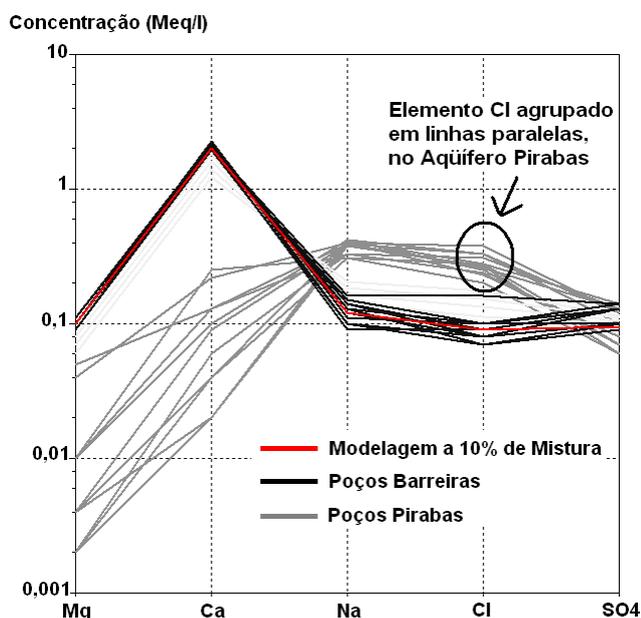


Figura 5. Modelamento geoquímico a partir do Diagrama de Schöller.

Dentre os elementos da Figura 5, o Cl- é um bom indicador de misturas de águas. As concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero. (Schöller, 1962).

Outras combinações (20 a 50% de misturas), bem como testes no período seco não obtiveram padrão concordante durante todo o conjunto de parâmetros para amostras do Pirabas.

As águas de um aquífero confinado quando plotadas num diagrama de composição usando na abscissa

um elemento ou parâmetro conservativo deveriam agrupar-se indicando a presença de apenas um tipo de água (Mazor, 2004), entretanto as amostras se distribuíram de forma alinhada no Aquífero Pirabas, representando linha de mistura (Figura 5).

CONCLUSÕES

Os aquíferos Barreiras e Pirabas possuem características hidroquímicas distintas, apresentando no primeiro menor concentração de elementos dissolvidos na água devido o menor tempo de percolação e dissolução de suas rochas, acontecendo o oposto para as águas do Pirabas, o qual apresenta concentração iônica bem elevada, pois o tempo de contato da água com a rocha encaixante está na ordem de milhões de anos.

A fácies hidroquímica de cada aquífero revela o tipo de contribuição em suas águas, sendo no Barreiras originado da contribuição de água meteórica (Cl^- e Na^+), enquanto no Pirabas há forte predominância de reações químicas das rochas, como a dissolução da calcita (HCO_3^- e Ca^{2+}).

As matrizes de correlação revelam ambientes de contribuição entre os elementos, constatado pela quantidade de correlações relevantes (positivas e negativas acima de 0,8), apontando processos de conexão hidráulica entre os aquíferos e a mistura destas águas.

A partir dos diagramas de composição nota-se que o efeito da sazonalidade é pouco perceptível, apresentando pequenas variações durante o período seco e chuvoso. Ressalta-se a distribuição das linhas em formato paralelo no diagrama de Schöller, tanto no Barreiras quanto no Pirabas, característico de águas que sofrem misturas.

A compilação de dados e tratamentos estatísticos aponta o processo de misturas entre as águas do sistema Barreiras e Pirabas na proporcionalidade de 10%, pronunciando-se mais evidente no período chuvoso, no aquífero Pirabas.

O elemento Cl^- por ser conservativo em meio subterrâneo, reforça a tese de conexão hidráulica entre os aquíferos devido à distribuição quase perfeita das linhas em formato paralelo em cada ponto de coleta no Pirabas, apresentando águas misturadas em diversos teores.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida a Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho e ao PPGG (programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica) da UFPA pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F.A.M.; *Neotectônica e Estruturação dos Sistemas Hidrogeológicos da Região de Castanhal/PA*. Revista Águas Subterrâneas. 2012, 1, 26.
- AQUACHEM. *Program for Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting v 3.7*; Waterloo, Canada, 1997.
- CABRAL, N.M.T; *Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2004.
- CARVALHO, W.G; *Caracterização Química dos Aquíferos da Formação Pirabas no Conjunto COHAB / Distrito de Icoaraci*

- *Pará, Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2001.
- CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental; *Normalização Técnica NT-07 (Análise físico-química das águas)*. São Paulo-SP, Brasil, 1978.
- CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental; *Guia de coleta e preservação de amostras de água*, São Paulo-SP, Brasil, 1987.
- COSTA, J.B.S.; BERMERGUY, R.L.; BORGES, M.S.; COSTA, A.R.; TRAVASSOS, W.; MIOTO, J.; IGREJA, H.L.S.; *Aspectos Fundamentais na Amazônia Brasileira*. Anais do Simpósio Internacional do Quaternário da Amazônia, Manaus, Brasil, 1993.
- COSTA, F.R.; *Influência da Neotectônica sobre os arranjos geométricos dos Aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2004.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R.; *Em Hidrologia subterrânea*, 1º Vol., Omega: Barcelona, 1976.
- DNMET, Departamento Nacional de Meteorologia; *Normais Climatológicas*, Brasília, Brasil, 1992.
- FENZL, N.; *Introdução a Hidrogeoquímica*, 1º ed., EDUFPA: Belém, 1988.
- FERREIRA, C.S.; CUNHA, O.R.; *Notas sobre a Formação Pirabas com descrição de novos intervalos fósseis I (Mollusca-Gastropoda)*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. 1957, 2, 1.
- GÓES, A.M.; TRUNCKENBRODT, W.; *Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará*. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú, Brasil, 1980.
- GÓES, A.M.; ROSETTI, D.F.; NOGUEIRA, A.C.R.; TOLEDO, P.M.; *Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Pará*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. 1990, 2, 3.
- GRASSHOFF, K.; *On the determination of silica in sea water*. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1964, 11, 597.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br>. Acesso em 09 jun 2010.
- MATTA, M.A.S.; *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2002.
- MAZOR, E.; *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 3th ed., Marcel Dekker: New York, 2004.
- OLIVEIRA, J.R.; SOUZA LEAL, A.; TANCREDI, A.C.F.N.S.; *Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*, 1th ed., CPRM: Belém, 2001.
- PALHETA, E.S.M.; *Estudo da Compartimentação e Arcabouço Neotectônico da Ilha de Mosqueiro – Pará*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2008.
- PARANHOS, P.F.; *Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2010.
- PINHEIRO, A.V.R.; *Uso de Ferramentas Multidisciplinares na Avaliação de Vulnerabilidade e Risco a Subsidência no Meio Cársico na Cidade de Castanhal, Nordeste do Pará – Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2009.
- RAMAGE, L. *Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico do Município de Porto Alegre, RS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.
- ROSSETTI, D.F.; TRUNCKENBRODT, W.; GÓES, A.M.; *Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. 1989, 1, 25.
- SAUMA FILHO, M.; *As Águas Subterrâneas de Belém e Adjacências: Influência da Formação Pirabas e Parâmetros Físico-Químicos para Medidas de Qualidade - Pará, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 1996.
- SCHÖLLER, H.; *Les eaux souterrains*. 53th ed., Paris, 1962.

ANEXO – TABELAS SUBMETIDAS À REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS

Tabela 2. Composição química das águas dos Aquíferos Barreiras e Pirabas, e *backgrounds* em Capanema e Benevides.

Parâm.	Aquíferos Barreiras ⁱ				Aquíferos Pirabas ⁱⁱ				Capanema (Pirabas) ⁱⁱⁱ		Benevides (Barreiras) ^{iv}	
	Mín.	Máx.	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Mín.	Máx.	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴
pH	4,3	6,2	5,0	5,1	7,0	8,0	7,5	7,4	7,40	7,35	4,60	4,54
T °C	26,30	30,70	28,45	27,93	28,50	31,00	29,84	29,83	29,32	28,17	27,27	27,00
Cond. ¹	11,10	92,20	39,75	35,53	222,0	406,0	344,0	331,9	670,37	607,83	28,37	26,07
STD ²	10,0	82,0	38,2	34,6	105,0	181,0	158,4	156,7	306,83	311,83	22,00	18,00
Sílica ³	0,84	7,60	3,77	3,04	6,06	16,02	11,40	10,84	5,81	6,09	4,69	4,66
Na ⁺	0,24	0,50	0,38	0,37	0,05	0,18	0,12	0,13	0,51	0,43	0,08	0,07
K ⁺	0,005	0,056	0,023	0,021	0,02	0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,003	0,003
Mg ²⁺	0,001	0,061	0,012	0,010	0,07	0,13	0,09	0,10	0,11	0,11	0,003	0,001
Ca ²⁺	0,011	0,327	0,112	0,111	1,78	2,53	2,12	2,04	3,43	3,50	0,03	0,03
Sr ²⁺	0,001	0,007	0,002	0,002	0,016	0,022	0,019	0,019	0,022	0,023	0,0002	0,0002
Fe ²⁺	0,003	0,014	0,007	0,005	0,006	0,022	0,013	0,012	0,03	0,03	0,004	0,001
Cl ⁻	0,18	0,42	0,29	0,27	0,05	0,12	0,09	0,08	0,43	0,42	0,07	0,06
NO ₃ ⁻	0,05	0,15	0,08	0,09	nd	nd	nd	nd	0,01	nd	0,03	0,02
SO ₄ ²⁻	0,05	0,17	0,09	0,10	0,08	0,16	0,11	0,12	0,33	0,38	0,02	0,01
HCO ₃ ⁻	nd	nd	nd	nd	1,64	2,27	1,95	1,87	3,04	3,06	Nd	nd
Σcátion	---	---	0,53	0,52	---	---	2,40	2,35	4,13	4,12	0,16	0,11
Σânion	---	---	0,46	0,46	---	---	2,17	2,07	3,81	3,86	0,12	0,09

¹Condutividade(μS/cm). ²Sólidos Totais Dissolvidos(mg/L). ³Sílica(mg/L). ⁴Média. nd = não detectado. Cátions e ânions(meq/L). ⁱ(n=36). ⁱⁱ(n = 36). ⁱⁱⁱ(n=12). ^{iv}(n=6).

Tabela 3. Matriz de Correlação (p < 0,05) dos principais parâmetros hidrogeoquímicos dos aquíferos Barreiras e Pirabas.

	pH	Cond.	STD	Fe ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
(A) Período Seco											
pH	1										
Cond.	0,95	1									
STD	0,91	0,97	1								
Fe ²⁺	0,73	0,71	0,71	1							
Cl ⁻	-0,89	-0,95	-0,89	-0,58	1						
SO ₄ ²⁻	0,52	0,53	0,64	0,50	-0,36	1					
Na ⁺	0,95	-0,98	-0,95	-0,62	0,95	-0,55	1				
K ⁺	0,66	0,63	0,77	0,62	-0,44	0,78	-0,62	1			
Mg ²⁺	0,96	0,96	0,97	0,78	-0,88	0,57	-0,94	0,77	1		
Ca ²⁺	0,95	0,99	0,98	0,72	-0,94	0,57	-0,97	0,69	0,97	1	
Sr ²⁺	0,96	0,97	0,97	0,74	-0,87	0,68	-0,96	0,75	0,97	0,98	1
(B) Período Chuvoso											
pH	1										
Cond.	0,96	1									
STD	0,92	0,97	1								
Fe ²⁺	0,75	0,72	0,74	1							
Cl ⁻	-0,86	-0,92	-0,85	-0,58	1						
SO ₄ ²⁻	0,32	0,33	0,46	0,31	-0,15	1					
Na ⁺	-0,93	-0,98	-0,94	-0,62	0,93	-0,34	1				
K ⁺	0,75	0,79	0,89	0,56	-0,60	0,73	-0,77	1			
Mg ²⁺	0,97	0,96	0,97	0,74	-0,81	0,40	-0,92	0,86	1		
Ca ²⁺	0,98	0,99	0,98	0,71	-0,89	0,38	-0,97	0,83	0,98	1	
Sr ²⁺	0,96	0,98	0,97	0,72	-0,84	0,49	-0,96	0,86	0,97	0,99	1

CAPÍTULO 7

7.1 ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E HIDROQUÍMICA DOS SISTEMAS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ: UM CASO DE MISTURA DE AGUAS SUBTERRANEAS

SIGNATURE OF ISOTOPE STRONTIUM (Sr) AND HYDROCHEMISTRY BARREIRAS AND PIRABAS SYSTEMS IN ANANINDEUA AND BELÉM (PA): A CASE OF MIXING OF GROUNDWATER

Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho

Marco Antonio Galarza

Submetido: **Revista Águas Subterrâneas**

Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E HIDROQUÍMICA DOS SISTEMAS BARREIRAS E PIRABAS EM ANANINDEUA E BELÉM, PARÁ: UM CASO DE MISTURA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS" para Águas Subterrâneas. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/author/submission/26003>

Login: lavo1501

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Everton de Oliveira
Águas Subterrâneas

Águas Subterrâneas <http://www.ser.ufpr.br/asubterraneas>

ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E HIDROQUÍMICA DOS
SISTEMAS BARREIRAS E PIRABAS: UM CASO DE MISTURA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS

SIGNATURE OF ISOTOPE STRONTIUM (Sr) AND HYDROCHEMISTRY
BARREIRAS AND PIRABAS SYSTEMS: A CASE OF MIXING OF GROUNDWATER

RESUMO

O presente estudo visou à caracterização hidroquímica e isotópica destas águas, para identificar misturas entre os dois principais sistemas aquíferos. Amostras coletadas nos principais aquíferos da região nordeste do Pará mostram características distintas entre si, no aquífero Barreiras o íon dominante é Na^+ (regime de precipitações) e no aquífero Pirabas é o Ca^+ (contribuição litológica). Estudos estatísticos mostram boas correlações entre os sistemas aquíferos ($\geq 0,8$) e o modelamento geoquímico mostra claramente evidência de conexão hidráulica entre os aquíferos, devido ao formato da distribuição da composição de cada amostra em linhas paralelas no diagrama de Schöller e da convergência dos resultados da composição de amostras do Barreiras no Pirabas modeladas a 10%, sugerindo misturas entre os aquíferos estudados. Nas análises discriminantes utilizando a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, constatou-se a conexão hidráulica entre poços do aquífero Barreiras e Pirabas, de forma mais evidente no período chuvoso, apresentando excelente discriminação na metade das amostras dos poços em período de maior pluviosidade, como também, as análises de PCA indicam a mistura entre as águas do aquífero Barreiras com o aquífero Pirabas.

Palavras-Chave: Barreiras; Pirabas; Hidroquímica; Estrôncio; Mistura entre aquíferos.

ABSTRACT

This study aimed to characterize hydrochemical and isotopic these waters, to find identify mixtures of the two main aquifer systems. Samples collected in the main aquifers in northeastern Pará show different characteristics. In aquifers Barreiras the dominant ion is Na^+ (precipitation regime) and aquifers Pirabas is the Ca^+ (lithological contribution). Statistical studies show good correlation between the aquifer systems (≥ 0.8) and geochemical modeling shows clear evidence of hydraulic connection between the aquifers due to the size of distribution of composition of each sample in

parallel lines the diagram Schöller and convergence results the composition of Barreiras samples in Pirabas shaped to 10%, suggesting mixtures between the aquifers studied. The mixture of water is most evident in the rainy season. In discriminant analysis using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio, found hydraulic connection between wells Barreiras and Pirabas aquifer, most clearly in the rainy season, with excellent discrimination in half the samples from wells in period of higher rainfall, and PCA analysis indicate the mixing waters between Barreiras and Pirabas aquifer.

Keywords: Barreiras; Pirabas; Hydrochemistry, Strontium, Mixing between aquifers.

INTRODUÇÃO

A água é fundamental para os seres vivos, tão importante que nela surgiram às primeiras formas de vida. Há grande quantidade de água distribuída no planeta, porém menos de 3% da água do mundo é doce, restando menos de 1% para o consumo (aqüíferos).

A Região Metropolitana de Belém (RMB) possui uma população superior a 2.000.000 de habitantes e vários problemas oriundos da ocupação desordenada, diversos autores destacaram os riscos de contaminação de aqüíferos devido à ocupação desordenada (MATTA, 2002; CABRAL, 2004; COSTA, 2004; PARANHOS, 2010).

Na região do nordeste Paraense, os dois principais sistemas aqüíferos explotados são o sistema Barreiras, cujos aqüíferos estão alojados unicamente em rochas siliciclásticas, e sotoposto a ele o sistema Pirabas, composto por aqüíferos formados por rochas calcárias e rochas siliciclásticas (PARANHOS, 2010). Os aqüíferos citados possuem excelente aproveitamento para abastecimento de água da população da RMB.

Estudos demonstram a vulnerabilidade destes aqüíferos mais profundos por processos geológicos (investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições e estruturas tectônicas caracterizadas por falhas normais e transcorrentes em regiões de recarga) (PARANHOS, 2010). As falhas normais nas superfícies potenciais de menor pressão constituíram-se num dos locais de maior favorabilidade para a recarga dos aqüíferos por elas interceptados.

Decorre-se então grande preocupação no que diz respeito à possibilidade de contaminação desses aqüíferos por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, haja vista a possibilidade de comunicação hidráulica entre os sistemas

aqüíferos, sendo que as águas para abastecimento público da cidade são originadas do aqüífero Pirabas.

O estudo isotópico na região norte é relativamente recente, sendo que os estudos utilizando a geoquímica isotópica e a hidrogeoquímica são bastante escassos, destaca-se trabalhos pontuais nessa região (ALLÉGRE et al. 1996; BORDALO et al. 2007).

O elemento estrôncio (Sr) possui grande aplicabilidade em estudos de águas através da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, como em intrusão de água do mar, origem de águas e análise de misturas (JORGENSEN et al. 2008).

Dessa forma foram realizados estudos entre os sistemas Barreiras e Pirabas, através da geoquímica isotópica (utilizando os isótopos de Sr) e a hidrogeoquímica clássica nas sub-áreas de Icoaraci e Ananindeua, bem como na região de Benevides e Capanema (para fins comparativos da região de recarga do aqüífero Pirabas) durante um ciclo hidrológico completo, para identificar misturas entres os aqüíferos.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA

O Grupo Barreiras é constituído por argilas, siltes, areias, cascalhos, arenitos, siltitos, conglomerados, níveis de concreções ferruginosas e arenito ferruginoso. Encontra-se distribuída amplamente no litoral norte do Brasil. A formação representada por depósitos siliciclásticos constituídos por uma variedade de rochas onde se destacam arenitos maciços e estratificados, argilitos laminados e maciços, pelitos e conglomerados (Tabela 1).

Sotoposta ao Grupo Barreiras encontra-se a Formação Pirabas, esta aflora no nordeste do Pará, de forma destacada nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas. É constituída por calcários, areias, argilas, margas, arenitos, siltitos, argilitos, depositados em ambiente marinho, durante o Mioceno, ricamente fossilífera (MATTA, 2002; PARANHOS, 2010).

Tabela 1. Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará (SAUMA FILHO, 1996).

Table 1. Stratigraphic Column of the Sedimentary Cover of the Northeast, PA (SAUMA FILHO, 1996).

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	SEDIMENTOS MODERNOS	Sedimentos recentes quartzosos com matéria orgânica; argila, silte e areia.
		PLEISTOCENO	PÓS-BARREIRAS	Sedimentos areno-argilosos inconsolidados, quartzosos, siltico-argilosos com arenitos ferruginosos intercalados.
	TERCIÁRIO	MIOCENO-PLIOCENO	FORMAÇÃO BARREIRAS	Arenitos de granulometria variada, mal selecionados, argilosos, intercalados a siltitos e argilosos de cores variadas, tendo-se ainda níveis de concreções ferruginosas.
		OLIGO-MIOCENO	FORMAÇÃO PIRABAS	Calcários e margas, intercalados com folhelhos cinza-esverdeados e arenitos calcíferos.

Quanto à hidrogeologia, os aquíferos possuem nomes homônimos ao seu perfil estrutural (Figura 1):

Sistema Pirabas: unidade composta por sedimentos marinhos, fossilíferos da Formação Pirabas (MATTA, 2002). Os níveis desse aquífero ocorrem em intervalos de 70 até 259 metros. São subdivididos em Pirabas Superior e Inferior, com vazões de até 600 m³/h, além do qual são aquíferos de notável qualidade, com pH próximo à neutralidade, com dureza moderadamente dura a dura, classificadas como cálcico-magnesianas-bicarbonatadas (PARANHOS, 2010).

Sistema Barreiras: unidade composta por argilas, siltes, areias, cascalhos, arenitos, siltitos e conglomerados (ROSSETTI, 2001). Aparece em profundidades de 25 a 90 metros, com camadas aquíferas em torno de 70 metros, de natureza livre a confinada, neste caso pela presença de camadas argilosas sucessivamente intercaladas com areias, com vazões entre 10 e 70 m³/h.

Sistema Pós-Barreiras: é formado por camadas de rochas argilo-arenosas, inconsolidadas, que ocorrem até os primeiros 25 metros de profundidade. Esses aquíferos apresentam um fraco potencial hidrogeológico.

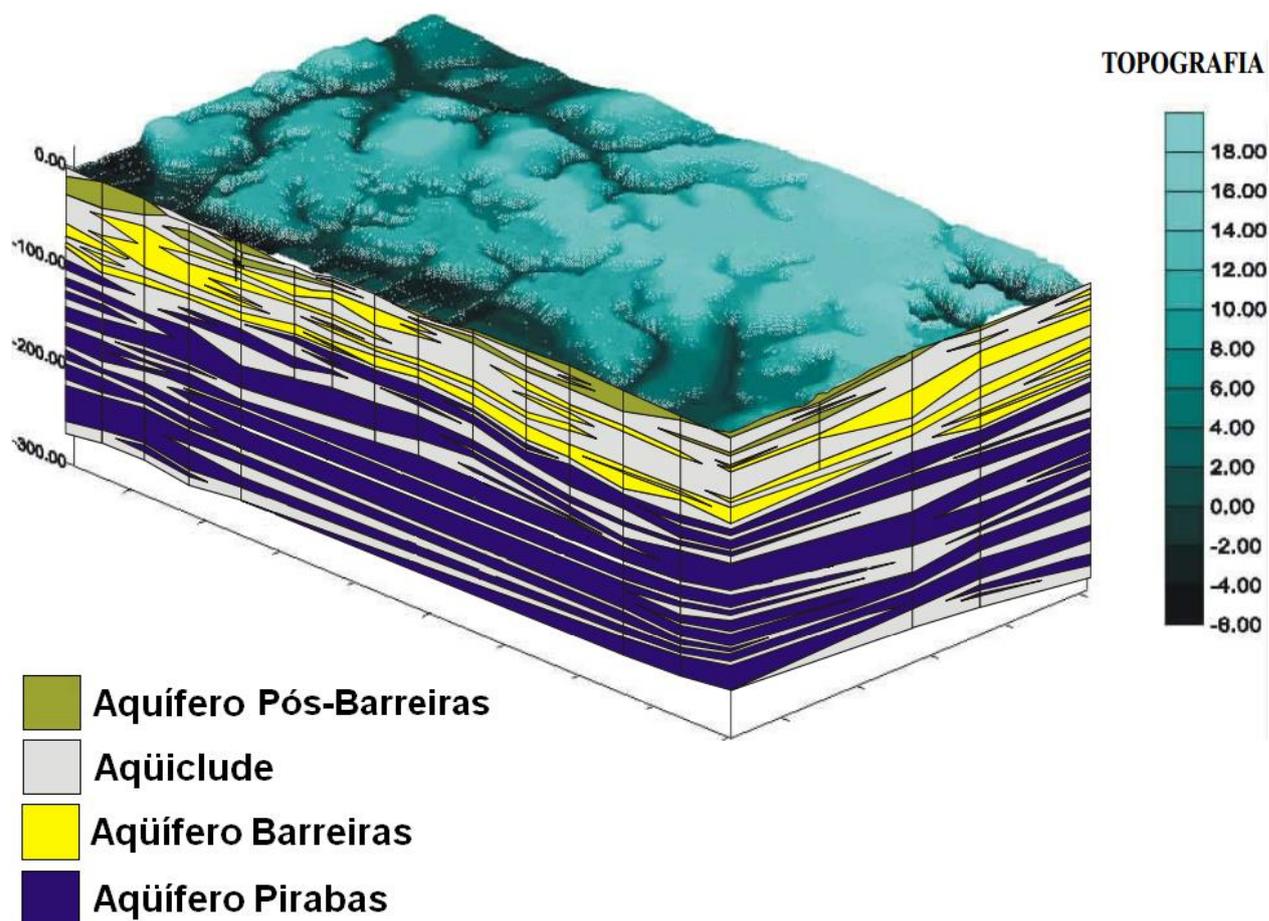


Figura 1. Aspectos Geométricos Tridimensionais do Sistema Aquífero do Município de Belém (Matta, 2002).

Figure 1. Three-dimensional Geometric Aspects of Aquifer System of Belém City (Matta, 2002).

ASPECTOS GEOLÓGICOS E NEOTECTÔNICOS

Até a década de 70 entendia-se que a região nordeste do Pará, assim como outras áreas de idade cenozóica no Brasil, fosse estável, sem indícios de tectonismo recente (PALHETA, 2008). Entretanto, após investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições (COSTA, 2004) e estruturas tectônicas que caracterizaram uma nova perspectiva quanto à atuação de processos neotectônicos no nordeste do Pará. Duas grandes movimentações neotectônicas foram reconhecidas na região nordeste do Pará, considerando os intervalos.

1) Mioceno-Plioceno: As falhas ocorrem nas regiões da ilha de Marajó, Belém, Ipixuna do Pará e zonas litorâneas. Segundo Palheta (2008) compreendem falhas

mestras normais, lítricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE, as quais estruturam a bacia na qual foram depositados os sedimentos da seqüência Pirabas-Barreiras (Figura 2);

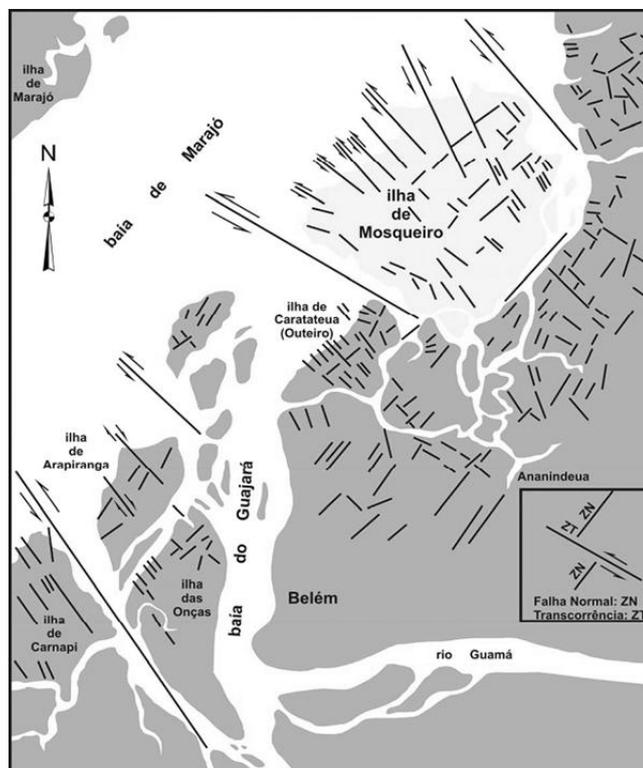


Figura 2. Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências (PALHETA, 2008).

Figure 2. Neotectonic model in region Belém-PA and surrounding areas (PALHETA, 2008).

2) Pleistoceno-Holoceno: Segundo Palheta (2008) a movimentação das falhas normais provocou a distribuição, em faixas alternadas, das formações Ipixuna e Barreiras. Expôs isolada a Formação Pirabas em meio a Formação Barreiras; possibilitou a deposição da seqüência Pós-Barreiras; gerou formação de arcos, de cotovelos, de segmentos retos, de capturas e de segmentos meandantes na rede de drenagem.

A partir dos estudos de Costa (2004), o qual se baseia na análise de drenagem da RMB e a geometria dos aquíferos a partir de falhas normais, pode-se evidenciar a influência da neotectônica devido à similaridade do arranjo. Segundo Pinheiro (2009) a correlação de poços situados em um mesmo bloco individual demonstrou que as camadas geológicas que ocorrem em cada um deles têm atitudes distintas, influenciadas pela atuação de processos neotectônicos.

Por serem falhas normais, superfícies potenciais de menor tensão, elas se constituem um dos locais mais favoráveis para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas, pois as falhas e fraturas abertas são condutos dos sistemas hidrogeológicos (Figura 3).

Abreu (2012) aponta através de estudo morfoestrutural realizado em Castanhal-PA que as falhas estruturais no nordeste do Pará configuram importantes condutos para a recarga dos sistemas hidrogeológicos.

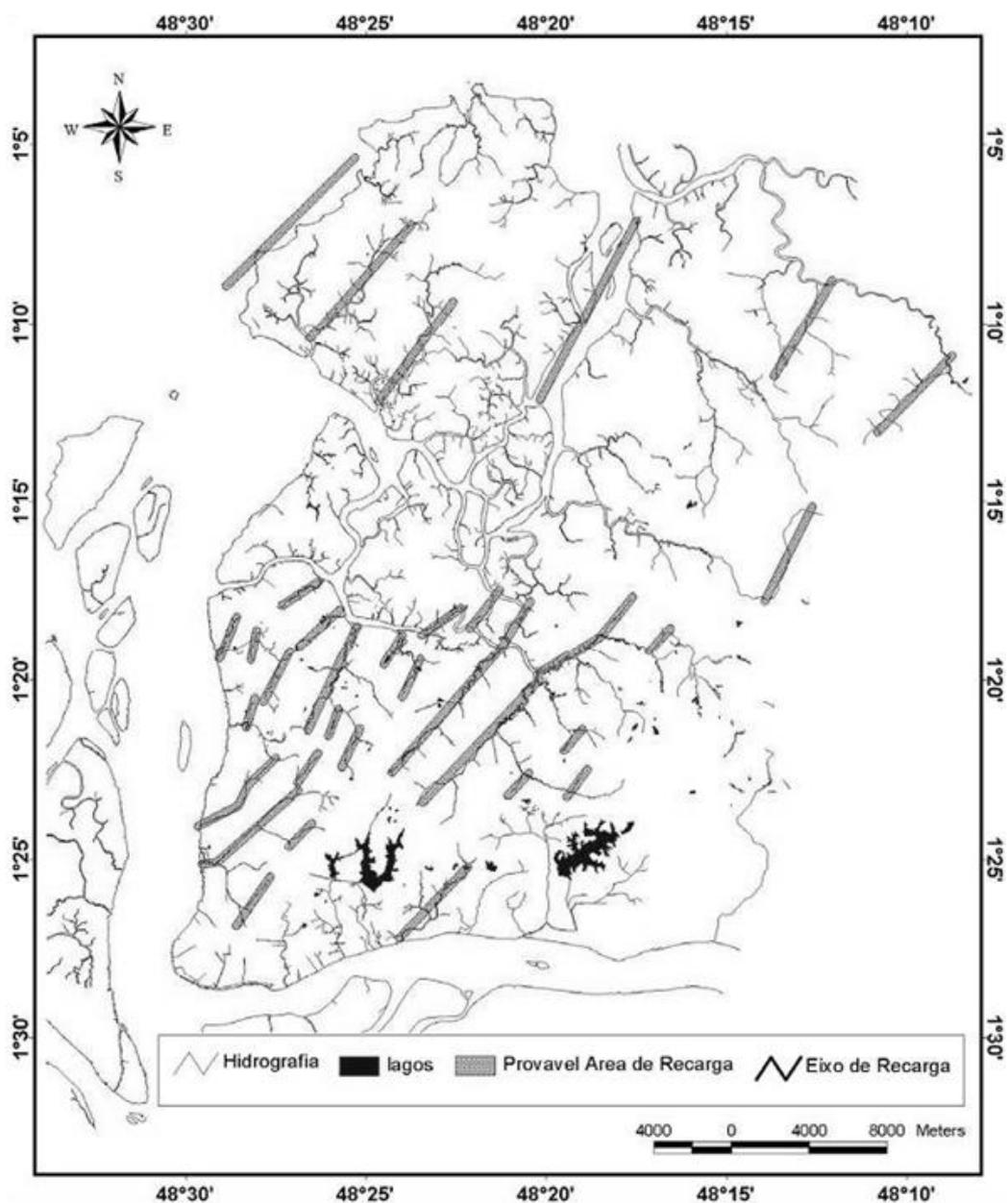


Figura 3. Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais (COSTA, 2004).

Figure 3. Map of probable major recharge areas in RMB, located along the route of normal faults (COSTA, 2004).

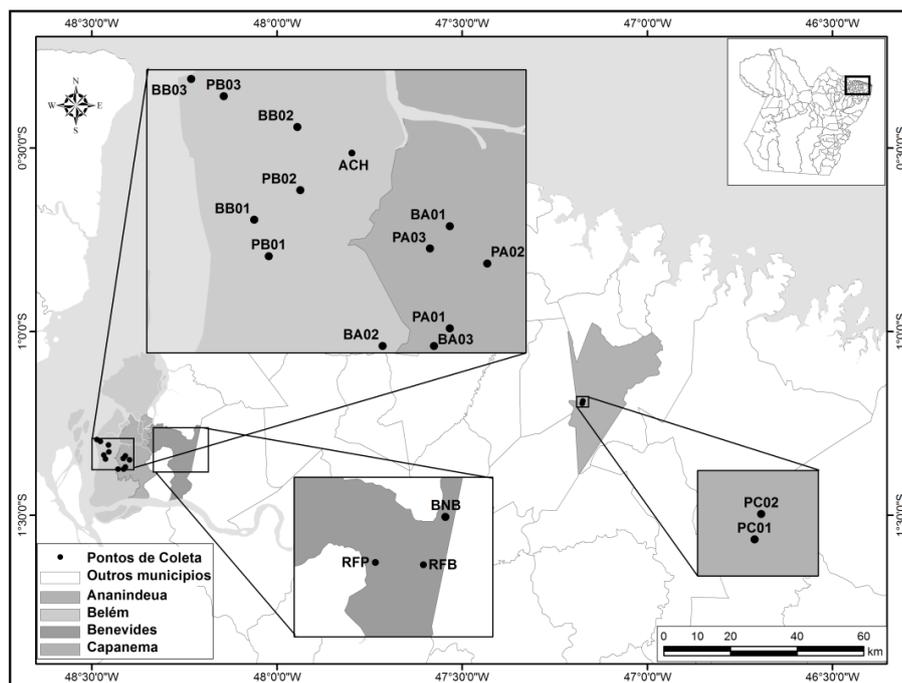
METODOLOGIA

Localização dos Pontos

As amostragens foram realizadas em regime bimestral desde Julho-Agosto de 2010 a Maio-Junho de 2011 caracterizando um ciclo hidrológico completo contemplando os meses chuvosos e meses mais secos. Considerando o referido período, totalizou-se (6) seis campanhas de coleta (Figura 4).

Figura 4. Mapa de localização e de amostragem da área de trabalho (Belém – Distrito de Icoaraci, e Ananindeua), mostrando os pontos de *backgrounds* Benevides e Capanema (IBGE, 2000).

Figure 4. Location map and sampling of the work area (Belém - Icoaraci District and Ananindeua), showing the background points in Capanema and Benevides (IBGE, 2000).



A nomenclatura das siglas, considerando a Figura 4, são as seguintes: PC (Aqüífero Pirabas - Poços Capanema) / BNB (Aqüífero Barreiras - Poço Benevides) / BB (Aqüífero Barreiras - Poços Belém) / BA (Aqüífero Barreiras - Poços Ananindeua) / PB (Aqüífero Pirabas - Poços Belém) / PA (Aqüífero Pirabas - Poços Ananindeua) / ACH (Água da Chuva) / RFB (Rocha da Formação Barreiras) / RFP (Rocha da Formação Pirabas).

Adotaram-se as campanhas de Julho-Agosto/2010, Setembro-Outubro/2010 e Maio-Junho/2011, como período seco, enquanto Novembro-Dezembro/2010, Janeiro-Fevereiro/2011 e Março-Abril/2011 foram considerados para efeito de análise e cálculo como período chuvoso.

Para estudo isotópico e da química das águas do aqüífero Barreiras e Pirabas, em Ananindeua e Icoaraci, foram escolhidos 3 poços em cada unidade aqüífera: em Ananindeua foram utilizados 3 poços profundos na COSANPA e 3

poços rasos de particulares; em relação a Icoaraci, foram utilizados 3 poços profundos da SAAEB, bem como 3 poços rasos de particulares, totalizando 6 amostras em cada sub-área, 12 amostras no total (cada campanha de coleta), foram realizados ainda coletas de 2 amostras em poços rasos em Capanema (Aqüífero Pirabas) e em 1 poço raso de Benevides (Aqüífero Barreiras).

Complementa-se com análises química e isotópica 1 (uma) análise de água da chuva dentro do período da amostragem em Belém-PA, bem como análises isotópicas da rocha aqüífera (na seções aqüíferas do Barreiras e Pirabas).

As amostragens em poços pirabas referem-se a empresas públicas com finalidade de abastecimento público, a ilustração abaixo (Figura 5) refere-se o poço PB-01, da SAAEB, destaca-se que as amostras foram coletadas próximas a saída de água do poço, através de registro lateral.



Figura 5. Poço Pirabas, referente à amostra PB-01.
Figure 5. Pirabas well, referring to the sample PB-01.

A escolha dos poços Barreiras, além de serem próximas às referida falhas, foi observado à questão sanitária do poço, para prejudicar o mínimo possível nas análises químicas. Sabe-se que a maioria dos poços rasos sofre a interferência antrópica, devido à descarga de esgotos lançadas em fossas e sumidouros, contaminando o aqüífero Barreiras na sua parte médio-superior.



Figura 6. Local de Amostragem de Poço Barreiras, observar a boa construção do mesmo, assim impedindo o *input* de contaminantes.
Figure 6. Local Sampling Barreiras Well, look at the good construction of it, thus preventing the input of contaminants.

Acima se encontra a ilustração de um poço raso (Figura 6), no qual apresenta parâmetros observados pela legislação ambiental vigente, apresentando lacre de proteção, laje de proteção e fossa/esgoto em distância segura.

Análises Químicas

Utilizaram-se garrafas de polietileno com tampa de enroscar e volume de 100 mL (Ferro total) e 500 mL (demais parâmetros por método titulométrico e cromatografia iônica), lavadas inicialmente com solução ácida e em seguida com água deionizada. Esse procedimento evita qualquer tipo de contaminação proveniente do frasco (CETESB, 1978).

Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos *in situ* (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos) e então acondicionadas em baixa temperatura para transporte até o Laboratório de Hidrogeoquímica da UFPA.

A concentração de (HCO_3^-) foi determinado a partir dos valores numéricos da alcalinidade total (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976).

Para ferro total utilizou-se o método da orto-fenantrolina, com a determinação espectrofotométrica de ferro (CETESB, 1978). A concentração de sílica é obtida combinando reagentes, ácido ascórbico e ácido oxálico (GRASSHOFF, 1964).

Para cromatografia líquida, as amostras foram filtradas em filtros de Marca Millipore de 0,45 μm , e estocadas em garrafas de polietileno de 100 mL para posterior análise.

As concentrações de cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- e SO_4^{2-}) foram determinadas por cromatografia líquida utilizando-se cromatógrafo de íons DIONEX DX-120. Para a análise de cátions utilizou-se coluna catiônica (CSRS ULTRACS12A DIONEX), eluente 20 Mm MSA (Ácido Metanosulfônico) e fluxo 1,0 mL min^{-1} . Para análise dos ânions utilizou-se coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 DIONEX), como eluente solução 3,5 mM Na_2CO_3 /1,0 mM NaHCO_3 e fluxo 1,2 mL min^{-1} .

Para cálculo do balanço de massa iônico (ΔIon), considerou-se a seguinte fórmula (CUSTODIO, 1976):

$$\Delta\text{Ion} (\%) = 100 * (\Sigma r \text{ cátions} - \Sigma r \text{ ânions}) / (\Sigma r \text{ cátions} + \Sigma r \text{ ânions})$$

As amostras no aquífero Barreiras apresentaram balanço iônico no valor médio de 8,8%, enquanto que no aquífero Pirabas a média foi de 4,7%. A diferença se dá pela maior concentração de íons no Pirabas, fruto de águas com tempo maior de percolação e dissolução de elementos químicos neste aquífero.

Análise Isotópica de Sr

As amostras destinadas à análise isotópica de estrôncio (Sr) foram filtradas em filtros de Marca Millipore de 0,45 μm , acidificadas com HNO_3 -bidestilado a pH em torno de 2 e estocadas em garrafas de polietileno de 250 mL refrigeradas (NÉGREL e PETELET-GIRAUD, 2005; BORDALO et al. 2007).

Baseando-se na metodologia implantada no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA segundo Bordalo et al. (2007) para determinação da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas, evaporou-se 200 ml de amostra quando dos poços Barreiras, 100 ml de amostra quando de proveniência do Pirabas (devido a diferença da quantidade de estrôncio dissolvida na amostra) e 500 ml de amostra de água da chuva; e posteriormente solubilizados com 1 mL de HNO_3 -bidestilado 3,5 mol/L, para separação cromatográfica do Sr com resina Sr.spec.

Quanto à análise das rochas da formação Barreiras e Pirabas, utilizou-se o método de abertura de rocha total, no qual se utilizou 1 ml HF-bidestilado, 0,5 ml de HNO₃-bidestilado (13N) e 0,5 ml de HClO₄, após o ataque químico foi-se solubilizado com 1mL de HNO₃-bidestilado 3,5 mol/L, realizando-se a separação cromatográfico do Sr com a resina Sr.spec.

Após separação e evaporação das amostras, além de todos os procedimentos laboratoriais para evitar ao máximo a contaminação de Sr, adiciona-se a cada amostra 1 mL de HNO₃** concentrado (3%). Em seguida são levadas para análises num espectrômetro de massa (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS, Modelo Neptune), onde foram feitas as leituras das amostras. As razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr foram normalizadas para ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0,1194 e o fracionamento de massa foi corrigido no modo exponencial. A concentração de Estrôncio das amostras foi determinada através da mistura com traçador de Sr (⁸⁶Sr/⁸⁴Sr = 0,054998; ⁸⁷Sr/⁸⁴Sr = 0,021387; ⁸⁸Sr/⁸⁴Sr = 0,165433) do Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA. Para o controle da precisão analítica utilizou-se o padrão SRM-987 que forneceu uma razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de 0,710272 ± 0,000020 (2σ, média de 14 leituras) e os brancos totais de Sr ficaram entre 2,72 e 3,28 ng.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição Química

A Tabela 2 apresenta os valores das amostras em poços dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas coletadas no verão e no inverno (Julho de 2010 a Junho de 2011).

Os valores de pH das amostras apresentam grande diferença entre os sistemas aquíferos, variando no aquífero Barreiras de 4,3 a 6,2, atingindo no aquífero Pirabas valores entre 7,0 e 8,0. Os valores no Barreiras refletem a disponibilidade de H⁺, principalmente na forma de Ácido Silícico (2NaAlSi₃O₈ + 9H₂O + 2H₂CO₃ → Al₂Si₂O₅(OH)₄ + 2Na⁺ + 2HCO₃⁻ + **4H₄SiO₄**), no caso do Pirabas o valor é fortemente contribuído pela presença de bicarbonato oriundo da dissolução da calcita (CaCO₃⁻ + H₂CO₃⁻ → Ca²⁺ + **2HCO₃⁻**).

Tabela 2. Composição química das águas dos Aqüíferos Barreiras e Pirabas, e *backgrounds* em Capanema e Benevides.

Table 2. Chemical composition of water in the Barreiras and Pirabas Aquifers, and backgrounds in Capanema and Benevides.

Parâm.	Aqüíferos Barreiras ⁱ				Aqüíferos Pirabas ⁱⁱ				Capanema (Pirabas) ⁱⁱⁱ		Benevides (Barreiras) ^{iv}	
	Mín.	Máx.	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Mín.	Máx.	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴	Período Seco ⁴	Período Chuvoso ⁴
pH	4,3	6,2	5,0	5,1	7,0	8,0	7,5	7,4	7,40	7,35	4,60	4,54
T °C	26,30	30,70	28,45	27,93	28,50	31,00	29,84	29,83	29,32	28,17	27,27	27,00
Cond. ¹	11,10	92,20	39,75	35,53	222,0	406,0	344,0	331,9	670,37	607,83	28,37	26,07
STD ²	10,0	82,0	38,2	34,6	105,0	181,0	158,4	156,7	306,83	311,83	22,00	18,00
Sílica ³	0,84	7,60	3,77	3,04	6,06	16,02	11,40	10,84	5,81	6,09	4,69	4,66
Na ⁺	0,24	0,50	0,38	0,37	0,05	0,18	0,12	0,13	0,51	0,43	0,08	0,07
K ⁺	0,005	0,056	0,023	0,021	0,02	0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,003	0,003
Mg ²⁺	0,001	0,061	0,012	0,010	0,07	0,13	0,09	0,10	0,11	0,11	0,003	0,001
Ca ²⁺	0,011	0,327	0,112	0,111	1,78	2,53	2,12	2,04	3,43	3,50	0,03	0,03
Sr ²⁺	0,001	0,007	0,002	0,002	0,016	0,022	0,019	0,019	0,022	0,023	0,0002	0,0002
Fe ²⁺	0,003	0,014	0,007	0,005	0,006	0,022	0,013	0,012	0,03	0,03	0,004	0,001
Cl ⁻	0,18	0,42	0,29	0,27	0,05	0,12	0,09	0,08	0,43	0,42	0,07	0,06
NO ₃ ⁻	0,05	0,15	0,08	0,09	nd	nd	nd	nd	0,01	nd	0,03	0,02
SO ₂ ⁻	0,05	0,17	0,09	0,10	0,08	0,16	0,11	0,12	0,33	0,38	0,02	0,01
HCO ₃ ⁻	nd	nd	nd	Nd	1,64	2,27	1,95	1,87	3,04	3,06	nd	nd
Σcátions	---	---	0,53	0,52	---	---	2,40	2,35	4,13	4,12	0,16	0,11
Σânions	---	---	0,46	0,46	---	---	2,17	2,07	3,81	3,86	0,12	0,09

¹Condutividade (µS/cm). ²Sólidos Totais Dissolvidos (mg/l). ³Sílica dissolvida(mg/L). ⁴Média. nd = não detectado. Cátions e ânions (meq/L).

ⁱ(número de amostras=36). ⁱⁱ(número de amostras = 36). ⁱⁱⁱ(número de amostras =12). ^{iv}(número de amostras =6).

A condutividade no sistema Barreiras varia de 11,10 a 92,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto no Pirabas os valores são de 222,0 a 406,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de STD seguem a mesma tendência da condutividade nos aquíferos amostrados, reforçando a diferença do tempo de percolação nestes aquíferos, no qual as águas do Pirabas são mais antigas que a do Barreiras.

Comparando os resultados da RMB com amostras de outras regiões no qual afloram o aquífero Barreiras (Benevides) e aquífero Pirabas (Capanema), encontram-se diferenças físico-químicas marcantes.

Quanto ao Barreiras, aos valores de referência (*backgrounds*) apresentaram-se mais ácidas, com menor quantidade de íons dissolvidos, conseqüentemente, menor valor de STD e condutividade elétrica mais baixa, essa tendência se apresentou em todos os parâmetros com exceção da Sílica que apresentou ligeiro aumento da concentração.

Entretanto nos *backgrounds* de Capanema, a tendência foi inversa, com amostras mais básicas, maior quantidade de íons dissolvidos, maior valor de STD e condutividade elétrica maior, sendo que o parâmetro de exceção novamente foi a sílica, apresentando menor concentração que nas amostras da RMB.

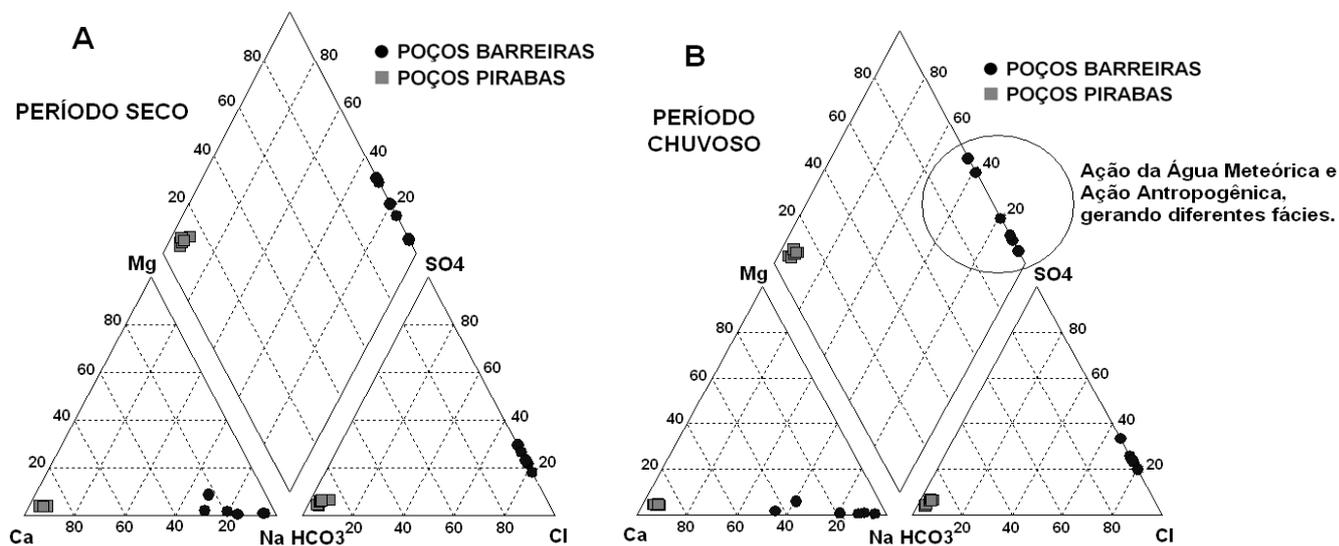


Figura 7. Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso.

Figure 7. Diagram of Piper in the wells sampled. A) Dry and B) Wet.

A partir dos diagramas trilineares de Piper confeccionados no Software *Aquaquem v3.7 for Windows* (AQUAQUEM, 1997) observa-se que a fácies hidroquímica predominante no Barreiras é a $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ devido a contribuição majoritária da precipitação pluviométrica, enquanto que no Pirabas predomina a fácies $\text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+}$ influenciados principalmente pela litologia (FENZL, 1988).

A diferença de sílica dissolvida entre os aquíferos dá-se pela hidrólise dos silicatos. Devido à reação ser lenta e de baixa solubilidade (RAMAGE, 2005), a concentração de sílica aumenta com o tempo de percolação no aquífero, ocorrendo maiores concentrações de sílica no Pirabas.

A variação sazonal mostra que os aquíferos possuem pouca sensibilidade quanto ao período climático (Figura 7). Destaca-se que no período chuvoso há uma variação maior do tipo de fácies, indicando maior suscetibilidade destes aquíferos quanto à ação intempérica natural e ação de cunho antropogênico, conforme observado na Figura 7 a partir da mudança de fácies de poços no aquífero Barreiras (aquífero raso).

É importante apontar a seguinte tendência iônica no aquífero Barreiras: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Fe}^{2+}$ para os cátions e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ para os ânions. Neste caso, os cátions possuem concentrações químicas controladas por minerais feldspáticos, como anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e albita ($2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), que a partir do intemperismo nas rochas, geram a Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), principal produto do intemperismo encontrado no aquífero Barreiras. Quanto aos anions, apresenta-se o Cl^- como íon principal, fruto da precipitação pluviométrica e a sua conservação em subsuperfície, destacando ainda o NO_3^- , elemento comum em aquíferos que sofrem ação antrópica direta, devido à carga de detergentes e esgotos a partir de fossas e sumidouros.

No aquífero Pirabas é encontrada a seguinte tendência: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Fe}^{2+} > \text{Sr}^{2+}$ para cátions e $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ para ânions. Os cátions apresentam a contribuição de minerais como a calcita (CaCO_3) e dolomita (MgCaCO_3), e os ânions refletem o ambiente carbonático e o seu produto da dissolução (HCO_3^-).

A partir da análise de correlação, evidencia-se excelente relação entre os sistemas aquíferos estudados. A análise se deu a partir da junção de dados dos poços do Barreiras e Pirabas no mesmo período de amostragem, no caso, seco e chuvoso.

O enriquecimento de íons nestas águas é proporcional ao aumento de sólidos totais dissolvidos e por consequência o aumento da condutividade.

Tabela 3. Matriz de Correlação ($p < 0,05$) dos principais parâmetros hidrogeoquímicos dos aquíferos Barreiras e Pirabas.

Table 3. Correlation Matrix ($p < 0.05$) of the main hydrogeochemical parameters in Barreiras and Pirabas aquifers.

	pH	Cond.	STD	Fe ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
(A) Período Seco											
pH	1										
Cond.	0,95	1									
STD	0,91	0,97	1								
Fe ²⁺	0,73	0,71	0,71	1							
Cl ⁻	-0,89	-0,95	-0,89	-0,58	1						
SO ₄ ²⁻	0,52	0,53	0,64	0,50	-0,36	1					
Na ⁺	0,95	-0,98	-0,95	-0,62	0,95	-0,55	1				
K ⁺	0,66	0,63	0,77	0,62	-0,44	0,78	-0,62	1			
Mg ²⁺	0,96	0,96	0,97	0,78	-0,88	0,57	-0,94	0,77	1		
Ca ²⁺	0,95	0,99	0,98	0,72	-0,94	0,57	-0,97	0,69	0,97	1	
Sr ²⁺	0,96	0,97	0,97	0,74	-0,87	0,68	-0,96	0,75	0,97	0,98	1
(B) Período Chuvoso											
pH	1										
Cond.	0,96	1									
STD	0,92	0,97	1								
Fe ²⁺	0,75	0,72	0,74	1							
Cl ⁻	-0,86	-0,92	-0,85	-0,58	1						
SO ₄ ²⁻	0,32	0,33	0,46	0,31	-0,15	1					
Na ⁺	0,93	-0,98	-0,94	-0,62	0,93	-0,34	1				
K ⁺	0,75	0,79	0,89	0,56	-0,60	0,73	-0,77	1			
Mg ²⁺	0,97	0,96	0,97	0,74	-0,81	0,40	-0,92	0,86	1		
Ca ²⁺	0,98	0,99	0,98	0,71	-0,89	0,38	-0,97	0,83	0,98	1	
Sr ²⁺	0,96	0,98	0,97	0,72	-0,84	0,49	-0,96	0,86	0,97	0,99	1

As Tabelas 3a e 3b (considerando $r \geq 0,80$) apresentam excelentes correlações entre Cl e Na ($r = 0,95$ e $0,93$), Cl e Mg ($r = -0,88$ e $-0,81$), Cl e Ca ($r = -0,94$ e $-0,89$), Cl e Sr ($r = -0,87$ e $-0,84$), Na e Mg ($r = -0,94$ e $-0,92$), Na e Ca ($r = -0,97$ ambos), Na e Sr ($-0,96$ ambos), K e Mg, Ca, Sr ($r = 0,86$, $0,83$ e $0,86$, respectivamente, estas correlações somente no chuvoso), Mg e Ca ($r = 0,97$ e $0,98$), Mg e Sr ($r = 0,97$ ambos), Ca e Sr ($r = 0,98$ e $0,99$). Estas correlações relevantes estão associadas a sua afinidade química e as diversas reações que liberam os íons para o meio aquoso, além do qual reforçam a ligação hidráulica entres os dois aquíferos (considerando o aspecto de proporcionalidade que neles se apresentam),

com correlações positivas e negativas, sendo que no período chuvoso há maior quantidade de correlações relevantes, apontando neste período maior pronúncia de mistura entre as águas desses aquíferos.

Modelamento Hidrogeoquímico

A partir de diagramas de composição do tipo Schöller, pode-se representar sistemas convencionais de águas subterrâneas. A seguir encontram-se as composições das águas nos dois períodos climáticos.

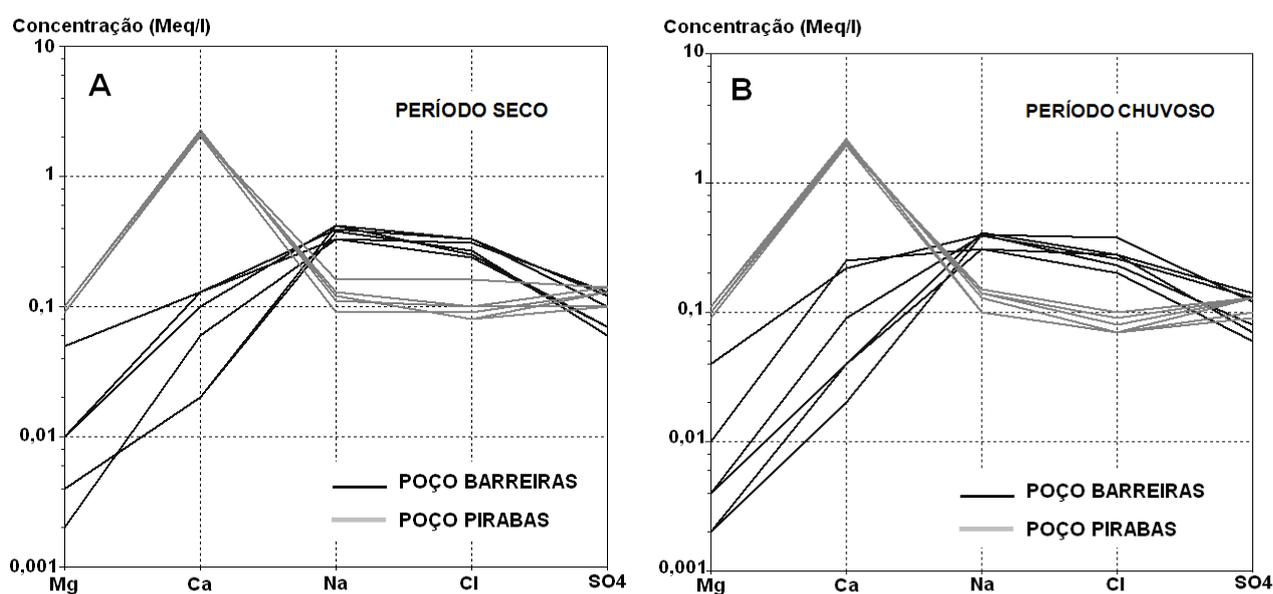


Figura 8. Diagramas de Composição de Schöller período: A) seco e B) chuvoso.

Figure 8. Composition Schöller Diagrams: A) dry and B) wet.

Nas Figuras 8a e 8b, encontram-se os padrões característicos em cada tipo de aquífero, no período seco e chuvoso há predominância do íon Ca^{2+} com mais de 46% da soma dos íons no aquífero Pirabas, enquanto que no aquífero Barreiras o íon mais principal é o Na^+ atingindo 37% da soma total de íons. Nas duas situações o íon dominante controla o pH do respectivo aquífero resultando em águas ácidas no Barreiras e águas próximas a neutralidade no Pirabas.

Ressalta-se o comportamento em leque nos dois sistemas aquíferos, apresentando valores em linhas paralelas (PARANHOS, 2010), demonstram que as águas do aquífero Barreiras se misturam com a do Pirabas, pois se não houvessem misturas entre os aquíferos, as linhas estariam praticamente sobrepostas e o padrão gráfico seria outro (MAZOR, 2004).

A Figura 9 mostra o modelamento geoquímico com o auxílio do Software *Aquaquem v3.7*, utilizando as médias em cada ponto de coleta (3 amostras do período seco no respectivo ponto de coleta; e 3 amostras do período chuvoso no respectivo ponto de coleta). Nota-se que as amostras do aquífero Pirabas possuem maior estabilidade não possuindo tanta variabilidade entre os poços amostrados, entretanto no aquífero Barreiras as amostras tendem a ser mais variáveis, devido sua maior exposição ao *input* atmosférico neste aquífero (Na^+ e Cl^-) e contribuições antropogênicas através da presença de NO_3^- .

Utilizando a ferramenta "*Mix Samples*" contida no programa citado, é possível calcular o grau de mistura entre as águas. No caso estudado, a percentagem de misturas em 10% assemelha-se com as amostras do Pirabas, apresentando concentrações concordantes com o conjunto de parâmetros para amostras deste aquífero. Ressalta-se que este grau de interação foi resultado da modelagem no software considerando 10% da concentração química dissolvida na amostra do Barreiras com 90% da concentração química dissolvida na amostra do Pirabas no período chuvoso.

Outras combinações (20 a 50% de misturas), bem como testes no período seco não obtiveram padrão concordante durante todo o conjunto de parâmetros para amostras do Pirabas.

Dentre os elementos da Figura 9, o Cl^- é um bom indicador de misturas de águas entre os aquíferos. As concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero (SCHÖLLER, 1962). As águas de um aquífero confinado quando plotadas num diagrama de composição usando na abscissa um elemento ou parâmetro conservativo deveriam agrupar-se indicando a presença de apenas um tipo de água (MAZOR, 2004), entretanto as amostras se distribuíram de forma alinhada no Aquífero Pirabas, representando linha de mistura (Figura 9).

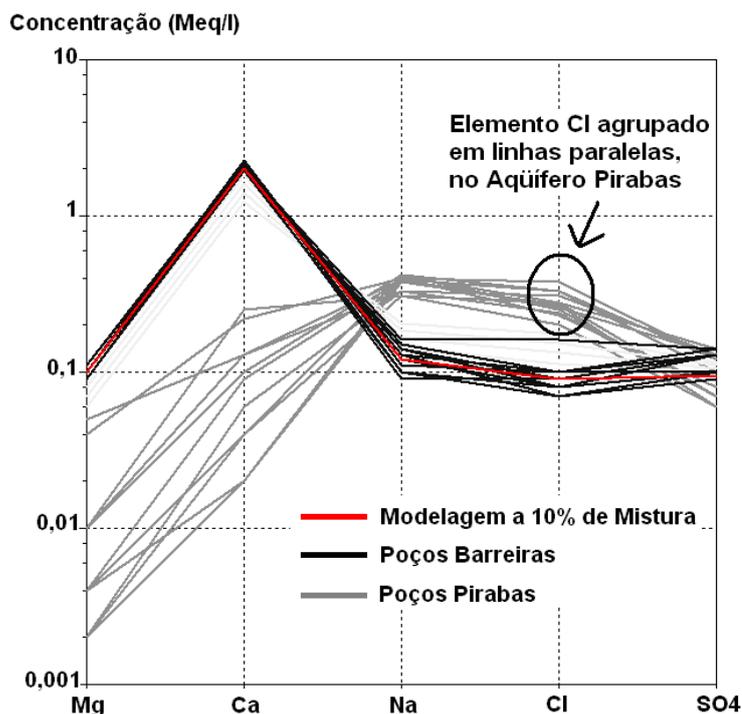


Figura 9. Modelamento geoquímico a partir do Diagrama de Schöller

Figure 9. Diagram Schöller from the geochemical modeling

Geologia Isotópica do Estrôncio (Sr) e a sua utilização em Análise de Mistura de Águas

O estrôncio tem quatro isótopos estáveis que ocorrem naturalmente, ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr e suas abundâncias isotópicas são 0,56%, 9,87%, 7,04% e 82,53%, respectivamente. A abundância dos isótopos de estrôncio é variável por causa da formação de ^{87}Sr radiogênico através do decaimento natural do ^{87}Rb , dessa forma, a composição isotópica de estrôncio em rocha ou mineral depende da idade e da quantidade de rubídio presente no meio (FAURE, 1986).

O valor da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dissolvido na água meteórica é aproximadamente 0,7092 (NÉGREL & PETELET-GIRAUD, 2005). Essa razão é considerada homogênea devido ao longo tempo de residência do Sr nos oceanos, da ordem de 5×10^6 anos, quando comparado com o tempo de mistura das águas oceânicas, de cerca de 10^3 anos (BANNER et al. 1994).

A variação na composição isotópica do Sr tem sido usada para determinar a fonte de Sr de um corpo de água em particular, a história geoquímica dessas águas (interação rocha-água) e, principalmente, o potencial de mistura dessas águas (LYONS et al. 1995). A Tabela 4 apresenta algumas razões isotópicas conhecidas.

Tabela 4 – Razões Isotópicas de Sr em diversos ambientes.

Table 4 – Isotopic ratios of Sr in various environments.

Ambientes	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Fonte
Crosta Continental	0,7123	ALLEGRE et al. 1996
Carbonatos Marinheiros Fanerozóicos	0,707 - 0,709	BANNER, 2004
Água do Mar Atual	0,7092	BANNER, 2004
Chuva em áreas oceânicas	0,7092	CAPO et al. 1992
Chuva em área urbana	0,7103	XU et al. 2009
Chuva em área continental	0,7130	XU et al. 2009
Sedimentos em Suspensão do Rio Amazonas	0,7109	BANNER, 2004
Sedimentos em Suspensão do Rio Negro	0,716223	GAILLARDET et al. 1997
Sedimentos em Suspensão do Rio Trombetas	0,732295	GAILLARDET et al. 1997
Média das rochas dos Andes	0,70566 - 0,70951	ROLLINSON, 1993

Bordalo et al. (2007) testaram a potencialidade da ferramenta isotópica de estrôncio em três regiões da zona bragantina, revelando valores de 0,71027 a 0,71364 no poço da região do Acarajó, refletindo maior contribuição de Sr radiogênico compatível com o ambiente continental (Barreiras), já no Pântano Salino aonde se encontra um ambiente transicional os valores variam de 0,70959 a 0,70984, e no “Furo do chato” localizado no ambiente de mangue intermaré, revela a influência marinha nas águas subsuperficiais com valores de 0,70914-0,70933. Jorgensen et al. (2008) com o objetivo de investigar intrusão de água do mar destacaram valores em aquíferos não-confinados na costa da Dinamarca que representam mistura de águas a partir da água do mar, aquífero arenoso e aquífero calcário, sugerindo razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,7092, 0,7094 e 0,7082, respectivamente.

Resultados – Razões Isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

A Tabela 5 apresenta os resultados isotópicos de Sr das amostras dos aquíferos Barreiras e Pirabas, com *backgrounds* comparativos em local de possível recarga de cada aquífero (Amostras BNB, PC-01 e PC-02) e rochas das formações homônimas. Salienta-se que as amostras do Barreiras se apresentam mais radiogênicas que as amostras do Pirabas. Esses resultados refletem as características do ambiente por onde circula a água, no qual as águas do aquífero Barreiras são mais radiogênicas representando a natureza continental dos litotipos, enquanto as águas do aquífero Pirabas são menos radiogênicas devido ao ambiente

predominantemente marinho dessas rochas, apresentando razão isotópica similar a água do mar no valor de 0,7092 (FAURE, 1986). Nota-se que no período seco, as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ quando comparado em cada aquífero são diferentes.

No período chuvoso, é notável a reomogeneização das razões isotópicas entre os sistemas aquíferos; processos de recarga são maiores no inverno, isso é apresentando através da diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no Barreiras considerando o input de água da chuva com razão de 0,705 (os valores no sistema Barreiras que eram na casa de 0,71 decaíram para valores similares ao aquífero Pirabas na faixa de 0,708 – 0,709).

É importante salientar que as amostras do Barreiras são mais suscetíveis ao *input* atmosférico, havendo maior contribuição no período chuvoso.

Comparando-se com a Tabela 4, na qual estão presentes valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de diversos ambientes, constata-se que a rocha da Formação Barreiras (0,727492) como também as do respectivo aquífero apresentam razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em geral acima de 0,71, similares a crosta continental e de ambientes como os sedimentos continentais exemplificados por resultados de sedimentos em Suspensão do Rios Amazonas, Negro e Trombetas, respectivamente, 0,7109; 0,7162 e 0,7322 (BANNER, 2004; GAILLARDET et al. 1997).

Os resultados amostrados de rocha do Pirabas e do aquífero homônimo (Tabela 5) apresentam razões similares aos macrofósseis marinhos no intervalo de 0,7086-0,7088 (BELÚCIO, 2001); como também a água do mar atual e chuvas em área oceânicas com o valor de 0,7092 (BANNER, 2004; CAPO et al. 1992).

A concentração de estrôncio praticamente não sofreu variações nos períodos sazonais, entretanto é marcante a diferença de concentração em cada sistema aquífero, no aquífero Barreiras a variação foi de 10 a 280 ppb, enquanto no Pirabas a oscilação foi de 750 a 880 ppb (Tabela 5). A diferença de resultados deve-se ao tipo de rocha encaixante no aquífero Pirabas no caso o carbonato de cálcio, ressalta-se que o estrôncio (Sr) é um elemento químico membro do grupo dos metais alcalinos terrosos e o seu raio iônico (1,13Å) é próximo ao do cálcio (0,99Å) substituindo o cálcio em minerais como o carbonato de cálcio, especialmente aragonita (FAURE, 1986). Isso explica as mais altas concentrações de Sr no aquífero Pirabas, sendo que o *background* apresenta teores mais altos de Sr devido à maior quantidade de Ca, portanto maior troca e dissolução entre esses elementos.

Tabela 5 – Razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dos aquíferos Barreiras e Pirabas nos períodos sazonais.
 Table 5 – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios of the Barreiras and Pirabas aquifers in the seasonal period.

Unidade/Amostras		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$				
	Sazonalidade	Sr (ppb)*	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Mai-Jun/2011	
PERÍODO SECO	BARREIRAS	BB-01	80	0,711090 (31)	0,710025 (29)	0,707898 (5)
		BB-02	20	0,711210 (31)	0,709677 (11)	0,706567 (34)
		BB-03	230	0,710845 (19)	0,707626 (35)	0,710217 (9)
		BA-01	10	0,719799 (50)	0,718607 (35)	0,710977 (75)
		BA-02	20	0,716305 (46)	0,711528 (46)	0,712348 (11)
		BA-03	280	0,709508 (23)	0,705911 (19)	0,708525 (4)
		BNB	10	0,716579 (99)	0,712604 (65)	0,714777 (75)
PERÍODO SECO	PIRABAS	PB-01	820	0,709543 (5)	0,708975 (24)	0,708998 (3)
		PB-02	810	0,709642 (3)	0,709481 (21)	0,708957 (4)
		PB-03	880	0,709588 (4)	0,709322 (6)	0,709056 (3)
		PA-01	840	0,710939 (23)	0,709458 (10)	0,709127 (3)
		PA-02	750	0,709890 (23)	0,709404 (11)	0,709120 (6)
		PA-03	770	0,709961 (15)	0,708571 (11)	0,708982 (9)
		PC-01	820	0,709046 (5)	0,710709 (3)	0,708591 (4)
		PC-02	810	0,709573 (5)	0,709452 (4)	0,708722 (5)
	Sazonalidade	Sr (ppb)*	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	
PERÍODO CHUVOSO	BARREIRAS	BB-01	80	0,705864 (8)	0,708954 (31)	0,708629 (10)
		BB-02	20	0,707746 (16)	0,705815 (22)	0,704546 (20)
		BB-03	200	0,708833 (10)	0,709984 (4)	0,709366 (27)
		BA-01	10	0,708016 (36)	0,707800 (16)	0,702348 (33)
		BA-02	20	0,711611 (30)	0,711695 (14)	0,711677 (24)
		BA-03	270	0,707578 (7)	0,708539 (3)	0,708427 (6)
		BNB	80	0,713396 (126)	0,713189 (188)	0,716219 (23)
PERÍODO CHUVOSO	PIRABAS	PB-01	840	0,708758 (2)	0,709273 (4)	0,709018 (2)
		PB-02	820	0,708757(7)	0,709257 (3)	0,709192 (2)
		PB-03	810	0,708815 (2)	0,709253 (2)	0,709102 (1)
		PA-01	840	0,708944 (6)	0,709447 (3)	0,709229 (2)
		PA-02	770	0,708712 (2)	0,709482 (3)	0,709089 (5)
		PA-03	800	0,708778 (11)	0,709471 (2)	0,709222 (4)
		PC-01	1130	0,708238 (5)	0,708858 (4)	0,708871 (3)
		PC-02	890	0,708585 (1)	0,709320 (2)	0,709009 (3)
Água da Chuva**	ACH	0,705316 (55)				
Rocha Fm. Barreiras	RFB	0,727492 (11)				
Rocha Fm. Pirabas	RFP	0,708752 (12)				
Rocha Macrofósseis Formação Pirabas***		0,7086-0,7088				

*Média em $\mu\text{g/l}$, **Coleta no Período Chuvoso (fevereiro/2011), Fm. = formação, ***Fonte: BELÚCIO, 2001.

As amostras de *background* em regiões de provável recarga dos aquíferos não apresentaram variações significativas das razões isotópicas nos períodos seco e chuvoso, entretanto as amostras dos aquíferos na RMB apresentaram diferença de valores durante a sazonalidade seco-chuvoso, a possibilidade mais provável seria a *input* de água da chuva, bem como a própria contribuição antropogênica devido à menor proteção do aquífero Barreiras.

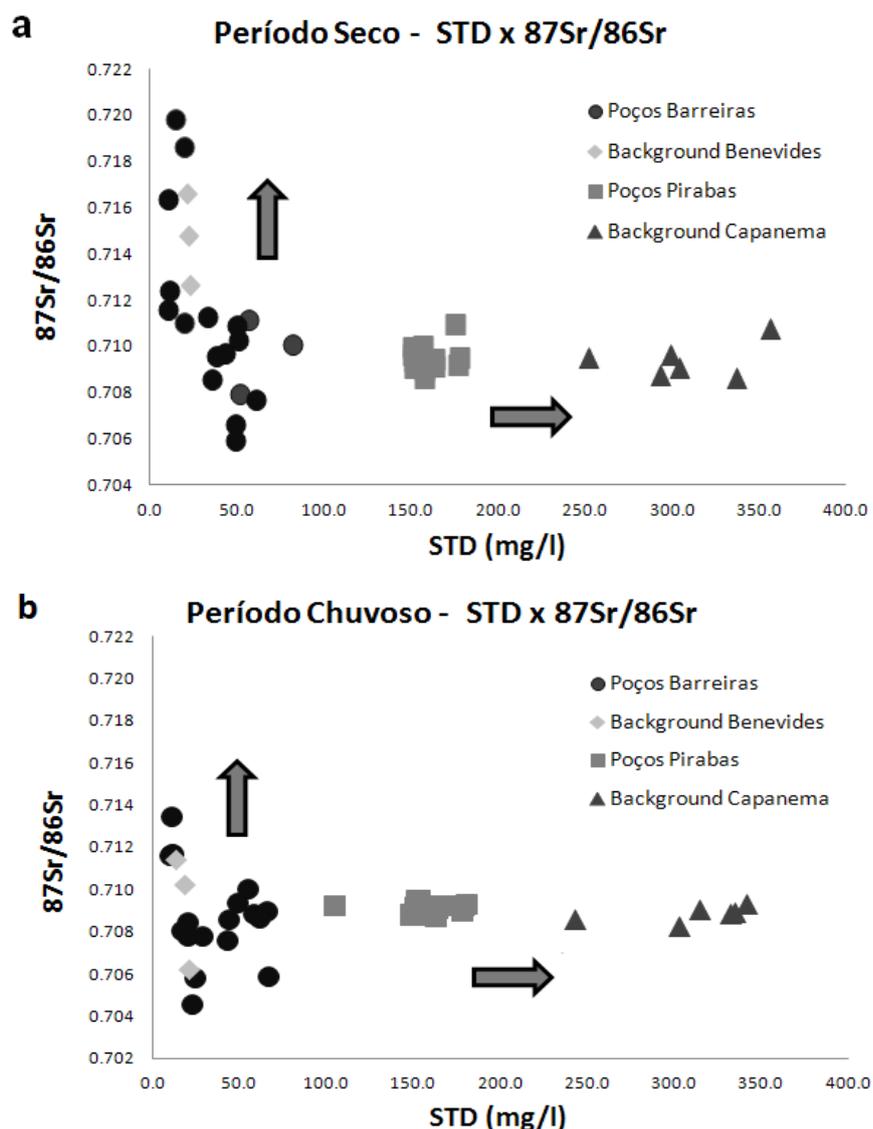


Figura 10. Diagramas de dispersão STD x $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ períodos: a) seco e b) chuvoso.

Figure 10. Scatterplots STD x $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ periods: a) dry and b) wet.

A partir das figuras 10a e 10b é possível observar processos distintos que controlam os sistemas em cada aquífero. No Barreiras, o principal intemperismo são dos silicatos (feldspatos), representado pelos poços barreiras e background Benevides, os quais apresentam razão isotópica entre 0,712-0,725, deslocando os pontos verticalmente. Enquanto no Pirabas apresenta-se a razão isotópica homogênea variando entre 0,708-0,712, representando a dissolução da calcita com deslocamento dos dados amostrais na forma horizontal, os respectivos gráficos concordam o formato de entrada de dados de Sun et al. (2011).

É importante notar o efeito da contribuição da água da chuva e de ações antropogênicas, os quais modificam as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ do aquífero Barreiras, e por processos gravimétricos na modificação da composição $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ do Pirabas.

Análises de Discriminante e PCA

Para análise de discriminante e PCA utilizou-se o software Statistica for Windows (STATISTICA, 2009). As amostras foram agrupadas em 4 grupos, na seguinte ordem: Grupo 1 – G_1 (Amostras do Barreiras – período Seco); Grupo 2 – G_2 (Amostras do Pirabas – período Seco); Grupo 3 – G_3 (Amostras do Barreiras – período Chuvoso); Grupo 4 – G_4 (Amostras do Pirabas – período Chuvoso).

Figura 11. Análise de Discriminante nos dois principais períodos climáticos da região.

Figure 11. Discriminant Analysis of the two major climate periods in the region.

Classification of Cases (Tabela todos os dados.sta)		
Incorrect classifications are marked with *		
Case	Observed Classif.	4 p=.26667
BB-01	G_1:1	G_4:4
*BB-02	G_1:1	G_4:4
BB-03	G_1:1	G_4:4
BA-01	G_1:1	G_4:4
BA-02	G_1:1	G_4:4
*BA-03	G_1:1	G_4:4
PB-01	G_2:2	G_1:1
PB-02	G_2:2	G_1:1
PB-03	G_2:2	G_1:1
PA-01	G_2:2	G_1:1
PA-02	G_2:2	G_1:1
*PA-03	G_2:2	G_1:1
BB-01	G_3:3	G_4:4
BB-02	G_3:3	G_4:4
*BB-03	G_3:3	G_4:4
*BA-01	G_3:3	G_4:4
*BA-02	G_3:3	G_4:4
BA-03	G_3:3	G_4:4
*PB-01	G_4:4	G_1:1
PB-02	G_4:4	G_1:1
PB-03	G_4:4	G_1:1
*PA-01	G_4:4	G_1:1
*PA-02	G_4:4	G_1:1
PA-03	G_4:4	G_1:1

AMOSTRAS
NO
PERÍODO
SECO

AMOSTRAS
NO
PERÍODO
CHUVOSO

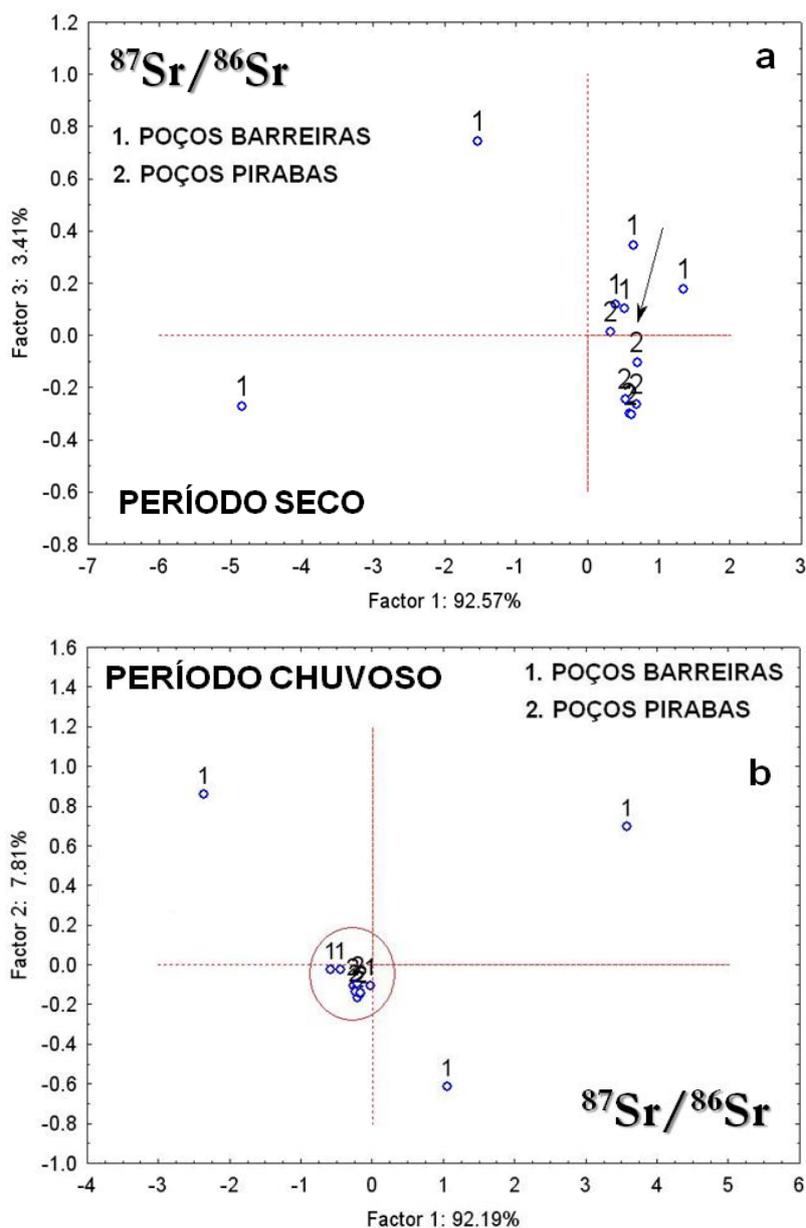


Figura 12. Diagramas PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ períodos: a) seco e b) chuvoso.

Figure 12. Scatterplots PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ periods: a) dry and b) wet.

Utilizando a combinação de diversos parâmetros ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Cl^- - SO_4^{2-} - K^+ - Mg^{2+}) para análise de discriminante (Figura 11); o produto gerado apresenta claramente excelente discriminação das amostras no período chuvoso, exemplificado por 3 discriminações no período seco, enquanto no período mais chuvoso metade das amostras se discriminaram muito entre si. Com base nas amostras analisadas e da ferramenta usada podemos indicar que as águas dos aquíferos Barreiras e Pirabas se misturam, de forma mais evidente no período chuvoso.

Nas figuras 12a e 12b, utilizando o parâmetro $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, é perceptível a mistura entre os aquíferos, visto que no período seco os resultados analíticos apontam tendência de misturas entre as águas dos aquíferos Barreiras com o Pirabas, enquanto no período chuvoso há homogeneização dos resultados analíticos, sobrepostos entre si, indicando mistura entre águas dos sistemas aquíferos abordados.

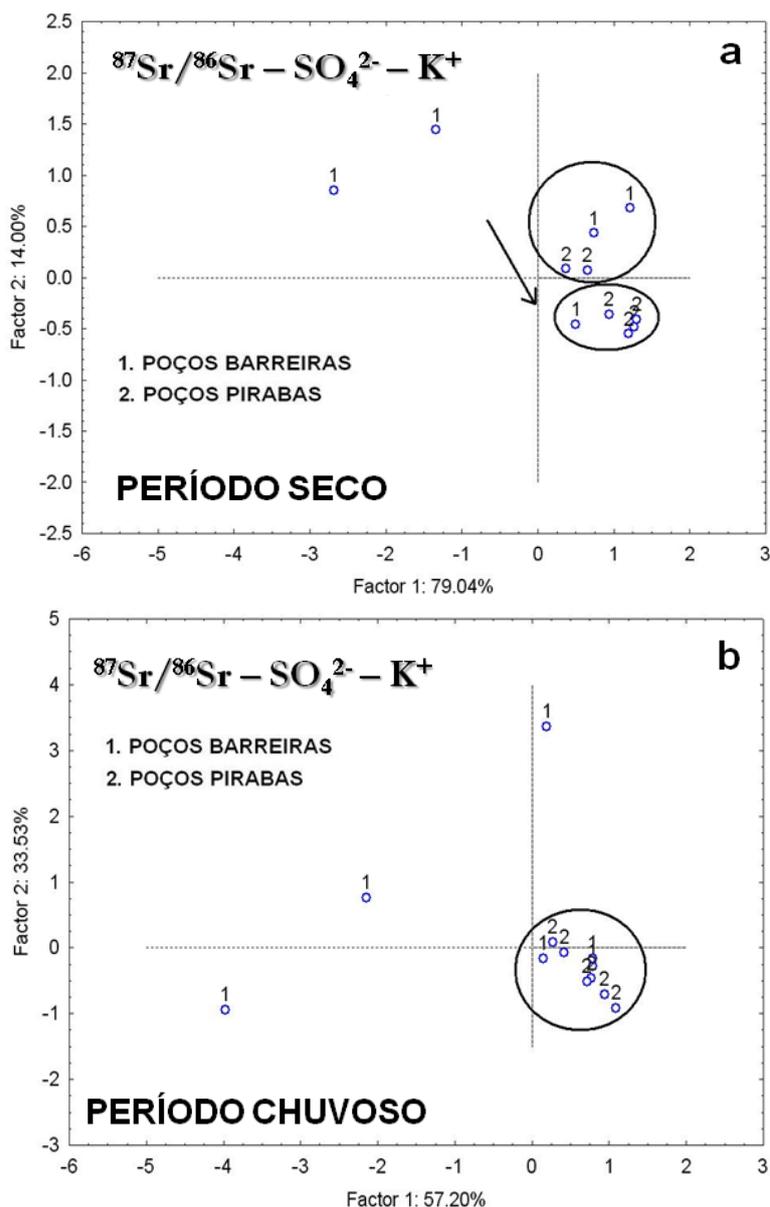


Figura 13. Diagramas PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+$ períodos: a) seco e b) chuvoso.

Figure 13. Scatterplots PCA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+$ period: a) dry and b) wet.

Os gráficos PCA combinando parâmetros isotópicos e hidroquímicos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+$) plotados nas figuras 13a e 13b, apontam para processo de mistura entre os aquíferos, apresentando tendência de mistura no período seco,

enquanto no período chuvoso os resultados sobrepõem-se entre si, assim caracterizando a mistura de água entre os aquíferos.

CONCLUSÕES

Os aquíferos Barreiras e Pirabas possuem características hidroquímicas distintas, apresentando no primeiro menor concentração de elementos dissolvidos na água devido o menor tempo de percolação e dissolução de suas rochas, acontecendo o oposto para as águas do Pirabas, o qual apresenta concentração iônica bem elevada, pois o tempo de contato da água com a rocha encaixante está na ordem de milhões de anos.

A fácies hidroquímica de cada aquífero revela o tipo de contribuição em suas águas, sendo no Barreiras originado da contribuição de água meteórica (Cl^- e Na^+), enquanto no Pirabas há forte predominância de reações químicas das rochas, como a dissolução da calcita (HCO_3^- e Ca^{2+}).

As matrizes de correlação apresentaram grande quantidade de correlações relevantes (positivas e negativas acima de 0,8) entre os parâmetros físico-químicos.

A partir dos diagramas de composição nota-se que o efeito da sazonalidade é pouco perceptível, apresentando pequenas variações durante o período seco e chuvoso. Ressalta-se a distribuição das linhas em formato paralelo no diagrama de Schöller, no qual revelam poços com tipos de águas diferentes, tanto no Barreiras quanto no Pirabas, característico de águas que sofrem misturas.

A compilação de dados e tratamentos estatísticos aponta o processo de misturas entre as águas do sistema Barreiras e Pirabas na proporcionalidade de 10%, pronunciando-se mais evidente no período chuvoso, no aquífero Pirabas.

O elemento Cl^- por ser conservativo em meio subterrâneo, reforça a tese de conexão hidráulica entres os aquíferos devido à distribuição quase perfeita das linhas em formato paralelo em cada ponto de coleta no Pirabas, apresentando, portanto vários tipos de águas, ou seja, águas misturadas em diversos teores.

As análises de Estrôncio através da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ apresentaram amostras dos poços Barreiras mais radiogênicas que a do Pirabas. Isso ocorre devido o tipo de formação das rochas encaixantes, no caso, o aquífero Barreiras de formação continental (0,711-0,712), e o Pirabas predominantemente formação marinha (0,708-0,709).

A partir da variação sazonal é perceptível a homogeneização dos valores dos poços Barreiras no período chuvoso, ocorrendo diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (em torno de 0,708-0,709). O presente trabalho atribuiu esse fenômeno ao input mais severo de água meteórica, portanto de contribuição predominantemente de água da chuva. Essa hipótese é reforçada pelas análises de *backgrounds* comparativos, nos quais apesar do período sazonal similar, não sofreram alteração significativa nas suas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da Formação Barreiras apresenta-se mais radiogênica que a da Formação Pirabas apontando para processo de homogeneização das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, principalmente no período chuvoso. As principais causas apontadas para o referido processo são o *input* de água meteórica no Aquífero Barreiras modificando a razão isotópica no Barreiras no período chuvoso, apontam possíveis misturas entre esses sistemas aquíferos; o processo de misturas é corroborado pelos resultados das análises Discriminante e PCA.

A utilização de análises isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), parâmetros hidrogeoquímicos nos períodos sazonais utilizando a assinatura isotópica do Sr, estatística multivariada (Discriminante e PCA), análises de correlação, diagramas de Schöller e seu respectivo modelamento sugerem processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre os sistemas aquíferos Barreiras com o Pirabas, concordando com os estudos estruturais realizados por Costa (2004), Palheta (2008), Pinheiro (2009) e Abreu (2012). Os mesmos que indicam a capacidade das águas nos respectivos aquíferos em misturar-se, principalmente pelas feições neotectônicas definidas na região da RMB.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida a Olavo Bilac Q. Oliveira filho e ao PPGG (Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica) da UFPA pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F.A.M. Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/Pa. *Águas Subterrâneas*, v. 1, p. 1-17, 2012.
- ALLÉGRE, C.J.; DUPRÉ, B.; NÉGREL, P.; GAILLADET, J. Sr-Nd-Pb isotopes systematics in Amazon and Congo river systems: Constrain about erosion processes. *Chemical Geology*, v. 131, p. 93-112, 1996.

- AQUACHEM. Program for Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting v 3.7; Waterloo, Canada, 1997.
- BANNER, J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth Science Reviews*, v. 65, p. 141, 2004.
- BANNER, J.L.; MUSGROVE, M.; CAPO, R. C. Tracing groundwater evolution in a limestone aquifer using Sr isotopes: Effect of multiple sources of dissolved ions and mineral-solution reactions. *Geology*, v. 22, p. 687-690, 1994.
- BELÚCIO, E.F. Estudo da Razão Isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em Macrofósseis da Formação Pirabas, Nordeste do Estado do Pará. Belém, Pará, 2001. 58p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- BORDALO, A.O.; MOURA, C.A.V.; SCHELLER, T. Determinação da Composição Isotópica de Estrôncio em Águas Naturais: Exemplos de sua aplicação em águas subsuperficiais da zona costeira na região Bragantina-PA. *Química Nova*, v. 30, p. 821-827, 2007.
- CABRAL, N.M.T. Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal. Belém, Pará, 2004. 278 p. Tese (Doutoramento em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- CAPO, R.C.; STEWART, B.W.; CHADWICK, O.A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geoderma*, v. 82, p. 197-225, 1992.
- CETESB. Normalização Técnica NT-07. Análise físico-química das águas. São Paulo, CETESB, 1978.
- COSTA, F.R. Influência da Neotectônica sobre os arranjos geométricos dos Aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. Belém, Pará, 2004. 173p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. Hidrología subterránea. Barcelona: Omega, 1976.
- FAURE, G. Principles of Isotope Geology. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- FENZL, N. Em Introdução a Hidrogeoquímica, 1º ed., Belém: EDUFPA, 1988.
- GAILLARDET, J.; DUPRÉ, B.; ALLÈGRE, C.; NÉGREL, P. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, v. 142, p. 141-173, 1997.
- GRASSHOFF, K. On the determination of silica in sea water. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 11, p. 597-604, 1964.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br>. Acesso em: 09 jun 2010.
- JORGENSEN, N.O.; ANDERSEN, M.S.; ENGESGAARD, P. Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). *Journal of Hydrology*, v. 348, p. 257-269, 2008.
- LYONS, W.B.; TYLER, S.W.; GAUDETTER, H.E.; LONGD.T. The use of strontium isotopes in determining groundwater mixing and brine fingering in a playa spring zone, Lake Tyrrel, Australia. *Journal of Hydrology*, v. 187, p. 225-239, 1995.

- MATTA, M.A.S. Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. Belém, Pará, 2002. 292 p. Tese (Doutoramento em Hidrogeologia). Universidade Federal do Pará.
- Mazor, E.; Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. 3th ed., New York: Marcel Dekker, 2004.
- NÉGREL, P.; PETELET-GIRAUD, E. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). *Journal of Hydrology*, v. 305, p. 99–119, 2005.
- PALHETA, E.S.M. Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro-Pa empregado no conhecimento hídrico subterrâneo. Belém, Pará, 2008. 241p. Tese (Doutoramento em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- PARANHOS, P.F. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. Belém, Pará, 2010. 94p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- PINHEIRO, A.V.R. Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará – Brasil. Belém, Pará, 2009. 211p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará.
- RAMAGE, L. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico do Município de Porto Alegre, RS. Porto Alegre, Brasil, 2005. 111 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ROLLINSON, H. Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. England: Longman Scientific and Technical, 1993.
- ROSSETTI, D.F. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, p. 77-89, 2001.
- SAUMA FILHO, M. As Águas Subterrâneas de Belém e Adjacências: Influência da Formação Pirabas e Parâmetros Físico-Químicos para Medidas de Qualidade Pará, Brasil. Belém, Brasil, 1996. 128 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Pará.
- SCHÖLLER, H.; Les eaux souterrains. 53th ed., Paris, 1962.
- SUN, L.; LEYBOURNE, M.I.; MILLER N.R.; DENISON, R.E. Strontium isotope constraints on solute sources and mixing dynamics in a large impoundment, South-Central USA. *Chemical Geology*, v. 285, p. 203-214, 2011.
- STATISTICA for Windows 9.0 [Computer program manual]. Tulsa, StatSoft, Inc., 2300 East 14th Street, WEB: <http://www.statsoft.com>, 2009.
- XU, Z.; LI, Y.; TANG, Y.; HAN, G. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater at an urban site in Loess Plateau, Northwest China. *Atmospheric Research*, v. 94, p. 481-490, 2009.

CAPÍTULO 8

8.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na área de estudo há basicamente dois sistemas aquíferos de aproveitamento humano e industrial: O sistema Barreiras, cujo aquífero está encaixado em rochas siliciclásticas, e sotoposto a ele o sistema Pirabas, formado por rochas calcárias e rochas siliciclásticas.

O aquífero Barreiras apresenta valores de pH na zona ácida, devido a influência das reações químicas que acontecem nesta seção aquífera, bem como a contribuição da água da chuva que apresenta pH ácido, no qual o Cl^- e Na^+ são os principais elementos presentes no aquífero. No Pirabas, a concentração de sólidos totais dissolvidos é elevada devido ao tempo de percolação da água, sendo que o pH permanece próximo a neutralidade, influenciado pela dissolução da calcita liberando eletrólitos principalmente o HCO_3^- e Ca^{2+} .

O período sazonal não acarretou influência tão significativa nos parâmetros hidroquímicos, havendo pequena redução de eletrólitos no período chuvoso, devido à diluição dos solutos; frisa-se que o aquífero Barreiras apresenta oscilações um pouco maiores que o Pirabas, provavelmente ocasionado pela exposição do aquífero a superfície (*input* atmosférico, ação natural e antrópica).

As oscilações no Barreiras são refletidos nos diagramas de composição, resultados sazonais, bem como as fácies hidroquímicas que em certo período variou, certamente pela sua menor proteção e maior exposição aos agentes citados no parágrafo anterior. No Pirabas, a estabilidade é maior devido a sua profundidade e menor interação com as ações climáticas e físicas da superfície.

As matrizes correlacionando os dois períodos sazonais entre os sistemas aquíferos mostraram excelentes correlações (parâmetros correlacionados acima de 0,8), sugerindo contribuições entre os aquíferos, apresentando aspectos de proporcionalidade.

As análises através de diagramas de composição de Schöller e modelagem dos mesmos, revelam claramente processos de mistura, com modelamento em torno de 10 % entre águas do Barreiras e Pirabas no período chuvoso, reforçando a hipótese de existência de comunicação hidráulica entre estes aquíferos.

As análises de Estrôncio através da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ apresentaram amostras dos poços Barreiras mais radiogênicas que a do Pirabas. Isso ocorre devido o tipo de formação das rochas encaixantes, no caso, o aquífero Barreiras de formação continental (0,711-0,712), e o Pirabas predominantemente formação marinha (0,708-0,709).

A partir da variação sazonal é perceptível a homogeneização dos valores dos poços Barreiras no período chuvoso, ocorrendo diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (em torno de 0,708-0,709). O presente trabalho atribuiu esse fenômeno ao *input* mais severo de água meteórica, portanto de contribuição predominantemente de água da chuva. Essa hipótese é reforçada pelas análises de background's comparativos, nos quais apesar do período sazonal similar, não sofreram alteração significativa nas suas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

As análises de discriminante combinando $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e diversos parâmetros hidroquímicos mostram que os poços dos dois sistemas aquíferos apresentam excelente discriminação no período chuvoso, a que pese haver discriminação porém em menor quantidade de amostras no período seco. Essa análise reforça o grau de mistura entre os aquíferos, apontando maior interação no período chuvoso.

As análises de PCA utilizando $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostram com clareza o processo de mistura de águas entre os aquíferos, havendo homogeneização de resultados no mesmo quadrante no período chuvoso. Combinando, também, parâmetros hidroquímicos juntamente com a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ como Sulfato e Potássio, é interessante notar a mesma tendência, reforçando a validade da ferramenta utilizada como alternativa efetiva na identificação de misturas de águas.

A utilização de análises isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), parâmetros hidrogeoquímicos nos períodos sazonais utilizando a assinatura isotópica do Sr, estatística multivariada (Discriminante e PCA), análises de correlação, diagramas de Schöller e seu respectivo modelamento sugerem processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, concordando com os estudos estruturais realizados por Igreja et al. (1990), Costa (2004), Palheta (2008), Pinheiro (2009) e Abreu (2012). Os mesmos que indicam a capacidade das águas nos respectivos aquíferos em misturar-se, principalmente pelas feições neotectônicas definidas na região da RMB.

Considerando-se conjuntamente todos os indicadores analisados, conclui-se que a falta de planejamento do uso das águas subterrâneas dos poços tubulares rasos da área estudada (Barreiras) podem ser facilitadores de contaminação de águas em aquíferos mais profundos como o Pirabas, devido à sugerida conexão hidráulica entre os aquíferos, a preocupação reside no fato do sistema Pirabas ser a principal alternativa de água de qualidade na região, caracterizada como a principal fonte de abastecimento público da RMB e proximidades. Torna-se então importante a preservação e planejamento coerente da exploração desse bem, de forma planejada e sustentável, para garantir o recurso natural “água” quanto a sua quantidade e qualidade a gerações futuras.

REFERÊNCIAS

- Abreu F.A.M. 2012. Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/Pa. *Águas Subterrâneas*, **1**:1-17.
- Allégre C.J., Dupré B., Négrel P., Gaillardet J. 1996. Sr-Nd-Pb isotopes systematics in Amazon and Congo river systems: Constrains about erosion processes. *Chemical Geology*, **131**: 93-112.
- APHA – American Public Health Association 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, Washington, 140 p.
- AQUACHEM 1977. *Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting, version 3.7.42*. Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3L3.
- Arai M., Uesugui N., Rossetti D.F., Góes A.M. 1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. *In: CBG, Cong. Geol. Norte*, 35, *Anais*, p. 738-752.
- Arai M., Truchenbrodt W., Nogueira A.C.R., Góes A.M., Rossetti D. 1994. Novos Dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos Sedimentos Barreiras, NE do Pará. *In: SGA, Simp. Geol., Norte*, 4, *Anais*, p. 185-187.
- Banner J.L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth Science Reviews*, **65**: 141-194.
- Banner J.L., Musgrove M., Capo R.C. 1994. Tracing groundwater evolution in a limestone aquifer using Sr isotopes: Effect of multiple sources of dissolved ions and mineral-solution reactions. *Geology*, **22**: 687-690.
- Bermeguy R.L., Costa J.B.S., Hasui Y., Borges M.S. 1995. Tectônica e paleogeografia da calha do rio Amazonas. *In: SNET, Simp. Nac. Est. Tec., Sul*, 5, *Anais*, p. 419-420.
- Bordalo A.O., Moura C.A.V., Scheller T. 2007. Determinação da Composição Isotópica de Estrôncio em Águas Naturais: Exemplos de sua aplicação em águas subsuperficiais da zona costeira na região Bragantina-PA. *Química Nova*, **30**: 821-827.
- Borges M.S., Costa J.B.S., Bermeguy R.L., Paranhos Júnior C.A., Hasui Y. 1995. A esculturação da paisagem do litoral do norte do Brasil e sua relação com movimentos neotectônicos do Quaternário. *In: SNET, Simp. Nac. Est. Tec., Sul*, 5, *Anais*, p. 423-424.
- Boyd C 1990. *Water quality in ponds of aquaculture*. Birmingham Publishing, Alburn, Alabama, 482p.
- Bullen T.D., Krabbenhoft D.P., Kendall C. 1996. Kinetic and mineralogic controls of the evolution of groundwater chemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin. *Geoch. Et Cosm. Acta*, **60**: 1807-1821.
- Cabral N.M.T. 2004. Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 278 p.
- Capo R.C., Stewart B.W., Chadwick O.A. 1992. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geoderma*, **82**: 197-225.
- Carvalho W.G. 2001. Caracterizações Químicas dos Aquíferos da Formação Pirabas no Conjunto COHAB / Distrito de Icoaraci - Pará, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 41 p.

- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental 1987. *Guia de coleta e preservação de amostras de água*. São Paulo-SP, 150 p.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental 1978. *Normalização Técnica NT-07. Análise físico-química das águas*. São Paulo-SP, 340 p.
- Christian L.N., Banner J.L., Mack L.E. 2011. Sr isotopes as tracers of anthropogenic influences on stream water in the Austin, Texas, area. *Chemical Geology*, **282**: 84-97.
- Collerson K.D., Ullman W.J., Jørgensen T. 1988. Groundwaters with unradiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in the Great Artesian Basin, Australia. *Geology*, **16**: 59-63.
- Costa J.B.S. 1996. A neotectônica na Amazônia. In: SGA, Simp. Geol., Norte, 5, *Anais*, p. 35-38.
- Costa J.B.S., Bermerguy R.L., Borges M.S., Costa A.R., Travassos W., Miotto J., Igreja H.L.S. 1993. Aspectos fundamentais da neotectônica na Amazônia Brasileira. In: SIQA. Simp. Int. Quart. Amaz., Norte, 1, *Anais*, p. 103-106.
- Costa J.B.S., Bermerguy R.L., Hasui Y., Borges M.S., Ferreira Júnior C.R.P., Bezerra P.E.L., Costa M.L., Fernandes J.M.G. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, **4**: 23-44.
- Costa F.R. 2004. Influência da Neotectônica sobre os arranjos geométricos dos Aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 173 p.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**: 146-160.
- Costa M.L. & HORBE A.M.C. 1995. Pedras de ferro de interface areia-argila no perfil laterítico da ilha de Mosqueiro (região Norte do Brasil). *Caderno de Geociências – IBGE*, **14**: 61-68.
- Costa M.L., Angélica R.S., Avelar J.O.G. 1991. Outeiro e Mosqueiro: exemplos de evolução laterítica imatura. In: SGA, Norte, 3, *Anais*, p. 479-493.
- Custódio E. & Llamas M.R. 1976. *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 1157 p.
- DNMET – Departamento Nacional de Meteorologia 1992. *Normais Climatológicas (1961-1990)*. Brasília, DNMET, 84p.
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. John Wiley & Sons Inc, New York, 589 p.
- Ferreira C.S. & Cunha O.R. 1957. *Notas sobre a Formação Pirabas com descrição de novos intervalos fósseis I (Mollusca-Gastropoda)*. Belém, MPEG, Boletim 2, 60 p.
- Gaillardet J., Dupré B., Allégre C., Négrel P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, **142**: 141-173.
- Góes A.M., Rossetti D.F., Nogueira A.C.R., Toledo P.M. 1990. *Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Pará*. Belém, MPEG, Boletim 2, 15 p.
- Góes A.M. & Truckenbrodt W. 1980. Caracterização faciológicas e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará. In: CBG, Cong. Geol., Sul, 31, *Anais*, p. 766-771.
- Grasshoff K. 1964. On the determination of silica in sea water. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **11**: 597-604.
- Herut B., Starinsky A., Katz A. 1993. Strontium in rainwater from Israel: Sources, Isotopes and chemistry. *Earth and Planet*, **120**:77-84.

- Igreja H.L.S., Alves R.J.; Costa P.S.; Costa J.B.S. 1990. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro – NE do Estado do Pará. *In*: CBG, Cong. Geol., Nordeste, 36, *Anais*, p. 2110-2123.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2000. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br>. Acesso em 09 jun 2010.
- Jorgensen N.O. & Holm P.M. 1994. Isotope studies (^{18}O , D/H and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of saline groundwater in Denmark. *Future Groundwater Resources at Risk*, **222**: 231–238.
- Jorgensen N.O., Andersen M.S., Engesgaard P. 2008. Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). *Journal of Hydrology*, **348**: 257-269.
- Langman J.B. & Ellis A.S. 2010. A multi-isotope (dD, d ^{18}O , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and d ^{11}B) approach for identifying saltwater intrusion and resolving groundwater evolution along the Western Caprock Escarpment of the Southern High Plains, New Mexico. *Applied Geochemistry*. **25**: 159-174.
- Lyons W.B., Tyler S.W., Gaudetter H.E., Longd T. 1995. The use of strontium isotopes in determining groundwater mixing and brine fingering in a playa spring zone, Lake Tyrrel, Australia. *Journal of Hydrology*, **187**: 225-239.
- Matta M.A.S. 2002. Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 292p.
- Montgomery J, Evans J.A., Wildman G. 2006. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope composition of bottled British mineral waters for environmental and forensic purposes. *Applied Geochemistry*, **21**: 1626-1634.
- Naftz D.L., Peterman Z.E., Spangler L.E. 1997. Using ^{87}Sr values to identify sources of salinity to a freshwater aquifer, greater Aneth oil field, Utah, USA. *Chemical Geology*, **141**: 195-209.
- Négrel P. & Petelet-Giraud E. 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). *Journal of Hydrology*, **305**: 99–119.
- Négrel P., Millot R., Roy S., Guerrot C., Pauwels H. 2010. Lead isotopes in groundwater as an indicator of water–rock interaction (Masheshwaram catchment, Andhra Pradesh, India). *Chemical Geology*, **274**: 136-148.
- Oliveira J.R., Souza Leal A., Tancredi A.C.F.N.S. 2001. *Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*. Belém, CPRM, 115 p.
- Palheta E.S.M. 2008. Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro-Pará empregado no conhecimento hídrico subterrâneo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 241p.
- Palmer M.R. & Edmond J.M. 1992. Controls over the strontium composition of river water. *Geoch. Et Cosm. Acta.*, **56**: 2099-2111.
- Paranhos P.F. 2010. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 94p.
- Pinheiro A.V.R. 2009. Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará – Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 211 p.

- Queiroz M.M.A., Horbe A.M.C., Seyler P., Moura C.A.V. 2009. Hidroquímica do Rio Solimões na região entre Manacapuru e Alvarães – Amazonas – Brasil. *Acta Amazônica*, **39**: 943-952.
- Rodier J. 1981. *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Omega, Barcelona, 30 p.
- Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, England, 352 p.
- Rossetti D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**: 77-89.
- Rossetti D.F., Góes A.M., Trunckenbrodt W. 1990. *A influência marinha nos Sedimentos Barreiras*. Belém, MPEG, Boletim 2, 12 p.
- Rossetti D.F.; Trunckenbrodt W.; Góes A.M. 1989. *Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará*. Belém, MPEG, Boletim 1, 49 p.
- Sá J.H.S. 1969. *Contribuição à Geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, Estado do Pará*. Rio de Janeiro, UFRJ, *Boletim Geológico* 3, 15 p.
- Sauma Filho M. 1996. *As Águas Subterrâneas de Belém e Adjacências: Influência da Formação Pirabas e Parâmetros Físico-Químicos para Medidas de Qualidade Pará, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 128 p.
- Silva O.F. & Lowenstein P. 1988. *Contribuição à Geologia da Folha de São Luiz (SA-23) no Estado do Pará*. Belém, MPEG, Boletim 13, 17 p.
- STATÍSTICA 2009. STATSOFT, INC. 09. for Windows 9.0. Tulsa, StatSoft [Computer Program Manual]. 1 CD-ROM.
- SUDAM – Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia 1984. *Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira*. Belém, PHCA, 125p.
- Woods T.L., Fullagar P.D., Spruill R.K., Sutton L.C. 2000. Strontium isotopes and major elements as tracers of groundwater evolution: examples from the Upper Castle Hayne Aquifer of North Carolina. *Ground Water*, **38**: 762–771.
- Xu Z., Li Y., Tang Y., Han G. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater at an urban site in Loess Plateau, Northwest China. *Atmospheric Research*, **94**: 481-490.

ANEXOS

ANEXO A - CICLO HIDROLÓGICO COMPLETO PARA CADA PARÂMETRO

Pontos	pH					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	4,32	4,32	4,37	4,89	4,72	4,37
BB-02	4,87	4,57	4,57	5,05	5,23	4,35
BB-03	5,96	5,67	5,49	5,03	5,84	5,49
BA-01	5,22	4,68	5,30	4,69	6,19	4,27
BA-02	5,89	5,81	5,19	5,75	5,18	5,32
BA-03	5,33	5,35	4,96	5,40	4,76	4,98
BNB	4,68	4,36	4,39	4,50	4,72	4,77
PB-01	7,26	7,43	7,69	7,14	7,09	7,13
PB-02	7,39	8,02	7,89	7,16	7,30	7,00
PB-03	7,68	7,93	7,66	7,60	8,02	7,07
PA-01	7,41	7,63	7,63	7,01	7,73	7,23
PA-02	7,62	7,62	7,13	7,30	7,65	7,12
PA-03	7,68	7,68	7,18	7,30	7,63	7,42
PC-01	7,35	7,40	7,26	7,48	7,49	7,11
PC-02	7,55	7,62	7,50	7,02	7,35	7,37

Pontos	Temperatura em Graus Celsius					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	30,7	29,8	29,3	29,2	28,4	27,7
BB-02	30,0	28,5	27,4	27,0	26,9	27,2
BB-03	30,6	28,8	28,4	28,2	28,2	28,4
BA-01	27,5	27,4	29,0	26,7	26,5	26,7
BA-02	29,0	27,8	28,4	26,3	28,5	27,4
BA-03	27,8	28,6	28,8	28,5	27,1	28,2
BNB	26,5	27,3	27,3	26,6	27,7	28,0
PB-01	29,1	29,4	29,4	30,0	30,3	29,3
PB-02	29,7	30,9	29,5	29,5	29,3	29,9
PB-03	29,9	30,7	30,7	28,5	29,5	29,6
PA-01	31,0	30,5	29,7	29,5	30,2	29,0
PA-02	29,0	30,8	30,8	29,9	29,4	29,5
PA-03	29,2	30,6	30,3	30,0	30,4	29,1
PC-01	28,4	29,1	28,1	27,5	28,9	28,9
PC-02	28,4	30,5	27,9	28,4	28,2	30,6

Pontos	Condutividade Elétrica – CE em $\mu\text{S/cm}$					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	25,20	17,50	14,80	14,19	12,84	11,11
BB-02	54,60	92,20	62,40	53,80	48,30	46,00
BB-03	32,18	33,80	32,20	33,10	25,70	38,10
BA-01	37,34	42,00	37,30	43,30	23,10	41,00
BA-02	51,92	21,20	21,40	23,10	17,90	21,00
BA-03	49,90	52,50	77,20	56,30	42,60	47,90
BNB	27,22	29,90	29,20	24,00	25,00	28,00
PB-01	337,40	319,00	314,00	384,00	329,00	341,00
PB-02	328,20	320,00	318,00	350,00	321,00	332,00
PB-03	304,60	322,00	318,00	222,00	322,00	339,00
PA-01	373,00	377,00	374,00	328,00	380,00	406,00
PA-02	346,80	347,00	346,00	323,00	349,00	369,00
PA-03	337,80	336,00	335,00	326,00	336,00	356,00
PC-01	716,00	744,00	641,00	706,00	702,00	787,00
PC-02	562,20	532,00	510,00	714,00	374,00	681,00

Pontos	Ferro (t) em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,006	0,006	0,002	0,009	0,007	0,007
BB-02	0,002	0,001	0,000	0,004	0,004	0,006
BB-03	0,014	0,012	0,011	0,009	0,008	0,007
BA-01	0,011	0,012	0,010	0,012	0,008	0,006
BA-02	0,003	0,005	0,003	0,002	0,004	0,006
BA-03	0,004	0,005	0,002	0,003	0,001	0,007
BNB	0,001	0,004	0,000	0,000	0,001	0,006
PB-01	0,014	0,017	0,016	0,020	0,017	0,020
PB-02	0,009	0,012	0,011	0,016	0,011	0,015
PB-03	0,009	0,011	0,011	0,010	0,012	0,014
PA-01	0,008	0,009	0,012	0,010	0,013	0,014
PA-02	0,010	0,012	0,010	0,012	0,010	0,023
PA-03	0,006	0,009	0,009	0,006	0,010	0,014
PC-01	0,037	0,036	0,035	0,034	0,023	0,033
PC-02	0,022	0,016	0,012	0,016	0,031	0,031

Pontos	Sólidos Totais Dissolvidos (STD) em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	57,0	82,0	67,0	66,0	62,0	52,0
BB-02	33,0	43,0	29,0	25,0	23,0	49,2
BB-03	50,0	61,0	58,0	55,0	49,0	51,0
BA-01	15,0	20,0	17,0	20,0	11,0	20,0
BA-02	10,0	10,0	10,0	11,0	12,0	11,0
BA-03	38,0	49,0	43,0	44,0	20,0	36,0
BNB	21,0	23,0	14,0	19,0	21,0	22,0
PB-01	160,0	151,0	149,0	181,0	157,0	151,0
PB-02	149,0	151,0	150,0	167,0	151,0	152,0
PB-03	151,0	152,0	149,0	105,0	152,0	152,0
PA-01	175,0	178,0	178,0	152,0	179,0	177,0
PA-02	151,0	164,0	163,0	152,0	164,0	164,0
PA-03	157,0	158,0	158,0	154,0	159,0	158,0
PC-01	304,0	356,0	303,0	333,0	335,0	337,0
PC-02	299,0	252,0	243,0	342,0	315,0	293,0

Pontos	Sílica em mg/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	2,83	3,42	3,26	2,84	2,70	2,24
BB-02	3,05	2,80	3,85	2,97	1,34	2,60
BB-03	1,97	2,04	1,76	1,89	0,90	1,55
BA-01	7,25	7,60	2,29	6,71	3,03	5,63
BA-02	6,47	7,50	7,26	6,49	2,81	5,17
BA-03	1,80	2,25	2,01	1,77	0,85	1,66
BNB	5,61	4,43	5,50	5,51	2,96	4,02
PB-01	11,89	11,37	12,93	7,70	8,25	9,00
PB-02	12,59	11,56	13,52	6,06	8,55	9,15
PB-03	11,53	12,05	12,61	10,57	8,26	8,55
PA-01	13,17	12,93	14,93	9,62	9,39	10,18
PA-02	13,37	13,25	14,77	9,05	8,97	10,22
PA-03	12,57	12,39	14,08	16,02	9,90	9,50
PC-01	6,64	5,35	7,41	6,17	2,94	2,83
PC-02	8,94	7,39	9,50	7,73	2,79	3,71

Pontos	HCO ₃ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BB-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BB-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BA-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BA-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BA-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BNB	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-01	1,95	1,88	1,83	1,70	1,79	1,73
PB-02	2,04	1,95	1,67	1,74	1,67	1,64
PB-03	2,13	2,01	1,87	1,78	1,73	1,70
PA-01	2,27	2,26	2,23	2,26	1,81	1,72
PA-02	2,17	2,14	2,05	2,06	1,85	1,76
PA-03	2,05	1,99	1,87	1,78	2,05	1,77
PC-01	3,94	3,84	3,75	3,41	2,66	2,56
PC-02	3,05	2,52	2,69	2,88	2,98	2,32

Pontos	Cl ⁻ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,33	0,36	0,31	0,21	0,26	0,29
BB-02	0,27	0,25	0,22	0,18	0,18	0,19
BB-03	0,32	0,37	0,42	0,38	0,35	0,29
BA-01	0,30	0,24	0,24	0,22	0,23	0,23
BA-02	0,26	0,31	0,28	0,29	0,27	0,23
BA-03	0,33	0,31	0,30	0,26	0,28	0,29
BNB	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06
PB-01	0,11	0,12	0,11	0,08	0,10	0,11
PB-02	0,10	0,10	0,10	0,07	0,06	0,08
PB-03	0,10	0,10	0,10	0,09	0,08	0,12
PA-01	0,12	0,11	0,09	0,05	0,06	0,06
PA-02	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07	0,08
PA-03	0,07	0,08	0,10	0,09	0,06	0,08
PC-01	0,34	0,48	0,43	0,53	0,56	0,35
PC-02	0,38	0,54	0,36	0,32	0,35	0,51

Pontos	NO ₃ ⁻ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,064	0,060	0,061	0,074	0,093	0,096
BB-02	0,070	0,051	0,052	0,051	0,050	0,055
BB-03	0,133	0,140	0,122	0,104	0,150	0,127
BA-01	0,083	0,060	0,087	0,066	0,067	0,084
BA-02	0,051	0,059	0,066	0,077	0,082	0,068
BA-03	0,073	0,101	0,103	0,118	0,103	0,114
BNB	0,018	0,032	0,028	0,029	0,015	0,026
PB-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PC-01	0,005	0,006	ND	ND	0,002	ND
PC-02	0,007	0,023	ND	ND	ND	0,011

Pontos	SO ₄ ²⁻ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,12	0,16	0,17	0,09	0,14	0,10
BB-02	0,05	0,09	0,05	0,06	0,06	0,07
BB-03	0,08	0,09	0,11	0,12	0,12	0,13
BA-01	0,09	0,07	0,08	0,07	0,10	0,07
BA-02	0,06	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06
BA-03	0,11	0,11	0,15	0,13	0,15	0,17
BNB	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
PB-01	0,15	0,12	0,13	0,12	0,13	0,15
PB-02	0,14	0,11	0,14	0,12	0,13	0,14
PB-03	0,14	0,12	0,14	0,14	0,12	0,16
PA-01	0,10	0,08	0,10	0,08	0,10	0,11
PA-02	0,11	0,09	0,10	0,08	0,13	0,12
PA-03	0,14	0,12	0,13	0,16	0,10	0,15
PC-01	0,28	0,38	0,31	0,46	0,51	0,43
PC-02	0,33	0,35	0,30	0,44	0,28	0,22

Pontos	Na ⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,43	0,41	0,42	0,33	0,43	0,43
BB-02	0,37	0,32	0,34	0,29	0,28	0,31
BB-03	0,40	0,35	0,39	0,41	0,39	0,41
BA-01	0,50	0,36	0,40	0,38	0,42	0,41
BA-02	0,37	0,43	0,41	0,42	0,40	0,33
BA-03	0,34	0,38	0,31	0,38	0,24	0,26
BNB	0,09	0,08	0,09	0,08	0,05	0,06
PB-01	0,16	0,18	0,13	0,15	0,18	0,15
PB-02	0,09	0,13	0,10	0,11	0,10	0,05
PB-03	0,16	0,15	0,12	0,14	0,15	0,08
PA-01	0,14	0,12	0,10	0,09	0,10	0,06
PA-02	0,14	0,14	0,12	0,13	0,13	0,07
PA-03	0,15	0,14	0,12	0,16	0,15	0,06
PC-01	0,81	0,53	0,44	0,33	0,30	0,25
PC-02	0,79	0,31	0,23	0,61	0,67	0,39

Pontos	NH ₄ ⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,038	0,025	0,053	0,006	0,021	0,033
BB-02	0,014	0,012	0,015	0,014	0,011	0,008
BB-03	0,020	0,023	0,042	0,035	0,037	0,000
BA-01	0,021	0,022	0,014	0,017	0,016	0,013
BA-02	0,018	0,011	0,007	0,014	0,019	0,012
BA-03	0,037	0,044	0,039	0,036	0,044	0,023
BNB	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PA-03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PC-01	ND	0,078	0,071	0,042	0,010	0,017
PC-02	ND	ND	0,036	0,058	0,349	ND

Pontos	K ⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,02
BB-02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
BB-03	0,04	0,06	0,05	0,03	0,02	0,04
BA-01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
BA-02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
BA-03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
BNB	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002
PB-01	0,05	0,05	0,047	0,042	0,045	0,02
PB-02	0,04	0,05	0,044	0,040	0,042	0,02
PB-03	0,05	0,05	0,048	0,043	0,049	0,02
PA-01	0,05	0,06	0,047	0,045	0,049	0,02
PA-02	0,05	0,06	0,049	0,038	0,049	0,02
PA-03	0,06	0,06	0,051	0,060	0,054	0,02
PC-01	0,03	0,03	0,032	0,017	0,001	0,001
PC-02	0,06	0,02	0,017	0,059	0,062	0,02

Pontos	Mg ²⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,005	0,009	0,004	0,004	0,003	0,003
BB-02	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001
BB-03	0,039	0,061	0,055	0,037	0,036	0,038
BA-01	0,006	0,003	0,001	0,002	0,001	0,004
BA-02	0,005	0,002	0,004	0,003	0,005	0,004
BA-03	0,009	0,010	0,010	0,004	0,007	0,008
BNB	0,004	0,003	0,002	0,000	0,003	0,002
PB-01	0,088	0,108	0,095	0,097	0,087	0,069
PB-02	0,102	0,111	0,101	0,096	0,092	0,068
PB-03	0,094	0,113	0,102	0,094	0,092	0,071
PA-01	0,109	0,128	0,111	0,105	0,101	0,077
PA-02	0,107	0,119	0,108	0,092	0,095	0,073
PA-03	0,094	0,116	0,105	0,115	0,104	0,070
PC-01	0,154	0,150	0,142	0,111	0,098	0,078
PC-02	0,102	0,094	0,096	0,107	0,117	0,072

Pontos	Ca ²⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,107	0,185	0,108	0,089	0,077	0,003
BB-02	0,075	0,106	0,057	0,036	0,035	0,001
BB-03	0,144	0,197	0,213	0,185	0,276	0,038
BA-01	0,012	0,049	0,035	0,011	0,013	0,004
BA-02	0,035	0,027	0,040	0,037	0,035	0,004
BA-03	0,170	0,207	0,291	0,178	0,277	0,008
BNB	0,043	0,045	0,032	0,031	0,038	0,002
PB-01	2,084	2,126	1,893	1,964	1,921	1,893
PB-02	2,208	2,116	1,931	1,988	1,948	1,840
PB-03	2,206	2,096	1,999	1,991	1,989	1,905
PA-01	2,534	2,445	2,341	2,376	1,839	1,777
PA-02	2,343	2,233	2,153	2,131	2,055	1,918
PA-03	2,237	2,168	2,066	1,903	2,177	1,964
PC-01	4,038	4,189	4,162	4,053	3,474	3,122
PC-02	3,323	3,200	3,265	3,231	2,832	2,702

Pontos	Sr ²⁺ em meq/l					
	Jul-Ago/2010	Set-Out/2010	Nov-Dez/2010	Jan-Fev/2011	Mar-Abr/2011	Mai-Jun/2011
BB-01	0,0019	0,0016	0,0016	0,0023	0,0016	0,0016
BB-02	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
BB-03	0,0050	0,0048	0,0053	0,0048	0,0039	0,0057
BA-01	0,0003	0,0002	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002
BA-02	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
BA-03	0,0060	0,0066	0,0055	0,0066	0,0066	0,0066
BNB	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
PB-01	0,0194	0,0184	0,0194	0,0194	0,0187	0,0180
PB-02	0,0186	0,0185	0,0187	0,0185	0,0187	0,0183
PB-03	0,0168	0,0218	0,0110	0,0226	0,0217	0,0219
PA-01	0,0193	0,0191	0,0189	0,0196	0,0189	0,0192
PA-02	0,0175	0,0171	0,0167	0,0183	0,0176	0,0167
PA-03	0,0192	0,0167	0,0176	0,0208	0,0162	0,0171
PC-01	0,0255	0,0256	0,0226	0,0283	0,0267	0,0244
PC-02	0,0210	0,0184	0,0192	0,0228	0,0189	0,0178