

**MANOEL IMBIRIBA JUNIOR**

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO AQUÍFERO PIRABAS NA CIDADE DE  
SALINÓPOLIS, NE DO PARÁ.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Hidrogeologia

Orientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro

Coorientadora: Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão

**BELÉM - PARÁ**

**2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

I32e Imbiriba Junior, Manoel  
Estudo hidrogeológico do Aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis-NE do Pará/Manoel  
Imbiriba Junior. — 2019.  
165 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro  
Coorientação: Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Instituto de  
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Hidrogeologia. 2. Aquífero Pirabas. 3. Salinópolis. I. Título.

CDD 551.4903

---

**MANOEL IMBIRIBA JUNIOR**

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO AQUÍFERO PIRABAS NA CIDADE DE  
SALINÓPOLIS, NE DO PARÁ.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos  
Linha de pesquisa: Hidrogeologia

Data de Aprovação:

Banca Examinadora:

---

Prof. Roberto Vizeu Lima Pinheiro – Orientador  
PhD em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos - Membro  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Dr<sup>a</sup>. Maria Antonieta Alcântara Mourão - Avaliador 3 (externo)  
Doutora em Geologia  
Serviço Geológico do Brasil-CPRM

## AGRADECIMENTOS

Aos Orixás pela saúde e perseverança;

À toda minha família, e principalmente a minha companheira Tereza Cristina por tudo.

Ao Professor Doutor e Orientador Roberto Vizeu Lima Pinheiro por toda essa jornada de ensinamentos e amizade.

Ao Serviço Geológico do Brasil-CPRM – que através do Projeto RIMAS-BE viabilizou toda a execução do trabalho e em especial a Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão, na verdade minha Coorientadora, desde a chegada na empresa, sempre disponível para ajudar no que for necessário. Extensivo a todos os colegas da RIMAS por todo o Brasil.

À UFPA por todo o meu aprendizado acadêmico, aos professores e funcionários do PPRH-IG,

Aos colegas do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, geólogos Homero Melo, Fhábio Pinheiro e Rafael Neto, geofísico Bruce Chiba, cartógrafo Alceu Mendel, pela contribuição, seja nos levantamentos de campo, seja nas discussões e opiniões técnicas e manuseio dos programas e gráficos elaborados para o trabalho.

Aos Técnicos em Geociências da CPRM Paulo Melo, Rosilene Sarmento, Linaldo Mesquita e Paulo Sérgio dos Santos nos levantamentos e coletas de água para análise em Salinópolis. A Técnica em Hidrologia Luciana Brabo pela sistematização dos dados de chuva da RHN-CPRM-ANA.

A geóloga Márcia Gaspar (ANA), pelo intercâmbio de informações pertinentes aos estudos das águas subterrâneas na RMB.

Aos profissionais dos laboratórios do LAMIN CPRM do Rio de Janeiro e Caeté,

Ao LEBAC-UNESP – Dr<sup>a</sup>. Márcia Stradioto, pelas análises realizadas.

Ao colega geólogo Roberto Kirchheim, pelo apoio nas discussões isotópicas.

Ao geofísico Boris Freimann, por toda contribuição em campo e escritório.

Aos colegas mestrandos das turmas PPRH2 e PPRH3 pela convivência e troca de experiência.

Ao publicitário Anderson Costa da Rocha pela manipulação e tratamento das imagens de arquivo fotográfico.

Ao colega Pedro Rolim (SIPAM) pela confecção das figuras da Climatologia.

Ao Dr. Antonio Carlos Tancredi pelo conhecimento e explicações sobre a natureza hidrogeoquímica das águas.

Ao Engenheiro Centeno Junior, profissional no ramo de perfuração de poços, pela experiência e contribuições repassadas quanto aos aspectos hidrogeológicos;

Aos servidores da COSANPA de Salinópolis, na pessoa do Sr. José Carlos, sem esses literalmente não tinha água pra nada.

Ao proprietário do Hotel Salinópolis, Sr. Eduardo (Dudu), pela acolhida sempre fraterna, a quando da hospedagem em Salinópolis.

Ao aluno de graduação em Geologia da UFPA Matheus Moura, pelos trabalhos técnicos utilizando os anaglifos digitais;

A estagiária do Projeto RIMAS, graduanda em Geologia da UFPA Ismayla Maciel Carneiro pela presteza na ajuda da formatação da dissertação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram por mais esta jornada de vida.

O critério da verdade é a prática!

## RESUMO

O Município de Salinópolis é considerado um dos mais importantes polos turísticos do estado do Pará e do norte do Brasil, devido sua paisagem bucólica e belas praias. No saneamento básico, há problemas com o abastecimento de água devido à crescente demanda populacional. O uso da água subterrânea através de poços profundos para abastecimento público, é explorada do sistema aquífero carbonático Pirabas de origem marinha e idade miocênica. A caracterização climatológica dos índices de chuva foram confrontadas com as medidas de nível d'água dos poços da RIMAS. Nos levantamentos de campo foram cadastrados 17 poços profundos na zona urbana central. Desde 2010 tem-se monitorado a qualidade/quantidade de 03 poços da RIMAS. As perfilagens ópticas detectaram os furos nos revestimentos e obstruções dos poços. Foram definidas as áreas de recarga e descargas e de fluxo subterrâneo através do potencial hidráulico. A tomografia elétrica do terreno *versus* perfis geofísicos de poços, através da resistividade permitiu diferenciar as camadas dos aquíferos, porém não foi possível definir as estruturas controladoras da entrada das águas nos mesmos. A classificação da água foi feita com os diagramas de *Piper*, *Stiff* e *Schoeller*, mais o STD e o balanço iônico, nos períodos secos dos anos de 2016, 2107 (chuvoso) e 2018, resultou uma água cálcica bicarbonatada para os 03 poços da RIMAS, e sódica bicarbonatada para os 14 poços em bombeamento da COSANPA. A água do poço Guaxini Pentágono no período seco de 2018 foi classificada como cálcica mista. O estudo hidrogeológico dividiu o sistema aquífero Pirabas em Pirabas Inferior: caracterizado pelas águas dos 14 poços da COSANPA e Pirabas Superior: relacionado aos 03 poços da RIMAS. As análises dos isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{D}$ ) dos poços e da chuva de Salinópolis mostraram que os dados da GNIP-Belém (*Global Network of Isotopes Precipitation*) e a reta meteórica global se aproximaram, mostrando relação direta entre a precipitação que ocorre com a média global, derivando a ocorrência de chuvas de mesma origem. Os valores acima da reta meteórica local definiram um enriquecimento desses isótopos e confirmaram a origem meteórica nas águas do aquífero Pirabas. É necessário investigar a ocorrência de condutos cársticos que possibilitam a entrada de água de origem marinha no sistema aquífero Pirabas. Com os resultados obtidos, espera-se contribuir com a melhoria do quadro de saneamento em relação ao abastecimento pelas águas subterrâneas na cidade de Salinópolis.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Aquífero Pirabas. Salinópolis (PA).

## ABSTRACT

The Salinópolis region is considered one of the most important tourist centers of the state of Pará and of the Northern Region of Brazil, due to its bucolic atmosphere and beautiful beaches. Regarding basic sanitation, it shows signs of water supply problems due to the growing population demand, especially along the summer holidays and extended weekends. The use of groundwater through deep wells for public supply, managed by COSANPA, is exploited from the Pirabas aquifer system, which has geologic marine origins with miocene age. The climatic characterization of the rainfall indices was compared with the NA measurements of the RIMAS wells. In the field surveys, were registered 17 water samples from deep wells in the central urban area. Since 2010 we have monitored the quality and quantity of 03 deep wells. Optical profiling detected holes in the coatings and well obstructions. The areas of recharge and discharges and the groundwater flow was defined by hydraulic potential. The electrical tomography of the terrain versus the geophysical profiles of wells allowed, through the difference of resistivity, to differentiate the layers of the aquifers, but was not possible to recognize any tectonic structures related to water systems. The water classification was made using the Piper, Stiff and Schoeller diagrams, plus the STD and the Ionic Balance, during the dry seasons of 2016, 2017 (rainy season) and 2018. The waters of RIMAS wells were classified as bicarbonated calcic, and bicarbonate sodic for the 14 pumping wells of COSANPA. The waters of Guaxini Pentagono well in the dry season of 2018 was classified as calcic mixed. By hydrogeological studies the aquifer Pirabas was divided in Lower Pirabas (characterized by the well water 14 wells of COSANPA) and Upper Pirabas (related to the wells of RIMAS). The stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{D}$ ) analyzes of the wells and the rainfall of Salinópolis showed that the GNIP (Global Network of Isotopes Precipitation) data from Belém and the Global Meteorological Line approaches, showing a direct relationship between the precipitation that occurs with the global average deriving the occurrence of rains of the same origin. It is necessary to investigate the occurrence of karst conduits that allow the entry of water of marine origin in the Pirabas aquifer system. With the results obtained in this research, it is expected to contribute to the improvement of the sanitation framework in relation to groundwater supply in the city of Salinópolis.

Key words: Hydrogeology. Aquifer Pirabas. Salinópolis(PA).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

#### CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 - Mapa de localização da área de trabalho e distribuição dos 17 poços profundos estudados no município de Salinópolis. NE do Pará. ....	26
Figura 1. 2- Registro fotográfico de pontos de amostragens de poços das 04 campanhas de campo na área em estudo. Anos de 2016 (seco), 2017 (chuvoso e seco) e 2018 (seco). Salinópolis.....	29
Figura 1. 3 - Representação esquemática do método elétrico. ....	30
Figura 1. 4 - Arranjo dos eletrodos de correntes para execução de Tomografia Elétrica. ....	31
Figura 1. 5 - 3ª campanha de coleta de água através do Método <i>LOW-FLOW</i> (baixa vazão) no poço Açai2 - RIMAS. Período seco. Dezembro de 2017. ....	34
Figura 1. 6 - Amostragem da 2ª campanha de coleta de água realizada no poço Dom Bosco (Dinossauro) em bombeamento da COSANPA, e análise <i>in loco</i> com aparelho <i>HACH</i> . Período Chuvoso. Junho de 2017.....	34
Figura 1. 7 - Representação do Diagrama de <i>Stiff</i> . ....	39
Figura 1. 8 - Representação do diagrama semi-logarítmico de <i>Schoeller</i> .....	40
Figura 1. 9 - Instalação da GNIP-BE, com o amostrador de água de chuva. 13/12/2018. ....	43

#### CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 - Variabilidade da Precipitação - Média total anual.....	47
Figura 2. 2 - Variabilidade da precipitação. Total médio para 1 mês, 2, 3, 4, 5 e 6 meses consecutivos. ....	48
Figura 2. 3 - Variabilidade da frequência de dias com precipitação - Total médio mensal. ....	48
Figura 2. 4 - Variabilidade interanual da precipitação - Total médio anual.....	49
Figura 2. 5 - – Variabilidade da temperatura mensal média, máxima e mínima absoluta. ....	49
Figura 2. 6 - Variabilidade do índice excessos e deficiências hídrica - Média total mensal....	50
Figura 2. 7 - Variação entre a chuva <i>versus</i> NE do poço Guaxini Pentágono. RIMAS-CPRM. ....	51
Figura 2. 8 - Variação entre a chuva <i>versus</i> NE do poço Barreiro-FEMAC1. RIMAS-CPRM. ....	51

Figura 2. 9 - Variação entre a chuva <i>versus</i> NE estático do poço Açai2. RIMAS-CPRM. ....	52
Figura 2. 10 - Localização das unidades geotectônicas simplificadas da região nordeste do estado do Pará e parte do norte do Brasil (COSTA <i>et al.</i> 2002). .....	54
Figura 2. 11 - Estruturas paleógenas-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 (COSTA <i>et al.</i> 1996). .....	55
Figura 2. 12 - Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior - Neogeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C - Sedimentos Pós-Barreiras. ....	59
Figura 2. 13 - Perfil geológico representativo das três camadas que constituem as falésias da ilha de Mosqueiro e adjacências. A - camada arenosa; B - camada areno argilosa a areno conglomerática; C - camada argilo arenosa (IGREJA <i>et al.</i> 1990). Ao lado fotografia correspondente ao perfil do Ariramba, ilha do Mosqueiro. ....	59
Figura 2. 14 - Distribuição das litologias e depósitos inconsolidados na cidade de Salinópolis. ....	60
Figura 2. 15 - Mapa da distribuição da rede de drenagem no município de Salinópolis e adjacências. ....	63

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3. 1 - Mapa de localização das seis seções de Tomografia Elétrica (TE) realizadas na área de estudo. Locação dos poços com perfilagem geofísica. ....	65
Figura 3. 2 - Perfis de resistividade originais (à esquerda) e normalizados à direita), Poços A, C e E.....	66
Figura 3. 3 - Seções de Tomografias Elétricas (TE05 e TE06) no sistema Açai-Centro –Zona urbana de Salinópolis.....	69
Figura 3. 4 - Seções de Tomografias Elétricas do sistema Jardim Atalaia (TE03 e TE04). Zona urbana de Salinópolis.....	70
Figura 3. 5 - Seções de Tomografia Elétrica (TE01 e TE02) no sistema Barreiro - Salinópolis.....	71
Figura 3. 6 - Perfil construtivo, geológico e gráfico da evolução do nível estático (NE) de água do poço Açai2. (RIMAS-WEB). Ano de 2015 a 2018.....	73

Figura 3. 7 - Distribuição dos perfis geofísicos e litológicos de poços da COSANPA na direção NW-SE, em Salinópolis. A camada argilosa (30 m) está presente em todos os perfis. A cor vermelha representa o embasamento cristalino. (FREIMANN, 2012) .....	74
Figura 3. 8 - Bloco gerado no programa Oasis Montaj do Sistema Açai (Centro), com a espacialização das curvas de níveis, TE05 e TE06 e os poços da COSANPA nas proximidades. ....	76
Figura 3. 9 - Bloco do Sistema Jardim Atalaia (Bloco Atlântico), com a espacialização das curvas de níveis, TE e os poços da COSANPA nas proximidades. ....	77
Figura 3. 10 - Bloco do Sistema Barreiro, com a espacialização das curvas de níveis, TE e os poços da COSANPA nas proximidades.....	77
Figura 3. 11 - Representação do corte horizontal na cota de -20m. Horizonte que marca a passagem da Formação Barreiras para a Formação Pirabas (topo do aquífero Pirabas Superior). ....	78
Figura 3. 12 - Corte horizontal na cota -40m. Horizonte que marca a passagem a base da camada argilosa selante com o topo do Aquífero Pirabas Inferior. ....	79
Figura 3. 13 - Corte horizontal na cota -130m. Horizonte que marca a passagem da base do Aquífero Pirabas Inferior com o substrato do embasamento cristalino. ....	79
Figura 3. 14 - Diagrama trilinear de <i>Piper</i> de amostras da água subterrânea. Poços RIMAS. 1ª, 3ª e 4ª campanha de amostragem Período seco: dezembro de 2016, 2017 e 2018. ....	91
Figura 3. 15 - Diagrama de <i>Stiff</i> . Período Seco. 1ª, 3ª e 4ª campanhas de amostragem. 03 poços da RIMAS-BE. Salinópolis. Dezembro de 2016, 2017 e 2018. Notar a forma alongada para o poço Guaxini Pentágono; e losangular simétrica para os poços Barreiro1 e Açai2.....	93
Figura 3. 16 - Diagrama de Schoeller. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Dezembro de 2016; 2017 e 2018. Salinópolis. O $Ca^{2+}$ e o $CO_3^{+} + HCO_3^{-}$ estão enriquecidos e o $NO_3^{-}$ quase sem presença na amostragem. Na 4ª campanha de amostragem houve acréscimo do valor do $SO_4^{2-}$ no poço Guaxini Pentágono que superou todas as outras amostragens.....	95
Figura 3. 17 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016, 2017 e 2018). Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 – 500) indicando águas doces. ....	96

Figura 3. 18 - Diagrama trilinear de <i>Piper</i> de amostras das águas subterrâneas: Classificação Hidroquímica dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Salinópolis. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem (abril e junho de 2017). Águas classificadas como Sódica-Bicarbonatadas.....	100
Figura 3. 19 - Diagrama de <i>Stiff</i> de amostras da água subterrânea. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem. Abril e junho de 2017. No gráfico de pizza verifica-se os percentuais dos íons no poço Açai3. Representação geométrica de um bumerangue. ....	101
Figura 3. 20 - Diagrama de <i>Schoeller</i> de amostras das águas subterrâneas. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem. Classificação Hidroquímica dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Abril e Junho de 2017.....	102
Figura 3. 21 - Sólidos totais dissolvidos (STD). Período chuvoso. 2ª amostragem para os 13 poços em bombeamento da COSANPA. Abril e junho de 2017. Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 – 500): Água Doce.....	103
Figura 3. 22 - Diagrama trilinear de <i>Piper</i> de amostras da água subterrânea. Classificação Hidroquímica dos 14 poços da COSANPA (Salinópolis), da 3ª campanha de amostragem. Período seco (dezembro de 2017). Predomínio de águas Sódica-Bicarbonatadas. ....	106
Figura 3. 23 - Diagrama de <i>Stiff</i> de amostras da água subterrânea: Classificação Hidroquímica da 3ª campanha de amostragem. 14 poços da COSANPA. Período seco (dezembro de 2017). Representação geométrica de um bumerangue. ....	107
Figura 3. 24 - Diagrama de <i>Schoeller</i> de amostras das águas subterrâneas: Período seco. 3ª campanha de amostragem Classificação Hidroquímica dos 14 poços em bombeamento da COSANPA (Salinópolis). Dezembro de 2017.....	108
Figura 3. 25 - Classificação dos sólidos totais dissolvidos (STD): 3ª amostragem para os 14 poços em bombeamento da COSANPA no período seco (Dezembro de 2017). Água doce.....	109
Figura 3. 26 - Relação do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para os poços dos sistemas 7 de setembro (Femac); Barreiro e Guaxini quanto a RMG nas duas etapas de amostragem no ano de 2017.....	116
Figura 3. 27 - Comparação dos dados de chuva entre a GNIP Belém e a RMG. ....	117
Figura 3. 28 - Parâmetros estatísticos no formato de boxplot do $\delta^{18}\text{O}$ (‰).....	118
Figura 3. 29 - Distribuição dos parâmetros estatísticos no formato de boxplot do $\delta^2\text{H}$ (‰). ....	119

Figura 3. 30 - Representação dos dados da GNIP e sua dispersão em relação aos dados da área (dados do Mestrado). .....	120
Figura 3. 31 - Correlação das amostragens 1 (chuvoso) e 2 (seco) com a local Belém. ....	121
Figura 3. 32 - Correlação de todas as amostras de poços separadas por local de bombeamento relacionada a reta local Belém. ....	122
Figura 3. 33 - Amostragem 1 e 2 em relação a profundidade dos poços. ....	123

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4. 1 - Tipos de aquíferos em função da porosidade.. .....	124
Figura 4. 2 - Variáveis do teste de bombeamento. ....	126
Figura 4. 3 - Perfuratriz rotativa tombada em função da queda da composição do poço provavelmente por ocorrência de conduto cárstico (caverna). ....	129
Figura 4. 4 - Rochas calcárias (Biocalcarenito) aflorantes na Praia do Atalaia (Salinópolis). .....	130
Figura 4. 5 - Desenho esquemático correspondente ao Sistema aquífero Pirabas Inferios (B) e Superior (A). Notar a camada argilosa selante, e a Área de recarga (1) representando o Aquífero Pirabas aflorante. ....	133
Figura 4. 6 - Correlação dos perfis (sudeste-noroeste) lito-estratigráficos dos poços profundos definindo topo-base do sistema aquífero Pirabas Superior; a camada de argila e o sistema aquífero Pirabas Inferior. Em vermelho o embasamento cristalino. ....	136
Figura 4. 7 - Correlação dos perfis geofísicos dos poços Farol, Escritório, Amapá, Dom Bosco e Barreiro Femac 3. ....	137
Figura 4. 8 - Perfil estratigráfico correlacionando as camadas lateralmente dos poços acima descritos. Notar a espessura maior das camadas de calcário na parte inferior do perfil (sistema aquífero Pirabas Inferior). ....	138
Figura 4. 9 - Mapa de potencial hidráulico (PH): direção de linha de fluxo do aquífero Inferior do Pirabas. Diferença de cota de 02 metros. Período chuvoso. Abril e junho de 2017. Salinópolis – PA. ....	143
Figura 4. 10 - Mapa de potencial hidráulico (PH): direção de linha de fluxo do aquífero Inferior do Pirabas. Diferença de cota de 02 metros. Período seco. Salinópolis – PA. ....	144
Figura 4. 11 - Bloco diagrama de Potencial Hidráulico em 3D do Aquífero Inferior do Pirabas. Período Chuvoso. Salinópolis. ....	145

Figura 4. 12 - Bloco diagrama de Potencial Hidráulico e de Fluxo Subterrâneo em 3D do Aquífero Pirabas Inferior Pirabas seco. Salinópolis .....	146
Figura 4. 13 - Mapas em 3D e em planta da altimetria. Áreas de recarga (em azul) e descarga (em verde). .....	148

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1. 1 - Localização dos poços com as coordenadas decimais e RN's. (altitude ortométrica).....	27
Tabela 1. 2 - Correspondência entre o tipo de perfil geofísico com as propriedades petrofísicas. ....	32
Tabela 1. 3 - Representação do Diagrama de <i>Pipper</i> .....	38

### CAPÍTULO 2

Tabela 2. 1 - Unidades geomorfológicas identificadas r na Folha Salinópolis. ....	62
---	----

### CAPÍTULO 3

Tabela 3. 1 - Quantificação de 91 poços amostrados do SIAGAS: Profundidade (m); Quantidade (%); Unidade geológica; Uso da água; Vazão média (m <sup>3</sup> /h).....	64
Tabela 3. 2 - Endereços onde foram realizados os levantamentos geofísicos através das seções de Tomografia Elétrica (TE). Salinópolis. ....	65
Tabela 3. 3 - Blocos gerados com os respectivos poços e Tomografias Elétricas .....	75
Tabela 3. 4 - Resultado das análises de pH, CE a 20°C (µS/cm), T (°C), alcalinidade total (mgCaCO <sub>3</sub> -/L) e espécies químicas (mg/L) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA em Salinópolis. Período Chuvoso (abril e junho de 2017). ....	81
Tabela 3. 5 - Resultado das análises de pH, CE a 20°C (µS/cm), T (°C), alcalinidade total (mgCaCO <sub>3</sub> -/L) e espécies químicas (mg/L) dos 03 poços da RIMAS e 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Seco: dezembro de 2017. Total de 17 poços. At: Alcalinidade total. ....	82
Tabela 3. 6 - Determinação dos ânions (mg/L) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período chuvoso. Abril e junho de 2017. ....	87
Tabela 3. 7 - Determinação dos ânions (mg/L) dos 17 poços: 03 poços da RIMAS-BE e 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Seco. Dezembro de 2017.....	87
Tabela 3. 8 - Determinação dos cátions (20) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Chuvoso. 2ª amostragem. Abril e junho de 2017.....	88

Tabela 3. 9 - Determinação dos cátions (20) dos 03 poços da RIMAS-BE e dos 14 poços em bombeamento da COSANPA (Salinópolis). Período Seco. 3ª amostragem. Dezembro de 2017.....	89
Tabela 3. 10 - Resultado das análises químicas e classificação das águas subterrâneas. 03 poços da RIMAS. 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Período seco: dezembro de 2016; 2017 e 2018. Salinópolis. Classificação iônica: águas Cálcica-Bicarbonatadas. Excessão: poço Guaxini Pentágono apresentou classificação Cálcica Mista em 2018. ....	91
Tabela 3. 11 - Análise química das 10 amostras de águas subterrâneas. Poços RIMAS. 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Período seco: dezembro de 2016; 2017 e 2018.....	92
Tabela 3. 12 - Análise química das 10 amostras de águas subterrâneas. Período seco: 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018. ....	94
Tabela 3. 13 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016, 2017 e 2018). Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 - 500) indicando águas doces. ....	96
Tabela 3. 14 - Resultado das análises químicas e Balanço Iônico (B.I.). Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. 03 poços da RIMAS-BE (Dezembro de 2016, 2017 e 2018). 10 amostras: 07 amostras atenderam ao B.I.1. 03 amostras não atenderam ao B.I.1. Segundo Custódio and Lhamas. ....	98
Tabela 3. 15 - Resultado das análises e classificação química das águas subterrâneas dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Salinópolis. Período chuvoso. 2ª amostragem. Abril e junho de 2017. ....	99
Tabela 3. 16 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período chuvoso. 2ª amostragem. 13 poços da COSANPA em bombeamento (Salinópolis). Abril e junho de 2017. Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 - 500) indicando águas doces. ....	103
Tabela 3. 17 - Balanço Iônico dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Período chuvoso. Abril e junho de 2017. 10 poços atenderam ao B.I.I. 03 poços não atenderam ao B.I.I. ....	104
Tabela 3. 18 - Análise e classificação química das águas subterrâneas dos 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período seco (dezembro de 2017).105	
Tabela 3. 19 - Sólidos totais dissolvidos (STD): 3ª amostragem para os 14 poços da COSANPA. Período seco (Dezembro de 2017). Água doce. ....	109

Tabela 3. 20 - Balanço iônico (BI): 3ª amostragem para os 14 poços da COSANPA em bombeamento no período seco (Dezembro de 2017).....	110
Tabela 3. 21 - Resultado das análises de metais pesados (mg/L) das águas subterrâneas dos 17 poços da COSANPA no período seco (Dezembro de 2017). Lamin-RJ-CPRM. ....	112
Tabela 3. 22 - Distribuição das amostras dos poços e de chuva da 1ª amostragem realizada no período chuvoso nos meses de abril e junho de 2017 na RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ ).....	113
Tabela 3. 23 - Distribuição das amostras dos poços e de chuva da 2ª amostragem realizada no período seco. Dezembro de 2017. RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ ). ....	114

#### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4. 1 - Unidades Aflorantes (Barreiras e Pirabas) e Subjacentes (Pirabas em com suas respectivas litologias e espessuras) conforma Mapa Hidrogeológico do Brasil .....	125
Tabela 4. 2 - Valores de Vazão e Vazão específica das Unidades Hidroestratigráficas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil. ....	126
Tabela 4. 3 - Valores de Condutividade Hidráulica das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil.....	127
Tabela 4. 4 - Valores de Transmissividade das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil. ....	127
Tabela 4. 5 - Valores de Produtividade das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil. ....	128
Tabela 4. 6 - Valores de condutividade hidráulica (cm/s), porosidade total (n) e porosidade efetiva (ne) em diferentes materiais. Adaptado de Gonçalves e Giampá. ....	139
Tabela 4. 7 - Dados aa profundidade da coluna de recalque; de nível estático (NE); nível dinâmico (ND); tempo de recuperação dos 17 poços estudados em Salinópolis. Período chuvoso. Abril e Junho 2017.....	140
Tabela 4. 8 - Dados da profundidade da coluna de recalque; nível estático (NE); nível dinâmico (ND); tempo de recuperação dos 17 poços estudados em Salinópolis. Período seco. Dezembro 2017.....	140
Tabela 4. 9 - Valores de potencial hidráulico (PH) dos 14 poços em bombeamento da COSANPA nos períodos chuvoso e seco de 2017.....	141

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COSANPA – Companhia de Saneamento do Pará

GEHITE – Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial

GNIP – *Global Network of Isotopes Precipitation*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDESP – Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

*LOW FLOW* – método de bombeamento de baixa vazão

meq/L – miliequivalente por litro

NA – Nível d'água

ND – Nível dinâmico

NE – Nível estático

PCD – Plataforma de coleta de dados

PH – Potencial hidráulico

RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas

RMB – Região Metropolitana de Belém

RMG – Reta Meteórica Global

RN – Referência de nível

SAAEB – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém

SBG-CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

SEMAS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará

SEV – Sondagem elétrica vertical

SIAGAS – Sistema de Informações das Águas Subterrâneas

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

STD – Sólidos totais dissolvidos

TE – Tomografia elétrica

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b> .....	22
<b>1.1 Justificativa</b> .....	24
<b>1.2 Objetivos gerais</b> .....	25
1.2.1 Objetivos Específicos .....	25
<b>1.3 Localização da área e dos poços estudados</b> .....	25
<b>1.4 Materiais e métodos</b> .....	27
1.4.1 Pesquisa bibliográfica.....	27
1.4.2 Levantamento de Dados .....	28
1.4.3 Elaboração de mapas e diagramas.....	44
<b>1.5 Referencial teórico</b> .....	44
1.5.1 Rochas Calcárias .....	44
1.5.2 Intemperismo químico.....	45
1.5.3 Ambientes cársticos.....	45
<b>CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	47
<b>2.1 Caracterização climática</b> .....	47
2.1.1 Precipitação Pluviométrica .....	47
2.1.2 Temperatura do Ar .....	49
2.1.3 Excedente e Deficiência Hídrica.....	50
2.1.4 Variabilidade entre Pluviosidade <i>versus</i> Nível Estático nos poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS-BE/CPRM.....	50
<b>2.2 Contexto geológico</b> .....	52
2.2.1 Geologia Regional.....	52
2.2.2 Tectônica .....	53
2.2.3 Geologia Local.....	56
2.2.4 Contexto geomorfológico .....	61
2.2.5 Distribuição da rede de drenagem.....	62
<b>CAPÍTULO 3 LEVANTAMENTO DE DADOS E DISCUSSÕES</b> .....	64

<b>3.1 Uso da água</b> .....	64
<b>3.2 Levantamento geofísico</b> .....	64
3.2.1 Localização dos Dados Geofísicos.....	64
3.2.2 Interpretação Geofísica.....	67
3.2.3 Discussão dos resultados geofísicos sob a perspectiva geológica .....	72
3.2.4 Geração dos blocos geofísicos .....	75
3.2.5 Avaliação dos dados geofísicos .....	80
<b>3.3 Caracterização hidroquímica</b> .....	80
3.3.1 Análise de Tratamento de Dados Hidroquímicos .....	81
3.3.2 Potabilidade .....	83
3.3.3 Classificação das Águas .....	90
<b>3.4 Análises isotópicas: isótopos estáveis de oxigênio (<math>\delta^{18}\text{O}</math>) e deutério (<math>\delta^2\text{H}</math>)</b> .....	113
3.4.1 Resultado da 1ª amostragem isotópica. Período chuvoso. Abril e junho de 2017.....	113
3.4.2 Resultado da 2ª amostragem. Período seco. Dezembro de 2017. ....	114
3.4.3 Análise dos dados da GNIP ( <i>Global Network of Isotopes Precipitation</i> ) de Belém versus Reta Meteorológica Global (RMB). ....	117
3.4.4 Análises e Interpretação dos dados da GNIP no trabalho .....	119
<b>CAPÍTULO 4 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS</b> .....	124
<b>4.1 Sistemas aquíferos</b> .....	124
4.1.1 Domínios e Parâmetros Hidrogeológicos .....	124
4.1.2 Parâmetros Hidrogeológicos.....	125
4.1.3 Aspectos gerais da hidrogeologia da região .....	128
4.1.4 Caracterização hidrogeológica.....	130
<b>4.2 Definição do sistema aquífero Pirabas</b> .....	132
4.2.1 Sistema aquífero Pirabas Inferior.....	134
4.2.2 Sistema aquífero Pirabas Superior .....	134
4.2.2 Movimentação da água subterrânea no sistema aquífero Pirabas.....	139
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES</b> .....	149
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	152

<b>ANEXO A</b> .....	158
<b>ANEXO B</b> .....	159
<b>ANEXO C</b> .....	160
<b>ANEXO D</b> .....	161
<b>ANEXO E</b> .....	162
<b>ANEXO F</b> .....	163
<b>ANEXO H</b> .....	165

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O uso da água subterrânea no planeta é de mais de 1 milhão de m<sup>3</sup>, o que coloca a água como a substância mais extraída do subsolo. Mesmo estando abaixo da sua capacidade o Brasil já está entre os países que mais captam água subterrânea do mundo, aparecendo na 9ª colocação. Em 2010 a Índia estava em primeiro lugar, seguido por China e Estados Unidos (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2019).

A distribuição do uso da água subterrânea no Brasil é de 30% para abastecimento doméstico; 24% para a agropecuária; 18% para o público-urbano; 18% para o uso múltiplo; 10% a indústria e 4% para outros usos como lazer e recreação (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL-CPRM, 2018). O estudo do Instituto Trata Brasil aponta ainda que 52% dos municípios brasileiros são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas. Esse recurso hídrico é inclusive, a única opção de 48% das cidades com população menor que 10.000 habitantes.

No sistema de informações das águas subterrâneas - SIAGAS - do SGB-CPRM (2019), a Região Norte em 07 estados explora água subterrânea de 25.401 poços. O estado do Pará possui 9.199 registros em 144 municípios, mais de 50% utilizam água subterrânea, captada seja pela concessionária estadual COSANPA, Serviços Autônomos, Diretorias ou Secretarias municipais, ou mesmo por empresas privadas que administram condomínios particulares, nos mais diversos aquíferos: Pirabas (Região Metropolitana de Belém e nordeste), Alter do Chão (todo o Baixo-Amazonas), Itapecuru (nordeste e sudeste), Grajaú (Bragança-Viseu), Tucunaré (Marajó), Barreiras, dentre outros, com potencial razoável para abastecimento (REDE INTEGRADA DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2014).

Diante da importância da utilização das águas subterrâneas, e da necessidade do conhecimento mais aprofundado do comportamento desses reservatórios, o presente trabalho dá ênfase aos estudos hidrogeológicos do sistema aquífero Pirabas, pois representa um dos mais importantes reservatórios de água subterrânea da região equatorial norte do Brasil que ocorre associado à unidade homônima Pirabas de idade oligo-miocênica (GÓES *et al.*, 1990; ROSSETTI *et al.*, 2002). Ocorre em grande parte na região nordeste paraense.

Muito embora esta unidade seja bem estudada do ponto de vista paleoambiental e paleontológico, a caracterização quali-quantitativa mais detalhada deste aquífero ainda permanece em aberto.

Os estudos sobre o aquífero Pirabas durante esses últimos anos tem aumentado a produção de trabalhos em áreas importantes do conhecimento geocientífico. Cavalcanti Neto (1986) discorreu sobre a determinação da interface água doce-água salgada da estância hidromineral de Salinópolis. Lopes (1995) fez investigação por eletrorresistividade de ambientes cársticos no município de São João de Pirabas. Araújo (1998) descreveu os aspectos gerais da hidrogeologia das regiões costeiras na cidade de Salinópolis. Matta (2002) discorreu sobre os fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua.

Bandeira (2008) estudou a neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal-PA. Palheta (2008) fez o estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da ilha de Mosqueiro - Pará empregado na prospecção hídrica subterrânea. Pinheiro (2008) trabalhou com o uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará. Freimann (2012) correlacionou os perfis geofísicos de poços na sede do Município de Salinópolis. Freimann (2016) elaborou o estudo hidrogeológico através de perfis geofísicos de poços e sondagens elétricas verticais (sev's) também em Salinópolis-PA. Galarza & Silva (2017) realizaram estudos de caracterização hidrogeoquímica e isotópica utilizando estrôncio para o Pirabas Superior em Castanhal e Santa Maria no Pará.

Segundo o IBGE (2010) o município de Salinópolis teve uma população estimada de 40.424 pessoas em 2018. O último censo de 2010 atingiu a população de 37.421 pessoas e densidade demográfica de 157,40 habitantes/Km<sup>2</sup>. Pela sua vocação privilegiada para o ecoturismo, com belíssimas praias, cordões litorâneos, manguezais, campos de dunas, aves migratórias e abundante quantidade de pescado e mariscos, calor do verão equatorial, e brisa constante, através de incessante vento de direção 10° nordeste, a demanda populacional em épocas de veraneio tem aporte significativo de pessoas buscando momentos de lazer e desfrute desse paraíso.

O aquífero Pirabas tem importância fundamental para manutenção do equilíbrio ecológico acima descrito, e por representar uma das melhores possibilidades de captação de

água a baixo custo, de qualidade e a curto prazo. A implementação sistemática de poços de captação de água desse reservatório, ajudaria bastante para melhorias do quadro nada satisfatório quanto ao planejamento, gestão e operação do saneamento básico. O município carece de investimentos e financiamento para ampliação, modernização e no planejamento de obras para atendimento básico de fornecimento de água para os munícipes e veranistas. A população aumenta substancialmente durante os períodos de veraneio e feriados prolongados, ocorrendo falta de água, devido à utilização acima do padrão regular de atendimento. A disponibilidade de oferta de água para a demanda sempre crescente, mostra-se como um dos principais desafios a serem vencidos na gestão racional desse recurso hídrico.

### **1.1 Justificativa**

A série histórica do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) - Ministério do Desenvolvimento Regional do ano de 2017 para o município de Salinópolis apresentou a população total atendida com abastecimento de água de 35.300 consumidores. A quantidade de ligações ativas de água foi de 8.439 e de economias ativas atingiu 9.493. A quantidade de água micromedida atingiu 1.505 de ligações ativas, e a extensão da rede de água contou com 81 Km. O volume de água produzido foi de 3.229,63 m<sup>3</sup>, e o volume de água micromedido foi apenas de 273,82 m<sup>3</sup>.

Para se implementar política pública que vá ao encontro de ofertar água em abundância, mais com a preocupação de não haver desperdício, tem-se a necessidade de elaboração de projetos bem definidos para potencializar a captação de recursos e otimizar a execução dos projetos executivos.

A necessidade de se avançar no conhecimento desses mananciais em termos de qualidade e quantidade justifica a importância do estudo hidrogeológico do sistema aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis, para gerar informações de sua potencialidade, quais as possíveis origens da água, distribuição espacial, espessura e extensão lateral das camadas, comportamento hidroquímico, potabilidade, presença ou não metais pesados, potabilidade, uso e gestão das águas subterrâneas.

É fato que o consumo está maior que a capacidade de carga disponibilizada pelos serviços ambientais, sendo a água subterrânea impactada pela demanda excessiva e por ser a principal fonte de abastecimento público.

É necessário saber gerir os recursos hídricos lançando mão de novas tecnologias e emprego correto das águas. Espera-se que o estudo sirva de contribuição como ferramenta na gestão e uso racional dos recursos hídricos subterrâneos, cada vez mais impactados pelo aumento da demanda devido ao crescimento populacional.

## **1.2 Objetivos gerais**

O trabalho objetivou o estudo hidrogeológico do sistema aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis, nordeste do Pará.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- ✓ Estudar o aquífero Pirabas quanto aos aspectos hidrogeológicos;
- ✓ Classificar o tipo e a origem das águas;
- ✓ Definir a relação topo-base dos aquíferos com o emprego dos métodos geofísicos
- ✓ Caracterizar isotopicamente as águas dos poços e das chuvas de Salinópolis.
- ✓ Caracterizar através do potencial hidráulico os mapas de fluxo e as áreas de recarga e descarga;

## **1.3 Localização da área e dos poços estudados**

O município de Salinópolis está inserido na Folha Salinópolis SA-23-V-A-V pertencente à mesorregião nordeste paraense, e a microrregião do Salgado, perfazendo uma área de aproximadamente 247 km<sup>2</sup>. A sede municipal encontra-se em 00° 36'47" S e 47° 21'30" W. Ao norte a cidade limita-se com o Oceano Atlântico; à leste a baía do Arapepó; a sul com o município de São. João de Pirabas e a oeste com o município de Maracanã (Figura 1.1 e Tabela 1.1)

O principal acesso se dá saindo da cidade de Belém pela rodovia BR-316. Ao alcançar o Município de Santa Maria do Pará, em seguida as rodovias estaduais PA 324 e PA 124 (na localidade de Santa Luzia, no Município de São João de Pirabas), até chegar ao município de Salinópolis. O tempo percorrido da capital do estado, por estrada, estima-se em torno de 04 horas, perfazendo cerca de 230Km de distância.

Figura 1. 1 – Mapa de localização da área de trabalho e distribuição dos 17 poços profundos estudados no município de Salinópolis. NE do Pará.

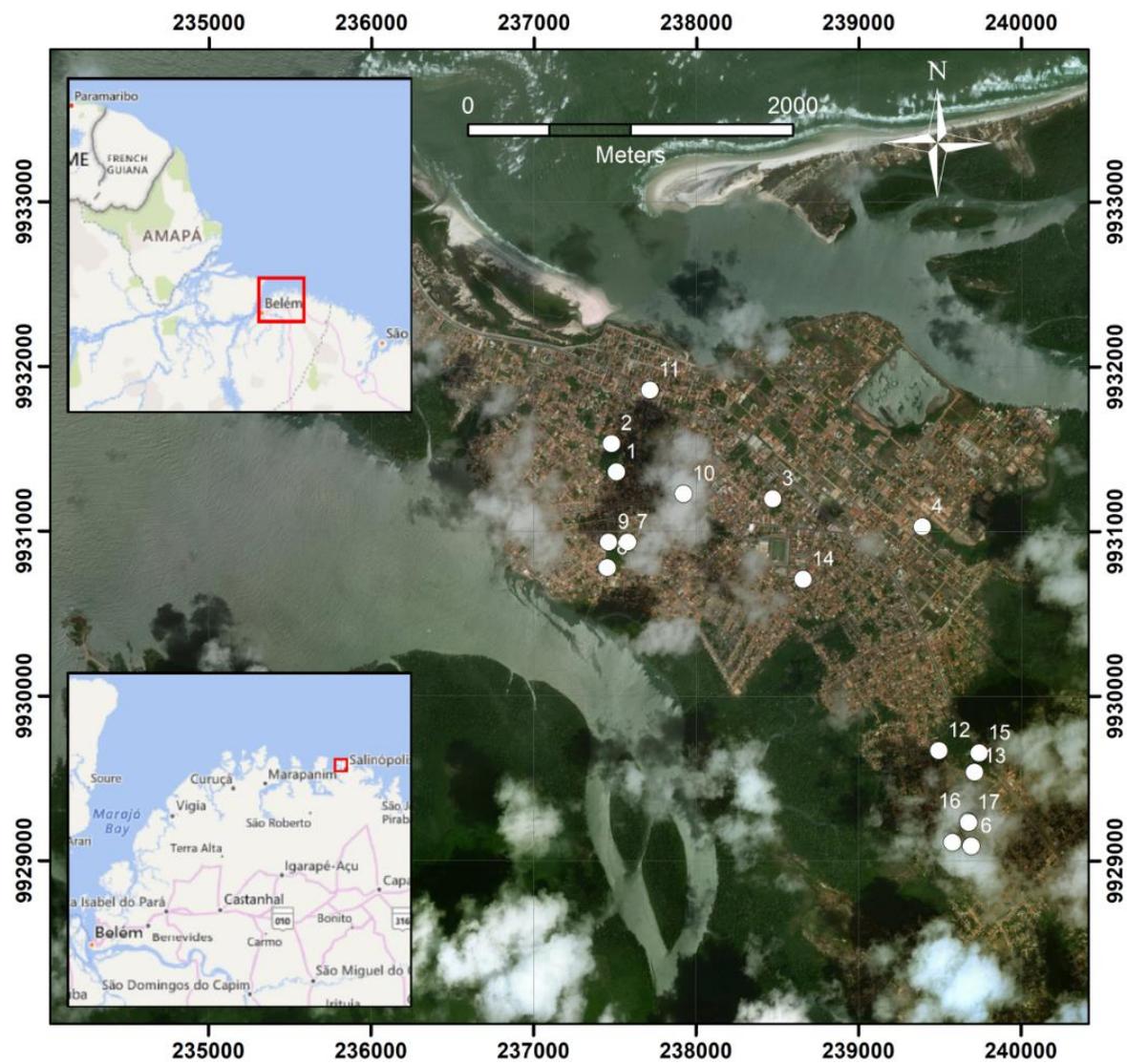


Tabela 1. 1 - Localização dos poços com as coordenadas decimais e RN's. (altitude ortométrica).

<b>Ponto</b>	<b>Poço</b>	<b>Latitude (Grau decimal)</b>	<b>Longitude (Grau decimal)</b>	<b>Altitude Ortométrica</b>
<b>1</b>	Açaí 3	-0,620482	-47,358391	10,480
<b>2</b>	Açaí 2	-0,618926	-47,358677	9,700
<b>3</b>	Amapá 1	-0,621957	-47,349763	10,280
<b>4</b>	Jardim Atalaia	-0,623493	-47,341503	11,020
<b>5</b>	Barreiro 5	-0,640808	-47,339844	16,250
<b>6</b>	Barreiro 4	-0,64101	-47,3388	15,600
<b>7</b>	7 Setembro 1	-0,62423	-47,357786	9,640
<b>8</b>	7 Setembro 2	-0,62573	-47,358905	3,650
<b>9</b>	7 Setembro 3	-0,624326	-47,358828	8,330
<b>10</b>	Escritório	-0,62168	-47,35469	25,400
<b>11</b>	Farol	-0,615986	-47,356547	24,290
<b>12</b>	Guaxinim 1	-0,635765	-47,340589	11,190
<b>13</b>	Guaxinim 2	-0,663696	-47,338616	14,140
<b>14</b>	Dom Bosco	-0,626376	-47,348086	18,060
<b>15</b>	Guaxini Pentágono	-0,635905	-47,338369	7,530
<b>16</b>	Barreiro 3	-0,639662	-47,33898	20,640
<b>17</b>	Barreiro 1	-0,639423	-47,338948	20,640

## 1.4 Materiais e métodos

A metodologia envolveu procedimentos, métodos e técnicas de campo, de escritório e de laboratório, para a obtenção e integração de dados e geração de informações da ocorrência, potencialidade e qualidade das águas subterrâneas, que permitiu a caracterização do sistema aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis-NE do Pará. O método de pesquisa foi dividido em 04 fases: Pesquisa bibliográfica, levantamento de dados, elaboração de mapas e diagramas e interpretação dos dados obtidos.

### 1.4.1 Pesquisa bibliográfica

Esses levantamentos já vêm sendo trabalhados desde o ano de 1991, quando se fez o trabalho de campo para confecção de mapa geológico IDESP (1991). A partir de 2010 iniciou-se a operação da Rede RIMAS-Belém, do SGB-CPRM. A proposta do estudo é juntar o arcabouço técnico-acadêmico já estabelecido, e aprofundar a geração do conhecimento para o melhor entendimento do comportamento do manancial subterrâneo de água.

Integração, análise e interpretação de dados obtidos em campo e escritório dos poços tubulares abrangendo características construtivas, profundidade de NA, vazão de produção, testes de bombeamento, perfil litológico, para caracterização dos sistemas aquíferos Pirabas Inferior e Pirabas Superior;

#### 1.4.2 Levantamento de Dados

Os dados adquiridos no presente trabalho foram obtidos pelos seguintes métodos:

##### **Cadastramento de poços e levantamento altimétrico**

A rede de amostragem contou com pontos de coletas em poços tubulares profundos, sendo 03 poços dedicados ao monitoramento quali-quantitativo da RIMAS-BE (sem bombeamento), e 14 poços em regime de bombeamento, pertencentes ao sistema de abastecimento público da concessionária estadual COSANPA. Estes poços estão localizados na zona urbana central da cidade Salinópolis e exploram água dos aquíferos Pirabas Inferior e Pirabas Superior (Figura 1.2). Ao todo foram 37 amostras coletadas (03 no período seco de 2016; 13 no período chuvoso e 17 no período seco de 2017; e 04 no período seco de 2018).

O levantamento altimétrico foi realizado em dezembro de 2017, com o apoio do setor de Cartografia do SGB-CPRM com a colocação de referências de nível (RN's) em 17 poços.

As áreas de recarga e descarga foram interpretadas levando em consideração a topografia do terreno, em uma área que compreende 08 Km<sup>2</sup>, com todos os poços da COSANPA inseridos. Cada poço contém sua referência de nível (RN), que a ser subtraído do valor da boca do poço (BP), passa a representar o *DATUM* de cada poço. O valor utilizado para as consistências dos dados para a RIMAS-SIAGAS está publicado na WEB-RIMAS.

Figura 1. 2- Registro fotográfico de pontos de amostragens de poços das 04 campanhas de campo na área em estudo. Anos de 2016 (seco), 2017 (chuvoso e seco) e 2018 (seco). Salinópolis.



### Métodos Geofísicos

Nesta etapa do trabalho foram utilizados os métodos: Elétrico (Tomografia Elétrica) e Perfilagem geofísica de poços, descritos abaixo:

#### *Método Elétrico*

É um método geofísico que usa como fonte uma corrente elétrica contínua injetada através de eletrodos de corrente. O resultado da injeção é a criação de um campo elétrico em sub-superfície que é medido através de eletrodos de potencial e se baseia na lei de Ohm (Figura 1.3):

$$V = R \cdot I$$

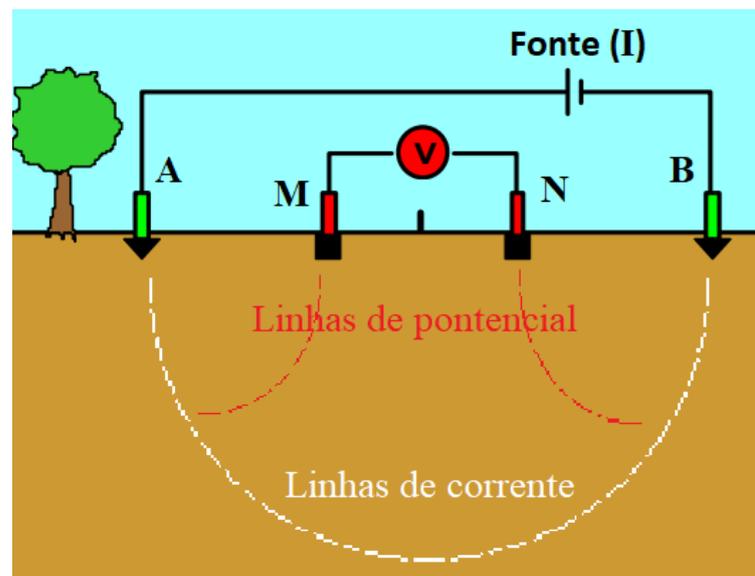
Onde:

V: é a diferença de potencial elétrico medido;

R: resistência do material atravessado dependente da resistividade elétrica e geometria do corpo;

I: corrente elétrica injetada;

Figura 1. 3 - Representação esquemática do método elétrico.



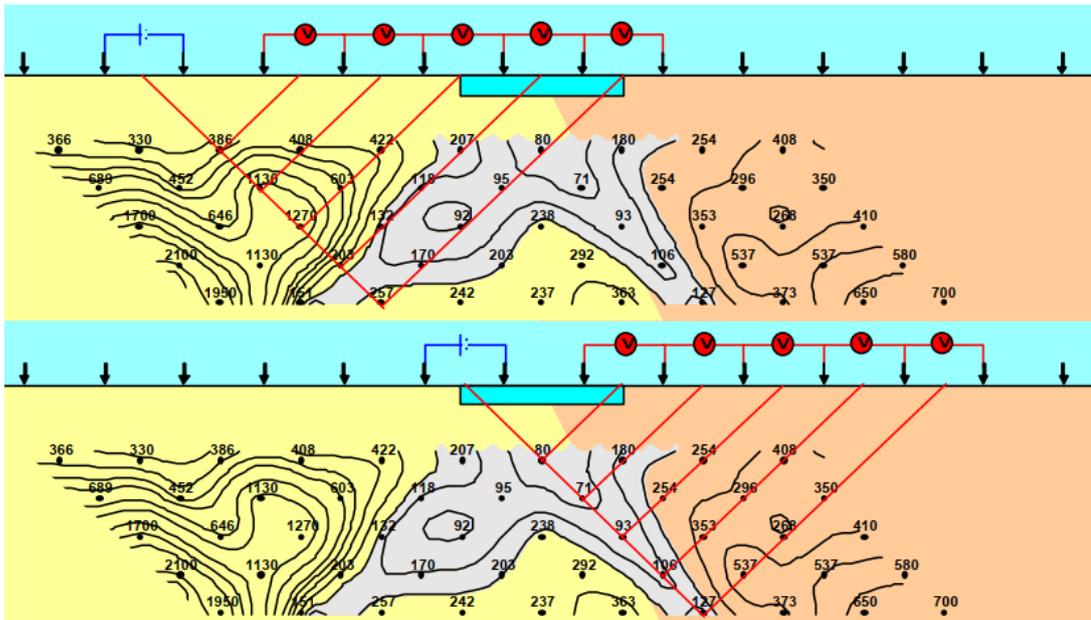
No ambiente geológico, a resistividade elétrica depende do tipo litológico e é resultado efetivo de alguns fatores como: resistividade dos minerais que compõem a rocha; resistividade dos fluidos que presentes nos poros; porosidade e o Grau de saturação; tipo de contato entre as fases sólida/líquida da rocha.

Há diversas metodologias de aquisição de dados para obtenção da distribuição de resistividade do meio geológico, sendo as mais empregadas:

- Sondagem Elétrica Vertical (SEV): onde as medidas de resistividade são tomadas ao longo da profundidade. Esta metodologia é empregada em ambientes geológicos com variação litológica em profundidade, ou seja, em ambientes de camadas horizontais (bacias, por exemplo).
- Caminhamento Elétrico (CE): as medidas de resistividades variam lateralmente no mesmo nível de investigação (mesma profundidade).

Quando diversas medidas são realizadas variando a distância entre os eletrodos de corrente e de potencial temos a composição de uma pseudo-seção elétrica, onde podemos observar os contrastes de resistividade elétrica em profundidade e lateralmente. Esta composição também é conhecida como Tomografia Elétrica (TE) (Figura 1.4).

Figura 1.4 - Arranjo dos eletrodos de correntes para execução de Tomografia Elétrica.



### *Perfilagem Geofísica de Poço*

É uma metodologia de medição das propriedades físicas das rochas, atravessadas por um poço, em relação à profundidade. Entre as propriedades físicas medidas estão a resistividade elétrica, potencial eletroquímico espontâneo, velocidade de propagação de ondas acústicas, radioatividade, etc. As características petrofísicas (porosidade, permeabilidade, saturação fluida, etc.), necessárias para a avaliação de formação, são inferidas a partir desses perfis geofísicos.

A Tabela 1.2 abaixo mostra a correspondência entre alguns perfis geofísicos e as propriedades petrofísicas inferidas a partir de cada um.

Tabela 1. 2 - Correspondência entre o tipo de perfil geofísico com as propriedades petrofísicas.

<b>Perfil</b>	<b>Parâmetro medido</b>	<b>Propriedade da rocha</b>
Potencial Espontâneo	Potencial elétrico natural gerado dentro do poço.	Salinidade da água da formação; litologia; conteúdo de argila; permeabilidade.
Elétrico de indução	Resistividade das regiões mais afastadas da parede do poço.	Resistividade de grande volume de rocha.
Raio Gama Convencional	Conteúdo total em U, Th e K.	Litologia; conteúdo de argila; rocha geradora/selante.
Sônico	Tempo de propagação de onda acústica pela parede do poço.	Porosidade; velocidade; constantes elásticas da rocha.
Densidade	Quantidade de elétrons por unidade de volume de rocha.	Porosidade; densidade da rocha.
Neutrônico	Quantidade do elemento hidrogênio por unidade de volume de rocha.	Porosidade; presença de hidrocarboneto leve.
Caliper	Diâmetro do poço	Dureza da rocha.

Uma rocha torna-se mais (ou menos) condutora de corrente elétrica, na dependência da interconexão de seus poros e da maior (ou menor) concentração iônica de fluidos condutivos. A presença de fluidos isolantes, tais como água doce, óleo/gás, torna a rocha menos condutiva, ou seja, mais resistiva. Por outro lado, o conteúdo de argila tem papel importante no comportamento elétrico da rocha por apresentarem elevada quantidade de cátions em sua superfície externa.

#### *Tratamento dos Dados Geofísicos*

As pesquisas geofísicas são divididas, basicamente, em três etapas: aquisição, processamento e interpretação. Cada método geofísico aplicado possui suas particularidades nas etapas de aquisição e processamento, podendo a última etapa (interpretação) ser realizada a partir da interpretação de dados de diferentes métodos geofísicos, como é o caso do presente trabalho. Na tomografia os dados foram processados inicialmente nos *softwares* *Prosys*, da *IRIS Instruments*, e *Res2DInv*, da *Geotomo Software*.

Além da análise qualitativa usada na interpretação geológica das formações, foi realizada a normalização do perfil elétrico de indução nos perfis de poço e nas seções de tomografia elétrica de acordo com:

$$\rho_N = \frac{\rho - \rho_{MÍN}}{\rho_{MÁX} - \rho_{MÍN}}$$

Onde:

$\rho$ : resistividade do ponto;

$\rho_{\text{MÍN}}$ : resistividade mínima do perfil ou seção;

$\rho_{\text{MÁX}}$ : resistividade máxima do perfil ou seção;

$\rho_{\text{N}}$ : resistividade normalizada;

A normalização possibilita correlacionar os perfis de resistividade elétrica entre as formações geológicas e entre poços, pois, apesar de trabalharem com a mesma propriedade física (resistividade elétrica), esta pode apresentar-se em escalas diferentes, influenciadas pelo tipo de equipamento e condições de medição externas (período climático, por exemplo).

### **Coleta das amostras de água e análise in loco.**

#### *Amostragem do Período Seco.*

A 1ª, 3ª e 4ª campanhas de coleta de campo das amostras foram feitas nos três poços pertencentes à Rede RIMAS-BE-CPRM, e ocorreram no período seco, no mês de dezembro de 2016, 2017 e 2018.

A 1ª campanha de coleta de campo ocorreu entre 06 e 07 de dezembro de 2016. Os 03 poços da RIMAS-BE foram bombeados e coletados pelo equipamento *LOW-FLOW* (método de baixa vazão) e analisados quimicamente *in loco*, com seções filtrantes compreendidas no sistema aquífero Pirabas Superior: Poços Guaxini Pentágono, Barreiro1 e Açai2.

Esses poços estão a longo tempo inativos (sem bombeamento), além de apresentarem furos em seus revestimentos, conforme detectados nas perfilagens ópticas (filmagem), o que implica em entrada de água de camadas (aquíferos) superiores, podendo-se esperar mistura de água das camadas aquíferas superiores.

A 3ª campanha foi realizada de 04 a 08 de dezembro de 2017 com 17 poços. Foi coletada a bateria completa de poços constando de 03 poços da RIMAS-BE e mais 14 poços em bombeamento da COSANPA, a maioria amostradas no extravasor - torneira instalada na boca do poço (Figura 1.5).

Figura 1. 5 - 3ª campanha de coleta de água através do Método *LOW-FLOW* (baixa vazão) no poço Açai2 - RIMAS. Período seco. Dezembro de 2017.



A 4ª campanha de amostragem ocorreu de 04 a 05 de dezembro de 2018 com os 03 poços da RIMAS-BE. Foi coletada amostra a mais do que nas 02 campanhas anteriores. O poço Barreiro1 teve coleta em 02 seções filtrantes: nas profundidades de 58 e a 94 metros.

*Amostragem Período chuvoso.*

A amostragem no período chuvoso correspondeu à 2ª campanha de coleta de campo realizada de 11 a 13 de abril, e de 13 e 14 de junho de 2017. Contou com 13 poços profundos da COSANPA, todos em regime de bombeamento (Figura 1.6). O poço Jardim Atalaia não foi amostrado, pois se encontrava com problema técnico no sistema de bombeamento.

Figura 1. 6 - Amostragem da 2ª campanha de coleta de água realizada no poço Dom Bosco (Dinossauro) em bombeamento da COSANPA, e análise *in loco* com aparelho *HACH*. Período Chuvoso. Junho de 2017.



Foi utilizado o Método *LOW-FLOW* (baixa vazão) com bomba tipo bexiga para coleta de água; análise *in loco* por meio de célula de fluxo e de aparelho de medição Modelo *HACH* para os parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, condutividade elétrica, Eh). Os 03 poços foram bombeados, coletados e analisados, com suas seções filtrantes compreendidas no sistema aquífero Pirabas Superior.

Medição dos parâmetros hidrodinâmicos dos poços para determinação do potencial hidráulico;

### **Análises hidroquímicas laboratoriais das águas**

Os parâmetros químicos analisados nos laboratórios da CPRM - LAMIN-BH, Caeté e RJ foram:

Condutividade elétrica (CE) - capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica, refletindo a facilidade da água na transmissão da corrente elétrica. Está relacionada à presença de cátions e ânions provenientes de sais diversos que se encontram dissolvidos na água. Esses sais se acumulam no corpo hídrico, em função da movimentação e transporte de material de solos. A CE tem o papel de medir o grau de mineralização iônica das águas que, por sua vez, está diretamente associada à potabilidade para consumo humano. É medida por condutivímetro e é expressa em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este parâmetro foi analisado a  $20^\circ\text{C}$  em água, dada em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com procedimento analítico IT 06-02-02 – Metrohm 856 Conductivity Module;

Potencial Hidrogeniônico (pH) - medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. É calculado em escala antilogarítmica e para temperaturas de  $25^\circ\text{C}$  são considerados os valores de 1 a 14, onde aqueles inferiores a 7 são denominados de ácidos, superiores a 7 são básicos ou alcalinos e 7 é considerado valor neutro. Este parâmetro foi avaliado com procedimento analítico IT 06-0201 – Metrohm Titrand, ambos pelo Método analítico Eletrométrico, e Titulador automático Metrohm 905 Titrand;

Carbonato (mg/L), bicarbonato (mg/L), hidróxido (mg/L) e alcalinidade total (mgCaCO<sub>3</sub>/L), todos pelo Procedimento IT 06-03-05 – Determinação de alcalinidade por carbonato/bicarbonato por titulometria e Método analítico Titulométrico, pelo Equipamento Titulador automático Metrohm 905 Titrand;

Fluoreto, Cloreto, Nitrito, Brometo, Nitrato, Fosfato e Sulfato (todos em mg/L). O procedimento analítico foi o IT 06-04-01, com uso do Cromatógrafo de Íons Metrohm 881 Compact IC pro, coluna Super7, eluente  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  5,4mM, fluxo de 0,7 mL/min, e temperatura de 45°C.

O cloreto é um dos principais ânions inorgânicos e está presente em todas as águas naturais, sendo proveniente da lixiviação de minerais ferro-magnesianos de rochas ígneas e sais de evaporitos. Em linhas gerais, possui valores situados entre 10 e 250 mg/L nas águas doces e valores entre 18.000 e 21.000 mg/L em águas marinhas. Em águas subterrâneas esta variável apresenta teores inferiores a 100 mg/L (FEITOSA *et al*, 2008).

O sulfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois é encontrado sob a forma de enxofre, nas plantas, no solo e em águas pluviais. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo sulfato, em aquíferos, podem prejudicar a qualidade das águas e interferir no ciclo natural do enxofre. Apresentam importância que vai desde o laboratório, passa pela indústria e chega aos sistemas vivos.

Segundo Parron (2011), o nitrito é um estado de oxidação intermediário de nitrogênio, e ocorre tanto pela oxidação do amônio, como pela redução do nitrato. Ambos os processos (oxidação e redução) ocorrem em estações de tratamento de esgoto, em sistemas de distribuição de água e em águas naturais. Em águas subterrâneas, o nitrito pode ser encontrado em concentrações de até 0,1 mg/L.

A detecção de nitrito em águas subterrâneas aponta para contaminações recentes, com procedência de material orgânico animal ou vegetal. Além disto, pode ser identificado como consequência de decomposição biológica por ação de microrganismos, ou até mesmo, oriundo de ativos inibidores de corrosão em instalações de indústrias.

O nitrato é um grande indicador de contaminação e poluição das águas subterrâneas por atividade antrópica. Quando encontrado em águas minerais é associado ao risco de duas doenças graves como a metahemoglobinemia, conhecida como síndrome do bebê azul e o câncer gástrico. Esse elemento é considerado prejudicial à saúde, porém é um importante agente na agricultura. O nitrato em águas subterrâneas origina-se principalmente de quatro fontes: aplicação de fertilizantes com nitrogênio, bem como inorgânicos e de esterco animal, em plantações; cultivo do solo; esgoto humano depositado em sistemas sépticos e deposição atmosférica.

O fósforo pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica e sendo os fosfatos solúveis a ocorrência mais comum deste parâmetro, e são classificados em ortofosfatos, fosfatos orgânicos e fosfatos condensados. O fosfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois está relacionado a processos naturais como a dissolução de rochas, decomposição de matéria orgânica e carreamento dos solos. Contudo, pode também estar relacionado a processos antrópicos como lançamento de esgoto sanitário, fertilizantes, detergentes e pesticidas. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo fosfato podem prejudicar a qualidade das águas residuais, principalmente através do lançamento de detergentes fosfatados empregados no uso doméstico em larga escala (SANTOS, 2011).

Os elementos Al; As; Ba; Be; B; Cd; Ca; Pb; Co; Cu; Cr; Sb; Sn; Sr; Fe; Li; Mg; Mn; Mo; Ni; Se; Si; Ti; V; Zn; Na; K; Ag e Br, todos foram analisados por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente). O Hg total foi determinado por AAGVF (Absorção Atômica com Geração de Vapor Frio). Os metais pesados foram tabulados e descritos a parte dos demais cátions.

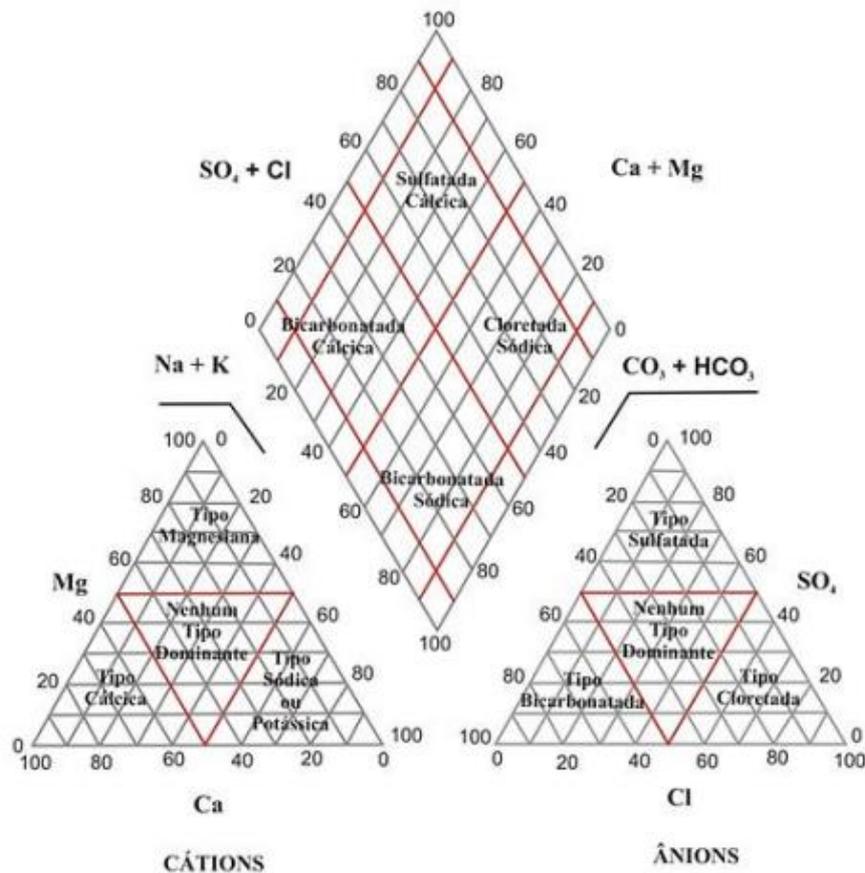
O elemento ferro deve receber atenção especial se tratando de qualidade de águas subterrâneas no estado do Pará. É um elemento bastante comum nas águas subterrâneas. Sua origem pode estar ligada à lixiviação dos solos, contaminantes industriais e ao contato da água com tubulações metálicas. As principais fontes deste elemento são minerais máficos que possuem ferro na sua estrutura cristalina: magnetita, biotita, pirita, piroxênio e anfibólios. No estado reduzido ( $Fe^{2+}$ ), é solúvel e ocorre como hidróxidos. No estado oxidado ( $Fe^{3+}$ ), é insolúvel e precipita, tingindo a água de cores que variam do amarelo ao vermelho intenso dependendo da concentração de ferro presente (FEITOSA *et al*, 2008).

Na classificação iônica dos tipos hidroquímicos foram utilizados os diagramas de *Piper*; *Stiff* e *Schoeller*. Os dados hidroquímicos foram analisados com o propósito de identificar os diferentes tipos de água, simular os possíveis processos geoquímicos relacionados à variação composicional da água e à sua interação com o arcabouço do aquífero, com vistas à caracterização da qualidade das águas dos sistemas aquíferos Pirabas Superior e Inferior.

A classificação da água pode ser feita utilizando-se vários parâmetros, a depender do objetivo a ser alcançado. O diagrama triangular de *Pipper* vem sendo bastante utilizado para a classificação iônica das águas subterrâneas. Neste diagrama pode-se distinguir três campos

com os dados plotados em % meq/L: o triângulo dos cátions, onde é plotada a abundância relativa dos cátions  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ; o triângulo dos ânions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ , e o losango onde os pontos encontrados nos triângulos anteriores são projetados. O cruzamento do prolongamento dos dois pontos define a posição do ponto na área do losango e classifica a amostra de acordo com seus fácies para cátions e ânions (Tabela 1.3).

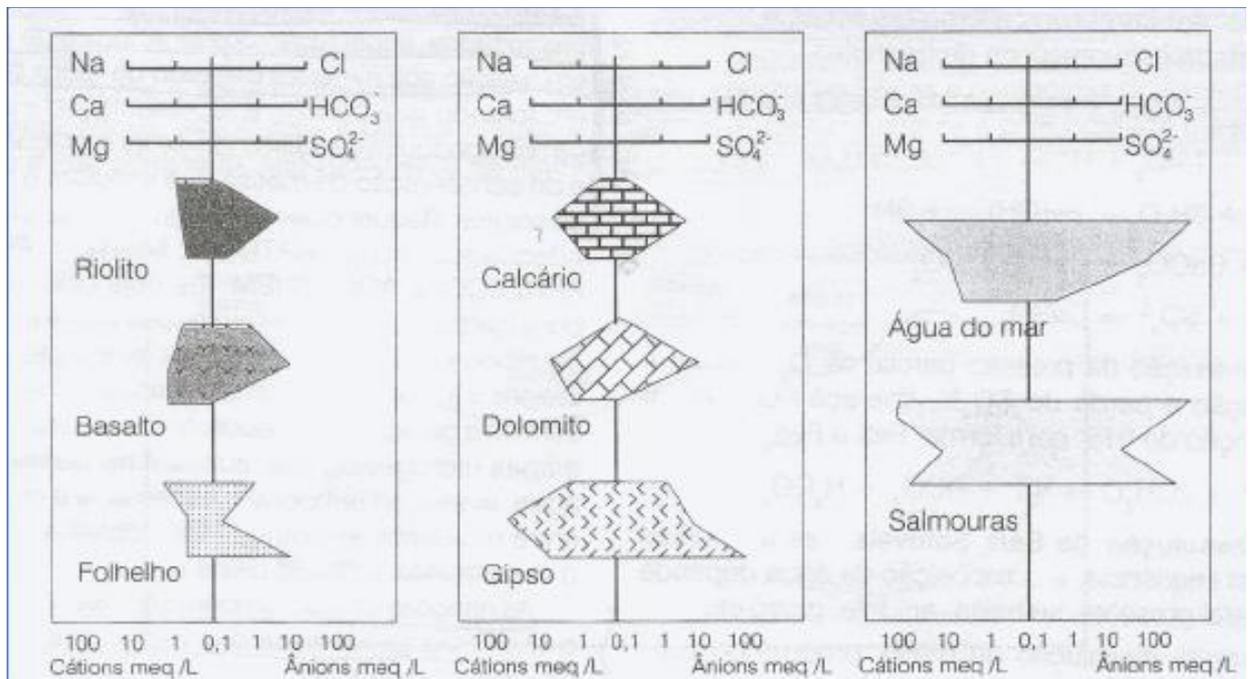
Tabela 1.3 - Representação do Diagrama de *Pipper*.



O diagrama de *Stiff* contém linhas dispostas à esquerda e à direita de uma linha vertical que representa o valor zero. Utilizou-se para este estudo os cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , e  $\text{Mg}^{2+}$ ) plotados à esquerda, enquanto os ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) plotados à direita dessa linha. As concentrações iônicas são expressas em miliequivalentes por litro (meq/L) e os pontos gerados são interligados por linhas, originando um polígono. As variedades de formas e de tamanhos gerados expressam as características das águas e permitem sua classificação e correlação, possibilitando estimar a origem e/ou influências sofridas pela água subterrânea no sistema aquífero (Figura 1.7).

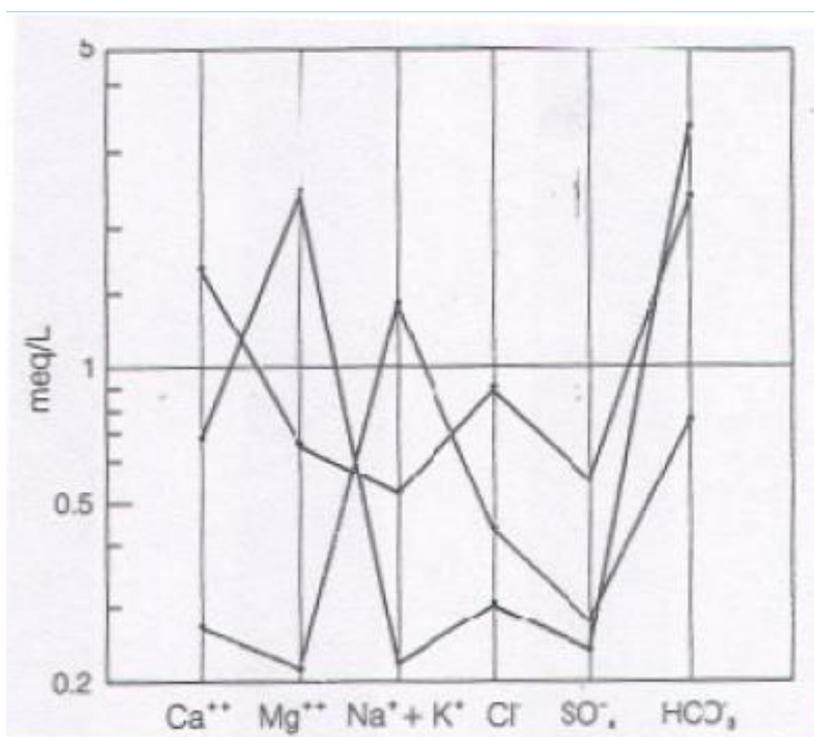
Dentre as diversas formas de representação gráfica da composição química das águas naturais, o método proposto por *Stiff* (*apud* SZIKSZAY, 1993) é particularmente útil quando se pretende estabelecer comparações entre várias águas, sobretudo àquelas mais ricas em sais. O método possibilita uma avaliação visual fácil dos padrões definidos e permite o reconhecimento preliminar de águas cujo quimismo é influenciado por fatores similares. Entretanto esses diagramas não ressaltam bem as pequenas diferenças de teores, que são muitas vezes importantes para a determinação da origem das águas.

Figura 1. 7 - Representação do Diagrama de *Stiff*.



O diagrama semi-logarítmico de *Schoeller* permite, quanto à classificação iônica, aumentar ou reduzir o número de elementos representados, de acordo com as necessidades e os objetivos da análise (Figura 1.8).

Figura 1. 8 - Representação do diagrama semi-logarítmico de *Schoeller*



Na avaliação da análise química, pode-se determinar o erro analítico com base no balanço iônico. Numa análise química completa, a concentração total de íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração total dos íons negativos (ânions). O desvio percentual desta igualdade é determinado pelo coeficiente de erro da análise (e%). Recomenda-se que este erro não seja superior a 10% para que a análise seja considerada correta. A validação dos resultados obtidos foi realizada com base no cálculo do balanço iônico, realizado com o emprego do programa *Qualigraf* (MOBUS, 2002) que calcula o erro prático (Ep) por meio da metodologia descrita em Feitosa *et al.* (2008).

Para melhor entendimento da classificação das águas, resolveu-se agrupar as amostras pelos períodos de coletas, devido à coincidência no tempo das campanhas de amostragem, e também por se repetirem os resultados dos parâmetros analisados no mesmo período amostral. Assim foram agrupados os resultados dos poços da RIMAS-BE dos períodos secos, todos amostrados no mês de dezembro dos anos 2016 (1ª amostragem), 2017 (3ª amostragem) e 2018 (4ª amostragem). Os poços da RIMAS-BE foram analisados em separado dos poços em bombeamento da COSANPA para os resultados do período chuvoso (2ª amostragem) e seco (3ª amostragem) de 2017.

### *Avaliação dos Metais Pesados*

Os metais pesados analisados foram o arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel, zinco e mercúrio. Foram selecionados pontos para coleta de 17 amostras do sistema aquífero Pirabas. Todas as amostragens seguiram os padrões específicos para coleta e foram encaminhadas ao laboratório do LAMIN-CPRM-RJ para as devidas análises. Para avaliar os resultados das análises de metais pesados utilizou-se a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, que estabelece como padrão de potabilidade valor máximo de 0,7 mg/L de bário na água para consumo humano;

### *Análise da Potabilidade*

A potabilidade foi avaliada a partir das análises feitas em 17 poços. O período chuvoso abrangeu análises de 13 poços da COSANPA (Abril e junho de 2017), enquanto o período seco envolveu 17 poços (RIMAS E COSANPA; Dezembro de 2016, 2017 e 2018).

### *Determinação dos isótopos estáveis de Oxigênio ( $\delta^{18}O$ ) e Deutério ( $\delta^2H$ );*

O hidrogênio e o oxigênio da água ocorrem com diferentes combinações isotópicas em suas moléculas. Mais comuns e de maior interesse para hidroquímica são as moléculas  $^1H_2^{16}O$  (comum),  $^1HD^{16}O$  (raro) e  $^1H_2^{18}O$  (raro), que podem ser divididas entre moléculas leves ( $^1H_2^{16}O$ ) e moléculas pesadas ( $^1HD^{16}O$  e  $^1H_2^{18}O$ ).

Durante a evaporação, as moléculas leves da água evaporam mais rapidamente do que as moléculas pesadas e, à medida que a evaporação se processa, a água remanescente se enriquece em isótopos pesados, tornando o vapor relativamente mais leve. Na condensação, o vapor residual se torna mais pobre em isótopos pesados, enquanto que o vapor liquefeito fica mais rico. Esses dois processos fazem com que sucessivas condensações do mesmo vapor sejam mais e mais pobres em isótopos pesados, como acontece com as precipitações à medida que migram para altas latitudes.

A composição isotópica da água é expressa em relação à composição isotópica média da água do oceano, um padrão internacional chamado *Standard Mean Ocean Water -SMOW* e, atualmente, *Viena Standard Mean Ocean Water -VSMOW* (CRAIG, 1961).

A diferença entre a razão isotópica da água e deste padrão, determinada por espectrômetro de massa ou por espectroscopia em cavidade ressonante tipo *ring-down*

(CRDS, *cavityring-downspectroscopy*), é expressa em partes por mil (‰). A razão de deutério é representada por  $\delta D$ , e de  $^{18}O$ , por  $\delta^{18}O$ .

$$\delta D_{amostra} \text{ ‰} = \frac{(D/H)_{amostra} - (D/H)_{SMOW}}{(D/H)_{SMOW}} \times 1000$$

$$\delta O^{18}_{amostra} \text{ ‰} = \frac{(O^{18}/O^{16})_{amostra} - (O^{18}/O^{16})_{SMOW}}{(O^{18}/O^{16})_{SMOW}} \times 1000$$

Água com menos deutério que SMOW apresenta  $\delta D$  negativo; água com mais deutério que SMOW apresenta  $\delta D$  positivo. O mesmo ocorre com o  $\delta^{18}O$ . O ciclo hidrológico global mostra correlação linear entre  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$ . Essa relação resulta de vários processos de fracionamento, como resultado das mudanças de fases, de temperatura, circulação atmosférica global e destilação da massa de vapor de água durante a chuva (GAT, 1980). Com base nos valores isotópicos de uma rede mundial de precipitação, levantados pela Agência Internacional de Energia Atômica, modelos de circulação de massas de vapor d'água do ar e processos físicos pelos quais a água passa em seu ciclo podem ser estudados e avaliados pelas medidas isotópicas dos corpos d'água.

#### *Coletas e Análises Isotópicas das Amostras*

Durante as etapas de campo, foram seguidos todos os padrões recomendados para amostragem.

A 1ª campanha de amostragem foi realizada no período chuvoso nos meses de abril e junho de 2017. Foram selecionados 13 poços em bombeamento da COSANPA para coleta das amostras de águas subterrâneas na cidade de Salinópolis para análise dos isótopos de  $\delta^{18}O$  e deutério ( $\delta^2H$ ), do sistema aquífero Pirabas Inferior. A coleta de chuva foi realizada no dia 26/06/2018 às 17:17 horas.

A 2ª campanha de amostragem ocorreu no período seco em dezembro de 2017. Foram selecionados 17 poços para coleta de amostras das águas subterrâneas, do sistema aquífero Pirabas Inferior e Pirabas Superior, contando com 03 poços de monitoramento da Rede RIMAS, pelo Método *LOW FLOW* (bomba de baixa vazão), e mais 14 poços em

bombeamento da COSANPA (extravasor). A coleta de chuva foi realizada no dia 06/01/2018 às 16:00 horas.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Estudo de Bacias – LEBAC, Campus da UNESP de Rio Claro para isótopos de oxigênio-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e deutério ( $\delta^2\text{H}$ ). Utilizou-se a técnica de espectroscopia em cavidade ressonante tipo *ring-down*, que se baseia na absorção de radiação laser na faixa do infravermelho próximo (0,7  $\mu$  a 2,5  $\mu$ ) por substâncias no estado gasoso, tais como água, gás carbônico e metano. O instrumento utilizado para análise isotópica foi o *Liquid Water Isotope Analyzer* da Los Gatos Research Inc (LWIA-24d).

### *GNIP (Global Network of Isotopes Precipitation)*

A rede nacional de monitoramento isotópico de chuva chegou a contar com cerca de 20 estações GNIP's. No início da década de 90, esta rede foi desmantelada deixando o país e o continente americano sem informações. A partir do mês de dezembro de 2018, a GNIP-BE foi retomada pelo SGB-CPRM, através do Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia, e coordenada pelo Projeto RIMAS em Belém, e já se encontra em operação no estacionamento da sede da SUREG-BE (Figura 1.9).

Figura 1. 9 - Instalação da GNIP-BE, com o amostrador de água de chuva. 13/12/2018.



Para a interpretação do comportamento isotópico foi utilizado banco de dados da GNIP de Belém do período de 1965 até 1990, adquiridos na Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA 2019). Isso possibilitou uma análise mais representativa dos dados, devido o elevado número de amostras, caracterizando a região de forma significativa.

### 1.4.3 Elaboração de mapas e diagramas

Utilização do programa *SURFER.12* para produção de mapas de fluxo e das áreas de recarga e descarga;

## 1.5 Referencial teórico

### 1.5.1 Rochas Calcárias

O calcário é uma das rochas sedimentares mais abundante na superfície da terra. Forma extensas camadas na crosta continental, e contém minerais de carbonato, especialmente a calcita (50% ou mais) e a dolomita, que se recristalizam durante a litificação em uma rocha dura e quebradiça. A sedimentação de carbonato envolve em geral animais ou plantas, e especialmente microorganismos. Estes últimos alteram o ambiente químico local, transformando pequenos cristais de carbonato (geralmente o mineral aragonita) em lama de carbonato ou em leitos de mar rasos (WILSON, 1975)

Uma vasta gama de organismos – dos microscópicos, unicelulares foraminíferos até os construtores de recifes (como os corais) e vertebrados maiores, segregam o cálcio de seus arredores para construir suas conchas e ossos (esses últimos são feitos de fosfato de cálcio). Após a morte, os restos de carbonato poderão se acumular em quantidade suficiente para formar sedimentos como a lama do leito do oceano e os recifes calcários.

Em mares tropicais rasos com altas taxas de evaporação, o carbonato poderá também ser depositado diretamente no fundo do mar. As correntes rolam esses grãos agregadores de carbonatos formando areias de carbonato chamadas oólitos, que depois são litificadas para formar rochas.

Os carbonatos de mares tropicais rasos se constituíram nas mais importantes ocorrências camadas de calcário. No passado, tais mares haviam inundado grande parte dos continentes, criando extensos recifes, e por sua vez, sedimentos calcários – por exemplo, durante o Carbonífero Inferior (Mississipiano), cobriram grande parte do antigo continente de Laurência (hoje aproximadamente a América do Norte), bem como a Europa.

As rochas calcárias podem se dissolver para formar carste e características de cavernas e , na evaporação, serem novamente depositadas para construir depósitos de travertino em

torno de fonte termais e gêiseres, e depósitos de carbonato de cavernas, como escorrimentos, e estalagmites.

### 1.5.2 Intemperismo químico

O intemperismo químico pode levar ao fracionamento de alguns minerais da rocha e à formação de novos minerais. Em climas quentes e úmidos, ele ocorre muito mais rapidamente do que em condições áridas. O processo é acelerado pela chuva que combinada com o dióxido de carbono da atmosfera, forma solução ácida. À medida que essa solução se infiltra no solo, carrega alguns minerais, em especial carbonato de cálcio, para uma solução, numa reação química reversível.

O calcário reage facilmente em água ácida, e pode escavar passagens subterrâneas na rocha produzindo tipos distintos de paisagens (cavernas, condutos, sumidouros, entre outras) chamadas de regiões cársticas.

### 1.5.3 Ambientes cársticos

As rochas carbonáticas, principais hospedeiras das paisagens cársticas e dos sistemas de cavernas, ocupam cerca de 12% das áreas continentais, e somente cerca de 07 a 10% apresentam relevo cárstico. Segundo Ford e Williams (1989), cerca de 25% da população depende de água extraída do carste.

Terrenos cársticos caracterizam-se também por abrigar aquíferos de condutos, notáveis pelo fluxo rápido da água subterrânea, baixa capacidade de filtração de material em suspensão e/ou impurezas, alta capacidade de armazenamento de água subterrânea e bacias de drenagem de superfície sem correspondência exata com os sistemas de drenagem subterrânea (PALMER, 1991), e com características hidrológicas diretamente vinculadas aos fatores geológicos (BOGLI, 1980).

No processo de carstificação, as rochas carbonáticas, sobretudo os calcários e dolomitos em função da alta solubilidade, sofrem reações de dissolução, que são promovidas principalmente pelo ácido carbônico, devido à disponibilidade global de CO<sub>2</sub> no solo e atmosfera.

As feições superficiais e subterrâneas que compõem o ambiente cárstico foram geradas, em sua maior parte, durante o Quaternário. No Brasil, os relevos cársticos ocupam uma área relativamente reduzida, concentrando-se na região central do país e estando

representados por carbonatos pré-cambrianos essencialmente subhorizontalizados submetidos à influência de clima sazonal. Quando comparados a outros ambientes geomorfológicos, no entanto, o carste destaca-se por apresentar importantes vestígios paleoambientais. Os controles estrutural e tectônico são importantes no condicionamento morfológico e direcional de várias feições cársticas, como dolinas, cavernas e vales.

A carstificação pode ser interpretada como um processo de erosão química, sendo a água subterrânea o principal agente geomórfico primário. Nesse sentido, para estimar o fluxo de massa em solução de um sistema cárstico, é fundamental monitorar durante um ano hidrológico o volume de água (solvente) transmitido pelo sistema, com vistas a avaliar o impacto que este agente exerce na rocha encaixante (carbonática). As informações obtidas no referido monitoramento também possibilitam entender o processo de recarga do sistema.

Poucos trabalhos foram desenvolvidos sobre a hidroquímica do carste brasileiro, destacando-se Karmann (1994), que investigou o carste do Alto Ribeira (SP), atribuindo sua origem essencialmente à ação do ácido carbônico e Guerra (1986) que investigou características hidroquímicas do carste do grupo Bambuí na Bahia, não tratando da gênese do aquífero de condutos. Auler (1996, 1999) levanta a hipótese de dois tipos de agentes de dissolução para o carste do Grupo Una, o tradicional ácido carbônico e o ácido sulfúrico, porém, baseado em dados hidroquímicos secundários.

De acordo com a regionalização de terrenos cársticos do Brasil efetuada por Karmann e Sánchez (1979), evidencia-se potencial espeleológico para as coberturas carbonáticas plataformais dos Grupos Bambuí e Una, no Brasil Central (GO, MG, BA), os metacalcários e dolomitos na Serra da Bodoquena (MS) e sequência carbonática do Grupo Araras (MT) e os metacalcários e metadolomitos do Grupo Açungui, na região sudeste (SP, PR).

Os aquíferos cársticos são particularmente vulneráveis à contaminação, como constatado por Goldscheider (2002), devido a fatores como: baixa espessura dos solos, concentração de fraturamentos e carstificação das camadas superiores do aquífero, além da ocorrência de pontos de recarga em cavidades e condutos formados pelo processo de carstificação, que propiciam a penetração e o transporte de contaminantes nesse sistema.

## CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Caracterização climática

A região nordeste do estado do Pará apresenta um clima quente e úmido do tipo Am2, de acordo com a classificação de Köppen, adaptada por Martorano *et al.*(1993). Destaca-se a variabilidade da precipitação, em virtude dos fenômenos oceânicos-atmosféricos que influenciam diretamente na variabilidade das condições climatológicas regional.

#### 2.1.2 Precipitação Pluviométrica

A precipitação pluviométrica em Salinópolis, apresenta duas estações bem definidas: uma bastante chuvosa (janeiro a junho), com total de 2.590,5 mm, correspondendo a mais de 90% da precipitação total anual, e outra menos chuvosa (julho a dezembro), com total de 267,0 mm de chuva. A média total anual de é 2.857,5 mm (Figura 2.1). Na figura 2.2 observa-se o total médio da variabilidade da precipitação para 1 mês, 2, 3, 4, 5 e 6 meses consecutivos.

Figura 2. 1 - Variabilidade da Precipitação - Média total anual.

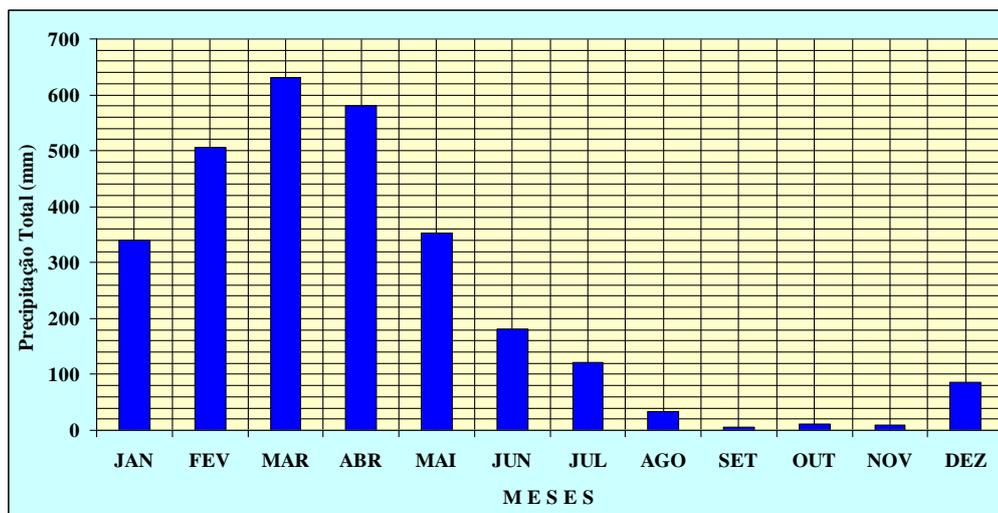
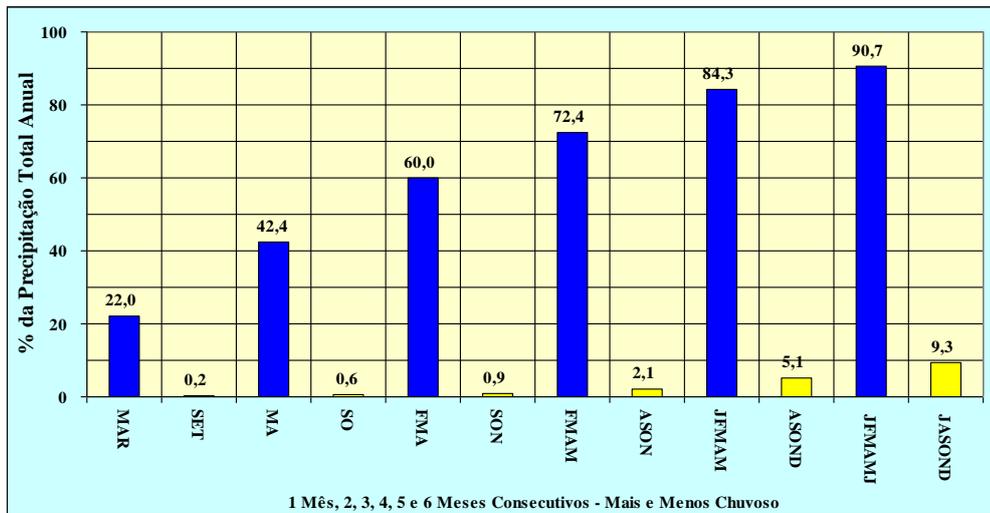
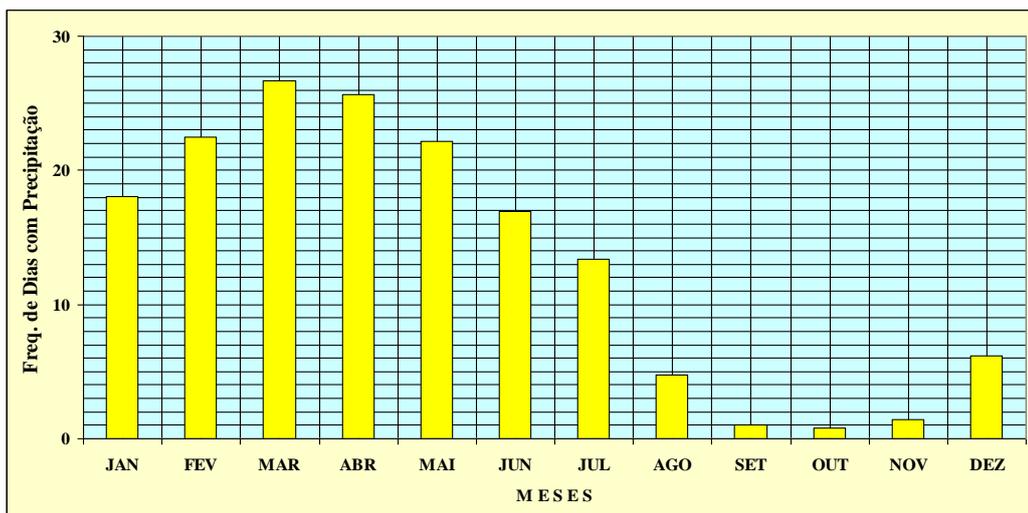


Figura 2. 2 - Variabilidade da precipitação. Total médio para 1 mês, 2, 3, 4, 5 e 6 meses consecutivos.



Quanto à frequência de dias com chuva, variam de janeiro a junho, com total de 132 dias com chuva, correspondendo a mais de 82% da frequência de dias com chuva anual, e a outra menos chuvosa, de julho a dezembro, com total de 28 dias com chuva, com frequências de dias anual de 160 dias (Figura 2.3). Os meses mais secos (setembro, outubro e novembro) chegam à frequência de média de 01 dia com chuva.

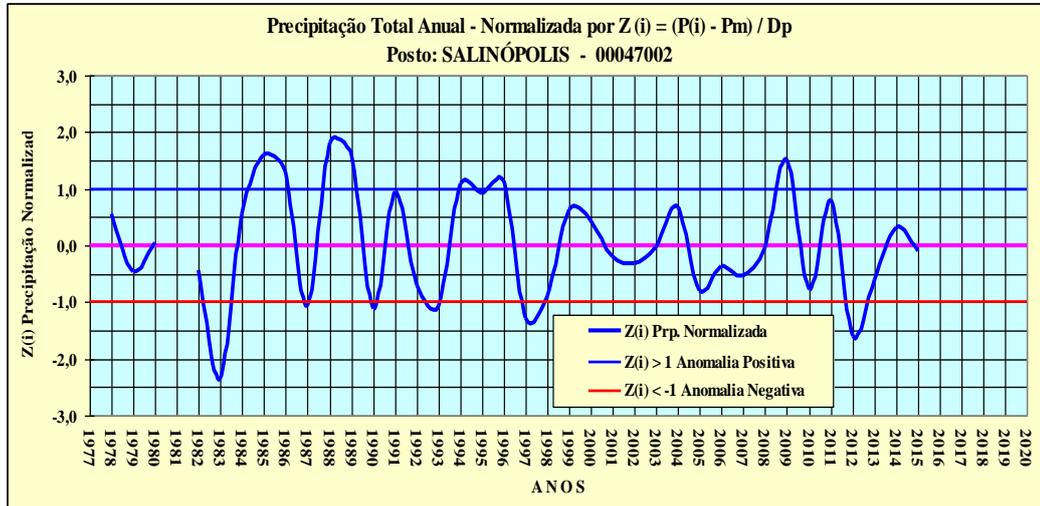
Figura 2. 3 - Variabilidade da frequência de dias com precipitação - Total médio mensal.



A variabilidade interanual, depende principalmente das condições Oceano *versus* Atmosfera, como no caso de anos *El Niño* (anomalias positivas) de 1997/98, 1982/83, 2015/16, e de *La Niña* (negativas) de 1988/89, 1998/99/00, 2007/08 e 2009/10; muito embora

alguns anos não apresentaram o comportamento esperado, podendo estes estarem associados a outros fenômenos (Figura 2.4).

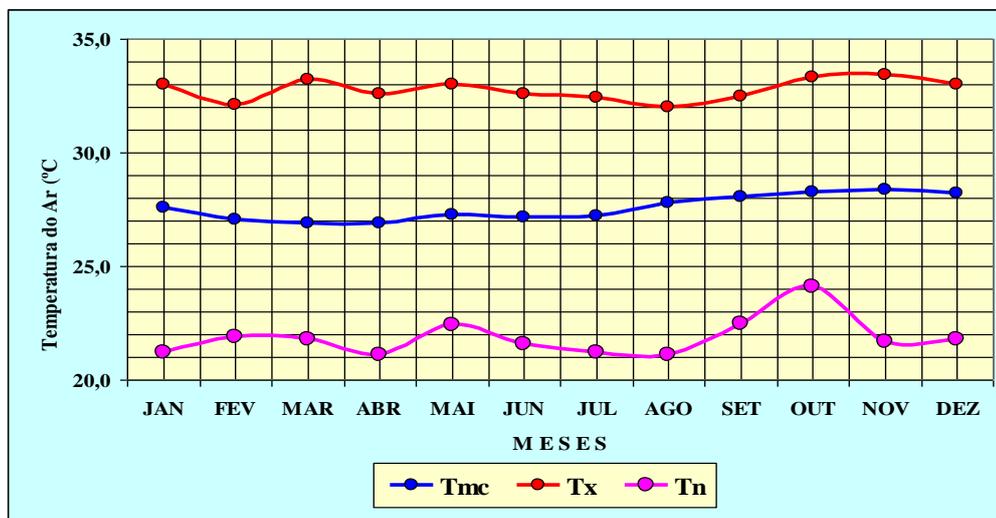
Figura 2. 4 - Variabilidade interanual da precipitação - Total médio anual.



### 2.1.3 Temperatura do Ar

O regime térmico a que está submetido o Município de Salinópolis é caracterizado por temperaturas elevadas, porém homogêneas, com média anual quase constante, de 27,6 °C, sendo que a temperatura máxima mensal apresenta valores que variam de 32.0 a 33,5 °C e as mínimas com valores em torno de 21,0 a 24,5 °C. A amplitude térmica pode atingir até 12,5 °C (Figura 2.5).

Figura 2. 5 - Variabilidade da temperatura mensal média, máxima e mínima absoluta.

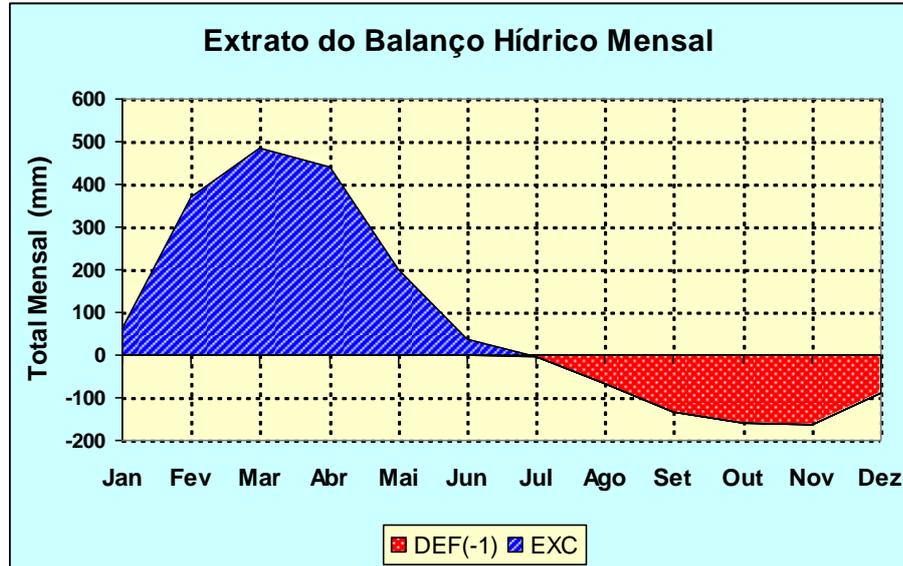


#### 2.1.4 Excedente e Deficiência Hídrica

No estabelecimento das condições hídricas do solo, não bastam somente os dados de precipitação e evaporação, existe um outro fator a considerar, ou seja, as perdas de água pela evaporação e pela transpiração das plantas, fenômeno esse chamado de evapotranspiração potencial (FEITOSA, 2008). O Método de Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather contabiliza a água num processo de entrada no solo, representado pelas chuvas, e de saída, dada pela evaporação e transpiração dos vegetais (THORNTHWAITE e MATHER, 1957). Com isso, este método permite expressar, em milímetros, o índice de disponibilidade da água no solo, fornecendo os excessos e deficiências que ocorrem durante o ano (Figura 2.6).

No Município de Salinópolis ocorre um excedente hídrico total da ordem de 1.597,4 mm, observado nos meses de janeiro a junho, e um déficit hídrico total de 616,0 mm referentes aos meses de julho a dezembro, com o trimestre de maior excedente - fevereiro a abril e o de maior déficit - de setembro a novembro. Admite-se uma retenção hídrica de 125 mm de água pelo solo.

Figura 2. 6 - Variabilidade do índice excessos e deficiências hídrica - Média total mensal.

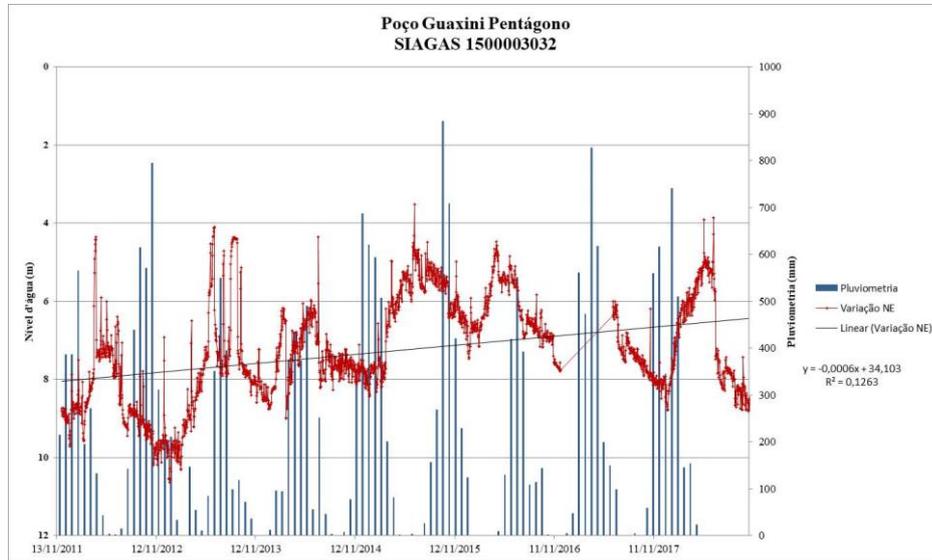


#### 2.1.5 Variabilidade entre Pluviosidade *versus* Nível Estático nos poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS-BE/CPRM

Foram cedidos para o Projeto RIMAS, através de Termo de Acordo assinado pelas presidências da CPRM e da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), em 17 de novembro de 2014, 03 (três) poços para monitoramento das águas subterrâneas:

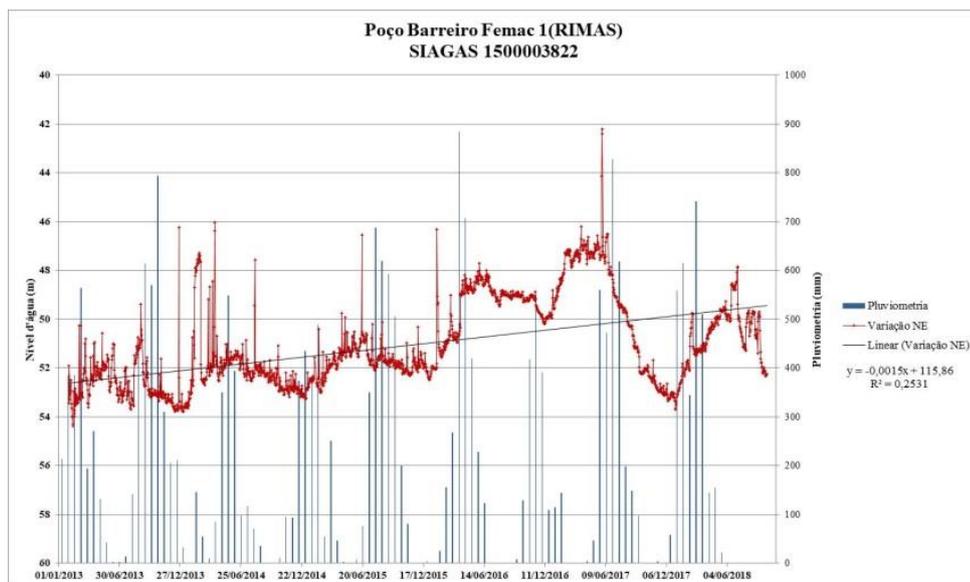
Poço COSANPA Guaxini Pentágono (SIAGAS 1500003232), construído em 1982, com operação iniciada em 02 de dezembro de 2011 (Figura 2.7).

Figura 2. 7 - Variação entre a chuva *versus* NE do poço Guaxini Pentágono. RIMAS-CPRM.



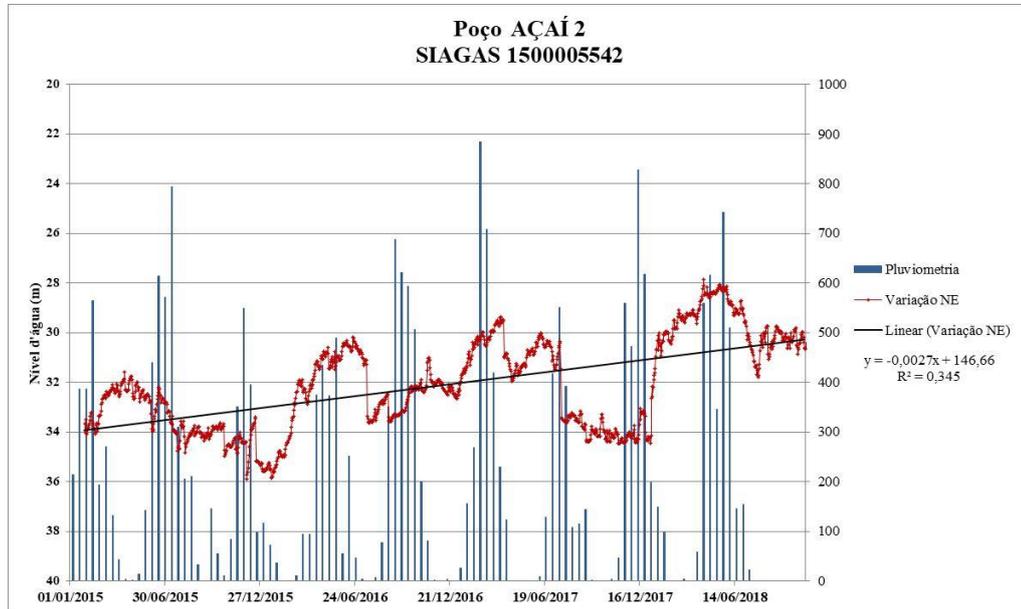
Poço COSANPA Barreiro1 (SIAGAS: 1500003822), construído em agosto de 1991, com início do monitoramento em 01 de dezembro de 2011 (Figura 2.8).

Figura 2. 8 - Variação entre a chuva *versus* NE do poço Barreiro1. RIMAS-CPRM.



Poço COSANPA Açai2 (SIAGAS 1500005542), construído em 1991 e operando desde 29 de janeiro de 2015 (Figura 2.9).

Figura 2. 9 - Variação entre a chuva *versus* NE estático do poço Açai2. RIMAS-CPRM.



## 2.2 Contexto geológico

### 2.2.1 Geologia Regional

A área em estudo está assentada sobre um conjunto de depósitos sedimentares associados às Plataformas Bragantina e Pará, que incluem as rochas da Formação Pirabas depositadas no Oligoceno/Mioceno Inferior (MAURY, 1925; PETRI, 1957; FERREIRA, 1966; FERREIRA, 1982; FERNANDES, 1984); as rochas da Formação Barreiras depositadas no intervalo entre o Mioceno Inferior a Médio (COSTA *et al.* 1993; GÓES; TRUCKEMBRODT 1980; ROSSETI *et al.* 1989); além dos sedimentos inconsolidados Pós-Barreiras de idade plio-pleistocênica (SÁ 1969, ROSSETI *et al.* 1989).

Com base em aspectos sedimentológicos e paleontológicos, Rossetti (2001) integralizou informações a respeito das unidades geológicas presentes na região nordeste do Pará, englobando-as em uma série de sequências, separadas por discordâncias de cunho regional, cada formação que compõe a geologia será detalhadamente descrita no tópico geologia local.

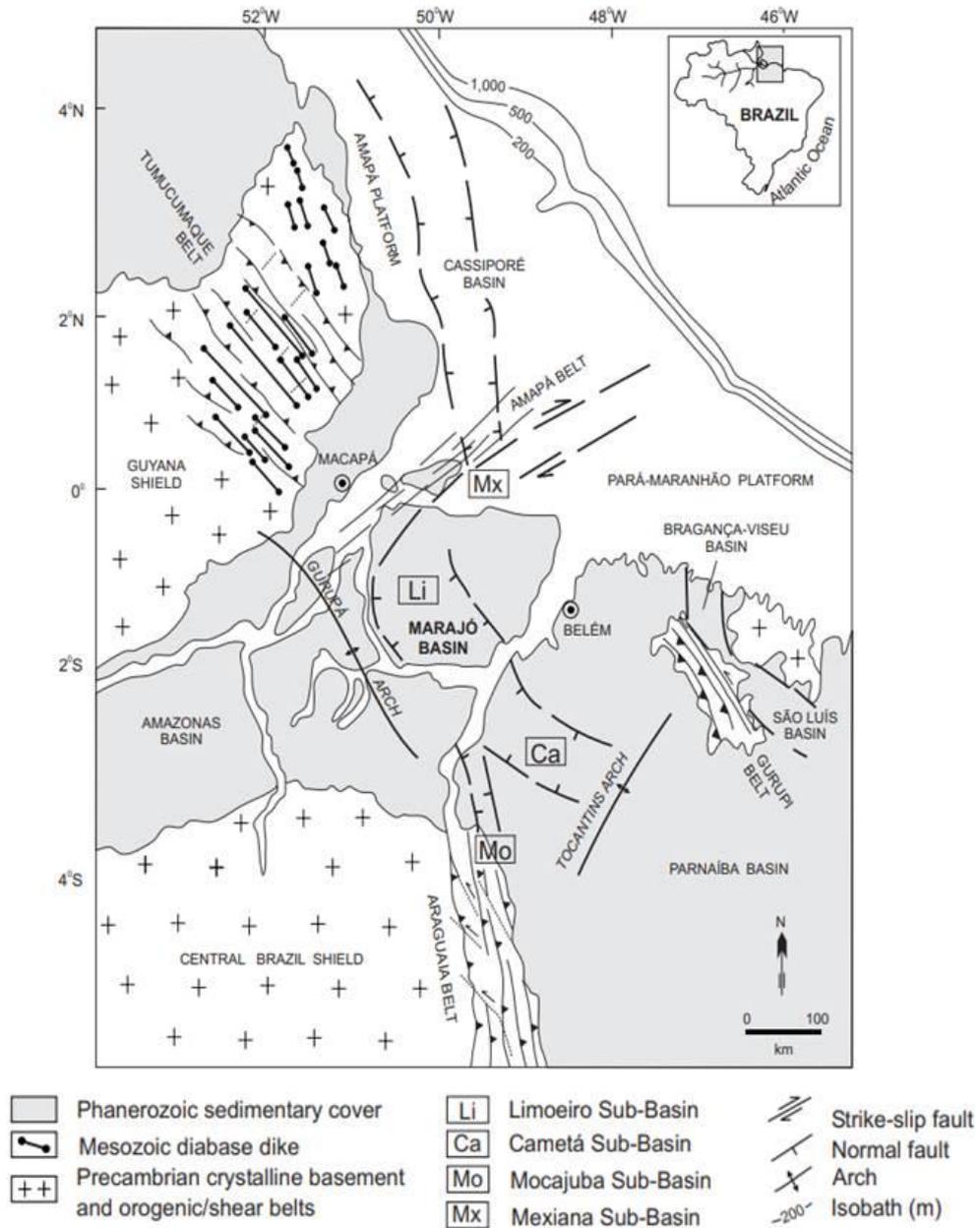
A Sequência “A” compreende a Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras, representando a passagem gradual lateral e ascendente dos depósitos da Formação Pirabas para os sedimentos da Formação Barreiras. As fases finais da sedimentação Pirabas e o início da deposição Barreiras são considerados de idade contemporânea (COSTA *et al.* 1993; ROSSETI *et al.* 1989; ROSSETTI 2001). A Sequência “B” corresponde a parte intermediária e superior da Formação Barreiras, enquanto a Sequência “C” é representada pelos Sedimentos Pós-Barreiras.

Neste contexto, as formações Barreiras e Pirabas constituem os principais aquíferos da região nordeste do estado, estas unidades geológicas se encontram interdigitadas, conforme Rosseti (2001) e o limite entre ambas é de difícil distinção. Assim, se apresenta, um resumo sobre essas duas unidades.

### 2.2.2 Tectônica

Os sedimentos terció-quaternários Barreiras-Pirabas na região estão assentados sobre um embasamento cristalino pré-cambriano que se apresenta seccionado por cinturões de cisalhamento, os quais definem grandes blocos crustais justapostos, com idades superiores a 1,86 Ga (COSTA *et al.* 1993; COSTA & HASUI 1997; HASUI 1996). As unidades geotectônicas que se destacam no embasamento da região nordeste do estado do Pará são o Cráton Amazônico, o Cinturão Araguaia, o Cráton São Luis e o Cinturão Gurupi, ilustrados na Figura 2.10 (COSTA *et al.* 2002).

Figura 2. 10 - Localização das unidades geotectônicas simplificadas da região nordeste do estado do Pará e parte do norte do Brasil (COSTA *et al.* 2002).



A movimentação cenozóica na região amazônica, que apresenta maior influência nos aquíferos regionais, é fortemente controlada pela estruturação do embasamento (COSTA *et al.*, 1996; HASUI, 1996), e resulta do tectonismo transcorrente, de movimentação binária dextral E-W, intraplaca, induzida pela movimentação da Placa Sul Americana para oeste (HASUI, 1990).

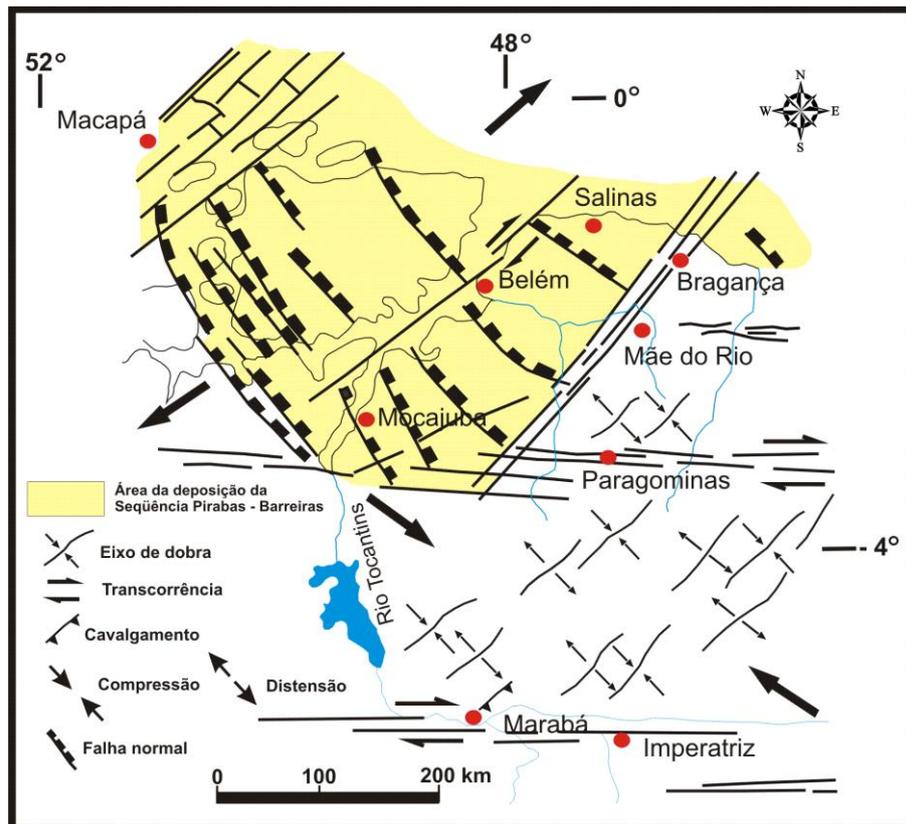
Os perfis lateríticos de composição bauxítico-fosfática e idade oligocênica, estabeleceram a idade máxima do início dos eventos neotectônicos na região Amazônica

(COSTA, 1996). A partir dos eventos de instalação dos perfis lateríticos, marca de um período de estabilidade tectônica, foram individualizadas duas grandes movimentações neotectônicas (BEMERGUY *et al.*, 1995; BORGES *et al.*, 1995) nos seguintes intervalos:

a) Mioceno – Plioceno

Os primeiros registros neotectônicos são caracterizados pelo desenvolvimento de estruturas transtensivas e transpressivas (COSTA *et al.*, 1996). Nas regiões da ilha de Marajó, Belém, Ipixuna e no litoral também ocorrem estruturas transtensivas, que compreendem falhas mestras normais, lístricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE, as quais estruturaram a bacia na qual foram depositadas as rochas da Sequência Pirabas- Barreiras (PALHETA, 2008) (Figura 2.11).

Figura 2. 11 - Estruturas paleógenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Sequencia Pirabas.



Fonte: Costa *et al* (1996).

A evolução tectonossedimentar dessa bacia de afastamento é relacionada a duas fases (COSTA *et al.*, 1996 *apud* PALHETA, 2008): a primeira fase é condicionada pelo avanço do mar “Pirabas”, controlado pelas falhas normais (NW-SE) e conseqüentemente a sedimentação

dos carbonatos da Formação Pirabas; enquanto a segunda fase é constituída por sucessivos eventos com movimentações 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. Posteriormente, ocorreu o período de tranquilidade tectônica no Pleistoceno Médio caracterizado pela formação dos perfis lateríticos imaturos. As áreas transpressivas abrangem a região de Marabá, Paragominas até a porção oeste do Maranhão.

#### b) Pleistoceno – Holoceno

O segundo grande episódio de movimentação do Pleistoceno Médio ao Holoceno provocou, na região nordeste do Pará, o surgimento 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).

Essas estruturas do Quaternário afetam as formações Ipixuna (Cretáceo Superior), Pirabas e Barreiras (Mioceno), e os perfis lateríticos imaturos, com indicação de rejeito de falhas normais de poucos metros a várias dezenas de metros.

A movimentação das falhas normais provocou a distribuição, em faixas alternadas, das formações Ipixuna e Barreiras; expôs isolada a Formação Pirabas em meio a Formação Barreiras; promoveu o basculamento da ilha de Marajó; possibilitou a deposição da Sequência Pós-Barreiras; produziu dissecação no sistema colinoso; gerou formação de arcos, de cotovelos, de segmentos retos, de capturas e de segmentos meandantes na rede de drenagem (COSTA *et al.*, 1996).

### 2.2.3 Geologia Local

#### Formação Pirabas

A Formação Pirabas aflora, principalmente, na região litorânea do nordeste do estado do Pará, nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas, de onde derivou seu nome; sendo constituída, em geral, por rochas carbonáticas depositadas durante o Mioceno Inferior (MAURY, 1925; PETRI, 1957; FERREIRA, 1966; FERREIRA, 1982; FERNANDES, 1984).

Historicamente, as pesquisas realizadas por Maury na região e suas publicações foram fundamentais para o reconhecimento da Formação Pirabas e serviram de base para pesquisas geológicas e paleontológicas seguintes. Em 1925, Maury denominou a formação como Formação Pirabas, e através do reconhecimento do gastrópode *Orthaulax pugnax*, ela foi capaz de correlacionar o paleoambiente desta região com outros já identificados em algumas formações da América do Norte (TÁVORA *et al.*, 2002).

A proposta inicial de subdivisão dos sedimentos Pirabas foi realizada por Petri (1957) que, baseando-se exclusivamente em foraminíferos, estabeleceu as biofácies Castelo, Canecos e Baunilha Grande, abrangendo, respectivamente, afloramentos do atual litoral paraense, Zona Bragantina e Furo de Baunilha Grande (GÓES *et al.* 1990).

- 1) Fácies Castelo: calcários na forma de coquinas, micritos, biohermitos e dolmicritos.
- 2) Fácies Baunilha Grande: argilitos negros com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros possuindo fragmentos de crustáceos.
- 3) Fácies Capanema: calcários argilosos, micritos, biomicritos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos.

Essas fácies são marcadas pelo rico conteúdo fossilífero e as suas disposições atribuem a esta unidade uma origem em um ambiente marinho aberto, com águas rasas, quentes e agitadas, com presença de lagunas, estuários e, mais localizadamente, mangues (GOÉS *et al.*, 1990).

De um modo geral, os trabalhos posteriores adotaram, com pequenas modificações, estas denominações, muitas vezes utilizando-as com conotação litoestratigráfica. Desta forma, Ferreira (1977), apresentou o posicionamento, contendo da base para o topo, as fácies: Castelo, Baunilha Grande e Capanema (antiga Canecos). Entretanto, em trabalhos posteriores (URDININEA, 1978; TRUCKENBRODT, 1981; FERREIRA, 1980, 1982; FERREIRA; FRANCISCO, 1988) empregam outros empilhamentos estratigráficos.

Posteriormente, com base em análises faciológicas, Góes *et al.* (1990) verificaram que as subdivisões litofaciológicas estabelecidas para a Formação Pirabas não apresentam um posicionamento estratigráfico único, nem são restritas geograficamente.

Os perfis realizados em Atalaia, Aecuru e Capanema, indicaram a ocorrência das diferentes fácies, descritas como Castelo, Baunilha Grande e Capanema em todos os pontos indistintamente, sob forma de intercalações. Assim, os autores descreveram ser fácies constituídas por biocalciruditos, biocalcarenitos estratificados, biocalcarenitos não estratificados, margas e, subordinadamente, biohermitos, folhelhos (negros e verdes) e calcilutitos.

Os ambientes de deposição variaram entre ilhas de barreira, laguna (incluindo mangues) e plataforma carbonática, esta submetida à ação de ondas de tempestade (GÓES *et al.*, 1990), sob condições de forte controle tectônico, com o desenvolvimento de vales incisivos, que se encaixam ao longo de zonas de falhas (ROSSETTI; GÓES, 2004).

#### Formação Barreiras

As primeiras referências sobre os depósitos miocênicos na região norte do Brasil são de (CARVALHO, 1926; KATZER, 1933; OLIVEIRA; LEONARDOS, 1943 *apud* ROSSETTI, 2006; PENNA, 1876), no entanto, a carência de estudos sedimentológicos e estratigráficos detalhados durante muitos anos, confundiram a relação entre as unidades litoestratigráficas Pirabas e Barreiras.

A Formação Barreiras (Figura 2.12) ocorre em uma faixa costeira que se estende do estado do Rio de Janeiro até o Amapá e é constituída por sedimentos siliciclásticos e fácies carbonáticas. As fácies siliciclásticas consistem em arenitos quartzosos, depósitos heterolíticos, argilitos e, menos comumente, conglomerados de colorações negra, verde oliva, cinza ou, ainda, variegada (i.e., violácea, amarelada a avermelhada).

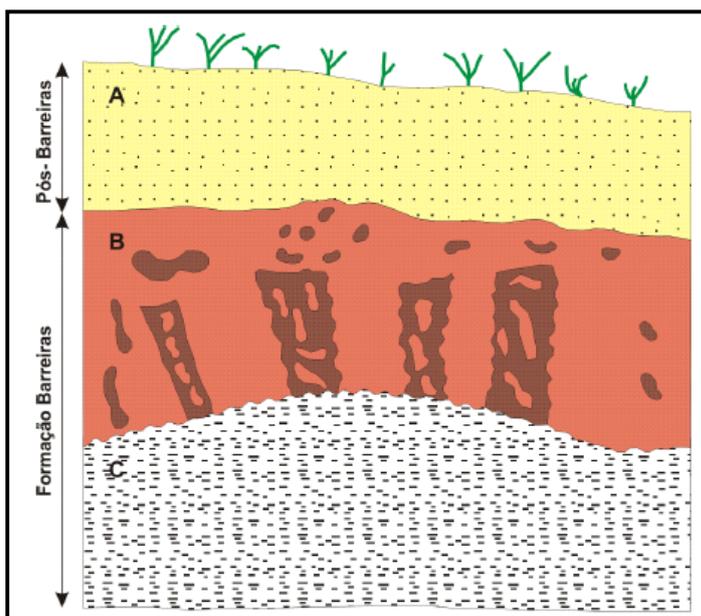
Por meio de correlações com depósitos homônimos, que ocorrem no nordeste brasileiro, esta formação foi datada inicialmente de idade correspondente ao Plioceno/Pleistoceno. Porém, estudos palinológicos posteriores mostraram que ela pertence ao Mioceno Médio. Estes estudos também mostraram a influência marinha na deposição dos litotipos da Formação Barreiras, o que levou a sugestão de que esta se encontra interdigitada com a Formação Pirabas (ROSSETTI, 2006), reforçando sugestões anteriores já apresentadas na literatura (p.ex., ARANTES *et al.*, 1972 *apud* ROSSETTI, 2006).

Na ilha do Mosqueiro, situada na porção noroeste do município de Belém, a Formação Barreiras foi descrita em detalhe a partir de falésias (Figura 2.13,) nas praias do Paraíso, Grande e Baía do Sol (IGREJA *et al.*, 1990; COSTA *et al.*, 1991).

Figura 2. 12 - Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior - Neogeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C - Sedimentos Pós-Barreiras.

ÉPOCA		UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQÜÊNCIA DEPOSICIONAL
PLIOCENO - QUATERNÁRIO		Pós-Barreiras	C
MIOCENO	SUPERIOR	Paleossolo Laterítico	DS3
	MÉDIO	Formação Barreiras Superior - Médio	B
	INFERIOR	Formação Barreiras Inferior	DS 2
OLIGOCENO SUPERIOR		Formação Pirabas	A
		Paleossolo Bauxítico - Laterítico	DS 1

Figura 2. 13 - Perfil geológico representativo das três camadas que constituem as falésias da ilha de Mosqueiro e adjacências. A - camada arenosa; B - camada areno argilosa a areno conglomerática; C - camada argilo arenosa (IGREJA *et al.* 1990). Ao lado fotografia correspondente ao perfil do Ariramba, ilha do Mosqueiro.



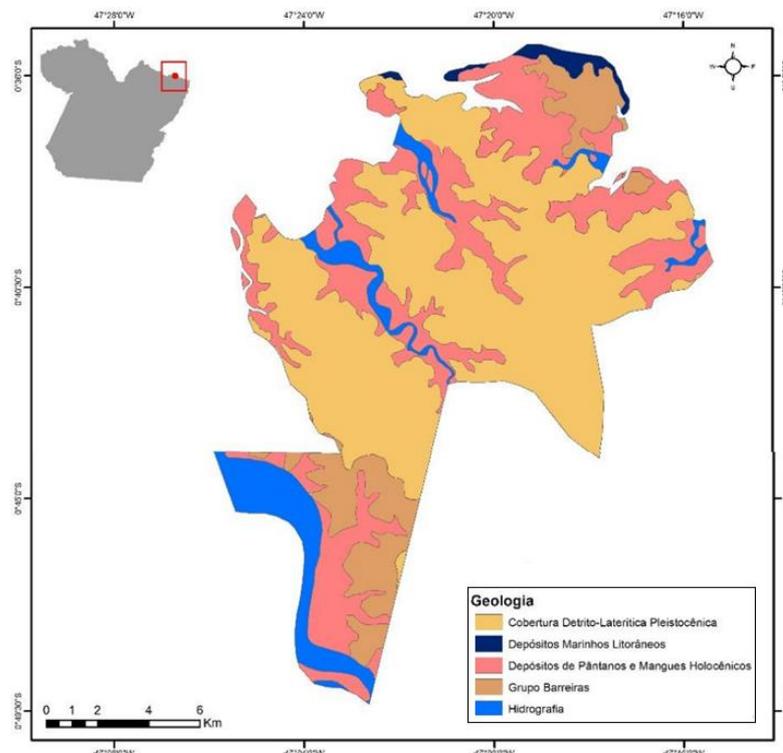
### Sedimentos Pós-Barreiras

Os sedimentos Pós-Barreiras ocorrem sobrepostos ao Grupo Barreiras, com o qual formam uma superfície erosiva. São constituídos por sedimentos de coloração amarelada, inconsolidados e facilmente desagregados, de composição predominantemente quartzosa, com granulação areno-argilosa, havendo ocorrência local de seixos e blocos de arenito ferruginoso (FARIAS *et al.*, 1992 *apud* COSTA, 2004). Sua origem deposicional é atribuída a movimentos gravitacionais com atuação secundária de dunas eólicas (ROSSETTI *et al.*, 1990 *apud* COSTA, 2004).

### Sedimentos Modernos

Os Sedimentos Modernos constituem depósitos fluviomarinhos inconsolidados presentes ao longo das planícies fluviais e costeiras, sendo formados por areias, siltes e argilas com restos de vegetais e de animais. Sua origem é ligada a erosão principalmente da Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, os quais são as unidades com maiores exposições na área de estudo. A Figura 2.14 mostra a distribuição das litologias e dos depósitos inconsolidados no município de Salinópolis (RODRIGUES, 2016).

Figura 2. 14 - Distribuição das litologias e depósitos inconsolidados na cidade de Salinópolis.



Fonte: Modificado de Rodrigues (2016).

#### 2.2.4 Contexto geomorfológico

Segundo Silva *et al.* (1994), a área de estudo se insere em duas grandes unidades morfoestruturais: Planalto Costeiro da Amazônia (Zona Bragantina) e Planícies Fluviomarinhas (Tabela 2.1).

O Planalto Costeiro é constituído por um relevo rebaixado, variando de plano a ondulado, fortemente dissecado, com cotas topográficas variando de 40 a 70 m, sendo formado como resultado de processos de aplainamento e dissecção da Formação Barreiras, o qual sustenta essa unidade.

As planícies flúvio-marinhas ocorrem nas porções mais próximas da linha de costa e ao longo dos vales fluviais e são caracterizadas pela presença de reentrâncias, que teriam surgido principalmente devido afogamento de vales fluviais. Nestas unidades encontram várzeas ou planícies fluviomarinhas, com relevos planos a suavemente ondulados, sendo sustentados por depósitos aluvionares e costeiros quaternários.

Em um trabalho envolvendo uma escala mais detalhada, Boulhosa e Souza Filho (2008) reconheceram 16 unidades geomorfológicas na Folha Salinópolis (SA-V-A-V).

Tabela 2. 1 - Unidades geomorfológicas identificadas na Folha Salinópolis.

Unidade Geomorfológica	Características geomorfológicas gerais
Planalto Costeiro	Composto pela Formação Barreiras e sedimentos pós-barreiras, correspondente ao embasamento da Planície Costeira.
Colinas e tabuleiros	Relevo ondulado e por vezes plano com altitudes de até 64m.
Planícies aluviais	Depósitos holocênicos influenciados por processos fluviais
Planícies estuarinas e de Maré	Depósitos holocênicos influenciados diretamente pelas correntes e marés.
Planície de intermaré lamosa – Manguezal	Planície lamosa, densamente vegetada por mangue, que sofre a influencia de marés, e processos estuarinos.
Planície de supramaré	Superfície areno-argilosa resultante da dissipação de dunas e erosão de falésias, com sedimentos retrabalhados e acumulados apenas durante as marés de sizígia.
Pântano salino	Depósitos areno-argilosos hipersalinos, localizados na zona de supramaré.
Barras arenosas	Barras arenosas longitudinais desenvolvidas na foz dos canais de maré e de baías.
Planície litorânea	Depósitos holocênicos que sofrem influência de ondas, ventos e marés.
Antigas cristas de praia	Corpos arenosos alongados isolados pelos processos litorâneos e que repousam sobre depósitos lamosos de manguezais.
Dunas vegetadas	Campos de dunas que foram totalmente descaracterizados e vegetados.
Dunas costeiras atuais	Dunas fixas e móveis paralelas À linha de costa.
Interdunas	Dunas fixas e móveis entre lagos.
Praias de macromaré	Estão localizadas na zona de maior energia do litoral desde o nível de baixa-mar até a linha máxima de alcance das marés (base dos campos de dunas e falésias ativas).
Lagos	Corpos hídricos associados aos campos de dunas atuais e paleodunas, estando limitados pelas mesmas.

Fonte: Boulhosa e Souza Filho (2008).

### 2.2.5 Distribuição da rede de drenagem

Segundo Centeno (2016), a área de Salinópolis está inserida em um contexto morfoestrutural correspondente a zona homóloga 02 de análise de drenagem do referido trabalho. Esta zona (Figura 2.15) apresenta uma geometria alongada na direção NW -SE que se estende do norte ao sudeste da área. Isso é, em grande parte, reflexo da orientação dos seus elementos de drenagem principais, os quais se encontram predominantemente seguindo esta mesma direção, em N40°-50°W e N10°-20°W. Alinhamentos em N40°-50°E e N60°-70°W

também ocorrem de maneira considerável. A disposição desses elementos impõem um padrão de treliça para a drenagem.

Além dessas características, a ZH2 apresenta uma densidade média de drenagem em relação às outras ZHs, angularidade média, sinuosidade baixa e assimetria moderada. Dentre as anomalias verificadas por Centeno 2016, a que mais se destaca é a forma meandrante de um canal na porção norte da ZH, a dobra em cotovelo verificada no Rio Xindeua, que muda de uma direção N-S para E- W, e a feição em arco no Rio Japerica, que sofre uma inflexão de E-W para NE-SW. Esses tipos de anomalias ocorrem ao longo de toda essa ZH, sendo também verificadas de maneira expressiva feições anastomosadas e alargamento de rio.

Figura 2. 15 - Mapa da distribuição da rede de drenagem no município de Salinópolis e adjacências.



Fonte: Centeno (2016).

## CAPÍTULO 3 LEVANTAMENTO DE DADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Uso da água

Dentre os 102 poços cadastrados atualmente no Sistema de Informações das águas subterrâneas SIAGAS-CPRM para o município de Salinópolis, 91 poços foram selecionados e classificados quanto à profundidade, em intervalos equivalentes a 30 m. Para cada intervalo foi definida a quantidade e percentual de ocorrência, tipo de formação geológica, uso predominante da água, e vazão de estabilização média (Tabela 3.12).

Tabela 3. 1 - Quantificação de 91 poços amostrados do SIAGAS: Profundidade (m); Quantidade (%); Unidade geológica; Uso da água; Vazão média (m<sup>3</sup>/h).

<b>Profundidade (poços)</b>	<b>Quantidade (poços)</b>	<b>%</b>	<b>Unidade geológica</b>	<b>Uso da água</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>P ≤ 30 m</b>	7	8%	Barreiras/Pirabas	doméstico	6,0
<b>30 m &lt; P ≤ 60 m</b>	16	18%	Pirabas	doméstico	7,8
<b>60 m &lt; P ≤ 90 m</b>	7	8%	Pirabas	múltiplo/urbano	16,3
<b>90 m &lt; P ≤ 120 m</b>	8	9%	Pirabas	urbano	14,3
<b>120 m &lt; P ≤ 150 m</b>	31	34%	Pirabas	urbano/doméstico	72,3
<b>150 m &lt; P ≤ 180 m</b>	22	24%	Pirabas	urbano/doméstico	64,6
<b>P &gt; 180 m</b>	0	0%	s/informação	s/informação	0,0

O resultado do levantamento apontou um total de 74% de poços utilizados para abastecimento público, com profundidades abaixo de 60 metros, e vazões acima de 60 m<sup>3</sup>/hora, todos correspondentes a exploração do sistema aquífero Pirabas, demonstrando a importância do manancial para o abastecimento público de subterrânea.

### 3.2 Levantamento geofísico

#### 3.2.1 Localização dos Dados Geofísicos

Os dados geofísicos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de poços perfilados com geofísica, e tomografias elétricas (TE) realizadas no período de 02 a 07/12/2017 e na data de 31/05/2018 (Figura 3.1).

Poços em diferentes bairros foram alvos das investigações e escolhidos usando o critério da proximidade de poços perfilados com geofísica: Jardim Atalaia, Barreiro e Açaí (Centro). Em cada bairro foram executadas duas linhas de tomografia elétrica em direções perpendiculares entre si (Tabela 3.2).

Figura 3. 1 - Mapa de localização das seis seções de Tomografia Elétrica (TE) realizadas na área de estudo. Localização dos poços com perfilagem geofísica.

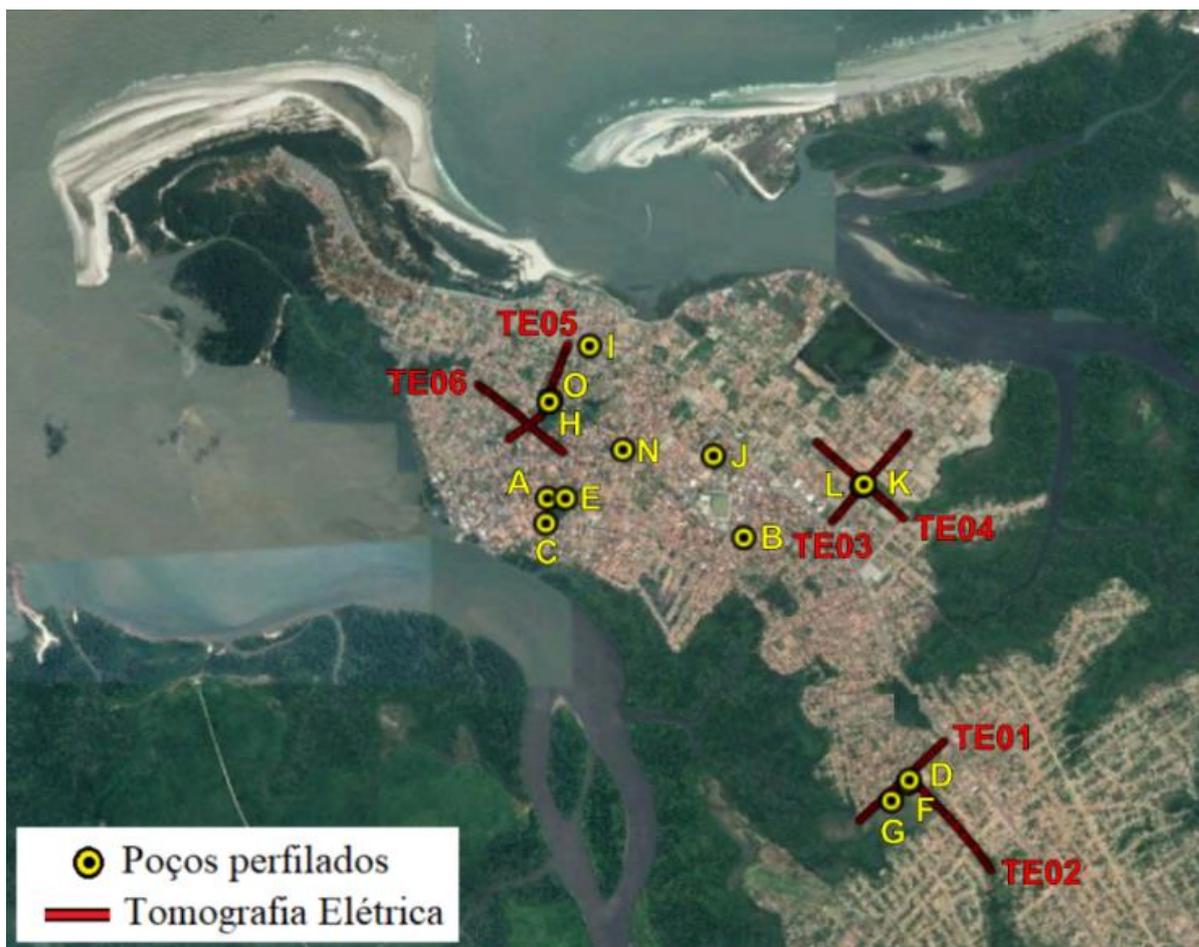


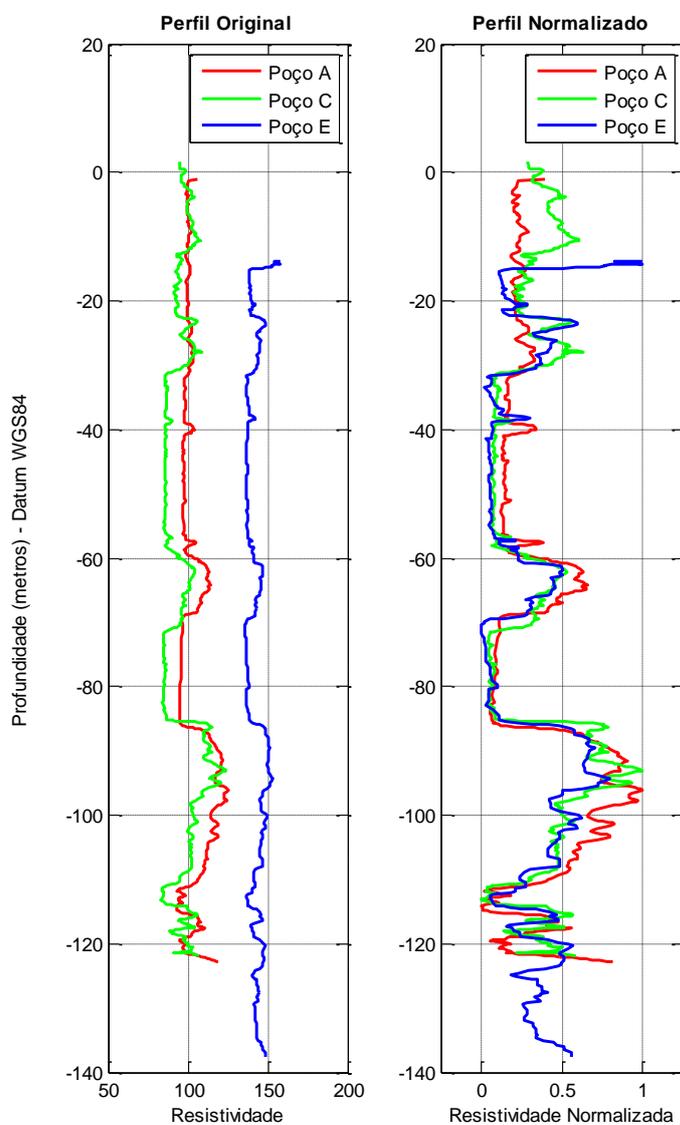
Tabela 3. 2 - Endereços onde foram realizados os levantamentos geofísicos através das seções de Tomografia Elétrica (TE). Salinópolis.

Tomografia Elétrica (TE)	Orientação	Data	Local
TE01	NE – SW	07/12/2017	Rua Padre José Tocantins
TE02	SE – NW	02/12/2017 e 31/05/2018	Rua Dilcinardo Batista
TE03	SW – NE	03/12/2017	Rua H
TE04	SE – NW	04/12/2017	Rua Quinta
TE05	NE – SW	05/12/2017	Av. Pres. Getúlio Vargas
TE06	NW – SE	06/12/2017	Rua Benjamin Constant

A Figura 3.2 abaixo mostra os perfis de resistividade de três poços: A (7 de setembro2); C (7 de setembro1) e E (7 de setembro3) próximos um do outro. Os perfis originais mostram uma diferença na escala de resistividade entre os três poços, levando à interpretação de que o poço E está em um ambiente mais resistivo que os poços A e C.

Após a normalização verifica-se forte correlação entre os perfis, que é um resultado esperado para poços próximos entre si. Nos perfis geofísicos, a normalização foi realizada perfil por perfil e para as tomografias elétricas foi realizado o mesmo tratamento, porém, duas a duas (TE01-TE02; TE03-TE04, e TE05-TE06).

Figura 3. 2 - Perfis de resistividade originais (à esquerda) e normalizados à direita), Poços A, C e E.



### 3.2.2 Interpretação Geofísica

#### **Bairro Açaí (Centro)**

Em ambas tomografias é observada uma camada superficial com resistividade mais elevada. A resistividade dessa camada mais superficial é influenciada pela resistência de contato provocada pelo efeito antrópico, pois o levantamento foi realizado em rua pavimentada (asfalto, aterro, cobertura laterítica).

A tomografia TE05 (Figura 3.3) de direção NE-SW, apresenta comportamento estratificado com suaves variações laterais de resistividade. As principais e mais acentuadas variações de resistividades estão assinaladas na figura 3.5 e mostram planos com mergulhos altos, sub-verticais, para NE.

A tomografia TE06 de direção NW-SE, também apresenta-se estratificada, porém com variações mais acentuadas de resistividade. As variações laterais de resistividade mais acentuadas estão indicadas na figura 3.3 e apresentam mergulho sub-vertical para NW.

#### **Bairro Jardim Atalaia**

Na tomografia TE03 as camadas apresentam mergulho suave para SE. As interfaces entre as camadas não ficam bem definidas em alguns trechos (linha tracejada) devido às discontinuidades laterais discretas de resistividade. No entanto, a tomografia TE04, perpendicular à TE03 no ponto assinalado, mostra um ambiente em subsuperfície mais compartimentado, com discontinuidades laterais (linha contínua grossa) mais fortes e sub-verticais. Notar que, em ambas as tomografias (Figura 3.4), a camada superficial é mais resistiva nos altos topográficos (a noroeste da TE03 e nos extremos da TE04).

#### **Barreiro**

As tomografias apresentaram uma camada superficial resistiva mais espessa em comparação com os dos bairros Jardim Atalaia e Açaí-Centro, chegando a 30m de profundidade em alguns trechos. Apesar de terem sido realizadas em ruas em alguns trechos não asfaltadas, a pavimentação feita com piçarra rica em laterita resultou em valores de resistência de contato acima do ideal, em torno de 8 kOhm.m, o que pode ter influenciado nos valores mais superficiais de resistividade (Figura 3.5).

Na TE01 (Figura 3.5), cuja topografia vai diminuindo para SW, a camada superficial e resistiva torna-se mais adelgada. A camada inferior apresenta baixa

resistividade e descontinuidades laterais com mergulho para SW. É possível identificar mais um horizonte resistivo à NE, interrompido por descontinuidades de resistividade mencionadas acima.

A tomografia TE02 (Figura 3.5) apresenta estratificação e variações de resistividades mais suaves. A camada superficial resistiva é mais delgada que na TE01. À noroeste tem-se um horizonte resistivo com forte descontinuidade que pode estar relacionada à alguma reorganização estrutural pós-deposicional.

Figura 3. 3 - Seções de Tomografias Elétricas (TE05 e TE06) no sistema Açai-Centro –Zona urbana de Salinópolis.

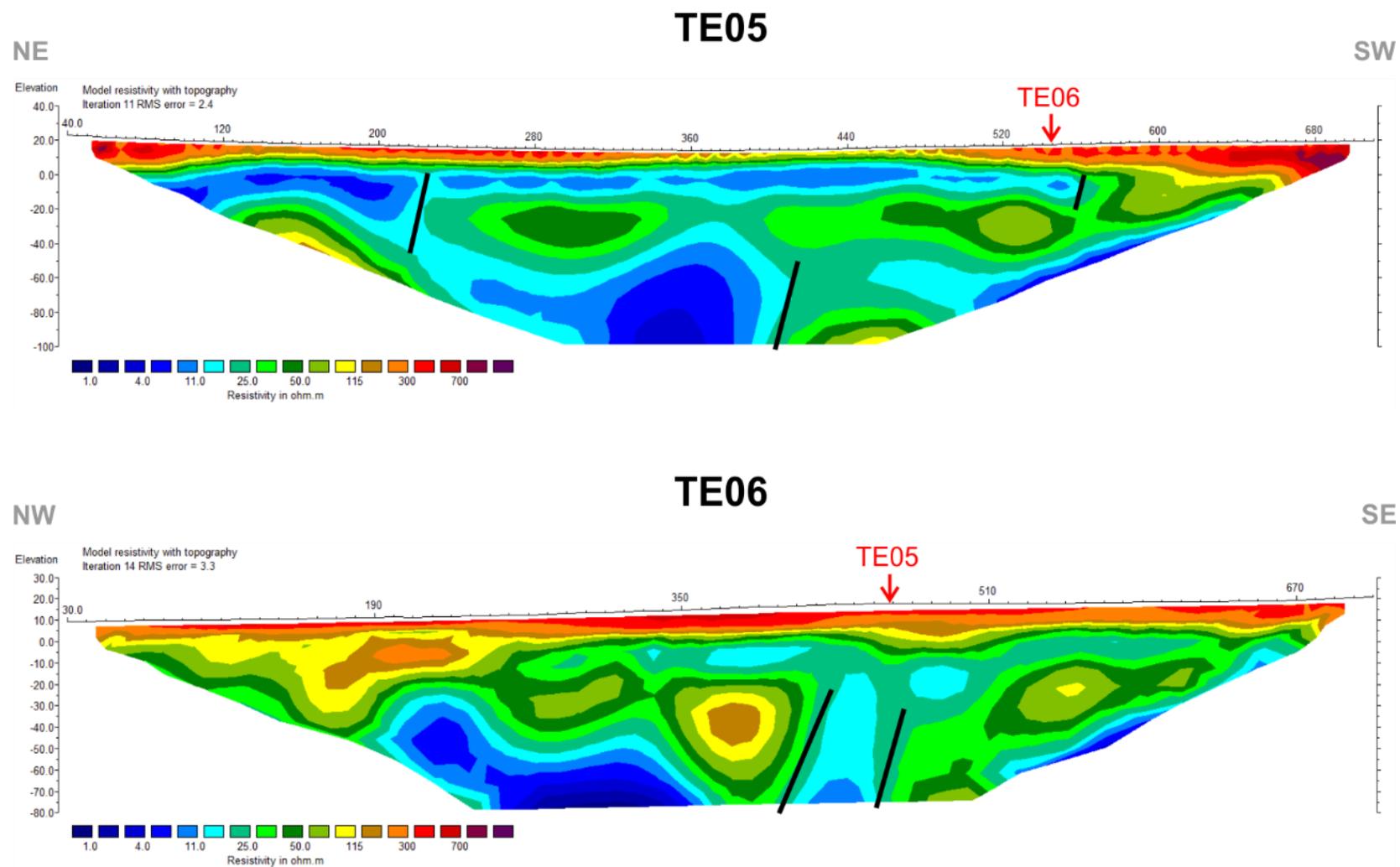


Figura 3. 4 - Seções de Tomografias Elétricas do sistema Jardim Atalaia (TE03 e TE04). Zona urbana de Salinópolis.

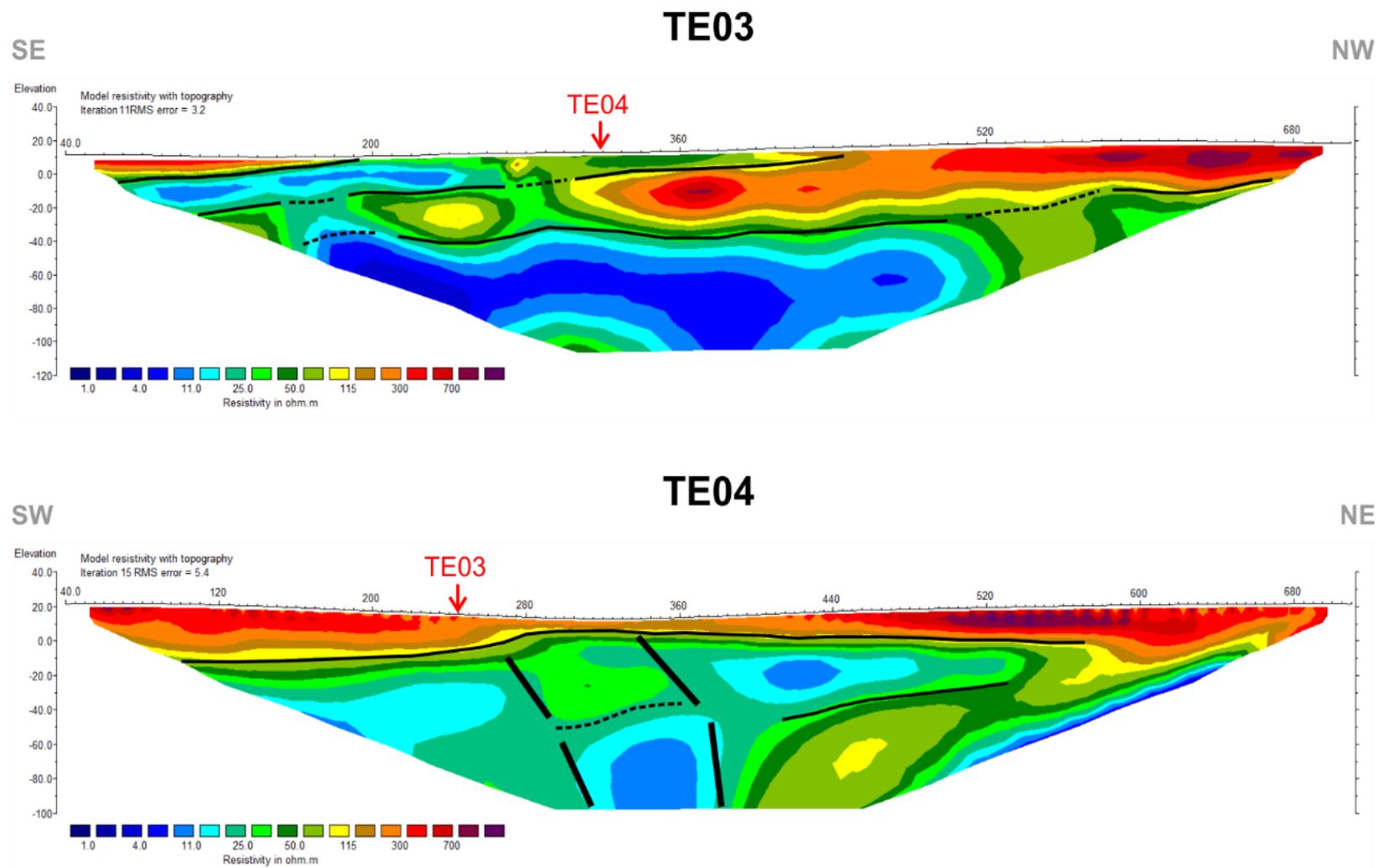
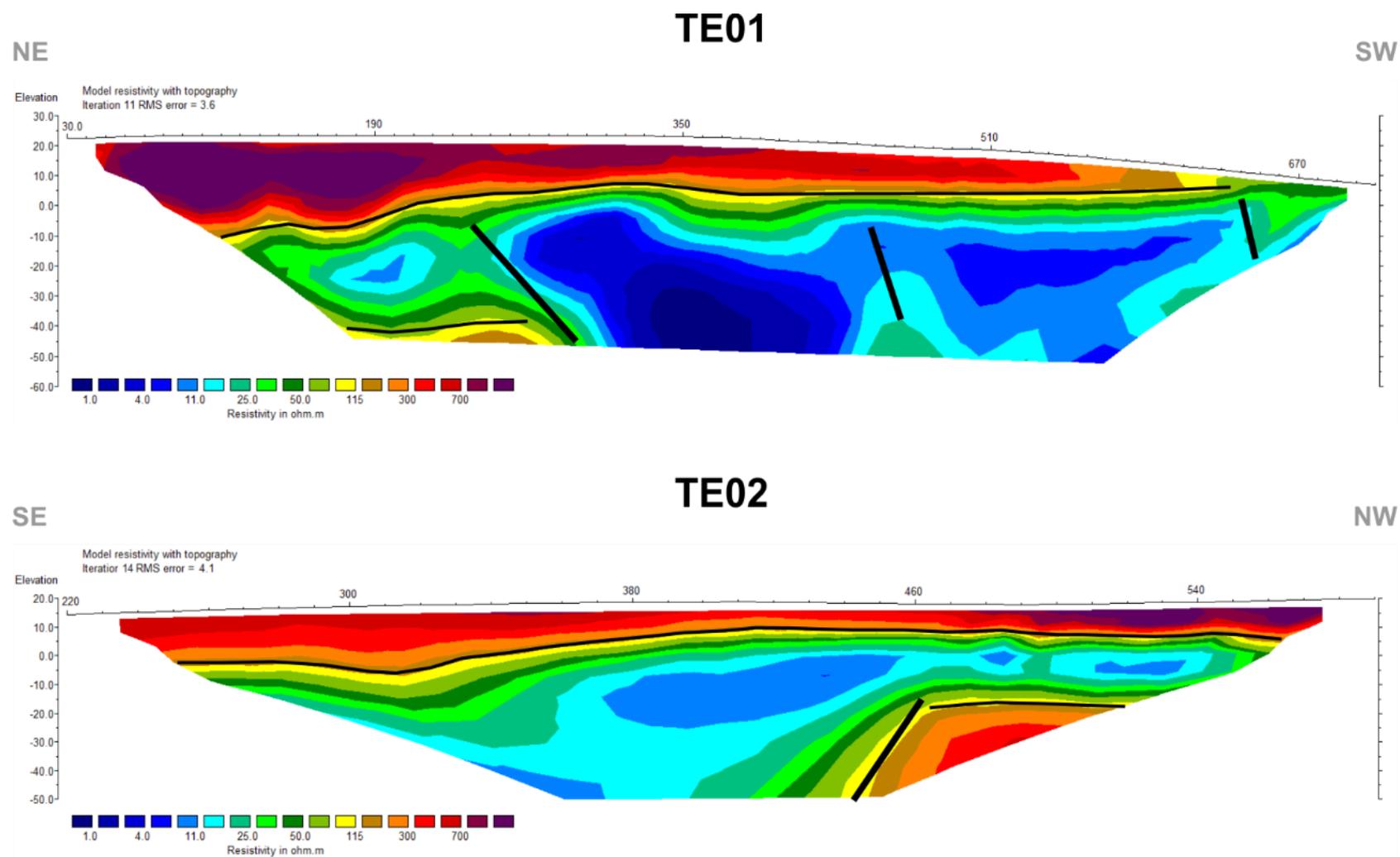


Figura 3. 5 - Seções de Tomografia Elétrica (TE01 e TE02) no sistema Barreiro - Salinópolis.



### 3.2.3 Discussão dos resultados geofísicos sob a perspectiva geológica

Devido à falta de mais poços alinhados para comparação normalizada da geofísica, não foi possível fazer correlação entre as áreas perfiladas. Tanto no bairro Jardim Atalaia (pouca informação de poços) e no Barreiro (a tomografia elétrica não conseguiu um bom registro devido interferências e/ou ruídos, quando da realização das seções), encontrou-se dificuldades para de fazer uma boa correlação entre as TE's e os perfis de poços.

O melhor par ordenado de Tomografia Elétrica para a interpretação da geofísica com a geologia é o TE05 e TE06, localizados no Bairro do Açaí. Verifica-se que os valores da resistividade tem relação direta com o arcabouço litológico, registrados nos diversos poços construídos em Salinópolis, e em especial os poços Açaí1 (soterrado), Açaí2 (RIMAS) e Açaí3, em bombeamento pela COSANPA.

Nessas tomografias, a camada superficial com resistividade mais elevada, é influenciada pela resistência de contato provocada pelo efeito antrópico, dada a presença de rua pavimentada (asfalto, cobertura laterítica). Sofrem também influência direta dos materiais da Formação Barreiras e dos Sedimentos Pós Barreiras, que são resistivos.

A tomografia TE05 (Figura 3.4), de direção NE-SW, o comportamento estratificado com suaves variações laterais de resistividade representam a resposta do aquífero Pirabas Superior. As variações acentuadas de resistividade que mostram inclinação de alto angulo (sub-vertical) para nordeste, podem associar-se à camada selante formada pelo extenso pacote argiloso presente em todas as perfilagens de poços.

A parte basal, com menores valores de resistividade relaciona-se ao aquífero Pirabas Inferior, com resposta característica de calcário com muita água, em situação de confinamento e apresentando altas vazões. É representada pelo poço Açaí1, com 160 metros de profundidade e vazão de 130 m<sup>3</sup>/hora (Figura 3.6).

Freimann (2012) apontou que na correlação dos perfis geofísicos dos poços da COSANPA em Salinópolis, os 02 aquíferos mais rasos tendem a ser menos espessos e apresentam conteúdo de argila em alguns pontos, sendo o mais superficial de maior propensão à contaminação externa, visto que o mesmo deve aflorar nos baixos topográficos, fatores que reduzem o potencial do aquífero.

Os 02 aquíferos mais profundos relacionados ao sistema aquífero Pirabas Inferior, apresentam boa espessura em toda a extensão de Salinópolis, continuidade lateral muito bem definida, com o conteúdo de argila diminuindo do centro em direção à saída da cidade, representando, assim, os aquíferos de maior potencialidade exploratória de água subterrânea no município (Figuras 3.7 e 3.8).

Figura 3. 6 - Perfil construtivo, geológico e gráfico da evolução do nível estático (NE) de água do poço Açai2. (RIMAS-WEB). Ano de 2015 a 2018.

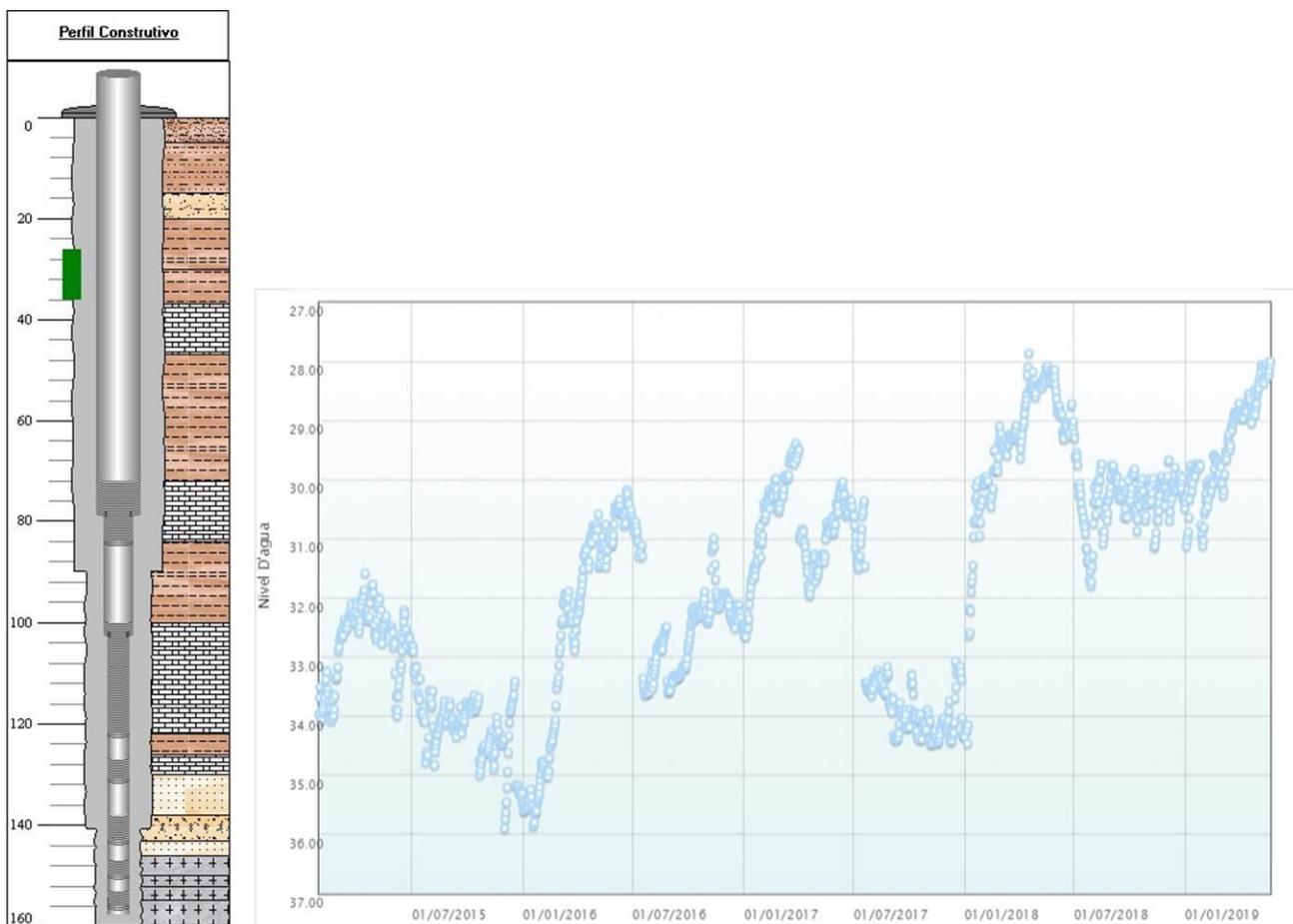
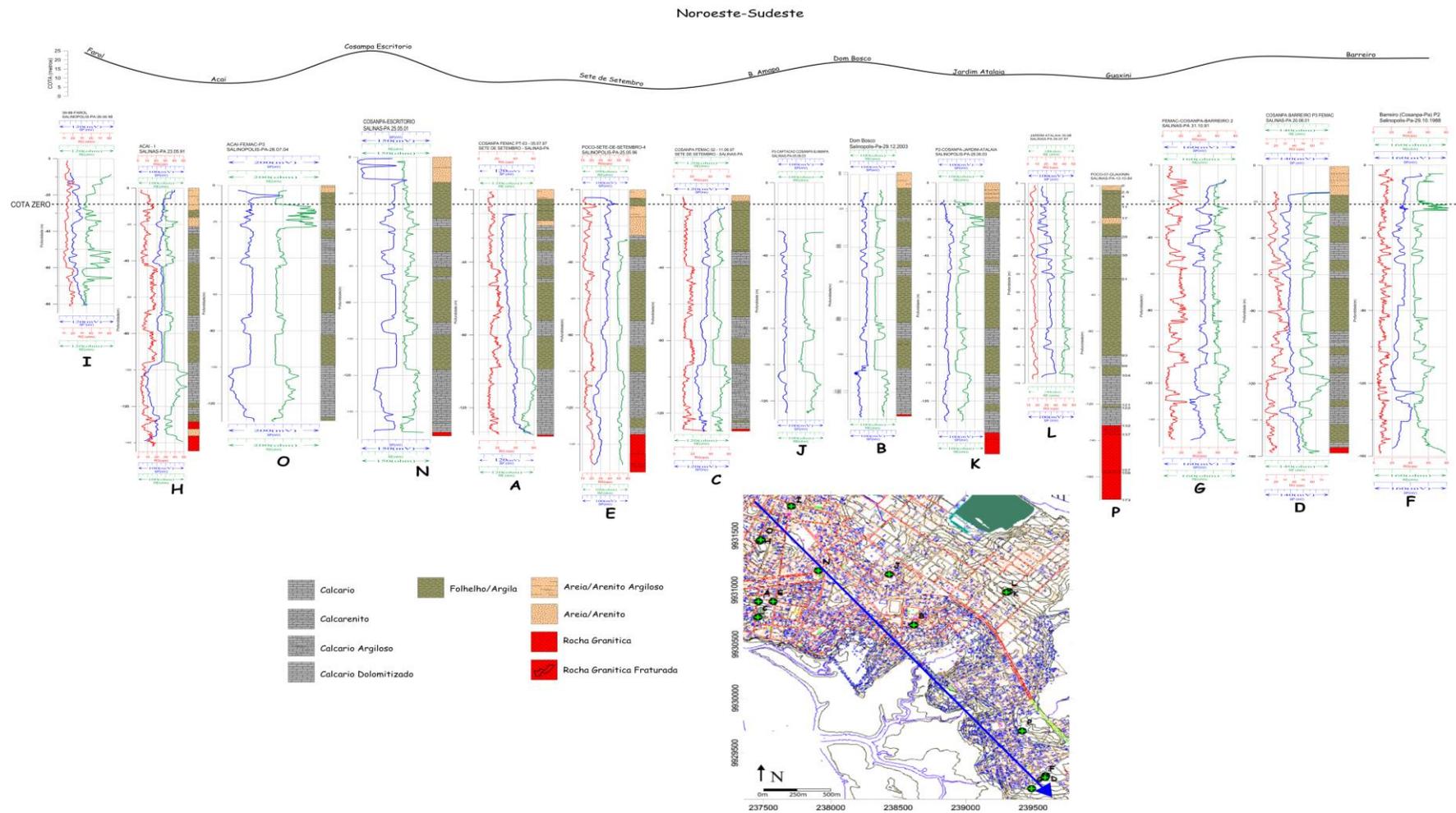


Figura 3.7 - Distribuição dos perfis geofísicos e litológicos de poços da COSANPA na direção NW-SE, em Salinópolis. A camada argilosa (30 m) está presente em todos os perfis. A cor vermelha representa o embasamento cristalino.



Fonte: (FREIMANN, 2012)

### 3.2.4 Geração dos blocos geofísicos

A representação dos blocos diagramas foi gerada através do programa Oasis Montaj, obtendo-se curvas de níveis com intervalos de 5 em 5 metros, seis seções orientadas de Tomografia Elétrica (TE) e locação de 12 poços com perfilagem geofísica, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Blocos gerados com os respectivos poços e Tomografias Elétricas

<b>Blocos</b>	<b>Poços</b>	<b>Tomografia Elétrica (TE)</b>	<b>Orientação</b>
<b>Barreiro</b>	D (Barreiro3) F (Barreiro4) G (Barreiro2)	<b>TE01</b>	NE – SW
		<b>TE02</b>	SE – NW
<b>Jardim Atalaia</b>	B (Dom Bosco) J (Amapá)	<b>TE03</b>	SW – NE
		<b>TE04</b>	SE – NW
<b>Açaí (Centro)</b>	A (7 de set2) C (7 de set1) E (7 de set3) H (Açaí3) I (Farol) N (Escritório) Açaí2-RIMAS	<b>TE05</b>	NE – SW
		<b>TE06</b>	NW – SE

As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 mostram o comportamento espacial dos blocos gerados através da interpolação dos dados geofísicos nos sistemas Açaí; Jardim Atalaia e Barreiro:

Figura 3. 8 - Bloco gerado no programa Oasis Montaj do Sistema Açai (Centro), com a espacialização das curvas de níveis, TE05 e TE06 e os poços da COSANPA nas proximidades.

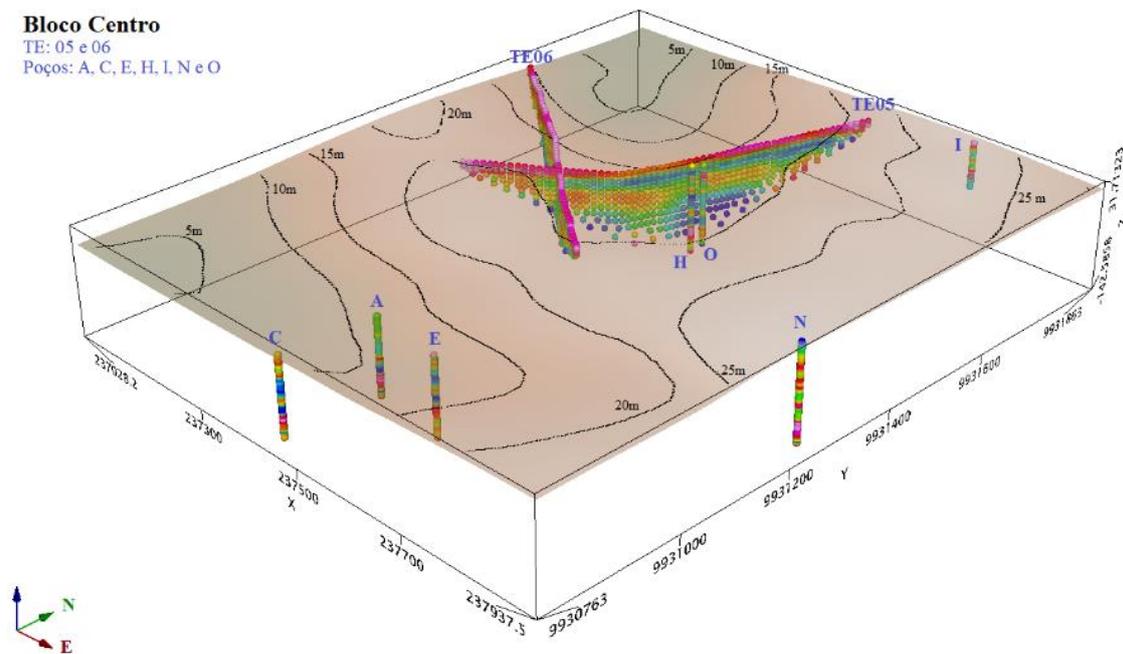


Figura 3. 9 - Bloco do Sistema Jardim Atalaia (Bloco Atlântico), com a espacialização das curvas de níveis, TE e os poços da COSANPA nas proximidades.

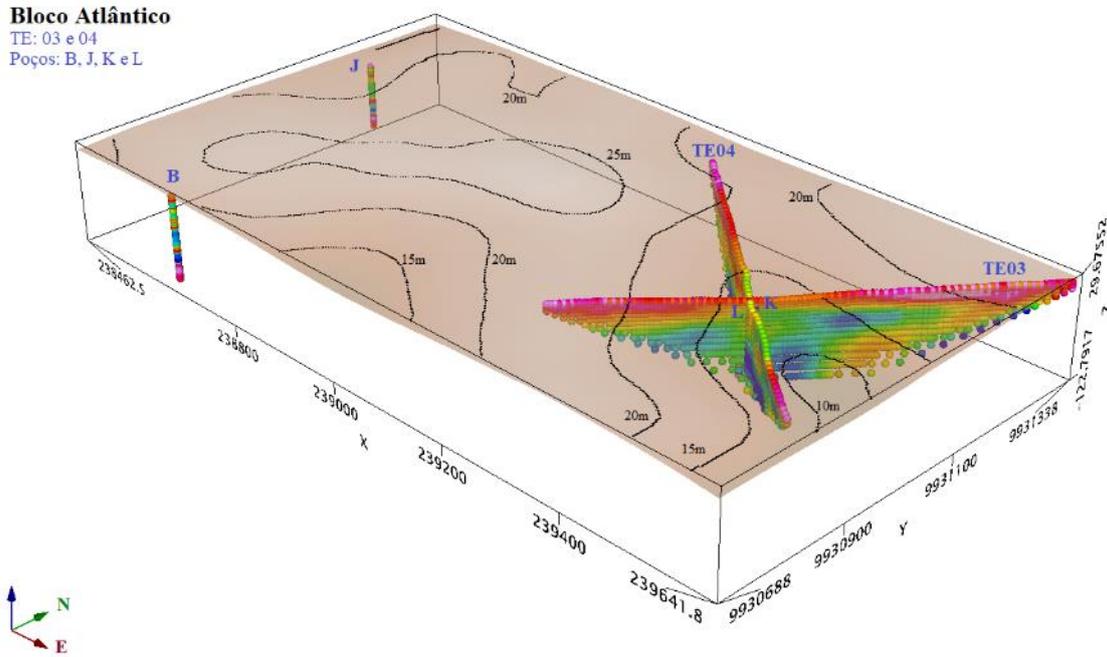
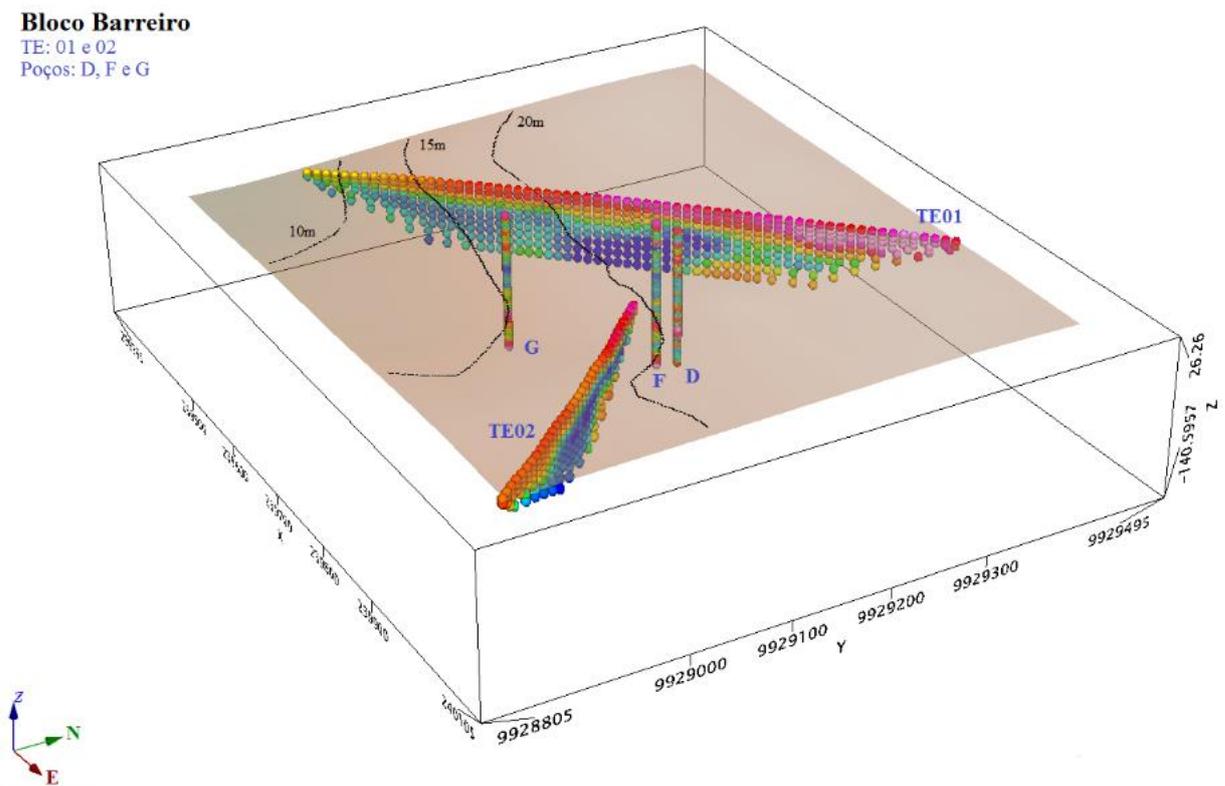
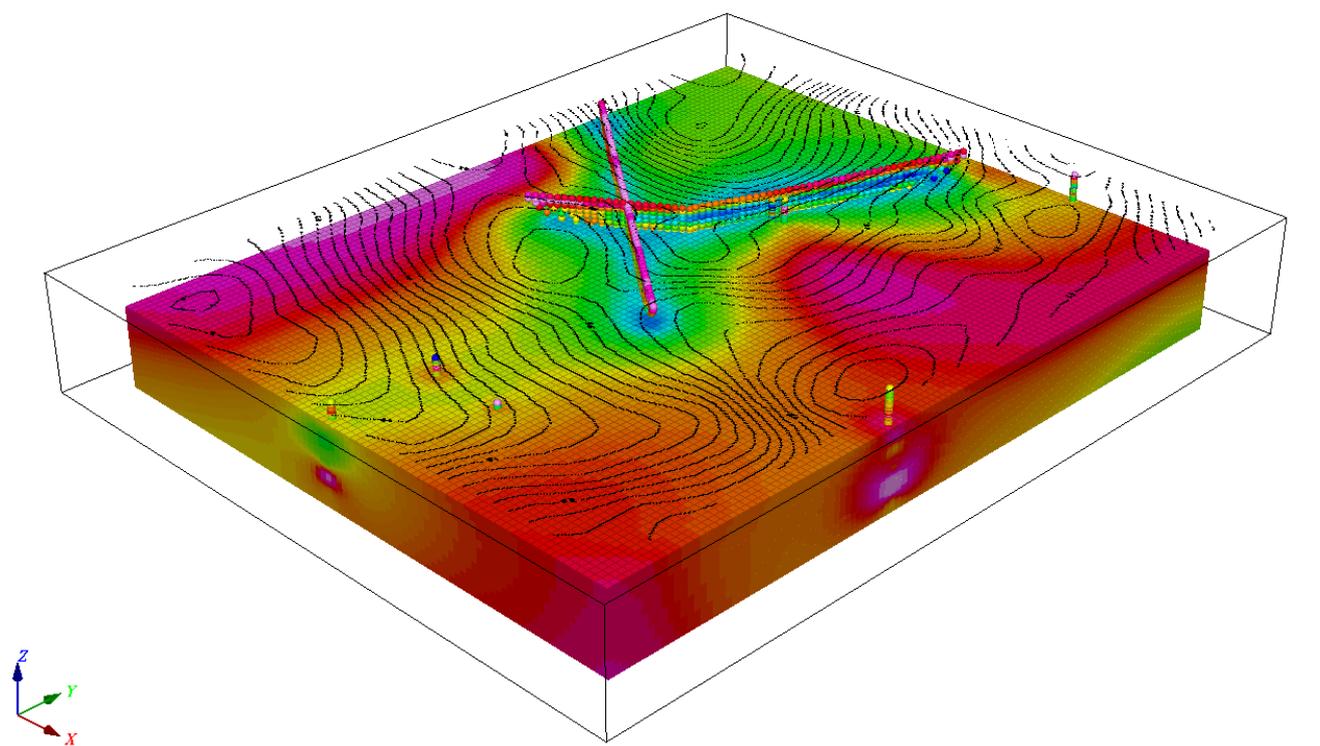


Figura 3. 10 - Bloco do Sistema Barreiro, com a espacialização das curvas de níveis, TE e os poços da COSANPA nas proximidades.



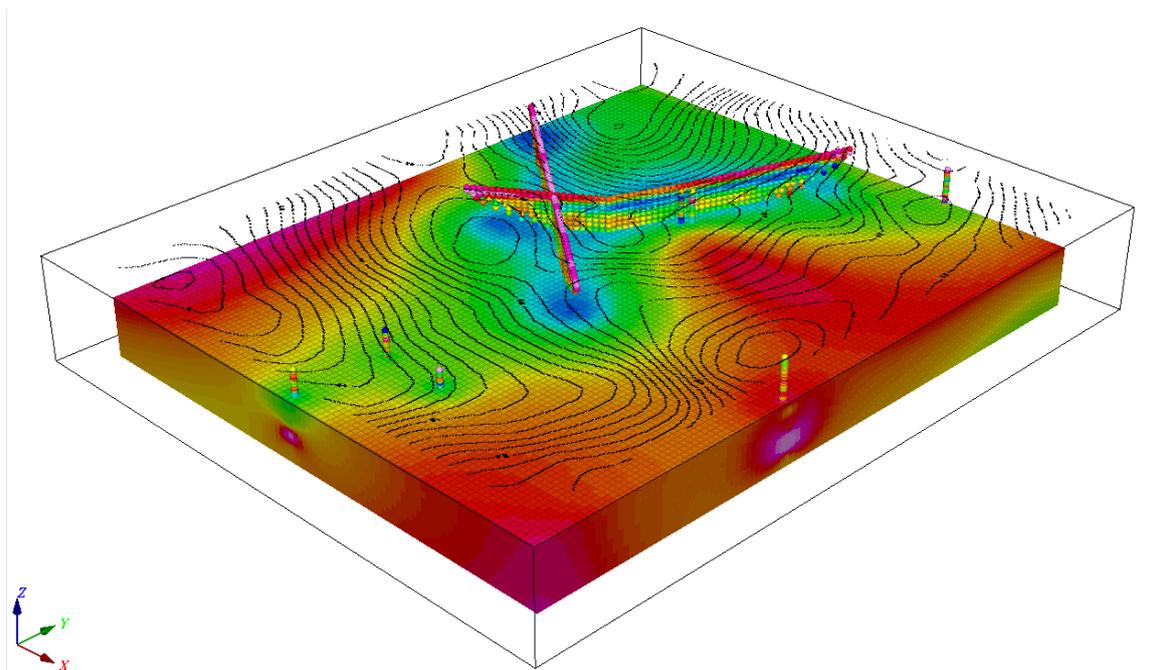
A Figura 3.11 representa a superfície da cota -20 metros em profundidade no bloco Açaí. Essa profundidade, nos poços estudados, através do perfil litológico, das curvas dos métodos geofísicos de poços (raios gama, resistividade e potencial elétrico) define a passagem da Formação Barreiras para a Formação Pirabas, representa o topo do aquífero Pirabas Superior.

Figura 3. 11 - Representação do corte horizontal na cota de -20m. Horizonte que marca a passagem da Formação Barreiras para a Formação Pirabas (topo do aquífero Pirabas Superior).



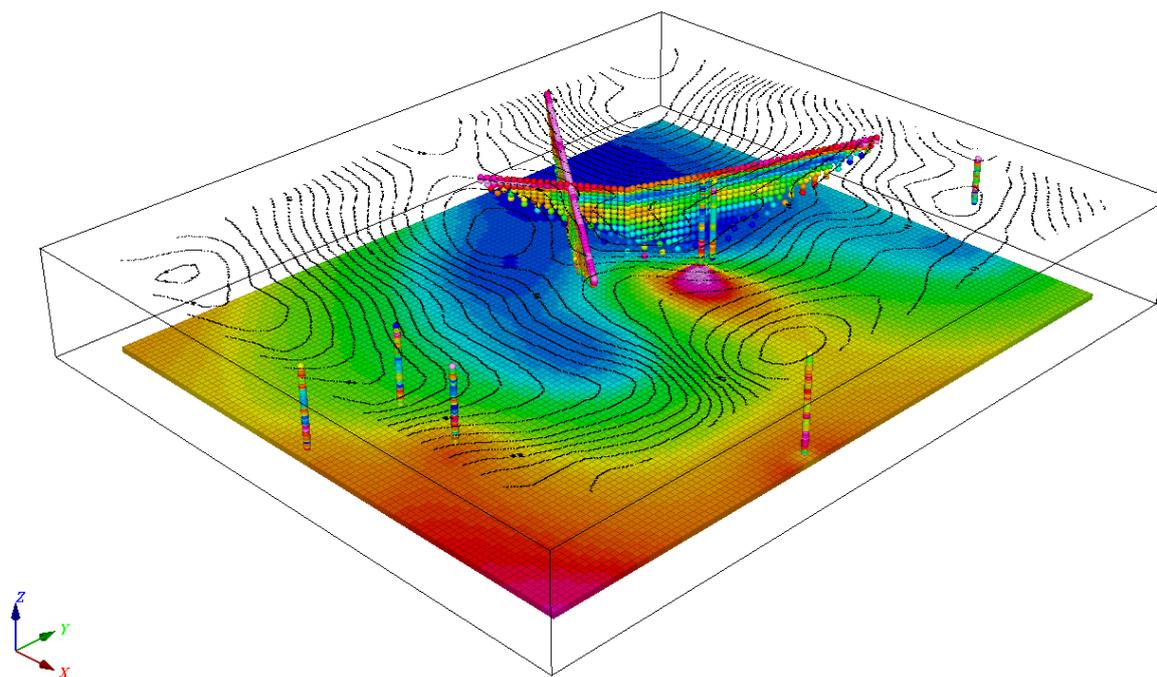
A Figura 3.12 corresponde à representação da cota -40m; horizonte que marca a passagem a base da camada argilosa selante com o topo do Aquífero Pirabas Inferior.

Figura 3. 12 - Corte horizontal na cota -40m. Horizonte que marca a passagem a base da camada argilosa selante com o topo do Aquífero Pirabas Inferior.



A Figura 3.13 ilustra a cota -130m. que determina a passagem da base do Aquífero Pirabas Inferior com o substrato do embasamento cristalino.

Figura 3. 13 - Corte horizontal na cota -130m. Horizonte que marca a passagem da base do Aquífero Pirabas Inferior com o substrato do embasamento cristalino.



### 3.2.5 Avaliação dos dados geofísicos

O tratamento dos dados geofísicos por seções de TE proporcionou resposta mais acurada para interpretação do comportamento do aquífero Pirabas, porém a escala de trabalho foi reduzida, onde não se teve o alcance espacial necessário para visualizar as relações dos poços com as seções e geração de bloco.

Além disso, as operações de campo enfrentaram problemas nas seções, principalmente no sistema Barreiro, que apesar de ter sido refeito, continuou apresentando baixa resolução. No sistema Jardim Atalaia também houve interferências (ruídos) nas medidas de resistividade.

A intenção inicial de gerar um modelo conceitual, através da visualização de blocos em 3D, não logrou êxito, pois não se conseguiu chegar ao topo do embasamento nas seções trabalhadas. O trabalho ficou prejudicado devido à abertura da linha de TE com 700 metros de largura, e ainda foram danificados 02 carretéis de cabo na operação de campo.

Os resultados alcançados permitem sugerir que há necessidade de se aprofundar os estudos do comportamento espacial desse importante manancial. A ausência de exposições geológicas preservadas aponta para a necessidade da escolha de métodos geofísicos mais adequados para se avançar nas investigações, sugerindo-se pesquisas de escala regional, tal como o método gravimétrico, magneto-telúrico ou eletromagnético.

Os resultados indicam que o Aquífero Pirabas é controlado por camadas sub-horizontais, ao passo que, controles estruturais não podem ser assumidos na escala de observação, muito embora, a tectônica possa ter controlado regionalmente a sucessão estudada, como possível resposta a reativações do embasamento.

### 3.3 Caracterização hidroquímica

Este estudo objetivou a caracterização e avaliação qualitativa em 04 campanhas de amostragens das águas que circulam no sistema aquífero Pirabas. Vale ressaltar que a definição de dois sistemas aquíferos diferenciados (Pirabas Inferior e Pirabas Superior), se deu em função da posição das seções filtrantes de cada poço analisado, e

suas relações com as características hidroquímicas apresentadas, ambos correlacionados as rochas da Formação Pirabas (Mioceno Inferior).

O sistema aquífero Pirabas Inferior tem sua representação relacionada aos poços com seções filtrantes posicionadas abaixo da camada de argila de trinta a quarenta metros de espessura e acima do embasamento cristalino, e corresponde a todos os poços em bombeamento da COSANPA: 13 poços coletados no período chuvoso de 2017 (abril e junho) e quatorze poços coletados no período seco de 2017 (dezembro).

O sistema aquífero Pirabas Superior está relacionado aos 03 poços pertencentes a RIMAS-BE, onde as coletas foram realizadas nas seções filtrantes posicionadas acima da camada de argila (30 a 40 metros), no período seco (dezembro) do anos de 2016, 2017 e 2018.

### 3.3.1 Análise de Tratamento de Dados Hidroquímicos

Os parâmetros físico-químicos foram interpretados com base nos valores analisados *in loco* de pH, condutividade elétrica e temperatura, no período chuvoso (abril e junho: 13 poços em bombeamento da COSANPA) e no período seco (dezembro: 03 poços da RIMAS e mais 14 poços em bombeamento da COSANPA) ambos no ano de 2017, visto que abrangeram um ano hidrológico e maior quantidade amostral. Foram consideradas também as concentrações de bicarbonato, carbonato e alcalinidade total determinados em laboratório (Tabelas 2.4 e 2.5).

Tabela 3. 4 - Resultado das análises de pH, CE a 20°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), T (°C), alcalinidade total ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) e espécies químicas (mg/L) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA em Salinópolis. Período Chuvoso (abril e junho de 2017).

Poços	Coleta	T (C°)	Ph	CE	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Hidróxido	At	Fluoreto
<b>Amapá</b>	11/04/2017	30	7,39	506	1,35	231,9	ND	192,5	0,61
<b>Barreiro 3</b>	11/04/2017	29	7,64	501	1,28	225,6	ND	187,2	0,71
<b>Barreiro 5</b>	11/04/2017	28	7,69	504	2,63	232,5	ND	195,2	0,75
<b>Barreiro 4</b>	12/04/2017	30	7,91	515	2	221,9	ND	185,3	0,72
<b>Guaxini 1</b>	12/04/2017	28,5	8	511	2,44	228,8	ND	191,8	0,73
<b>7 de Setembro 2</b>	13/04/2017	29,4	7,74	505	1,71	254,4	ND	211,6	0,55
<b>7 de Setembro 3</b>	13/04/2017	29,5	7,87	494	2,07	245,4	ND	204,8	0,55
<b>7 de Setembro 1</b>	13/04/2017	29,3	7,82	497	1,8	255,3	ND	212,4	0,45
<b>Escritório</b>	13/04/2017	30,8	7,74	490	1,47	242,2	ND	201,1	0,59
<b>Guaxini 2</b>	13/04/2017	29,4	7,81	515	1,24	223,9	ND	185,7	0,72
<b>Açai 3</b>	13/04/2017	30	7,90	479	2,22	251	ND	209,6	0,56
<b>Farol</b>	13/04/2017	29,7	7,49	491	1,55	246,3	ND	204,7	0,55
<b>Dom Bosco</b>	14/04/2017	29,3	7,87	521	1,83	228,6	ND	190,6	0,70

Tabela 3. 5 - Resultado das análises de pH, CE a 20°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), T ( $^{\circ}\text{C}$ ), alcalinidade total ( $\text{mgCaCO}_3\text{-}/\text{L}$ ) e espécies químicas ( $\text{mg}/\text{L}$ ) dos 03 poços da RIMAS e 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Seco: dezembro de 2017. Total de 17 poços. At: Alcalinidade total.

Poços	Coleta	T $^{\circ}\text{C}$	Ph	CE	Carbonato	Bicarbonato	Hidróxido	At
<b>Guaxini Pentágono</b>	04/12/2017	29,36	7,99	337	ND	118,05	ND	96,87
<b>Escritório</b>	05/12/2017	29,7	7,80	496	1,12	238,04	0,013	197,15
<b>7 de Setembro 2</b>	05/12/2017	30,8	7	509	4,32	247,52	0,051	210,36
<b>Farol</b>	05/12/2017	30,4	7,72	489	2,38	243,92	0,028	204,11
<b>Açaí 3</b>	05/12/2017	30,4	7,75	483	2,87	247,84	0,033	208,16
<b>Dom Bosco</b>	05/12/2017	29	8,31	513	1,83	231,81	0,022	193,24
<b>Barreiro 4</b>	05/12/2017	29	7,84	518	2,02	218,4	0,026	182,58
<b>7 de Setembro 3</b>	06/12/2017	29,8	7,55	498	2,07	248	0,024	206,93
<b>7 de Setembro 1</b>	06/12/2017	29,7	7,93	497	2,25	254,3	0,028	212,4
<b>Barreiro 5</b>	06/12/2017	31	7,88	509	2,51	234,93	0,034	196,97
<b>Barreiro 3</b>	06/12/2017	29,3	8,26	508	1,75	232,92	0,022	194,02
<b>Guaxini 1</b>	06/12/2017	29	8,13	513	2,52	224,95	0,036	188,81
<b>Guaxini 2</b>	06/12/2017	28,5	8,37	518	2,84	246,15	0,033	206,72
<b>Jardim Atalaia</b>	07/12/2017	30,2	8,15	528	1,89	224,12	0,025	187,05
<b>Amapá</b>	07/12/2017	29,1	8,42	506	1,96	238,45	0,026	198,91
<b>Açaí 2</b>	07/12/2017	28,1	7,76	500	0,75	284,93	ND	234,96
<b>Barreiro 1</b>	07/12/2017	29,27	8,74	532	0,37	340,21	ND	279,65

## pH

O pH das águas no período chuvoso (abril e junho), apresentou variação de 7,39 (Amapá 2017) a 8,0 (Guaxini1 2017), e uma média de 7,76. No período seco (dezembro), apresentou variação de 6,47 (Guaxini Pentágono 2018) a 8,42 (7 de Setembro2 2017), com média de 7,78. A Portaria do MS, estabelece como padrão de potabilidade para o pH, uma faixa de valores que vai de 6,0 a 9,5. Para a Organização Mundial de saúde (OMS) essa faixa é alterada para 6,5 a 8,5. Portanto, as águas subterrâneas analisadas nestes poços estão dentro dos padrões exigidos para consumo humano. O sistema aquífero Pirabas apresentou pH acima da neutralidade.

## Condutividade Elétrica

A CE no período chuvoso apresentou variação de 479,00 (Açaí3 2017) a 521,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Dom Bosco 2017), e média de 502,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No seco, variou de 316 (Guaxini Pentágono 2016) a 444,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Guaxini2 2017), com média de 407  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A legislação brasileira não estipula valores quanto à CE, mas valores que ultrapassem 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  podem estar relacionados a ambientes impactados negativamente. Valores superiores a este podem gerar sabor desagradável à água, afetando diretamente sua potabilidade e capacidade para consumo.

## Temperatura

Os valores de T (°C) praticamente não apresentaram diferenças entre os períodos, com variação entre 28 a 30,8°C para ambos. A amplitude térmica foi pequena, pois as águas subterrâneas não são influenciadas pelas mudanças atmosféricas, e sim pelo grau geotérmico local (em média 1°C a cada 30 metros).

O bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) foi definido a partir dos valores numéricos da alcalinidade total. Com valor mínimo de 221,9 e valor máximo de 255,3 mg/L, e média de 237,52 mg/L no período chuvoso. Já para o período seco exibiu valor mínimo de 118,05 e máximo de 340,21, com média de 239,67 mg/L.

### 3.3.2 Potabilidade

#### **Variáveis Físico-químicas**

As caracterizações físico-químicas da água e de soluções aquosas têm como objetivo identificar e quantificar os elementos e espécies iônicas presentes nesses corpos (PARRON, 2011). A partir disto, é possível compreender os processos naturais ou antrópicos que estes se relacionam quanti e qualitativamente. Os teores determinados nas amostras analisadas são comparados aos padrões conhecidos, os quais são especificados em portarias e resoluções legais, que dão subsídios para enquadramento na potabilidade, como é o caso da portaria nº 2.914/2011, do Ministério da Saúde.

Os ânions analisados incluíram o cloreto; nitrato; nitrito; sulfato e fosfato: (Tabelas 2.6 e 2.7).

#### *Cloreto*

O teor de cloreto no período chuvoso, apresentou variação de 17,20 (Açai3 2017) a 31,01 mg/L (Barreiro4 2017), e uma média de 24,05 mg/L. No seco, variou de 5,27 (Açai2 2016) a 30,92 mg/L (Dom Bosco 2017), com média de 12,23 mg/L. Os resultados obtidos estão dentro dos padrões permitidos para consumo humano que estabelece como padrão de potabilidade para o cloreto de 250 mg/L.

### *Nitrato*

O nitrato no período chuvoso variou de 0,01 (Dom Bosco 2017) a 0,95mg/L (Guaxini1 2017), com média de 0,3 mg/L. No período seco, apresentou variação de <0,01 mg/L (Barreiro-94m 2018) a 6,77 mg/L (Jardim Atalaia 2017), com média de 0,96 mg/L. O limite de potabilidade para o nitrato é de até 10 mg/L para as águas destinadas ao consumo humano. Geralmente, ocorre em pequenas quantidades em águas superficiais, mas pode atingir concentrações elevadas em algumas águas subterrâneas (até 5 mg/L). Todos os poços amostrados apresentam índices de nitrato dentro do padrão/limite aceitável para consumo humano.

### *Nitrito*

O nitrito no período chuvoso variou de < 0,01 (Guaxini1; 7 de Setembro3 e Guaxini2) a 1,41mg/L (7 de Setembro2 2017), com média de 0,13mg/L. No seco, apresentou variação de >0,01 mg/L (Açaí2 e Barreiro1- 2017) a 0,05 mg/L (Guaxini Pentágono 2016), com média de 0,042 mg/L. O limite de potabilidade para o nitrito é de até 1 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Todas as águas analisadas estão dentro do padrão exigido para consumo.

### *Sulfato*

O teor de sulfato no período chuvoso (abril e junho), variou de 10,99 (Farol 2017) a 17,07 mg/L (Guaxini2 2017), e média de 13,89 mg/L. No seco apresentou variação de 1,48 (Açaí 2017) a 92,28 mg/L (Guaxini Pentágono 2018), e uma média de 14,91 mg/L. A Portaria estabelece como padrão de potabilidade para o sulfato de 250 mg/L. Apesar do valor relativamente alto do sulfato no poço Guaxini Pentágono em 2108, os resultados mostram valores baixos para concentração de sulfato nas águas analisadas e estão dentro dos padrões de aceitação para o consumo humano.

### *Fosfato*

O teor de fosfato no período seco e chuvoso (dezembro; abril e junho), não apresentou variação expressiva, e todos os valores analisados foram abaixo de 1mg/L. A Portaria nº 2.914/2011, não estipula valores quanto à concentração de fosfato, mas a legislação holandesa determina que o nível de fosfatos em águas subterrâneas não gera problemas quando sua concentração é igual ou menor a 0,05 mg/L. Valores superiores a

este podem gerar sabor desagradável à água, afetando diretamente sua potabilidade e capacidade para consumo.

Os parâmetros catiônicos considerados na interpretação foram cálcio, magnésio, sódio, potássio (Tabelas 2.18 e 2.19).

#### *Cálcio*

O cálcio no período chuvoso do ano de 2017 variou de 11,51 (Farol) a 17,08 mg/L (Amapá), com média de 13,22 mg/L. No período seco (dezembro) dos anos 2016, 2017 e 2018, apresentaram variação de 11,03 (Farol 2017) a 93,70 mg/L (Barreiro1 2018), com média de 37,25 mg/L. A Portaria nº 2.914/2011 não determina valores quanto ao teor de cálcio. Segundo Parron (2011), ele pode ser encontrado em corpos d'água superficiais em concentrações em torno de 15 mg/L e, em águas subterrâneas, em concentrações que variam de 10 a 100 mg/L. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro dos parâmetros estabelecidos para consumo humano.

#### *Magnésio*

O magnésio durante o período chuvoso (abril e junho), apresentou variação de 10,82 (Farol 2017) a 13,28 mg/L (Açai3 2017), com média de 11,60 mg/L. No período seco apresentou variação de 4,77 (Guaxini Pentágono 2017) a 16,968 mg/L (Barreiro1 2018), com média de 10,97 mg/L. Apesar da Portaria nº 2.914/2011 não fixar valores para o magnésio, pode ser encontrado em águas naturais em concentrações próximas de 4 mg/L e, nas águas subterrâneas, em teores próximos de 5 mg/L (PARRON, 2011). Todas as águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

#### *Sódio*

O sódio no período chuvoso variou de 70,11 (Amapá 2017) a 88,07 mg/L (Guaxini2 2017), com média de 80,71 mg/L. No período seco apresentou variação de 6,416 mg/L (Barreiro1 2018) a 98,08mg/L (Escritório 2017), com média de 56,75 mg/L. O sódio não é tratado na Portaria nº 2.914/2011, contudo as águas superficiais possuem teores de sódio inferiores a 50 mg/L enquanto que águas subterrâneas, mostram variação de 0,1mg/L a 100mg/L (PARRON, 2011). As águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

#### *Potássio*

O valor do potássio das águas coletadas durante o período chuvoso (abril e junho), apresentou variação 7,24 mg/L (7 de Setembro1 2017) a 9,02 mg/L (Barreiro3 2017), com média de 8,34 mg/L.

### **Parâmetros indesejáveis**

Os valores analisados em laboratório referente aos parâmetros indesejáveis, encontram-se nas tabelas 3.8 e 3.9.

#### *Ferro Total*

O ferro no período chuvoso variou de 0,01 (Guaxini1 - 2017) a 0,08 mg/L (Barreiro3-2017), com média de 0,03 mg/L. No seco, variou de 0,02 mg/L (7 de Setembro2; Açai3; Guaxini Femac1 - 2017) a 0,683 mg/L (Açai2 - 2018), com média de 0,11 mg/L. De acordo com a Portaria do MS, o limite de potabilidade para o ferro é de até 0,3 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Dois poços (Período seco - Guaxini Pentágono 2016/2017 e Açai2 - 2018) apresentaram valores acima do permitido pela legislação.

O alto teor de ferro nas águas subterrâneas é um fator de alerta, pois causa danos à saúde humana e confere à água sabor amargo e coloração amarela a turva. Ademais, causa manchas em instalações sanitárias e roupas, destrói tubulações (infiltrações nos filtros dos poços e obstruções nas canalizações) e restringe essa água para uso industrial (FREDDO, 2008).

#### *Manganês*

O manganês no período chuvoso (abril e junho) foi, no geral, de 0,01mg/L. No período seco apresentou variação de 0,014 mg/L (Barreiro1 2018) a 0,218 mg/L (Açai2 2016), com média de 0,11 mg/L. De acordo com a Portaria n° 2.914/2011 do MS, o limite de potabilidade para o manganês é de até 0,1 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano.

#### *Alumínio*

O alumínio durante o período chuvoso de 2017 variou de 0,018 (Barreiro3) a 0,028 mg/L (7 de Setembro), com média de 0,013 mg/L. No período seco dos anos de 2016, 2017 e 2018, apresentou variação de 0,010 mg/L (Guaxini Pentágono) a 0,024 mg/L (Barreiro1), com média de 0,014 mg/L. Segundo a Portaria n° 2.914/2011 do MS, o limite de potabilidade para o Al é de até 0,2 mg/L, para o consumo humano. Todas as águas analisadas estão dentro dos parâmetros apropriados para esta finalidade.

Tabela 3. 6 - Determinação dos ânions (mg/L) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período chuvoso. Abril e junho de 2017.

Poços	Coleta	Fluoreto	Cloreto	Nitrito	Brometo	Nitrato	Fosfato	Sulfato
Amapá	11/04/2017	0,61	26,56	0,07	0,09	0,21	-1	13,45
Barreiro-Femac3	11/04/2017	0,71	28,8	0,03	0,1	< 0,01	-1	16,29
Barreiro-Femac5	11/04/2017	0,75	25,79	0,06	0,1	0,32	-1	13,83
Barreiro-Femac4	12/04/2017	0,72	31,01	0,03	0,11	0,06	-1	16,68
Guaxini-Femac1	12/04/2017	0,73	28,01	< 0,01	0,1	0,95	-1	15,24
7 de setembro2	13/04/2017	0,55	21,89	1,41	0,08	0,58	-1	11,41
7 de setembro3	13/04/2017	0,55	19,84	< 0,01	0,07	0,34	-1	12,7
7 de setembro1	13/04/2017	0,45	18,73	0,03	0,07	0,23	-1	14,13
Escritório	13/04/2017	0,59	22,5	0,09	0,08	0,05	-1	11,85
Guaxini-Femac2	13/04/2017	0,72	30,52	< 0,01	0,11	0,41	-1	17,07
Açaí 3	13/04/2017	0,56	17,2	0,01	0,06	0,22	-1	12,12
Farol	13/06/2017	0,55	20,22	0,12	0,07	0,51	-1	10,99
Dom Bosco	14/06/2017	0,7	27,47	0,03	0,1	0,05	-1	14,81

Tabela 3. 7 - Determinação dos ânions (mg/L) dos 17 poços: 03 poços da RIMAS-BE e 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Seco. Dezembro de 2017.

Poços	Coleta	Fluoreto	Cloreto	Nitrito	Brometo	Nitrato	Fosfato	Sulfato
Guaxini Pentágono	04/12/2017	0,1	18,31	0,04	0,05	1,8	-1	20,7
Escritório	05/12/2017	0,63	20,8	< 0,01	0,04	0,22	-1	11,36
7 de setembro2	05/12/2017	0,59	19,35	< 0,01	0,04	< 0,01	-1	10,84
Farol	05/12/2017	0,55	19,54	< 0,01	0,04	1,22	-1	10,22
Açaí 3	05/12/2017	0,58	16,92	< 0,01	0,05	0,68	-1	11,56
Dom Bosco	05/12/2017	0,74	30,92	< 0,01	0,07	< 0,01	-1	13,96
Barreiro4	05/12/2017	0,77	26,85	< 0,01	0,07	0,42	-1	16,26
7 de setembro3	06/12/2017	0,53	19,65	< 0,01	0,04	3,26	-1	11,17
7 de setembro1	06/12/2017	0,49	18,32	< 0,01	0,04	0,77	-1	13,38
Barreiro5	06/12/2017	0,79	25,15	< 0,01	0,07	0,07	-1	13,61
Barreiro3	06/12/2017	0,74	26,23	< 0,01	0,08	0,7	-1	15,93
Guaxini Femac1	06/12/2017	0,76	26,37	< 0,01	0,06	0,4	-1	14,38
Guaxini Femac2	06/12/2017	0,74	29,18	< 0,01	0,06	0,53	-1	16,48
Jardim Atalaia	07/12/2017	0,69	27,92	< 0,01	0,06	6,77	-1	14,15
Amapá	07/12/2017	0,68	25,07	< 0,01	0,05	0,26	-1	12,81
Açaí2	07/12/2017	0,13	8,57	< 0,01	0,02	0,35	-1	1,53
Barreiro1	07/12/2017	0,05	5,27	< 0,01	0,02	0,58	-1	4,37

Tabela 3. 8 - Determinação dos cátions (20) dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período Chuvoso. 2ª amostragem. Abril e junho de 2017.

Poços	Coleta	Al	Be	B	Ca	Co	Sb	Sn	Sr	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Se	Si	Ti	V	Na	K	Ag
<b>Amapá</b>	11/04/2017	0,019	0,002	0,262	17,08	0,005	0,002	0,01	1,59	0,031	0,006	12,47	0,01	0,01	0,005	8,48	0,005	0,005	70,11	8,357	0,01
<b>Barreiro3</b>	11/04/2017	0,018	0,002	0,285	13,21	0,005	0,002	0,01	1,16	0,076	0,006	11,47	0,01	0,01	0,005	8,878	0,005	0,005	76,62	9,02	0,01
<b>Barreiro5</b>	11/04/2017	0,02	0,002	0,304	13,09	0,005	0,002	0,01	1,113	0,062	0,006	11,12	0,01	0,01	0,005	8,774	0,005	0,005	83,7	9,313	0,01
<b>Barreiro4</b>	12/04/2017	0,019	0,002	0,291	12,74	0,005	0,002	0,01	1,19	0,035	0,006	11,24	0,01	0,01	0,005	8,772	0,005	0,005	81,68	9,61	0,01
<b>Guaxini1</b>	12/04/2017	0,022	0,002	0,297	12,74	0,005	0,002	0,01	1,119	0,013	0,007	10,9	0,01	0,01	0,005	8,861	0,005	0,005	84,01	9,192	0,01
<b>7 de Setembro2</b>	13/04/2017	0,022	0,002	0,188	12,31	0,005	0,002	0,01	1,344	0,014	0,006	11,73	0,01	0,01	0,005	8,499	0,005	0,005	82,04	7,453	0,01
<b>7 de Setembro3</b>	13/04/2017	0,028	0,002	0,184	13,16	0,005	0,002	0,01	1,355	0,025	0,007	11,99	0,01	0,01	0,005	8,484	0,005	0,005	79,43	7,744	0,01
<b>7 de Setembro1</b>	13/04/2017	0,02	0,002	0,166	14,79	0,005	0,002	0,01	1,319	0,024	0,007	11,11	0,01	0,01	0,005	8,867	0,005	0,005	80,14	7,238	0,01
<b>Escritório</b>	13/04/2017	0,023	0,002	0,225	11,95	0,005	0,002	0,01	1,488	0,048	0,006	11,53	0,01	0,01	0,005	8,449	0,005	0,005	81,36	7,716	0,01
<b>Guaxini2</b>	13/04/2017	0,021	0,002	0,287	12,71	0,005	0,002	0,01	1,204	0,027	0,006	10,95	0,01	0,01	0,005	8,427	0,005	0,005	88,07	8,443	0,01
<b>Açaí3</b>	13/04/2017	0,021	0,002	0,181	12,86	0,005	0,002	0,01	1,532	0,021	0,006	13,28	0,01	0,01	0,005	8,769	0,005	0,005	77,05	8,113	0,01
<b>Farol</b>	13/06/2017	0,01	0,002	0,214	11,512	0,005	0,002	0,01	1,461	0,016	0,006	10,818	0,01	0,01	0,005	8,698	0,005	0,005	82,908	7,584	0,01
<b>Dom Bosco</b>	14/06/2017	0,01	0,002	0,288	13,68	0,005	0,002	0,01	1,982	0,044	0,005	12,215	0,01	0,01	0,005	8,384	0,005	0,005	82,085	8,595	0,01

Tabela 3. 9 - Determinação dos cátions (20) dos 03 poços da RIMAS-BE e dos 14 poços em bombeamento da COSANPA (Salinópolis). Período Seco. 3ª amostragem. Dezembro de 2017.

Poços	Coleta	Al	Be	B	Ca	Co	Sb	Sn	Sr	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Se	Si	Ti	V	Na	K	Ag
<b>Guaxini Pentágono</b>	04/12/2017	0,01	0,002	0,1	39,934	0,005	0,002	0,01	0,081	0,361	0,005	4,774	0,13	0,01	0,005	4,901	0,005	0,005	18,697	6,029	0,01
<b>Escritório</b>	05/12/2017	0,01	0,002	0,206	11,334	0,005	0,002	0,01	1,746	0,025	0,006	10,088	0,01	0,01	0,005	8,452	0,005	0,005	98,084	7,329	0,01
<b>7 de Setembro2</b>	05/12/2017	0,02	0,002	0,169	11,351	0,005	0,002	0,01	1,554	0,018	0,006	9,937	0,01	0,01	0,005	8,547	0,005	0,005	96,975	6,954	0,01
<b>Farol</b>	05/12/2017	0,063	0,002	0,193	11,034	0,005	0,002	0,01	1,553	0,077	0,007	9,897	0,01	0,01	0,005	8,763	0,005	0,005	97,665	7,445	0,01
<b>Açaí3</b>	05/12/2017	0,016	0,002	0,166	11,959	0,005	0,002	0,01	1,489	0,015	0,006	11,376	0,01	0,01	0,005	8,782	0,005	0,005	78,316	7,529	0,01
<b>Dom Bosco</b>	05/12/2017	0,01	0,002	0,261	13,074	0,005	0,002	0,01	1,897	0,054	0,006	11,24	0,01	0,01	0,005	8,549	0,005	0,005	92,024	8,298	0,01
<b>Barreiro4</b>	05/12/2017	0,015	0,002	0,235	11,606	0,005	0,002	0,01	1,262	0,038	0,005	9,412	0,01	0,01	0,005	8,005	0,005	0,005	92,433	8,302	0,01
<b>7 de Setembro3</b>	06/12/2017	0,017	0,002	0,159	11,951	0,005	0,002	0,01	1,398	0,043	0,006	10,189	0,01	0,01	0,005	8,356	0,005	0,005	89,23	7,018	0,01
<b>7 de Setembro1</b>	06/12/2017	0,01	0,002	0,161	14,243	0,005	0,002	0,01	1,217	0,027	0,007	10,384	0,01	0,01	0,005	9,22	0,005	0,005	79,723	7,196	0,01
<b>Barreiro5</b>	06/12/2017	0,01	0,002	0,28	11,716	0,005	0,002	0,01	1,189	0,052	0,005	9,67	0,01	0,01	0,005	8,595	0,005	0,005	92,86	8,174	0,01
<b>Barreiro3</b>	06/12/2017	0,057	0,002	0,262	12,339	0,005	0,002	0,01	1,196	0,038	0,005	9,941	0,01	0,01	0,005	9,52	0,011	0,005	87,624	8,423	0,01
<b>Guaxini1</b>	06/12/2017	0,027	0,002	0,259	11,594	0,005	0,002	0,01	1,139	0,021	0,006	9,337	0,01	0,01	0,005	8,663	0,005	0,005	91,367	8,119	0,01
<b>Guaxini2</b>	06/12/2017	0,01	0,002	0,261	11,696	0,005	0,002	0,01	1,057	0,03	0,005	9,197	0,01	0,01	0,005	8,259	0,005	0,005	86,553	7,738	0,01
<b>Jardim Atalaia</b>	07/12/2017	0,018	0,002	0,262	11,696	0,005	0,002	0,01	1,521	0,051	0,005	10,273	0,01	0,01	0,005	7,883	0,005	0,005	83,107	8,393	0,01
<b>Amapá</b>	07/12/2017	0,015	0,002	0,247	14,503	0,005	0,002	0,01	1,812	0,034	0,006	11,068	0,01	0,01	0,005	8,481	0,005	0,005	81,998	7,952	0,01
<b>Açaí2</b>	07/12/2017	0,024	0,002	0,1	85,94	0,005	0,002	0,01	0,174	0,061	0,013	13,037	0,139	0,01	0,005	13,337	0,005	0,005	7,34	2,173	0,01
<b>Barreiro1</b>	08/12/2017	0,011	0,002	0,1	91,301	0,005	0,002	0,01	0,922	0,057	0,005	15,167	0,149	0,01	0,005	13,053	0,005	0,005	7,215	2,806	0,01

### 3.3.3 Classificação das Águas

#### **Classificação de águas – Período seco. 1<sup>a</sup>; 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> amostragens. 03 poços da RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.**

A classificação das águas no período seco em relação aos 03 poços da RIMAS-BE em Salinópolis mereceu tratamento diferenciado por serem de monitoramento dedicado aos parâmetros do nível d'água (NA), físico-químicos e químicos. A medida do nível d'água automática é horária. Os parâmetros físico-químicos mínimos são do CONAMA (STD, nitrato, pH, turbidez, e CE), além de nitrito, alcalinidade, temperatura. Fonte: RIMAS-WEB.

*Diagrama de Piper: Período seco: 1<sup>a</sup>; 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> amostragens. 03 poços da RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.*

Na classificação catiônica do Diagrama trilinear de *Piper* (Tabela 3.10), o valor de  $\text{Na}^{++} \text{K}^{+}$  foi maior para o poço Guaxini Pentágono (24,73 mg/L) em relação aos poços Barreiro1 e Açai2 (10,25 mg/L) os quais obtiveram valores bem próximos.  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^{+}$  foram muito baixos para o poço Guaxini Pentágono; médio a alto para o poço Barreiro1; e alto para o poço Açai2.

Quanto aos resultados aniônicos, o valor do  $\text{Cl}^{-}$  foi mais alto para o poço Guaxini Pentágono; e muito baixo para os poços Barreiro1 e Açai2.

O  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{-}$  foi menor para o Guaxini Pentágono, e de valor médio para o Barreiro1, sendo mais alto para o Açai2. O  $\text{SO}_4^{2-}$  no geral se apresentou com valor alto para o poço Guaxini Pentágono; médio para o poço Barreiro1 e baixo para o poço Açai2.

A classificação hidroquímica especificamente na 4<sup>a</sup> campanha de amostragem no período seco em dezembro de 2018, revelou águas do tipo cálcica-bicarbonatada para o poço Barreiro1 na profundidade de 98 metros (aquífero Pirabas Inferior) e 54 metros (aquífero Pirabas Superior); e para o poço Açai 2.

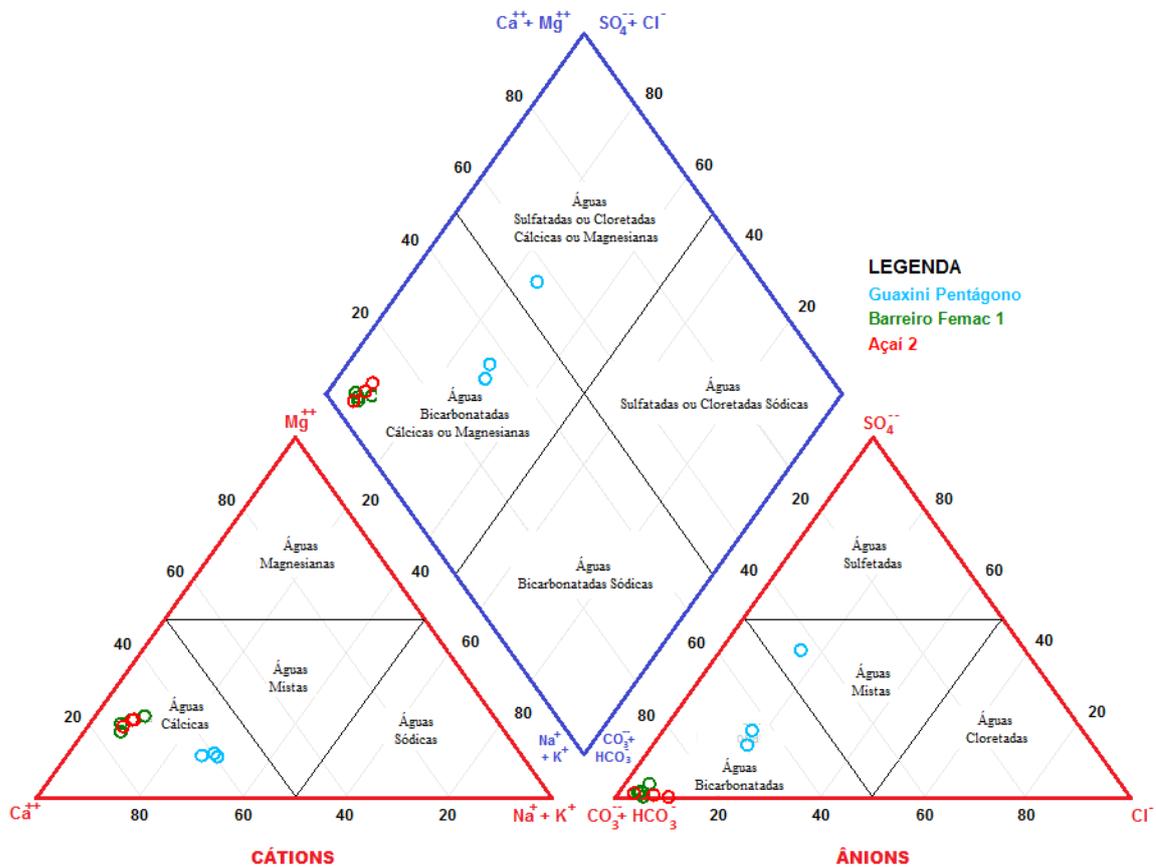
O poço Guaxini Pentágono indicou água cálcica mista. O alto teor de  $\text{SO}_4^{2-}$  deriva de mistura de águas, dada possivelmente pelo posicionamento de filtro na parte mais elevada do

aquífero Pirabas Superior, e também pela possível entrada de água pelo furo no revestimento a 9 metros de profundidade, proveniente do sistema aquífero Barreiras (Figura 3.14).

Tabela 3. 10 - Resultado das análises químicas e classificação das águas subterrâneas. 03 poços da RIMAS. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Período seco: dezembro de 2016; 2017 e 2018. Salinópolis. Classificação iônica: águas Cálcica-Bicarbonatadas. Excessão: poço Guaxini Pentágono apresentou classificação Cálcica Mista em 2018.

Nº	Poço	Na+K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Classificação das Águas
1	Guaxini Pentágono (2016)	20,88	38,23	4,92	17,28	113,6	26,46	Cálcica Bicarbonatada
2	Barreiro1 (2016)	79,76	79,76	15,03	5,82	297,09	4,54	Cálcica Bicarbonatada
3	Açaí2 (2016)	77,21	77,21	14,68	20,13	317,78	1,48	Cálcica Bicarbonatada
4	Guaxini Pentágono (2017)	39,93	39,93	4,77	18,31	118,05	20,7	Cálcica Bicarbonatada
5	Barreiro1 (2017)	85,94	85,94	13,04	8,57	285,68	1,53	Cálcica Bicarbonatada
6	Açaí2 (2017)	91,3	91,3	15,17	5,27	340,58	4,37	Cálcica Bicarbonatada
7	Guaxini Pentágono (2018)	45,53	45,53	5,35	24,94	123,4	92,28	Cálcica Mista
8	Barreiro1: 58m (2018)	82,3	82,3	16,97	8,53	319,5	11,62	Cálcica Bicarbonatada
9	Barreiro1: 94m (2018)	93,71	93,71	16,19	7,74	350,06	6,08	Cálcica Bicarbonatada
10	Açaí2 (2018)	80,88	80,88	15,22	12,9	309,59	2,82	Cálcica Bicarbonatada

Figura 3. 14 - Diagrama trilinear de Piper de amostras da água subterrânea. Poços RIMAS. 1ª, 3ª e 4ª campanha de amostragem Período seco: dezembro de 2016, 2017 e 2018.



*Diagrama de Stiff: Período seco: 1ª; 2ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.*

As águas analisadas para os poços da RIMAS-BE no Diagrama de *Stiff* para o período seco (Tabela 3.11) apresentaram formato geométrico alongado para o poço Guaxini Pentágono, e de representação losangular simétrica para os poços Barreiro1 e Açaí2 (Figura 3.15).

O diagrama de *Stiff* apresentou formatos diferenciados devido ao enriquecimento de  $\text{Ca}^+$  e  $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$  para os poços Barreiro1 e Açaí2. Apesar do valor maior para  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  no Guaxini Pentágono, os cátions  $\text{Ca}^+$  e  $\text{Mg}^+$  apresentaram-se com menor valor para esse poço.

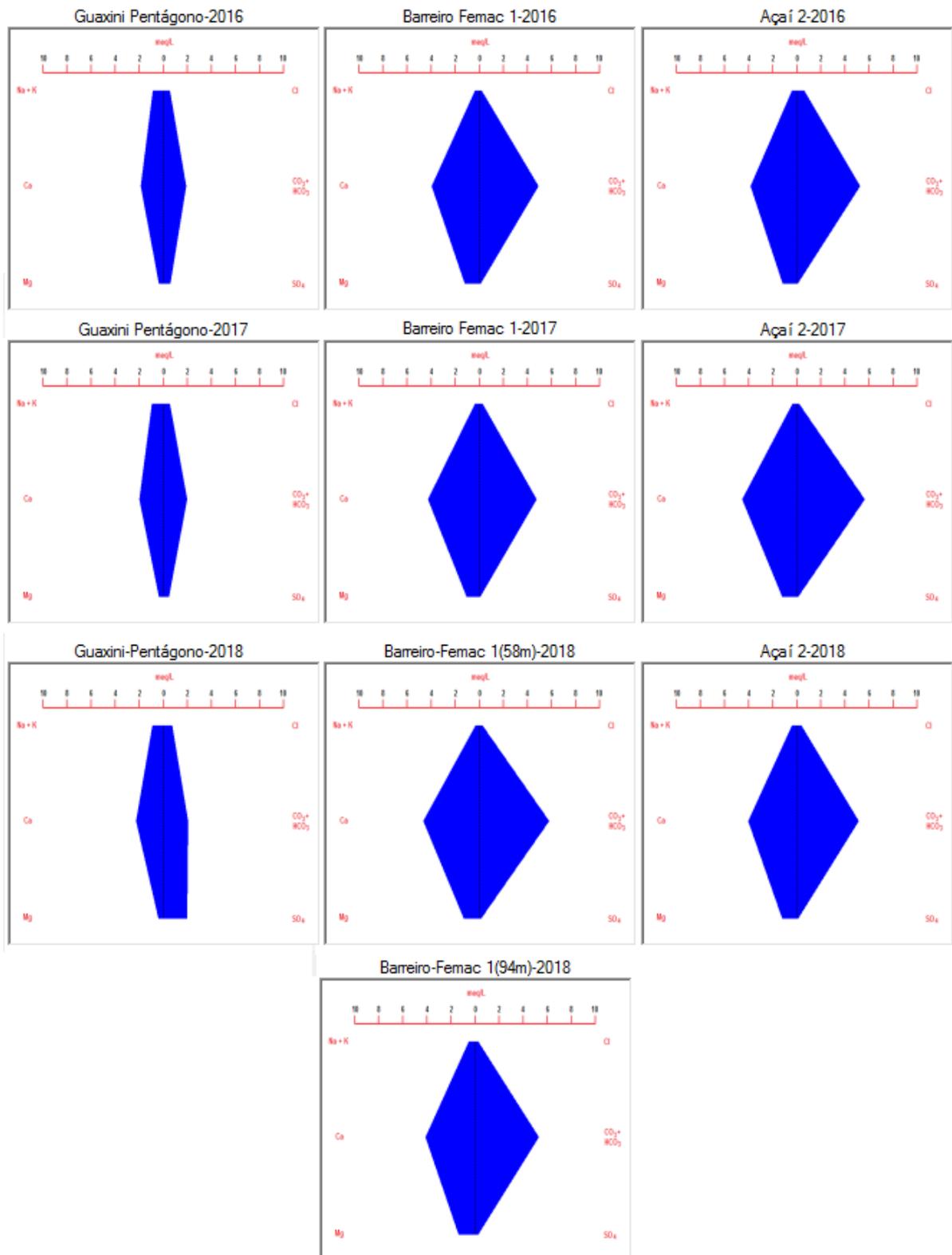
O diferencial na amostragem ocorreu no período seco em dezembro de 2018. Foi coletada e analisada uma amostra a mais no poço Barreiro1. Porém o resultado diferente das demais amostragens se deu para o  $\text{SO}_4^{2-}$  para o poço Guaxini Pentágono, que modificou a representação gráfica do diagrama, assumindo uma forma assimétrica na parte inferior do mesmo, justamente pela elevação do resultado do teor de  $\text{SO}_4^{2-}$  na amostra.

Quanto ao resultado dos diagramas de *Stiff* em relação as amostras do poço Barreiro1 (94 e 54 metros) e do poço Açaí2, verifica-se que são muito semelhantes, mantendo a mesma relação dos resultados amostrais das campanhas anteriores (Figura 3.15).

Tabela 3. 11 - Análise química das 10 amostras de águas subterrâneas. Poços RIMAS. 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Período seco: dezembro de 2016; 2017 e 2018.

Nº	Poço	Na+K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)
1	Guaxini Pentágono (2016)	20,88	38,23	4,92	17,28	113,6	26,46
2	Barreiro1 (2016)	79,76	79,76	15,03	5,82	297,09	4,54
3	Açaí2 (2016)	77,21	77,21	14,68	20,13	317,78	1,48
4	Guaxini Pentágono (2017)	39,93	39,93	4,77	18,31	118,05	20,7
5	Barreiro1 (2017)	85,94	85,94	13,04	8,57	285,68	1,53
6	Açaí2 (2017)	91,3	91,3	15,17	5,27	340,58	4,37
7	Guaxini Pentágono (2018)	45,53	45,53	5,35	24,94	123,4	92,28
8	Barreiro1: 58m (2018)	82,3	82,3	16,97	8,53	319,5	11,62
9	Barreiro1: 94m (2018)	93,71	93,71	16,19	7,74	350,06	6,08
10	Açaí2 (2018)	80,88	80,88	15,22	12,9	309,59	2,82

Figura 3. 15 - Diagrama de *Stiff*. Período Seco. 1ª, 3ª e 4ª campanhas de amostragem. 03 poços da RIMAS-BE. Salinópolis. Dezembro de 2016, 2017 e 2018. Notar a forma alongada para o poço Guaxini Pentágono; e losangular simétrica para os poços Barreiro1 e Açai2.



*Diagrama de Schoeller: Período seco. 1ª, 2ª e 3ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.*

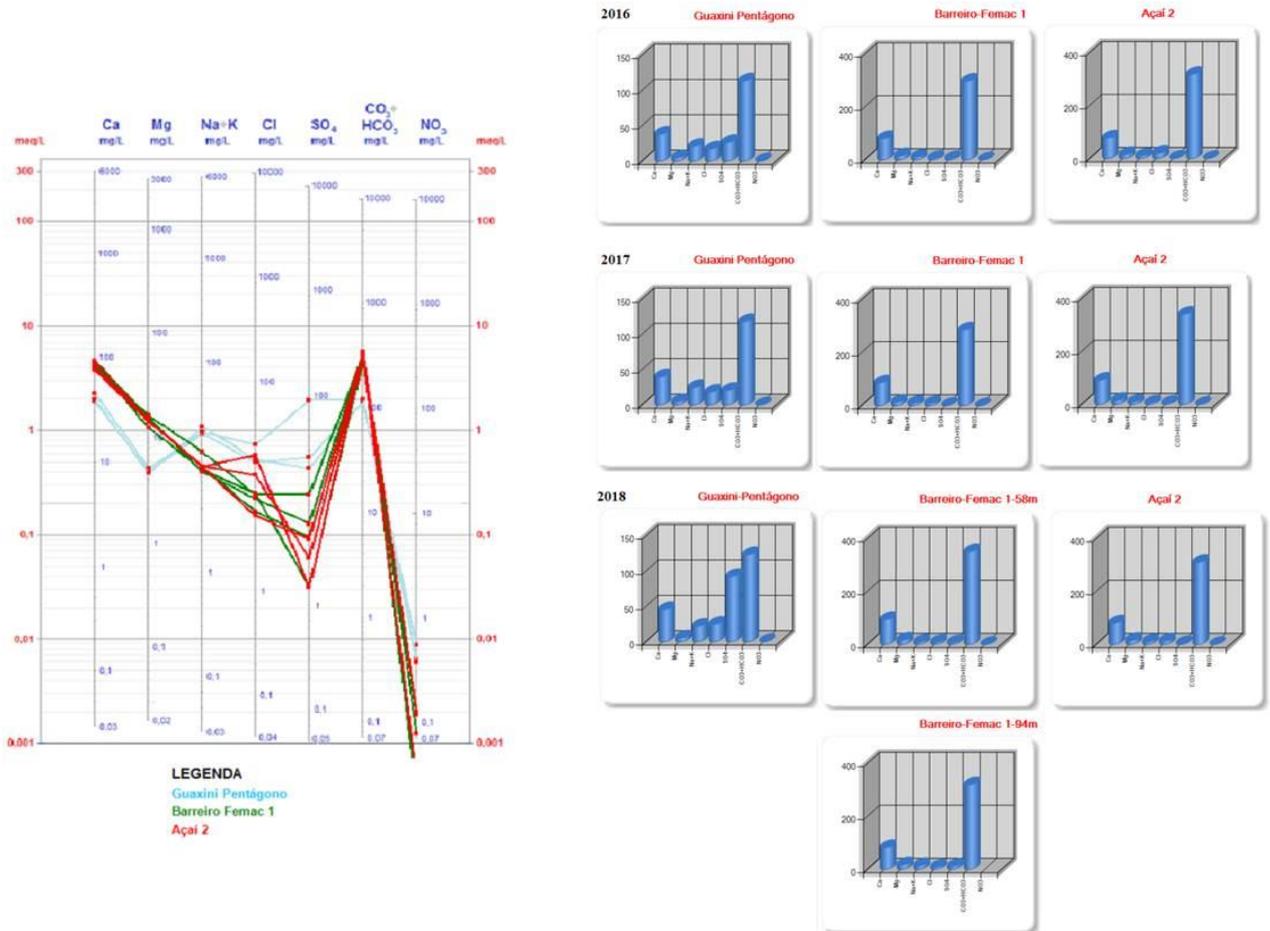
A análise do Diagrama de *Schoeller* para o período seco, mostrou que nos poços da RIMAS predominam o íon  $\text{Ca}^+$ , havendo enriquecimento do  $\text{CO}_3^+ + \text{HCO}_3^+$  e apresentou valores mais baixo de  $\text{SO}_4^{2-}$ , e quase sem presença de  $\text{NO}_3^-$  (Tabela 3.12).

Os resultados das análises do diagrama de *Schoeller* para a quarta campanha de amostragem realizada no período seco em dezembro de 2018, mostrou que nos poços da RIMAS predominam o íon  $\text{Ca}^+$  e o  $\text{CO}_3^+ + \text{HCO}_3^+$ , sendo que neste período, o valor de  $\text{SO}_4^{2-}$ , teve um acréscimo significativo especificamente para o poço Guaxini Pentágono (Figura 3.16).

Tabela 3. 12 - Análise química das 10 amostras de águas subterrâneas. Período seco: 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.

Nº	Poço	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	$\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$ (mg/L)	$\text{SO}_4$ (mg/L)	$\text{NO}_3$ (mg/L)
1	Guaxini Pentágono (2016)	20,88	38,23	4,92	17,28	113,6	26,46	0,56
2	Barreiro1 (2016)	10,21	79,76	15,03	5,82	297,09	4,54	0,12
3	Açaí2 (2016)	10,25	77,21	14,68	20,13	317,78	1,48	0,03
4	Guaxini Pentágono (2017)	24,73	39,93	4,77	18,31	118,05	20,70	0,41
5	Barreiro1 (2017)	9,51	85,94	13,04	8,57	285,68	1,53	0,08
6	Açaí2 (2017)	10,02	91,30	15,17	5,27	340,58	4,37	0,13
7	Guaxini Pentágono (2018)	22,01	45,53	5,35	24,94	123,4	92,28	0,38
8	Barreiro1: 58m (2018)	14,09	82,30	16,97	8,53	319,15	11,62	0,00
9	Barreiro1: 94m (2018)	8,96	93,71	16,19	7,74	350,06	6,08	0,02
10	Açaí2 (2018)	10,30	80,88	15,22	12,90	309,59	2,82	0,03

Figura 3. 16 - Diagrama de Schoeller. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Dezembro de 2016; 2017 e 2018. Salinópolis. O Ca<sup>2+</sup>e o CO<sub>3</sub><sup>+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> estão enriquecidos e o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> quase sem presença na amostragem. Na 4ª campanha de amostragem houve acréscimo do valor do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no poço Guaxini Pentágono que superou todas as outras amostragens.



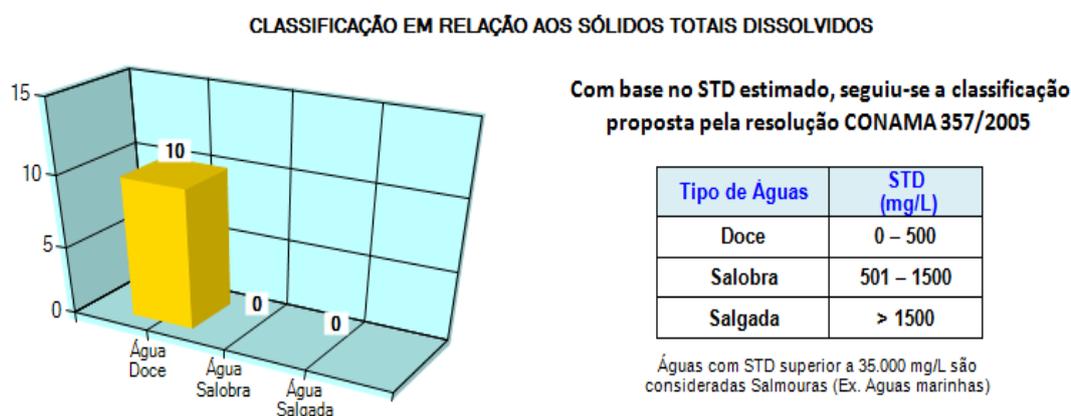
*Sólidos Totais Dissolvidos (STD): Período seco: 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016, 2017 e 2018.*

Com base nas análises dos sólidos totais dissolvidos (STD) estimado em mg/L, e em conformidade com o CONAMA 357/2005, a classificação em 100% das amostras esteve entre 0 – 500 mg/L resultando em água doce (Figura 3.17). O poço Guaxini Pentágono (205,4 mg/L) obteve o menor valor de STD em relação as outras amostras (Tabela 3.13).

Tabela 3. 13 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016, 2017 e 2018). Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 - 500) indicando águas doces.

Poço	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	C.E (µS/cm)	STD estimado (mg/L)	Classificação
Guaxini Pentágono(2016)	20,88	38,23	4,92	17,28	113,6	26,46	316	205,4	Água Doce
Barreiro1 (2016)	10,21	79,76	15,03	5,82	297,09	4,54	503	327,0	Água Doce
Açaí2 (2016)	10,25	77,21	14,68	20,13	317,78	1,48	335,7	218,2	Água Doce
Guaxini Pentágono(2017)	24,73	39,93	4,77	18,31	118,05	20,70	336	218,4	Água Doce
Barreiro1 (2017)	9,51	85,94	13,04	8,57	285,68	1,53	500	325,0	Água Doce
Açaí2 (2017)	10,02	91,30	15,17	5,27	340,58	4,37	532	345,8	Água Doce
Guaxini Pentágono(2018)	22,01	45,53	5,35	24,94	123,4	92,28	335	217,8	Água Doce
Barreiro1: 58m (2018)	14,09	82,30	16,97	8,53	319,15	11,62	488	317,2	Água Doce
Barreiro1: 94m (2018)	8,96	93,71	16,19	7,74	350,06	6,08	522	339,3	Água Doce
Açaí2 (2018)	10,30	80,88	15,22	12,90	309,59	2,82	483	314,0	Água Doce

Figura 3. 17 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016, 2017 e 2018). Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 – 500) indicando águas doces.



*Balanço Iônico (BI): Período seco: 1ª; 3ª e 4ª amostragens. Poços RIMAS. Dezembro de 2016; 2017 e 2018.*

O balanço iônico realizado para as dez amostras dos poços da RIMAS-BE no período seco, mostrou como resultado quanto ao Erro Prático (Ep), definido por Custódio e Llamas (1983), que sete amostras ficaram abaixo do erro Teórico, que é o máximo permitido considerando a condutividade elétrica, analisados nos poços Guaxini Pentágono (2016); Barreiro1 (2016 e 2018) e no poço Açaí2 nos três anos analisados (2016, 2017 e 2018).

As outras três amostras que ficaram acima do erro teórico (> 10%), o poço Guaxini Pentágono não atendeu o limite do B.I.1 em duas amostragens: em 2017, onde o B.I.1 foi de 15,20% para uma CE igual a 336 µS/cm; e em 2018 o B.I.1 foi de 23,29% (ocorreu o erro

mais alto de todas as séries) e CE de 335  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (mais baixa condutividade elétrica). No poço Barreiro1 (2017) o percentual foi de 14,46%, para CE de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabela 3.14).

Ressalta-se que apenas os íons maiores foram considerados no balanço iônico, podendo haver contribuição de parâmetros não considerados. Assim sendo, apesar dos resultados de algumas análises ocorrem erros que ultrapassaram os limites aceitáveis, as amostras foram consideradas válidas para a caracterização hidroquímica.

No Balanço Iônico da 4ª amostragem somente o poço Guaxini Pentágono não atendeu o B.I.1, com valor da condutividade elétrica bem mais baixa que os demais poços, porém com o Erro prático [Ep] maior que 10% (Tabela 3.14).

Tabela 3. 14 - Resultado das análises químicas e Balanço Iônico (B.I.). Período seco. 1ª, 3ª e 4ª amostragens. 03 poços da RIMAS-BE (Dezembro de 2016, 2017 e 2018). 10 amostras: 07 amostras atenderam ao B.I.1. 03 amostras não atenderam ao B.I.1. Segundo Custódio and Lhamas.

Poço	Na + K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	C.E (μS/cm)	Σ Cátions (meq/L)	Σ Ânions (meq/L)	B.I.I (%)	B.I.II (%)	Observações
Guaxini Pentágono (2016)	0,8883	1,9109	0,4042	0,4875	1,8619	0,5509	316	3,2035	2,9003	9,93	4,97	OK
Barreiro1 (2016)	0,3954	3,9872	1,2361	0,1642	4,8810	0,0945	503	5,6187	5,1397	8,90	4,45	OK
Açaí2 (2016)	0,4062	3,8595	1,2070	0,5679	5,2115	0,0308	335,7	5,4727	5,8101	5,98	2,99	OK
Guaxini Pentágono (2017)	0,9675	1,9963	0,3926	0,5165	19348	0,4310	336	3,3565	2,8823	15,20	7,60	Não atende B.I.I
Barreiro1 (2017)	0,3749	4,2961	1,0722	0,2418	4,6950	0,0319	500	5,7432	4,9686	14,46	7,23	Não atende B.I.I
Açaí2 (2017)	0,3856	4,5641	1,2473	0,1487	5,5884	0,0910	532	6,1971	5,8280	6,14	3,07	OK
Guaxini Pentágono (2018)	0,9362	2,2761	0,4396	0,7036	2,0225	1,9213	335	3,6519	4,6474	23,99	11,99	Não atende B.I.I
Barreiro1: 58m (2018)	0,5463	4,1140	1,3954	0,2406	5,2385	0,2419	488	6,0557	5,7211	5,68	2,84	OK
Barreiro1: 94m (2018)	0,3442	4,6845	1,3315	0,2183	5,7436	0,1266	522	6,3603	6,0885	4,37	2,18	OK
Açaí2 (2018)	0,4091	4,0434	1,2518	0,3639	5,0774	0,0587	483	5,7043	5,5000	3,65	1,82	OK

**Balanço Iônico N°1**  
Baseado no Erro prático [Ep], definido por Custódio e Llamas (1983) como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \right| \times 200$$

o erro Teórico é o E.P. máximo permitido considerando-se a condutividade elétrica (C.E.), conforme mostrado abaixo:

Cond. Elétrica (μS/cm)	50	200	500	2.000	> 2.000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fatores de conversão  
Mg/L → Meq/L

Número de  
Amostras

10

**Balanço Iônico N°2**  
Baseado no Erro prático [Ep] definido por Logan (1965), dado como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \right| \times 100$$

O erro Teórico é o E.P. máximo permitido levando-se em consideração os valores dos íons, conforme mostrado abaixo:

Σ cátions ou Σ ânions	< 1	1	2	6	10	30	>30
Erro permitido (%)	15	10	6	4	3	2	1

**Classificação das águas. Período Chuvoso: 2ª Amostragem. 13 poços da COSANPA. Abril e junho 2017.**

A classificação das águas no período chuvoso foi realizada nos meses de abril e junho de 2017 em relação aos 13 poços da COSANPA em Salinópolis. Os parâmetros físico-químicos mínimos são do CONAMA (sólidos totais dissolvidos, nitrato, pH, turbidez, condutividade elétrica), além de nitrito, alcalinidade e temperatura.

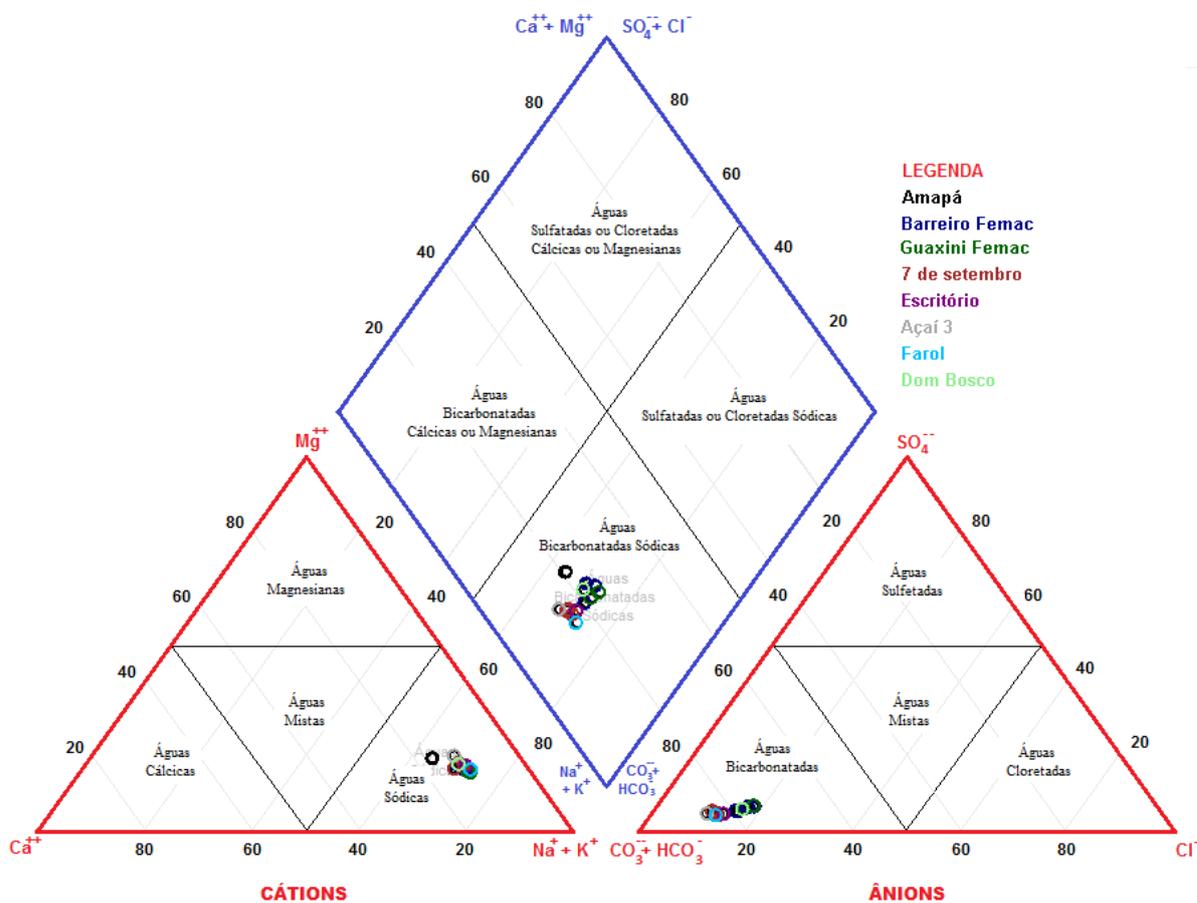
*Diagrama de Piper: Período chuvoso.*

As águas analisadas dos 13 poços da COSANPA em bombeamento no período chuvoso foram classificadas como Sódicas Bicarbonatadas pelo Diagrama trilinear de *Piper* (Tabela 3.15 e Figura 3.18).

Tabela 3. 15 - Resultado das análises e classificação química das águas subterrâneas dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Salinópolis. Período chuvoso. 2ª amostragem. Abril e junho de 2017.

Poço	Na + K	Ca	Mg	Cl	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Classificação
<b>Amapá</b>	78,47	17,08	12,47	25,56	233,25	13,45	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Barreiro3</b>	85,64	13,21	11,47	28,8	226,88	16,29	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Barreiro5</b>	93,01	13,09	11,12	25,79	235,13	13,83	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Barreiro4</b>	91,29	12,74	11,24	31,01	223,9	16,68	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Guaxini1</b>	93,2	12,74	10,9	28,01	231,24	15,24	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>7 de setembro2</b>	89,49	12,31	11,73	21,89	256,11	11,41	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>7 de setembro3</b>	87,17	13,16	11,99	19,84	247,47	12,7	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>7 de setembro1</b>	87,38	14,79	11,11	18,73	257,1	14,13	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Escritório</b>	89,08	11,95	11,53	22,5	243,67	11,85	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Guaxini2</b>	96,51	12,71	10,95	30,52	225,14	17,07	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Açaí3</b>	85,16	12,86	13,28	17,2	253,22	12,12	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Farol</b>	90,49	11,51	10,82	20,22	247,85	10,99	<b>Sódica Bicarbonatada</b>
<b>Dom Bosco</b>	90,69	13,68	12,22	27,47	230,43	14,81	<b>Sódica Bicarbonatada</b>

Figura 3. 18 - Diagrama trilinear de Piper de amostras das águas subterrâneas: Classificação Hidroquímica dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Salinópolis. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem (abril e junho de 2017). Águas classificadas como Sódica-Bicarbonatadas.

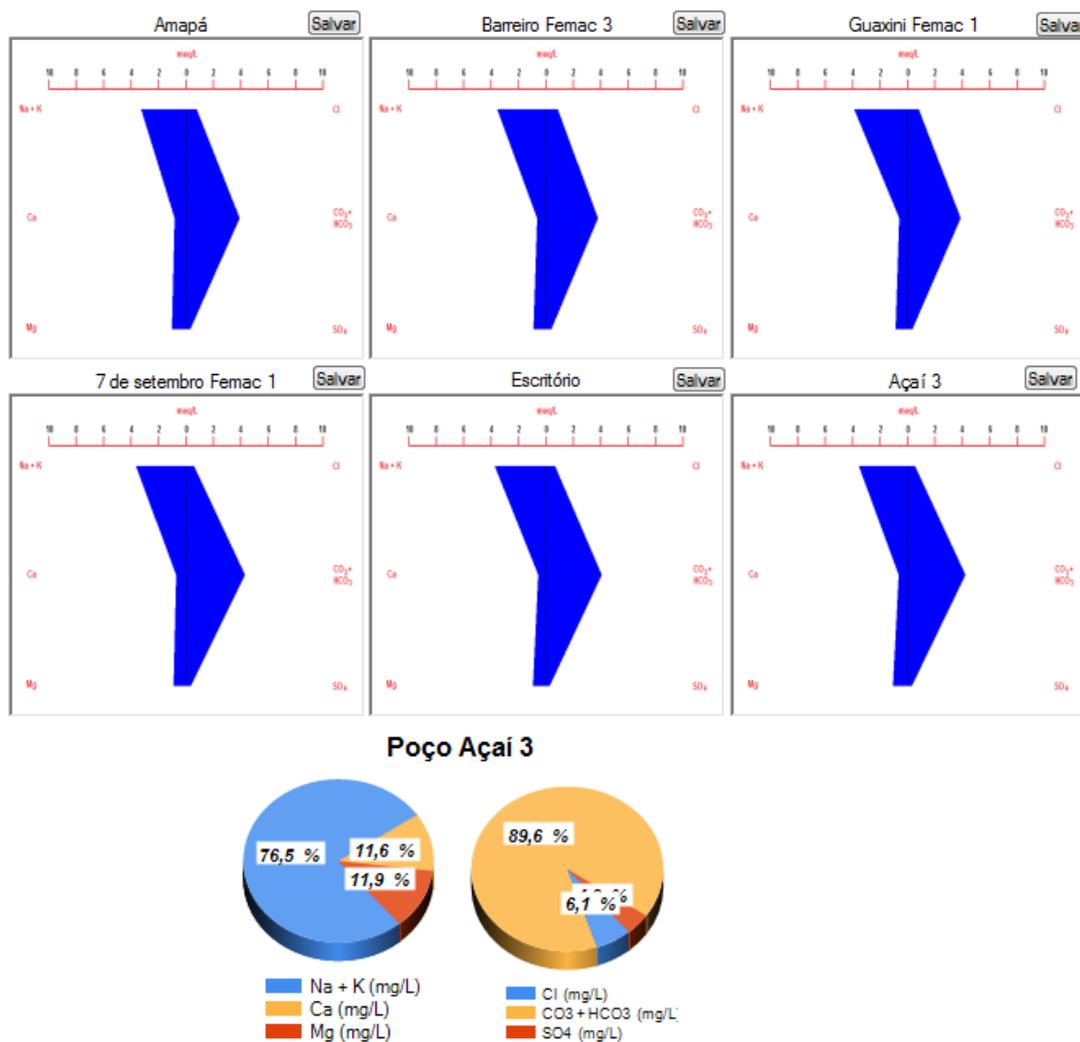


#### Diagrama de Stiff: Período chuvoso

Foram selecionados no período chuvoso para representação gráfica do diagrama de *Stiff*, levando em consideração descrever o maior número de locais e especialização na área dos sistema de abastecimento, 06 poços em bombeamento da COSANPA: Amapá, Barreiro3, Guaxini1; 7 de setembro1, Escritório e Açai3.

A representação geométrica do diagrama lembra a figura de um bumerangue, que se repetiu para todos os 06 poços (Figura 3.19). Ocorreu um enriquecimento de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , e mais ainda de  $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ . O  $\text{Ca}^+$  e  $\text{Mg}^+$  apresentam a mesma proporcionalidade, sendo seus valores mais reduzidos. O  $\text{SO}_4^{2-}$  aparece com regularidade nos resultados e atribui na qualidade das águas, o resultado mais sulfatado.

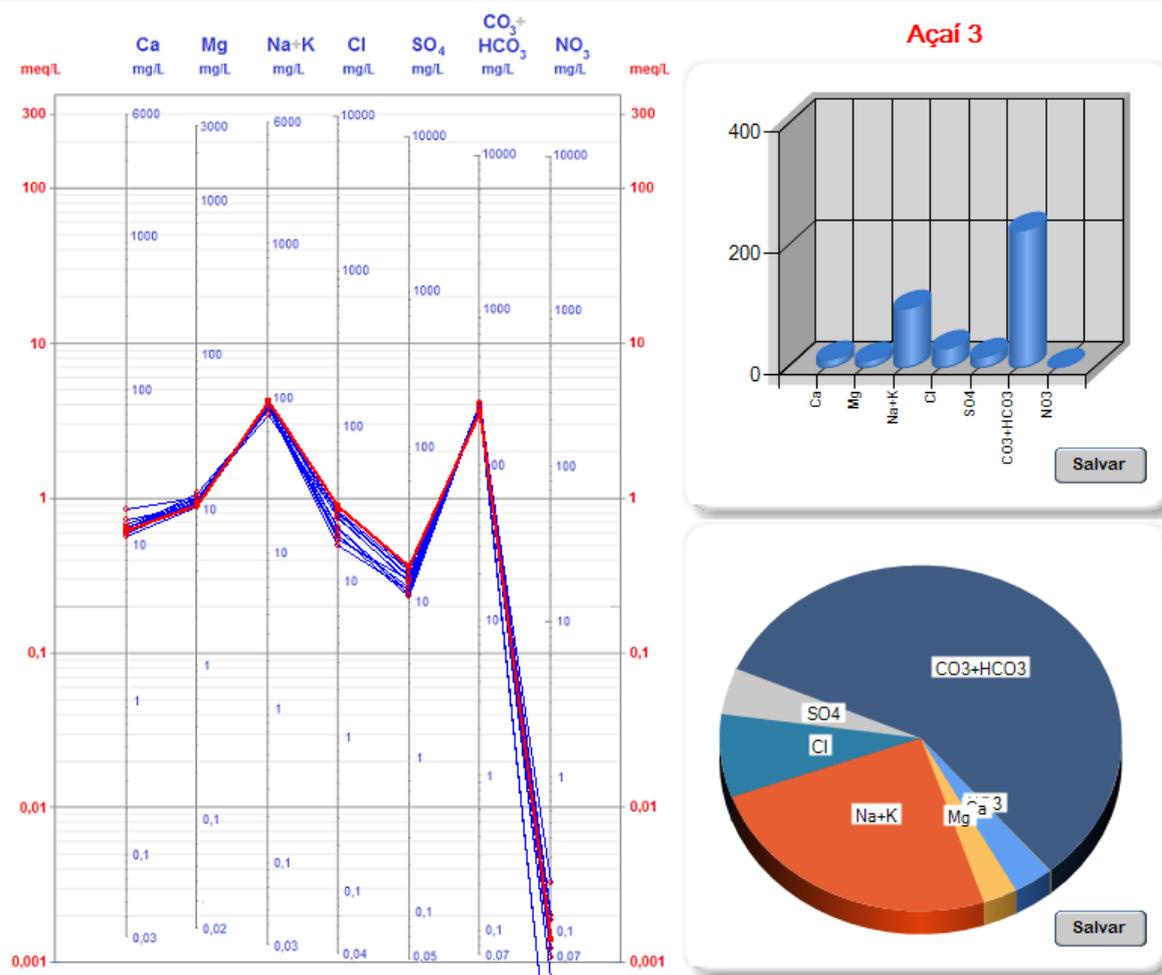
Figura 3. 19 - Diagrama de *Stiff* de amostras da água subterrânea. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem. Abril e junho de 2017. No gráfico de pizza verifica-se os percentuais dos íons no poço Açai3. Representação geométrica de um bumerangue.



#### Diagrama de Schoeller. Período chuvoso

O diagrama de *Schoeller* para os 13 poços em bombeamento da COSANPA no período chuvoso em abril e junho de 2017 indicou maiores valores para CO<sub>3</sub>+ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, seguido do Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>. Os cátions Ca<sup>+</sup> e Mg<sup>+</sup> apresentam-se na mesma faixa, porém menores em relação aos primeiros descritos. Houve um decréscimo de Cl<sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. O NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aparece como traço (Figura 3.20).

Figura 3. 20 - Diagrama de *Schoeller* de amostras das águas subterrâneas. Período chuvoso. 2ª campanha de amostragem. Classificação Hidroquímica dos 13 poços em bombeamento da COSANPA. Abril e Junho de 2017.



### *Sólidos totais dissolvidos (STD): Período chuvoso*

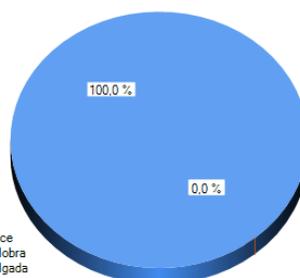
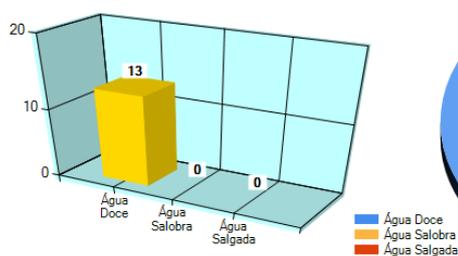
Com base nos sólidos totais dissolvidos (STD) estimado em mg/L, e de acordo com a classificação do CONAMA 357/2005, o resultado da 2ª amostragem dos 13 poços em bombeamento da COSANPA no período chuvoso em abril e junho de 2017, em 100% das amostra esteve entre 0 - 500 mg/L, foi de Água Doce (Tabela 3.16 e Figura 3.21).

Tabela 3. 16 - Sólidos Totais Dissolvidos. STD. Período chuvoso. 2ª amostragem. 13 poços da COSANPA em bombeamento (Salinópolis). Abril e junho de 2017. Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 - 500) indicando águas doces.

Poço	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	C.E (µS/cm)	STD (mg/L)	Classificação
Amapá	78,47	17,08	12,47	26,56	233,25	13,45	433	281,5	Água Doce
Barreiro3	85,64	13,21	11,47	28,80	226,88	16,29	447,4	290,8	Água Doce
Barreiro5	93,01	13,09	11,12	25,79	235,13	13,83	455,9	296,3	Água Doce
Barreiro4	91,29	12,74	11,24	31,01	223,90	16,68	443,1	288,0	Água Doce
Guaxini1	93,20	12,74	10,90	28,01	231,24	15,24	449,5	292,2	Água Doce
7 de setembro2	89,49	12,31	11,73	21,89	256,11	11,41	447,5	290,9	Água Doce
7 de setembro3	87,17	13,16	11,99	19,84	247,47	12,70	420,6	273,4	Água Doce
7 de setembro1	87,38	14,79	11,11	18,73	257,10	14,13	436,1	283,5	Água Doce
Escritório	89,08	11,95	11,53	22,50	243,67	11,85	427,6	277,9	Água Doce
Guaxini2	96,51	12,71	10,95	30,52	225,14	17,07	442,2	287,4	Água Doce
Açaí3	85,16	12,86	13,28	17,20	253,22	21,12	418	271,7	Água Doce
Farol	90,46	11,51	10,82	20,22	247,85	10,99	363,5	236,3	Água Doce
Dom Bosco	90,69	13,68	12,22	27,47	230,43	14,81	378,9	246,3	Água Doce

Figura 3. 21 - Sólidos totais dissolvidos (STD). Período chuvoso. 2ª amostragem para os 13 poços em bombeamento da COSANPA. Abril e junho de 2017. Classificação segundo a resolução CONAMA 357/2005 (0 - 500): Água Doce.

CLASSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AOS SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS



Com base no STD estimado, seguiu-se a classificação proposta pela resolução CONAMA 357/2005

Tipo de Águas	STD (mg/L)
Doce	0 - 500
Salobra	501 - 1500
Salgada	> 1500

Águas com STD superior a 35.000 mg/L são consideradas Salmouras (Ex. Águas marinhas)

### Balanço Iônico (B.I.): Período chuvoso

O Balanço Iônico dos 13 poços da COSANPA em bombeamento, no período chuvoso, em abril e junho de 2017 resultou em 10 poços que atenderam ao B.I.1. Os poços (03) que não atenderam ao B.I.1 foram: Barreiro5 com CE igual a 455,9 µS/cm e erro 10,31; o poço Guaxini2 com CE de 442,2 µS/cm e erro de 12,47; e o poço Dom Bosco (Dinossauro) com CE igual 378,9 µS/cm e erro de 11,35% (Tabela 3.17).

Tabela 3. 17 - Balanço Iônico dos 13 poços da COSANPA em bombeamento. Período chuvoso. Abril e junho de 2017. 10 poços atenderam ao B.I.I. 03 poços não atenderam ao B.I.I.

Poço	Na + K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	C.E (μS/cm)	∑ Cátions (meq/L)	∑ Anions (meq/L)	B.I.I (%)	B.I.II (%)	Observações
Amapá	3,2636	0,8538	1,0255	0,7493	3,8458	0,2800	433	5,1430	4,8751	5,35	2,67	OK
Barreiro 3	3,5637	0,6604	0,9433	0,8124	3,7402	0,3392	447,4	5,1674	4,8919	5,48	2,74	OK
Barreiro 5	3,8791	0,6544	0,9145	0,7275	3,8983	0,2879	455,9	5,4480	4,9138	10,31	5,16	Não atende B.I.I
Barreiro 4	3,7989	0,6369	0,9244	0,8748	3,7036	0,3473	443,1	5,3602	4,9257	8,45	4,22	OK
Guaxini1	3,8895	0,6369	0,8964	0,7902	3,8314	0,3173	449,5	5,4228	4,9388	9,34	4,67	OK
7 de setembro2	3,7593	0,6154	0,9647	0,6175	4,2266	0,2376	447,5	5,3394	5,0817	4,95	2,47	OK
7 de setembro3	3,6532	0,6579	0,9861	0,5597	4,0911	0,2644	420,6	5,2971	4,9152	7,48	3,74	OK
7 de setembro1	3,6713	0,7394	0,9137	0,5284	4,2444	0,2942	436,1	5,3243	5,0669	4,95	2,48	OK
Escritório	3,7366	0,5974	0,9482	0,6347	4,0187	0,2467	427,6	5,2822	4,9001	7,51	3,75	OK
Guaxini2	4,0469	0,6354	0,9005	0,8610	3,7111	0,3554	442,2	5,5828	4,9274	12,47	6,24	Não atende B.I.I
Açaí3	3,5591	0,6429	1,0921	0,4852	4,1879	0,2523	418	5,2941	4,9254	7,22	3,61	OK
Farol	3,8005	0,5754	0,8898	0,5704	4,0885	0,2288	363,5	5,2657	4,8877	7,45	3,72	OK
Dom Bosco	3,7909	0,6839	1,0050	0,7749	3,8077	0,3083	378,9	5,4797	4,8910	11,35	5,68	Não atende B.I.I

#### Balanço Iônico N°1

Baseado no Erro prático (Ep), definido por Custódio e Llamas (1983) como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \right| \times 200$$

o erro Teórico é o E.P. máximo permitido considerando-se a condutividade elétrica (C.E.), conforme mostrado abaixo:

Cond. Elétrica (μS/cm)	50	200	500	2.000	> 2.000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fatores de conversão  
Mg/L → Meq/L

Número de  
Amostras

13

#### Balanço Iônico N°2

Baseado no Erro prático (Ep) definido por Logan (1965), dado como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \right| \times 100$$

O erro Teórico é o E.P. máximo permitido levando-se em consideração os valores dos íons, conforme mostrado abaixo:

∑ cátions ou ∑ ânions	< 1	1	2	6	10	30	>30
Erro permitido (%)	15	10	6	4	3	2	1

**Classificação das Águas: Período Seco. 3ª amostragem. 14 poços da COSANPA em bombeamento. Dezembro de 2017.**

*Diagrama de Piper: Período seco. 3ª amostragem.*

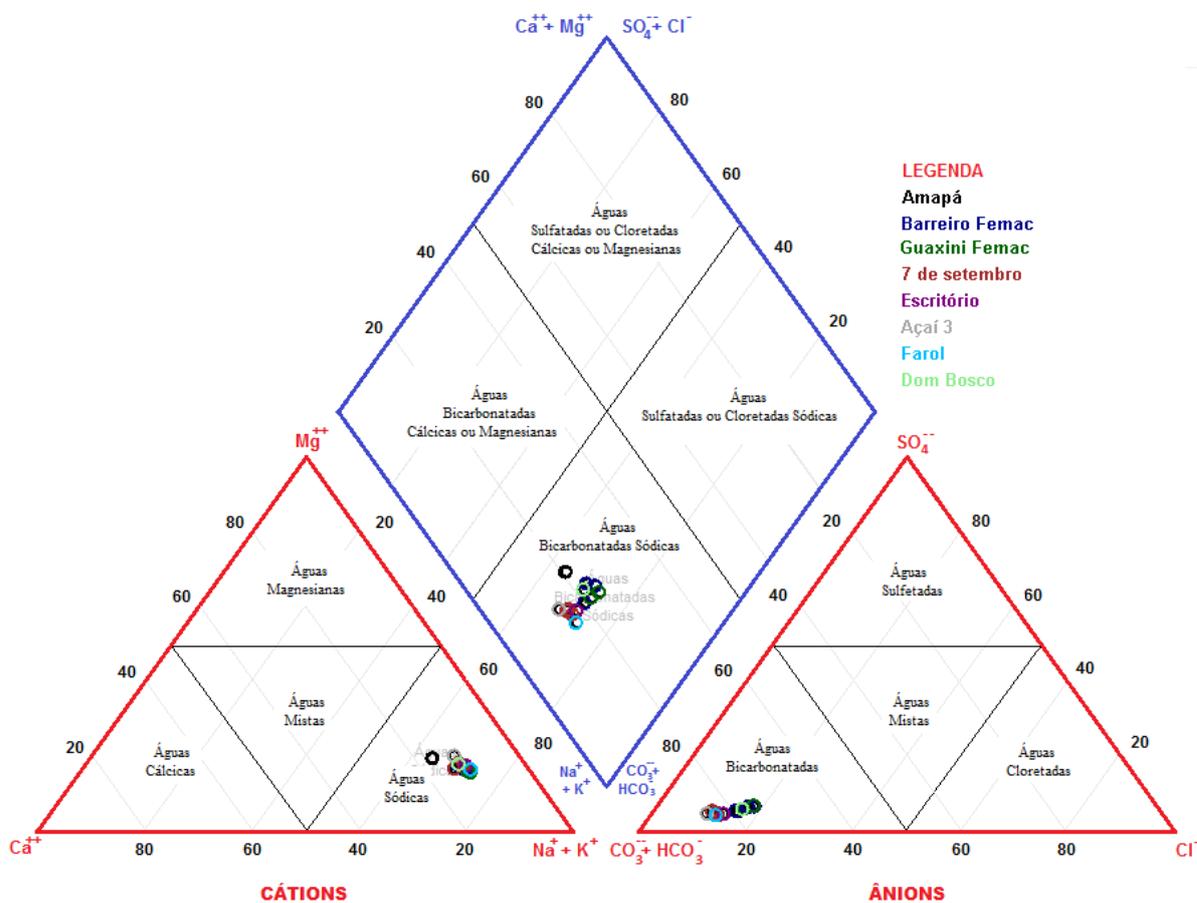
Nesse período, foram coletados e analisados 17 poços, sendo os 14 poços em bombeamento da COSANPA, incluindo o poço Jardim Atalaia, que no 2º período encontrava-se com problemas no sistema elétrico.

O resultado da classificação das águas mostrou domínio de tipos Sódica-Bicarbonatadas para todos os poços em bombeamento da COSANPA, conforme análise pelo Diagrama trilinear de *Piper* (Tabela 3.18 Figura 3.22).

Tabela 3. 18 - Análise e classificação química das águas subterrâneas dos 14 poços em bombeamento da COSANPA. Salinópolis. Período seco (dezembro de 2017).

Poço	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Classificação
<b>Amapá</b>	78,47	17,08	12,47	26,56	233,25	13,45	Sódica Bicarbonatada
<b>Barreiro 3</b>	85,64	13,21	11,47	28,80	226,88	16,29	Sódica Bicarbonatada
<b>Barreiro 5</b>	93,01	13,09	11,12	25,79	235,13	13,83	Sódica Bicarbonatada
<b>Barreiro 4</b>	91,29	12,74	11,24	31,01	223,90	16,68	Sódica Bicarbonatada
<b>Guaxini 1</b>	93,20	12,74	10,90	28,01	231,24	15,24	Sódica Bicarbonatada
<b>7 de setembro 2</b>	89,49	12,31	11,73	21,89	256,11	11,41	Sódica Bicarbonatada
<b>7 de setembro 3</b>	87,17	13,16	11,99	19,84	247,47	12,70	Sódica Bicarbonatada
<b>7 de setembro 1</b>	87,38	14,79	11,11	18,73	257,10	14,13	Sódica Bicarbonatada
<b>Escritório</b>	89,08	11,95	11,53	22,50	243,67	11,85	Sódica Bicarbonatada
<b>Guaxini 2</b>	96,51	12,71	10,95	30,52	225,14	17,07	Sódica Bicarbonatada
<b>Açaí 3</b>	85,16	12,86	13,28	17,20	253,22	21,12	Sódica Bicarbonatada
<b>Farol</b>	90,46	11,51	10,82	20,22	247,85	10,99	Sódica Bicarbonatada
<b>Dom Bosco</b>	90,69	13,68	12,22	27,47	230,43	14,81	Sódica Bicarbonatada

Figura 3. 22 - Diagrama trilinear de *Piper* de amostras da água subterrânea. Classificação Hidroquímica dos 14 poços da COSANPA (Salinópolis), da 3ª campanha de amostragem. Período seco (dezembro de 2017). Predomínio de águas Sódica-Bicarbonatadas.

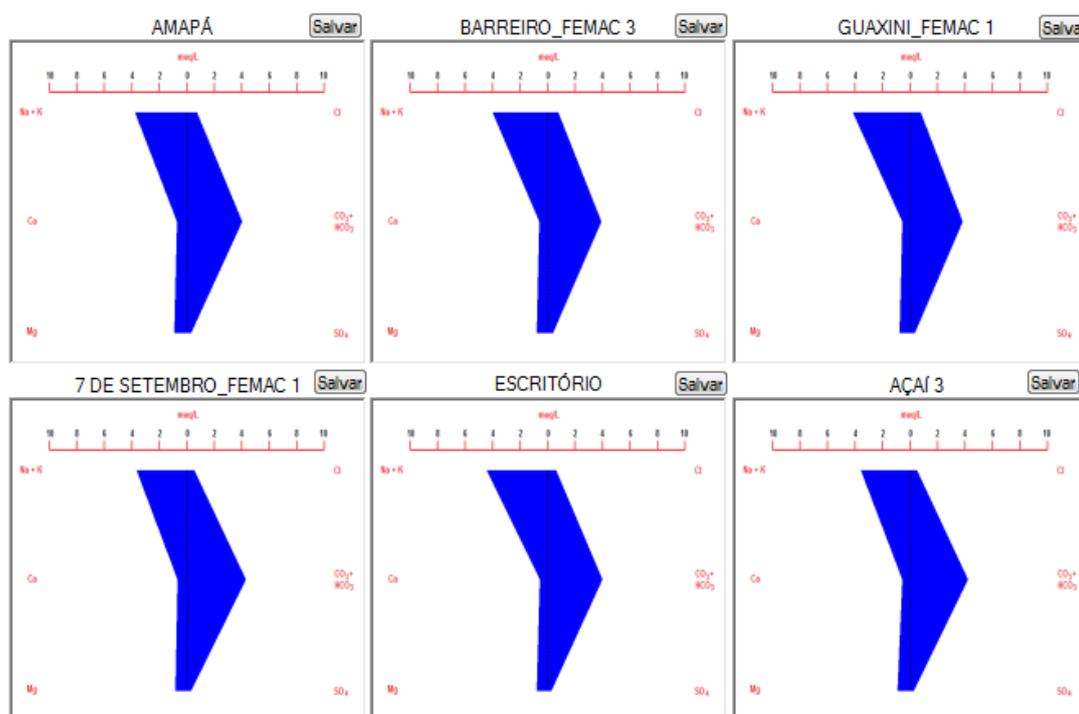


*Diagrama de Stiff. Período Seco. 3ª amostragem.*

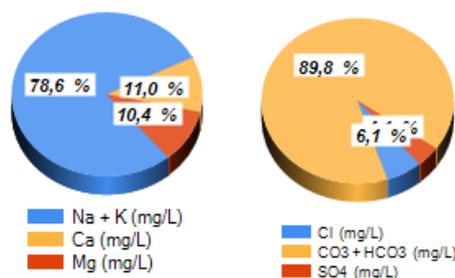
Foram selecionados na 3ª amostragem os poços em bombeamento da COSANPA no período seco em dezembro de 2017, até para efeito de comparação, os mesmos poços da 2ª amostragem (chuvoso): Amapá, Barreiro3, Guaxini1; 7 de setembro1, Escritório e Açai3.

A figura de um bumerangue se repetiu para todos, assim como as características físico-químicas (Figura 3.23). Há um enriquecimento de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  e mais ainda de  $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ . O  $\text{Ca}^+$  e  $\text{Mg}^+$  estão na mesma proporção com seus valores mais reduzidos. O  $\text{SO}_4^{2-}$  aparece em todas as amostras e fornece um caráter sulfatado à qualidade das águas.

Figura 3. 23 - Diagrama de *Stiff* de amostras da água subterrânea: Classificação Hidroquímica da 3ª campanha de amostragem. 14 poços da COSANPA. Período seco (dezembro de 2017). Representação geométrica de um bumerangue.



Poço Açai 3

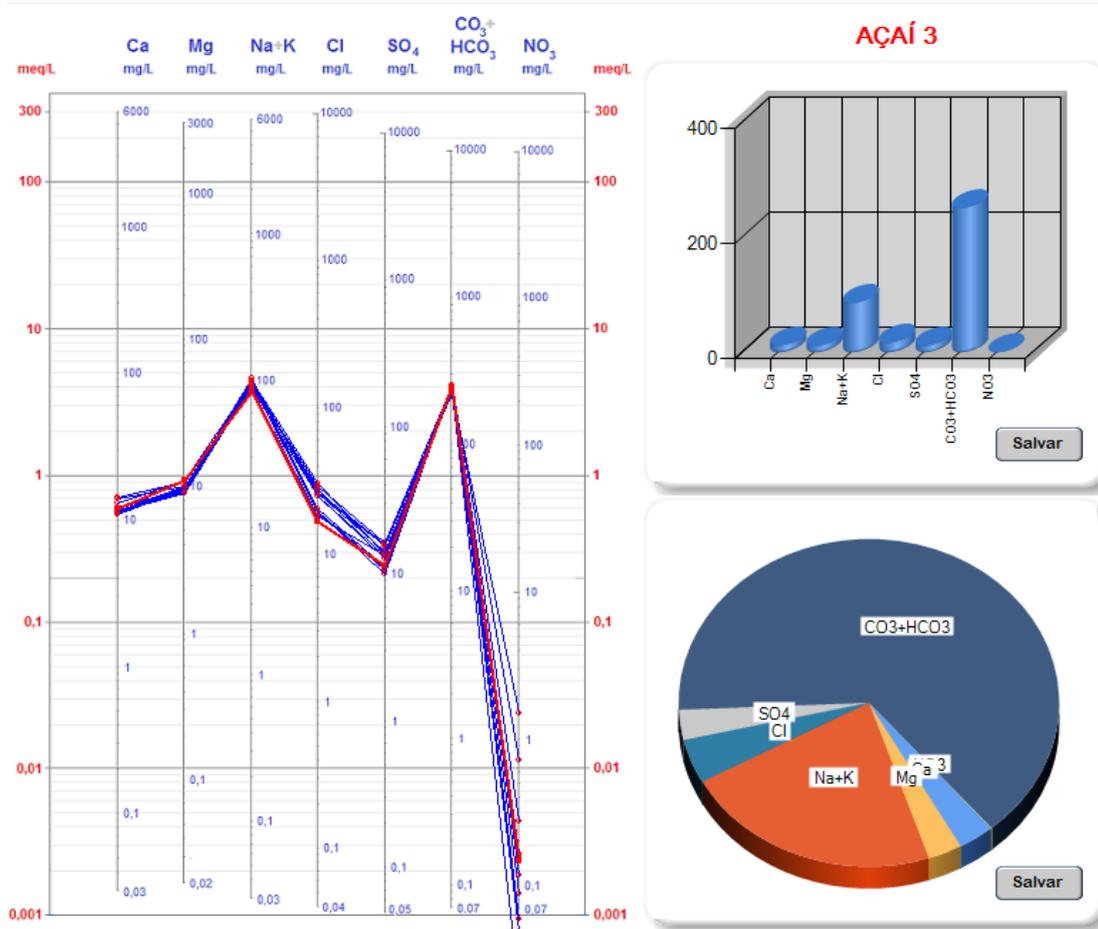


#### Diagrama de Schoeller – Período Seco.

O diagrama de *Schoeller* para os 14 poços em bombeamento da COSANPA no período seco (dezembro de 2017) aponta maiores valores para  $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$ , seguido do  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ .  $\text{Ca}^+$  e  $\text{Mg}^+$  que apresentam-se na mesma faixa, porém em menor grau com relação aos primeiros. Há um decréscimo de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . O  $\text{NO}_3^-$  aparece como traço.

As águas analisadas dos 14 poços em bombeamento são classificadas, quanto sua composição iônica, como bicarbonatadas sódicas, com baixo teores de cálcio e magnésio, e altos teores de sódio e potássio (Figura 3.24).

Figura 3. 24 - Diagrama de Schoeller de amostras das águas subterrâneas: Período seco. 3ª campanha de amostragem Classificação Hidroquímica dos 14 poços em bombeamento da COSANPA (Salinópolis). Dezembro de 2017.



*Sólidos totais dissolvidos (STD): Período Seco. 3ª amostragem*

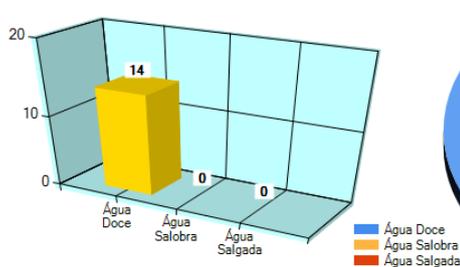
Segundo a classificação do CONAMA 357/2005, com base no STD estimado em mg/L, as águas da 3ª amostragem para os 14 poços em bombeamento da COSANPA, no período seco de dezembro de 2017 (Tabela 3.19 e Figura 3.25), resultou em água doce, visto que todas mostraram STD entre 0 – 500 mg/L.

Tabela 3. 19 - Sólidos totais dissolvidos (STD): 3ª amostragem para os poços quatorze poços da COSANPA no período seco (Dezembro de 2017). Água doce.

Poço	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	C.E (µS/cm)	STD (mg/L)	Classificação
Escritório	105,40	11,33	10,09	20,80	239,16	11,36	415,9	270,3	Água Doce
7 de Setembro2	103,91	11,35	9,94	19,35	251,84	10,84	429,2	279,0	Água Doce
Farol	105,12	11,03	9,90	19,54	246,30	10,22	402,8	261,8	Água Doce
Açaí 3	85,85	11,96	11,38	16,92	250,71	11,56	403,7	262,4	Água Doce
Dom Bosco	100,73	13,07	11,24	30,92	250,71	13,96	403,7	262,4	Água Doce
Barreiro4	100,73	11,61	9,41	26,85	220,42	16,26	427,5	277,9	Água Doce
7 de Setembro3	96,25	11,95	10,19	19,65	250,07	11,17	418,1	271,8	Água Doce
7 de Setembro1	86,92	14,24	10,38	18,32	256,55	13,38	420,1	273,1	Água Doce
Barreiro5	101,03	11,71	9,67	25,15	237,44	13,61	420,8	273,5	Água Doce
Barreiro 3	96,04	12,34	9,94	26,23	234,67	15,93	422,7	274,8	Água Doce
Guaxini1	99,49	11,59	9,34	26,37	227,47	14,38	415,5	270,1	Água Doce
Guaxini2	94,29	11,70	9,20	29,18	248,99	16,48	444,6	289,0	Água Doce
Jardim Atalaia	91,51	11,67	10,27	27,92	226,01	14,15	437,3	284,2	Água Doce
Amapá	89,95	14,50	11,07	25,07	240,41	12,81	432,8	281,3	Água Doce

Figura 3. 25 - Classificação dos sólidos totais dissolvidos (STD): 3ª amostragem para os 14 poços em bombeamento da COSANPA no período seco (Dezembro de 2017). Água doce.

CLASSIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AOS SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS



Com base no STD estimado, seguiu-se a classificação proposta pela resolução CONAMA 357/2005

Tipo de Águas	STD (mg/L)
Doce	0 – 500
Salobra	501 – 1500
Salgada	> 1500

Águas com STD superior a 35.000 mg/L são consideradas Salmouras (Ex. Águas marinhas)

*Balanço iônico (BI): Período Seco. 3ª amostragem.*

O Balanço Iônico dos 14 poços da COSANPA em bombeamento, no período seco de dezembro de 2017, revelou que somente 07 (50%) atenderam ao B.I.1 (Tabela 3.20). Novamente, ressalta-se a questão de apenas os íons maiores estarem sendo considerados para o balanço.

Tabela 3. 20 - Balanço iônico (BI): 3ª amostragem para os 14 poços da COSANPA em bombeamento no período seco (Dezembro de 2017).

Poço	Na + K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (meq/L)	SO <sub>4</sub> (meq/L)	C.E (meq/L)	Σ Cátions (meq/L)	Σ Anions (meq/L)	B.I.I (%)	B.I.II (%)	Observações
Escritório	4,4537	0,5664	0,8298	0,5868	3,9388	0,2365	415,9	5,8499	4,7621	20,50	10,25	Não atende B.I.I
7 de Setembro Femac 2	4,3955	0,5674	0,8175	0,5459	4,2008	0,2257	429,2	5,7804	4,9724	15,03	7,51	Não atende B.I.I
Farol	4,4392	0,5514	0,8142	0,5512	4,0772	0,2128	402,8	5,8048	4,8412	18,10	9,05	Não atende B.I.I
Açaí 3	3,5995	0,5979	0,9359	0,4773	4,1578	0,2407	403,7	5,1333	4,8757	5,15	2,57	OK
Dom Bosco	4,2330	0,6534	0,9244	0,8723	4,1578	0,2906	403,7	5,8108	5,3207	8,81	4,40	OK
Barreiro Femac 4	4,2330	0,5804	0,7739	0,7574	3,6469	0,3385	427,5	5,5873	4,7429	16,35	8,17	Não atende B.I.I
7 de Setembro Femac 3	4,0611	0,5974	0,8380	0,5543	4,1337	0,2326	418,1	5,4965	4,9206	11,06	5,53	Não atende B.I.I
7 de Setembro Femac 1	3,6520	0,7119	0,8537	0,5168	4,2430	0,2786	420,1	5,2175	5,0383	3,49	1,75	OK
Barreiro Femac 5	4,2484	0,5854	0,7953	0,7095	3,9342	0,2834	420,8	5,6290	4,9270	13,30	6,65	Não atende B.I.I
Barreiro Femac 3	4,0269	0,6169	0,8175	0,7399	3,8579	0,3317	422,7	5,4612	4,9475	9,87	4,94	OK
Guaxini Femac 1	4,1823	0,5794	0,7681	0,7439	3,7709	0,2994	415,5	5,5298	4,8142	13,84	6,92	Não atende B.I.I
Guaxini Femac 2	3,9629	0,5849	0,7566	0,8232	4,1291	0,3431	444,6	5,3044	5,2953	0,17	0,09	OK
Jardim Atalaia	3,8302	0,5834	0,8446	0,7876	3,7363	0,2946	437,3	5,2581	4,8185	8,73	4,36	OK
Amapá	3,7704	0,7249	0,9104	0,7072	3,9735	0,2667	432,8	5,4056	4,9475	8,85	4,43	OK

**Balanço Iônico N°1**

Baseado no Erro prático (Ep), definido por Custódio e Llamas (1983) como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cátions}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cátions}} \right| \times 200$$

o erro Teórico é o E.P. máximo permitido considerando-se a condutividade elétrica (C.E.), conforme mostrado abaixo:

Cond. Elétrica (µS/cm)	50	200	500	2.000	> 2.000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fatores de conversão  
Mg/L → Meq/L

Número de  
Amostras

14

**Balanço Iônico N°2**

Baseado no Erro prático (Ep) definido por Logan (1965), dado como:

$$Ep (\%) = \left| \frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cátions}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cátions}} \right| \times 100$$

O erro Teórico é o E.P. máximo permitido levando-se em consideração os valores dos íons, conforme mostrado abaixo:

Σ cátions ou Σ ânions	< 1	1	2	6	10	30	>30
Erro permitido (%)	15	10	6	4	3	2	1

## Discussão

Os trabalhos versando sobre a hidroquímica na região de Salinópolis e arredores, em geral analisam água de poços rasos em torno de 30 metros de profundidade. Esse patamar abrange o aquífero Barreiras, a parte superior do aquífero Pirabas Superior e quase nenhuma análise no aquífero Pirabas Inferior. O escopo desse trabalho analisou poços mais profundos relacionados a filtros localizados em profundidades abaixo de 60 metros.

Nos estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA, a classificação hidroquímica feita com auxílio dos diagramas de *Piper* mostrou que as águas tanto no aquífero Pirabas Superior como do aquífero Pirabas Inferior foram classificadas como cálcicas bicarbonatadas (ANA, 2019).

Através das análises químicas nos diagramas de *Piper*, *Stiff e Schoeller*, o sistema aquífero Pirabas Inferior foi classificado como sódico bicarbonatado, com águas que podem ter origem marinha provavelmente inseridas no aquífero através de condutos característicos de aquíferos cársticos, através das rochas calcárias da Formação Pirabas que afloram por todo o litoral.

É muito menos provável a origem das águas sódica-bicarbonatadas estarem associadas à mistura com águas conatas da Formação Pirabas, na condição de que a lixiviação pretérita não conseguiu eliminar por completo os sais marinhos dissolvidos e estes permaneceram adsorvidos nas argilas. Esta mesma origem também não pode ser assumida para o íon Cl.

O sistema aquífero Pirabas Superior teve sua água classificada como cálcica bicarbonatada, pela relação da fonte carbonática dos calcários da Formação Pirabas.

Houve mistura de água entre as rochas da Formação Barreiras e da Formação Pirabas na parte superior, tendo em vista a classificação cálcica mista da água do poço Guaxini Pentágono com valor relativo alto para o íon sulfato.

Otobo (1995) e Souza (1996) ao determinaram os fatores controladores do quimismo de águas subterrâneas da região nordeste do Pará, mostrou que nas águas das rochas calcárias a relação  $Ca+Mg:HCO_3 = 1$  reflete a dissolução dos carbonatos. São, assim, águas cálcicas bicarbonatadas, ricas em soluto (STD médio = 230 mg/L, com pH próximo de 7,0, as quais apresentam uma sensível diluição nos períodos chuvosos. Quando em contato com os níveis argilosos contendo pirita, tornam-se sulfatadas-sódicas e ácidas (pH = 5). Os produtos de

alteração do calcário são saturados em base, com pH=8,0, sendo constituído por quartzo, caolinita e calcita em menor proporção.

### Metais Pesados

Os metais pesados analisados foram o arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel, zinco e mercúrio (Tabela 3.21). Foram selecionados pontos para coleta de 17 amostras do sistema aquífero Pirabas.

As concentrações de níquel encontradas nas águas analisadas foram em sua maioria <0,005 mg/L (limite da técnica empregada para análise). Todas as amostras têm seus valores inferiores ao valor máximo permitido pela Portaria do Ministério da Saúde, que é de 0,07 mg/L de níquel na água para consumo humano.

Os valores encontrados para o metal zinco variaram de <0,01 mg/L a 1,104 mg/L, ficando todas abaixo do valor máximo permitido de 5 mg/L estabelecido pela referida Portaria. Do mesmo modo, os valores encontrados para arsênio, chumbo, cobre, cádmio, cromo e mercúrio mostram-se abaixo do limite definido pela portaria do Ministério da Saúde.

Tabela 3. 21 - Resultado das análises de metais pesados (mg/L) das águas subterrâneas dos 17 poços da COSANPA no período seco (Dezembro de 2017). Lamin-RJ-CPRM.

Poços	Coleta	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn	Hg Total
<b>Guaxini Pentágono</b>	04/12/2017	0,002	0,019	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,01	0,0003
<b>Escritório</b>	05/12/2017	0,002	0,011	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,018	0,0003
<b>7 de Setembro2</b>	05/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,01	0,0003
<b>Farol</b>	05/12/2017	0,002	0,012	0,002	0,002	0,007	0,005	0,005	0,017	0,0003
<b>Açaí3</b>	05/12/2017	0,002	0,011	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,012	0,0003
<b>Dom Bosco</b>	05/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,01	0,0003
<b>Barreiro4</b>	05/12/2017	0,002	0,011	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,012	0,0003
<b>7 de Setembro3</b>	06/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,017	0,0003
<b>7 de Setembro1</b>	06/12/2017	0,002	0,014	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,01	0,0003
<b>Barreiro5</b>	06/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,01	0,0003
<b>Barreiro3</b>	06/12/2017	0,002	0,021	0,002	0,002	0,006	0,005	0,005	1,104	0,004
<b>Guaxini1</b>	06/12/2017	0,002	0,013	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,471	0,0003
<b>Guaxini2</b>	06/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,031	0,0003
<b>Jardim Atalaia</b>	07/12/2017	0,002	0,01	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,033	0,0003
<b>Amapá</b>	07/12/2017	0,002	0,011	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,118	0,0003
<b>Açaí2</b>	07/12/2017	0,002	0,039	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,075	0,0004
<b>Barreiro1</b>	08/12/2017	0,002	0,02	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,134	0,0003

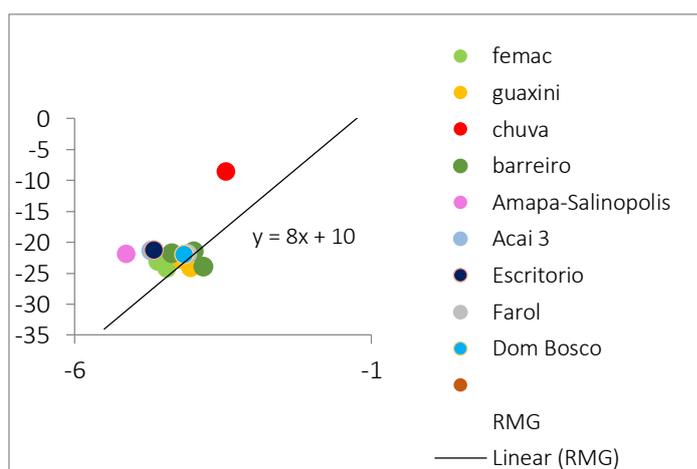
### 3.4 Análises isotópicas: isótopos estáveis de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e deutério ( $\delta^2\text{H}$ )

#### 3.4.1 Resultado da 1ª amostragem isotópica. Período chuvoso. Abril e junho de 2017.

As razões isotópicas das análises para  $\delta^{18}\text{O}$  variam no intervalo de -5,12‰ (poço Amapá) a -3,82‰ (poço Barreiro3), enquanto que os resultados para  $\delta^2\text{H}$  oscilam de -24,3‰ (7 de setembro 1) a -21,3‰ (Escritório). A Tabela 3.22 representa a distribuição das amostras dos poços e de chuva na RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ ). Os valores da chuva para o  $\delta^2\text{H}$  (‰) foi igual a -8,6 e para o  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) foi de -3,44.

Tabela 3. 22 - Distribuição das amostras dos poços e de chuva da 1ª amostragem realizada no período chuvoso nos meses de abril e junho de 2017 na RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ )

	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Erro	
7 Setembro Femac 1	-24,3	-4,44	-38	-6
7 Setembro Femac 2	-23,2	-4,59	10	0
7 Setembro Femac 3	-22,4	-4,28		
Guaxini Femac 1	-22,9	-4,2		
Guaxini Femac 2	-24,2	-4,04		
Barreiro Femac 3	-24	-3,82		
Barreiro Femac 4	-21,8	-4,35		
Barreiro Femac 5	-21,5	-3,98		
Amapá	-22	-5,12		
Chuva Salinópolis	-8,6	-3,44		
Açai 3	-21,4	-4,70		
Escritório	-21,3	-4,66		
Farol	-21,9	-4,09		
Dom Bosco	-22,1	-4,15		



O resultado da água de chuva coletada apresentou características de ter evaporado, devido a um provável processo de fracionamento da amostragem. A coleta não foi feita de maneira apropriada, pois além de não ter sido coletada em equipamento adequado, a mesma foi armazenada além do tempo adequado.

Quanto aos resultados das amostras dos poços, algumas ficaram bem próximas da RMG (acima), caracterizando um enriquecimento isotópico. Possivelmente estas águas possuem origem meteórica. Ocorreram três amostras que estão mais distantes da curva,

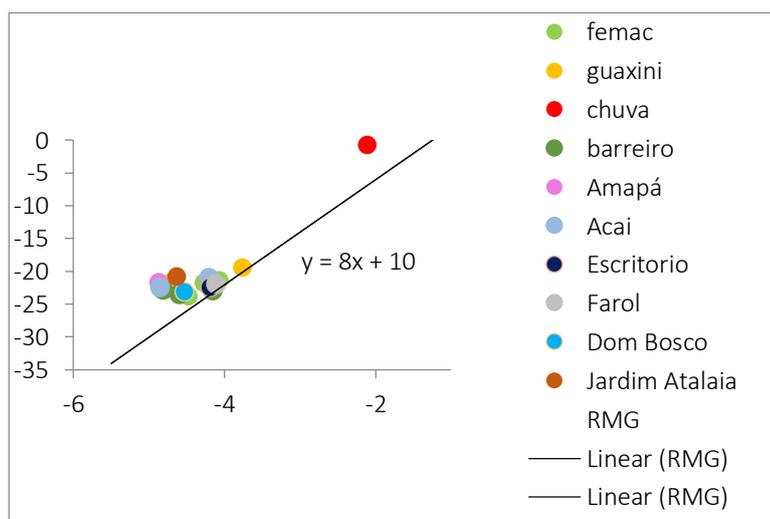
possivelmente causada pela evaporação, podendo ser da forma inapropriada da coleta, ou de suas origens.

### 3.4.2 Resultado da 2ª amostragem. Período seco. Dezembro de 2017.

As razões isotópicas das análises para  $\delta^{18}\text{O}$  variam no intervalo de -4,87‰ (poço Amapá) a -3,76‰ (poço Guaxini Pentágono-RIMAS). Os resultados para  $\delta^2\text{D}$  vão de -23,8‰ (poço 7 de setembro Femac 1) a -19,4‰ (poço Guaxini Pentágono-RIMAS). A tabela 3.23 representa a distribuição das amostras dos poços e de chuva na RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ ). Os valores da chuva para o  $\delta^2\text{H}$  (‰) foi igual a -0,7 e para o  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) foi de -2,11.

Tabela 3. 23 - Distribuição das amostras dos poços e de chuva da 2ª amostragem realizada no período seco. Dezembro de 2017. RMG - Reta Meteórica Global ( $y = 8x + 10$ ).

	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
7 Setembro-Femac 1	-23,8	-4,48
7 Setembro-Femac 2	-21,4	-4,07
7 Setembro-Femac 3	-21,8	-4,27
Guaxini-Femac 1	-22,3	-4,76
Guaxini-Femac 2	-21,7	-4,71
Guaxini-Pentágono (RIMAS)	-19,4	-3,76
Barreiro-Femac 1 (RIMAS)	-22,8	-4,81
Barreiro-Femac 3	-22,9	-4,15
Barreiro Femac 4	-23,5	-4,6
Barreiro-Femac 5	-23,2	-4,57
Amapá	-21,7	-4,87
Chuva	-0,7	-2,11
Acai 3	-21,0	-4,20
Açaí 2 (RIMAS)	-22,5	-4,85
Escritorio	-22,5	-4,19
Farol	-22,0	-4,11
Dom Bosco	-23,1	-4,53
Jardim Atalaia	-20,8	-4,63



Houve enriquecimento isotópico na água da chuva em relação à primeira amostragem, derivando que a coleta de água de chuva foi correta. Para as amostras repetidas, não foram verificadas diferenças entre elas. Ao compararmos os resultado entre as duas campanhas de amostragens, nota-se que na 1ª amostragem, além da chuva não ter fornecido uma boa resolução (afastada da reta), os pontos amostrados tem comportamento disperso ao longo da RMG, tanto acima quanto abaixo.

Na 2ª amostragem, análise da chuva comportou-se com valores mais próximos da reta, assim como os valores dos poços localizaram-se na parte de cima da reta, caracterizando um enriquecimento isotópico nessas águas.

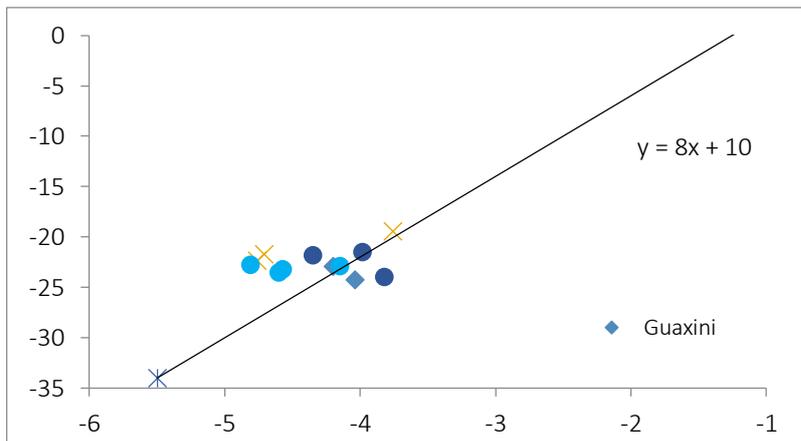
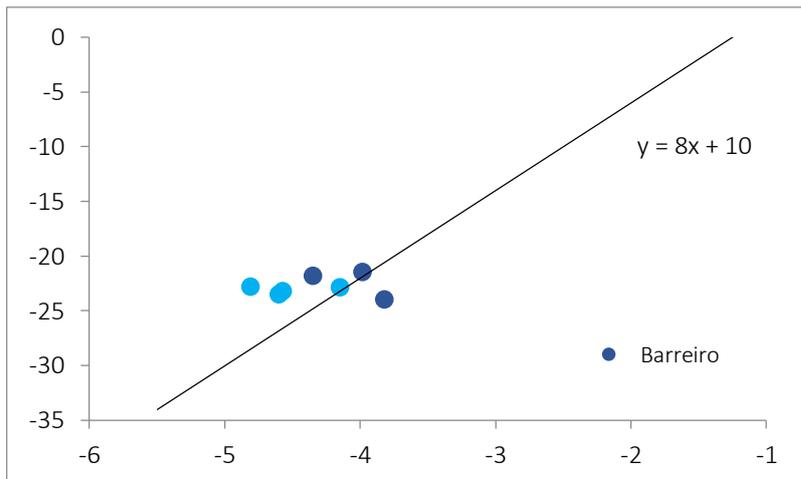
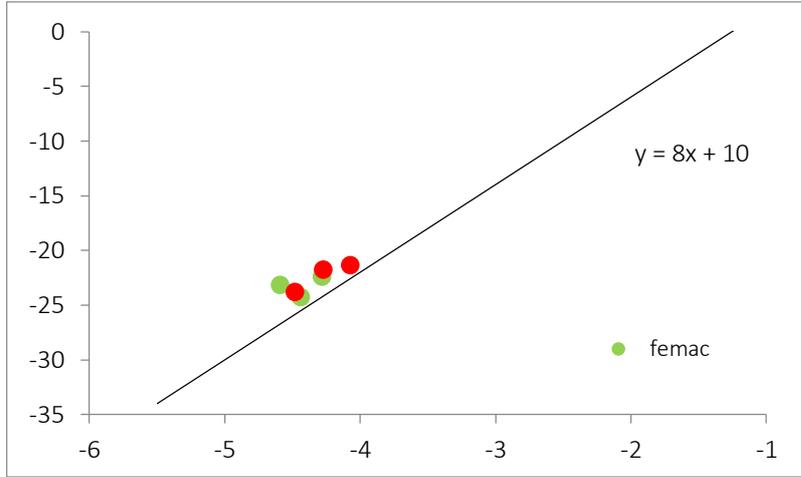
Ao serem analisadas individualmente algumas baterias de poços profundos, verificou-se que o sistema 7 de setembro, que possui 03 poços em bombeamento, tem todos eles acima da Reta Meteorológica Global, portanto se apresentam enriquecidos nas duas amostragem (chuvoso e seco) no ano de 2017 (Figura 3.26).

O sistema Barreiro conta com três poços em bombeamento e um poço de monitoramento da RIMAS. Foi observado que um poço encontra-se empobrecido isotopicamente durante as duas etapas de amostragem.

O sistema Guaxini apresenta 02 poços profundos em bombeamento, há ainda poços menores que não foram feitos parte do estudo. Apresentou maior dispersão e teve maior quantidade de amostras abaixo da reta de tendência da RMB. Portanto, foi o mais empobrecido isotopicamente no estudo.

O sistema Barreiro e Guaxini tiveram resultados isotópicos de seus poços bem mais próximos da linha de tendência da RMG em relação aos demais poços.

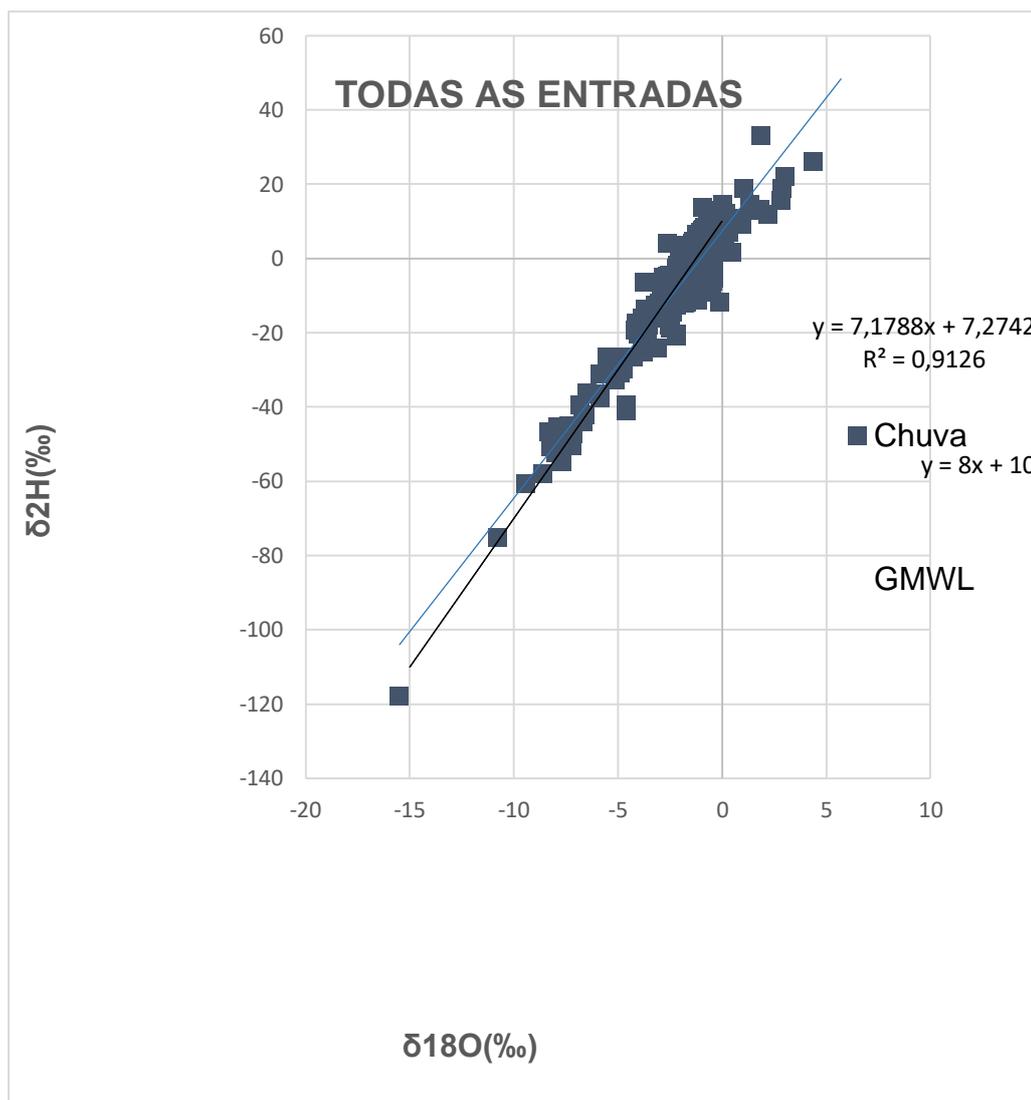
Figura 3. 26 - Relação do  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  para os poços dos sistemas 7 de setembro (Femac); Barreiro e Guaxini quanto a RMG nas duas etapas de amostragem no ano de 2017.



### 3.4.3 Análise dos dados da GNIP (*Global Network of Isotopes Precipitation*) de Belém versus Reta Meteórica Global (RMB).

Através das análises, temos a comparação dos dados da GNIP de Belém com a Reta Meteórica Global, possibilitando a visualização da origem das chuvas e a interpretação se elas seguem uma relação próxima com o parâmetro global, como se mostra na Figura 3.27.

Figura 3. 27 - Comparação dos dados de chuva entre a GNIP Belém e a RMG.

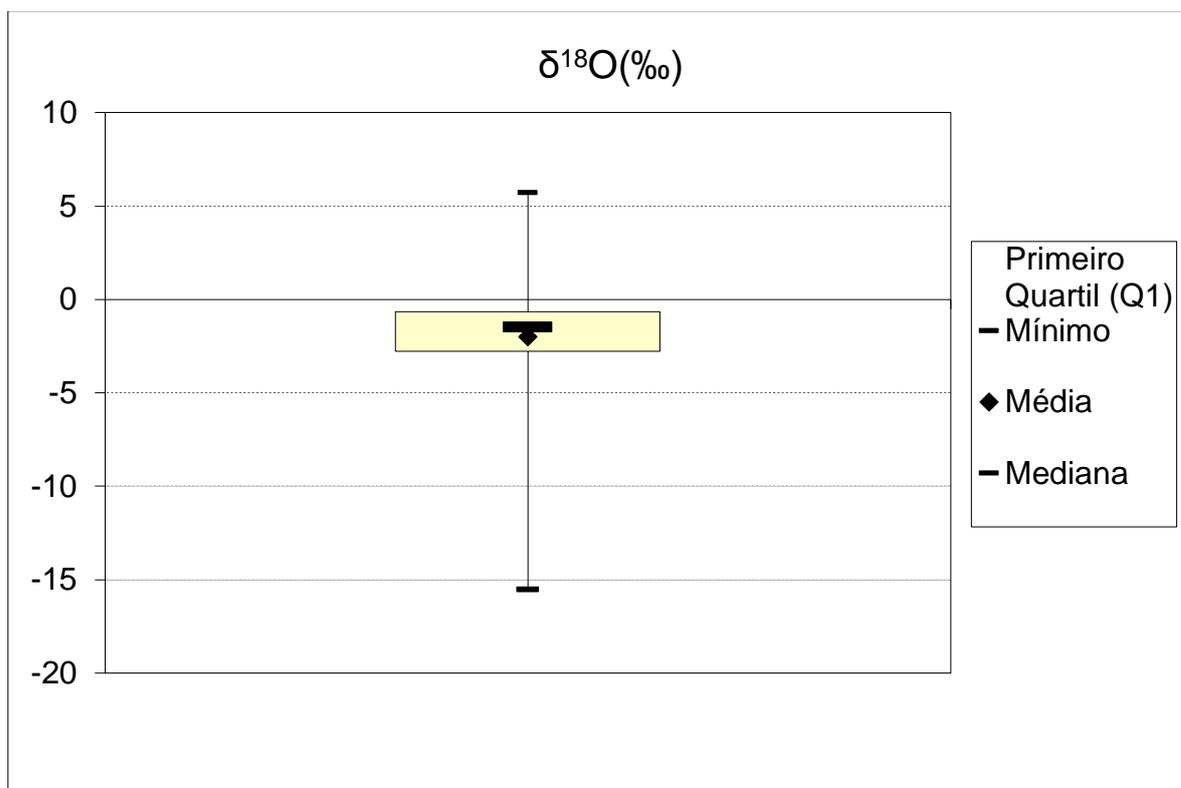


De acordo com a figura acima, nota-se que os dados da GNIP de Belém e a Reta Meteórica Global se aproximam, mostrando que de fato tem-se uma relação direta entre a precipitação que ocorre com a média global. Na verificação dos dados compreende-se que existe uma concentração da relação dos isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio, mostrando a ocorrência de chuvas de mesma origem.

Além disso, verifica-se que as regressões lineares realizadas nessas análises, tiveram valores próximos, afirmando o fato das chuvas presentes nessa região seguirem parâmetros da média global.

Abaixo é possível analisarmos cada uma das amostras dos isótopos estáveis independentes, ou seja, verificar os parâmetros estatísticos no formato de *boxplot* do  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) e do  $\delta^2\text{H}$  (‰) (Figuras 3.28 e 3.29).

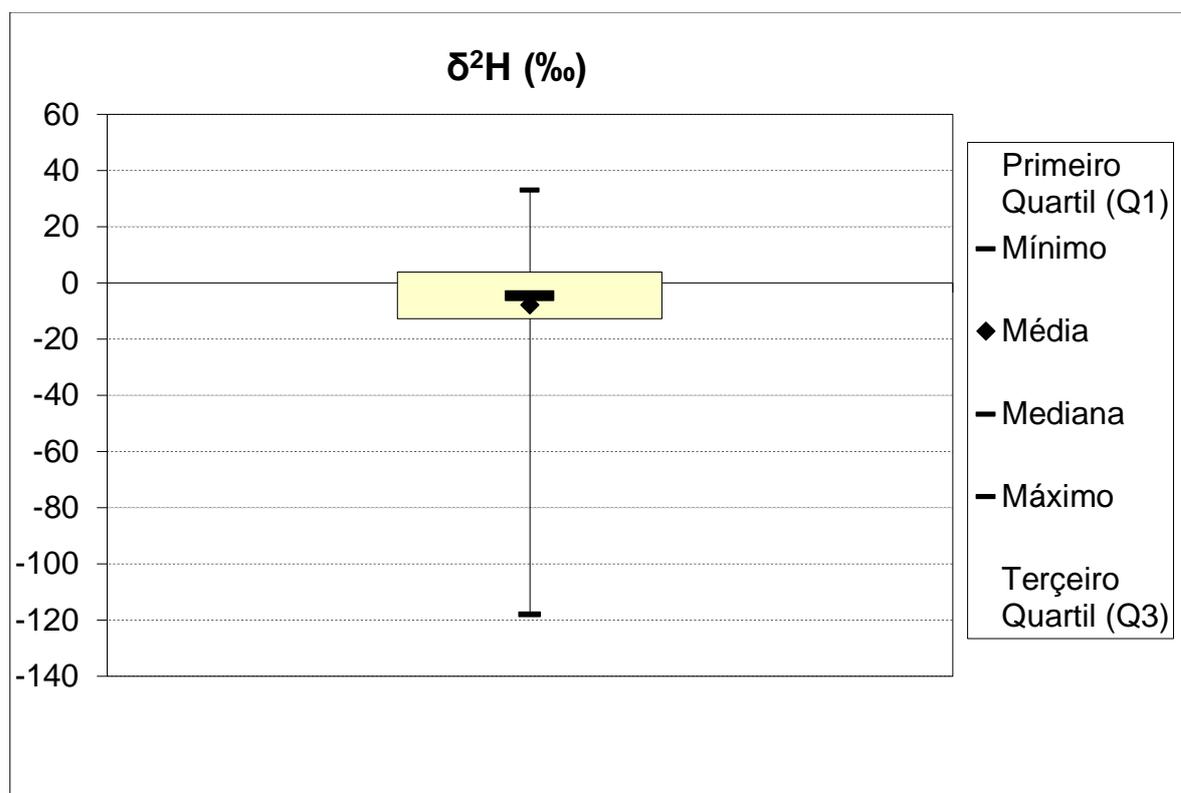
Figura 3. 28 - Parâmetros estatísticos no formato de boxplot do  $\delta^{18}\text{O}$  (‰).



Foi analisado inicialmente o  $\delta^{18}\text{O}$ , e nota-se que a maioria dos dados encontram-se próximo a média e a mediana, de -1.5 (‰), mostrando que de fato os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  estão agrupados e possuem um padrão nessa região de análise. Os picos de máximo e mínimo estão fora do padrão sendo considerados *outliers* e casos esporádicos, chegando a possuir valores superiores a 5 (‰) e inferiores a -15 (‰). Essa análise ajuda a visualização do comportamento dos isótopos de forma isolada, favorecendo análises futuras e conclusões mais aprofundadas.

Após a análise do  $\delta^{18}\text{O}$ , foi realizada a análise do deutério a partir dos mesmos métodos anteriores. Abaixo na Figura 3.29, vemos a distribuição dos parâmetros em formato de *Boxplot*.

Figura 3. 29 - Distribuição dos parâmetros estatísticos no formato de *boxplot* do  $\delta^2\text{H}$  (‰).

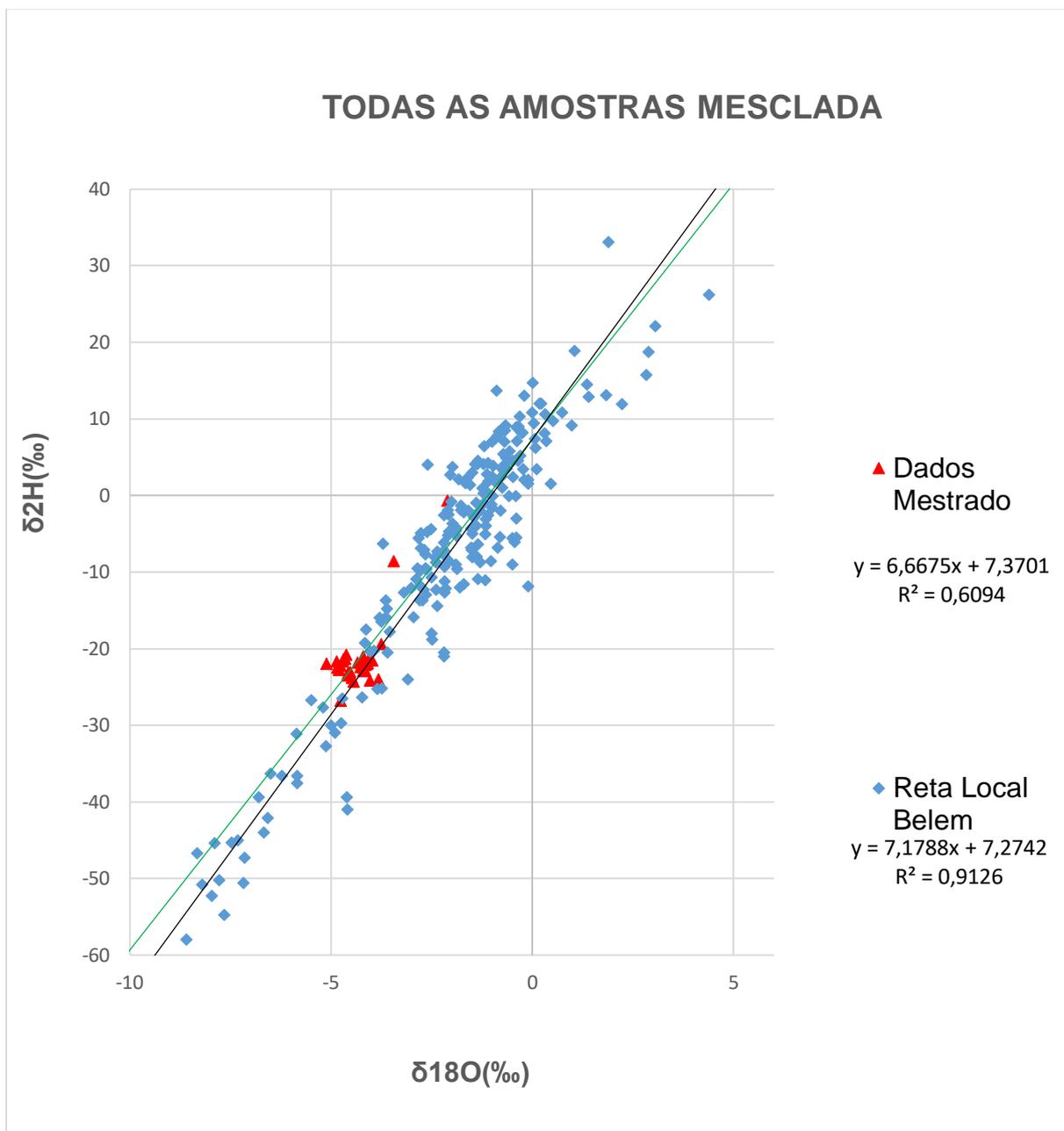


No caso do deutério verificou-se que a concentração dos dados se encontra no 0 (zero), variando cerca de  $\pm 5\%$  de  $\delta^2\text{H}$  e possuindo valores de máximo e mínimos bem dispersos. Nota-se que os valores de máximo e mínimo se encontram acima de  $20\%$  e abaixo de  $-100\%$ , enquanto a maioria dos dados se localiza em locais próximo ao  $0\%$ , afirmando de fato a dispersão fora do padrão para esses dados.

#### 3.4.4 Análises e Interpretação dos dados da GNIP no trabalho

Os dados trabalho foram obtidos no município de Salinópolis, estado do Pará. No contexto geológico regional, o sistema aquífero Pirabas, é o manancial subterrâneo mais importante que abastece o município. Abaixo segue a análise representativa dos dados e a sua dispersão em relação aos dados coletados nesta área (Figura 3.30).

Figura 3. 30 - Representação dos dados da GNIP e sua dispersão em relação aos dados da área (dados do Mestrado).



De acordo com os dados analisados, nota-se que os mesmos possuem um padrão, sendo aglomerados em uma faixa determinada com a relação aos dois isótopos, mostrando que as águas nessa região possuem as mesmas características, somente alguns pontos estão fora desse padrão e podem ser considerados *outliers* ou que eventos esporádicos ocorreram na área de análise.

Para visualização do padrão da amostragem dos dois isótopos relacionados a GNIP, foram confeccionados gráficos com os pontos localizados em relação à linha de tendência da reta

local Belém. A Figura 3.31 correlaciona as amostragens 1 (chuvoso) e 2 (seco) com a local Belém. A Figura 3.32 estabelece todas as amostragens separadas por local.

Figura 3. 31 - Correlação das amostragens 1 (chuvoso) e 2 (seco) com a local Belém.

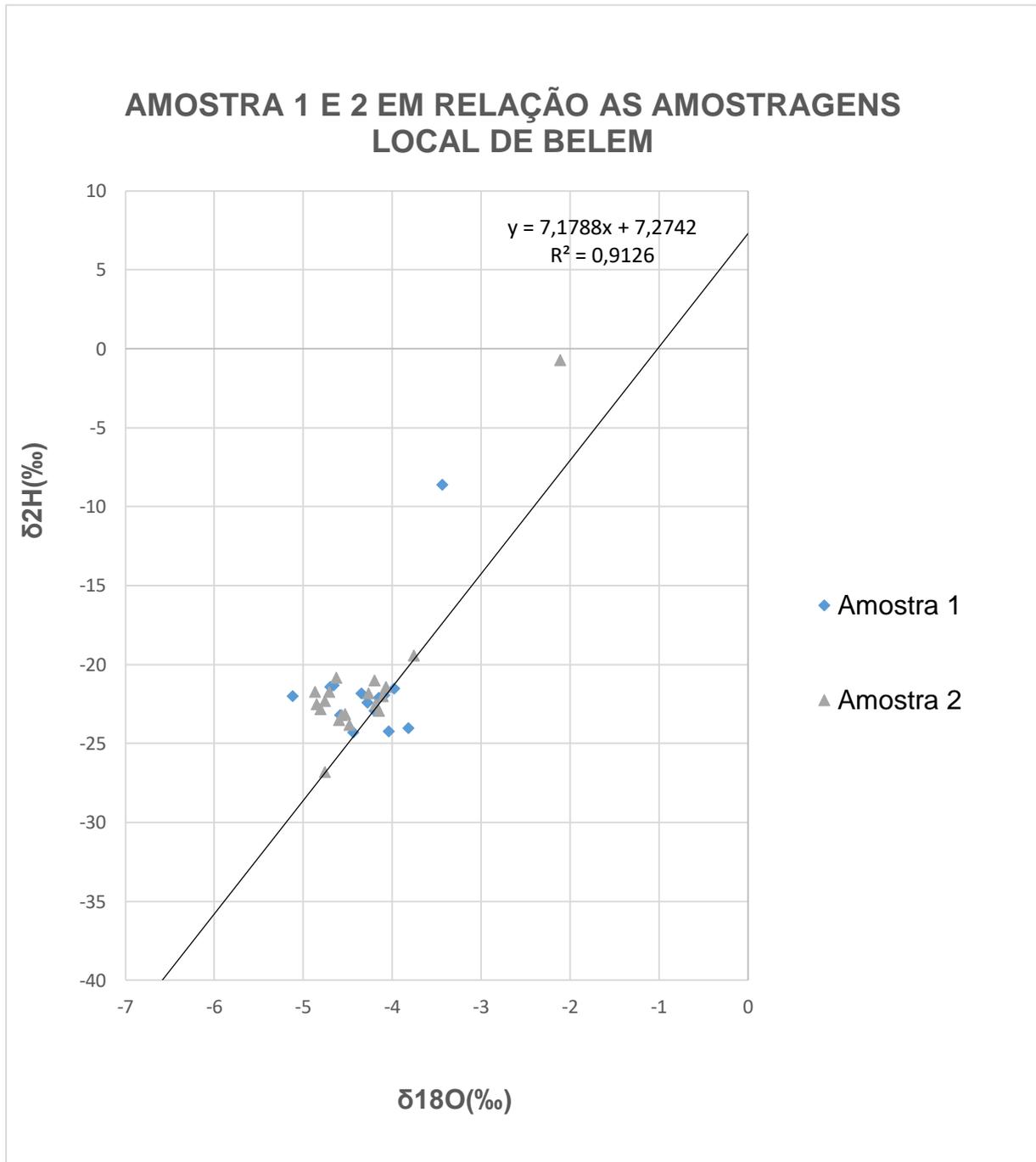
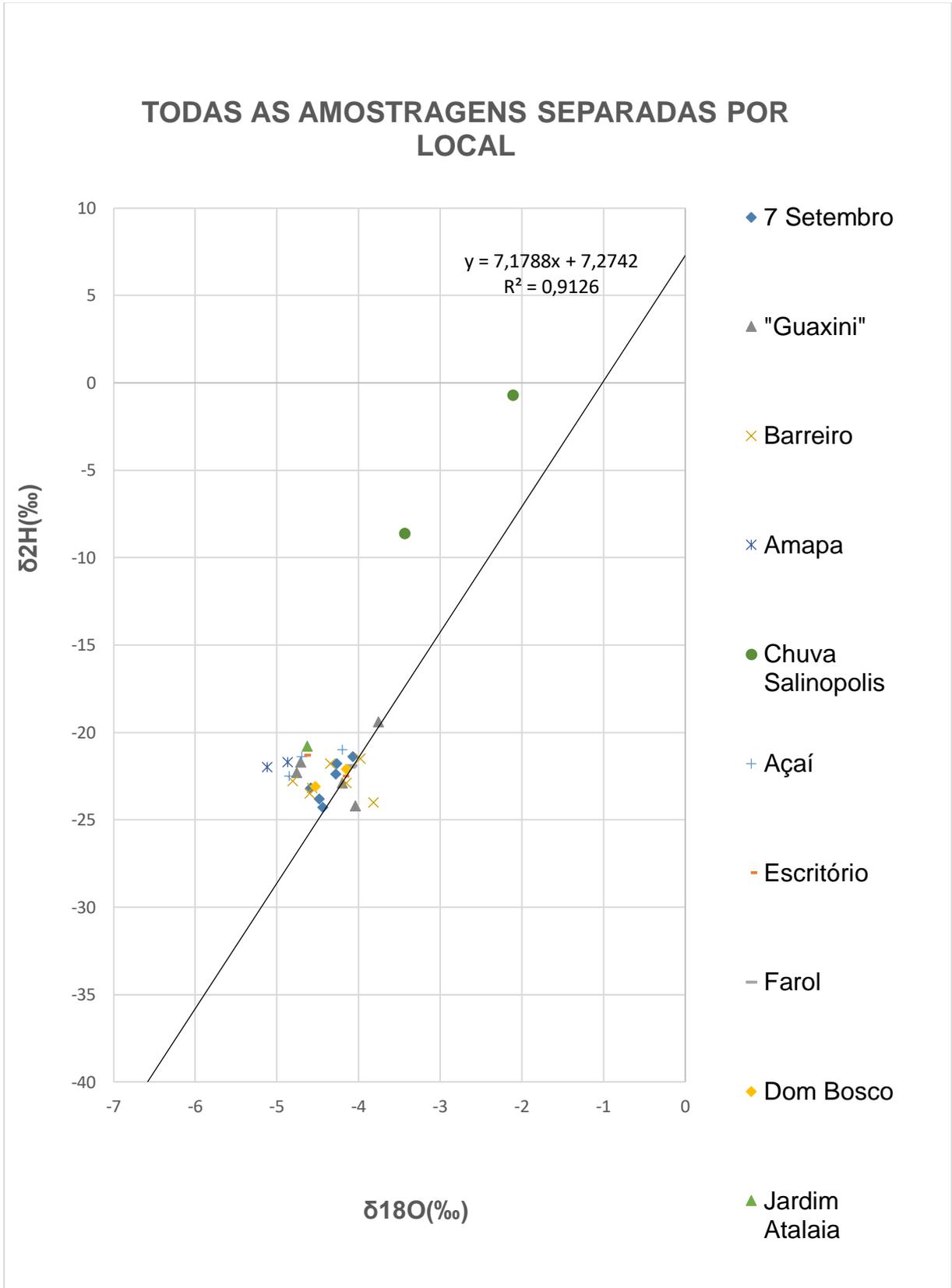


Figura 3. 32 - Correlação de todas as amostras de poços separadas por local de bombeamento relacionada a reta local Belém.



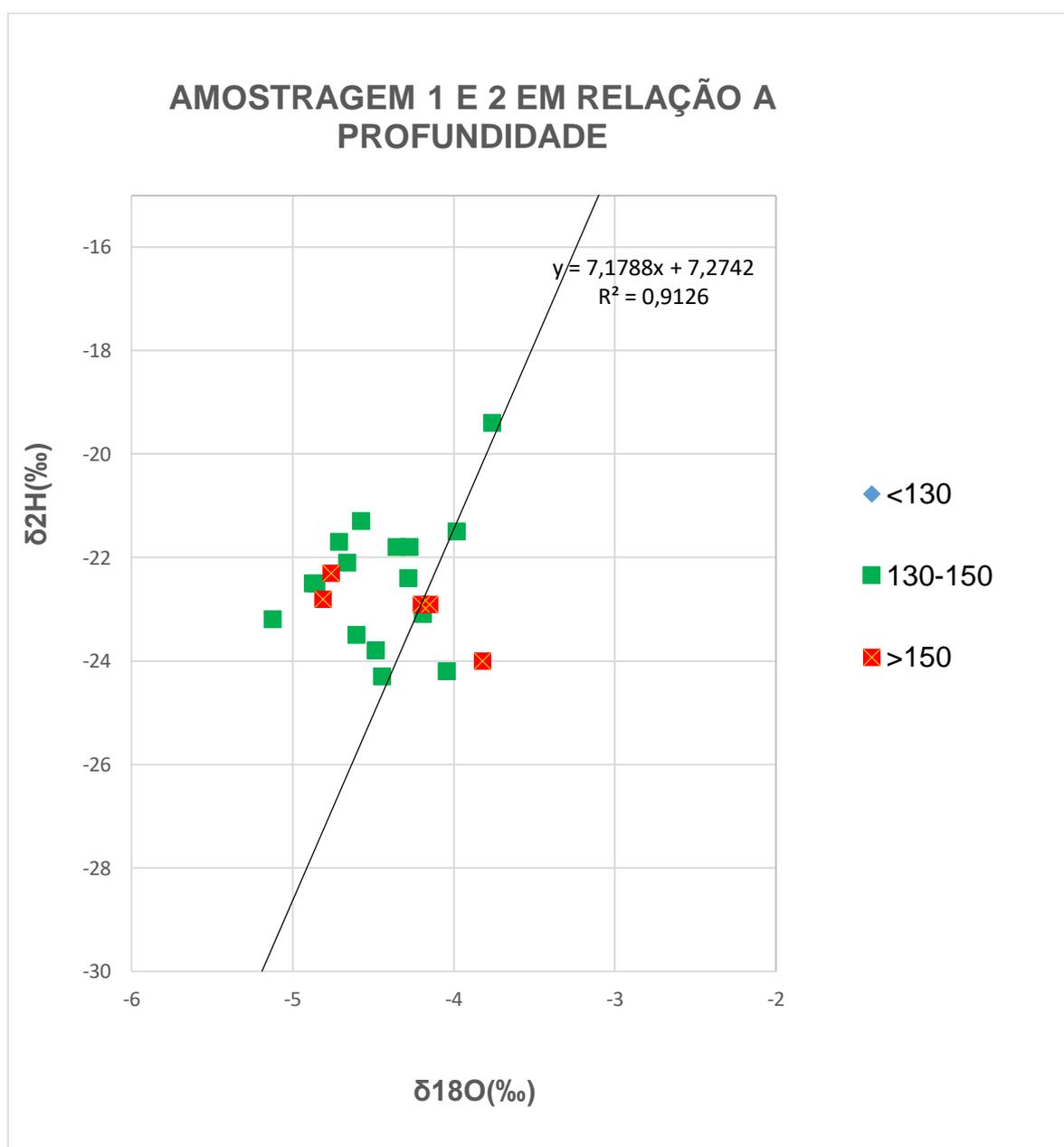
Estabelecendo uma relação entre os resultados das amostragens 1 e 2 e a profundidade dos poços que coincidiram com a reta meteórica local, foi construído um gráfico com a seguinte configuração (Figura 3.33):

-Poços com profundidade < 130m: não tiveram representação no gráfico.

-Poços entre 130 – 150 metros: Guaxini-Pentagono RIMAS; Barreiro Femac 5; 7 Setembro-Femac 1e o Escritório

-Poços > 150 metros: Barreiro-Femac 3 e Guaxini-Femac 1

Figura 3. 33 - Amostragem 1 e 2 em relação a profundidade dos poços.



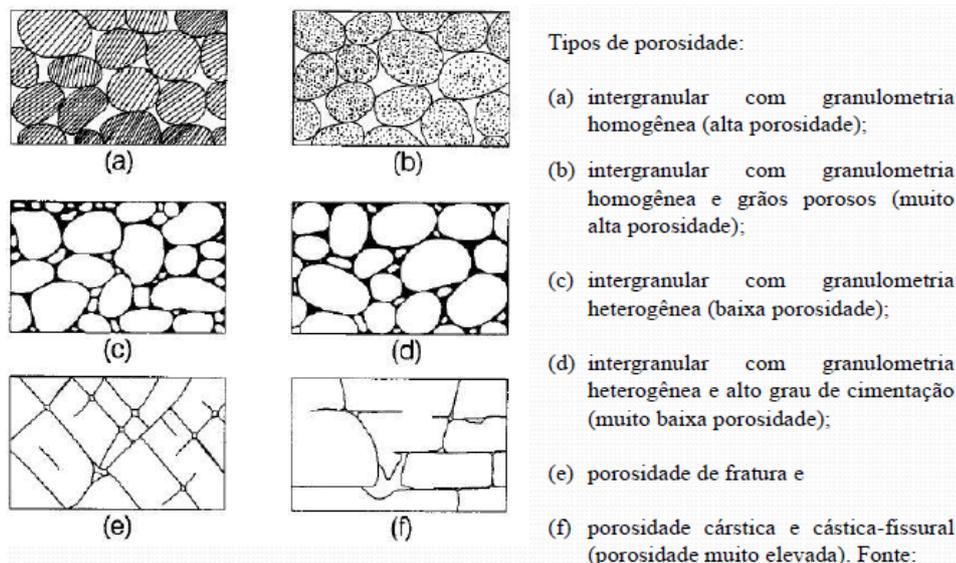
## CAPÍTULO 4 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

### 4.1 Sistemas aquíferos

Sistema aquífero pode ser definido como uma ou mais unidades ou formações geológicas que armazenam, transmitem e produzem quantidade significativa de água. Como as formações geológicas não são homogêneas e entremeiam porções mais e menos permeáveis, ou ainda impermeáveis, num conceito mais amplo, os sistemas aquíferos podem incluir aquíferos e aquícludes em escala local.

São agrupados em três categorias principais de unidades hidroestratigráficas, distinguidas conforme a natureza litológica de seus terrenos e suas propriedades hidráulicas (Figura 4.1): aquíferos cristalinos, permeáveis por fraturamento, aquíferos sedimentares, permeáveis predominantemente por porosidade granular e aquíferos cársticos com permeabilidade associada condutos.

Figura 4. 1 - Tipos de aquíferos em função da porosidade.



Fonte: Feitosa (2008).

#### 4.1.1 Domínios e Parâmetros Hidrogeológicos

Em termos de Domínios Hidrogeológicos, conforme método adotado no Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo da CPRM (2014), a região apresenta Unidades Estratigráficas (UE) Aflorantes e Subjacentes (Tabela 4.1). Com relação às Unidades Hidrolíticas, todas são consideradas do tipo granular, com baixo grau de fraturamento.

Tabela 4. 1 - Unidades Aflorantes (Barreiras e Pirabas) e Subjacentes (Pirabas em com suas respectivas litologias e espessuras) conforma Mapa Hidrogeológico do Brasil

<b>Unidade</b>	<b>Litologia</b>	<b>Espessura</b>
<b>Formação Barreiras</b>	arenito, conglomerado e argila	Média (10 - 100 m)
<b>Formação Pirabas</b>	areia, argila, conglomerado e calcário	Muito Alta (>500 m)

Fonte: (CPRM, 2014).

#### 4.1.2 Parâmetros Hidrogeológicos

Quando um poço é bombeado, seu nível da água é rebaixado progressivamente com o tempo. Este efeito é denominado rebaixamento. Quando o bombeamento é interrompido, o nível da água sobe gradativamente tendendo a voltar ao nível inicial (nível estático). Esta elevação do nível denomina-se recuperação (Figura 4.2). Abaixo a descrição dos parâmetros citados:

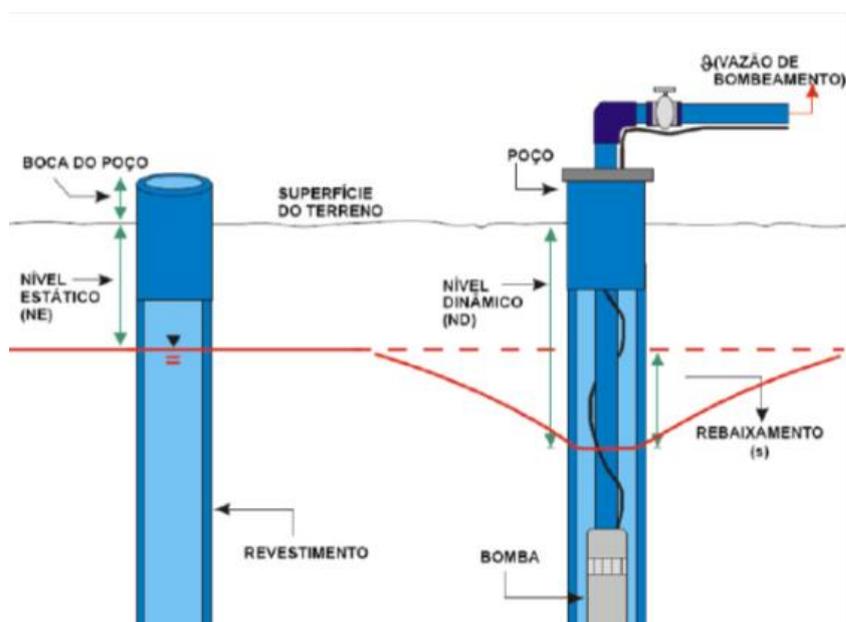
**Rebaixamento:** é o nível da água dentro do poço. É a distância entre o nível estático (NE) e o nível dinâmico (ND).

**Nível estático (NE):** é a distância da superfície do terreno ao nível da água dentro do poço antes de iniciar o bombeamento.

**Nível dinâmico:** é a distância entre a superfície do terreno e o nível da água dentro do poço após o início do bombeamento.

A variável Tempo é o tempo a partir do início do bombeamento.

Figura 4. 2 - Variáveis do teste de bombeamento.



A potencialidade de um aquífero relativo, a sua reserva explotável e sua vazão de segurança, está relacionada aos seus parâmetros hidrogeológicos, onde os mais importantes são representados pela porosidade total, porosidade efetiva, espessura saturada, condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento e capacidade específica. Essas grandezas descrevem as feições físicas e hidrodinâmicas do aquífero, mas também são muito importantes para a sua adequada gestão, uma vez que estes são utilizados para as estimativas das taxas anuais de recarga (reserva renováveis), condições gerais de circulação subterrânea e vulnerabilidade do sistema à contaminação (FEITOSA, 2008).

A vazão corresponde ao volume de água por unidade de tempo extraído do poço por um equipamento de bombeamento. As vazões ( $Q$ :  $m^3/h$ ) e vazões específicas ( $Q_s$ :  $m^3/h/m$ ) das Unidades Hidroestratigráficas (UH) são definidas Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2014) com os valores apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Valores de Vazão e Vazão específica das Unidades Hidroestratigráficas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil.

Unidade	Vazão ( $q$ : $m^3/h$ )	Vazão específica ( $q_s$ : $m^3/h/m$ )
Formação Barreiras	$25 < ou = Q < 50$ ; $1 < ou = Q < 10$	$1,0 < ou = Q/s < 2,0$
Formação Pirabas	$Q > ou = 100$	$Q/s > ou = 4,0$

Fonte: (CPRM, 2014).

A condutividade hidráulica ( $K$ : m/s) leva em conta as características do meio sendo que nas rochas cristalinas este parâmetro é definido em virtude da quantidade, trama, abertura e interconexão das fraturas. Nas rochas sedimentares, inclui porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas. Em ambos os aquíferos também se leva em consideração as características do fluido (viscosidade e massa específica). Em meio isotrópico, a condutividade hidráulica pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário. Refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico. Conforme o Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2014), a condutividade hidráulica apresenta os valores discriminados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 - Valores de Condutividade Hidráulica das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil..

<b>Unidade</b>	<b>Condutividade hidráulica (k: m/s)</b>
<b>Formação Barreiras</b>	$E-8 < \text{ou} = K < E-7$ ; $E-6 < \text{ou} = K < E-5$
<b>Formação Pirabas</b>	$K > \text{ou} = E-4$

Fonte: (CPRM, 2014).

A Transmissividade ( $T$ : m<sup>2</sup>/s) corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. A Tabela 4.4 apresenta os valores apresentados pela transmissividade.

Tabela 4. 4 - Valores de Transmissividade das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil.

<b>Formação Barreiras</b>	$E-6 < \text{ou} = T < E-5$ ; $E-4 < \text{ou} = T < E-3$
<b>Formação Pirabas</b>	$T > \text{ou} = E-2$

Fonte: (CPRM, 2014).

A Porosidade Específica pode ser definida como a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberada de uma amostra de rocha porosa ou fraturada saturada e o volume total.

O Coeficiente de Armazenamento (Vazão específica  $S_y$ ) é a capacidade de aquífero armazenar e transmitir água. Este parâmetro depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade,

permeabilidade e compressibilidade). Estas propriedades são responsáveis por todo comportamento do aquífero.

Na Tabela 4.5 estão discriminadas as características da Produtividade para as Unidades Hidrogeológicas.

Tabela 4. 5 - Valores de Produtividade das Unidades Hidrogeológicas Barreiras e Pirabas. Mapa Hidrogeológico do Brasil.

<b>Unidade</b>	<b>Produtividade</b>
<b>Formação Barreiras</b>	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa / Moderada
<b>Formação Pirabas</b>	Muito Alta

Fonte: (CPRM, 2014).

#### 4.1.3 Aspectos gerais da hidrogeologia da região

A região litorânea do nordeste do Pará situa-se na parte setentrional do Oceano Atlântico, constituído de uma porção marinha e outra continental, sendo que em direção ao continente a sedimentação ocorreu em ambiente misto. O preenchimento dessa região, se deu por sucessivos eventos geológicos que deixaram seus desenhos na referida bacia, que se encontra aflorando em Salinópolis (praia do Atalaia).

O embasamento está entre 130 a 160 metros de profundidades como atestam os poços perfurados pela CPRM, FEMAC e TECNOPOÇOS, todos para a COSANPA. As profundidades médias dos poços profundos em Salinópolis estão em torno de 130 metros, sempre captando água subterrânea da Formação Pirabas.

Em comunicação verbal o Responsável Técnico da empresa FEMAC-GEOSOLO, informou que, a quando da perfuração do poço Jardim Atalaia houve, no intervalo de 75 a 76 metros (1 metro), queda brusca no tempo de penetração da sonda, chegando ao valor 0 (zero), que fez com que a composição sofresse queda abrupta para dentro do poço, o que gerou perda expressiva de quantidade de lama de perfuração (bentonita). Posteriormente ocorreu retorno à curva normal, típica de penetração em material calcário.

Isso pode representar um padrão de caráter regional, pois este fato também já ocorreu em perfurações em Salinópolis, como também nos municípios de Castanhal e Marapanim (FEMAC-GEOSOLO, 2014).

No município de Castanhal-PA, no bairro de Jaderlândia, o maquinário chegou a sofrer avarias. Geologicamente, ocorre uma camada de calcarenito friável creme amarelado com vestígios fósseis disseminados com profundidade de 105 metros, sotoposto a uma camada de argila cinza escura, piritosa, cujo quimismo de caráter ácido da água promove a dissolução dos componentes químicos da rocha carbonática, gerando feições típicas de armazenamento e circulação cárstico-fissurais.

No município de Marapanim, faltando 01 metro para conclusão de furo piloto, o material foi aprisionado pelo fechamento do poço (RIMAS, 2014). Estas características conduzem a dificuldades na perfuração. Portanto, ao se ter o controle desse nível, pode-se projetar a coluna com o capeamento do fundo do poço até a profundidade desses condutos e cavernas, visto que as vazões nesses locais são normalmente elevadas.

Em Salinópolis, o poço que estava sendo perfurado nas proximidades da praia do Farol Velho para o Projeto RIMAS, teve a perfuratriz tombada, sendo amparada pela fiação da rede elétrica (Figura 4.3). Houve demora não conclusão do furo piloto, e provavelmente a composição do poço alcançou um conduto (descontinuidade) em subsuperfície e proporcionou o desmoronamento da parede e consequente desequilíbrio da máquina.

Figura 4. 3 – Perfuratriz rotativa tombada em função da queda da composição do poço provavelmente por ocorrência de conduto cárstico (caverna).



Fonte: (CPRM, 2014).

#### 4.1.4 Caracterização hidrogeológica

A estruturação geológica das camadas da Formação Pirabas, com mergulhos sub-horizontal a horizontal para oeste e com espessura aumentando de leste para oeste, confere ao aquífero uma variação de transmissividade, que em parte, aumenta nesse mesmo sentido. Além disso, as variações litológicas influenciam as características hidrodinâmicas do aquífero, revelando que este é de natureza carbonática, fraturado, isotrópico e heterogêneo, tendo em vista que os poços perfurados atingiram toda a espessura aquífera, isto é, são totalmente penetrantes (OLIVEIRA, 2010).

Particularmente, o município de Salinópolis constitui, em parte, uma das áreas de maior ocorrência do aquífero Pirabas de forma aflorante (Figura 4.4) e subaflorante. Vale ressaltar que o ele é o mais utilizado como fonte de abastecimento público, principalmente na sede do Município de Salinópolis.

O estudo hidrogeológico proposto teve como base os dados os 03 poços monitorados pela Rede de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS)/CPRM, o banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)/CPRM e 14 poços de abastecimento da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

Figura 4. 4 - Rochas calcárias (Biocalcarenito) aflorantes na Praia do Atalaia (Salinópolis).



A pesquisa realizada no SIAGAS (28/03/2017) revelou 93 poços cadastrados em todo o município de Salinópolis. Na RIMAS-WEB estão disponibilizados dados de 03 poços, abaixo descritos

O sistema Guaxini, possui dois poços em bombeamento: Guaxini Femac 1 e 2. O poço Guaxini Pentágono-RIMAS apresentou NE de 26 metros em 07/04/1982, e está obstruído a 53 metros, com furo a nove metros na coluna de revestimento. O NA varia de 4,08 a 10,19 metros. Possui 57.600 medidas de nível estático (02/12/2011 a 04/11/2018).

O sistema Barreiro possui 5 poços com profundidades abaixo de 100 metros. Atualmente possui 03 poços bombeando: FEMAC 2, 3 e 5. No poço Barreiro Femac 1-RIMAS, o nível estático (NE) medido em 10/08/1991 foi de 34 metros, com nível dinâmico (ND) alcançando 69,00 metros. Com duração do teste de bombeamento de 24 horas, a Vazão Específica atingiu 1.314 m<sup>3</sup>/h/m e a Vazão Após Estabilização, 46 m<sup>3</sup>/h. Possui 32.000 medidas de nível estático (31/01/2013 a 29/09/2018).

O sistema Açai possui 03 poços profundos, onde somente o poço P3 funciona 24 horas, bombeando direto na rede. O poço P1 está soterrado. O poço Açai2-RIMAS tem profundidade de 156 metros. O teste de bombeamento com 24 horas de duração, realizado em 10/07/1991, teve NE de 17,70 metros e ND de 46,70 metros, Vazão Específica de 3.034 m<sup>3</sup>/h/m, e Vazão Após Estabilização de 88 m<sup>3</sup>/h. Sua profundidade útil está em 47,60 metros e vazamento a 28 metros.

A variação medida desde 29/01/2015 até 21/12/2016 (quase dois anos) foi pequena (33,84 a 32,43 metros, diferença de menos de 1,5 metros). Já o rebaixamento desde sua construção até a última medição apresenta um valor de 16,14 metros. Possui 34.463 medidas de nível estático (29/01/2015 a 05/12/2018).

Esses poços estão disponibilizados para pesquisa no portal da CPRM ([www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)) nos Sistemas Geocientíficos através do ícone RIMAS, permitindo a consulta dos dados Gerais, Construtivos, Geológicos, Teste de Bombeamento (retirados do banco de dados do SIAGAS), além do Monitoramento do Nível D'água, Monitoramento Hidroquímico e Relatórios e Multimídias produzidos pela RIMAS.

#### **4.2 Definição do sistema aquífero Pirabas**

O município de Salinópolis está assentado sobre as rochas da Formação Pirabas. Na maioria das vezes, os calcários estão sobrepostos por uma cobertura de solo de até 15 metros de espessura, de cores amarela avermelhadas e níveis de alumino-ferruginoso intercalado e têm o embasamento granítico sotoposto a uma profundidade média de 130 metros. Esta área vem sendo explorada exclusivamente por águas subterrâneas, tendo em vista que a sede municipal é margeada por água salgada do Oceano Atlântico.

Os sistemas aquíferos identificados na região de Belém e adjacências são formados por rochas sedimentares terciárias-quadernárias que jazem sobre substrato de idade, provavelmente cretácea. Esses sistemas estão individualizados em aquíferos que compreendem coberturas recentes (aluviões, colúvios e elúvios), depósitos inconsolidados identificados como Pós-Barreiras e rochas sedimentares das formações Barreiras e Pirabas, e são reconhecidos pelos mesmos nomes atribuídos às unidades litoestratigráficas que os encerram. À porção inferior são atribuídas as melhores características hidráulicas e hidroquímicas desse aquífero. Porém por falta de informações, o Sistema Aquífero Pirabas não foi desmembrado no estudo realizado pela ANA (2019).

Através da correlação dos levantamentos geofísicos (perfis de poços profundos, seiv's e tomografias de terreno) em Salinópolis, foi possível definir o sistema aquífero Pirabas em dois sub-sistemas: aquífero Pirabas Superior, intercalados com calcário, argilas e margas, e o aquífero Pirabas Inferior com camadas profundas, onde as camadas de calcário são mais proeminentes. Uma camada contínua de argila com cerca de 40 metros de profundidade separa esses dois aquíferos.

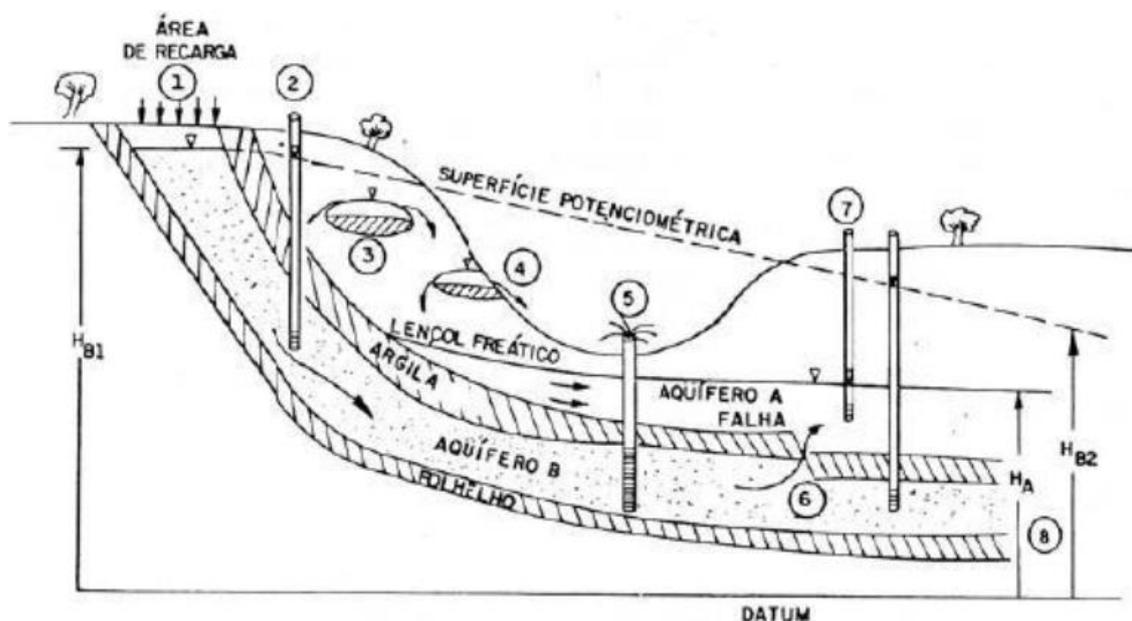
Em termos de tipo de aquífero, em função da porosidade, pode-se considerar um sistema misto para o aquífero Pirabas: intergranular, de porosidade de fraturas e em menor escala cárstico-fissural. Por aflorar principalmente na faixa litorânea (praias), ele se comporta como um aquífero livre (parte aerada) .

Do ponto de vista hidrogeológico, a região de Salinópolis é a que melhor apresenta fisicamente a ocorrência desse meio aquífero, na qual pode-se definir um perfil-guia, pois, tem-se bem delimitado seu arcabouço geológico-litoestratigráfico-paleontológico e geofísico, com base em muitos estudos e investigações envolvendo, principalmente, a Formação Pirabas.

Tem sobrejacente uma cobertura sedimentar que chega em alguns locais a 15 metros de profundidade. Depois verifica-se uma intercalação paralela a sub-paralela de estratos de areia, argila, e margas, com níveis calcários, em intervalos próximos a superfície. Abaixo ocorre camada argilosa de 30 a 40 metros de espessura, funcionando como um selante, que se sobrepõe a uma camada de maior expressividade do calcário Pirabas (Pirabas Inferior), ainda contendo intercalação com terrígenos, porém em menor escala. Esse material repousa entre 130 a 150 metros sobre o embasamento cristalino, que representa o substrato rochoso de toda a região.

O desenho clássico da Figura 4.5, é aplicável de forma esquemática para a configuração do sistema aquífero Pirabas Inferior (B) e Superior (A) em função da pressão da água, com a existência da camada argilosa selante dos aquíferos. A área de recarga (1) representa o aquífero Pirabas aflorando na zona litorânea.

Figura 4. 5 - Desenho esquemático correspondente ao Sistema aquífero Pirabas Inferios (B) e Superior (A). Notar a camada argilosa selante, e a Área de recarga (1) representando o Aquífero Pirabas aflorante.



Diante desse quadro evolutivo, considerou-se que o sistema aquífero Pirabas tem sua subdivisão em duas partes: aquífero Pirabas Inferior e aquífero Pirabas Superior (Figura 4.6).

#### 4.2.1 Sistema aquífero Pirabas Inferior

O sistema aquífero Pirabas Inferior é confinado não drenante, cujas unidades limítrofes de topo e base são impermeáveis. Nesse caso, o nível de água de um poço nele perfurado, se estabiliza acima do limite da base da unidade confinante de topo – nível de água virtual. Sua estabilização se dá abaixo as superfícies topográficas, e podem ser denominados de poços artesianos. A alimentação ou recarga desse aquífero ocorre nas zonas de afloramento das rochas sedimentares (FEITOSA, 2008).

Nos estudos sobre a hidrogeologia dos sistemas aquíferos da região de Belém/PA (ANA, 2019), foi subdividida em duas partes, sendo que na parte inferior são atribuídas as melhores características hidráulicas e hidroquímicas desse aquífero, porém a baixa densidade, assim como a distribuição irregular e escassez de informações não permitiram discorrer separadamente sobre cada uma das porções. Em síntese, o sistema aquífero Pirabas não foi desmembrado nesse estudo.

O sistema aquífero Pirabas Inferior apresenta camadas métricas de calcário, calcarenito, calcário argiloso e dolomitizados, intercalados com material argiloso e argilo-arenoso sotopostos ao embasamento cristalino. A espessura média desse sistema atinge cerca de 60 metros de espessura.

A concepção dos projetos construtivos de poços visando maior volume de água subterrânea devem local as seções filtrantes em suas camadas calcárias, tanto pela maior espessura, quanto pela sua extensão lateral, que localmente aumenta em direção à saída da cidade, como pode ser observado no perfil-seção da Figura 4.7 e 4.8, e nos perfis compostos dos poços construídos para a COSANPA (ANEXO A).

#### 4.2.2 Sistema aquífero Pirabas Superior

O sistema aquífero Pirabas Superior assume características de aquíferos semiconfinados drenantes, onde pelo menos uma das unidades limítrofes, no topo ou na base, é semipermeável, permitindo a entrada e/ou saída de fluxos verticais através dessas unidades semipermeáveis.

Tais fluxos são denominados de drenança, que podem ser ascendentes ou descendentes, dependendo da relação entre as cargas potenciométricas do aquífero em

questão, com as dos demais aquíferos acima, e ou abaixo dele. A alimentação desses aquíferos ocorre nas áreas de exposições rochosas, isto é, nas bordas das bacias sedimentares e também através das drenanças (FEITOSA, 2008).

A maior parte da recarga de água ocorre nos aquíferos rasos livres, podendo ser as rochas calcárias da Formação Pirabas aflorantes nas praias costeiras, ou mesmo integrantes do sistema aquífero Barreiras, sendo o volume correspondente à reserva anual. Uma parcela dessa recarga infiltra-se através das camadas semiconfinantes (aquítardos) da base dos aquíferos livres e atinge os reservatórios do sistema aquífero Pirabas Superior.

Esse pacote aquífero atinge cerca de 40 metros de espessura, desde a base da Formação Barreiras (podendo ocorrer mistura de água com esta), até o topo da camada argilosa selante.



Figura 4. 7 - Na parte superior: correlação dos perfis geofísicos dos poços Farol, Escritório, Amapá, Dom Bosco e Barreiro Femac 3.

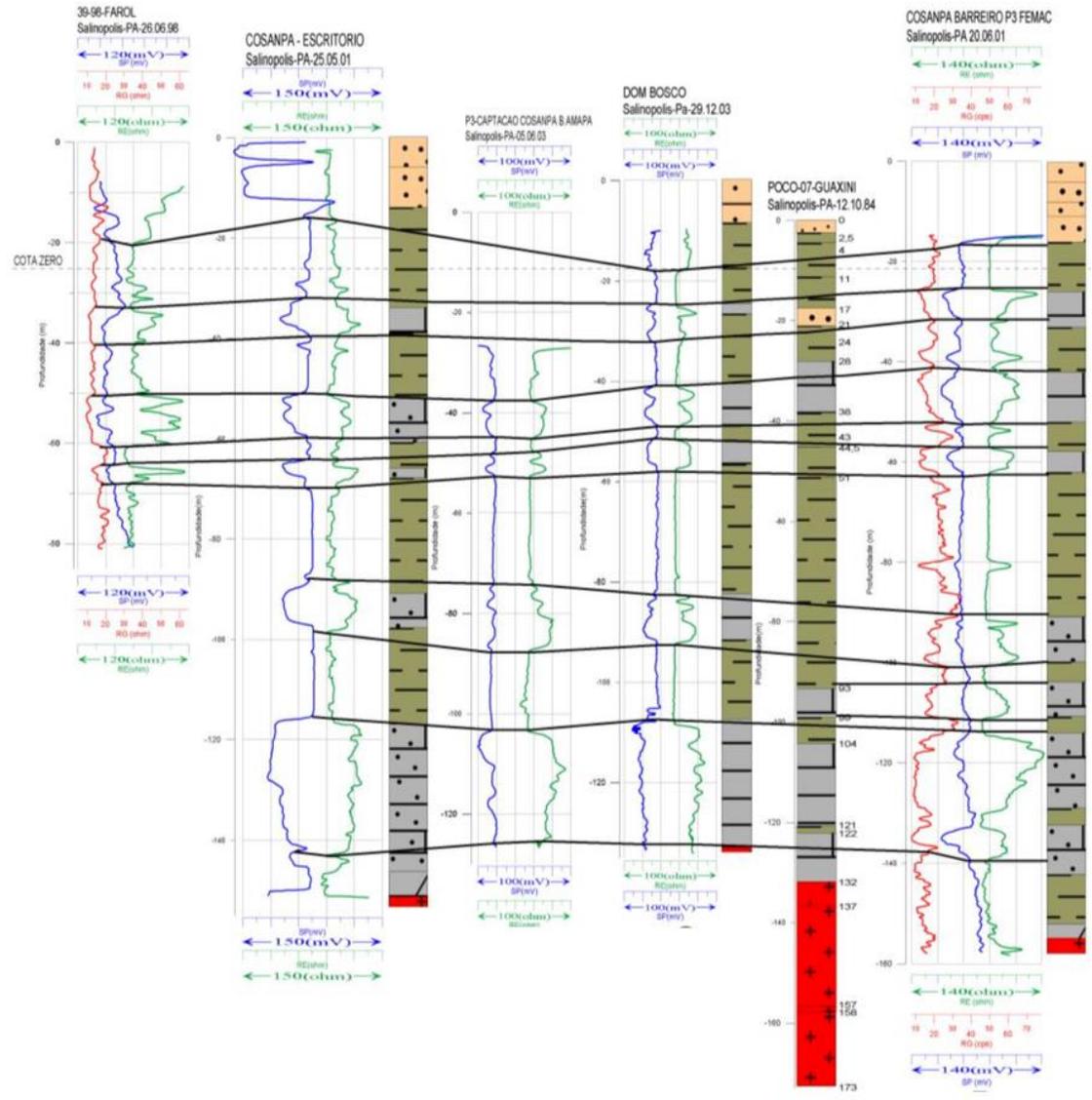
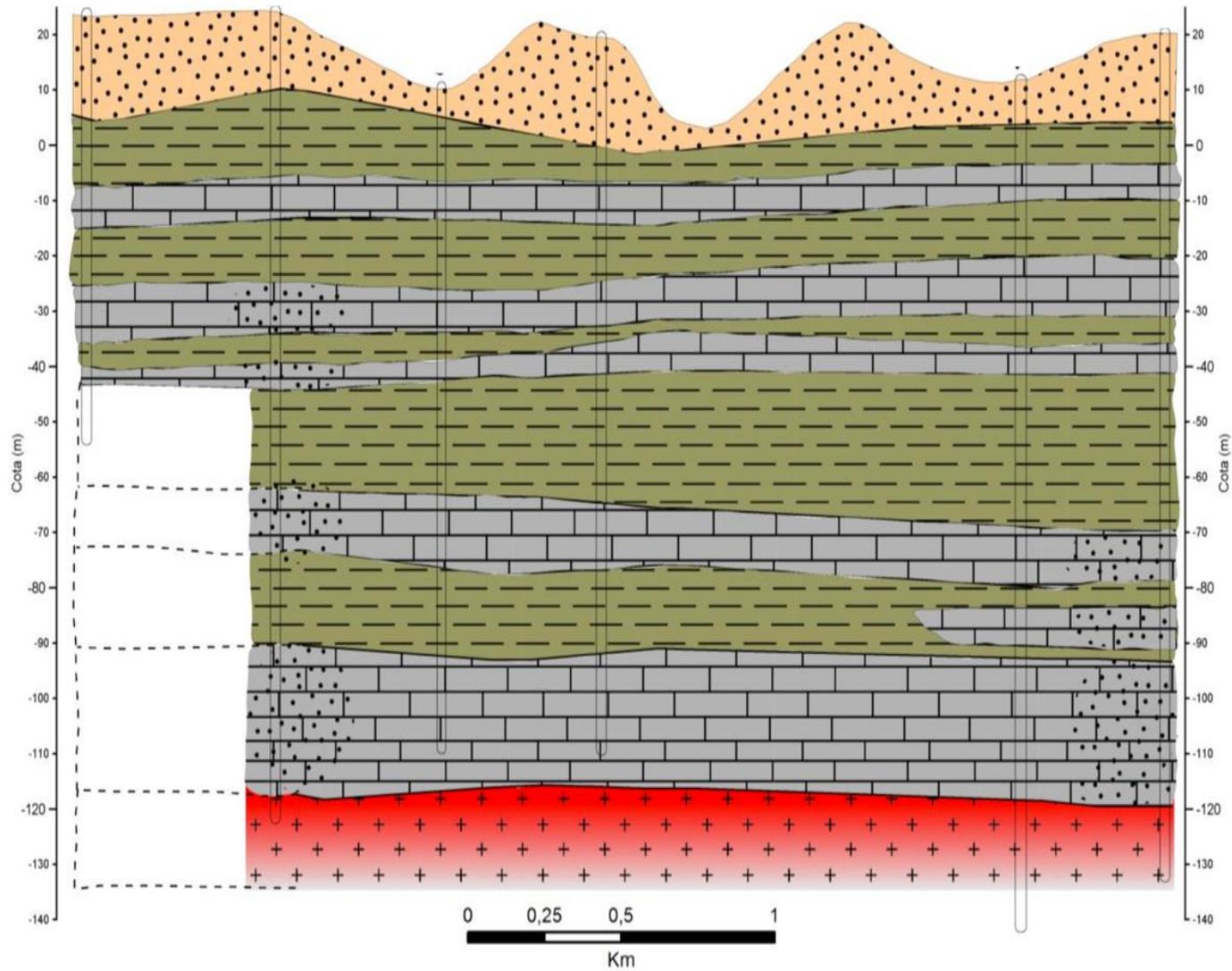


Figura 4. 8 - Perfil estratigráfico correlacionando as camadas lateralmente dos poços acima descritos. Notar a espessura maior das camadas de calcário na parte inferior do perfil (sistema aquífero Pirabas Inferior).



#### 4.2.2 Movimentação da água subterrânea no sistema aquífero Pirabas

A determinação dos tipos de fluxos existentes, local e regional, determinados pelo modelo físico hidrogeológico, demanda a identificação das respectivas zonas de recarga e descarga. A quantidade de água que atravessa a seção do aquífero é de fundamental importância para a avaliação da sua capacidade hídrica. Assim, importa conhecer quais as características do aquífero controlam a vazão e o movimento da água subterrânea. A Tabela 4.6 mostra valores típicos condutividade hidráulica, de porosidade total e porosidade efetiva em diferentes materiais.

Tabela 4. 6 - Valores de condutividade hidráulica (cm/s), porosidade total (n) e porosidade efetiva (ne) em diferentes materiais.

<b>Sedimentos</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm/s)</b>	<b>Porosidade total (n)</b>	<b>Porosidade efetiva (ne)</b>
Cascalho	$1 - 10^{-2}$	0,25 - 0,5	0,12 - 0,35
Areia bem selecionada	$10^{-1} - 10^{-3}$	0,20 - 0,35	0,15 - 0,35
Silte arenoso, areia fina	$10^{-3} - 10^{-5}$	0,10 - 0,20	0,10 - 0,28
Silte, Areia siltica, Argila arenosa	$10^{-4} - 10^{-6}$	0,35 - 0,50	0,03 - 0,19
Argila	$10^{-6} - 10^{-9}$	0,33 - 0,60	0,00 - 0,05
<b>Rochas Sedimentares</b>			
Arenito	$3 \times 10^{-8} - 6 \times 10^{-4}$	0,05 - 0,30	
Folhelho	$10^{-11} - 2 \times 10^{-7}$	0,21 - 0,41	
Calcário	$1 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-4}$	0,00 - 0,20	
<b>Rochas ígneas e metamórficas</b>			
Granito	$8 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-2}$	0,001	
Basalto	$2 \times 10^{-9} - 4 \times 10^{-5}$	0,03 - 0,35	
Rocha fraturada	$8 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-2}$	0,00 - 0,10	

Fonte: Adaptado de Gonçalves e Giampá (2006). Fetter (1988); Domenico e Schwartz (1990); Norton e Knapp, (1977).

### Mapa Potenciométrico

#### *Comportamento do Fluxo Subterrâneo*

Foram considerados para verificação do comportamento do fluxo subterrâneo os poços em bombeamento da COSANPA, conforme as tabelas elaboradas com os valores de nível dinâmico (poço bombeando), nível estático, profundidade da coluna de água da câmara de bombeamento, tempo e recuperação nos períodos chuvoso e seco de 2017 (Tabelas 4.7 e 4.8).

Tabela 4. 7 - Dados da profundidade da coluna de recalque; de nível estático (NE); nível dinâmico (ND); tempo de recuperação dos poços estudados em Salinópolis. Período chuvoso. Abril e Junho 2017.

Poço	Dia	Coluna	ND/Hora	NE/Hora	Tempo	Recuperação
Amapá	11/04/2017	72 m	68,97m (10:35)	39,57m (10:42 às 14:00)	3h 30'	29,40 m
Barreiro3	11/04/2017	78 m	71,86m (14:15)	52,14m (14:30 às 16:00)	1h 30'	19,72 m
Barreiro5	11/04/2017	78 m	65,51m (16:15)	46,96m (16:25 às 17:00)	45'	18,55 m
Barreiro4	12/04/2017	65 m	54,89m (08:50)	46,57m (08:50 às 09:55)	1h 05'	8,32 m
Barreiro1	12/04/2017	RIMAS	s/bomba	46,88m (10:45h)	-	-
Guaxini1	12/04/2017	60 m	54,69m (11:10)	41,37m (11:24 às 14:25)	3h	13,32 m
Guaxini2	12/04/2017	72 m	59,50m (14:50)	45,29m (14:50 às 15:30)	40'	14,21 m
7 de Setembro2	12/04/2017	66 m	65,76m (16:10)	40,45m (16:10 às 16:45)	35'	25,31 m
7 de Setembro1	12/04/2017	66 m	56,72m (17:10)	42,37m (17:10 às 17:40)	30'	14,35 m
7 de Setembro3	12/04/2017	78 m	77,34m (17:50)	45,36m (17:50 às 18:25)	35'	31,98 m
Escritório	13/04/2017	90 m	83,95m (10:00)	57,12m (10:00 às 11:00)	1h	26,83 m
Guaxini-Pentágono	13/04/2017	RIMAS	s/bomba	6,27m (13:25)	-	-
Açaí2	13/04/2017	RIMAS	s/bomba	31,96m (14:10)	-	-
Açaí3	13/06/2017	65 m	46,57m (15:05)	37,88m (15:05 às 16:00)	55'	8,69 m
Farol	13/06/2017	90 m	82,38m (12:45)	52,18m (17:45 às 18:35)	50'	30,20 m
Jardim Atalaia1	14/06/2017	78 m	s/bomba	38,48m (10:05)	-	-
Dom Bosco	14/06/2017	78 m	73,00m (09:00)	44,43m (09:00 às 09:45)	45'	28,57 m

Tabela 4. 8 - Dados da profundidade da coluna de recalque; nível estático (NE); nível dinâmico (ND); tempo de recuperação dos poços estudados em Salinópolis. Período seco. Dezembro 2017.

Poço	Dia	Coluna	ND/Hora	NE/Hora	Tempo	Recuperação
Guaxini-Pentágono	04/12/2017	RIMAS	s/bomba	8,52m (10:10)	-	-
Escritório	05/12/2017	90 m	85,14m (08:40)	85,11m (08:40 às 09:40)	1h	-
7 de Setembro2	05/12/2017	66 m	65,35m (11:05)	43,40m (11:05 às 11:35)	30'	21,96 m
Farol	05/12/2017	90 m	85,56m (12:00)	56,26m (12:00 às 12:30)	30'	29,3 m
Açaí3	05/12/2017	65 m	50,88m (15:00)	42,18m (15:00 às 15:45)	45'	8,7 m
Dom Bosco	05/12/2017	78 m	79,40 m (16:10)	50,00m (16:10 às 16:40)	30'	29,4 m
Barreiro4	05/12/2017	65 m	59,84m (17:39)	49,22m (17:30 às 18:05)	35'	10,62 m
7 de Setembro3	06/12/2017	78 m	76,36 m (09:20)	47,88m (09:20 às 09:55)	35'	28,48 m
7 de Setembro1	06/12/2017	66 m	57,64 m (10:15)	44,90m (10:15 às 10:55)	40'	12,74 m
Barreiro5	06/12/2017	78 m	82,45 m (14:40)	51,07m (14:40 às 15:30)	50'	31,38 m
Barreiro3	06/12/2017	78 m	73,26m (16:00)	55,96m (16:00 às 16:45)	45'	17,30 m
Guaxini1	06/12/2017	60 m	73,26m (16:00)	46,19 m	30'	11,71 m
Guaxini2	06/12/2017	72 m	73,26m (16:00)	49,42 m	30'	11,78 m
Jardim Atalaia	07/12/2017	78 m	73,26m (16:00)	44,00 m	30'	27,06 m
Amapá	07/12/2017	72 m	73,26m (16:00)	44,78m (11:15 às 11:40)	30'	27,66 m
Açaí2	07/12/2017	RIMAS	s/bomba	34,36m (12:00)	-	-
Barreiro1	08/12/2017	RIMAS	s/bomba	51,16m (08:10)	-	-

Na comparação dos dados acima, verifica-se que o Nível Estático (NE), apresentou valores maiores, em termos de profundidade no período seco.

O tempo de recuperação é variável, com duração média entre 30' a 1 hora, para a estabilização dos poços. O poço 7 de Setembro-Femac3, manteve a média muito alta de recuperação, em torno de 30 metros em 30'.

As profundidades das colunas de recalque (entendendo-se como a boca da bomba), encontram-se entre 60 a 90 metros. Os poços Escritório e Farol têm maiores altitudes, possuem colunas com cerca de 90 metros, e os maiores níveis dinâmicos.

O poço Barreiro1 da RIMAS, apresenta o maior nível estático da região, alcançando no período chuvoso valores superiores a 50 metros de profundidade. Esse poço está inativo, com furo na sua coluna a 36 metros e obstruído a 100 metros (redução do tubo de revestimento).

### **Potencial Hidráulico (PH) versus Mapa de Fluxo**

A visualização do mapa de fluxo de um sistema hidrogeológico pode indicar a posição das áreas de descarga e recarga. Como a área de estudo é composta por sistema hidrogeológico horizontal a sub horizontal, é possível traçar as isolinhas de potenciais hidráulicos (PH) para a representação da superfície potenciométrica e entender o comportamento da zona inferior saturada em relação ao meio (Tabela 3.11).

Tabela 4. 9 - Valores de potencial hidráulico (PH) dos 14 poços em bombeamento da COSANPA nos períodos chuvoso e seco de 2017.

Poço	Lat (DD)	Long (DD)	Altimetria (m)	NE-Chuvoso	NE-Seco	PH chuvoso	PH seco
<b>Açaí 3</b>	-0,620482	-47,358391	10,480	37,88	42,18	-27,400	-31,700
<b>Amapá</b>	-0,621957	-47,349763	10,280	39,57	44,78	-29,290	-34,500
<b>Jardim Atalaia</b>	-0,623493	-47,341503	11,020	38,48	44	-27,460	-32,980
<b>Barreiro 5</b>	-0,640808	-47,339844	16,250	46,96	51,07	-30,710	-34,820
<b>Barreiro 4</b>	-0,64101	-47,3388	15,600	46,57	49,22	-30,970	-33,620
<b>7 Setembro 1</b>	-0,624323	-47,357786	9,640	42,3	44,9	-32,660	-35,260
<b>7 Setembro 2</b>	-0,62573	-47,358905	3,650	40,45	43,4	-36,800	-39,750
<b>7 Setembro 3</b>	-0,624326	-47,358828	8,330	45,36	47,88	-37,030	-39,550
<b>Escritório</b>	-0,62168	-47,35469	25,400	57,12	85,11	-31,720	-59,710
<b>Farol</b>	-0,615986	-47,356547	24,290	52,18	56,26	-27,890	-31,970
<b>Guaxini 1</b>	-0,635765	-47,340589	11,190	41,37	46,19	-30,180	-35,000
<b>Guaxini 2</b>	-0,63696	-47,338616	14,140	45,29	49,42	-31,150	-35,280
<b>Dom Bosco</b>	-0,626376	-47,348086	18,060	44,43	50	-26,370	-31,940
<b>Barreiro 3</b>	-0,639662	-47,33898	20,640	68	55,96	-47,360	-35,320

No mapa do potencial hidráulico do período chuvoso, as linhas de fluxo, de uma maneira geral encontram-se no quadrante I (Nordeste) indo de E-NE, e para E-SE. No quadrante II (Sudeste) vão de SE-E; E-NW e E-S. No quadrante III (Sudoeste) fluem para NE-SW e no quadrante IV (Noroeste) saem para quase todas as direções. Segue-se a descrição dos fluxos nos quadrantes mencionados (Figura 4.9 e 4.10).

- Quadrante I (Nordeste): fluxo que provem de superfícies potenciométricas em torno de -16 metros, passando pelo poço Jardim Atalaia (margem direita da estrada principal - Bairro das Mansões) descendo até a superfície potenciométrica -32 metros, indo em direção aos poços da margem esquerda da estrada principal (entrando na cidade – parte urbana), na parte centro-norte da área, abrangendo os poços Dom Bosco (Dinossauro); Amapá e Escritório.
- Quadrante II (Sudeste): as linhas de fluxo convergem da superfície potenciométrica -18 metros, passando pelos poços do sistema Guaxini de cota -4 metros e depois seguindo para o sistema Barreiro, com superfície potenciométrica -48 metros.
- Quadrante III (Sudoeste): o fluxo segue de NE (superfície potenciométrica -32 metros) para SW (superfície potenciométrica -38 metros). Não houve poços estudados nesse quadrante.
- Quadrante IV (Noroeste): as linhas indicam fluxo em quase todas as direções, partindo da superfície potenciométrica -24 metros.

Figura 4. 9 - Mapa de potencial hidráulico (PH): direção de linha de fluxo do aquífero Inferior do Pirabas. Período chuvoso. Abril e junho de 2017. Salinópolis – PA.

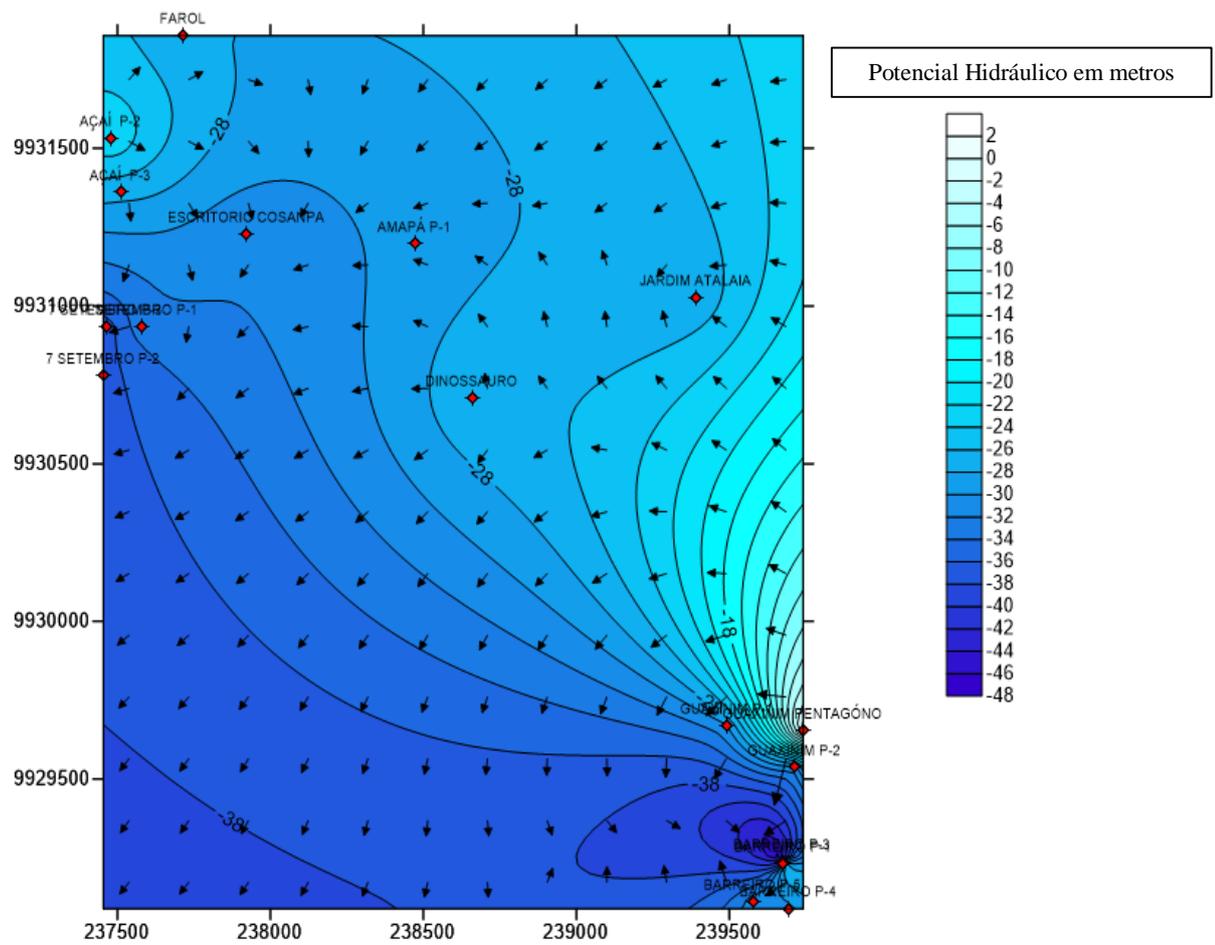
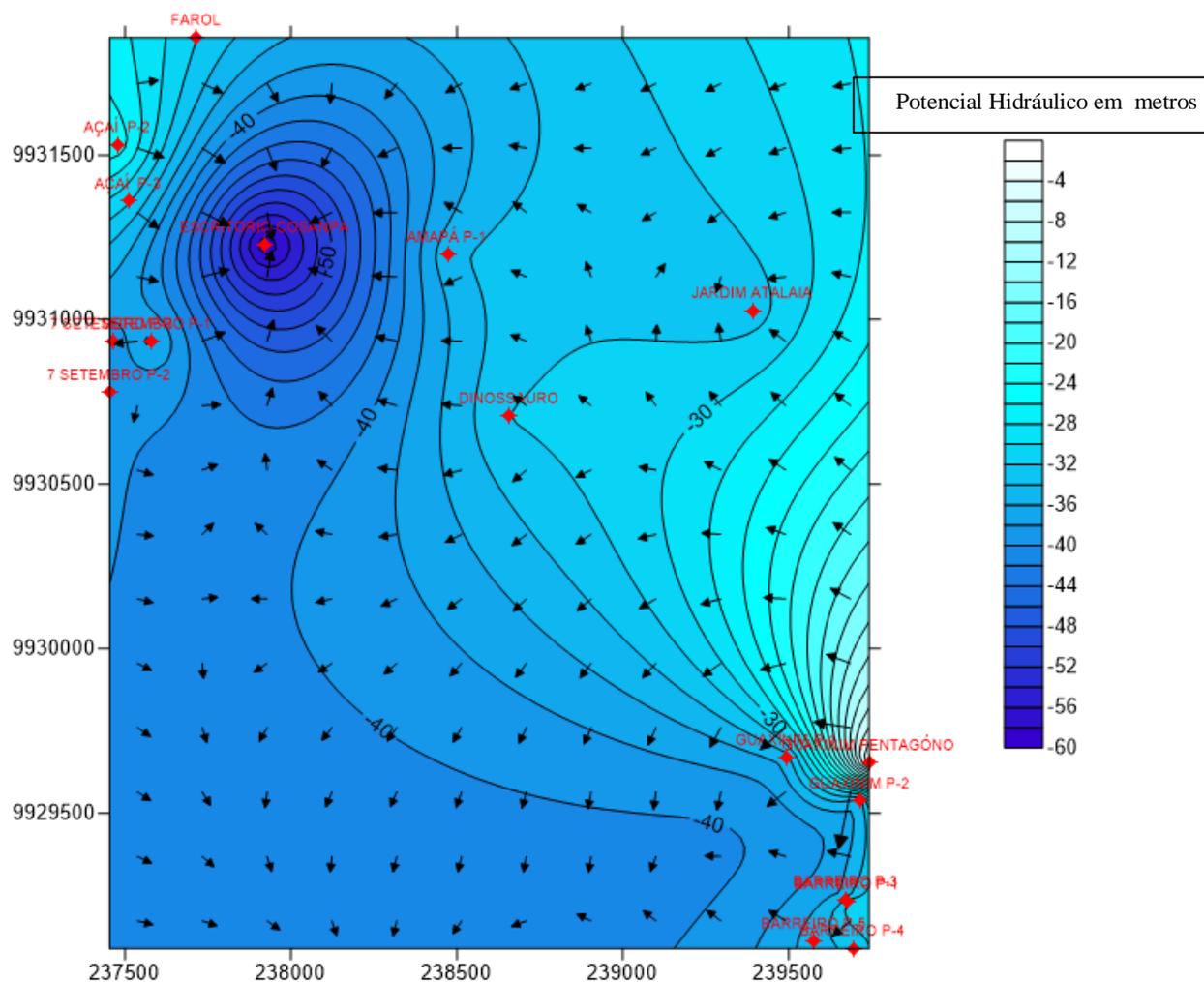


Figura 4. 10 - Mapa de potencial hidráulico (PH): direção de linha de fluxo do aquífero Inferior do Pirabas. Período seco. Salinópolis – PA.



O mapa em 3D (Figuras 4.11 e 4.12) mostra uma tendência das linhas de fluxo seguirem com direção para SW. Nesse caso em particular, no sentido do litoral para o continente. Pode-se inferir que esta disposição tenha a ver com a fonte de suprimento de água, visto o aquífero Pirabas Inferior, ser contribuinte e provedor para a região Nordeste do Pará e possivelmente para a Região Metropolitana de Belém.

Figura 4. 11 - Bloco diagrama de Potencial Hidráulico em 3D do Aquífero Inferior do Pirabas. Período Chuvoso. Salinópolis.

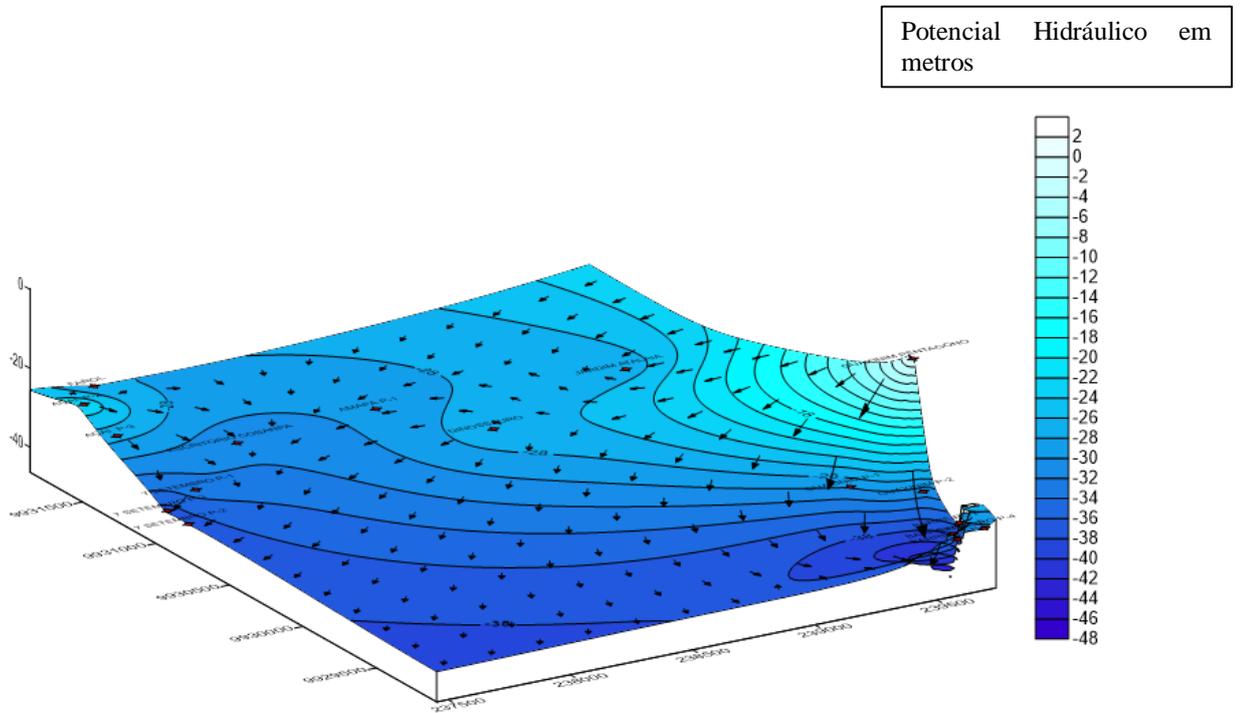
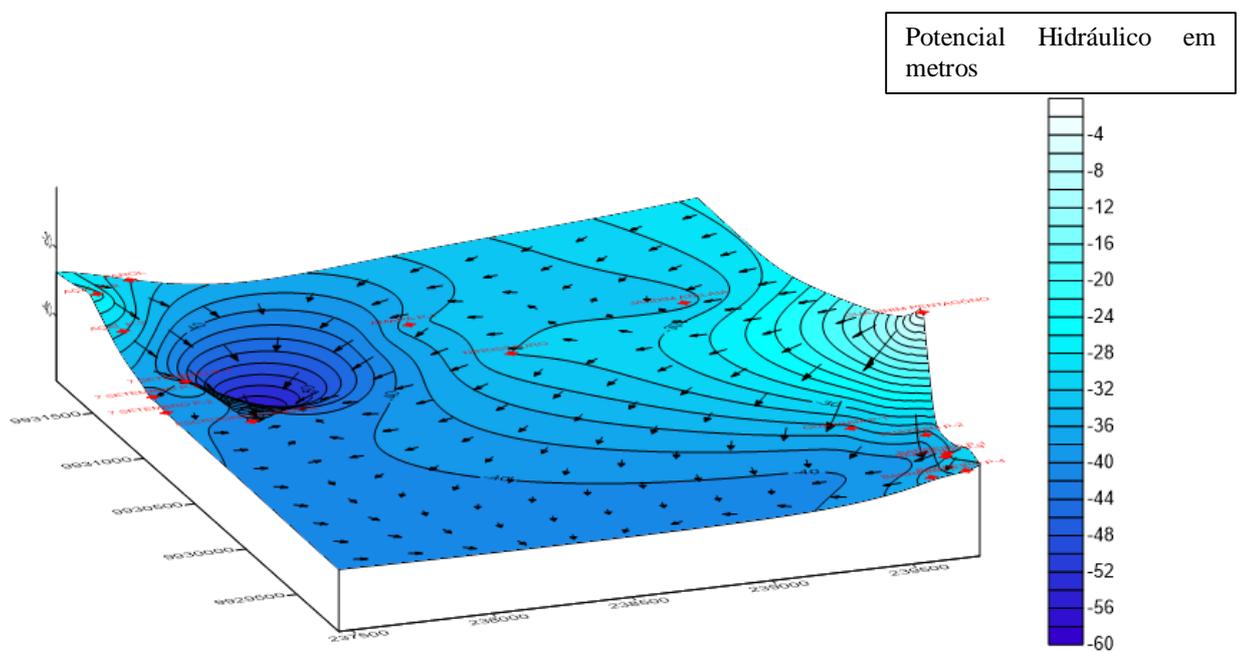


Figura 4. 12 - Bloco diagrama de Potencial Hidráulico e de Fluxo Subterrâneo em 3D do Aquífero Pirabas Inferior Pirabas seco. Salinópolis



### **Zonas de Recarga e Descarga.**

As zonas de recarga e descarga foram interpretadas levando em consideração a topografia do terreno, em uma área que compreende 8 Km<sup>2</sup>, com todos os poços da COSANPA inseridos (Figura 4.13). Cada poço contém sua referência de nível (RN), que a ser subtraído do valor da boca do poço (BP), passa a representar o *DATUM* de cada poço. O valor que é utilizado para as consistências dos dados para a RIMAS-SIAGAS está publicado na WEB-RIMAS.

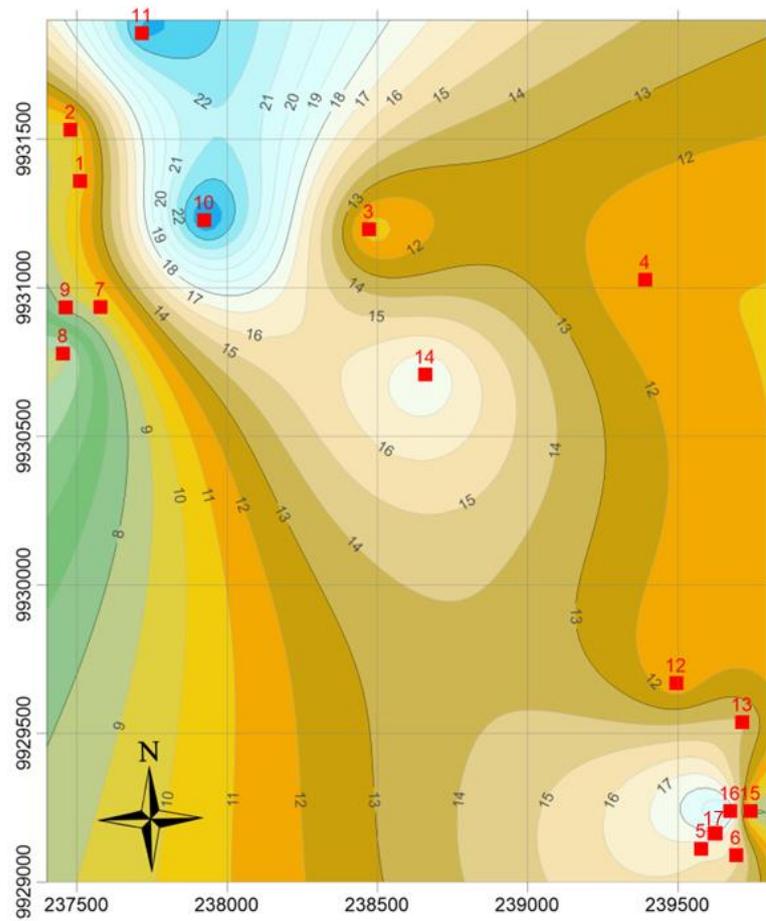
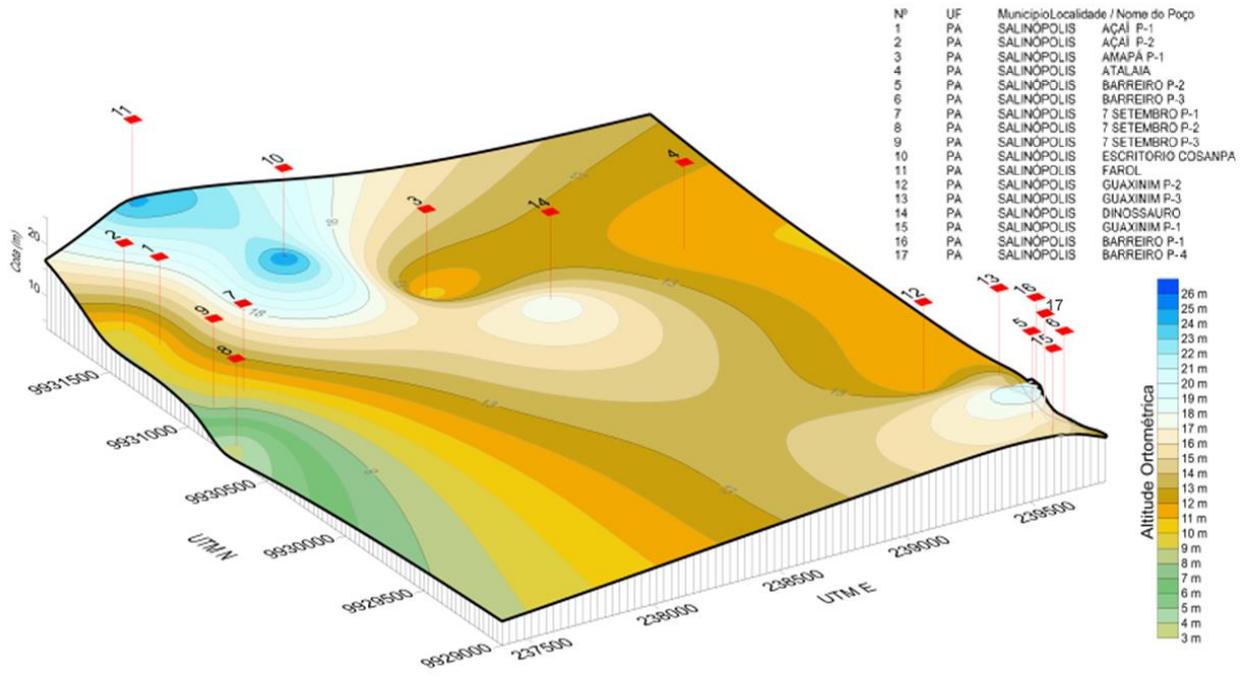
A análise das altitudes ortométricas, tanto em 3D como em planta, permitiu a definição das áreas de recarga e descarga:

As áreas de recarga com cota de 25 metros são representadas pelo poços Escritório e Farol (tom azul), localizados no Quadrante IV (Noroeste); as de cota em torno de 28 metros, tem o sistema Barreiro como representante estando inserido no Quadrante II (Sudeste). No centro da área, o poço Dom Bosco (Dinossauro) está localizado na cota de 18 metros, também configurando área de recarga para o sistema aquífero.

As áreas de descargas são representadas pelas locais de topografia mais baixa. Nesses casos, todas estão referenciadas ao sistema de drenagem. Como exemplo temos o sistema Guaxini (cota 12 metros); Amapá e sistema Açaí (cota 10 metros), e a parte mais baixa correspondendo ao sistema 7 de Setembro, com cotas atingindo 3 metros.

O sistema 7 de Setembro está localizado próximo a zona portuária (Porto Grande), principal ponto de abastecimento de pescado da cidade, e está praticamente ao nível do mar. O poço 7 de setembro<sup>2</sup>, possui cota mais baixa desse sistema, apresentando valores maiores de condutividade elétrica (447  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), que deve indicar o bombeamento de água originada dos manguezais que circundam essa parte da cidade.

Figura 4. 13 Zonas de Recarga e Descarga.



## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Os estudos hidrogeológicos do sistema aquífero Pirabas na cidade Salinópolis conseguiram definir uma subdivisão em sistema aquífero Pirabas Inferior e sistema aquífero Pirabas Superior. O sistema aquífero Pirabas compreende rochas de idade miocênica da Formação Pirabas nos dois sistemas definidos, intercaladas com camadas argilosas que servem de selante, dando um caráter confinado a semi-confinado. Acima estão as rochas da Formação Barreiras e Sedimentos Pós Barreiras e abaixo rochas graníticas do embasamento cristalino.

Os 03 poços de monitoramento da Rede RIMAS-BE analisados nos períodos secos (dezembro de 2016; 2017 e 2018) com suas seções filtrantes acima da camada argilosa selante, são responsáveis pelas informações na parte superior do aquífero Pirabas. Enquanto os 14 poços em bombeamento da COSANPA com filtros localizados abaixo da camada argilosa, estão relacionados ao sistema aquífero Pirabas Inferior. O aquífero inferior tem grande importância para o abastecimento público da cidade de Salinópolis, pois a maioria dos poços tubulares profundos captam água desse manancial a uma profundidade dos poços de abastecimento da COSANPA que varia entre 80 a 160 metros.

Para as análises hidroquímicas foram usados os diagramas de *Piper, Stiff e Schoeller*, onde a água do sistema aquífero Pirabas Inferior foi classificada como sódica bicarbonatada, com águas que podem ter contribuição marinha recente infiltradas nas rochas da Formação Pirabas que afloram por todo o litoral, e água do sistema aquífero Pirabas Superior classificada como cálcica bicarbonatada dada pela relação da fonte carbonática dos calcários da Formação Pirabas.

Quanto à origem das águas sódicas bicarbonatadas do aquífero Pirabas inferior podem estar ligada a condutos que facilitam a entrada de água marinha para o aquífero modificando sua classificação característica (cálcica bicarbonatada) do aquífero em todo nordeste paraense e na região metropolitana de Belém, de acordo como mostrou os estudos da ANA (2019).

É importante a identificação desses condutos para os estudos de qualidade e quantidade de água, avaliação da recarga do aquífero, projetos de construção de poços tubulares profundos. A ocorrência desses condutos foram comprovados por empresas perfuradoras na construção de poços tubulares profundos nos municípios de Marapanim, Castanhal e Salinópolis, como em estudos geofísicos no município de São João de Pirabas

que delimitaram cavernas com extensão lateral de 10 metros e profundidades até 45 metros (LOPES, 1995).

Ainda na parte superior do sistema aquífero Pirabas houve mistura de água entre as rochas da Formação Barreiras e da Formação Pirabas, tendo em vista a classificação cálcica mista da água do poço Guaxini Pentágono (período seco 218) que apresentou valor relativo alto para o íon sulfato nessa análise.

Os levantamentos geofísicos de perfis de poços e tomografia elétrica delimitaram a geometria em escala vertical dos estratos rochosos sedimentares, definindo a relação topo-base e a continuidade lateral. Devido à escala de trabalho dos levantamentos geofísicos não foi possível definir um padrão de discontinuidades que possivelmente contribuem para a entrada de água de origem marinha no aquífero Pirabas Inferior (definido pelo aumento do teor de sódio) e de recarga imediata das águas meteóricas no aquífero Pirabas Superior.

Contudo os resultados alcançados permitem sugerir que há necessidade de se aprofundar os estudos do comportamento espacial desse importante manancial, pois a ausência de exposições geológicas preservadas aponta a necessidade da escolha de métodos geofísicos mais adequados através de pesquisas em escala regional, utilizando os métodos gravimétricos, magneto-telúricos ou eletromagnéticos.

Os mapas de fluxo mostram que as direções do fluxo subterrâneo acompanham a topografia do terreno de Salinópolis. Nas áreas de recargas e de descargas demonstram que o fluxo subterrâneo vai da cota mais alta para a cota mais baixa.

Quanto à qualidade das águas, as análises de potabilidade considerou a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, dando como resultado todos os poços ficaram dentro dos parâmetros da legislação vigente, sendo a água doce e potável. Nas análises dos metais pesados não apresentaram valores acima do permitido da legislação, reforçando a boa qualidade da água estudada.

Nas análises dos isótopos estáveis de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{D}$ , a reta meteórica local apresentou relação com a reta meteórica global. As amostras coletadas mostram pequena dispersão em torno da reta local e indicam recarga rápida de águas meteóricas no sistema aquífero Pirabas, sem prévia evaporação. Os intervalos de variação de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{D}$  são compatíveis com águas costeiras em zonas de baixa latitude.

O monitoramento da variação do índice pluviométrico *versus* nível estático dos poços demonstrou que há recarga sistêmica dos mananciais, ou seja, os sistemas aquíferos estão sendo recarregados ao longo do anos hidrológicos pela água de chuva, representados pelas linhas de tendências crescentes dos poços monitorados, mesmo com a exploração contínua das águas subterrâneas.

Os estudos definem o alto potencial para abastecimento público das águas subterrâneas do sistema aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis, tanto em quantidade, quanto em qualidade. Basta saber gerir.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA - IAEA. **Dados de chuva da GNIP-Belém**. Disponível em: [www.iaea.org](http://www.iaea.org). Acesso em: 13/01/2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. **Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA**. Belém, 2109.
- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D. S.; GÓES, A. M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do estado do Pará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 35.*, 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. v.2, p. 738-752.
- ARAI, M.; TRUCHENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. C.R.; GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 4., Belém. **Anais...** Belém SBG. p. 185-187. 1994
- ARAÚJO, P.P. **Aspectos gerais da hidrogeologia das regiões costeiras – cidade de Salinópolis**. 1998. 11f. Trabalho Final de Disciplina de Especialização em Geociências Aplicadas ao Meio Ambiente – UFPA, CG, Belém, 1998.
- AULER SA, PILÓ L.B.; SAADI, A. Ambientes cársticos. *In: SOUZA, C.R.G. et al. (eds), Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, Ribeirão Preto, Brasil, 2005. p. 321-337.
- BANDEIRA, I.C.N. **Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/PA**. 2008. 144f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), IG, UFPA. Belém, 2008.
- BEMERGUY, R. L.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BORGES, M. S. Tectônica e Paleogeografia da calha do rio Amazonas. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS*. Gramado. **Anais...** Porto Alegre: SBG. v.5, p. 419-420. 1995.
- BORGES, M. S.; COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; FERNANDES, J. M. G. COSTA, M. L.; HASUI, Y. Evolução neotectônica da região Nordeste do estado do Pará. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS*. Gramado. **Anais...** Porto Alegre: SBG. v.5, p. 421-422. 1995.
- BORGES, M. S.; CAVALCANTE, L. M.; EBERT, H. D.; BEMERGUY, R. L.; COSTA, J. B. Aspectos geomorfológicos e modelagem digital de terreno de área entre as praias do Farol e Paraíso - ilha de Mosqueiro, Nordeste do Pará. **Geociências**, v. 16, n. 2, p. 626-643, 1997.
- CAVALCANTE, L. M. **Contribuição à geologia da margem NW da ilha de Mosqueiro, Nordeste do Estado do Pará**. 1997. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1997.
- CAVALCANTI NETO, F.P. **Determinação da interface água doce-água salgada da estância hidromineral de Salinópolis**. 1986. iii, 41f. TCC (Graduação) – Curso de Geologia. Centro de Geociências. UFPA, Belém, 1986.

COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; BEMERGUY, R. L.; IGREJA, H. L. S.; PINHEIRO, R. V. L. Aspectos da tectônica cenozóica da região do Salgado, litoral NE do Estado do Pará. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 3., Belém. **Anais...** Belém: SBG. p. 156-165. 1991.

COSTA, W. J. P.; EL-ROBRINI, M. Evolução morfoestrutural de uma ilha estuarina: ilha de Mosqueiro - baía de Marajó – norte/Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 37., São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG, 1992. v.1, p. 197.

COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; BEMERGUY, R. L.; FERNANDES, J. M. G. COSTA JUNIOR, P. S.; COSTA, M. L. Evolução cenozoica da região de Salinópolis, nordeste do estado do Pará. **Geociências**, v.12, n. 2, p. 373-396, 1993.

COSTA, J. B. S. A neotectônica na Amazônia. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 5., Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1996. p. 35-38.

COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; FERREIRA JUNIOR, C. R. P.; BEZERRA, P. E. L.; COSTA, M. L.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica na região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v.4, n. 2, p. 23-44, 1996.

COSTA J.B.S.; HASUI,Y. Evolução Geológica da Amazônia. *In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (coord.). Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: FINEP/SBG, 1997. p 15-90.

COSTA,J. B. S. ; HASUI, Y.; BEMERGUY,R.L.,SOARES,JR, A. V.; VILLEGAS, J. M.M. Tectonics and paleogeography of the Marajó basin, Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, n. 3, p. 519-531, 2002.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM. **Projeto estudos hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e adjacências**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Belém, 2002. 101 p. (Relatório Final).

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM. **Projeto implantação da rede de monitoramento integrado das águas subterrâneas**. Rio de Janeiro, 2009. (Proposta Técnica).

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ - COSANPA. **Gestão gerencial dos poços de abastecimento de Salinópolis**. Disponível em: <http://www.cosanpa.pa.gov.br/index.php/historico>. Acesso em: 12/01/2019,

FABRI, F. *et al.* Relevo cárstico em rochas siliciclástica: uma revisão com base na literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n. 3, p.339-351, jul-set. 2014.

FEITOSA, A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. **Hidrogeologia, conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2008.

FEMAC GEOSOLO ENGENHARIA LTDA. **Relatório técnico do poço tubular COSANPA - Marapanim P-02**. Belém, 2014. 26f.

FERNANDES, J. M. G. Paleocologia da Formação Pirabas, estado do Pará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1984. v. 1, p. 330-340.

FERREIRA, C. S. Características Litopaleontológicas da Formação Pirabas, estado do Pará. *ANAI DA VI CONF. GEOL. DAS GUIANAS. Avulso...* DNPM/DGM, v. 41, p:101-111, 1966.

FERREIRA, E. S. Correlação da Formação Pirabas (Mioceno Inferior) no N e NE do Brasil com as formações Chipola e Tampa da Península da Flórida, USA. *In: CONGRESSO ARGENTINO DE PALEONTOLOGIA*, 2º; *CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PALEONTOLOGIA*, I, **Anais...** Buenos Aires, 1980. v. 3: p: 49-55.

FERREIRA, C. S. Notas estratigráficas sobre o Cenozóico marinho do estado do Pará. *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, Anais...* Belém. 1982. v. 1: p: 81-88,

FERREIRA, E. S. & FRANCISCO, B. H. R. As relações da Formação Pirabas (Oligoceno/Mioceno) com as formações continentais terciárias no nordeste do Pará. *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35, **Anais....** Belém, SBG. 1988. v.2: p. 761-764.

FOSSSEN, H. **Geologia estrutural**. São Paulo: Oficina de Textos. 584 p. 2012.

FREDDO, J. F. V. **Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero barreiras: estudo de caso em Benevides – PA**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PPRH), Instituto de Geociências (IG), Universidade Federal do Pará. 2018.

FREIMANN, B.C. **Correlação de Perfis Geofísicos de Poços – sede do Município de Salinópolis-PA**. TCC. IG-UFGA. Belém. 2012.

FREIMANN, B. C. **Estudo hidrogeológico através de perfis geofísicos de poços esondagens elétricas verticais (sev's) – Salinópolis-PA**. Dissertação de Mestrado. Geofísica. IG. UFGA. Belém. 2014.

GÓES, A. M. ; TRUCKEMBRODT, W. Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região Bragantina, nordeste do estado do Pará. *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*. 31. Camboriú, SC. **Anais**. SBG Vol. 2: 766-771. 1980.

GÓES, A.M.; ROSSETI, D.F.; ROGUEIRA, A.C.R.; TOLEDO, P.M. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Estado do Pará. Belém: **Boletim MPEG**. 1990.

GÓES, A. M.; ROSSETI; D. F.; NOGUEIRA. A. C. R. & TOLEDO, P. M Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do estado do Pará. **Boletim MPEG**. Série Ciências do Terra, v.2. Belém,1990.

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. *In: Workshop sobre a neotectônica e sedimentação continental cenozoica no sudeste do Brasil*. Belo Horizonte. **Boletim**. SBG. V.1, p. 1-31. 1990.

HASUI, Y. Evolução geológica da Amazônia. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*. Belém. *Anais... SBG*. v.5, p. 31-34. Belém,1996.

INSTITUTO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO-SOCIAL DO PARÁ - IDESP. **Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro**. Relatório Técnico. Geologia. p. 17-58. Belém,1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Municípios Brasileiros** (2016). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/estimativatcu.shtm>. Acessado em 30/05/2019.

IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em 09/01/2017.

IGREJA, H. L. S.; ALVES, R. J.; COSTA JÚNIOR, P. S.; COSTA, J. B. S. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro - NE do Estado do Pará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 36., Natal. *Anais... Natal: SBG*. v.5, p. 2110-2123. 1990.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Revista estudo de água subterrâneas**. 36f. São Paulo. 2019.

LOPES, E. S. **Investigação por eletroressistividade de ambientes cársticos no município de São João de Pirabas**. Tese de Mestrado. Belém. CG - UFPA. 88p. 1995.

MATTA, M. A. S. **Fundamentos hidrogeológicos para gestão integrada de recurso hídrico da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 292p. (Tese de Doutorado) 2002.

MARTORANO, L. G.; PERREIRA, L. C.; CÉZAR, E. G. M.; PEREIRA, I. C. B. **Estudos climáticos do Estado do Pará, classificação climática (KÖPPEN) e deficiência hídrica**. (THORNTHWHITE, MATHER). Belém: SUDAM/EMBRAPA, SNLCS, 53p. 1993.

MAURY, C. J. **Fósseis terciários do Brasil. Serviço de Geologia e Mineralogia do Brasil, com descrições de novas formas cretáceas**. *Mon. Div. Gel. Min.* Rio de Janeiro, v.4, p.1-35. 1925.

MOBUS G. QUALIGRAF. **Programa para análise da qualidade da água**. Fortaleza, FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Software-CD. 2002.

MONTEIRO, E. C.; LUCZINSKI, E.; SOUZA, P. G. N. **Mapeamento geológico da ilha de Mosqueiro/PA (Projeto Nordeste do Pará)**. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 116p. (Relatório de Estágio de Campo III). 1992.

OLIVEIRA, J. R. **Projeto estudos hidrogeológicos da região metropolitana de Belém e adjacências**. Belém, CPRM (SUREG-BE) 110p. 2001.

PALHETA, E. S. M. **Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da ilha de Mosqueiro – Pará empregado na prospecção hídrica subterrânea**. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado). Belém. 2008.

PARRON, M.P., MUNIZ, D.H.F., PEREIRA, C.M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA FLORESTAS. ISSN 1980-3958, Documentos 232, Colombo – PR. 2011.

PETRI, S. **Foraminíferos miocênicos da Formação Pirabas**. Bol. Fac. Ciênc. Let., Univ. São Paulo, 216 (16): 1-78. 1957.

PINHEIRO, A. V. R.. **Uso de Ferramentas Multidisciplinares na Avaliação de Vulnerabilidade e Risco a Subsidência no Meio Cárstico na Cidade de Castanhal, Nordeste do Pará - Brasil**. 2008. 211f. Programa de Pós- Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado). Belém. 2008.

REDE INTEGRADA DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - RIMAS. **Relatório Técnico**. www.cprm.gov.br. 2014

ROSSETTI, D. E; TRUCKENBRODT, W.; GOÉS, A. M. Estudo Paleambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e pós-Barreiras na Região Bragantina, nordeste do estado do Pará. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**. Sér.Ciênc. Terra, v.1, p.25-74. 1989.

ROSSETTI, D. F. **Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes**. *Journal of South American Earth Sciences*, v.14, p. 77-89. 2001.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.. **O Neógeno da Amazônia Oriental**.: Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friederich Katzer), p.13-52, Belém. 2004.

ROSSETTI, D. F. **Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão**. Geol. USP, Sér. Cient. v.6, n.2, São Paulo. 2006.

RODRIGUES, E. S. F. **Caracterização hidroquímica dos aquíferos freáticos costeiros na cidade de Salinópolis-PA**. Dissertação de Mestrado N° 748. PPGG. IG.UFPA. 2016.

SALLES, L. Q. *et al.* **Influência dos aspectos hidrogeológicos de aquíferos cársticos na evolução do relevo: porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil**. REVISTA BRASILEIRA DE GEOMORFOLOGIA. v.19, n.1; 2018

SOUZA, E.L. **Fatores controladores do quimismo de águas subterrâneas da região nordeste do Pará**. Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica. Centro de Geociências. UFPA (Tese de Doutorado). Belém. 1996.

SÁ J. H. S. **Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, estado do Pará**. Bol. Geol. MPEG,v.3, p.20-36. 1969.

SALES, G. M. **Ecologia da paisagem da ilha do Mosqueiro, NE do Estado do Pará**. Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará (Dissertação de Mestrado). Belém. 2005.

SANTOS, R. A. **Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Município de Iraquara, Bahia**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 2011.

SILVA, I, R, F. ; GALARZA, M. A.,. 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. **Contribuições à Geologia da Amazônia** – v.10. p.83-97, Belém. SBG. 2010.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. SIAGAS. [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br). Sistemas Geocientíficos/web-siagas. Acesso em 30/07/2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Índices de cobertura de água e esgoto**. Disponível em: <http://snis.gov.br/glossarios>. Acesso em 30/06/2019.

TANCREDI, A. C. F. N. **Recursos Hídricos Subterrâneos de Santarém**. Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado). 153p. Belém. 1996.

TRUCKENBRODT, W. **Contribuição à mineralogia e à geoquímica da Formação Pirabas (Mioceno Inferior), estado do Pará**. Boletim MPEG, Série Geologia. v.25, p.1-6. Belém, 1981.

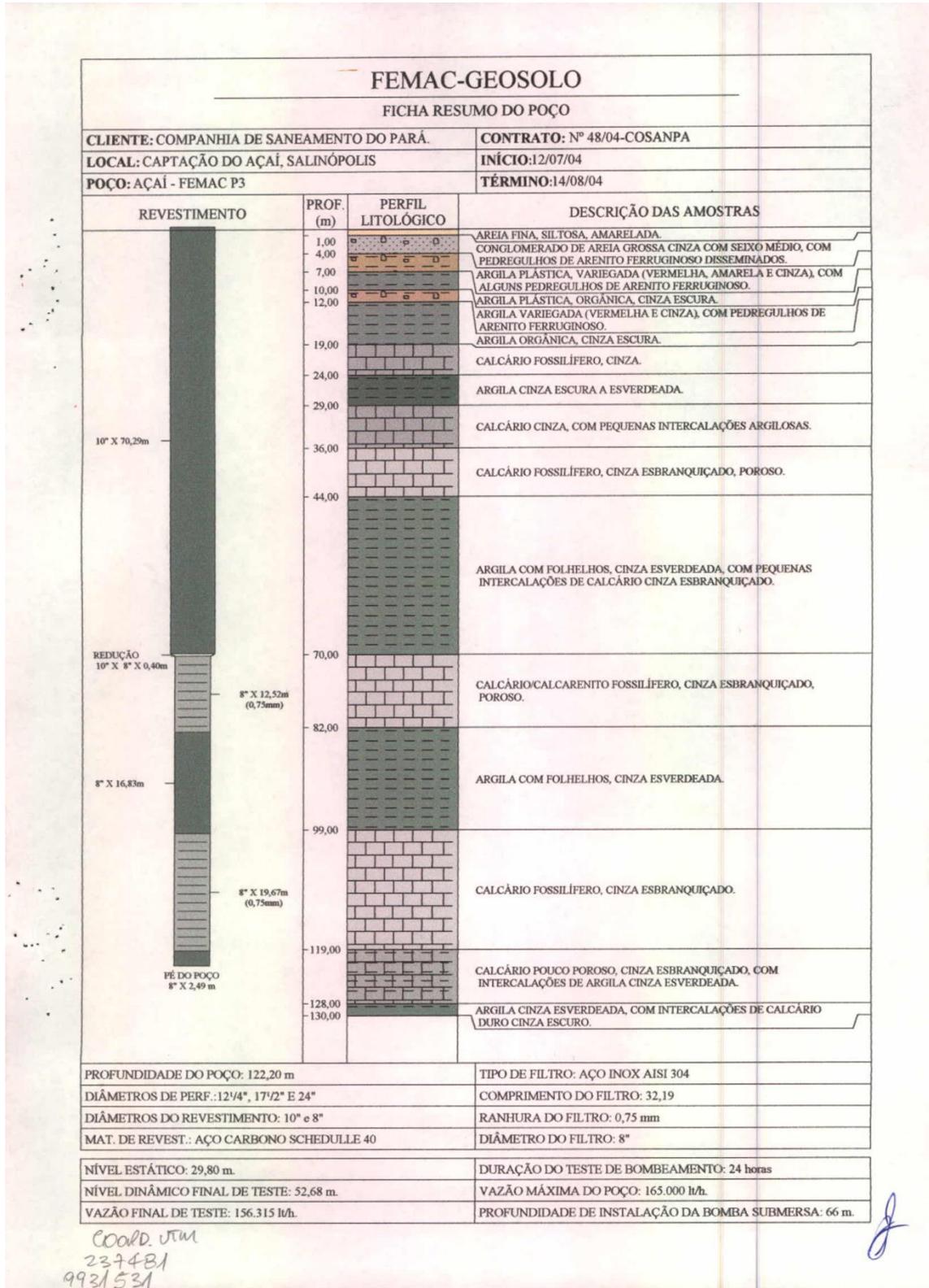
URDININEA, J. A. **Aspectos geoquímicos e ambientais dos calcários da Formação Pirabas, PA**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, T 1977.

VALLE, M, A. **Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias de Irecê e Salitre): Um exemplo da ação de ácido sulfúrico no sistema cárstico**. IG. USP.122p. São Paulo. 2004.

WILSON, J. L. **Carbonate Facies in Geologic History**. Spring-Verlag Berlin. Heidelberg. 471 p.1995.

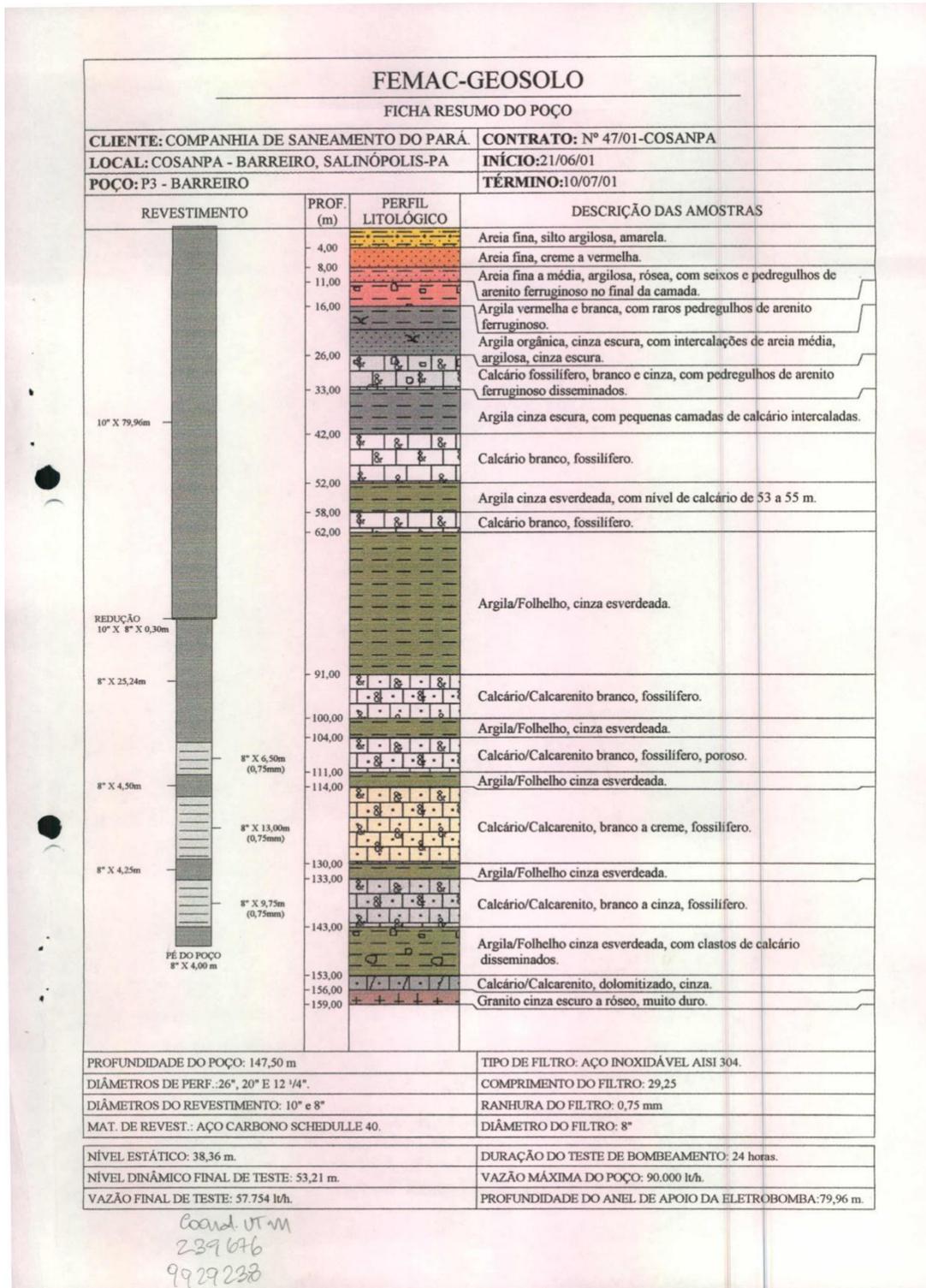
## ANEXO A

## Ficha resumo do poço Açaí3



## ANEXO B

## Ficha resumo do poço Barreiro3





## ANEXO D

## Ficha resumo do poço Dom Bosco (Dinossauro)

FEMAC-GEOSOLO			
FICHA RESUMO DO POÇO			
CLIENTE: COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ.		CONTRATO: Nº 63/03-COSANPA	
LOCAL: CAPTAÇÃO DO DOM BOSCO , SALINÓPOLIS		INÍCIO: 29/12/03	
POÇO: DOM BOSCO P2		TÉRMINO: 10/02/04	
REVESTIMENTO	PROF. (m)	PERFIL LITOLÓGICO	DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS
12" X 83,08m	9,00		AREIA FINA, SILTO ARGILOSA, AMARELADA, COM PEDREGULHOS DE ARENITO FERRUGINOSO.
	18,00		ARGILA VARIEGADA (VERMELHA), SILTOSA, COM POUCOS PEDREGULHOS DE ARENITO FERRUGINOSO MARROM AVERMELHADO.
	25,00		ARGILA ORGÂNICA, CINZA ESCURA A PRETA, EM PARTE SILTOSA.
	27,00		CALCÁRIO CINZA A ESBRANQUIÇADO, FOSSILÍFERO.
			ARGILA CINZA ESCURA, EM PARTE SILTOSA.
	41,00		CALCÁRIO CINZA A ESBRANQUIÇADO, FOSSILÍFERO, COM INTERCALAÇÕES DE ARGILA CINZA.
	49,00		ARGILA CINZA.
	52,00		CALCÁRIO CINZA A ESBRANQUIÇADO, FOSSILÍFERO.
	57,00		ARGILA COM FOLHELHOS, CINZA ESVERDEADA.
	83,00		CALCÁRIO POROSO, FOSSILÍFERO, CINZA A ESBRANQUIÇADO.
REDUÇÃO 8" X 3,18m	8" X 6,00m (0,75mm)	92,00	ARGILA COM FOLHELHOS, CINZA ESVERDEADA, COM PEQUENAS INTERCALAÇÕES DE CALCÁRIO.
8" X 16,93m	8" X 23,95m (0,75mm)	108,00	CALCÁRIO POROSO, FOSSILÍFERO, CINZA A ESBRANQUIÇADO.
PÉ DO POÇO 8" X 0,58 m	124,00 135,00		GRANITO CINZA ESCURO.
PROFUNDIDADE DO POÇO: 133,97 m		TIPO DE FILTRO: AÇO INOX AISI 304	
DIÂMETROS DE PERF.: 12", 17", 20" E 24".		COMPRIMENTO DO FILTRO: 29,95	
DIÂMETROS DO REVESTIMENTO: 12" e 8"		RANHURA DO FILTRO: 0,75 mm	
MAT. DE REVEST.: AÇO CARBONO SCHEDULE 40		DIÂMETRO DO FILTRO: 8"	
NÍVEL EStÁTICO: 39,20 m.		DURAÇÃO DO TESTE DE BOMBEAMENTO: 24 horas.	
NÍVEL DINÂMICO FINAL DE TESTE: 59,00 m.		VAZÃO MÁXIMA DO POÇO: 75.000 l/h	
VAZÃO FINAL DE TESTE: 50.126 l/h.		PROFUNDIDADE DE INSTALAÇÃO DA BOMBA SUBMERSA: 78 m.	

Coord. JTM

## ANEXO E

## Ficha resumo do poço Jardim Atalaia

FEMAC-GEOSOLO			
FICHA RESUMO DO POÇO			
CLIENTE: COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ.		CONTRATO: Nº 10/03-COSANPA	
LOCAL: CAPTAÇÃO DO JARDIM ATALAIA, SALINÓPOLIS		INÍCIO: 28/05/03	
POÇO: JARDIM ATALAIA - P2		TÉRMINO: 07/07/03	
REVESTIMENTO	PROF. (m)	PERFIL LITOLÓGICO	DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS
12" X 80,70m	4,00		AREIA FINA A MÉDIA, SILTOSA, CREME AMARELADA.
	6,00		ARGILA SILTOSA, VARIEGADA (VERMELHA E BRANCA) C/ PEDREG. DE LATERITA
	8,00		AREIA FINA, SILTOSA, CREME AVERMELHADA.
	11,00		SILTE ARGILO ARENOSO, CARBONÁTICO, AMARELO A VARIEGADO, C/ PEDREGULHOS DE ARENITO FERRUGINOSO MARROM.
	19,00		ARGILA SILTOSA, CALCÍFERA, CINZA ESCURA, COM POUCOS PEDREGULHOS DE ARENITO FERRUGINOSO E CALCÁRIO.
	25,00		CALCÁRIO FOSSILÍFERO, CINZA CLARO.
	31,00		CALCARENITO ARGILOSO, CINZA ESCURO.
	43,00		CALCÁRIO/CALCARENITO FOSSILÍFERO, CINZA CLARO.
	45,00		ARGILA SILTOSA, CALCÍFERA, CINZA ESVERDEADA.
	50,00		CALCÁRIO CINZA CLARO COM INTERCALAÇÕES DE ARGILA CINZA ESVERDEADA.
REDUÇÃO 12" X 8" X 0,46m	80,00		ARGILA CALCÍFERA COM FOLHELHOS, CINZA ESCURA A ESVERDEADA. PEQUENAS CAMADAS DE CALCÁRIO INTERCALADAS.
	88,16		
	90,00		CALCÁRIO/CALCARENITO FOSSILÍFERO, CINZA CLARO.
	99,22		
	107,01		ARGILA CALCÍFERA COM FOLHELHOS, CINZA ESCURA A ESVERDEADA, COM INTERCALAÇÕES DE CALCÁRIO/CALCARENITO.
	112,11		
	115,77		CALCÁRIO FOSSILÍFERO, CINZA CLARO, DE REGULAR A BOA POROSIDADE.
	121,89		
	126,73		ARGILA CALCÍFERA, CINZA ESVERDEADA, COM INTERCALAÇÕES DE CALCÁRIO.
	132,50		INTERCALAÇÕES DE CALCARENITO FINO, EM PARTE QUARTZOSO, CINZA, E CALCÁRIO FOSSILÍFERO, FRATURADO, CINZA CLARO.
8" X 16,24m	136,00		CAMADAS INTERCALADAS DE CALCÁRIO CINZA E ARGILA CALCÍFERA, COM FOLHELHOS, VARIEGADA A CINZA CLARA/ESVERDEADA.
	138,00		CALCÁRIO FOSSILÍFERO, CINZA, DE REGULAR POROSIDADE.
	142,00		ROCHA ALTERADA DE GRANITO (QUARTZO-BIOTITA), CINZA ESCURA.
	142,00		GRANITO CINZA ESCURO.
	150,00		
	150,00		
8" X 6,10m (0,75mm)	8" X 6,10m (0,75mm)		
	8" X 6,10m (0,75mm)		
	8" X 6,10m (0,75mm)		
	8" X 6,32m (0,75mm)		
	8" X 2,03m (0,50mm)		
	8" X 2,03m (0,50mm)		
8" X 4,86m	8" X 4,86m		
	8" X 4,86m		
8" X 3,38m	8" X 3,38m		
	8" X 3,38m		
PÉ DO POÇO 8" X 0,52 m	8" X 0,52 m		
	8" X 0,52 m		
	8" X 0,52 m		
	8" X 0,52 m		
	8" X 0,52 m		
	8" X 0,52 m		
PROFUNDIDADE DO POÇO: 138,98 m		TIPO DE FILTRO: AÇO INOX	
DIÂMETROS DE PERF.: 12 1/4", 17 1/2", 20" E 24"		COMPRIMENTO DO FILTRO: 30,16	
DIÂMETROS DO REVESTIMENTO: 12" e 8"		RANHURA DO FILTRO: 0,75 mm e 0,50 mm	
MAT. DE REVEST.: AÇO CARBONO		DIÂMETRO DO FILTRO: 8"	
NÍVEL ESTÁTICO: 33,70 m.		DURAÇÃO DO TESTE DE BOMBEAMENTO: 24 horas.	
NÍVEL DINÂMICO FINAL DE TESTE: 74,00 m.		VAZÃO MÁXIMA DO POÇO: 63.000 lt/h.	
VAZÃO FINAL DE TESTE: 62.860 lt/h.		PROFUNDIDADE DE INSTALAÇÃO DA BOMBA: 78 metros.	

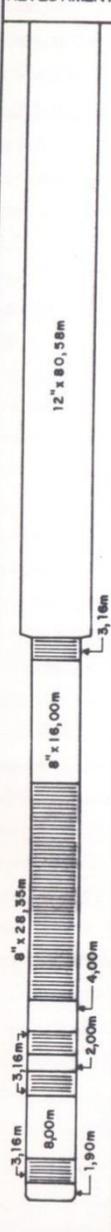
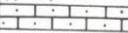
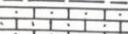
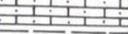
Coord. STM  
239308  
9931031





## ANEXO H

Ficha resumo do poço 7 de setembro

 <b>Femac-GeoSolo Engenharia Ltda.</b> <b>FICHA RESUMO DO POÇO</b>			
<b>CLIENTE:</b> COSANPA			
<b>LOCAL:</b> SALINÓPOLIS/ PA			
<b>POÇO Nº:</b> FEMAC - 7 DE SETEMBRO			
<b>CONTRATO:</b> 01/96 - COSANPA			
<b>INÍCIO:</b> JUNHO/96			
<b>TÉRMINO:</b> AGOSTO/96			
REVESTIMENTO	PROFUNDIDADE Q,00	PERFIL LITOLÓGICO	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA
	5,00		AREIA FINA A MÉDIA, BRANCA A CINZA, ARGILOSA, COM MATÉRIA ORGÂNICA VEGETAL.
	9,00		ARGILA SILTO-ARENOSA, CINZA MÉDIA A AVERMELHADA, COM CONCRETÕES FERRUGINOSAS.
	15,00		AREIA ARGILOSA, BRANCA EM PARTE AVERMELHADA.
	25,00		AREIA BRANCA HIALINA, MUITO FINA A GROSSA.
	28,00		CALCARENITO CREME CLARO, FOSSILÍFERO.
	37,00		FOLHELHO CINZA ESVERDEADO, SILTOSO, COM CAMADAS DE CALCARENITO CREME CLARO.
	45,00		CALCARENITO CREME CLARO, FOSSILÍFERO.
	72,00		FOLHELHO CINZA ESVERDEADO.
	86,00		CALCARENITO CREME CLARO, FOSSILÍFERO.
	100,00		FOLHELHO CINZA ESVERDEADO.
	125,00		CALCARENITO CREME CLARO, LOCALMENTE FOSSILÍFERO.
	131,00		FOLHELHO CINZA ESVERDEADO.
	134,00		CALCARENITO CREME CLARO, EM PARTE CINZA ESCURO, DOLOMITIZADO, FRATURADO E CAVERNOSO.
	145,00		DOLOMITA CINZA ESCURA, LOCALMENTE FRATURADA.
155,00		GRANITO ROSA, LOCALMENTE FRATURADO E COM TRAÇOS DE DOLOMITA CINZA ESCURA.	
<b>PROFUNDIDADE:</b> 153,47m		<b>TIPO DE FILTRO:</b> INOX TEFIL	
<b>DIÂMETROS DO POÇO:</b> 17 1/2" e 12 1/4"		<b>COMPRIMENTO DO FILTRO:</b> 40,99m	
<b>DIÂMETROS DO REVEST.:</b> 12" e 8"		<b>RANHURA DO FILTRO:</b> 0,75mm	
<b>MATERIAL DO REVEST.:</b> GEOMECÂNICO FORTILIT		<b>DIÂMETRO DO FILTRO:</b> 8"	
<b>NÍVEL ESTÁTICO:</b> 27,50m		<b>HORAS DE BOMBEAMENTO:</b> 12h	
<b>NÍVEL DINÂMICO:</b> 40,50m			