



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 469

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA
(⁸⁷Sr / ⁸⁶Sr) DOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E
PIRABAS SUPERIOR NOS MUNICÍPIOS DE CASTANHAL E
SANTA MARIA DO PARÁ, ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada por:

IGOR RAFAEL FURTADO DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. MARCO ANTONIO GALARZA TORO (UFPA)

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Silva, Igor Rafael Furtado da, 1982-

Caracterização hidrogeoquímica e isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará, Estado do Pará / Igor Rafael Furtado da Silva. – 2014

x, 71 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marco Antonio Galarza Toro

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Hidrologia - Pará . 2. Química da água - Pará. 3. Aquíferos - Pará. I. Título.

CDD 22. ed. 551.49098115



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

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA
(⁸⁷Sr / ⁸⁶Sr) DOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E
PIRABAS SUPERIOR NOS MUNICÍPIOS DE CASTANHAL E
SANTA MARIA DO PARÁ, ESTADO DO PARÁ**

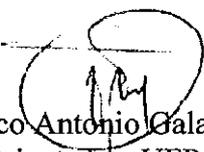
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

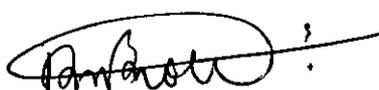
IGOR RAFAEL FURTADO DA SILVA

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

Data de Aprovação: 30/ 09 / 2015

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 ao Espírito Santo, meu verdadeiro amigo e fonte de sabedoria e à minha família, uma das fontes pelo qual Deus revela a mim o seu Amor diariamente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai pela graça a mim concedida através dos meios e fins alcançados para a realização desta maravilhosa obra.

Meus sinceros agradecimentos a meus pais, minha esposa, minhas filhas, meu genro, minha cunhada, meus sobrinhos, meus outros familiares e amigos de oração, que fizeram tudo o que podiam para me ajudarem a sair do coma e a terminar este trabalho.

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

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pelo custeio de diárias e ajuda de custo para as campanhas de coleta de amostras, o qual foi imprescindível para a aquisição de dados desta dissertação.

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro, pela sua inestimável companhia, orientação e companheirismo, sendo para mim considerado mais que um orientador e sim um grande amigo, por meio de quem tenho absorvido grandes pérolas do conhecimento científico.

Agradeço a Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências, sobretudo ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARÁ-ISO) na pessoa do prof. Dr. Cândido Augusto Veloso Moura, pela infraestrutura disponibilizada e atenção conferida durante o processo de obtenção de dados.

Agradeço ao Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa, pela autorização de uso dos laboratórios de Cromatografia, Hidroquímica e Análises Químicas para a realização das análises hidrogeoquímicas, assim como utilização de reagentes, materiais e corpo técnico para obtenção de dados e desenvolvimento da respectiva dissertação.

Agradeço ao meu amigo Lúcio Filho pela inestimável ajuda prestada nas coletas de campo.

Agradeço ao meu amigo Thiago Gomes pela ajuda prestada nas análises hidrogeoquímicas e isotópicas.

Meus comoventes agradecimentos aos Srs. Neutom e Ney, Gestores da Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará e aos técnicos pela autorização e auxílio nas coletas feitas nos poços da referida empresa, necessários para a conclusão deste trabalho.

“A sabedoria é a coisa principal; adquira, pois, a sabedoria; sim, com tudo o que possuiis adquira o entendimento”.

Provérbios 4:7

“Pois, enquanto os judeus pedem sinal, e os gregos buscam sabedoria, nós pregamos a Cristo crucificado, que é escândalo para os judeus, e loucura para os gregos, mas para os que são chamados, tanto judeus como gregos, Cristo, poder de Deus, e sabedoria de Deus”.

1 Coríntios 1:22-24

RESUMO

A partir da década de 70 estudos geológicos e de sensoriamento remoto realizados no nordeste do Estado do Pará identificaram feições e estruturas tectônicas que caracterizaram o processo neotectônico nesta região. Investigações hidrogeológicas na Região Metropolitana de Belém e suas adjacências também foram realizadas objetivando a caracterização das águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas (Pirabas Superior e Inferior), além de avaliar a possibilidade de mistura entre estes aquíferos por meio de sistemas de falhas e fraturas juntamente com o grau de vulnerabilidade a que estes estão sujeitos em relação à ação antropogênica. Paralelamente às investigações hidrogeoquímicas, estudos utilizando a assinatura isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) em águas subterrâneas têm sido realizados objetivando caracterizar as fontes de Sr para cada sistema aquífero, suas histórias geoquímicas e o potencial de mistura de águas entre eles. Dessa forma, foram realizados estudos da composição isotópica de estrôncio, bem como análises hidrogeoquímicas nas subáreas de Castanhal e Santa Maria do Pará, visando à caracterização desses sistemas aquíferos, além da detecção de eventuais misturas caso nelas ocorram. Os resultados hidrogeoquímicos revelaram características distintas entre os sistemas aquíferos estudados, destacando-se os parâmetros pH (3,52 a 5,97 no Sistema Barreiras; 6,17 a 6,60 no Sistema Pirabas Superior), Condutividade Elétrica (45,50 a 193,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Barreiras; 133,80 a 194,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Pirabas Superior), HCO_3^- (até 32,88 mg/L no Sistema Barreiras; 89,10 a 117,15 mg/L no Sistema Pirabas Superior), Cl^- (3,87 a 40,50 mg/L no Barreiras; 3,33 a 6,32 mg/L no Pirabas Superior), Na^+ (1,00 a 18,55 mg/L no Sistema Barreiras; 1,35 a 2,55 mg/L no Sistema Pirabas Superior), Mg^{2+} (até 1,26 mg/L no Barreiras; 2,03 a 2,81 mg/L no Pirabas Superior), Ca^{2+} (até 5,14 mg/L no Barreiras; 21,30 a 27,38 mg/L no Pirabas Superior) e Sr^{2+} (0,0065 a 0,0874 mg/L no Barreiras; 0,2129 a 0,2679 mg/L no Pirabas Superior). Estudos estatísticos mostraram boas correlações entre os sistemas aquíferos ($\geq 0,7$), principalmente durante o período chuvoso. A partir da análise dos diagramas de Piper verificou-se que o Aquífero Barreiras possui predominantemente águas Cl^- - Na^+ , sendo estas influenciadas pela contribuição das águas meteóricas e pela ação antropogênica, apresentando valores de pH ácidos, em torno de 4,7 e alta vulnerabilidade. As águas do Sistema Aquífero Pirabas Superior são majoritariamente HCO_3^- - Ca^{2+} , sendo esta fácies hidroquímica fortemente influenciada pela dissolução do carbonato, tendo um pH com valores acima de 6,0 e com menor vulnerabilidade em relação a ação antrópica. Durante o período seco os resultados isotópicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostraram que as amostras do Sistema Aquífero Barreiras são mais radiogênicas

(0,712716 a 0,723881) que a amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior (0,706080 a 0,709063). No período chuvoso ocorreu o processo de homogeneização das razões isotópicas dos sistemas aquíferos em estudo. Nas amostras do Sistema Aquífero Barreiras houve uma significativa diminuição das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,712716 a 0,723881 para uma faixa de 0,704239 a 0,709957, ficando estes valores semelhantes aos encontrados nas águas do Sistema Aquífero Pirabas Superior. Nos diagramas de composição dos principais íons (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) contra o cloreto (Cl^-) estes apresentaram grande variação indicando possivelmente a presença de mais de dois membros finais no processo de mistura destas águas. O tratamento estatístico multivariado (PCA), juntamente com o diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ mostraram uma tendência de mistura entre estes aquíferos e as águas meteóricas durante o período chuvoso. O modelamento hidrogeoquímico (diagrama de Schoeller) indicou que o grau de mistura das águas do Aquífero Pirabas Superior no Barreiras está em torno de 10% durante o período chuvoso. Em concordância com os estudos isotópicos e hidroquímicos e tomando como base a estruturação neotectônica existente na Região Metropolitana de Belém e suas adjacências, sugerem-se processos de mistura entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior principalmente no período chuvoso. A falta de um sistema de planejamento e gerenciamento do uso dos mananciais subterrâneos nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará, assim como em toda a Região Metropolitana de Belém, alertam para o perigo de contaminação do Sistema Aquífero Pirabas Superior por ação antropogênica, o qual representaria a melhor alternativa para o abastecimento público da população de Belém e suas adjacências com águas de excelente qualidade em relação à potabilidade para o consumo humano.

PALAVRAS-CHAVE: ISÓTOPOS DE ESTRÔNCIO, HIDROGEOQUÍMICA, AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS SUPERIOR

ABSTRACT

Geological surveys and remote sensing investigations in northeastern Pará State identified features and tectonic structures that characterized the neotectonic process in this region. Hydrogeological investigations in the Metropolitan Region of Belém and its surroundings were also held with the objective of characterizing the waters of the Barreiras and Pirabas (Lower Pirabas and Upper Pirabas) systems, and to evaluate the possibility of a mix between these aquifers through faults and fractures systems and the degree of their vulnerability in relation to anthropogenic inputs. Alongside the hydrogeochemical investigations, studies using isotopic signature of strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in groundwater have been performed in order to characterize the Sr sources for each aquifer system, their geochemical histories and the potential water mixture between them. Thus, studies were carried out in the isotopic composition of strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrogeochemical analyzes in subareas from Castanhal and Santa Maria do Pará, aimed at the characterization of these aquifer systems, as well as detection of any possible case mixtures occur among them. The hydrogeochemical results revealed distinct features between aquifer systems studied, highlighting the parameters pH (3.52 to 5.97 in Barreiras System; 6.17 to 6.60 in Upper Pirabas System), Electrical Conductivity (45.50 to 193.90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Barreiras; 133.80 to 194.70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Upper Pirabas), HCO_3^- (up to 32.88 mg/L Barreiras; 89.10 to 117.15 mg/L in Upper Pirabas System), Cl^- (3.87 to 40.50 mg/L Barreiras; 3.33 to 6.32 mg/L in Upper Pirabas), Na^+ (1.00 to 18.55 mg/L in Barreiras System; 1.35 to 2.55 mg/L Pirabas Upper System), Mg^{2+} (up to 1.26 mg/L Barreiras, from 2.03 to 2.81 mg/L in Upper Pirabas), Ca^{2+} (up to 5, 14 mg/L in Barreiras, from 21.30 to 27.38 mg/L in Upper Pirabas) and Sr^{2+} (0.0065 to 0.0874 mg/L in Barreiras; 0.2129 to 0.2679 mg/L in Upper Pirabas). Statistical studies have shown good correlations between the aquifers (≥ 0.7), especially during the rainy season. According to the analyzes of Piper diagrams it was found that the Barreiras aquifer has predominantly Cl^- - Na^+ waters, which are influenced by the contribution of meteoric water and the anthropogenic action, with pH values acids around 4.7 and high vulnerability. The waters of the Upper Pirabas Aquifer System are mostly HCO_3^- - Ca^{2+} , being this hydrochemical facies strongly influenced by the dissolution of carbonate, having a pH higher than 6 and less vulnerability to human action. Isotopic results showed that the Barreiras Aquifer samples are more radiogenic (0.712716 to 0.723881) than the sample of the Upper Pirabas Aquifer System (0.706080 to 0.709063) during the dry season. During the rainy season occurred the homogenization process of

isotopic ratios of aquifer systems under study. Samples of the Barreiras Aquifer System there was significant decrease in values of isotopic the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from 0.712716 to 0.723881 for a range from 0.704239 to 0.709957, getting these values similar to those found in the waters of the Upper Pirabas Aquifer System. Composition diagrams of the major ions against chloride varied greatly, possibly indicating the presence of more than two end members in these waters mixing process. The multivariate statistical analysis (PCA), together with the diagram $1/\text{Sr}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ showed a trend mixture between these aquifers and the meteoric waters during the rainy season. The hydrogeochemical modeling (Schoeller diagram) indicated that the degree of mixing between of the waters of the Upper Aquifer Pirabas and Barreiras is around 10% during the rainy season. Isotopic and hydrochemical studies together with on the existing neotectonic structure in the Metropolitan Region of Belém and its surroundings suggest mixing processes between Barreiras and Upper Pirabas aquifers systems, mainly in the rainy period. The lack of a planning and management system of the use of groundwater sources in the Castanhal and Santa Maria do Pará towns, as well as throughout the Metropolitan Region of Belém, alert to the risk of contamination of the Upper Pirabas Aquifer System by anthropogenic action, which represent the best alternative for public supply of the population of Belém and its surroundings with a excellent water quality with regard to portability for human consumption.

KEYWORDS: STRONTIUM ISOTOPES, HYDROGEOCHEMISTRY, UPPER PIRABAS AND BARREIRAS AQUIFERS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Mapa de localização da área estudada	4
Figura 2 –	Coluna estratigráfica do Cenozóico das plataformas do Pará e Bragantina (Paleogeno Superior – Neogeno)	6
Figura 3 –	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	8
Figura 4 –	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	9
Figura 5 –	Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências	9
Figura 6 –	Poço profundo, relativo à amostra BCAS-03	17
Figura 7 –	Correlação entre somatório de ânions e cátions das análises das águas subterrâneas dos 12 poços	21
Figura 8 –	Variação Temporal do pH nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	22
Figura 9 –	Variação Temporal da Condutividade Elétrica nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	23
Figura 10 –	Variação Temporal da Alcalinidade nas amostras nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	27
Figura 11 –	Variação Temporal da Sílica nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	28
Figura 12 –	Variação Temporal do íon Bicarbonato nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	29
Figura 13 –	Variação Temporal do íon Cloreto nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	30
Figura 14 –	Variação Temporal do íon Nitrato nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	31
Figura 15 –	Variação Temporal do íon Sulfato nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	32
Figura 16 –	Variação Temporal do íon Sódio nas amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo	33
Figura 17 –	Variação sazonal do íon de Potássio nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada	34
Figura 18 –	Variação sazonal do íon de Magnésio nas amostras de águas dos sistemas	35

	aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada	
Figura 19 –	Variação sazonal do íon de Cálcio nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada	36
Figura 20 –	Variação sazonal do Ferro Total nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior	37
Figura 21 –	Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso	38
Figura 22 –	Diagramas de Schoeller dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso	39
Figura 23 –	Modelamento Hidrogeoquímico de 10% entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior	40
Figura 24 –	Comportamento sazonal das variações isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	43
Figura 25 –	Diagramas de Composição dos Principais Cátions e Ânions vs. o íon Cloreto nas amostras de águas dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior..	46
Figura 26 –	Diagramas PCA para as amostras dos Aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. (A), (B), (C) Período Seco. (D), (E), (F) Período Chuvoso	47
Figura 27 –	Diagramas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ das médias das amostras dos Aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. Períodos Seco (A) e Chuvoso (B)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razões Isotópicas de Sr em diversos Ambientes e na água	13
Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos e dados isotópicos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) das águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área estudada referente aos Períodos Seco e Chuvoso	24
Tabela 3 – Dados hidroquímicos das amostras de água subterrâneas utilizadas na modelagem e valores obtidos para as misturas	40
Tabela 4 – Matriz de Correlação ($p < 0,05$) dos principais parâmetros dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. (A) Período Seco. (B) Período Chuvoso	42

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

APHA – American Public Health Association

BI – Balanço Iônico

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COSANPA – Companhia de Saneamento do Pará

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP – MS – Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer

PCA – Principal Component Analysis

RMB – Região Metropolitana de Belém

TIMS – Thermal Ionization Mass Spectrometry

Sumário

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPIÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTRA DE ILUSTRAÇÕES	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 ÁREA DE ESTUDO	3
2.1 LOCALIZAÇÃO	3
2.2 CLIMA	3
2.3 GEOLOGIA REGIONAL	4
2.4 NEOTECTÔNICA DO NORDESTE PARAENSE	6
2.5 HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO	10
2.6 GEOLOGIA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO E SUA IMPORTÂNCIA NA IDENTIFICAÇÃO DE MISTURAS EM ÁGUAS	11
2.7 PROBLEMÁTICA	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 GERAL	16
3.2 ESPECÍFICOS	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 POÇOS PROFUNDOS	17
4.2 POÇOS RASOS	18
4.3 ANÁLISES ISOTÓPICAS E HIDROQUÍMICAS	18
4.3.1 Procedimentos de Campo	18
4.3.2 Procedimentos Laboratoriais para Sr	18
4.4 PARÂMETOS HIDROQUÍMICOS	19
4.4.1 Alcalinidade Total	19
4.4.2 Ferro Total	19
4.4.3 Bicarbonato	19
4.4.4 Sílica	20
4.4.5 Cátions e Ânions	20
4.5 BALANÇO IÔNICO.....	20
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	21
5 RESULTADOS	22
5.1 RESULTADOS HIDROQUÍMICOS.....	22
5.1.1 pH.....	22

5.1.2	Condutividade Elétrica	22
5.1.3	Alcalinidade Total	27
5.1.4	Sílica	27
5.1.5	Cátions e Ânions	28
5.1.5.1	Bicarbonato (HCO_3^-).....	28
5.1.5.2	Cloreto (Cl^-)	29
5.1.5.3	Nitrato (NO_3^-).....	30
5.1.5.4	Sulfato (SO_4^{2-}).....	31
5.1.5.5	Sódio (Na^+).....	32
5.1.5.6	Potássio (K^+).....	33
5.1.5.7	Magnésio (Mg^{2+}).....	34
5.1.5.8	Cálcio (Ca^{2+}).....	35
5.1.5.9	Ferro Total.....	36
5.2	FÁCIES HIDROQUÍMICA	36
5.3	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO	41
5.4	RESULTADOS ISOTÓPICOS	41
5.5	MISTURA DE ÁGUAS	44
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
7	CONCLUSÃO	54
8	REFERÊNCIAS	57
9	ANEXO A – CICLO HIDROLÓGICO PARA CADA PARÂMETRO	61
10	ANEXO B – PERFIL GEOLÓGICO DE ALGUNS POÇOS PROFUNDOS	69
11	ANEXO C – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS POÇOS AMOSTRADOS	72

1 INTRODUÇÃO

A água é a substância mais abundante da Terra, movimentando-se entre seus diversos reservatórios naturais nas fases sólida, líquida e gasosa por meio do ciclo hidrológico. É responsável pela dissolução dos materiais terrestres e nos rios age como meio transportador de partículas. Sua forma sólida pode ser encontrada em grandes reservatórios como geleiras onde, sob a forma de gelo, é responsável pelo modelamento de paisagens. Em subsuperfície, a água se comporta como agente alimentador de poços, que são responsáveis pelo abastecimento de água em grandes centros urbanos e industriais, além de rios e lagos (em períodos de seca), brejos, pântanos, mangues e restingas, responsáveis pelo equilíbrio ecológico.

De uma maneira geral, a água subterrânea pode ser definida como aquela que ocupa os espaços vazios presentes no solo e no regolito (Teixeira *et al.* 2000). As unidades rochosas ou de sedimentos que armazenam a água subterrânea que pode ser economicamente explorada são denominados aquíferos. Segundo Teixeira *et al.* (2000) dos 2,5% de água doce existentes na superfície terrestre, apenas 1% é aproveitável pela humanidade e 29,9% de toda a água doce do planeta são provenientes de aquíferos. Matta (2002) sugere que as águas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém (RMB) e vizinhanças se mostram como excelente alternativa para o abastecimento público. Considerando a escassez de água doce, além de sua distribuição irregular no globo terrestre, o aumento populacional e o crescimento desordenado dos centros urbanos e industriais vêm fazendo pressão aos recursos hídricos subterrâneos. Isso é devido à baixa qualidade das águas superficiais motivadas por diversos processos de contaminação ambiental, além da exigência do padrão de potabilidade desta água para seus diversos usos múltiplos. Entre eles, destacam-se o consumo humano, a dessedentação de animais, o uso nos processos produtivos de diversas indústrias, como as de fabricação de bebidas, entre outros. Segundo Paranhos (2010) o estudo das propriedades físico-químicas dos mananciais subterrâneos serve como parâmetro para uma correta utilização destes em função das finalidades a que se destinam. O conhecimento hidroquímico minucioso da qualidade das águas subterrâneas levará ao conhecimento de sua história geológica, sua origem dentro do ciclo hidrológico como também a influência que estas águas sofrem do solo e rochas por onde elas circulam (Paranhos 2010).

Dentro deste contexto inserem-se as cidades de Castanhal e Santa Maria do Pará. Estes municípios localizam-se próximo a Região Metropolitana de Belém, tendo como principais características a expansão populacional desordenada, a ausência de políticas públicas e de um programa de gestão dos recursos hídricos. Em muitas partes dos referidos municípios não há a

presença de infraestrutura e saneamento básico para a população. Soma-se a isso o crescimento de zonas de ocupação ilegais (invasões) contribuindo para o crescimento da demanda de água potável sobrecarregando o sistema de abastecimento de água local, quando existente.

Estudos hidrogeoquímicos em águas provenientes de aquíferos têm sido utilizados buscando determinar a potencialidades deste recurso hídrico para o abastecimento público, para o uso na indústria, na agricultura, entre outros. Além disso, cabe destacar a utilização destes estudos visando o estabelecimento de informações de cunho técnico necessárias para gestão deste recurso ambiental no que diz respeito ao seu uso e proteção.

Concomitante ao estudo hidroquímico, pesquisas 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 (Espectrômetro de Massa com fonte de Plasma de Acoplamento Indutivo), possibilitando estudos com diversos elementos químicos, tais como U, Pb, Sr, Nd, levando a diversas aplicações como estudos de proveniência, em geocronologia, estratigrafia química e alterações temporais da Terra por processos subterrâneos (Banner 2004). O elemento Estrôncio (Sr) possui grande aplicabilidade em estudos de águas através da combinação de sua concentração com razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. É utilizado em estudo sobre intrusão salina, e como traçador de evolução e mistura de águas subterrâneas (Jorgensen *et al.* 2008). A composição isotópica do Sr nas águas é peculiar em cada ambiente, isto é, ambientes diferentes como o caso do ambiente de sedimentos clásticos correspondente a Formação Barreiras, apresentará composição isotópica de Sr mais radiogênicas que a de um ambiente de sedimentos marinhos representado pela Formação Pirabas.

O estudo isotópico na região norte é relativamente recente, sendo que os estudos utilizando a geoquímica isotópica e a hidrogeoquímica são bastante escassos, destacando-se Allégre *et al.* (1996), Bordalo *et al.* (2007), Queiroz *et al.* (2009), Oliveira Filho (2012), Oliveira Filho & Galarza (2013) e Horbe *et al.* (2013).

Dessa forma, foram realizados estudos da composição isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), bem como análises hidrogeoquímicas (cátions e ânions) nas subáreas de Castanhal e Santa Maria do Pará, visando à caracterização desses sistemas aquíferos, além da detecção de eventuais misturas caso nelas ocorram.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO

- Castanhal

O município de Castanhal se localiza a uma latitude 01°17'49" Sul e a uma longitude 47°55'19" Oeste, estando a uma altitude de 41 metros do nível do mar. Possui uma área de 1.029.191 Km². Sua população estimada em 2013 era de 183.917 habitantes, apresentando uma densidade demográfica 168,29 Hab./Km² (IBGE 2014). Este município se encontra a 68 km de distância da cidade de Belém (Capital do Estado do Pará), sendo que o acesso a ele se dá pela BR 316 seguindo rumo leste da Capital. O sistema de abastecimento público de água é feito unicamente pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará – COSANPA.

- Santa Maria do Pará

A cidade de Santa Maria está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 01°21'01" sul e longitude 47°34'32" oeste. Está a uma altitude de 51 metros do nível do mar. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, este município possui uma população estimada em 2013 de 23.649, com uma densidade demográfica de 50,31 hab./Km². Seu limite territorial é de 457.725 Km². Está a 103,7 km de distância em linha reta a leste de Belém. O acesso a esta cidade se dá pela BR 316 para leste da cidade de Castanhal. Também neste município o sistema de abastecimento público de água da população é feito pela COSANPA (Fig. 1).

2.2 CLIMA

A RMB e adjacências, localizadas no nordeste do Estado do Pará, possuem altitudes variando desde ao baixo do nível médio do mar (regiões de baixadas) até os 60m de altitude em alguns poucos locais. Apresenta dois aspectos importantes do ponto de vista climático: baixa latitude (1°28'3" S) e proximidade com o litoral (Costa 2005). Segundo Oliveira & Souza (1997), por sua posição geográfica, a RMB, pela classificação de Köppen, pertence à categoria climática “equatorial úmido” do tipo Af.

As características principais do clima são: altas temperaturas (sempre acima de 26 °C), ventos de baixa velocidade intercalados com frequentes momentos de calmaria, altos índices de umidade relativa do ar e precipitação abundante, oscilando entre 2.800 e 3.150 mm anuais.

A umidade relativa da RMB reflete uma grande influência do fator térmico, com a variação média interanual oscilando entre 81,8 a 91%, com uma média anual de 86%. Por essa razão a região se apresenta bastante úmida, o que causa grande desconforto ambiental. A área é submetida a um total de brilho solar de 35% a 60%, onde a insolação apresenta grande

relação com o elemento hídrico. A nebulosidade é bastante elevada, com variação média interanual de 6,6 a 6,8 décimos (Oliveira & Souza 1997).

Estudos realizados por Oliveira & Souza (1997) mostraram que as características climáticas da RMB e adjacências, no período de 1896 a 1995, apresentaram a temperatura do ar com valores médios anuais de 25,8° C e as médias de temperatura máxima e mínima alcançaram valores de 31,50 °C e de 22,0 °C, respectivamente.

As relações entre as alterações climáticas e os processos de urbanização são bem conhecidas. Essas alterações resultam do rápido e desordenado crescimento populacional dos grandes centros urbanos, tendo como atrativos a busca de trabalho, saúde, educação, e outros serviços. Com isso, as áreas ocupadas têm as suas coberturas naturais modificadas por diversos tipos de construções prediais e solos pavimentados, cuja consequência imediata é um aumento da temperatura causada por alterações no balanço radiativo, na circulação do ar e na taxa de evaporação, gerando assim um clima urbano específico (Costa & Martins 1996).

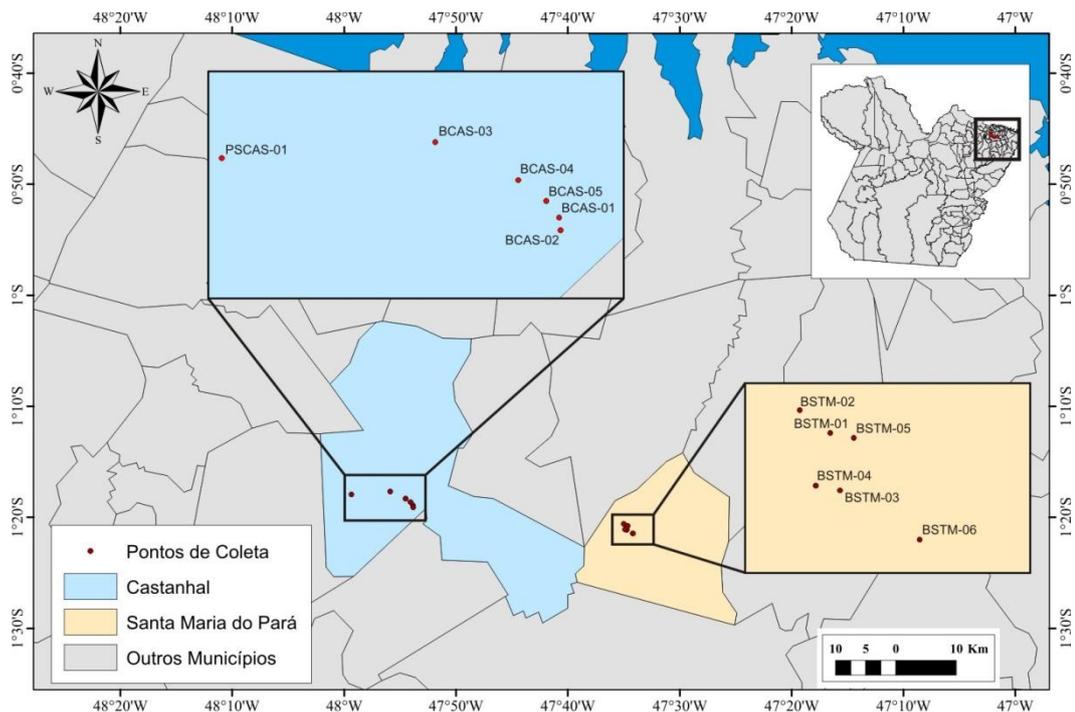


Figura 1. Mapa de localização da área estudada. Nomenclatura das amostras: BCAS (Aqüífero Barreiras - Poços Castanhal), BSMP (Aqüífero Barreiras - Poços Santa Maria do Pará), e PSCAS (Aqüífero Pirabas Superior - Poços Castanhal).

2.3 GEOLOGIA REGIONAL

Os depósitos miocênicos nos estados do Pará e Maranhão, tradicionalmente referidos de formações Pirabas (Neo-Oligoceno/Eomioceno) e Barreiras (Meso a Neomioceno), ocorrem em diferentes contextos estruturais, sendo particularmente bem expostos no norte da Bacia de

São Luís, centro-leste da sub-bacia de Cametá na porção leste do Sistema de Graben do Marajó, Bacia de Bragança-Vizeu, e nas plataformas Bragantina e do Pará (Rossetti 2006).

A área em estudo abrange os depósitos miocênicos denominados litoestratigraficamente de Formações Pirabas, Barreiras e Sedimentos Pós-Barreiras (Sauma Filho 1996). A Formação Pirabas é formada por rochas carbonáticas que foram depositadas durante o Mioceno Inferior (Maury 1925, Petri 1957, Ferreira 1966, Ferreira 1982, Fernandes 1984) com proveniência de um ambiente deposicional caracterizado como marinho aberto, de águas quentes, rasas e agitadas, contendo canais lagunares ou estuarinos e restritamente mangues em suas adjacências (Góes *et al.* 1990). Segundo Petri (1957) esta formação possui a seguinte subdivisão no que diz respeito às suas biofácies: Castelo, Canecos e Baunilha Grande. Ferreira¹ (1977 *apud* Góes *et al.* 1990) apresentou a seguinte subdivisão da base para o topo: Castelo, Baunilha Grande e Capanema (antiga Canecos). Porém, para Góes *et al.* (1990), a Formação Pirabas não possui um único posicionamento estratigráfico, ocorrendo intercalações entre estas subdivisões.

Segundo Rosseti (2006) a Formação Barreiras possui uma distribuição ao longo da faixa litorânea que se estende do Amapá ao Rio de Janeiro. Ela repousa discordantemente sobre a Formação Pirabas (Francisco *et al.* 1971) não ocorrendo interdigitação entre as elas segundo Ferreira & Francisco (1988). Porém, baseando-se em estruturas sedimentares palinomorfos, Góes *et al.* (1990) afirmam que o contato entre as formações Pirabas e Barreiras se dá de forma interdigitada e gradual. O trabalho de Rosseti (2006) demonstra que estas formações possuem uma genética relacionada, vinculada ao desenvolvimento de uma mesma sequência deposicional, levando à gradação de estratos carbonáticos-siliciclásticos para totalmente siliciclásticos ao longo da evolução miocênica. A Formação Barreiras é constituída de arenitos quartzosos, depósitos heterolíticos, argilitos e, menos comumente, conglomerados de colorações negra, verde oliva, cinza ou, ainda, variegada (i.e., violácea, amarelada a avermelhada).

A Formação Barreiras é coberta pela unidade Pós-Barreiras, que consiste de sedimentos inconsolidados, principalmente arenosos e uma fração de argila variando de fina a média e sem estrutura sedimentar aparente. Ocorrem também seixos milimétricos de quartzo leitoso, dispostos caoticamente, além de concreções ferruginosas. Incluem-se ainda os sedimentos aluvionares holocênicos atuais e subatuais, localizados nos vales de rios e igarapés que cortam a região. (Matta 2002). A coluna estratigráfica da área em estudo pode ser vista na Fig. 2.

¹Ferreira, E.S. 1977. Fácies da Formação Pirabas (Mioceno Inferior): Novos conceitos e ampliações. (Projetos específicos ABC. FINEP). *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 49(2): 353.

ÉPOCA		UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQUÊNCIA DEPOSICIONAL
PLIOCENO-QUATERNÁRIO		PÓS-BARREIRAS	Sedimentos Pós-Barreiras
MIOCENO	SUPERIOR	PALEOSSOLO LATERÍTICO	Discordância 3
	MÉDIO	FORMAÇÃO BARREIRAS SUPERIOR-MÉDIO	Formação Barreiras (parte intermediária e superior)
	INFERIOR	FORMAÇÃO BARREIRAS INFERIOR	Discordância 2
OLIGOCENO SUPERIOR		FORMAÇÃO PIRABAS	Formação Pirabas (parte inferior)
		PALEOSSOLO BAUXÍTICO-LATERÍTICO	Discordância 1

Figura 2. Coluna estratigráfica do Cenozóico das plataformas do Pará e Bragantina (Paleogeno Superior – Neogeno), modificado de Rossetti (2001).

2.4 NEOTECTÔNICA DO NORDESTE PARAENSE

Costa *et al.* (1996) reconhecem a presença de dois eventos tectônicos na região: O primeiro, representado pelos registros das últimas manifestações do evento Sul-Atlântico, de caráter extensional, o que favoreceu o desenvolvimento de um perfil laterítico maturo atribuído ao período Paleogeno (Eoceno-Oligoceno). O segundo, correspondente à Neotectônica, do Mioceno/Recente marcado por um regime transcorrente.

A neotectônica consiste no movimento da crosta terrestre surgido a partir do período Neogeno (Mioceno/Plioceno) e durante o Quaternário (Palheta 2008). Segundo Hasui & Costa (1996), estudos neotectônicos aplicados à hidrogeologia são importantes para o entendimento do mecanismo de percolação das águas subterrâneas, processos de contaminação de aquíferos, mitigação dos efeitos de afluxos de água, além da identificação das áreas de recarga e geometria dos aquíferos.

Para Costa (1996) o quadro neotectônico da Amazônia pode ser definido como um conjunto de estruturas e de sequências sedimentares, assim como a distribuição dos elementos principais das bacias hidrográficas e dos sistemas de relevo desenvolvidos do Mioceno ao Recente. Processos estes que se iniciaram com a rotação da placa sul-americana de leste para

oeste, resultando na implantação de um regime tectônico intraplaca. Esta rotação levou a atuação de um binário dextral E-W, com componentes transpressivo NW-SE e transtensivo NE-SW.

O estudo dos lateritos na Amazônia possibilitou a identificação de deslocamentos neotectônicos. Segundo Costa (1991) os lateritos tiveram dois períodos distintos de desenvolvimento: o Terciário Inferior (Eoceno-Oligoceno) e Terciário Superior/Pleistoceno. No primeiro houve a formação de lateritos com perfis bem evoluídos e profundos denominados lateritos antigos ou maduros. O Segundo período é marcado pela presença de lateritos mais jovens (imatuross) pouco evoluídos e menos profundos. A deformação de lateritos para Costa (1991) indica que a neotectônica atuou de forma descontínua na região, ou seja, em pulsos. Um primeiro pulso ocorreu logo após a formação dos lateritos maduros, possivelmente no Mioceno e um segundo, que sobreveio após a instalação dos lateritos imatuross, ainda no Pleistoceno, o que também é explicitado por Bemerguy *et al.* (1995).

- Miceno – Plioceno

Segundo Costa *et al.* (1996) e Palheta (2008), as manifestações neotectônicas deste período são caracterizadas pelo desenvolvimento de estruturas transtensivas.

As falhas transtensivas se dão nas regiões da ilha de Marajó, Belém, Ipixuna do Pará e zonas litorâneas. Palheta (2008) afirma que estas falhas são caracterizadas como mestras normais, lístricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE, as quais estruturam a bacia na qual foram depositados os sedimentos da sequência Pirabas-Barreiras. A evolução tectono-sedimentar desta bacia de afastamento, segundo Costa *et al.* (1996) está pautada em duas fases (Fig. 3):

- 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 sequência 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 sequências sedimentares na direção NW-SE.

- Pleistoceno – Holoceno

Essa época é caracterizada pelo aparecimento, 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 ocasionou a distribuição, em faixas alternadas, das formações Ipixuna e Barreiras, expondo isoladamente a Formação Pirabas em meio a Formação Barreiras, além de ter provocado o basculamento da Ilha de Marajó. Isso possibilitou a deposição da sequência Pós-Barreiras. Essa movimentação gerou a formação de arcos, de cotovelos, de segmentos retos, de capturas e de segmentos meandantes na rede de drenagem (Fig. 4).

A partir do estudo feito por Igreja *et al.* (1990), as falhas normais (NE-SW) permitiram regionalmente posicionar a direção NW-SE como a de maior estiramento. Com base nesta informação, Igreja *et al.* (1990) propuseram um modelo esquemático do arranjo neotectônico da região de Belém e adjacências, conforme a Fig. 5.

Bandeira & Abreu (2012), realizaram um estudo em Castanhal integrando dados de relevo, drenagem e geológicos e confeccionando-os em um mapa morfoestrutural, sendo esta enquadrada no contexto estrutural neotectônico proposto por Costa *et al.* (1996), ou seja, as direções NW-SE seriam as mais distensivas.

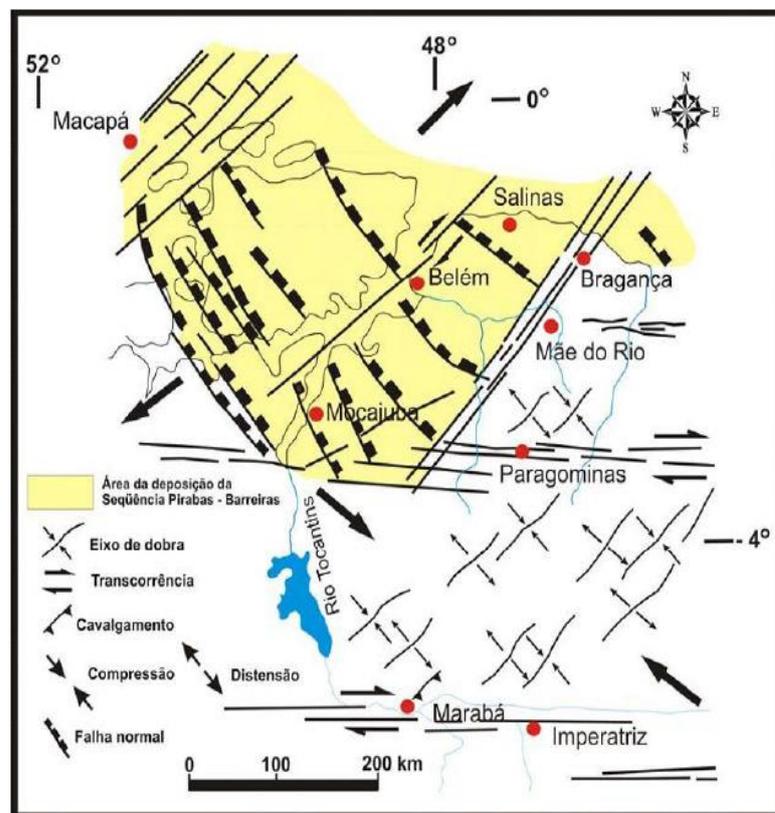


Figura 3. Estruturas paleogenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Sequência Pirabas-Barreiras. Falhas transcorrentes dexas NE-SW seccionam as falhas normais (Costa *et al.* 1996).

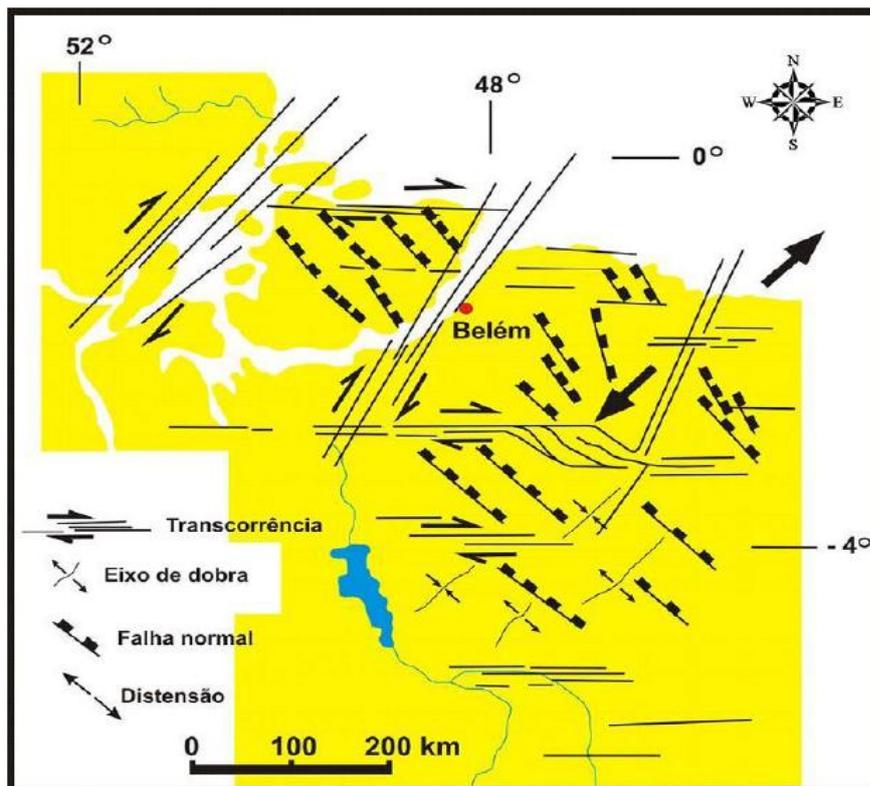


Figura 4. Surgimento de várias estruturas romboédricas transensivas controladas por falhas transcorrentes dextrais E-W, normais NW-SE reativadas, transcorrentes dextrais NE-SW e falhas normais N-S (Costa *et al.* 1996; Palheta 2008).

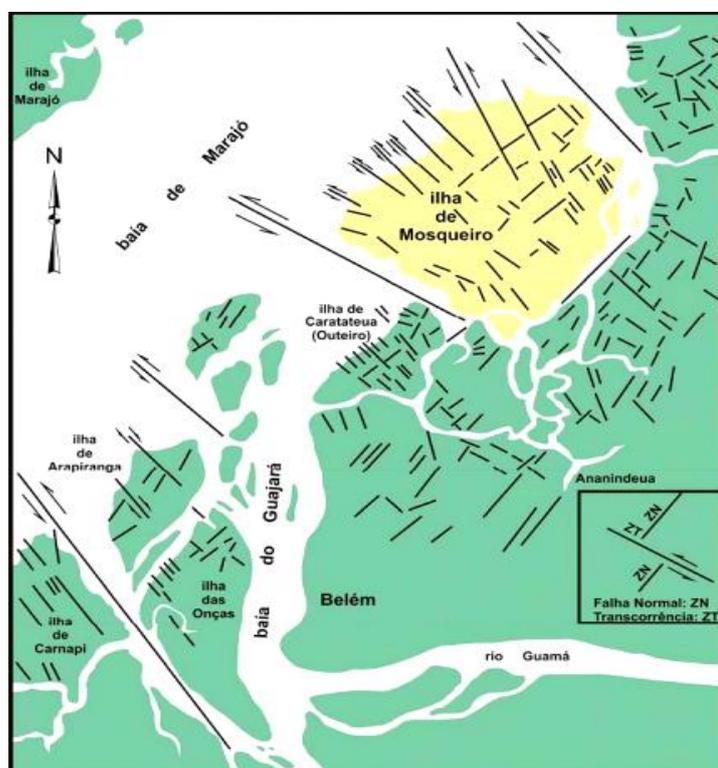


Figura 5. Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências (Igreja *et al.* 1990; Palheta 2008).

2.5 HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO

A hidrogeologia da área de estudo segundo Sauma Filho (1996), Matta (2002) e Cabral (2004) é dividida em quatro (4) sistemas aquíferos: aluviões, Pós-Barreiras, Barreiras e Pirabas, este último dividido em superior e inferior.

- **Aluviões**

Constituem-se de domínios de forma permoporosa apresentando boa capacidade de armazenamento de água. Dentro da região Metropolitana de Belém possuem uma espessura de 10 m, não sendo tão significativa quanto ao armazenamento hídrico. A principal fonte de recarga dos aquíferos formados nestes domínios é a precipitação pluviométrica. Apresentam uma vazão de 10 m³/h.

- **Sistema Aquífero Pós-Barreiras**

É constituído por níveis argilo-arenosos inconsolidados, com granulometria variando de fina até conglomerativas existentes em um espaçamento de 25 metros a partir da superfície. Há a presença de um horizonte laterítico com uma espessura de até 3 metros, com os sedimentos possuindo uma matriz argilo-arenosa envolvendo nódulos ferruginosos e/ou aluminosos. A vazão neste sistema aquífero é em torno de 5 m³/h, apresentando um potencial hidrológico fraco, porém com uma água de boa qualidade. Em alguns casos há necessidade de tratamento desta água devido à concentração de Fe nela presente. Estes aquíferos são de forma livre e confinada sendo a precipitação pluviométrica sua principal fonte de recarga. A vulnerabilidade destes reservatórios é alta devido à profundidade de ocorrência deles, que é inferior a 25 metros, ficando suscetíveis à interação com fossas sépticas, postos de combustíveis, cemitérios, áreas de construção de poços para captação de água, entre outros.

- **Sistema Aquífero Barreiras**

São aquíferos com expressões litológicas bastante heterogêneas constituídos basicamente por areia e arenitos, granulometria que varia de fina a grossa, e cascalhos. Verifica-se também a presença de níveis lateríticos e níveis argilosos caulinizados. Possuem profundidade variando de 25 a 90 metros e espessura média de 70 metros. A vazão nestes reservatórios varia de 10 a 70 m³/h. O alto teor de Fe (0,3 mg/L) é um importante entrave no processo de captação desta água, pois está fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde. A recarga é feita por meio da contribuição das camadas sobrepostas e pela chuva em unidade de afloramento dessa unidade.

- **Sistema Aquífero Pirabas**

Definida como uma unidade composta pelos sedimentos marinhos, fossilíferos da Formação Pirabas. Os níveis desse aquífero ocorrem em intervalos de 70 até 259 metros, sendo subdividido em Pirabas Superior e Inferior. O primeiro subsistema é composto por aquíferos com camadas de argilas calcíferas de cor cinza-esverdeada e leitos de calcário de colorações cinza esbranquiçada, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero. Geralmente aparecem em intervalos de 70 a 180 metros, possuindo espessuras em torno de 50 m e vazões entre 100 a 180 m³/h, principalmente quando estão associados aos sedimentos de granulação mais grossa. São de natureza confinada e apresentam uma boa continuidade lateral. Já o segundo é composto predominantemente por sedimentos arenosos de cor cinza esbranquiçada, com granulação fina a média, níveis conglomeráticos e intercalações mais espessas de argilas e siltitos avermelhados. Os aquíferos deste subsistema ocorrem nos intervalos de 180-193 m, 197-211 m, 229-240 m e 251-259 m. Possuem 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, classificada como cálcico-magnesianas-bicarbonatadas. Foram disponibilizados pela COSANPA os perfis dos poços profundos BCAS-04, BSMP-04 e BSMP-06, que podem ser vistos no Anexo B.

2.6 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), que inclui: Berílio, Magnésio, Cálcio, Estrôncio, Bário e Rádio. Seu raio iônico (1,13Å) é próximo ao do cálcio (0,99Å) 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 µg/L (Allégre *et al.* 1996, Banner 2004). A concentração de Sr em águas subterrâneas varia de 6 a 980 µg/L (Banner *et al.* 1994, Bullen *et al.* 1996) e a concentração relatada em águas pluviais varia de 96 a 874 µg/L (Herut *et al.* 1993).

O estrôncio tem quatro isótopos estáveis que ocorrem naturalmente, ⁸⁴Sr, ⁸⁶Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁸Sr 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 ⁸⁷Sr 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água do mar é de 0,709152 – 0,709195 (Faure 1986, Hodell *et al.* 1990, Jorgensen & Holm 1994, Woods *et al.* 2000, Négrel & Petelet Giraud 2005) com um valor médio de 0,709174. 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 (Faure 1986).

A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no material em suspensão dos rios da Amazônia varia entre 0,71698 e 0,75640, enquanto que no material dissolvido esta razão é mais baixa e varia de 0,708776 a 0,733172 (Allégre *et al.* 1996). Esta diminuição da razão isotópica na carga dissolvida é explicada pelos autores pelo fato deste material conter uma parte significativa de Sr derivado de rochas sedimentares e águas pluviais com baixa razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (variando entre a água do mar e os calcários). Valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da água da chuva em Israel variaram entre 0,70792 e 0,70923 (Herut *et al.* 1993) e em Guiyang no sudoeste da China de 0,707934 a 0,708473 (Han & Liu 2006). Entretanto, valores de 0,709198 a 0,713143 foram encontrados em Massif Central na França, enquanto que em Pequim (0,709118 a 0,710357), em Loess Plateau (0,710252 a 0,713024) e Guizhou na China variou entre 0,707463 e 0,712752 (Négrel & Roy 1998, Xu & Han 2009, Xu *et al.* 2009, Han *et al.* 2010). Alguns destes valores são maiores do que a razão isotópica da água do mar, sugerindo a presença de diversas fontes de estrôncio radiogênico, tanto natural como antropogênica.

Águas minerais na Grã-Bretanha mostram uma ampla gama de composições isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que variam entre 0,705868 de fontes de rocha vulcânica Carbonífera em Dunbartonshire, Escócia para 0,720647 no Aquífero Dalradian de Aberdeenshire, Escócia. Segundo Montgomery *et al.* 2006 a composição $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das águas minerais mostra uma correlação geral com as rochas aquíferas, atribuindo a diferença de composição isotópica nas águas de rochas mais velhas terem uma assinatura radiogênica maior do que aquelas de rochas mais jovens.

Banner *et al.* (2004) explicaram que a variação da razão isotópica de Sr em águas subterrâneas é similar àquela de águas superficiais, sendo esta variação identificada com 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 as águas meteóricas de recarga do aquífero australiano com rochas ígneas máficas cenozoicas, que possuem uma assinatura isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ juvenil, ou seja, rochas ígneas e materiais alóctones com razões isotópicas não radiogênicas como resultado de curto tempo de residência crustal ou baixa razão Rb/Sr. A Tab. 1 apresenta os valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de diferentes materiais terrestres.

Tabela 1. Razões Isotópicas de Sr em diversos Ambientes e na água.

Ambientes	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Fonte
Crosta Continental Superior	0,7163 - 0,8240	Goldstein & Jacobsen (1988)
Carbonatos Marinhos Fanerozóicos	0,707 - 0,709	Banner (2004)
Água do Mar Atual	0,709172	Hodell <i>et al.</i> (1990)
Água da chuva em áreas oceânicas	0,70920	Capo <i>et al.</i> (1992)
Água da chuva em áreas continentais	0,707463 - 0,713143	Herult <i>et al.</i> (1993); Négre & Roy (1998); Han e Liu (2006); Xu & Han (2009); Xu <i>et al.</i> (2009); Han <i>et al.</i> (2010)
Água da Chuva Região Metropolitana Belém	0,705316	Oliveira Filho (2012)
Sedimentos em Suspensão do Rio Amazonas	0,71327 - 0,72146	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Sedimentos em Suspensão do Rio Negro	0,71698	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Sedimentos em Suspensão do Rio Trombetas	0,74683	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Rocha Formação Barreiras	0,727492	Oliveira Filho (2012)
Rocha Formação Pirabas	0,708752	Oliveira Filho (2012)
Rocha Macrofósseis Formação Pirabas *	0,708696	Belúcio (2001)
Água do Sistema Aquífero Barreiras *	0,712855	Oliveira Filho (2012)
Água do Sistema Aquífero Pirabas *	0,709755	Oliveira Filho (2012)

* média

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 valores de $\delta^{87}\text{Sr}$ 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. No Pântano Salino aonde se encontra um ambiental transicional os valores variaram de 0,70959 a 0,70984, sendo que o Furo do chato, localizado no ambiente de mangue intermaré revelou a influência marinha nas águas sub-superficiais 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,7092, 0,7094 e 0,7082, respectivamente. Queiroz *et al.* (2009) e Horbe *et al.* (2013) utilizaram os isótopos de estrôncio visando estudar o comportamento geoquímico das águas do médio e baixo Rio Madeira e seus tributários (0,71920 a 0,72327), mostrando que as águas deste rio são mais radiogênicas que as dos rios Solimões e Amazonas (0,708685 a 0,714461), fato explicado pelos autores devido à influência das águas de seus tributários, tanto da margem direita como da esquerda, que apresentam características geoquímicas heterogêneas. Oliveira Filho (2012) utilizou a razão isotópica de estrôncio para investigar possível mistura de águas entre os aquíferos Barreiras (0,71002-0,71260) e o Pirabas (0,70857-0,71070) nos municípios de Belém e Ananindeua. Ele avaliou também as rochas das formações Barreiras (0,727492) e Pirabas (0,708752). O valor da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ encontrados por Oliveira para as rochas da Formação Pirabas é semelhante aos resultados encontrados por Belúcio (2001) para os macrofósseis desta formação no nordeste do estado do Pará (Tab. 1).

Utilizando os parâmetros pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} , Paranhos (2010) realizou um modelamento geoquímico a partir do diagrama de composição do tipo Schoeller para os aquíferos Barreiras e Pirabas, e sugeriu mistura das amostras entre eles com 10% das águas do Aquífero Pirabas influenciando no Barreiras. Isso foi confirmado por Oliveira Filho & Galarza (2013) que, além da hidrogeoquímica, utilizaram análises isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e estatística multivariada (Análise de Discriminante e Análise de Componente Principal) e mostraram, de forma geral, que no período chuvoso há homogeneização maior nas razões isotópicas obtidas (abaixo de 0,71), corroboradas pela razão isotópica da água da chuva (0,705316), sugerindo misturas entre estes sistemas aquíferos. Oliveira Filho & Galarza (2013) também identificaram que águas do Aquífero Barreiras são mais radiogênicas (continental) que as do Aquífero Pirabas (marinha) como confirmado anteriormente por Bordalo *et al.* (2007).

A combinação destes resultados com os estudos estruturais no que diz respeito às feições neotectônicas existentes na Região Metropolitana de Belém sugerem processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre estes sistemas aquíferos.

2.7 PROBLEMÁTICA

O trabalho de Costa (2005) mostra que os arranjos geométricos dos aquíferos têm sofrido os efeitos neotectônicos ativos desde o terciário, levando a crer que o terreno nesta região se mostra bastante fraturado. Além disso, as falhas normais são as superfícies de menor pressão sugerindo que esta região seja a mais favorável para a recarga dos aquíferos por ela interceptados. Paranhos (2010) estudando a hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci mostra a possibilidade de mistura entre os sistemas aquíferos Pirabas e Barreiras. Isso confirma a preocupação de Costa (2005) no que diz respeito à possibilidade de contaminação desses aquíferos por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, haja vista muita delas estarem completamente oneradas pela ocupação humana seja pela urbanização ou por atividade agrícola.

Além dos estudos hidroquímicos na análise de misturas estudos isotópicos de Sr têm crescido na caracterização de misturas de sistemas aquíferos. Bordalo *et al.* (2007) estudaram a composição isotópica de Estrôncio em águas sub-superficiais na região de Bragança. Queiroz *et al.* (2009) estudaram a hidroquímica do Rio Solimões na região entre Manacapuru e Alvarães no Amazonas. Horbe *et al.* (2013) estudaram o comportamento geoquímico das águas do médio e baixo Rio Madeira e seus tributários utilizando a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Oliveira Filho & Galarza (2013) investigaram a mistura de águas entre os sistemas aquíferos Pirabas e Barreiras em Icoaraci e Ananindeua utilizando a hidroquímica clássica e a assinatura isotópica de Sr. As assinaturas isotópicas destes aquíferos são distintas devido à diferença de suas composições isotópicas. No caso da ocorrência de misturas espera-se um padrão mais homogêneo. Além dos problemas já citados, a carência de estudos isotópicos na região em estudo justifica a importância deste trabalho.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

O presente trabalho se propõe a caracterizar os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, além de identificar possíveis misturas entre eles, através da geoquímica isotópica (utilizando o Sr) e a hidrogeoquímica clássica nas áreas dos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará durante um ciclo hidrológico completo.

3.2 ESPECÍFICOS

- Caracterização hidroquímica das amostras de águas de Castanhal e Santa Maria do Pará;
- Determinar as assinaturas isotópicas de Sr e suas concentrações objetivando caracterizar os aquíferos estudados;
- Compreender o mecanismo de interação e o grau de vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas nas áreas estudadas;
- Averiguar a possibilidade de misturas entre os aquíferos estudados;

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O período de amostragem foi do mês de Dezembro de 2012 a Dezembro de 2013 caracterizando um ciclo hidrológico completo contemplando os meses chuvosos (Nov-Dez, Jan-Fev e Mar-Abr) e de estiagem (Mai-Jun, Jul-Ago e Set-Out). O intervalo de coletas se deu de dois em dois meses, totalizando seis campanhas de coleta.

Para estudo isotópico e hidroquímico das águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, em Castanhal e Santa Maria do Pará foram escolhidos 6 poços sendo 3 rasos particulares e 3 profundos (Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA), totalizando 6 amostras p or município e 12 amostras no total para cada campanha de coleta.

4.1 POÇOS PROFUNDOS

As amostragens dos poços profundos foram realizadas nas imediações da COSANPA, empresa responsável pelo abastecimento público dos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará. A Fig. 6 mostra o poço BCAS-03, no município de Castanhal, onde a amostra foi coletada por meio de registro lateral (“ladrão”). Este poço possui uma profundidade em torno de 105 metros, o que dificulta o processo de percolação e possibilidade de contaminação deste. É importante frisar que a amostra de água do poço PSCAS-01 com profundidade de 100 metros foi assumida como sendo representante do Aquífero Pirabas Superior por apresentar características geoquímicas diferentes das amostras dos poços do sistema Barreiras.



Figura 6. Poço profundo relativo à amostra BCAS-03.

4.2 POÇOS RASOS

A coleta das amostras dos poços rasos foi realizada em residências particulares nos municípios da área em estudo e também numa escola. Sabe-se que os poços rasos são mais suscetíveis a ação antrópica, oriunda das descargas de esgotos provenientes de fossas e sumidouros. A maioria destes poços não se enquadra totalmente dentro dos padrões propostos pelas legislações sanitária e ambiental. Assim foram escolhidos poços em acordo com as legislações citadas.

4.3 ANÁLISES ISOTÓPICAS E HIDROQUÍMICAS

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

4.3.1 Procedimentos de Campo

Os procedimentos de campo foram desenvolvidos conforme a metodologia proposta pelo guia nacional de coletas e preservação de amostras (ANA 2011). Foram utilizadas garrafas de polietileno com tampa de enroscar e volume de 1000 mL lavadas inicialmente com solução ácida e em seguida com água deionizada visando evitar qualquer tipo de contaminação proveniente do frasco. Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos *in situ* (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos). As amostras foram acidificadas com HNO_3^- a pH em torno de 2 e acondicionadas em baixa temperatura para transporte até o laboratório de Hidroquímica da UFPA.

As amostras destinadas à análise isotópica de 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 1000 mL refrigeradas (Négrel & Petelet Giraud 2005, Bordalo *et al.* 2007, Négrel *et al.* 2010).

4.3.2 Procedimentos Laboratoriais para Sr

Conforme a metodologia utilizada por Bordalo *et al.* (2007) para determinação da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas, cerca de 200 mL (poços profundos) e 300 mL (poços rasos) das amostras coletadas foram evaporados e posteriormente solubilizados com 0,7 mL de HNO_3 -bidestilada 3,5 mol/L, para separação cromatográfica do Sr com resina Sr.spec. Após esta separação, além de todos os procedimentos laboratoriais para evitar ao máximo a contaminação de Sr, as amostras foram solubilizadas com 1200 mL de HNO_3^{***} (concentrado,

3%) e levadas ao espectrômetro de Massa (Inductively Coupled Plasma Massspectrometry – ICP-MS, Modelo Neptune) e feitas as leituras das amostras.

Os valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ foram normalizadas para $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$ 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 ($^{86}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,054998$; $^{87}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,021387$; $^{88}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,165433$). Para a precisão analítica utilizou-se o padrão SRM-987 (Solução Neptune) que forneceu uma média de $0,710270 \pm 0,000020$ (2σ , $n = 44$ leituras) para a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e os brancos totais de Sr ficaram entorno de 3,8 ng.

4.4 PARÂMETOS HIDROQUÍMICOS

Os parâmetros hidroquímicos foram determinados por meio das metodologias recomendadas pela APHA (1995) e ANA (2011):

4.4.1 Alcalinidade Total

A alcalinidade total foi 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 utilizados a fenolftaleína e o alaranjado de metila, e os resultados expressos em mg/L de CaCO_3 (Rodier 1981).

4.4.2 Ferro Total

Na determinação do Fe total foi utilizado o método da orto-fenantrolina, com a determinação espectrofotométrica de ferro, espectrofotômetro marca BECKMAN DU-6 a $\lambda=510$ 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 realizada mediante curva de calibração a partir de padrões pré-estabelecidos (ANA 2011).

4.4.3 Bicarbonato

O bicarbonato foi determinado a partir dos valores numéricos da alcalinidade total, expressa em mg/L de CaCO_3 , que são multiplicados pela constante 1,22 (Custódio & Llamas 1976).

4.4.4 Sílica

A sílica foi obtida pelo método de Grasshoff (1964) utilizando como redutor o 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.

4.4.5 Cátions e Ânions

As concentrações de cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- e SO_4^{2-}) foram determinadas por cromatografia líquida utilizando-se um 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 $1,0 \text{ mL min}^{-1}$. Para análise dos ânions foi utilizada coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 DIONEX) e, como eluente, uma solução $3,5 \text{ mM Na}_2\text{CO}_3/1,0 \text{ mM NaHCO}_3$ e fluxo $1,2 \text{ mL min}^{-1}$.

4.5 BALANÇO IÔNICO

Em relação aos íons presentes nas amostras, os resultados obtidos foram validados com base no critério de balanço iônico, onde a somatória das concentrações iônicas de cátions deve ser aproximadamente igual ao número das concentrações iônicas de ânions. O Balanço Iônico (BI) consiste na seguinte relação: a diferença entre a somatória dos cátions (Σ cátions) e somatória dos ânions (Σ ânions) dividida pela soma total da somatória de cátions (Σ cátions) e somatória de ânions (Σ ânions), conforme apresentado na equação 1 (Lloyd & Heathcote 1985).

$$BI(\%) = 100 * \frac{\Sigma \text{Cátions} - \Sigma \text{Ânions}}{\Sigma \text{Cátions} + \Sigma \text{Ânions}} \quad (1)$$

Segundo Hem (1985) os valores entre 2 a 10% para a percentagem da diferença ou erro do BI refletem excelentes condições analíticas. O cálculo do balanço iônico segundo a fórmula de Lloyd & Heathcote (1985) mostrou que, para a maioria das amostras estudadas, os erros da reação estiveram dentro do intervalo de 10 %. As amostras que excederam a 10 % foram amostras de poços rasos. Isso está relacionado à elevada concentração de nitrato no poço, evidenciando sua vulnerabilidade. As amostras apresentaram uma excelente correlação ($r = 0,9965$) entre o somatório de cátions e ânions sugerindo assim um bom balanço iônico entre elas (Fig. 7).

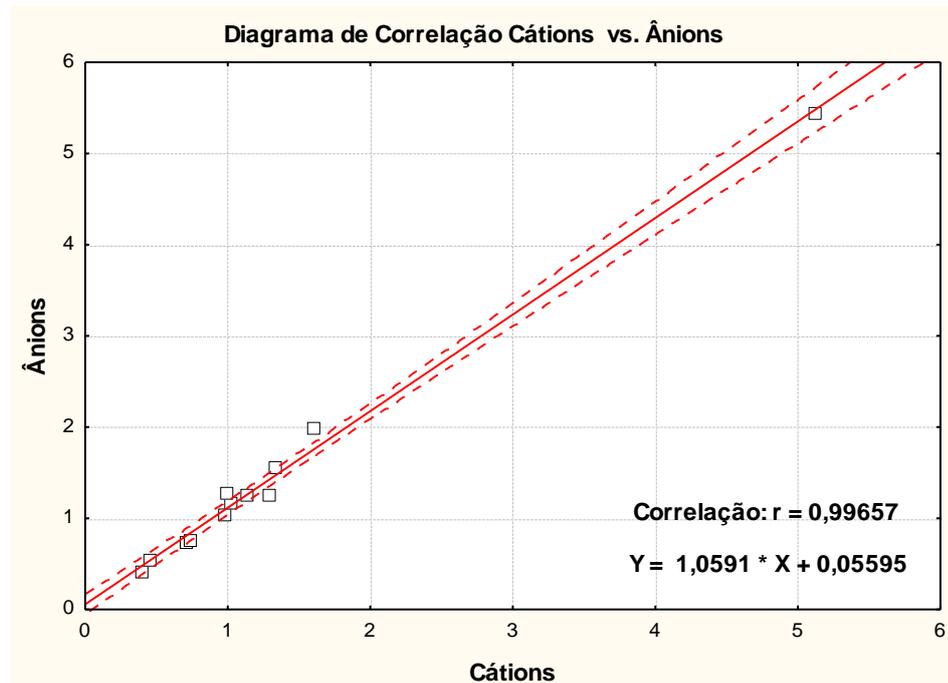


Figura 7. Correlação entre somatório de ânions e cátions das análises das águas subterrâneas dos 12 poços (meq/L).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a interpretação dos resultados obtidos nas diferentes etapas de trabalho laboratorial nos Laboratórios de Geologia Isotópica e Hidroquímica os seguintes softwares foram utilizados:

- Software Excel 2010 para estatística básica e construção dos gráficos
- Software “Statistica 9.0” para estatística básica e multivariada produção dos respectivos gráficos (StatSoft 2009)
- Software “Aquachem” – Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting version 1.40 (2011) para análise de estatística multivariada.

A transformação dos valores de mg/L para meq/L foi feita utilizando o software Aquachem. A metodologia para esta transformação pode ser encontrada em Fenzl (1986).

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS HIDROQUÍMICOS

A Tab. 2 apresenta o resumo dos principais parâmetros físicos, químicos e físico-químicos das águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área estudada, referente aos períodos seco e chuvoso.

5.1.1 pH

Segundo Fenzl (1986), as águas naturais contêm geralmente CO_2^- (dissolvido), íons HCO_3^- e CO_2^- livre, que juntos formam um sistema a tampão, permitindo assim pequenas variações do pH (entre 5 a 8). Os valores de pH para as águas do Aquífero Barreiras variaram entre 3,52 a 5,97, apresentando uma média de 4,73 tanto no período seco como no chuvoso. Já no Aquífero Pirabas Superior os valores ficaram entre 6,17 a 6,60, apresentando uma média de 6,43 no seco e 6,40 no chuvoso (Fig. 8).

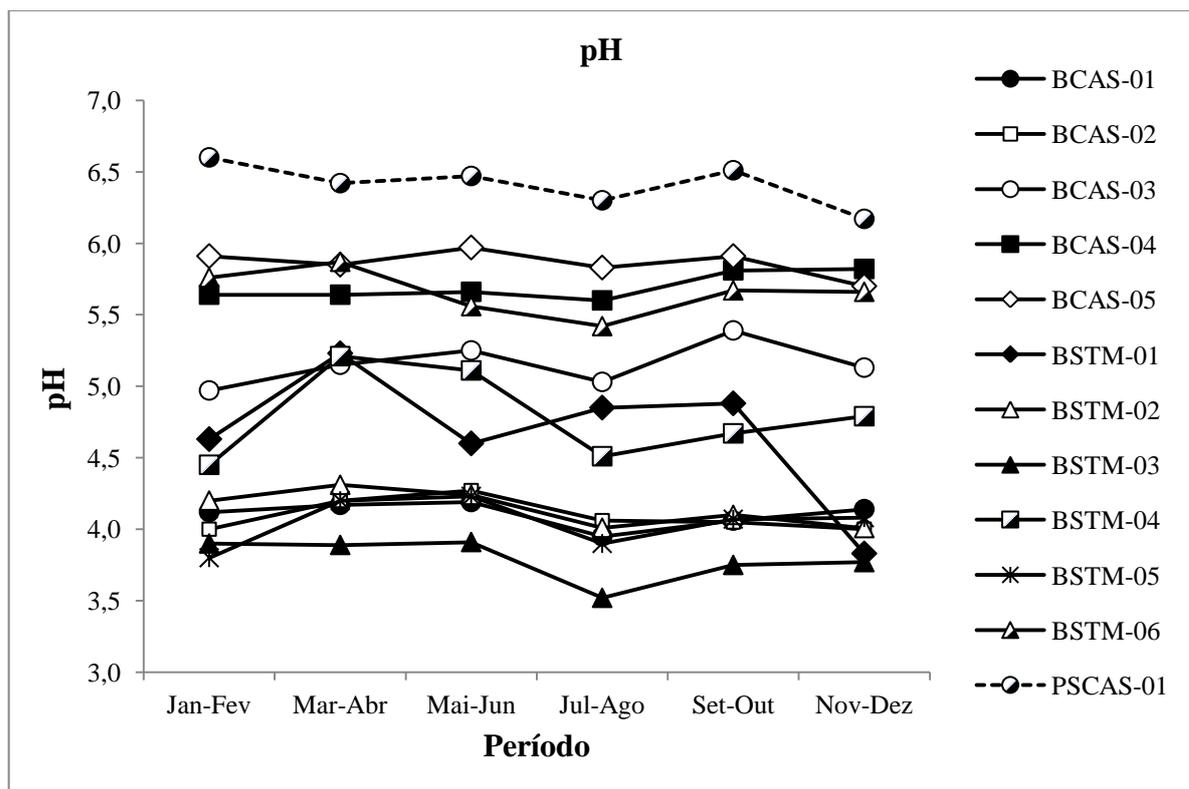


Figura 8. Variação Temporal do pH nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.2 Condutividade Elétrica

A condutividade pode ser definida como a capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica, sendo dependente das concentrações iônicas e da temperatura. Os cátions e

ânions dissolvidos em água são provenientes de sais acumulados do corpo hídrico, originados da movimentação e transporte de material de solos (Matta 2002). Em relação às águas subterrâneas, este parâmetro é de fundamental importância para a compreensão do grau de mineralização iônica das águas, estando intimamente relacionado com a potabilidade destas para o consumo humano. A condutividade variou de 45,50 a 193,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas águas do Barreiras, apresentando um valor médio de 99,64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e de 99,52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no chuvoso. Já as águas do Aquífero Pirabas Superior apresentaram valores que indo de 133,80 a 194,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tendo uma média de 169,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no seco e 171,27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no chuvoso (Fig. 9).

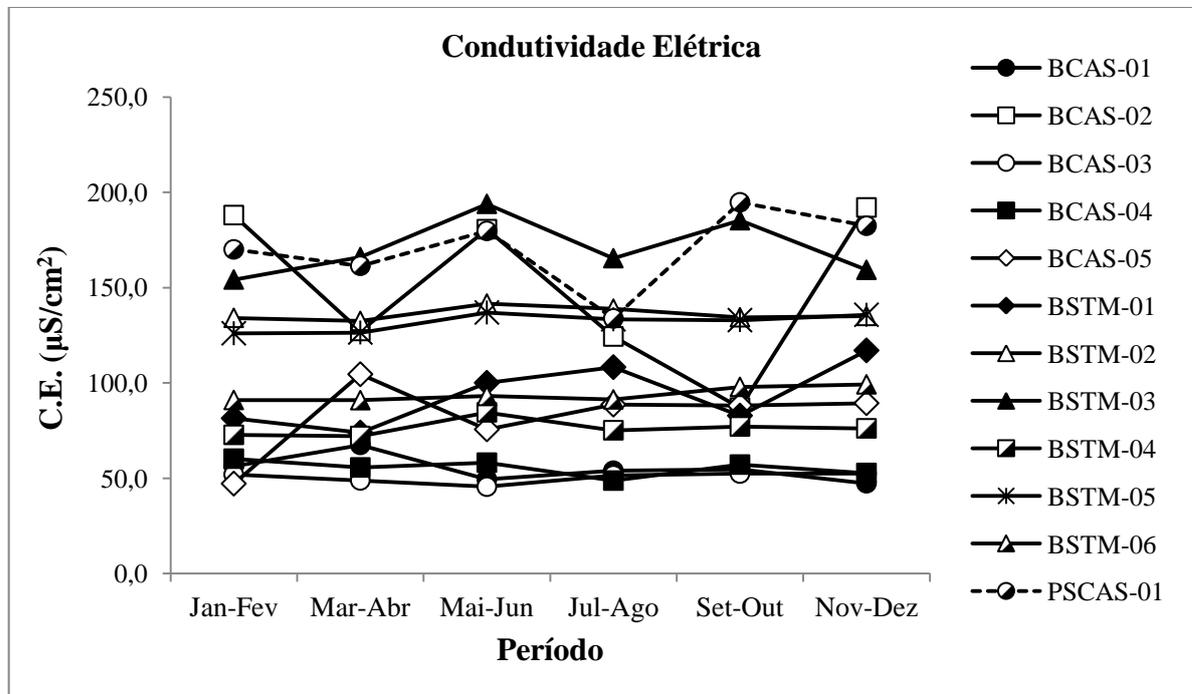


Figura 9. Variação Temporal da Condutividade Elétrica nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos e dados isótopos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) das águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área estudada referente aos Períodos Seco e Chuvoso. B (Aquífero Barreiras); PS (Aquífero Pirabas Superior); CAS (Castanhais); SMP (Santa Maria do Pará).

Amostras	Data	Prof. ¹ (m)	Temp. ² (°C)	pH	C.E. ³ ($\mu\text{S}/\text{Cm}^2$)	STD ⁴ (mg/L)	AL. ⁵ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Sr ⁺² (mg/L)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)
PERÍODO SECO																			
BCAS-01	mai-jun		27,80	4,19	49,37	168	nd.	nd.	21,38	25,40	0,56	1,52	11,72	1,97	0,73	3,09	0,029	0,053	0,723255 (10)
	jul-ago	18	27,50	3,95	53,9	143	nd.	nd.	19,24	17,87	2,56	1,73	11,45	2,03	0,36	2,83	nd.	0,050	0,722883 (06)
	set-out		28,20	4,06	54,7	167	nd.	nd.	21,56	22,64	0,37	1,67	11,49	2,22	1,25	3,11	0,003	0,057	0,720876 (06)
BCAS-02	mai-jun		27,95	4,27	180,6	143	nd.	nd.	23,78	45,38	2,47	9,37	13,15	2,44	0,83	1,07	0,051	0,059	0,723432 (08)
	jul-ago	23	27,70	4,06	124,3	98	nd.	nd.	16,98	36,63	2,63	10,34	12,62	1,59	0,37	1,28	0,007	0,029	0,716135(11)
	set-out		28,60	4,05	87	87	nd.	nd.	24,34	38,72	2,08	10,27	18,55	1,22	0,37	1,15	0,002	0,025	0,714081 (07)
BCAS-03	mai-jun		28,30	5,25	45,5	36	2,08	2,54	6,24	4,81	3,21	12,39	4,18	0,60	0,32	1,45	0,537	0,032	0,713675 (07)
	jul-ago	105	28,00	5,03	51,5	41	nd.	nd.	6,34	5,20	3,76	11,68	4,37	0,60	0,29	1,20	0,014	0,026	0,716735 (06)
	set-out		28,50	5,39	52,4	24	2,15	2,62	5,79	4,74	3,23	11,95	4,21	0,62	0,41	1,35	0,016	0,031	0,714279 (10)
BCAS-04	mai-jun		28,50	5,66	58,1	46	2,02	2,47	18,29	nd.	2,65	12,56	10,20	1,49	0,49	0,98	0,404	0,028	0,713638 (14)
	jul-ago	100	28,40	5,6	48,7	38	1,02	1,24	20,16	nd.	2,35	13,15	11,45	2,23	0,40	1,05	nd.	0,029	0,716715 (12)
	set-out		27,20	5,81	57,1	26	1,37	1,67	21,86	1,50	3,27	12,92	10,64	1,87	0,52	1,43	0,238	0,053	0,718231 (09)
BCAS-05	mai-jun		28,00	5,97	75,6	60	1,91	2,33	5,44	13,62	2,69	6,83	4,84	1,16	0,38	5,14	0,036	0,050	0,722370 (06)
	jul-ago	18	28,10	5,83	88,6	70	1,46	1,78	3,87	18,73	2,75	7,65	5,85	1,11	0,37	5,03	nd.	0,058	0,721845 (06)
	set-out		28,00	5,91	88,1	41	2,15	2,62	4,64	24,65	2,30	7,55	7,34	0,72	0,46	4,79	0,038	0,072	0,723881 (05)
BSMP-01	mai-jun		30,05	4,6	100	79	nd.	nd.	12,59	30,20	0,64	0,58	9,24	1,40	0,68	1,66	0,028	0,033	0,719663 (10)
	jul-ago	22	30,30	4,85	108,2	85	1,04	1,27	16,95	38,54	2,48	0,76	12,21	1,77	1,09	1,70	0,662	0,050	0,723585 (05)
	set-out		30,80	4,88	82,8	39	0,94	1,15	10,57	23,73	0,79	0,69	7,98	1,32	0,69	1,31	nd.	0,033	0,717163 (06)
BSMP-02	mai-jun		28,70	4,24	141,6	112	nd.	nd.	30,34	19,86	0,73	2,11	14,04	1,43	0,40	1,75	0,017	0,044	0,713745 (08)
	jul-ago	50	28,60	4,01	138,9	110	nd.	nd.	28,89	19,86	nd.	2,68	14,28	1,56	0,42	1,66	nd.	0,036	0,712716 (14)
	set-out		28,30	4,1	134,4	63	nd.	nd.	27,97	19,92	0,76	2,63	13,94	1,61	0,50	1,73	0,021	0,032	0,715279 (22)
BSMP-03	mai-jun		28,50	3,91	193,9	153	nd.	nd.	16,81	37,26	nd.	9,09	13,35	3,28	0,94	2,87	0,042	0,049	0,722176 (05)
	jul-ago	44	28,50	3,52	165,4	131	nd.	nd.	17,16	35,48	nd.	10,86	11,44	2,74	0,84	1,74	nd.	0,037	0,719990 (08)
	set-out		28,60	3,75	185,3	87	nd.	nd.	15,44	34,86	0,43	10,74	10,73	2,62	0,92	1,78	0,008	0,027	0,716741 (09)

Continuação

Amostras	Data	Prof. ¹ (m)	Temp. ² (°C)	pH	C.E. ³ ($\mu\text{S}/\text{Cm}^2$)	STD ⁴ (mg/L)	AL. ⁵ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Sr ⁺² (mg/L)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ($\pm 2\sigma$)
BSMP-04	mai-jun		29,65	5,11	84,5	67	nd.	nd.	10,31	19,68	0,92	8,05	9,67	1,04	0,39	1,17	0,034	0,030	0,719868 (13)
	jul-ago	100	29,40	4,51	75,1	59	nd.	nd.	9,13	19,61	nd.	8,94	7,44	1,13	0,53	0,99	0,009	0,027	0,718202 (12)
	set-out		28,90	4,67	77,1	36	nd.	nd.	8,93	19,27	nd.	8,71	7,22	1,17	0,59	1,08	0,152	0,027	0,718915 (08)
BSMP-05	mai-jun		29,30	4,23	136,9	108	nd.	nd.	15,44	43,17	0,49	8,69	10,89	2,04	0,93	1,96	0,027	0,043	0,719343 (10)
	jul-ago	100	29,50	3,9	133,3	105	nd.	nd.	13,75	25,11	0,69	9,28	10,71	2,06	0,81	1,45	0,050	0,039	0,717880 (11)
	set-out		28,80	4,07	132,9	63	nd.	nd.	11,28	20,03	0,87	9,34	10,55	2,09	1,04	1,72	nd.	0,039	0,717412 (07)
BSMP-06	mai-jun		28,60	5,56	93,1	74	nd.	nd.	8,77	10,67	1,78	10,55	7,98	1,08	0,81	4,37	0,027	0,072	0,719223 (05)
	jul-ago	100	28,90	5,42	91,3	72	nd.	nd.	9,04	10,83	2,13	11,45	11,44	2,74	0,84	1,74	nd.	0,061	0,718188 (04)
	set-out		27,80	5,67	97,9	46	1,07	1,31	10,82	10,33	2,02	11,13	7,57	1,04	0,91	5,08	nd.	0,069	0,719676 (04)
PSCAS-01	mai-jun		27,95	6,47	179,7	142	87,50	106,75	3,38	nd.	4,43	11,57	2,55	1,94	2,61	21,43	2,546	0,262	0,706080 (03)
	jul-ago	100	28,30	6,3	133,8	106	78,13	95,32	3,65	nd.	5,24	11,80	1,97	2,02	2,49	21,30	2,370	0,255	0,709063 (03)
	set-out		28,90	6,51	194,7	92	85,83	104,72	3,33	nd.	3,87	11,69	1,93	2,01	2,72	22,27	2,001	0,268	0,707908 (05)
PERÍODO CHUVOSO																			
BCAS-01	jan-fev		27,70	4,12	56,25	78,00	nd.	nd.	22,54	63,65	nd.	5,06	10,31	1,08	0,68	1,13	0,033	0,047	0,707908 (07)
	mar-abr	12	27,90	4,17	67,43	83,00	17,13	20,90	26,81	57,00	nd.	9,92	13,73	1,63	1,07	2,24	nd.	0,045	0,707608 (03)
	nov-dez		28,10	4,14	47,30	134,00	nd.	nd.	24,55	53,20	nd.	7,52	18,27	2,05	0,90	2,12	0,027	0,041	0,708341 (07)
BCAS-02	jan-fev		27,90	4,00	188,00	89,00	nd.	nd.	27,39	49,23	nd.	6,74	9,42	0,46	0,56	0,70	0,001	0,036	0,708730 (07)
	mar-abr	23	28,00	4,20	127,20	60,00	18,93	23,10	35,93	42,35	nd.	12,25	11,93	1,28	0,67	1,67	0,006	0,033	0,709119 (03)
	nov-dez		28,80	4,00	192,00	99,00	nd.	nd.	26,15	45,83	1,16	9,63	17,89	1,21	0,47	0,70	0,001	0,026	0,708054 (02)
BCAS-03	jan-fev		28,20	4,97	51,90	24,00	7,15	8,72	7,22	5,97	4,78	11,53	1,00	0,17	0,12	1,28	0,186	0,062	0,708018 (07)
	mar-abr	105	28,40	5,15	48,80	23,00	7,98	9,73	6,95	6,17	4,51	25,16	1,53	nd.	nd.	2,16	0,199	0,027	0,707127 (04)
	nov-dez		28,27	5,13	52,40	25,00	4,83	5,89	5,81	4,63	2,85	18,26	2,15	0,50	0,40	1,39	0,120	0,043	0,709200 (04)
BCAS-04	jan-fev		28,60	5,64	60,20	28,00	13,80	16,83	10,59	nd.	5,77	11,17	4,78	nd.	0,43	4,21	0,140	0,047	0,704320 (13)
	mar-abr	100	28,40	5,64	55,60	26,00	16,07	19,60	12,74	nd.	5,27	23,03	7,54	nd.	0,61	4,49	1,554	0,031	0,706548 (05)
	nov-dez		27,90	5,82	52,70	27,00	11,71	14,29	11,65	nd.	5,31	17,24	5,92	0,34	0,44	3,76	0,150	0,033	0,709375 (04)

Continuação

Amostras	Data	Prof. ¹ (m)	Temp. ² (°C)	pH	C.E. ³ ($\mu\text{S}/\text{Cm}^2$)	STD ⁴ (mg/L)	AL. ⁵ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Sr ⁺² (mg/L)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ($\pm 2\sigma$)
BCAS-05	jan-fev		28,00	5,91	47,10	22,00	nd.	nd.	20,81	16,41	2,69	4,81	1,36	0,19	nd.	nd.	0,042	0,006	0,705867 (23)
	mar-abr	10	28,00	5,85	104,50	49,00	1,79	2,18	21,74	14,72	4,90	13,08	3,86	1,90	0,42	1,16	nd.	0,087	0,709174 (06)
	nov-dez		28,20	5,70	89,30	42,00	nd.	nd.	18,26	23,47	2,07	8,17	7,98	0,54	0,34	0,87	0,025	0,066	0,709652 (08)
BSMP-01	jan-fev		30,10	4,63	81,40	38,00	3,85	4,70	13,79	29,97	nd.	7,87	7,63	1,35	nd.	nd.	nd.	0,034	0,708404 (05)
	mar-abr	22	30,00	5,23	73,90	35,00	0,90	1,10	12,55	22,82	2,29	17,04	6,13	0,77	0,62	1,59	nd.	0,027	0,707325 (04)
	nov-dez		30,70	3,83	117,00	120,00	3,76	4,58	25,48	59,18	0,57	12,69	16,81	2,47	1,26	2,90	nd.	0,068	0,709889 (03)
BSMP-02	jan-fev		28,70	4,20	134,10	63,00	nd.	nd.	40,50	25,14	nd.	6,86	14,86	1,86	nd.	nd.	0,025	0,016	0,709060 (11)
	mar-abr	50	28,70	4,31	132,50	63,00	nd.	nd.	37,90	23,50	nd.	16,32	15,46	1,22	0,59	1,65	nd.	0,015	0,705753 (04)
	nov-dez		28,40	4,01	135,10	63,00	nd.	nd.	26,18	19,08	0,67	11,45	13,23	1,46	0,38	1,33	0,023	0,040	0,709654 (09)
BSMP-03	jan-fev		28,50	3,90	154,20	73,00	nd.	nd.	21,14	45,14	nd.	7,45	10,48	2,58	nd.	nd.	0,121	0,045	0,707312 (10)
	mar-abr	44	28,50	3,89	166,00	79,00	nd.	nd.	21,65	46,76	nd.	8,01	12,71	1,41	1,19	2,01	nd.	0,041	0,709957 (11)
	nov-dez		28,70	3,77	159,30	75,00	nd.	nd.	14,64	42,51	0,31	7,37	9,93	2,41	0,74	1,95	0,064	0,018	0,708209 (11)
BSMP-04	jan-fev		29,60	4,45	72,70	34,00	nd.	nd.	12,76	25,25	nd.	7,31	7,08	1,08	0,44	0,80	nd.	0,028	0,707434 (06)
	mar-abr	100	29,70	5,21	72,10	34,00	21,19	25,85	17,74	23,36	nd.	16,21	6,89	0,77	0,43	0,85	0,004	0,033	0,707390 (06)
	nov-dez		28,90	4,79	76,10	36,00	nd.	nd.	8,83	18,55	0,74	11,23	6,85	1,03	0,47	0,89	0,009	0,030	0,705603 (07)
BSMP-05	jan-fev		29,20	3,80	126,00	59,00	nd.	nd.	19,66	52,07	nd.	9,12	7,06	1,11	0,44	0,72	0,006	0,044	0,708763 (04)
	mar-abr	100	29,40	4,20	126,40	60,00	nd.	nd.	35,09	51,31	nd.	20,24	9,57	1,50	1,12	1,58	nd.	0,026	0,704239 (03)
	nov-dez		28,80	4,08	135,70	64,00	nd.	nd.	14,55	40,54	0,46	14,71	10,12	1,92	0,81	1,39	0,003	0,046	0,708406 (09)
BSMP-06	jan-fev		28,70	5,76	91,00	43,00	26,95	32,88	14,85	13,46	nd.	9,61	7,17	1,16	0,70	4,19	nd.	0,070	0,707386 (05)
	mar-abr	100	28,50	5,87	90,90	43,00	19,39	23,65	11,54	11,43	2,86	20,22	7,34	0,72	0,89	4,54	0,586	0,070	0,707578 (04)
	nov-dez		27,73	5,66	99,20	47,00	25,21	30,76	8,22	9,75	1,83	14,29	7,34	0,96	0,72	4,25	nd.	0,068	0,707019 (03)
PSCAS-01	jan-fev		28,00	6,60	170,00	81,00	88,55	108,03	6,15	nd.	6,82	16,34	1,47	0,35	2,03	26,13	1,270	0,250	0,709277 (07)
	mar-abr	100	27,90	6,42	161,40	76,00	73,03	89,10	6,32	nd.	6,07	30,93	1,56	1,29	2,81	27,38	1,858	0,213	0,705715 (02)
	nov-dez		28,73	6,17	182,40	86,00	96,02	117,15	3,40	nd.	3,86	23,18	1,35	1,77	2,55	24,17	1,560	0,219	0,707539 (03)

¹ Profundidade. ² Temperatura. ³ Condutividade Elétrica. ⁴ Sólidos Totais Dissolvidos. ⁵ Alcalinidade. nd = não detectado.

5.1.3 Alcalinidade Total

Pode ser definida como a capacidade da água neutralizar ácido. Segundo Paranhos (2010) este parâmetro é importante no controle do processamento de águas naturais e despejos. Seu comportamento está diretamente ligado a qualquer processo envolvendo a liberação dos íons H^+ e OH^- , além de bases de ácidos fracos. Ainda segundo Paranhos (2010) os valores encontrados deste parâmetro em carbonatos variam de 10 a 500 mg/L. Já em águas naturais sua variação vai de 10 a 30 mg/L. Nas amostras deste trabalho a alcalinidade total apresentou um valor máximo de 26,95 mg/L para o sistema Barreiras, com médias de 0,52 e 6,08 mg/L nos períodos seco e chuvoso, respectivamente. Para as amostras do Aquífero Pirabas Superior, os valores variaram de 73,03 a 96,02 mg/L, sendo que a média do período seco foi de 83,82 mg/L enquanto que a do chuvoso foi de 85,87 mg/L (Fig. 10).

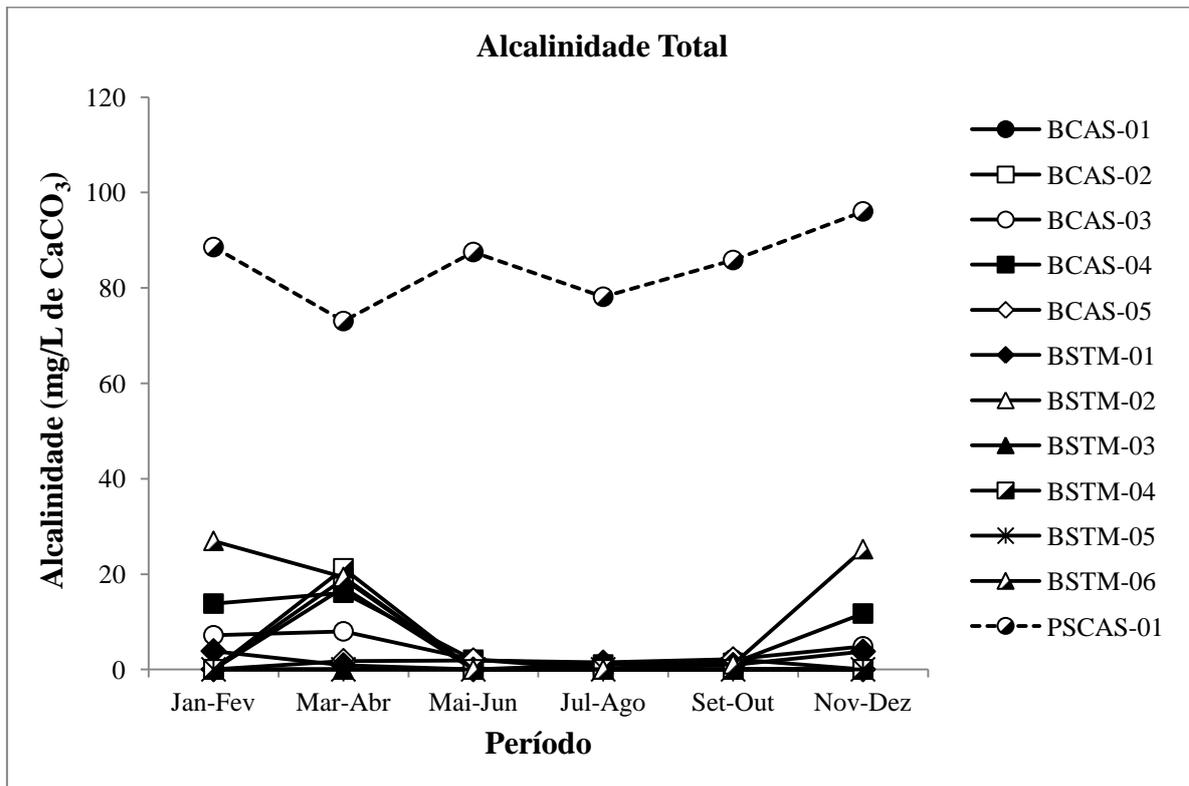


Figura 10. Variação Temporal da Alcalinidade nas amostras nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.4 Sílica

O silício é o elemento mais largamente encontrado nas rochas. Nas águas subterrâneas ele não ocorre de forma significativa. Segundo Feitosa & Manoel Filho (2000), as principais fontes de sílica para as águas subterrâneas são o intemperismo de minerais de argila, feldspatos e quartzo com quantidades variando em torno de 20 mg/L nestas águas. Em águas

marinhas pode variar entre 1 a 30 mg/L e nas águas bicarbonatadas sódicas pode chegar a 100 mg/L. Nas amostras de água do Aquífero Barreiras foram encontrados valores de SiO₂ que variaram de 0,58 a 26,16 mg/L, tendo um valor médio de 7,81 mg/L para o período seco e 12,17 no chuvoso. Já as amostras do sistema Pirabas Superior ocorreram valores entre 11,57 e 30,93 mg/L, com valores médios de 11,69 e 23,48 mg/L para os períodos seco e chuvoso, respectivamente (Fig. 11).

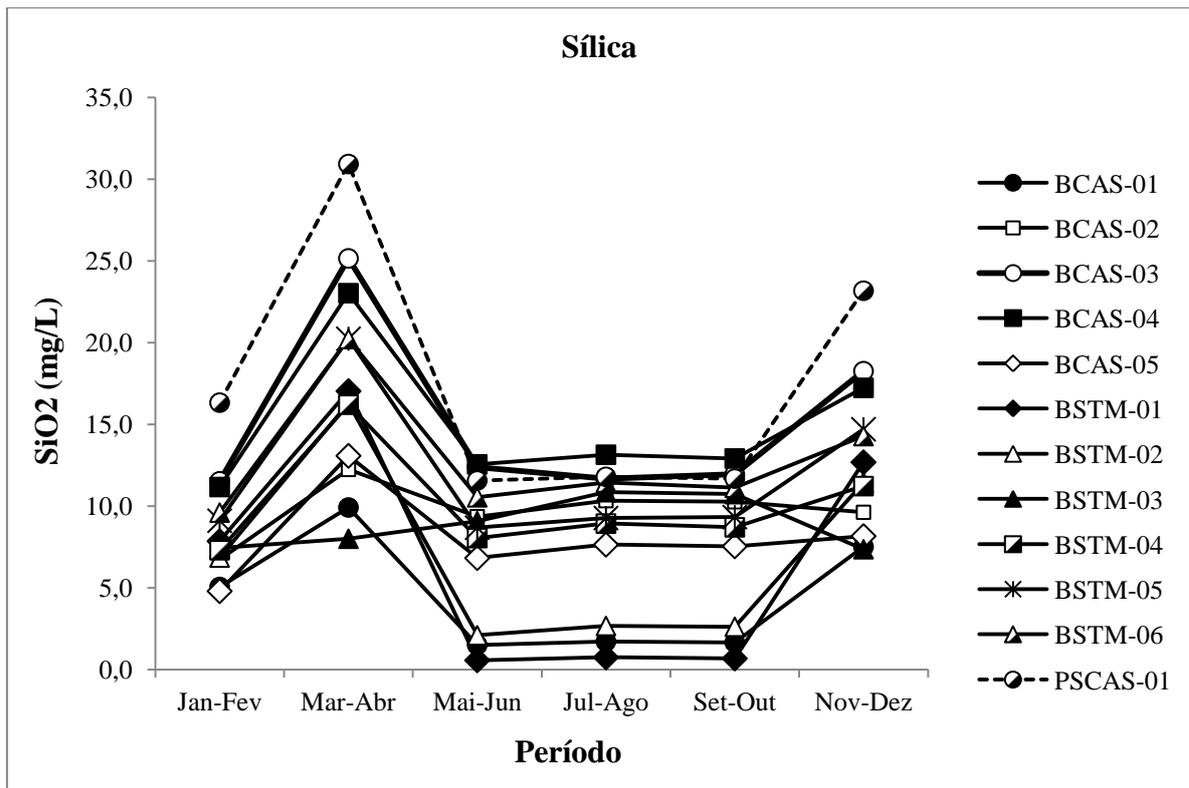


Figura 11. Variação Temporal da Sílica nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5 Cátions e Ânions

5.1.5.1 Bicarbonato (HCO₃⁻)

A Presença dos íons HCO₃⁻, CO₂⁻ (dissolvido), CO₂⁻ livre em águas impede a variação brusca do pH, funcionando como um sistema tampão. O bicarbonato geralmente é o íon majoritário na determinação da alcalinidade. Não sofre transformação por oxirredução em águas naturais, mas tem alta probabilidade de precipitação em forma de carbonato de cálcio. Em águas doces, seus valores variam entre 50 e 350 mg/L, enquanto que na água do mar possui teor da ordem de 140 mg/L (Ramage 2005). O Bicarbonato apresentou um valor máximo de 32,88 mg/L no Barreiras, com um valor médio de 0,64 mg/L no período seco e de

7,42 mg/L no chuvoso. Nas amostras de água do sistema Pirabas Superior ocorreram valores entre 89,10 e 117,15 mg/L, apresentando uma média de 102,26 mg/L no período seco e 104,76 mg/L no chuvoso (Fig. 12).

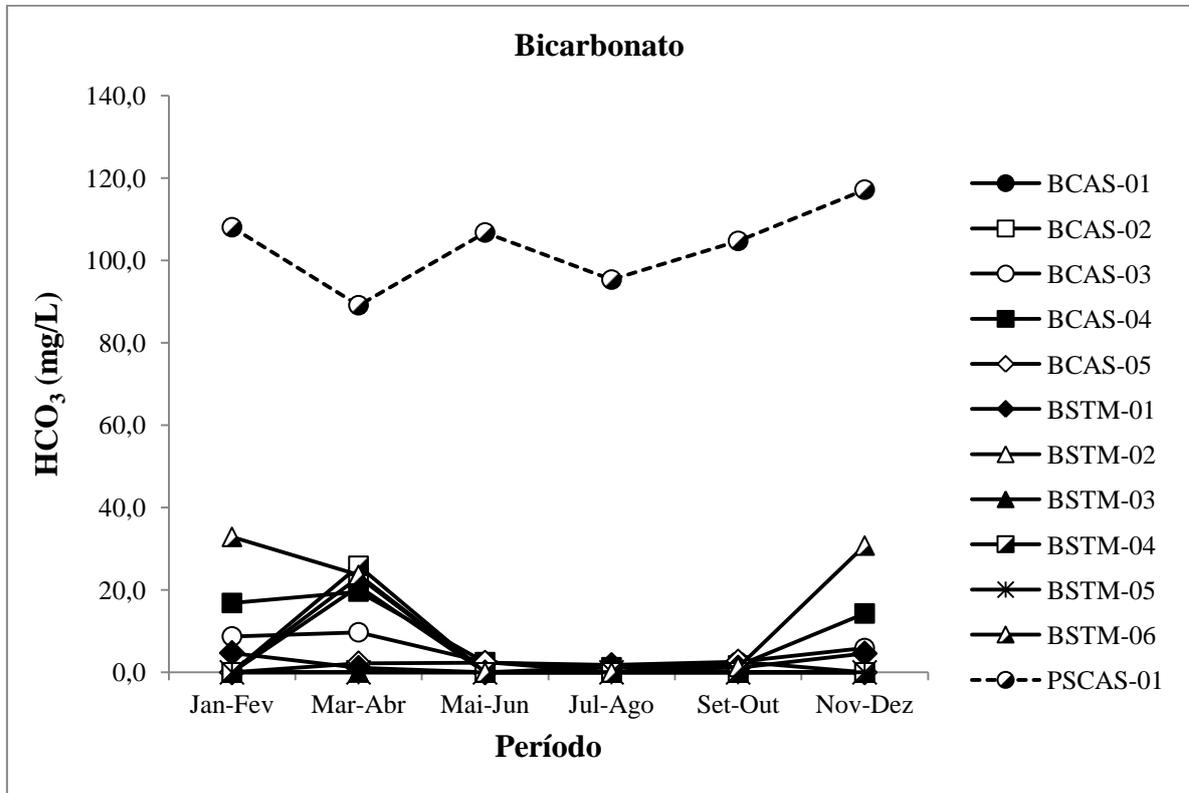


Figura 12. Variação Temporal do íon Bicarbonato nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5.2 Cloreto (Cl^-)

A maior parte deste íon provém dos oceanos como resultado de gases magmáticos e exalações vulcânicas do passado geológico da terra. É encontrado na litosfera nos seguintes minerais: feldspatos, sodalita ($\text{Na}_8(\text{Cl}/\text{AlSiO}_4)_6$), Apatita $\text{Ca}_5(\text{F},\text{Cl})(\text{PO}_4)_3$, micas e anfibólios. Possui alta mobilidade, sendo rapidamente lixiviado das rochas ou sedimentos mais permeáveis (Fenzl 1986). Além disso, o cloreto é muito solúvel e muito estável quando em solução, sendo de difícil precipitação. Segundo Feitosa & Manoel Filho (1997) as águas subterrâneas apresentam valores inferiores a 100 mg/L. Na área em estudo os valores de cloreto para as amostras do sistema Barreiras variaram de 3,57 a 40,50 mg/L, com um valor médio de 14,97 mg/L no período seco e 19,28 mg/L no chuvoso. Já no sistema Pirabas Superior o Cl^- variou de 3,33 a 6,32 mg/L, tendo uma média de 3,45 mg/L no seco e 5,29 mg/L no chuvoso (Fig. 13).

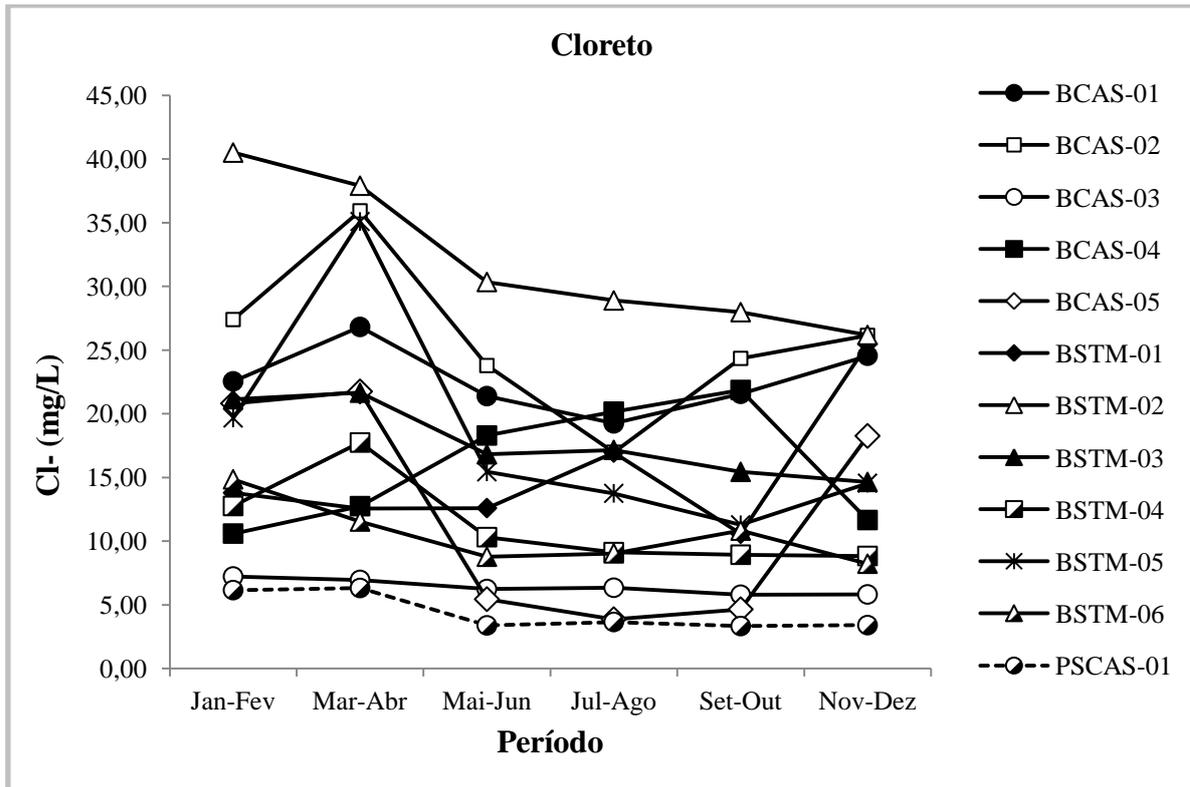


Figura 13. Variação Temporal do íon Cloreto nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5.3 Nitrato (NO_3^-)

Na presença do oxigênio, o nitrogênio é oxidado para as formas Amônio (NH_4^+) nitrito (NO_2^-) e Nitrato (NO_3^-), sucessivamente. Este último é o produto final da decomposição da matéria orgânica, apresentando valores de 1 mg/L para a água do mar enquanto que para as águas subterrâneas os valores estão entre 0,1 e 10 mg/L (Ramage 2005). Valores acima de 10 mg/L podem indicar input antropogênico provenientes de esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, entre outros. Na área estudada o nitrato variou até um valor máximo de 63,65 mg/L, apresentado uma média de 21,16 mg/L no período seco e 28,56 mg/L no chuvoso para o sistema Barreiras. Não foi identificada a presença do íon Nitrato nas amostras de água do sistema Pirabas Superior (Fig. 14).

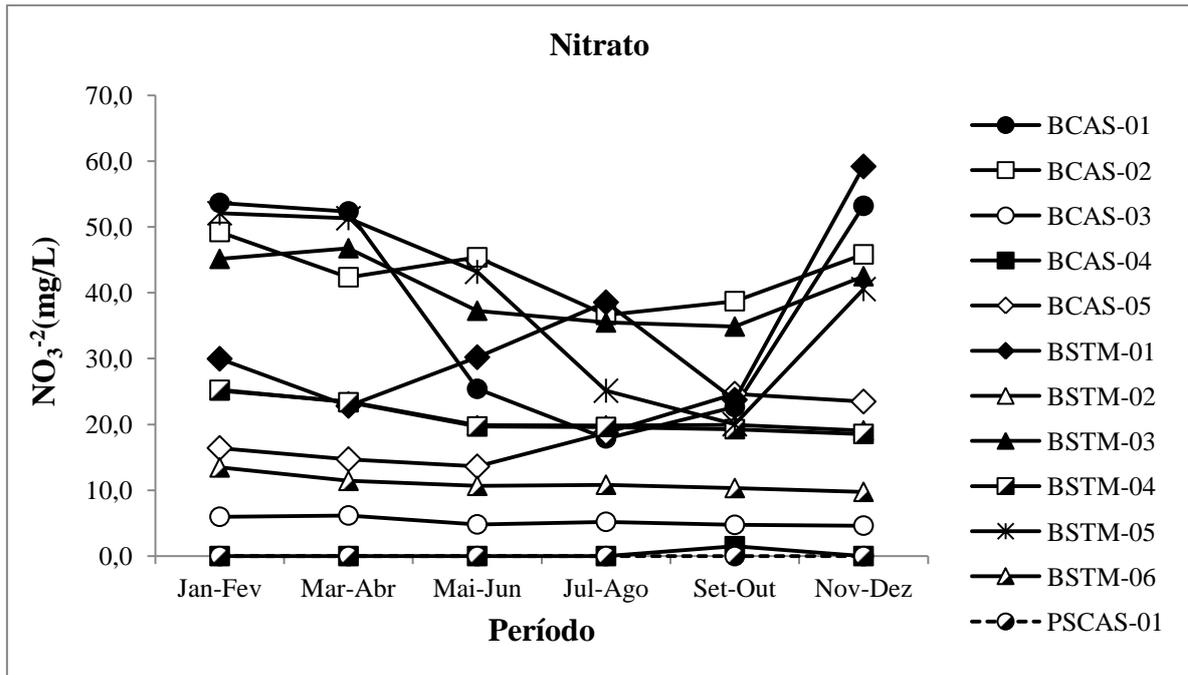


Figura 14. Variação Temporal do íon Nitrato nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5.4 Sulfato (SO_4^{2-})

O Sulfato, dissolvido na precipitação atmosférica, tem como suas principais fontes sais cíclicos, poeiras continentais, exalações vulcânicas e indústrias. Na litosfera o SO_4^{2-} é originado principalmente de evaporitos como gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). Além dos evaporitos, a decomposição de substâncias orgânicas nos solos constitui uma importante fonte de liberação de sulfatos para as águas subterrâneas, principalmente nas seguintes formas iônicas: SO_4^{2-} , HSO_4^- (Fenzl 1986). Os valores de sulfato para as amostras Barreiras apresentaram um valor máximo de 5,77 mg/L, com um valor médio de 1,56 mg/L para o período seco e 1,49 mg/L para o chuvoso. Para o sistema Pirabas Superior, encontrou-se valores entre 3,86 a 6,82 mg/L, tendo uma média de 4,52 mg/L no seco e de 5,58 mg/L no chuvoso (Fig. 15).

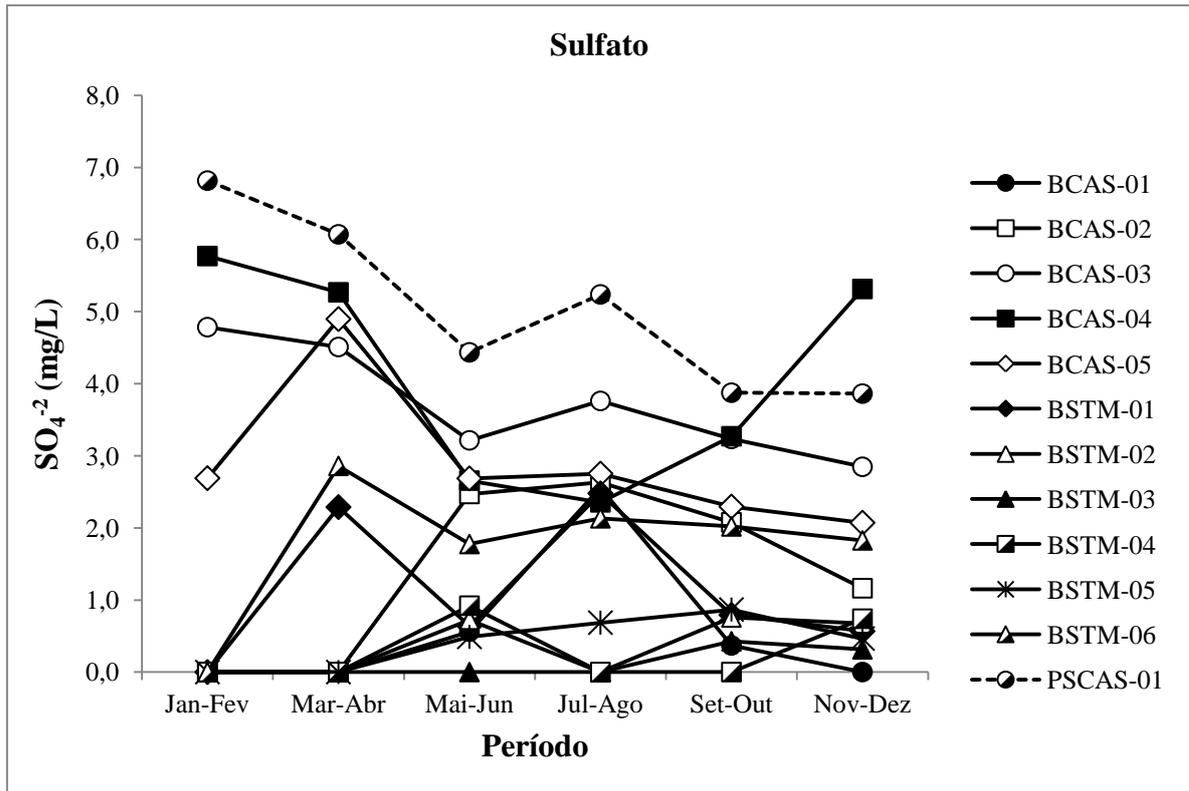


Figura 15. Variação Temporal do íon Sulfato nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5.5 Sódio (Na^+)

O sódio é um dos cátions mais abundantes nas águas subterrâneas. Isso é devido sua ampla distribuição nos minerais fontes, à baixa estabilidade química destes minerais do qual ele faz parte e por apresentar elevada solubilidade e difícil precipitação da maioria de seus compostos químicos em solução (Feitosa & Manoel Filho 2000). Os processos intempéricos que atuam nas rochas magmáticas e silicatos, geralmente, liberam sódio, enriquecendo as águas subterrâneas com este íon (Fenzl 1986). Sua concentração nos aquíferos varia entre 0,1 e 100 mg/L, ocorrendo um gradativo aumento a partir das zonas de recarga em direção às suas porções mais confinadas ou dos seus exutórios (Feitosa & Manoel Filho 2000). Os valores desse íon variaram de 1,00 a 18,55 mg/L nas águas do sistema Barreiras, tendo uma média de 10,06 mg/L no período seco e 8,92 mg/L no chuvoso. Nas amostras de água do Aquífero Pirabas Superior a variação foi de 1,35 a 2,55 mg/L, com valores médios de 2,15 e 1,46 mg/L para os períodos seco e chuvoso, sucessivamente (Fig. 16).

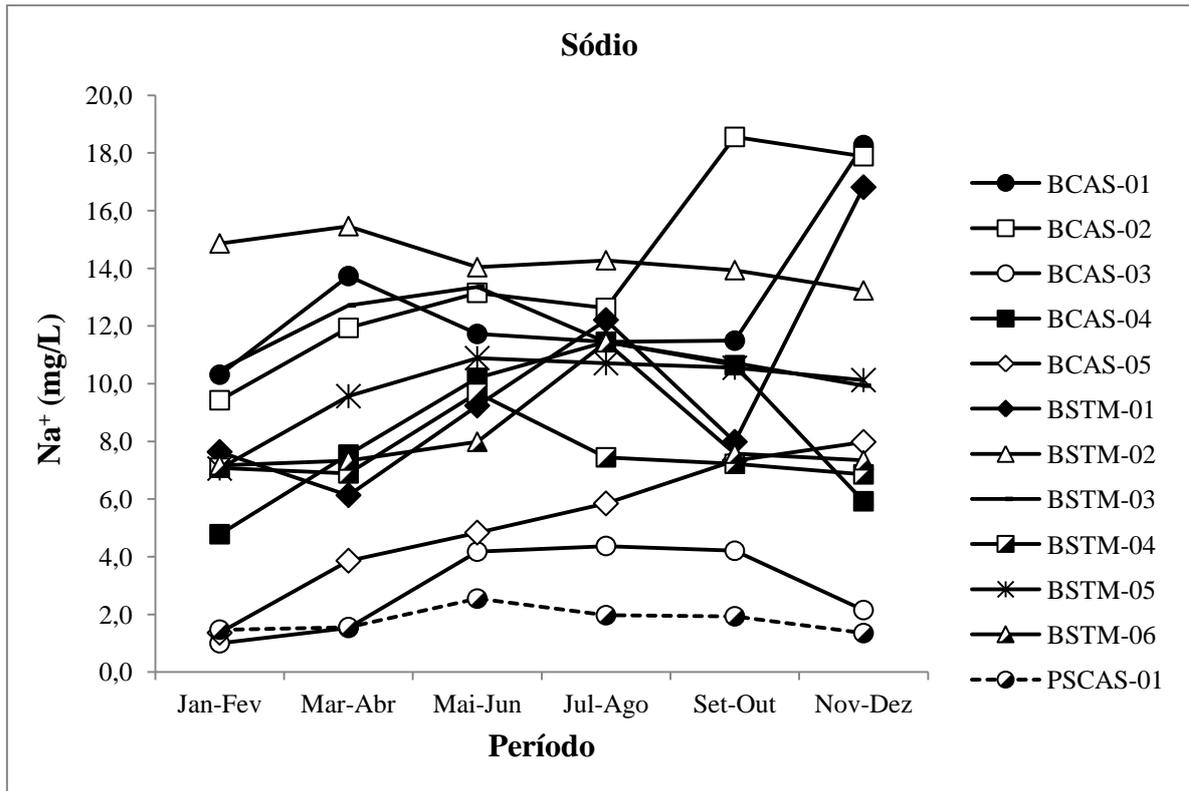


Figura 16. Variação temporal do íon Sódio nas amostras de água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior na área em estudo.

5.1.5.6 Potássio (K^+)

O potássio encontra-se principalmente nos feldspatos (ortoclásio, microclina) e micas (muscovita e biotita). Como o sódio, o K^+ é liberado pela ação do intemperismo e é facilmente adsorvido pelas argilas ou é participante na formação de minerais secundários. Isso explica geralmente as altas concentrações deste íon em argilas e na água do mar. Nas águas ‘meteóricas sua concentração varia de 0,1 a 4 mg/L. Possui alta mobilidade e devido sua intensa participação em processos de troca iônica, o potássio é um elemento pouco expressivo em águas naturais (Fenzl 1986). Os valores obtidos para o íon K^+ variaram até o valor máximo de 3,28 mg/L para o sistema Barreiras, apresentando médias de 1,63 mg/L no período seco e de 1,13 mg/L no chuvoso. Nas amostras de água do sistema Pirabas Superior o íon potássio variou de 0,35 a 2,02 mg/L. Seu valor médio no período seco foi de 1,99 mg/L e no chuvoso de 1,14 mg/L (Fig. 17)

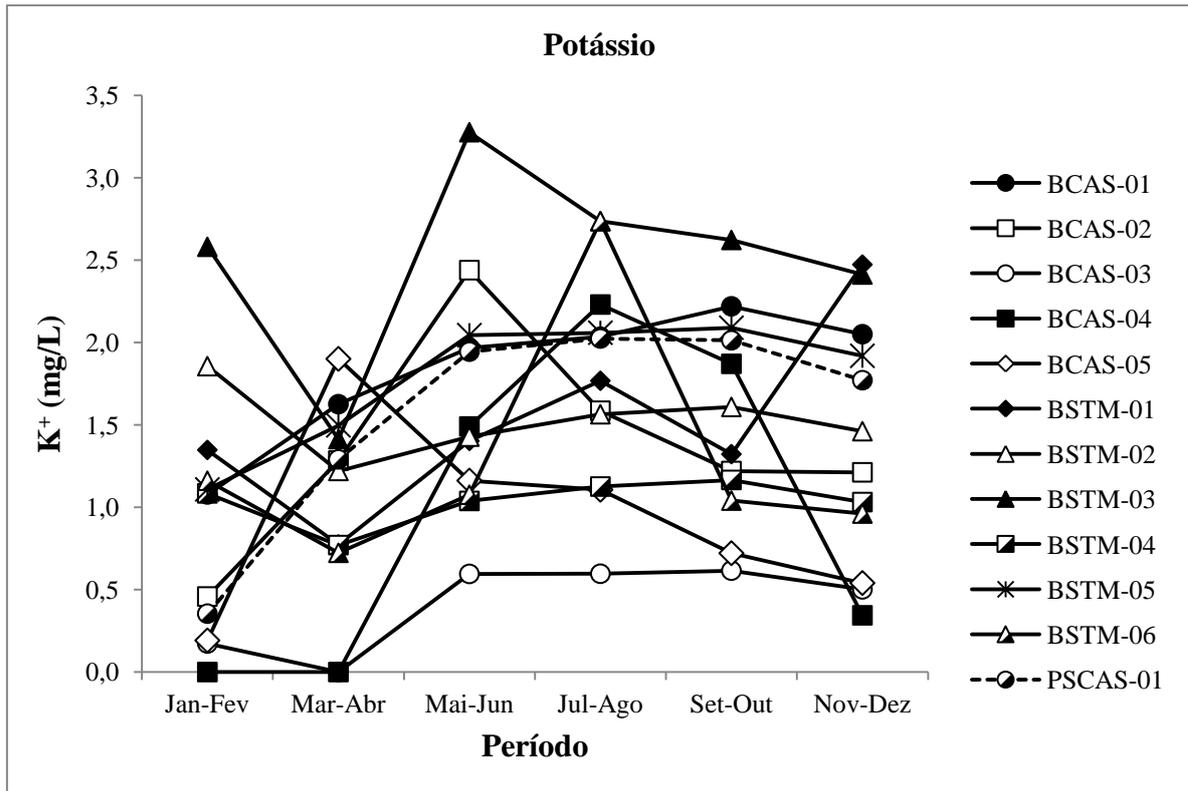


Figura 17. Variação sazonal do íon de Potássio nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada.

5.1.5.7 Magnésio (Mg^{2+})

O magnésio é liberado pela ação intempérica sobre rochas magmáticas, sendo que os principais minerais portadores deste elemento são: olivina, granada, piroxênios, anfibólios e micas. Ele também é encontrado em diversos depósitos de sais de origem marinha. Nas águas naturais tende a formar ligações iônicas complexas como $Mg(H_2O)_6^{2+}$, $MgOH^+$, mas geralmente é encontrado na forma Mg^{2+} (Fenzl 1986). Possui alta solubilidade na forma de $MgCO_3$, mas é um elemento raro nas águas subterrâneas devido sua escassez geoquímica. As amostras de água apresentaram valores de até 1,76 mg/L para o Barreiras, tendo uma média de 0,60 mg/L no período seco e 0,54 mg/L no chuvoso. Já para as amostras coletadas do Aquífero Pirabas Superior o Mg^{2+} variou de 2,03 a 2,81 mg/L, apresentando valores médios de 2,61 e 2,46 mg/L para os períodos seco e chuvoso, respectivamente (Fig. 18).

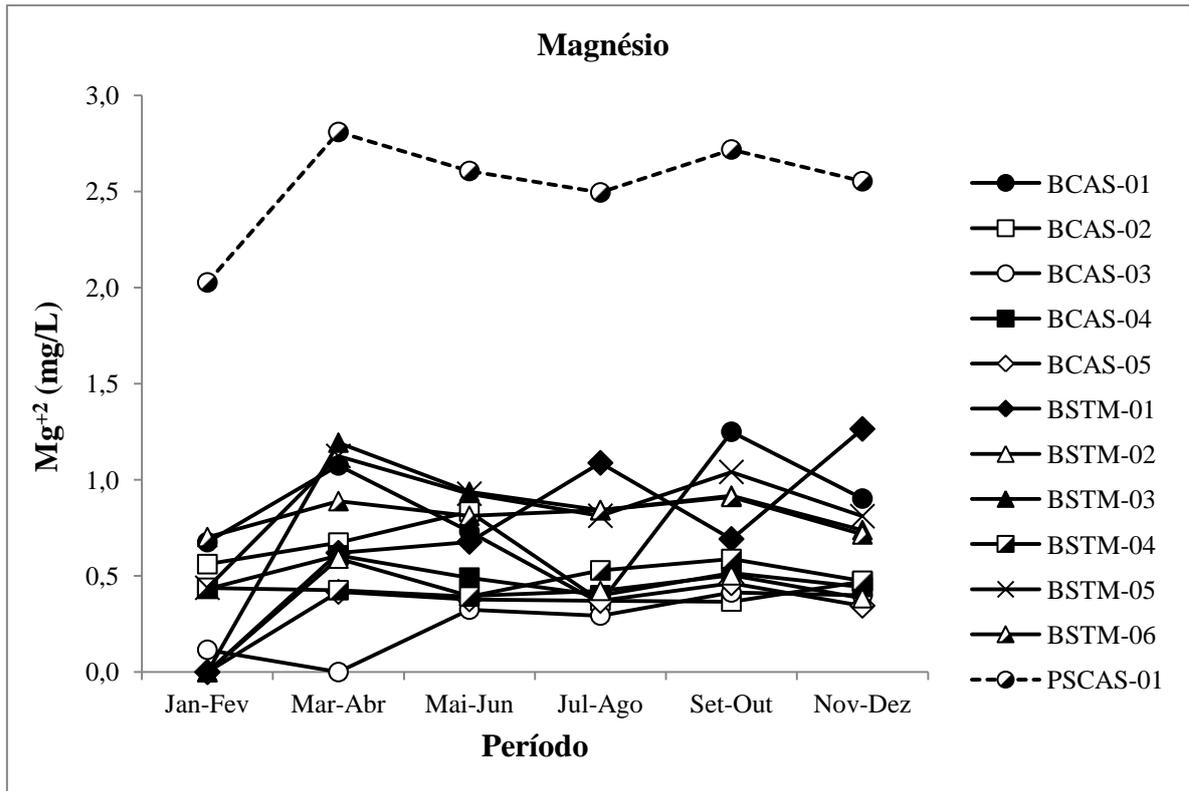


Figura 18. Variação sazonal do íon de Magnésio nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada.

5.1.5.8 Cálcio (Ca²⁺)

Segundo Matta (2002), o cálcio é um dos elementos mais abundantes que existe na maioria das águas e rochas. Segundo Fenzl (1986), os principais minerais portadores do cálcio são: Calcita e Aragonita (CaCO₃), dolomita (CaCO₃.MgCO₃), gipsita (CaSO₄.2H₂O) plagioclásio, apatita (Ca₅(F,Cl)(PO₄)₃), fluorita (CaF₂). Nas águas meteóricas a concentração de Ca²⁺ varia de 10 a 100 mg/L. Nas águas naturais sua concentração depende do equilíbrio CO₂ - CaCO₃. O Ca²⁺ alcançou um valor máximo de 5,14 mg/L para as águas do sistema Barreiras, com valores médios de 2,14 e 1,77 mg/L para os períodos seco e chuvoso, respectivamente. Nas águas do sistema Pirabas Superior a variação do íon cálcio foi de 21,30 a 27,38 mg/L, com uma média de 21,67 mg/L no período seco e 25,89 mg/L no chuvoso (Fig. 19).

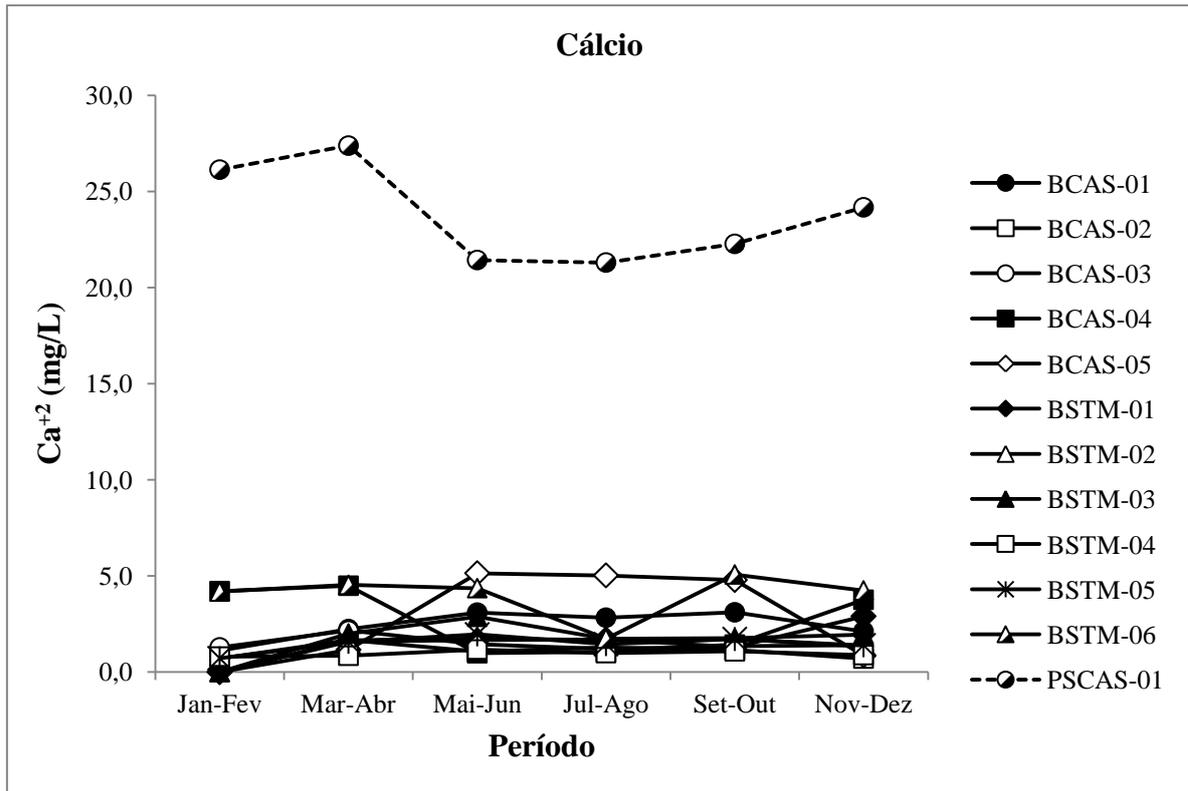


Figura 19. Variação sazonal do íon de Cálcio nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior da área estudada.

5.1.5.9 Ferro Total

O ferro ocorre principalmente sob a forma de Fe^{3+} (ferro férrico) podendo também ocorrer como Fe^{2+} (ferro ferroso). O segundo é quando a água é exposta ao oxigênio do ar, os íons ferrosos se oxidam tornando-se férricos, dando uma coloração amarelada a água, esteticamente desagradável e um sabor ruim. Nas amostras do sistema Barreiras o conteúdo de ferro apresentou até 1,55 mg/L, tendo valores médios de 0,07 e 0,13 mg/L nos períodos secos e chuvoso, respectivamente. Na amostra do sistema Pirabas o Ferro Total variou de 1,27 a 2,55 mg/L, com médias de 2,31 e 1,56, nos períodos seco e chuvoso, reciprocamente (Fig. 20).

5.2 FÁCIES HIDROQUÍMICA

Segundo Fetter (1994) a fácies hidroquímica é usada para descrever massas de água subterrânea que possuem diferentes composições químicas. É dependente da composição das rochas por onde circula, do comportamento cinético da solução e do padrão de fluxo do aquífero. O “nome” da fácies é feito com base nas espécies iônicas mais abundantes.

Entre as diversas formas gráficas de representação das fácies hidroquímicas, destacam-se o diagrama de Piper e Schoeller.

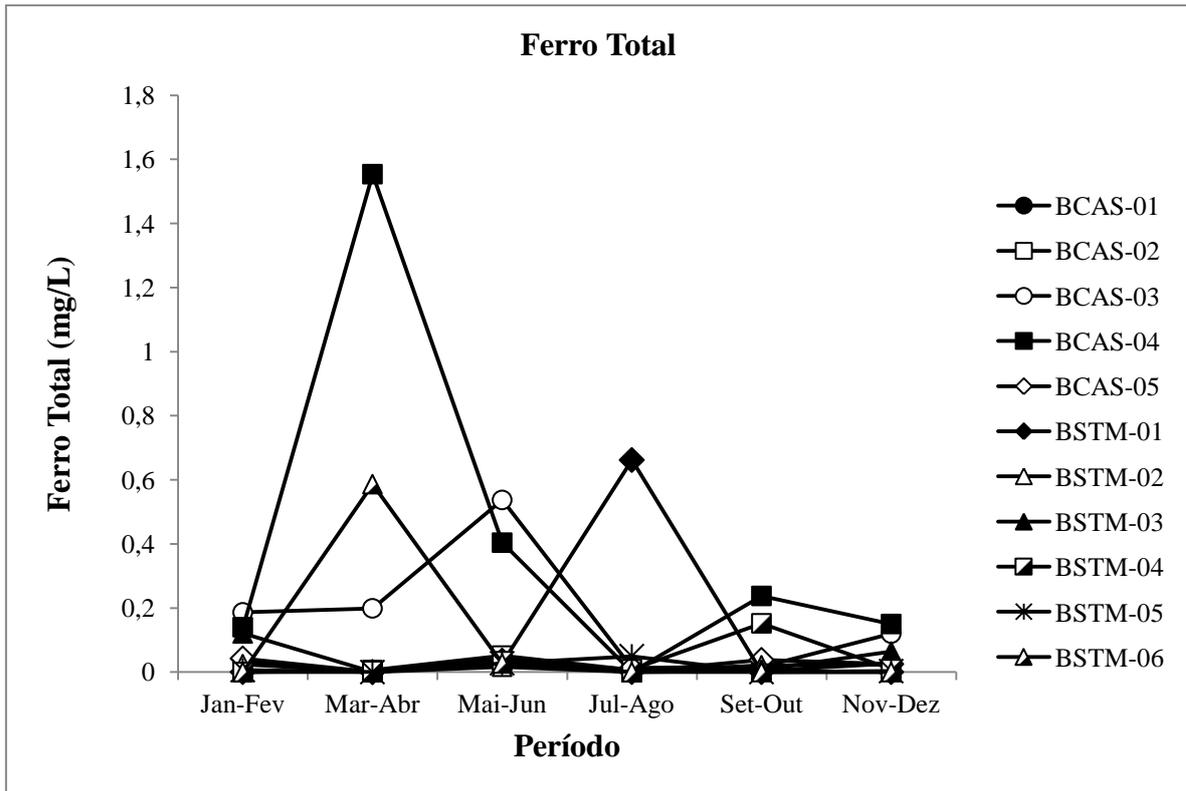


Figura 20. Variação sazonal do Ferro Total nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior

O diagrama de Piper consiste na junção de dois triângulos e um paralelogramo. Os triângulos representam os cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+}) e ânions (HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{-2}), respectivamente. Eles são divididos em 100 partes iguais representando os constituintes dissolvidos em água, sendo possível classificá-la a partir do par iônico predominante. No paralelogramo é possível verificar as características químicas da água (Piper 1944² apud Bento 2006). A Fig. 21 apresenta os diagramas de Piper dos períodos seco e chuvoso para os principais cátions e ânions relacionados com os diferentes aquíferos na área em estudo. No diagrama de Schoeller as concentrações dos cátions e ânions são representadas em papel semi-logarítmico, pois as linhas mostram o mesmo gradiente, além de se poder identificar ao mesmo tempo o comportamento de íons de baixas concentrações com os de elevado valores (Mazor 2004). A forma de apresentação dos dados neste diagrama é bem flexível, permitindo a aumento ou a diminuição de elementos representados levando em conta a necessidade e os objetivos da interpretação. A Fig. 22 apresenta os diagramas de Schoeller dos períodos seco e chuvoso para os principais cátions e ânions relacionados com os diferentes aquíferos na área em estudo.

² Piper A.M. (1944). A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Am Geophys Union Trans., 25: 914-928.

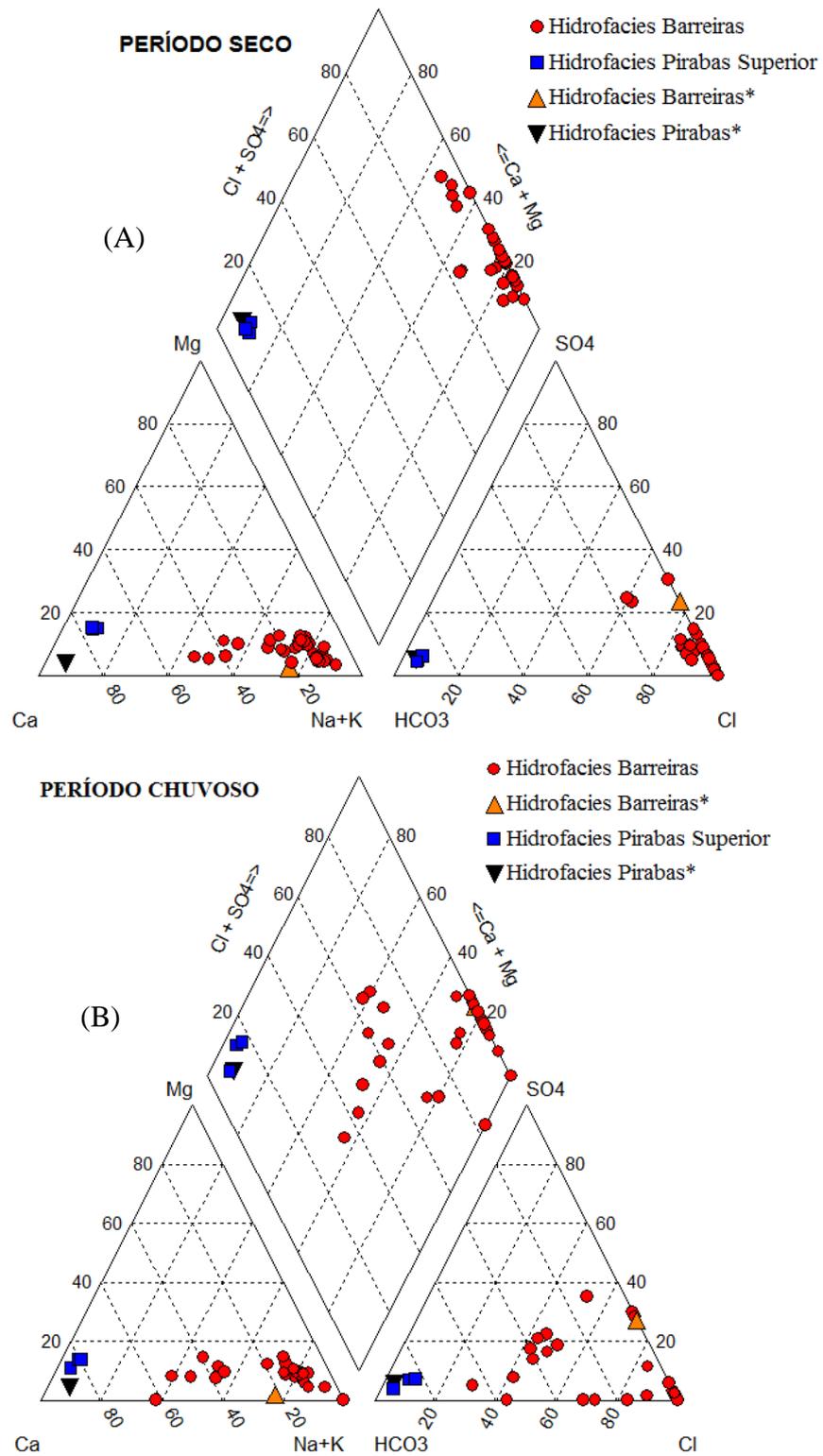


Figura 21. Diagramas de Piper dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso. *Dados de Oliveira Filho (2012).

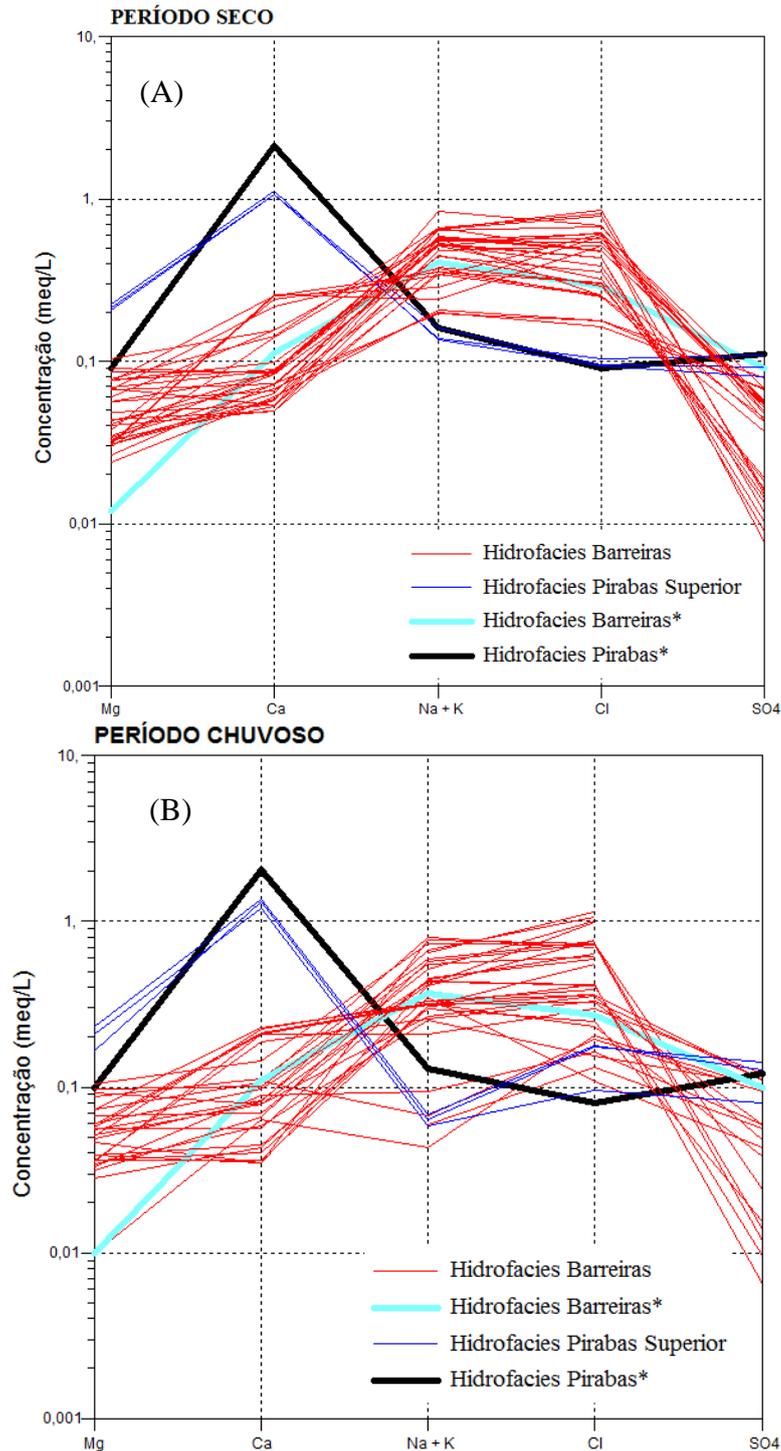


Figura 22. Diagramas de Schoeller dos poços amostrados períodos: A) Seco e B) Chuvoso. *Dados de Oliveira Filho (2012).

Buscando avaliar a possibilidade, bem como a porcentagem de mistura de águas entre o sistema Barreiras e o Pirabas Superior, utilizou-se o software Aquachem vs. 2011.1 para fazer o modelamento geoquímico das amostras de águas destes aquíferos. Seguindo a metodologia proposta por Paranhos (2010), tomou-se a amostra de água PSCAS-01 do bimestre Março-Abril como representativa do sistema Pirabas, pois esta apresentou a quantidade mais

expressiva de Ca^{+2} . Em seguida, tomou-se a média dos valores obtidos dos poços do sistema Barreiras e, utilizando a ferramenta *Mix Samples* do referido programa, foi calculado grau de mistura em que 10% das águas do sistema Pirabas Superior se misturam com 90% das águas do sistema Barreiras, no período chuvoso. A Tab. 3 apresenta os dados para o modelamento geoquímico e a Fig. 23 mostra o diagrama de Schoeller desta modelagem.

Tabela 3. Dados hidroquímicos das amostras de água subterrâneas utilizadas na modelagem e valores obtidos para as misturas. Valores médios das concentrações dos íons em mg/L.

Amostras	pH	Cl^-	SO_4^{-2}	Na^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}
Barreiras	4,72	17,13	1,52	9,50	0,59	1,96
Pirabas Superior	6,17	3,40	3,86	1,35	2,55	24,17
Mistura 10%	4,87	15,76	1,75	8,69	0,79	4,18

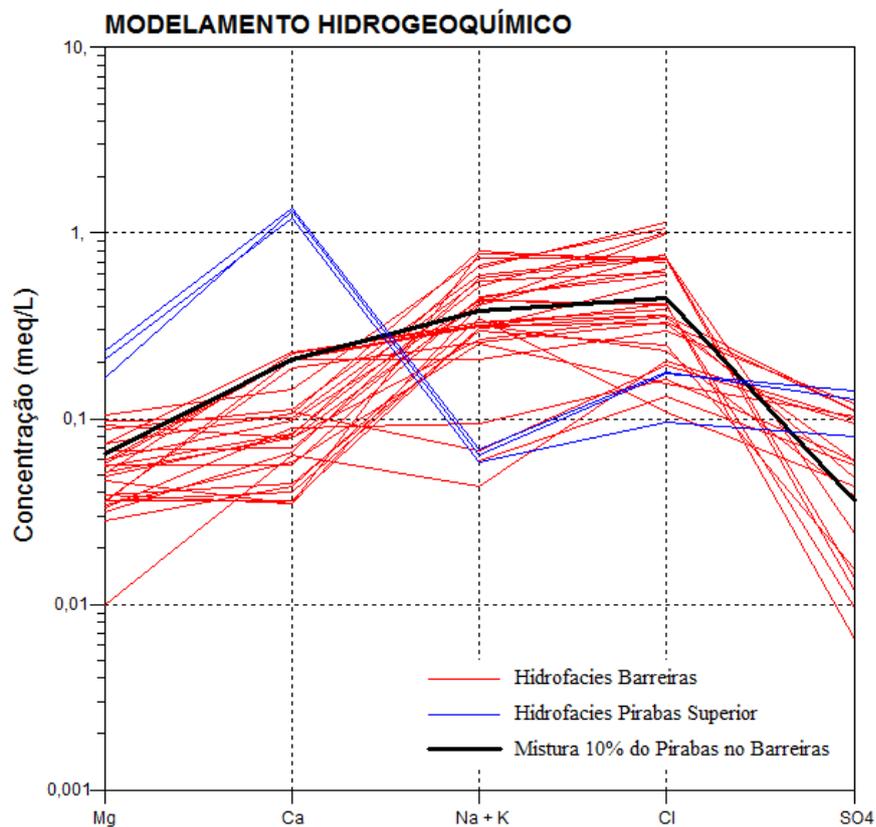


Figura 23. Modelamento Hidrogeoquímico em que 10% do Sistema Aquífero Pirabas Superior se misturam em 90% no Barreiras.

5.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

O coeficiente de correlação é usado como medida para estabelecer a relação entre duas variáveis, em como uma delas prediz o comportamento da outra. Baseado no quimismo das águas existe três fortes tipos de relações entre os principais cátions e ânions (Douglas & Leo³ 1977, *apud* Rao *et al.* 1997): (1) Alta competitividade entre íons de mesma carga, mas com valências diferentes. Ex: Ca^{+2} e Na^+ ; (2) Afinidade entre íons de cargas opostas, mas com mesmo número de valência. Ex: Na^+ e Cl^- e (3) Não competitividade entre íons de mesma carga e mesma valência. Ex: Ca^{+2} e Mg^{+2} .

A Tab. 4 apresenta a matriz de correlação dos principais parâmetros físico-químicos das amostras de água dos aquíferos Barreiras e Pirabas Superior durante os períodos seco e chuvoso.

Considerando $r \geq 0,70$, no período seco houve excelentes correlações entre pH e NO_3^- ($r = -0,80$), pH e Na^+ ($r = -0,79$), C.E e STD ($r = 0,98$), HCO_3^- e Mg^{+2} ($r = 0,93$), HCO_3^- e Ca^{+2} ($r = 0,98$), HCO_3^- e Fe Total ($r = 0,97$), HCO_3^- e Sr^{+2} ($r = 0,97$), Cl^- e Na^+ ($r = 0,91$), Mg^{+2} e Ca^{+2} ($r = 0,90$), Mg^{+2} e Fe Total ($r = 0,99$), Mg^{+2} e Sr^{+2} ($r = 0,94$), Ca^{+2} e Fe Total ($r = 0,96$), Ca^{+2} e Sr^{+2} ($r = 0,98$), Fe Total e Sr^{+2} ($r = 1,00$), pH e SO_4^{-2} ($r = 0,80$).

O período chuvoso apresentou boas correlações entre pH e Cl^- ($r = -0,72$), pH e NO_3^- ($r = -0,86$), pH e SO_4^{-2} ($r = 0,85$), pH e SiO_2 ($r = 0,75$), pH e Na^+ ($r = -0,81$), pH e Fe Total ($r = 0,70$), C.E. e STD ($r = 0,95$), HCO_3^- e SiO_2 ($r = 0,75$), HCO_3^- e Mg^{+2} ($r = 0,91$), HCO_3^- e Ca^{+2} ($r = 0,99$), HCO_3^- e Fe Total ($r = 0,95$), HCO_3^- e Sr^{+2} ($r = 0,97$), Cl^- e SO_4^{-2} ($r = -0,70$), Cl^- e SiO_2 ($r = -0,70$), Cl^- e Na^+ ($r = 0,87$), NO_3^- e SO_4^{-2} ($r = -0,85$), NO_3^- e Na^+ ($r = 0,73$), Mg^{+2} e Ca^{+2} ($r = 0,94$), Mg^{+2} e Fe Total ($r = 0,84$), Mg^{+2} e Sr^{+2} ($r = 0,93$), Ca^{+2} e Fe Total ($r = 0,96$), Ca^{+2} e Sr^{+2} ($r = 0,98$), Fe Total e Sr^{+2} ($r = 0,91$).

5.4 RESULTADOS ISOTÓPICOS

Os resultados das razões isotópicas e concentrações das amostras dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior são mostrados na Tab. 2 e Fig. 24. No Sistema Aquífero Pirabas Superior as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para a amostra de água variaram de 0,705715 a 0,709277 (média de 0,707597), observando-se os valores mínimos nos períodos de Março-Abril (0,705715) e Maio-Junho (0,706080). As concentrações de Sr^{+2} variaram de 212,9 a 267,9 ppb (média =

³ Douglas, E.B. & Leo, W.N. (1977). Hydrogeochemical Relationships Using Partial Correlation Coefficient. Water Resource Bull., v.13, pp.843-846.

244,5 ppb). Os menores valores para o Sr^{+2} foram encontrados nos períodos de Março-Abril (213 ppb) e Novembro-Dezembro (219 ppb).

Tabela 4. Matriz de Correlação ($p < 0,05$) dos principais parâmetros dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. (A) Período Seco. (B) Período Chuvoso.

(A) PERÍODO SECO														
	<i>pH</i>	<i>C.E.</i>	<i>STD</i>	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{-2}	SiO_2	Na^+	K^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}	<i>Fe Total</i>	Sr^{+2}
<i>pH</i>	1													
<i>C.E.</i>	-0.23	1												
<i>STD</i>	-0.29	0.98	1											
HCO_3^-	0.58	0.43	0.38	1										
Cl^-	-0.68	0.09	0.16	-0.44	1									
NO_3^-	-0.80	0.38	0.47	-0.47	0.40	1								
SO_4^{-2}	0.80	-0.14	-0.13	0.64	-0.50	-0.65	1							
SiO_2	0.43	0.09	0.08	0.27	-0.41	-0.42	0.49	1						
Na^+	-0.79	0.14	0.24	-0.62	0.91	0.67	-0.66	-0.37	1					
K^+	-0.41	0.62	0.61	0.16	0.38	0.35	-0.31	0.02	0.42	1				
Mg^{+2}	0.39	0.55	0.49	0.93	-0.38	-0.28	0.44	0.19	-0.49	0.41	1			
Ca^{+2}	0.61	0.42	0.36	0.98	-0.49	-0.46	0.64	0.23	-0.64	0.16	0.93	1		
<i>Fe Total</i>	0.60	0.39	0.33	0.99	-0.44	-0.50	0.67	0.27	-0.64	0.13	0.92	0.96	1	
Sr^{+2}	0.60	0.42	0.37	0.98	-0.45	-0.46	0.64	0.24	-0.61	0.19	0.94	1.00	0.96	1

(B) PERÍODO CHUVOSO														
	<i>pH</i>	<i>C.E.</i>	<i>STD</i>	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{-2}	SiO_2	Na^+	K^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}	<i>Fe Total</i>	Sr^{+2}
<i>pH</i>	1													
<i>C.E.</i>	-0.21	1												
<i>STD</i>	-0.30	0.95	1											
HCO_3^-	0.68	0.35	0.30	1										
Cl^-	-0.72	0.31	0.35	-0.56	1									
NO_3^-	-0.86	0.25	0.39	-0.54	0.67	1								
SO_4^{-2}	0.85	-0.19	-0.28	0.61	-0.70	-0.85	1							
SiO_2	0.65	0.04	-0.04	0.75	-0.70	-0.73	0.75	1						
Na^+	-0.81	0.23	0.35	-0.53	0.87	0.77	-0.81	-0.72	1					
K^+	-0.61	0.53	0.64	-0.14	0.50	0.73	-0.70	-0.50	0.62	1				
Mg^{+2}	0.40	0.49	0.50	0.91	-0.36	-0.18	0.35	0.56	-0.28	0.20	1			
Ca^{+2}	0.63	0.40	0.36	0.99	-0.52	-0.49	0.61	0.73	-0.51	-0.07	0.94	1		
<i>Fe Total</i>	0.70	0.28	0.21	0.95	-0.59	-0.62	0.76	0.80	-0.58	-0.25	0.84	0.96	1	
Sr^{+2}	0.66	0.38	0.35	0.97	-0.53	-0.46	0.59	0.69	-0.55	-0.04	0.93	0.98	0.91	1

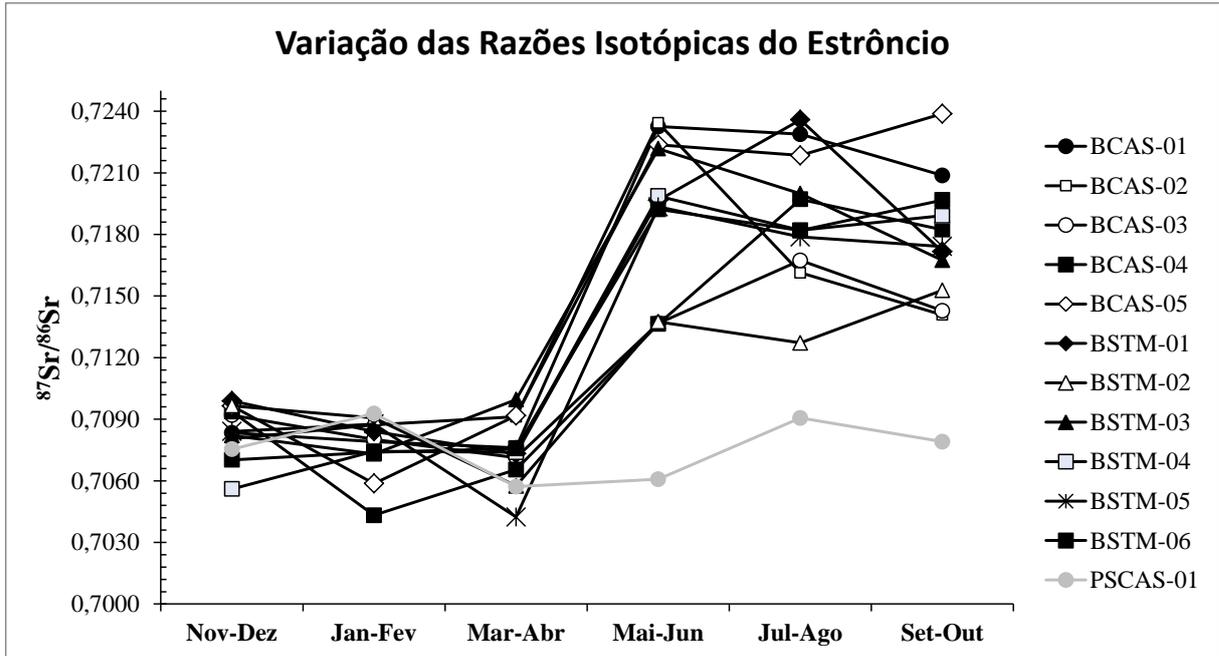


Figura 24. Comportamento sazonal das variações isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

No Sistema Barreiras os valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas amostras de água variaram de 0,704239 a 0,723881 (média de 0,713231), enquanto que as concentrações de Sr^{+2} variaram de 6,5 a 87,4 ppb. No período chuvoso as amostras do Sistema Barreiras mostraram valores das razões isotópicas semelhantes aos valores da amostra PSCAS-01 do Sistema Pirabas Superior. Todas as amostras tiveram um comportamento similar no período de Novembro-Dezembro em torno de 0,708412, sendo o menor valor identificado na amostra BSMP-04 e o maior na amostra BSMP-01. No período de Janeiro-Fevereiro, as amostras BCAS-03, BSMP-04 e PSCAS-01 tiveram um pequeno aumento de suas razões isotópicas, enquanto que as amostras BCAS-04 e BCAS-05 apresentaram uma leve diminuição de suas razões isotópicas. As amostras BCAS-03 e BSMP-03 tiveram um aumento de sua concentração de Sr^{+2} de 43 para 62 ppb e de 18 para 45 ppb, respectivamente. Já na amostra BCAS-05 houve uma brusca queda de sua concentração de 66 ppb para 6 ppb. Em Março-Abril a grande maioria das amostras do Barreiras tiveram um queda de suas razões isotópicas juntamente com a amostra PSCAS-01 do Pirabas Superior. Porém as amostras BCAS-04 e BCAS-05 apresentaram um pequeno aumento. O maior valor da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das amostras do Barreiras foi da amostra BSMP-03 (0,709957), enquanto que a amostra BSMP-05 exibiu o menor valor desta razão (0,704239) seguido pela diminuição brusca de sua concentração de Sr^{+2} em quase pela metade (26 ppb) comparada com o período anterior (44 ppb). Neste bimestre também houve uma diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da amostra PSCAS-01 seguido pela diminuição de sua concentração Sr^{+2} (de 250 para 213 ppb). No bimestre Maio-Junho houve um aumento significativo nos valores da razão isotópica do estrôncio nas amostras do Barreiras variando

de 0,713638 a 0,723432. A amostra BCAS-02 apresentou o maior valor da razão isotópica, juntamente com a maior concentração de Sr^{+2} (59 ppb), enquanto que a amostra BCAS-04 revelou os menores valores tanto para a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,713638) como para a concentração de Sr^{+2} (28 ppb). Em Julho-Agosto houve um queda brusca na razão isotópica da amostra BCAS-02 para um valor de 0,716135, seguido pela diminuição de sua concentração de Sr^{+2} para 29 ppb. Destaca-se também neste período um aumento da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da amostra PSCAS-01 de 0,706080 para 0,709063. A amostra BSMP-02 apresentou o menor valor da razão isotópica neste período (0,712716). No bimestre Setembro-Outubro houve uma diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas amostras BCAS-01, BCAS-02, BCAS-03, BCAS-04, BSMP-01, BSMP-03 e BSMP-05 e um aumento nas demais. Houve uma diminuição brusca no valor da razão isotópica da amostra BCAS-04 para 0,718231. Não houve grandes variações da concentração de estrôncio (Fig. 24; Tab. 2).

5.5 MISTURA DE ÁGUAS

Segundo Mazor (2004), o fluxo de água subterrânea entre poços, bem como a sua velocidade e seu tempo de deslocamento é feito através do estudo dos gradientes hidráulicos, com a premissa de que estes poços estejam interconectados, sendo necessários conhecimentos geológicos da área dos poços estudados. Ainda segundo Mazor (2004), as informações geológicas estratigráficas e tectônicas são instrutivas, mas não definitivas para provar a existência de conectividade hidráulica entre poços, sendo, portanto, necessário o estudo de outros parâmetros para conferir a conexão hidráulica dos poços estudados. Este autor sugere que os constituintes químicos da água podem indicar se os poços estudados são do mesmo tipo de água ou pertencem a grupos diferentes. Entre os principais constituintes químicos, o cloreto pode ser considerado o melhor indicador hidroquímico quanto à identificação dos tipos de águas e seus possíveis padrões de mistura, pois ele é comum nas águas subterrâneas, tem um limitado número de fontes identificáveis e é hidroquimicamente conservativo, ou seja, ele não participa nas interações de troca iônica rocha-água subterrânea, e, quando está na água subterrânea não é removido por nenhum tipo de processo (Crandall *et al.* 1999, Mazor 2004, Négrel & Petelet Giraud 2005, Han *et al.* 2010). As principais fontes de origem deste íon são: Aerossol marinho na forma de sais atmosféricos, dissolução de halita em casos limitados onde o mineral está presente em rochas e a água do mar a partir de uma intrusão salina em um aquífero (Mazor 2004). A Fig. 25 apresenta os diagramas de composição química entre os principais cátions e ânions contra o íon cloreto.

Foi realizada uma análise estatística multivariada procurando averiguar a formação de grupos distintos entre os dados amostrados e as possíveis relações existentes entre eles no caso de possíveis misturas (Voudouris *et al.* 2000). Foi empregada a técnica de Análise de Componente Principal (PCA). O PCA é uma transformação linear de dados multivariados em que os eixos transformados se alinham com a maior variância nos dados (Davis 2002). É um método útil na redução, manipulação e visualização dos sistemas de dados complexos onde padrões e similaridades de dados não são bem compreendidas (Melloul & Collin 1992). A Análise de Componente Principal foi realizada nas amostras utilizando os seguintes conjuntos de variáveis que apresentaram boas correlações: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Cl^- - SO_4^{2-} - K^+ - Mg^{2+} ; Cl^- - Na^+ - NO_3^- - K^+ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SO_4^{2-} - K^+ para os períodos seco e chuvoso (Fig. 26). No período seco percebe-se a nítida distinção entre as amostras dos aquíferos estudados, enquanto que no chuvoso se ver claramente a interação entre ambos.

Procurando investigar melhor a possibilidade de mistura entre os sistemas aquíferos estudados os resultados isotópicos de Sr foram lançados no diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ (Fig. 27).

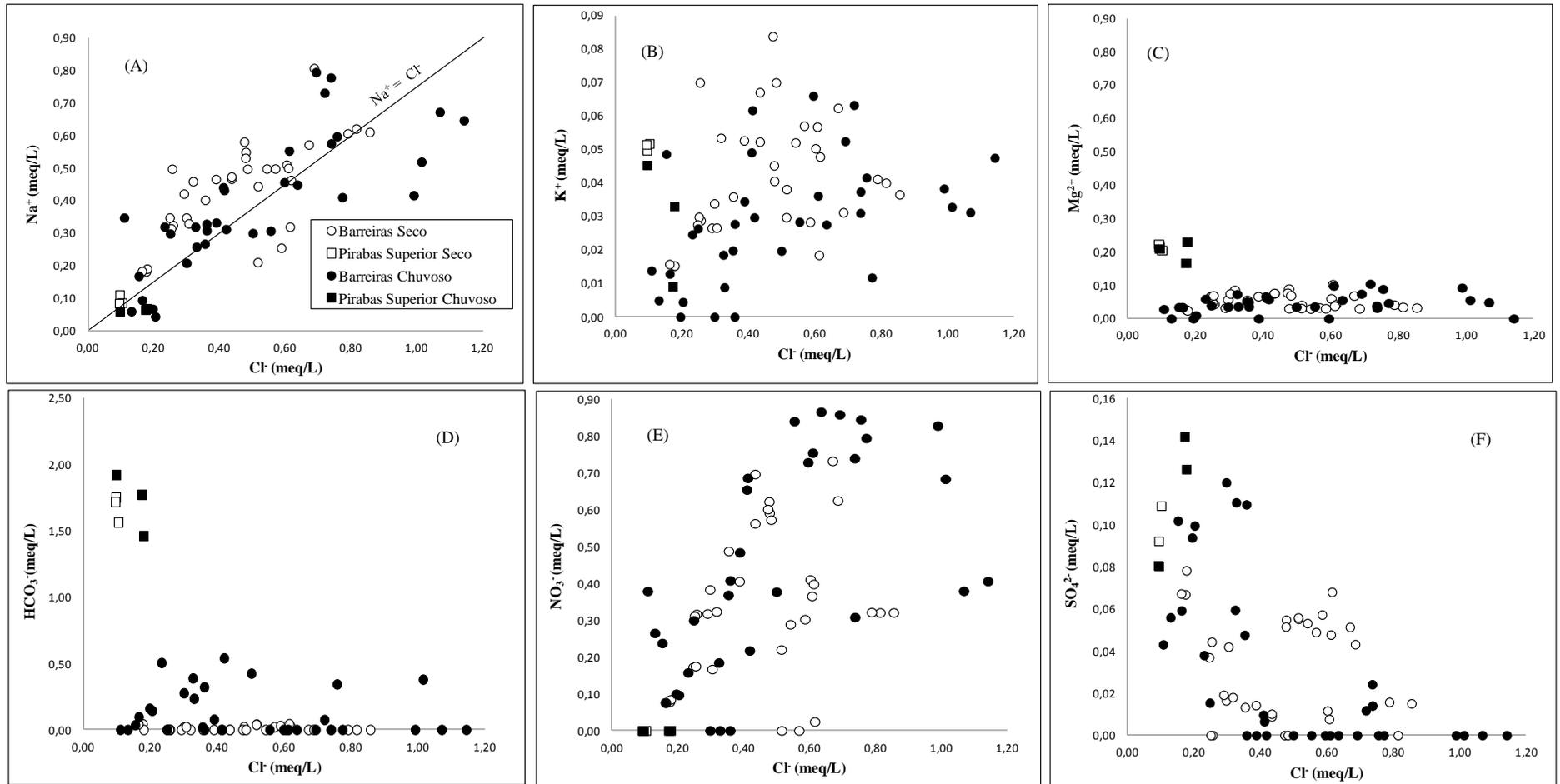


Figura 25. Diagramas de composição química dos principais cátions e ânions vs. o íon Cloreto nas amostras de águas dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior nos períodos seco e chuvoso.

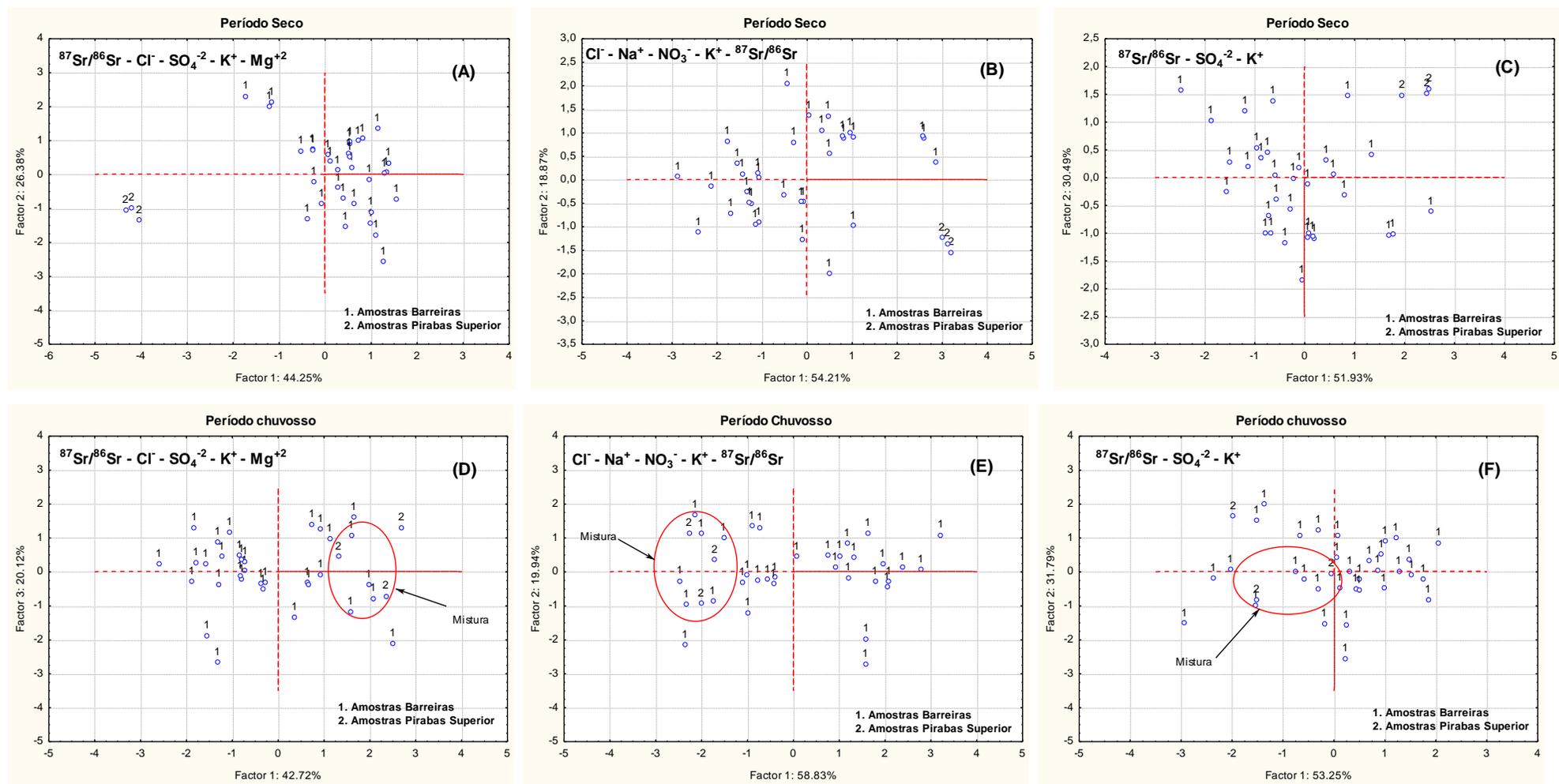


Figura 26. Diagramas PCA para as amostras dos Sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. (A), (B) e (C) Período Seco. (D), (E), (F) Período Chuvoso.

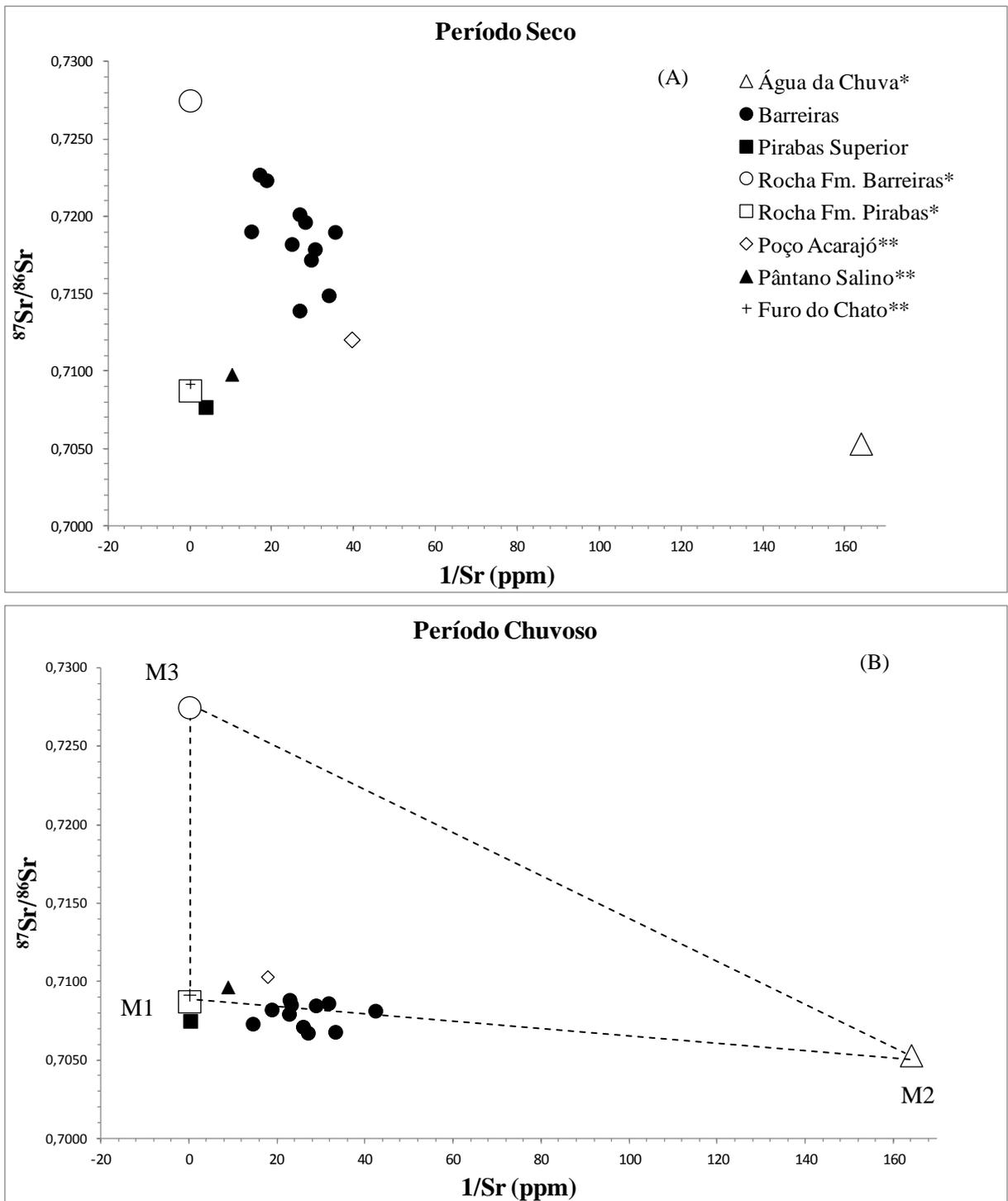


Figura 27. Diagramas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ da média das amostras dos Sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior. (A) Período Seco. (B) Período Chuvoso. M1, M2, M3 = Membros Finais; Fm.: Formação. * Dados de Oliveira Filho (2012). ** Dados de Bordalo *et al.* (2007).

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O pH para as amostras do Aquífero Barreiras é ácido e com valores variáveis. Estes valores refletem a liberação de H^+ a partir da dissolução de ácidos orgânicos produzidos pela decomposição da matéria orgânica nos solos da região amazônica e, principalmente na forma de Ácido Silícico $2NaAlSi_3O_8 + 9H_2O + 2H_2CO_3 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 2HCO_3^- + 4H_4SiO_4$ (Matta 2002; Oliveira Filho 2012). Por sua vez a amostra do sistema Pirabas Superior foi fortemente influenciada pela elevada presença de bicabornato, originado a partir da dissolução de rochas carbonáticas, principalmente pela dissolução do mineral calcita ($CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$).

Os valores da Condutividade Elétrica nas amostras do sistema Barreiras apresentaram pouca variação quanto à sazonalidade, mas tiveram uma variação expressiva de forma espacial. Com exceção das amostras BCAS-02, BSMP-02, BSMP-03 e BSMP-05, as demais apresentaram valores semelhantes aos encontrados por Cortez *et al.* (2000) e Oliveira Filho & Galarza (2013). Porém, Cabral & Lima (2006) e Paranhos (2010) encontraram valores superiores a $200 \mu S/cm^2$ para as águas do Aquífero Barreiras. Tal fato evidencia a presença de ambientes altamente lixiviados onde houve a migração de elementos maiores (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) para as águas subterrâneas deixando estes ambientes com características ácidas, com forte presença de alumínio e ferro (Bahia *et al.* 2008). A amostra do sistema Pirabas Superior apresentou valores maiores que as do Barreiras, revelando uma água mais mineralizada, resultante da diferença do tempo de percolação entre estes aquíferos sendo a água do sistema Pirabas mais antiga (concordando com Oliveira Filho 2012). Os valores de STD seguiram tendência semelhante aos valores da Condutividade Elétrica.

Com respeito à Sílica, as amostras Barreiras e Pirabas Superior apresentaram um comportamento muito semelhante durante o período sazonal, sendo que os maiores valores para este parâmetro ocorreram no período chuvoso, principalmente no bimestre Março-Abril, sendo isto devido ao maior input pluviométrico neste período, que faz com que haja o aumento no processo de hidrólise dos minerais silicosos, aumentando a quantidade de sílica lixiviada para as águas (Teixeira *et al.* 2000). A maior quantidade de sílica na amostra do Pirabas Superior é resultado da presença de sílica amorfa provenientes das carapaças de diatomáceas nas rochas carbonáticas da Formação Pirabas (Oliveira Filho & Galarza 2013).

A partir da análise dos diagramas de Piper e dos diagramas de Schoeller (Figs. 21 e 22) verificou-se que, nas amostras de água do sistema Barreiras predominou a fácies Na^+-Cl^- . Isto é o resultado, principalmente, da forte contribuição do input atmosférico de água meteórica nestes poços, característica marcante no Aquífero Barreiras (Matta 2002; Paranhos 2010;

Oliveira Filho & Galarza 2013). Por sua vez a amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior predominou a fácies HCO_3^- - Ca^{2+} , sendo esta, resultado da interação destas águas com as rochas carbonáticas da Formação Pirabas. No período chuvoso, houve o aparecimento das fácies Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- - HCO_3^- e Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^- nas amostras BCAS-03, BCAS-04 e BSMP-06, as quais sugerem possíveis misturas entre os sistemas aquíferos estudados (Paranhos 2010, Oliveira Filho & Galarza 2013).

As amostras do Aquífero Barreiras apresentaram a seguinte tendência iônica: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ para os cátions e $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ para os ânions. A concentração química dos cátions é controlada pelo intemperismo de minerais feldspáticos como a anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e também a albita ($2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) que, sofrendo a ação da hidrólise são alterados gerando a Caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$), argilomineral muito encontrado no Aquífero Barreiras (Teixeira *et al.* 2000; Oliveira Filho 2012). O intemperismo destes plagioclásios cálcicos pode justificar o aumento do conteúdo de cálcio na amostra BCAS-05 durante o período seco. A amostra PSCAS-01, representativa do Sistema Aquífero Pirabas Superior apresentou a tendência iônica $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ para os cátions e $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ para os ânions. Os cátions são resultantes da dissolução de minerais como Calcita (CaCO_3) e Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) que são disponibilizados para este sistema aquífero através da interação desta águas com as rochas da Formação Pirabas.

A alta concentração de cloreto nas águas do Aquífero Barreiras, principalmente no período chuvoso mostra a sensibilidade deste aquífero em relação à sazonalidade, uma vez que este íon não é abundante nas rochas que compõem a geologia da área em estudo (Matta 2002; Cabral & Lima 2006). A média do cloreto neste aquífero (19,28 mg/L) foi seis vezes maior que o valor máximo de 2,27 mg/L encontrado por Cortez *et al.* (2000) em Belém, porém um pouco menor que os valores das amostras analisadas por Cabral & Lima (2006), que apresentaram um valor médio de 25,77 mg/L. O diagrama de composição $\text{Na}^+ \times \text{Cl}^-$ (Fig. 25A) exibiu uma grande variedade de conteúdo de Cl^- , mostrando amostras acima e abaixo da linha de extrapolação para o ponto zero (Mazor 2004), confirmando a existência de outras fontes de cloreto além da água da chuva, possivelmente antropogênicas (Négreil & Petelet Giraud 2005). A amostra BCAS-03 apresentou o menor conteúdo de sódio para as águas do Barreiras, principalmente no período chuvoso (Fig. 16), fato este que pode ter sido ocasionado pela troca iônica deste cátion com argilas (Kloppmann⁴ 1995 *apud* Négreil & Petelet Giraud

⁴ Kloppmann, W. 1995. Datation des eaux de la nappe de la craie (France et Allemagne): approche chimique et isotopique. PhD thesis, Univ. Paris Sud. 252 p.

2005). O conteúdo de K^+ foi bastante variável, porém, juntamente com o Mg^{2+} , tiveram valores poucos expressivos no Sistema Aquífero Barreiras, isso devido à intensa participação do potássio em mecanismos de troca iônica e a escassez geoquímica do magnésio em águas subterrâneas (Fenzl 1988; Fig. 25B e C).

A amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior apresentou maiores concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} do que as amostras do Barreiras, o que reflete a influência do litotipo drenado por este sistema aquífero, além de mostrar que este sistema aquífero é menos afetado pela sazonalidade (Figs. 19 e 25C, D e F).

A elevada concentração de nitrato (Figs. 14 e 25E) nas amostras do Barreiras é proveniente do input antropogênico originado a partir de fossas e sumidouros mostrando assim a alta vulnerabilidade deste aquífero em relação ao sistema Pirabas Superior (Cabral 2004).

Com exceção da amostra BCAS-04, as demais amostras do Barreiras apresentaram uma pequena variação do SO_4^{2-} durante os períodos seco e chuvoso (Fig. 15). O aumento significativo de sulfato na amostra BCAS-04 durante o período chuvoso pode ser devido à decomposição de substâncias orgânicas nos solos, que constituem uma importante fonte de sulfatos para as águas subterrâneas (Fenzl 1988, Fig. 25F).

Com exceção das amostras BCAS-03, BCAS-04, BSMP-01 e BSMP-06, as demais apresentaram valores semelhantes para o conteúdo de Ferro Total (Fig. 20). As amostras citadas anteriormente apresentaram um aumento no conteúdo de Ferro durante o segundo e terceiro bimestre, podendo isso estar associado à litologia do Sistema Aquífero Barreiras e a presença de ambientes redutores (Matta 2002). Cabe ressaltar que estas amostras tiveram um aumento da concentração de SO_4^{2-} que, segundo Fenzl (1988), aumenta a solubilidade do Fe. A amostra PSCAS-01 do Sistema Aquífero Pirabas Superior apresentou um elevado valor de ferro, o que pode estar relacionado a incrustações e a falta de manutenção periódica das tubulações deste poço conforme sugerido por Paranhos (2010).

Os valores da razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ no período seco (Tab. 2 e Figs. 24 e 27A) mostraram que as amostras do Sistema Aquífero Barreiras (0,712716 a 0,723881) são mais radiogênicas que a amostra PSCAS-01 (0,706080 a 0,709063), representativa do Sistema Aquífero Pirabas Superior. Assim como também para com as amostras do poço Acarajó, Pântano Salino e Furo do Chato de Bordalo *et al.* (2007). Comparadas com o valor da razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ da rocha da Formação Barreiras (Oliveira Filho 2012), elas apresentam-se menos radiogênicas (Tab. 1). As águas do Aquífero Barreiras refletem a influência do litotipo no qual elas circulam, sendo este de origem continental (Goldstein & Jacobsen, 1988), apresentando valores semelhantes aos encontrados por Allègre *et al.* (1996) para os sedimentos continentais em suspensão dos

rios Negro, Trombetas e Amazonas. Estes dados concordam com os resultados obtidos por Oliveira Filho & Galarza (2013) para as águas do Aquífero Barreiras nos Municípios de Belém e Ananindeua (Tab. 1).

Por sua vez a amostra do Aquífero Pirabas Superior é menos radiogênica evidenciando a origem marinha das rochas da Formação Pirabas por onde ela circula, mostrando valores para a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ semelhantes à da água do mar (0,709172; Hodell 1990), ao valor médio da amostra do Furo do Chato de influência marinha (0,709180, Bordalo 2007) e das assinaturas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,708696) dos macrofósseis da Formação homônima, Belúcio (2001).

Durante o período chuvoso ocorreu o processo de homogeneização das razões isotópicas dos sistemas aquíferos em estudo, uma vez que nas amostras do Sistema Aquífero Barreiras houve uma significativa diminuição das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,712716 a 0,723881 para uma faixa de 0,704239 a 0,709957, ficando estes valores semelhantes aos encontrados para as amostras de água do Sistema Aquífero Pirabas Superior (Figs. 24 e 27B). Esta diminuição expressiva é explicada pela interação das águas deste aquífero com a água da chuva cuja razão está em torno de 0,705316 (Oliveira Filho & Galarza 2013) e de ações antropogênicas que podem também explicar a grande variação dos valores das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ neste aquífero. Para a amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior houve uma pequena variação de sua razão isotópica entre os períodos seco e chuvoso, sendo que neste último período ela apresentou uma leve diminuição. Paranhos (2010) e Oliveira Filho & Galarza (2013) explicaram este fato como sendo uma provável mistura em torno de 10% das águas do Sistema Aquífero Barreiras (homogeneizado pelas águas meteóricas) no Pirabas por conectividade hidráulica, principalmente em feições neotectônicas (Igreja *et al.* 1990; Costa *et al.* 1996; Palheta 2008; Bandeira & Abreu 2012).

O conteúdo de estrôncio nos sistemas aquíferos não apresentou variação significativa entre as estações seca e chuvosa, mas mostrou uma diferença de concentração entre eles. O conteúdo de Sr^{+2} foi menor nas amostras do Barreiras que na amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior, o que é devido ao processo de substituição iônica do cálcio pelo estrôncio nos minerais carbonáticos da Formação Pirabas, em virtude do comportamento geoquímico similar entre estes elementos (Faure 1986), dados similares foram encontrados por Oliveira Filho & Galarza (2013).

Analisando os diagramas de Piper e Schoeller (Figs. 21 e 22) algumas amostras do Sistema Aquífero Barreiras mostraram um comportamento hidrogeoquímico de mistura mais evidente no período chuvoso. Verificou-se nos diagramas de Schoeller a presença de linhas paralelas (leques) que evidenciam misturas, caso contrário a linhas das amostras estariam

sobrepostas indicando apenas um tipo de água (Mazor 2004). Os íons Mg^{+2} e HCO_3^- vs. o cloreto (Fig. 25C e D) evidenciam claramente a presença de pelo menos dois tipos de águas, sendo que a amostra PSCAS-01 (Aquífero Pirabas Superior) se mostrou mais enriquecida nestes íons, confirmando a origem marinha das rochas que drenam este aquífero. O baixo teor de magnésio e bicarbonato nas amostras do Aquífero Barreiras confirma a escassez geoquímica destes elementos em águas subterrâneas como relatado por Fenzl (1988). Houve um enriquecimento de cálcio e bicarbonato nas amostras do Sistema Aquífero Barreiras BCAS-03, BCAS-04 e BSMP-06 durante o período chuvoso, sendo este fato explicado por uma provável mistura destas águas com as águas do Aquífero Pirabas Superior que ascende por conexão hidráulica através das falhas e fraturas nas rochas que estão possivelmente saturadas neste período (Oliveira Filho & Galarza 2013). Os diagramas de composição dos íons Na^+ , K^+ e NO_3^- vs. o Cl^- (Fig. 25A, B e E) indicam possíveis misturas de mais de dois membros finais em diferentes proporções, principalmente durante o período chuvoso. Segundo Mazor (2004) quando as amostras se dispõem na forma de uma linha existe mistura de dois tipos de água, mas quando estão dispersas indicam a presença de mais de dois membros finais no processo de mistura. Isso sugere que as águas meteóricas possivelmente sejam o terceiro membro final neste processo de mistura. A Análise de Componente Principal (Fig. 26) também reforça a hipótese de mistura de águas entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior no período chuvoso, concordando com Oliveira Filho & Galarza (2013). Durante o período seco (Fig. 26A, B e C) se verificam dois grupos distintos e sem uma forte interação entre eles. Porém percebe-se um pequeno deslocamento nas amostras do Pirabas Superior (Fig. 26C), sugerindo uma leve mistura ainda no período seco por meio de infiltração das águas meteóricas no Barreiras que, por sua vez infiltra no Pirabas Superior. Já no período chuvoso se observa uma maior interação entre os dois grupos (Fig. 26D, E e F).

O resultado do modelamento geoquímico (Fig. 23) sugere que não somente as águas do Sistema Aquífero Barreiras se misturam no Pirabas (Paranhos 2010; Oliveira Filho & Galarza 2013), mas também as águas deste estão se misturando nas águas do Barreiras durante o período chuvoso em um padrão em torno de 10%. Este resultado sugere que águas do Sistema Aquífero Pirabas Superior estão ascendendo por conectividade hidráulica (falhas) devido à recarga deste aquífero durante o período chuvoso.

No diagrama de mistura $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. $1/Sr$ (Fig. 27A e B) como proposto por Faure (1986), o processo de homogeneização das razões isotópicas das amostras é visto claramente no período chuvoso. Neste diagrama tem-se a presença de três membros finais: A rocha da Formação Pirabas (M1), a água da chuva (M2) e a rocha da Formação Barreiras (M3). As

amostras do Barreiras ficaram na linha de mistura entre a rochas da Formação Pirabas e a água da chuva, o que evidencia tanto a participação das águas meteóricas quanto das águas do Aquífero Pirabas Superior nas amostras do Barreiras por conectividade hidráulica, reforçando a hipótese de mistura apresentada no modelamento geoquímico (Fig. 23).

7 CONCLUSÃO

Nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará os sistemas aquíferos estudados apresentaram características hidrogeoquímicas diferenciadas. O Aquífero Barreiras, alojado em rochas siliciclásticas, possui menor concentração de íons dissolvidos em água, em torno de 60 mg/L, sendo resultado do menor tempo de percolação e interação com seu litotipo, enquanto que o Sistema Aquífero Pirabas Superior possui uma maior concentração iônica dissolvida em água, em média 97 mg/L, resultante do maior tempo de contato com a rocha encaixante da Formação Pirabas, que é mais antiga e está sotoposto à Formação Barreiras.

O Aquífero Barreiras possui predominantemente águas cloretadas-sódicas, sendo estas influenciadas pela contribuição das águas meteóricas e pela ação antropogênica, apresentando valores de pH ácidos, em torno de 4,7 e alta vulnerabilidade. As águas do Sistema Aquífero Pirabas Superior são majoritariamente bicarbonatadas-cálcicas, sendo esta fácies hidroquímica fortemente influenciada pela dissolução do carbonato, tendo um pH com valores acima de 6 e com menor vulnerabilidade em relação a ação antrópica.

As matrizes de correlação mostraram significativas correlações relevantes entre os parâmetros físico-químicos tanto positivas quanto negativas com valores acima de 0,7.

O efeito sazonal é perceptível nas amostras do Sistema Aquífero Barreiras, porém a amostra do Sistema Aquífero Pirabas Superior apresentou pouca variação sazonal no qual os pontos e as linhas quase que se sobrepõe no diagrama de Piper e de Schoeller, respectivamente. O comportamento hidrogeoquímico das amostras do Barreiras mostrou linhas paralelas perfazendo a forma de um leque no diagrama de Schoeller, sendo que houve um pequeno distanciamento entre elas durante o período chuvoso, indicando a presença de mais de um tipo de água.

As análises isotópicas de estrôncio a partir da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durante o período seco apresentaram valores mais radiogênicos para as amostras dos poços Barreiras (0,712716 a 0,723881) do que a do Pirabas Superior (0,706080 a 0,709063). Isso reflete a influência do tipo de formação das rochas encaixantes destes aquíferos que, no caso do Aquífero Barreiras, seu litotipo é de origem continental, e o Pirabas Superior predominantemente marinho. Durante o período chuvoso houve uma homogeneização das razões isotópicas nas amostras do

Sistema Aquífero Barreiras a partir da mistura com as águas meteóricas e com uma contribuição em torno de 10% da água do Pirabas Superior resultando na diminuição dos valores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas amostras deste sistema aquífero de 0,712716 a 0,723881 para uma faixa de 0,704239 a 0,709957.

Nos diagramas de composição dos principais íons contra o cloreto este apresentou grande variação indicando possivelmente a presença de mais de dois membros finais no processo de mistura destas águas. O tratamento estatístico multivariado (PCA), juntamente com o diagrama de mistura $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ mostraram uma tendência de mistura entre estes aquíferos durante o período chuvoso. O modelamento hidrogeoquímico (diagrama de Schoeller) indicou que o grau de mistura das águas do Aquífero Pirabas Superior no Barreiras está em torno de 10% durante o período chuvoso, fato que explica assim o enriquecimento de cálcio e bicarbonato em algumas amostras durante o mesmo período.

Os estudos isotópicos, hidrogeoquímicos e estatísticos realizados neste trabalho, aliados aos estudos neotectônicos feitos na região nordeste do estado do Pará mostraram a vulnerabilidade do Aquífero Barreiras durante o período sazonal. Estes estudos também sugerem uma provável interconexão entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior, principalmente no período chuvoso, alertando para a possibilidade de contaminação dos sistemas aquíferos mais profundos, os quais representam a provável alternativa para o abastecimento público da população de Belém e suas adjacências com águas de excelente qualidade em relação a potabilidade para o consumo humano. Portanto, recomenda-se o gerenciamento do uso dos mananciais subterrâneos nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará, assim como para a toda a Região Metropolitana de Belém objetivando a correta exploração deste recurso ambiental de forma planejada e sustentável, levando à conservação de sua quantidade e qualidade para as presentes e futuras gerações.

REFERÊNCIAS

- 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.
- American Public Health Association – APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington. American Public Health Association. 19th ed., 140 p.
- Agencia Nacional De Águas – ANA. 2011. Guia de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo - SP, CETESB. 326p.
- AQUACHEM. 2011. Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting, v 1.40, Waterloo Hydrogeologic. Waterloo, Ontario, Canadá.
- Bahia V., Fenzl N., Morales G.P. 2008. Caracterização da qualidade das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do Utinga/Belém (PA) - a partir de dados hidrogequímicos. 15º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, p. 1-20.
- Bandeira I.C.N. & Abreu F.S.M. 2012. Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal / PA. *Águas Subterrâneas*, **26**(1):1-17.
- 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.
- Belúcio E.F. 2001. Estudo da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em macrofósseis da formação Pirabas, nordeste do estado do Pará. Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 58p.
- Bemerguy R.L. Costa J.B.S. Hasui Y. Borges M. S. 1995. Tectônica e paleogeografia da calha do Rio Amazonas. In: 5º Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos. Gramado. Boletim de Resumos Expandidos, Porto Alegre: SBG/RS e CPGQ/UFRGS, p 419-420.
- Bento E.S. 2006. Hidrogeoquímica e Modelo Hidrogeológico das Águas Subterrâneas no Baixo Curso do Rio Macaé, Município de Macaé-RJ. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 180p.
- 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.
- 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**(10): 1807-1821.
- Cabral N.M.T. 2004. Impacto da Urbanização na Qualidade das Águas Subterrâneas nos Bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal. PhD Thesis, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 278 p.
- Cabral e Lima. 2006. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, Belém, **1**(1), p. 149-166.
- Capo R.C., Stewart B.W., Chadwick O.A. 1992. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geoderma*, **82**: 197-225.
- Collerson K.D. Ullman W. J. Torgersen T. 1988. Ground waters with unradiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in the Great Artesian Basin, Australia. *Geology*, **16**: 59-63.
- Costa DE J.P.R. & Martins M. 1996. Determinação das alterações microclimáticas causadas por processo de ocupação urbana. In: 9º Congresso Brasileiro De Meteorologia, v. 2, p. 1182-1184.
- Costa F.R. 2005. Influência da Neotectônica sobre os Arranjos Geométricos dos Aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. MS Dissertation. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 171 p.

- Costa J.B.S., Bemerguy 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 Depositionais, *Geonomos*, **4** (2): 23-44.
- Costa, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**(12): 146-160.
- Cortez C.M.B. Tagliarini E.M. Tancredi A.C.F.N.S. 2000. Utilização de águas minerais dos aquíferos do Grupo Barreiras na região de Belém (PA). In: JOINT World Congress on Groundwater Fortaleza, CE: [s.n.]. v. 1. 1 CD-ROM.
- Crandall C.A. Katz B.G. Hirten J.J. 1999. Hydrochemical evidence for mixing of river water and groundwater during high-flow conditions, lower Suwannee River basin, Florida, USA. *Hydrogeology Journal*, **7**:454-467.
- Custodio E. & Llamas M.R. 1976. *Hidrologia Subterrânea*. Vol.2. Barcelona: Omega, 2450 p.
- Davis J.C. 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, second ed. John Wiley and Sons, Inc., New York, 646 p.
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. 2. Ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 589 p.
- Feitosa F.A.C. & Manoel Filho J.M. 2000. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM/LABHID, 2ª. Ed. 391 p.
- Fenzl N. 1986. *Introdução a Hidrogeoquímica*, Belém EdUFPA, 189 p.
- Fernandes J.M.G. 1984. Paleoeologia da Formação Pirabas, Estado do Pará. SBG, 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Anais., v. 1, p. 330-340.
- Ferreira C.S. 1982. Notas Estratigráficas sobre o Cenozoico Marinho do Estado do Pará. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Anais, v. 1, p. 84-88.
- Ferreira C.S., & Francisco B.H.R. 1988. As Relações da Formação Pirabas (Oligoceno-Mioceno) com as Formações Continentais do Nordeste do Pará. In: SBG, 35º Congresso Brasileiro e Geologia, Belém, *Anais*, v. 6, p. 761-764.
- Fetter. C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3 ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 691 p.
- Francisco B.H.R., Loewenstein P., Silva O.F., Silva G.G. 1971. Contribuição à Geologia da Folha São Luís - no Estado do Pará - III - Estratigrafia. IV - Recursos Minerais. Bol. Museu Paraense Emilio Goeldi, nova série geológica, **17**:1-40.
- Góes A.M., Rossetti D.F., Nogueira A.C.R., Toledo P.M. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no Nordeste do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, **2**: 3-15.
- Goldstein S.L. Jacobsen S.B. 1988. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, **87**: 249-265.
- Grasshoff K. 1964. On the determination of sílica in sea water. *Deep-Sea Research*, **11**:597-604.
- Han G. & Liu C.Q. 2006. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China. *Science of the Total Environment*, **364**: 165-174.
- Han G. Tang Y. Wu Q. Tan Q. 2010. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in karst virgin forest, Southwest China. *Atmospheric Environment*, **44**: 174-181.
- Hem J.D. 1985. Study and interpretation of the characteristics of natural waters. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Washington D.C. 263 p.
- Herut B., Starinsky A., Katz A. 1993. Strontium in rainwater from Israel: Sources, Isotopes and chemistry. *Earth and Planet*, **120**:77-84.
- Hodell, D.A., Mead, G.A., Mueller, P.A. 1990. Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8 Ma to present): Implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to the oceans, *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **80**(4): 291-307.

- Horbe A.M.C., Queiroz M.M.A., Moura C.A.V., Galarza Toro M.A. 2013. Geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários – Amazonas – Brasil, *Acta Amazônica*, **43**(4): 489- 504.
- Igreja H. S. Borges M. S. Alves R. J. Costa Júnior P. S. Costa J. B. S. 1990. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro – Nordeste do Estado do Pará. In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia. Natal, Anais, v.3, p.2110-2124.
- 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.
- Lloyd J.W. Heathcote J.A. 1985. *Natural Inorganic Hydro-chemistry in Relation to Groundwater*. Clarendon Press, Oxford, England, 296 p.
- Lyons W.B., Tyler S.W., Gaudette H.E., Longd T. 1995. The use of strontium isotopes in determining groundwater mixing and brine fingering in a playa spring zone, Lake Tyrrell, 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*. PhD Thesis, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 292 p.
- Maury C. J. 1925. *Fósseis Terciários do Brasil com descrições de novas formas cretáceas*. Rio de Janeiro. Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil - CPRM. 665p.
- Mazor E. 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology Third Edition Books in Soils Plants And the Environment*. 453 p.
- Melloul A., Collin M. 1992. The ‘principal components’ statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. *J. Hydrol.* **140**: 49–73.
- 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.
- Négre 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.
- Négre P. & Petelet Giraud, E. 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). *Journal of Hydrology*, **305**: 99–119.
- Négre P. & Roy S. 1998. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study.
- Oliveira Filho O.B.Q. 2012. *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*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 82 p.
- Oliveira Filho O.B.Q & Galarza M.A. 2013. *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 comparativos nos Municípios de Benevides e Capanema (PA)*. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, v. 8, 22 p.
- Oliveira M.C.F. de & Souza P.F.S. 1997. Estudo de Possíveis Variações e Mudanças Climáticas em Belém. In: 10º Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, *Anais*, Piracicaba – SP, p. 410-412.

- Palheta E.S.M. 2008. Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da ilha do Mosqueiro – Pará empregado no conhecimento hídrico subterrâneo. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 241 p.
- 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. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 94 p.
- Petri, S. 1957. Foraminíferos Miocênicos da Formação Pirabas. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras (Geologia) – Universidade Federal de São Paulo, v. 216, 72 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.
- Ramage L. 2005. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Cenozoico do Município de Porto Alegre, RS. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 111 p. Disponível em : <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5756>>. Acesso em: 16 de jul. 2014.
- Rao Y.S. Reddy T.V.K. Nayudu P.T. 1997. Groundwater quality in the Niva river basin, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geology* **32**:56–63.
- Rodier J. 1981. Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Barcelona, Ed. Omega, 1059 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**(1):77-89.
- Rossetti D.F. 2006. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. *Geol. USP Sér. Cient.*, São Paulo, **6**(2): 7-18.
- 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. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 128 p.
- STATISTICA for Windows 9.0 [Computer program manual]. Tulsa, StatSoft, Inc., 2300 East 14th Street, WEB: <http://www.statsoft.com>.
- Teixeira W., Toledo M.C.M. de, Fairchild T.R., Taioli F.(Orgs.). 2000. Decifrando a Terra. São Paulo, Oficina de Textos, 568 p.
- Voudouris K., Panagopoulos A. & Koumantakis, J. 2000. Multivariate statistical analysis in the assessment of hydrochemistry of the northern Korinthia prefecture alluvial aquifer system (Peloponnese, Greece). *Natural Resources Research*, Vol. 9, 2: 135-146p.
- 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.
- Xu Z. & Han G. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China. *Atmospheric Environment* **43**: 1954–1961.

ANEXO A - CICLO HIDROLÓGICO COMPLETO PARA CADA PARÂMETRO

Amostras	pH					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	4,12	4,17	4,14	4,19	3,95	4,06
BCAS-02	4,00	4,20	4,00	4,27	4,06	4,05
BCAS-03	4,97	5,15	5,13	5,25	5,03	5,39
BCAS-04	5,64	5,64	5,82	5,66	5,60	5,81
BCAS-05	5,91	5,85	5,70	5,97	5,83	5,91
BSMP-01	4,63	5,23	3,83	4,60	4,85	4,88
BSMP-02	4,20	4,31	4,01	4,24	4,01	4,10
BSMP-03	3,90	3,89	3,77	3,91	3,52	3,75
BSMP-04	4,45	5,21	4,79	5,11	4,51	4,67
BSMP-05	3,80	4,20	4,08	4,23	3,90	4,07
BSMP-06	5,76	5,87	5,66	5,56	5,42	5,67
PSCAS-01	6,60	6,42	6,17	6,47	6,30	6,51

Amostras	Temperatura (°C)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	27,70	27,90	28,10	27,80	27,50	28,20
BCAS-02	27,90	28,00	28,80	27,95	27,70	28,60
BCAS-03	28,20	28,40	28,27	28,30	28,00	28,50
BCAS-04	28,60	28,40	27,90	28,50	28,40	27,20
BCAS-05	28,00	28,00	28,20	28,00	28,10	28,00
BSMP-01	30,10	30,00	30,70	30,05	30,30	30,80
BSMP-02	28,70	28,70	28,40	28,70	28,60	28,30
BSMP-03	28,50	28,50	28,70	28,50	28,50	28,60
BSMP-04	29,60	29,70	28,90	29,65	29,40	28,90
BSMP-05	29,20	29,40	28,80	29,30	29,50	28,80
BSMP-06	28,70	28,50	27,73	28,60	28,90	27,80
PSCAS-01	28,00	27,90	28,73	27,95	28,30	28,90

Amostras	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	56,25	67,43	47,30	49,37	53,90	54,70
BCAS-02	188,00	127,20	192,00	180,60	124,30	87,00
BCAS-03	51,90	48,80	52,40	45,50	51,50	52,40
BCAS-04	60,20	55,60	52,70	58,10	48,70	57,10
BCAS-05	47,10	104,50	89,30	75,60	88,60	88,10
BSMP-01	81,40	73,90	117,00	100,00	108,20	82,80
BSMP-02	134,10	132,50	135,10	141,60	138,90	134,40
BSMP-03	154,20	166,00	159,30	193,90	165,40	185,30
BSMP-04	72,70	72,10	76,10	84,50	75,10	77,10
BSMP-05	126,00	126,40	135,70	136,90	133,30	132,90
BSMP-06	91,00	90,90	99,20	93,10	91,30	97,90
PSCAS-01	170,00	161,40	182,40	179,70	133,80	194,70

Amostras	Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	45,00	42,00	30,00	43,00	39,00	35,00
BCAS-02	89,00	60,00	99,00	143,00	98,00	87,00
BCAS-03	24,00	23,00	25,00	36,00	41,00	24,00
BCAS-04	28,00	26,00	27,00	46,00	38,00	26,00
BCAS-05	22,00	49,00	42,00	60,00	70,00	41,00
BSMP-01	38,00	35,00	120,00	79,00	85,00	39,00
BSMP-02	63,00	63,00	63,00	112,00	110,00	63,00
BSMP-03	73,00	79,00	75,00	153,00	131,00	87,00
BSMP-04	34,00	34,00	36,00	67,00	59,00	36,00
BSMP-05	59,00	60,00	64,00	108,00	105,00	63,00
BSMP-06	43,00	43,00	47,00	74,00	72,00	46,00
PSCAS-01	81,00	76,00	86,00	142,00	106,00	92,00

Amostras	Alcalinidade (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	nd.	17,13	nd.	nd.	nd.	nd.
BCAS-02	nd.	18,93	nd.	nd.	nd.	nd.
BCAS-03	7,15	7,98	4,83	2,08	nd.	2,15
BCAS-04	13,80	16,07	11,71	2,02	1,02	1,37
BCAS-05	nd.	1,79	nd.	1,91	1,46	2,15
BSMP-01	3,85	0,90	3,76	nd.	1,04	0,94
BSMP-02	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-03	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-04	nd.	21,19	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-05	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-06	26,95	19,39	25,21	nd.	nd.	1,07
PSCAS-01	88,55	73,03	96,02	87,50	78,13	85,83

Amostras	Ferro Total (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	0,033	nd.	0,027	0,029	nd.	0,003
BCAS-02	0,001	0,006	0,001	0,051	0,007	0,002
BCAS-03	0,186	0,199	0,120	0,537	0,014	0,016
BCAS-04	0,140	1,554	0,150	0,404	nd.	0,238
BCAS-05	0,042	nd.	0,025	0,036	nd.	0,038
BSMP-01	nd.	nd.	nd.	0,028	0,662	nd.
BSMP-02	0,025	nd.	0,023	0,017	nd.	0,021
BSMP-03	0,121	nd.	0,064	0,042	nd.	0,008
BSMP-04	nd.	0,004	0,009	0,034	0,009	0,152
BSMP-05	nd.	nd.	0,003	0,027	0,050	nd.
BSMP-06	nd.	0,586	nd.	0,027	nd.	nd.
PSCAS-01	1,270	1,858	1,560	2,546	2,370	2,001

Amostras	Sílica (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	5,06	9,92	7,52	1,52	1,73	1,67
BCAS-02	6,74	12,25	9,63	9,37	10,34	10,27
BCAS-03	11,53	25,16	18,26	12,39	11,68	11,95
BCAS-04	11,17	23,03	17,24	12,56	13,15	12,92
BCAS-05	4,81	13,08	8,17	6,83	7,65	7,55
BSMP-01	7,87	17,04	12,69	0,58	0,76	0,69
BSMP-02	6,86	16,32	11,45	2,11	2,68	2,63
BSMP-03	7,45	8,01	7,37	9,09	10,86	10,74
BSMP-04	7,31	16,21	11,23	8,05	8,94	8,71
BSMP-05	9,12	20,24	14,71	8,69	9,28	9,34
BSMP-06	9,61	20,22	14,29	10,55	11,45	11,13
PSCAS-01	16,34	30,93	23,18	11,57	11,80	11,69

Amostras	HCO ₃ ⁻ (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	nd.	20,90	nd.	nd.	nd.	nd.
BCAS-02	nd.	23,10	nd.	nd.	nd.	nd.
BCAS-03	8,72	9,73	5,89	2,54	nd.	2,62
BCAS-04	16,83	19,60	14,29	2,47	1,24	1,67
BCAS-05	nd.	2,18	nd.	2,33	1,78	2,62
BSMP-01	4,70	1,10	4,58	0,00	1,27	1,15
BSMP-02	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-03	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-04	nd.	25,85	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-05	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.
BSMP-06	32,88	23,65	30,76	nd.	nd.	1,31
PSCAS-01	108,03	89,10	117,15	106,75	95,32	104,72

Amostras	Cl ⁻ (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	22,54	26,81	24,55	21,38	19,24	21,56
BCAS-02	27,39	35,93	26,15	23,78	16,98	24,34
BCAS-03	7,22	6,95	5,81	6,24	6,34	5,79
BCAS-04	10,59	12,74	11,65	18,29	20,16	21,86
BCAS-05	20,81	21,74	18,26	5,44	3,87	4,64
BSMP-01	13,79	12,55	25,48	12,59	16,95	10,57
BSMP-02	40,50	37,90	26,18	30,34	28,89	27,97
BSMP-03	21,14	21,65	14,64	16,81	17,16	15,44
BSMP-04	12,76	17,74	8,83	10,31	9,13	8,93
BSMP-05	19,66	35,09	14,55	15,44	13,75	11,28
BSMP-06	14,85	11,54	8,22	8,77	9,04	10,82
PSCAS-01	6,15	6,32	3,40	3,38	3,65	3,33

Amostras	NO ₃ ⁻ (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	53,65	52,35	53,20	25,40	17,87	22,64
BCAS-02	49,23	42,35	45,83	45,38	36,63	38,72
BCAS-03	5,97	6,17	4,63	4,81	5,20	4,74
BCAS-04	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	1,50
BCAS-05	16,41	14,72	23,47	13,62	18,73	24,65
BSMP-01	29,97	22,82	59,18	30,20	38,54	23,73
BSMP-02	25,14	23,50	19,08	19,86	19,86	19,92
BSMP-03	45,14	46,76	42,51	37,26	35,48	34,86
BSMP-04	25,25	23,36	18,55	19,68	19,61	19,27
BSMP-05	52,07	51,31	40,54	43,17	25,11	20,03
BSMP-06	13,46	11,43	9,75	10,67	10,83	10,33
PSCAS-01	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.

Amostras	SO ₄ ⁻² (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	nd.	nd.	nd.	0,56	2,56	0,37
BCAS-02	nd.	nd.	1,16	2,47	2,63	2,08
BCAS-03	4,78	4,51	2,85	3,21	3,76	3,23
BCAS-04	5,77	5,27	5,31	2,65	2,35	3,27
BCAS-05	2,69	4,90	2,07	2,69	2,75	2,30
BSMP-01	nd.	2,29	0,57	0,64	2,48	0,79
BSMP-02	nd.	nd.	0,67	0,73	nd.	0,76
BSMP-03	nd.	nd.	0,31	nd.	nd.	0,43
BSMP-04	nd.	nd.	0,74	0,92	nd.	nd.
BSMP-05	nd.	nd.	0,46	0,49	0,69	0,87
BSMP-06	nd.	2,86	1,83	1,78	2,13	2,02
PSCAS-01	6,82	6,07	3,86	4,43	5,24	3,87

Amostras	Na ⁺ (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	10,31	13,73	18,27	11,72	11,45	11,49
BCAS-02	9,42	11,93	17,89	13,15	12,62	18,55
BCAS-03	1,00	1,53	2,15	4,18	4,37	4,21
BCAS-04	4,78	7,54	5,92	10,20	11,45	10,64
BCAS-05	1,36	3,86	7,98	4,84	5,85	7,34
BSMP-01	7,63	6,13	16,81	9,24	12,21	7,98
BSMP-02	14,86	15,46	13,23	14,04	14,28	13,94
BSMP-03	10,48	12,71	9,93	13,35	11,44	10,73
BSMP-04	7,08	6,89	6,85	9,67	7,44	7,22
BSMP-05	7,06	9,57	10,12	10,89	10,71	10,55
BSMP-06	7,17	7,34	7,34	7,98	11,44	7,57
PSCAS-01	1,47	1,56	1,35	2,55	1,97	1,93

Amostras	K ⁺ (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	1,08	1,63	2,05	1,97	2,03	2,22
BCAS-02	0,46	1,28	1,21	2,44	1,59	1,22
BCAS-03	0,17	nd.	0,50	0,60	0,60	0,62
BCAS-04	nd.	nd.	0,34	1,49	2,23	1,87
BCAS-05	0,19	1,90	0,54	1,16	1,11	0,72
BSMP-01	1,35	0,77	2,47	1,40	1,77	1,32
BSMP-02	1,86	1,22	1,46	1,43	1,56	1,61
BSMP-03	2,58	1,41	2,41	3,28	2,74	2,62
BSMP-04	1,08	0,77	1,03	1,04	1,13	1,17
BSMP-05	1,11	1,50	1,92	2,04	2,06	2,09
BSMP-06	1,16	0,72	0,96	1,08	2,74	1,04
PSCAS-01	0,35	1,29	1,77	1,94	2,02	2,01

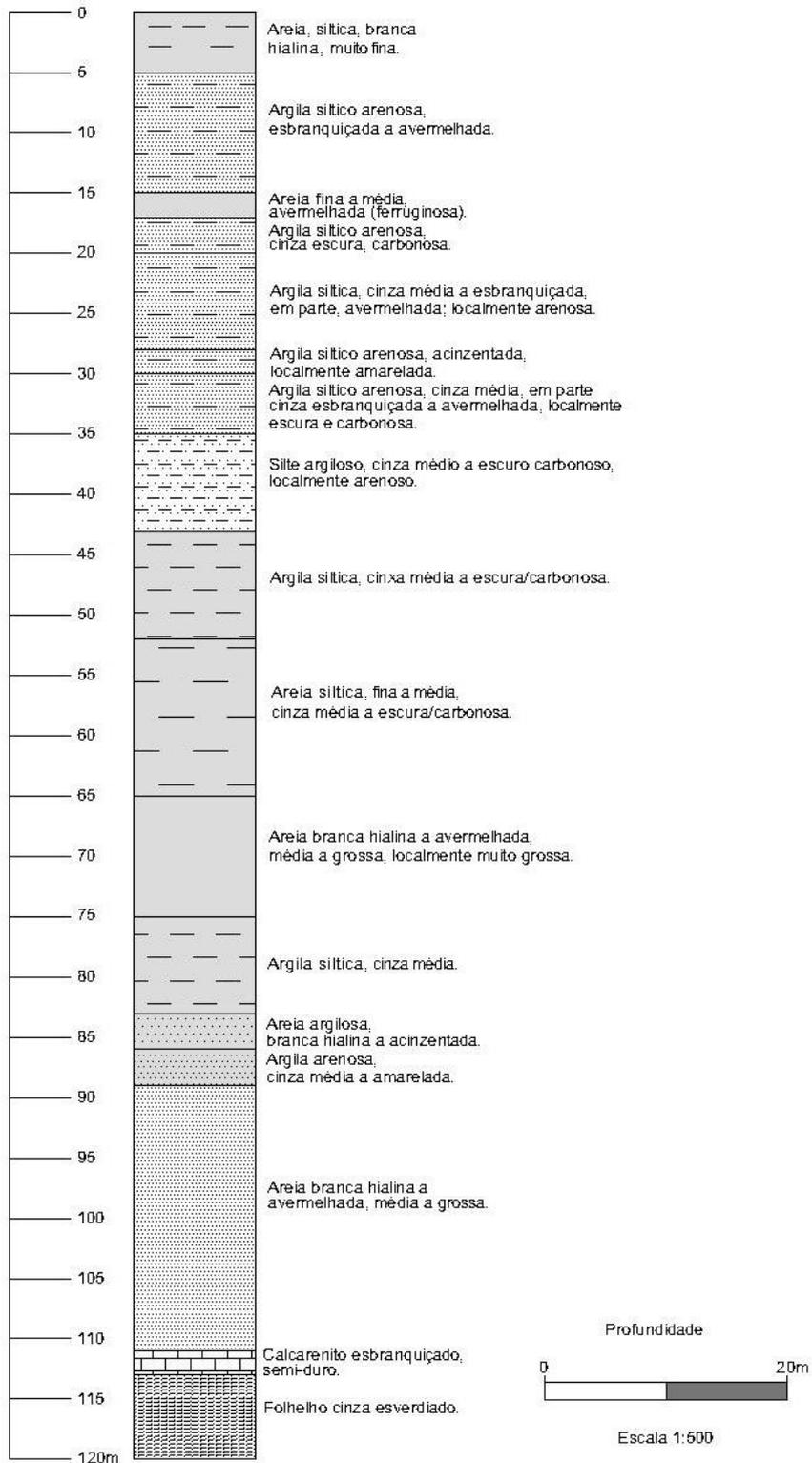
Amostras	Mg ⁺² (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	0,68	1,07	0,90	0,73	0,36	1,25
BCAS-02	0,56	0,67	0,47	0,83	0,37	0,37
BCAS-03	0,12	nd.	0,40	0,32	0,29	0,41
BCAS-04	0,43	0,61	0,44	0,49	0,40	0,52
BCAS-05	nd.	0,42	0,34	0,38	0,37	0,46
BSMP-01	nd.	0,62	1,26	0,68	1,09	0,69
BSMP-02	nd.	0,59	0,38	0,40	0,42	0,50
BSMP-03	nd.	1,19	0,74	0,94	0,84	0,92
BSMP-04	0,44	0,43	0,47	0,39	0,53	0,59
BSMP-05	0,44	1,12	0,81	0,93	0,81	1,04
BSMP-06	0,70	0,89	0,72	0,81	0,84	0,91
PSCAS-01	2,03	2,81	2,55	2,61	2,49	2,72

Amostras	Ca ⁺² (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	1,128	2,238	2,120	3,091	2,828	3,108
BCAS-02	0,701	1,666	0,703	1,070	1,279	1,150
BCAS-03	1,283	2,160	1,395	1,446	1,200	1,352
BCAS-04	4,210	4,490	3,760	0,980	1,050	1,430
BCAS-05	nd.	1,160	0,870	5,144	5,030	4,790
BSMP-01	nd.	1,592	2,903	1,660	1,703	1,305
BSMP-02	nd.	1,650	1,330	1,750	1,660	1,730
BSMP-03	nd.	2,007	1,950	2,874	1,738	1,776
BSMP-04	0,805	0,850	0,885	1,171	0,988	1,080
BSMP-05	0,719	1,575	1,394	1,960	1,453	1,717
BSMP-06	4,186	4,535	4,248	4,366	1,738	5,077
PSCAS-01	26,130	27,380	24,170	21,430	21,300	22,270

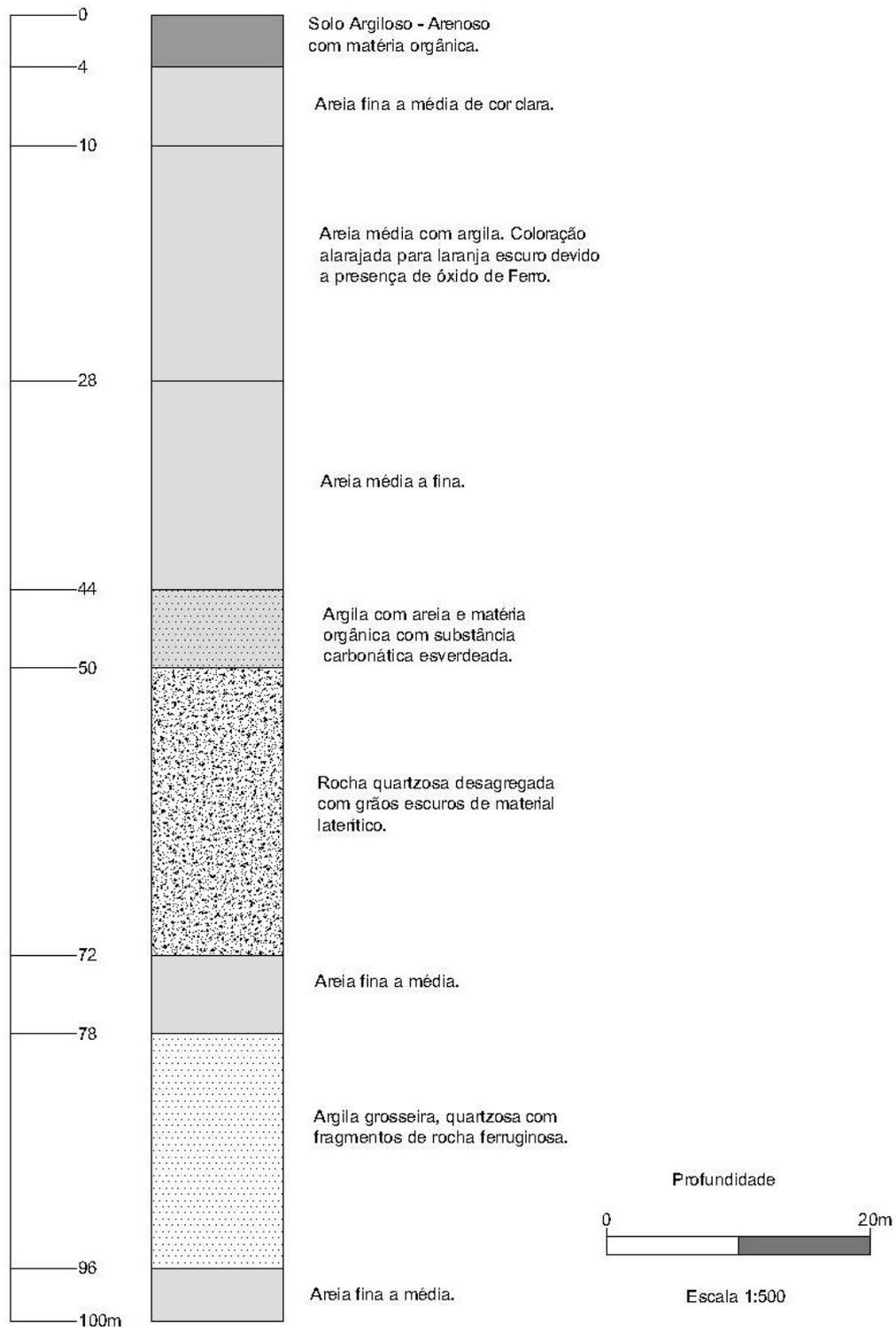
Amostras	Sr ⁺² (mg/L)					
	Jan-Fev	Mar-Abr	Nov-Dez	Mai-Jun	Jul-Ago	Set-Out
BCAS-01	0,047	0,045	0,041	0,053	0,050	0,057
BCAS-02	0,036	0,033	0,026	0,059	0,029	0,025
BCAS-03	0,062	0,027	0,043	0,032	0,026	0,031
BCAS-04	0,047	0,031	0,033	0,028	0,029	0,053
BCAS-05	0,006	0,087	0,066	0,050	0,058	0,072
BSMP-01	0,034	0,027	0,068	0,033	0,050	0,033
BSMP-02	0,016	0,015	0,040	0,018	0,016	0,014
BSMP-03	0,045	0,041	0,018	0,049	0,037	0,027
BSMP-04	0,028	0,033	0,030	0,030	0,027	0,027
BSMP-05	0,044	0,026	0,046	0,043	0,039	0,039
BSMP-06	0,070	0,070	0,068	0,072	0,061	0,069
PSCAS-01	0,250	0,213	0,219	0,262	0,255	0,268

ANEXO B – PERFIL GEOLÓGICO DE ALGUNS POÇOS PROFUNDOS

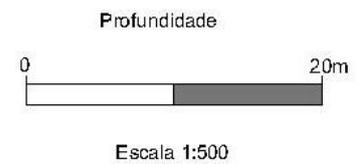
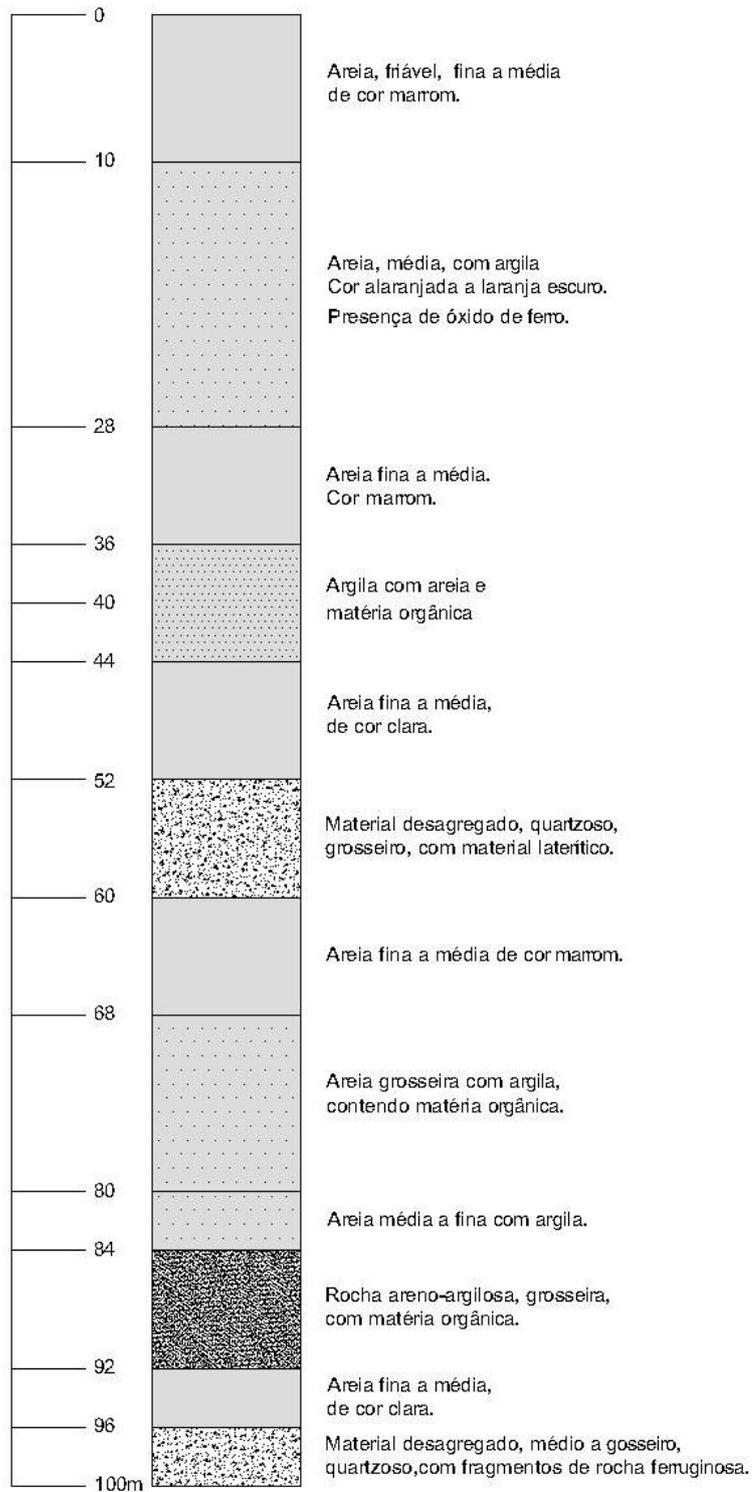
Poço BCAS-04



Poço BSTM-04



Poço BSTM-06



ANEXO C – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS POÇOS AMOSTRADOS

POÇOS	TIPO	LATITUDE	LONGITUDE
BCAS-01	RASO	1°18'56.33"S	47°53'49.74"O
BCAS-02	RASO	1°19'8.82"S	47°53'48.33"O
BCAS-03	PROFUNDO	1°17'41.83"S	47°55'50.91"O
BCAS-04	PROFUNDO	1°18'19.52"S	47°54'29.67"O
BCAS-05	RASO	1°18'40.05"S	47°54'2.55"O
BSMP-01	RASO	1°20'45.74"S	47°34'45.95"O
BSMP-02	RASO	1°20'36.62"S	47°34'58.00"O
BSMP-03	RASO	1°21'8.72"S	47°34'42.13"O
BSMP-04	PROFUNDO	1°21'6.82"S	47°34'51.67"O
BSMP-05	PROFUNDO	1°20'47.77"S	47°34'36.55"O
BSMP-06	PROFUNDO	1°21'28.34"S	47°34'10.50"O
PSCAS-01	PROFUNDO	1°17'57.71"S	47°59'20.15"O