



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA - PPGG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO DUNAS-
BARREIRAS NA REGIÃO DE PARNAMIRIM, RN

Autora:
ARYANE LEONÍDIO DO CARMO ASSUNÇÃO

Orientador:
PROF. DR. JOSÉ GERALDO DE MELO

Dissertação nº 180/PPGG

Natal-RN, agosto de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA
AQUÍFERO DUNAS-BARREIRAS NA REGIÃO DE PARNAMIRIM, RN

ARYANE LEONÍDIO DO CARMO ASSUNÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica.

Prof. Dr. José Geraldo de Melo
(Orientador - Departamento de Geologia UFRN)

Prof. Dr. José Braz Diniz Filho
(Membro Interno - Departamento de Geologia UFRN)

Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos
(Membro Externo - CPRM- Serviço Geológico do Brasil)

Natal/RN
Agosto/2016

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / SISBI / Biblioteca Setorial

Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET.

Assunção, Aryane Leonídio do Carmo.

Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na região de Parnamirim, RN / Aryane Leonídio do Carmo Assunção. - Natal, 2016.

x, 105f: il.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo de Melo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

1. Sistema Aquífero Dunas-Barreiras – Dissertação. 2. Qualidade das águas subterrâneas – Dissertação. 3. Avaliação hidroquímica – Dissertação. 4. Contaminação das águas – Dissertação. I. Melo, José Geraldo de. II. Título.

RN/UF/BSE-CCET

CDU: 556.33(813.2)

RESUMO

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Pirangi, localizada no litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte, e abrangendo 370 km² na região do município de Parnamirim. Essa área apresenta um alto potencial hidrogeológico, cujos recursos hídricos já vem sendo bastante explorados no decorrer dos anos. O objetivo principal do trabalho, tendo em vista a importância e crescente utilização desse recurso, é caracterizar a qualidade dessas águas subterrâneas e diagnosticar modificações hidroquímicas ocorridas a partir do desenvolvimento de atividades urbanas e agrícolas na região. Nesse sentido, foi desenvolvida inicialmente uma avaliação de uso e ocupação do solo em toda a área, identificando as atividades existentes e que possam influenciar na contaminação das águas. A partir dessas características dividiu-se a área de estudo em três subáreas, de modo a comparar a situação hidroquímica das águas entre elas. Para o reconhecimento hidrogeoquímico, a partir de rede de monitoramento definida, foram realizadas visitas de campo para coleta de amostras para análise química, a fim de interpretar a situação do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras. Com isso, obtiveram-se dados de condutividade elétrica, STD, cátions principais (sódio, cálcio, magnésio e potássio), ânions principais (cloreto, sulfato e bicarbonato), ferro, potássio, carbonato, nitrato, amônia, boro, pH, e dureza total; interpretou-se os resultados das análises através de métodos estatísticos, mapas hidroquímicos e diagramas de Piper e Durov Expandido; e foi realizado um estudo de qualidade das águas subterrâneas para determinados usos. A fácies hidroquímica que predomina na área de estudo foi reconhecida como cloretada sódica. Os resultados obtidos indicam que as águas subterrâneas apresentam, em geral, uma boa qualidade, com baixa salinidade. Contudo, identifica-se uma tendência à contaminação oriunda da porção norte da área, mais próxima ao centro do município de Parnamirim, e que vem passando por processos de expansão urbana nos últimos anos. Ocorre também essa tendência nas porções em que há cultivo de lavouras e pecuária, a oeste da área. A porção leste da área, subárea que engloba sistemas de lagoas e dunas, é a que possui as águas subterrâneas com menores salinidades e, conseqüentemente, qualidade mais preservada. Essas constatações indicam que a direção de diminuição de salinidade das águas (em direção a leste) segue a direção do fluxo subterrâneo.

Palavras chaves: Sistema Aquífero Dunas-Barreiras; Qualidade das águas subterrâneas; Avaliação hidroquímica; Contaminação das águas.

ABSTRACT

The study area is inserted in the hydrographic basin of Pirangi river, located in the west coast of Rio Grande do Norte state, covering 370 km² in the Parnamirim region. The area presents a high hydrogeological potential, whose water resources has been widely exploited over the years. The main objective of this dissertation, considering the importance and increasing use of this resource, is characterize the groundwater quality and diagnose hydrochemical changes due the urban development and agriculture in the region. In this sense, it was initially made an assessment of use and land occupation in the whole area, identifying existing activities and the might influence water contamination. Based on these characteristics, the study area was divided in three subareas, to compare the hydrochemical situation between them. For the hydrogeochemical recognition in the defined monitoring network, it was performed field work to collect samples for chemical analysis, in order to interpret the situation of the Dunas-Barreiras Aquifer System. Therewith, many measurements were obtained such as electrical conductivity, total dissolved solids, major cations (sodium, calcium and magnesium), major anions (chloride, sulfate and bicarbonate), iron, potassium, carbonate, nitrate, ammonia, boron, pH, and total hardness; the analysis results were interpreted using statistical methods, hydrochemical maps and Piper and Expanded Durov diagrams; and a study of groundwater quality was conducted for certain uses. The hydrochemical facies that prevails in the study area is sodium chlorinated. The results indicate that the groundwater have generally good quality with low salinity. However, there is a tendency to contamination originating from the northern part of the area, closer to the center of Parnamirim city, which has been undergoing urban expansion processes in the last years. The same tendency is seen in the portions which are agricultural crops and livestock, in the western area. The east portion of the area, subarea which comprises ponds and dunes systems, is the one with lower salinity levels and, therefore, more preserved quality. These findings indicate that the direction in the decreasing of water salinity (towards east) follows the direction of the groundwater flow.

Keywords: Dunas-Barreiras Aquifer System; Groundwater Quality; Hydrochemical Evaluation; Water Contamination.

AGRADECIMENTOS

Ofereço meus sinceros agradecimentos aos meus amados pais e irmãos, ao prezado professor Geraldo Melo, aos colegas de laboratório Rafaela Alves, Renan Costa, Christiane Câmara e Jadson Gomes, à atenciosa Nilda, aos incentivadores amigos Diego Costa, Bruno Vanderlei e Sávio Luna e ao compreensivo e companheiro Diogo Vasconcelos.

RESUMO iv

ASBTRACT v

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABELAS x

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....12

1.1 Localização da área e caracterização da área de estudo.....13

1.2 Atividades metodológicas.....15

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO.....19

2.1 Unidades litoestratigráficas.....20

2.2 Contexto Tectono-Estrutural da Região.....24

CAPÍTULO 3 - O SISTEMA AQUÍFERO DUNAS-BARREIRAS.....26

3.1 Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras (SAB).....27

3.2 Cadastro de poços e uso das águas.....28

3.3 Potenciometria e fluxo subterrâneo.....30

CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....32

4.1 Importância, qualidade e contaminação das águas subterrâneas.....32

4.2 Parâmetros fundamentais de reconhecimento da qualidade das águas.....33

4.2.1 Condutividade elétrica.....33

4.2.2 Sólidos totais dissolvidos.....33

4.2.3 Elementos químicos dissolvidos.....35

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....39

CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS.....44

6.1 Dados hidroquímicos pré-existentes.....44

6.2 Reconhecimento de salinidade das águas subterrâneas (*in situ*)48

6.3 Reconhecimento hidroquímico atual das águas subterrâneas.....55

6.3.1 Balanço iônico de massas.....58

6.3.2 Síntese dos resultados obtidos.....59

6.3.3 Correlação entre parâmetros químicos.....65

6.3.4 Representação gráfica em diagramas.....67

a. Diagrama de Piper.....67

b. Diagrama de Durov Expandido.....71

6.3.5 Mapas hidroquímicos.....73

6.4 Avaliação de qualidade para utilização das águas subterrâneas.....77

6.4.1 Uso para consumo humano.....77

6.4.2 Uso para irrigação.....77

6.4.3 Uso industrial.....78

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....80

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....83

**CAPÍTULO 8 - ARTIGO SUBMETIDOS AO BOLETIM DO MUSEU PARAENSE
EMÍLIO GOELDI.....87**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo, com acessos e rede hidrográfica.....	14
Figura 1.2: Realização em campo de medidas de CE, STD e T com o Condutivímetro Portátil Modelo – TEC-4P-MP.....	16
Figura 1.3: Exemplos de uso e ocupação do solo: à esquerda, área destinada a cultivo de lavoura de cana-de-açúcar; à direita, lotes de condomínio residencial construídos, configurando uma área de expansão urbana.....	17
Figura 2.1: Coluna litoestratigráfica com as unidades ocorrentes na área de estudo. Fonte: Alves (2015).....	22
Figura 2.2: Mapa geológico simplificado contendo unidades litoestratigráficas, alinhamentos morfotectônicos e falhas geológicas ocorrentes na área de estudo. Fonte: Alves (2015).....	23
Figura 3.1: Mapa de localização dos pontos d'água cadastrados, incluindo os poços particulares e os operados pela CAERN.....	29
Figura 3.2: Distribuição do uso das águas nos poços particulares cadastrados.....	29
Figura 3.3: Mapa potenciométrico e de fluxo subterrâneo do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras. Fonte: Alves (2015).....	31
Figura 5.1: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi/RN.....	40
Figura 5.2: Vista panorâmica da Lagoa de Alcaçuz.....	41
Figura 5.3: Visão do vale do Rio Pirangi e, ao fundo, área de duna.....	41
Figura 5.4: Região de Dunas Vegetada em região conhecida como Alcaçuz.....	41
Figura 5.5: Áreas destinadas a cultivo de lavouras no setor oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi.....	42
Figura 5.6: Áreas em processo de expansão urbana, caracterizadas por abertura de acessos asfaltados e construção de loteamentos residenciais.....	43
Figura 6.1: Mapa de localização dos pontos previamente analisados.....	45
Figura 6.2: Mapas de isolinhas de condutividade elétrica (CE), contendo a localização dos poços analisados nesse parâmetro.....	50
Figura 6.3: Mapa de fluxo subterrâneo do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na região de Parnamirim. Fonte : Alves (2015).....	52

Figura 6.4: Mapas de isolinhas de sólidos totais dissolvidos (STD), contendo a localização dos poços analisados nesse parâmetro.....	54
Figura 6.5: Mapa de localização dos pontos amostrados para reconhecimento hidroquímico na área de estudo.....	56
Figura 6.6: Mapa representando as três subáreas delimitadas na área de estudo.....	61
Figura 6.7: Esquema do diagrama de Piper.....	67
Figura 6.8: Diagramas de Piper com as amostras referentes a cada uma das subáreas definidas.....	69
Figura 6.13: Diagrama de Durov Expandido, com subdivisões e processos amostrados.....	71
Figura 6.14: Diagrama de Durov Expandido com as amostras das três subáreas.....	73
Figura 6.15: Curvas de isovalores de condutividade elétrica.....	75
Figura 6.16: Curvas de isovalores de cloreto.....	75
Figura 6.17: Curvas de isovalores de sódio.....	76
Figura 6.18: Curvas de isovalores de nitrato.....	76
Figura 6.18: Quadro com valores máximos permitidos de parâmetros para qualidade de água para uso em diferentes tipos de indústrias (Freitas, 2009).....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em estudos anteriores. Fonte: Alves (2015).....	27
Tabela 6.1: Tabela contendo os valores obtidos em análises químicas de estudos prévios na área.....	46
Tabela 6.2: Resumo dos valores obtidos de CE, STD e temperatura a partir das medições realizadas nos poços avaliados no âmbito desse trabalho.....	49
Tabela 6.3: Resultados das análises de parâmetros hidroquímicos, realizadas nas 27 amostras da área de estudo.....	57
Tabela 6.4: Tabela contendo valores calculados no balanço hídrico das 27 amostras realizadas.....	59
Tabela 6.5: Resumo dos resultados das análises químicas da área total.....	60
Tabela 6.6: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea A.....	62
Tabela 6.7: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea B.....	62
Tabela 6.8: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea C.....	63

Tabela 6.9: Classificação das águas quanto à dureza, segundo Custodio & LLamas, 2001.....	64
Tabela 6.10: Correlação matricial entre parâmetros hidroquímicos.....	66
Tabela 6.11: Tipos de águas ocorrentes na subárea A.....	70
Tabela 6.12: Tipos de águas ocorrentes na subárea B.....	70
Tabela 6.13: Tipos de águas ocorrentes na subárea C.....	70
Tabela 6.14: Valores máximos permitidos para consumo humano de alguns parâmetros em água, adaptado de Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde.....	77

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A presente dissertação, intitulada “Hidroquímica e Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na Região de Parnamirim, RN”, exhibe e discute os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho de mestrado inserido no Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG-UFRN). O trabalho é vinculado ao projeto da rede FINEP/CNPq-CT-Hidro sob título “Potencialidades e Definição de Estratégias de Manejo das Águas Subterrâneas da Região de Parnamirim, RN”.

O objetivo principal desse trabalho é caracterizar e avaliar a situação atual da qualidade das águas subterrâneas do aquífero Dunas-Barreiras na região do município de Parnamirim. Para isso, é de essencial importância a caracterização dos condicionantes hidrogeológico e hidrogeoquímicos e avaliação da qualidade das águas, englobando conhecimentos do aquífero através dos poços e aspectos do uso e das suas potencialidades. Além disso, informações referentes ao uso e ocupação do solo fora utilizadas para a identificação de setores com possíveis fontes de contaminação.

A região de estudo, a qual se estende para Sul de Parnamirim, é bastante explorada em termos de recursos hídricos subterrâneos e os estudos exploratórios existentes de caráter regional indicam para a mesma um elevado potencial hidrogeológico, com provável ocorrência de águas de boa qualidade. A água subterrânea do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras é a principal fonte de suprimento hídrico das populações da área. As águas são, geralmente, captadas através de poços tubulares ou poços escavados. Entretanto, a urbanização rápida e em grande dimensão na região, especialmente no município de Parnamirim, afeta consideravelmente os recursos hídricos existentes. A taxa de crescimento de Parnamirim vem aumentando cada vez mais, porém permanece a deficiência quanto aos sistemas de redes de esgotos, drenagem e abastecimento adequado das águas. É recorrente o uso de fossas e sumidouros na região. Além disso, a exploração das águas disponíveis vem ocorrendo de forma desordenada, sem o manejo adequado dos recursos disponíveis (MELO; ALVES & DA SILVA, 2014). Em áreas de cultivo de lavouras ocorrem sistemas de irrigação sem controle do uso de fertilizantes ou pesticidas. Essas situações podem comprometer a disponibilidade e a qualidade hídrica, levando-se em consideração que a água subterrânea fica sujeita a graves danos de contaminação caso não seja devidamente protegida da ação antropogênica (Foster, 2003; Israfilov, 2006).

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do Rio Pirangi, localizada no litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Esta bacia compreende uma superfície total de 436 km² e é formada pelos rios Pirangi, Pium e Pitimbu e pelos riachos dos Mendes, Taborda e Água Vermelha. São cursos d'água perenes, que se desenvolvem sobre os sedimentos Tercio-Quaternários do Grupo Barreiras e são alimentados por ressurgências de águas subterrâneas do aquífero formado por esses sedimentos que constitui o sistema aquífero Dunas-Barreiras. Estão inseridas na área também as lagoas do Jiqui, de Pium e a lagoa Azul. O rio Pitimbu, afluente do rio Pirangi, é o manancial cujas características ambientais e hidrológicas são as mais estudadas (Duarte *et al.*, 2004; Borges, 2002; Kabayashi *et al.*, 2010), já que o mesmo flui para a lagoa de Jiqui, cujas águas abastecem a Zona Sul da cidade de Natal.

Essas considerações dizem respeito à bacia do rio Pirangi como um todo e a sua caracterização está sendo considerada no âmbito geral deste trabalho. Entretanto, a área objeto deste trabalho abrange especificamente a região principal do município de Parnamirim e arredores, com superfície total da ordem de 370 km², onde os estudos estão sendo efetivamente realizados. Tal área está limitada no seu setor Norte pelo Rio Pitimbu e no setor Leste pelo rio Pirangi, abrangendo grande parte do município de Parnamirim e pequena parcela dos municípios de Nísia Floresta, São José de Mipibu, Macaíba e Vera Cruz (Figura 1.1). Nesses municípios, as principais atividades econômicas desenvolvidas são a agropecuária e o comércio (CPRM, 2005).

Do ponto de vista geomorfológico, dominam na área de estudo os tabuleiros costeiros com ocorrência de planícies lagunares e elevações dunares que se desenvolvem mais proeminentemente na faixa costeira. Segundo avaliação climatológica realizada por Alves (2016), o clima da área pode ser caracterizado como úmido ou, de acordo com sua eficiência térmica, como megatérmico, com verão seco e outono chuvoso. A vegetação ocorre como Florestas Subperenifólia (árvores sempre verdes, largas e adensadas, e solos recoberto por camada de húmus), vegetação da Formação Tabuleiros Litorâneos e Ecossistema Mata Atlântica protegido (CPRM, 2005).

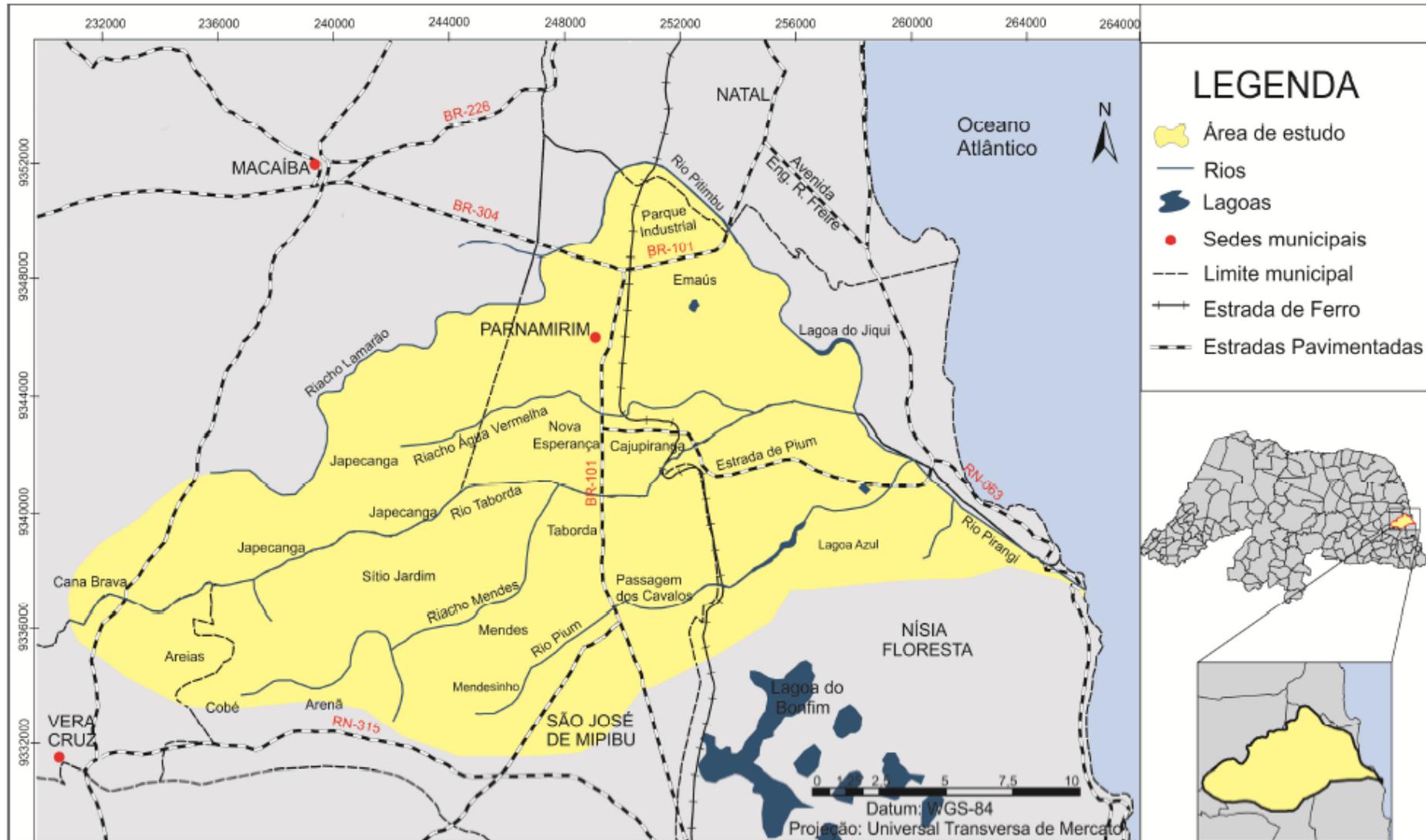


Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo, com acessos e rede hidrográfica

1.2 ATIVIDADES METODOLÓGICAS

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido adotando-se as seguintes atividades metodológicas:

a. Levantamento e análise de dados bibliográficos

Inicialmente foi realizada uma pesquisa para levantamento de dados bibliográficos existentes sobre a área, incluindo relatórios técnicos, banco e arquivo de dados, englobando fundamentalmente dados climáticos, hidrológicos, hidrogeológicos e principalmente hidroquímicos.

b. Medições em campo de parâmetros hidroquímicos indicadores da qualidade das águas subterrâneas

Visitas de campo foram realizadas em 28 poços previamente cadastrados pelo projeto vinculado, para a aquisição *in situ* de dados de parâmetros hidroquímicos nesses pontos e, conseqüentemente, atualização do cadastro existente. A seleção dos poços visitados foi realizada de modo a abranger homogeneamente a área de estudo, contemplando tanto regiões urbanizadas quanto regiões da zona rural. Os parâmetros coletados foram valores de condutividade elétrica (CE), de sólidos totais dissolvidos (STD) e de temperatura (T). Vale salientar que essa coleta de dados foi realizada em uma época considerada como “período chuvoso” na região (dentre os meses de março a agosto de 2015). Na ocasião utilizou-se o Medidor de Condutividade Portátil Modelo – TEC-4P-MP: através de uma célula de vidro e de um sensor de temperatura foram obtidos os dados, em amostras de aproximadamente 100mL de água coletadas em cada poço selecionado, conforme ilustrado na figura 1.2.

c. Elaboração e interpretação de mapas de condutividade elétrica e de sólidos totais dissolvidos

Foram elaborados mapas exibindo a distribuição dos valores coletados de condutividade e de sólidos totais dissolvidos na área de estudo, de modo a melhor interpretar os dados obtidos, possibilitando a análise do comportamento e da qualidade das águas subterrâneas em questão.

Utilizou-se o *software Arcgis 10.1* e o *software CorelDraw X6* para elaboração e aperfeiçoamento da apresentação das imagens.



Figura 1.2: Realização em campo de medidas de CE, STD e T com o Condutivímetro Portátil Modelo – TEC-4P-MP. Fonte: Aryane Assunção.

d. Elaboração de mapa de uso e ocupação do solo

Com o uso de imagens de satélite da área de interesse do trabalho, foram delimitadas regiões de prováveis usos e ocupações dos solos da Bacia hidrográfica do Rio Pirangi. De posse dessas informações prévias, foram realizadas visitas de campo por toda a área, a fim de coletar dados para confirmar e aprimorar o que fora distinguido pré-campo, diferenciando as porções que envolvem os ecossistemas de lagos e dunas, as que preservam vegetação, as que possuem cultivo de lavouras/pecuária, as áreas já urbanizadas e as áreas que possuem, no momento, grande potencial de expansão urbana (figura 1.3). A partir dos dados obtidos, tanto por observação como por informações dadas pela população, foi elaborado um mapa (na escala 1:100.000) que ilustra a distribuição do uso e ocupação da área, o qual pode auxiliar na identificação de possíveis causas para a condição da qualidade da água subterrânea em cada porção da área de estudo.

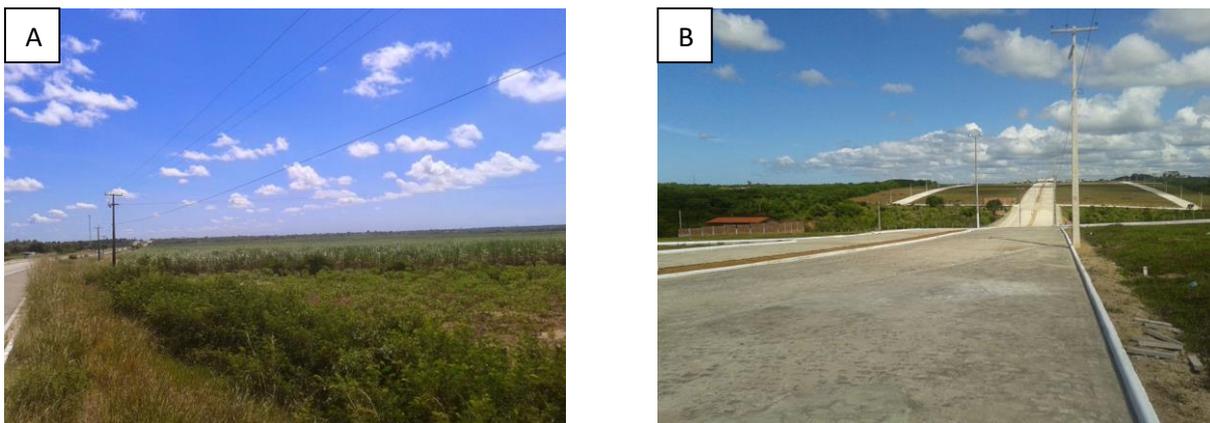


Figura 1.3: Exemplos de uso e ocupação do solo. Na foto A, área destinada a cultivo de lavoura de cana-de-açúcar; na foto B, lotes de condomínio residencial construídos, configurando uma área de expansão urbana.

Fonte: Aryane Assunção.

e. Avaliação de dados pré-existentes de análises químicas

Dados de análises químicas realizadas anteriormente, em amostras de águas subterrâneas de determinados poços da área de estudo, foram tabelados e interpretados a fim de estabelecer um conhecimento prévio sobre a composição e qualidade das águas em datas anteriores e estabelecer uma comparação com os dados coletados atualmente, no decorrer desse trabalho.

f. Coletas em campo de amostras de água para análises químicas

Foram coletadas 27 amostras de água subterrânea em poços (tanto tubulares quanto cacimbões) localizados dentro da área de estudo, a fim de submeter a análises químicas para determinação dos seguintes parâmetros: cátions principais (sódio, cálcio, magnésio e potássio) e ânions principais (cloreto, sulfato e bicarbonato), ferro, potássio, carbonato, nitrato, amônia, boro, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e dureza total. Nessa etapa, os poços amostrados foram selecionados a partir dos poços cadastrados, dos analisados anteriormente e de acordo com a disponibilidade de acesso naquele momento, na intenção de permanecer abrangendo homoganeamente toda a área de estudo.

As amostras foram coletadas nas descargas de água dos poços operantes ou com o auxílio de um *bayler*, nos pontos que não dispunham de dispositivos de bombeamento. Foram acondicionadas em garrafas apropriadas, acomodadas em caixa de isopor com gelo e procurou-se encaminhá-las ao laboratório de análise no mesmo dia da coleta, seguindo assim as normas

padronizadas para coleta, preservação e transporte de amostras, de modo a ter maior segurança em sua preservação, para que apresentassem a melhor representatividade das condições naturais de ocorrência da água subterrânea. As temperaturas das amostras foram medidas no momento das coletas.

g. Avaliação hidrogeoquímica e interpretação dos dados de análises químicas coletados

A situação atual das águas subterrâneas foi avaliada mediante a utilização dos dados hidrogeoquímicos. Inicialmente, os resultados das análises químicas foram submetidos a um balanço de massas entre cátions e ânions, como forma de verificação da confiabilidade das análises laboratoriais. Na sequência, a avaliação hidrogeoquímica seguiu com a observação do comportamento de cada parâmetro, de acordo com um agrupamento das amostras em “subáreas”, segundo as características individuais identificadas em cada uma até então. Os dados numéricos foram processados e interpretados com o auxílio do *software Excel*. A etapa seguinte consistiu na elaboração e interpretação dos resultados das análises químicas utilizando os diagramas de Piper e Durov Expandido, os quais foram construídos com o uso do *software AQUAQUEM 3.70*. Através desses diagramas foi realizada também a classificação hidroquímica dos tipos de águas existentes na área. Através do *software Arcgis 10.1*, mapas hidroquímicos foram elaborados e interpretados, de modo a observar como as concentrações dos parâmetros hidroquímicos se distribuem ao longo da área de estudo. Foi realizada uma avaliação da influência dos diversos tipos de uso e ocupação de solo sobre a qualidade das águas de cada subárea. Além disso, o padrão de potabilidade das águas subterrâneas foi avaliado para possíveis utilizações: consumo humano, uso em irrigação e uso industrial. Todas essas avaliações, em conjunto com as informações das demais etapas do trabalho, contribuíram para a caracterização das águas subterrâneas da área de estudo, reconhecendo onde, quanto e através do que as águas se apresentam contaminadas ou não.

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO

Segundo a bibliografia existente, na região costeira do Estado do Rio Grande do Norte podem ser definidas duas províncias sedimentares: Província Sedimentar da Bacia Potiguar e Província Sedimentar da Bacia Costeira PE/PB/RN.

Mabesoone *et al.*, (1991) realizaram uma revisão detalhada e sistemática da faixa sedimentar costeira, que abrange o trecho compreendido entre Natal/RN e o extremo Sul do Estado de Pernambuco. Atualmente, Pessoa Neto *et al.* (2007) e Córdoba *et al.* (2007) consideram a Falha de João Câmara, no Alto de Touros, o limite leste da Bacia Potiguar. Enquanto isso, segundo SERHID (1998), o trecho compreendido entre o Alto de Touros e o Alto de Mamanguape é admitido como zona de transição entre as bacias Potiguar e Costeira.

As unidades geológicas existentes na região, da base para o topo, podem ser identificadas como:

- Embasamento cristalino Pré-Cambriano;
- Arenitos e carbonatos Cretáceos do domínio da Bacia Costeira PE/PB/RN;
- Rochas Terciário-Quaternárias da Formação Barreiras;
- Coberturas Cenozóicas.

O embasamento cristalino é composto principalmente por granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses correlatos às rochas do Complexo Caicó (Bezerra *et al.*, 1993 *apud* Lucena, 2005; CPRM, 2006).

A sequência seguinte corresponde às rochas sedimentares Cretáceas, sendo representadas por arenitos (basal) e carbonatos (topo) com intercalações areníticas, repousando em discordância com o embasamento cristalino (Costa, 1971 *apud* Lucena *et al.*, 2006; Costa & Salim, 1972). Existem duas possibilidades, com base na estratigrafia, para a classificação dessas unidades cretáceas. A primeira é a de que esses sedimentos estão inseridos no Grupo Apodi da Bacia Potiguar, nas formações Açú (arenitos) e Jandaíra (calcários). A segunda é de que eles estão inseridos no Grupo Paraíba da Bacia Costeira Pernambuco-Paraíba, nas formações Beberibe (arenitos) e Gramame-Maria Farinha (calcários). Segundo estudos com análises de dados gravimétricos, sondagens elétricas, perfis de poços e correlações lito estratigráficas disponíveis na bibliografia (Lucena, 2005), a segunda possibilidade é de maior aceitação. Segundo Contege (1970 *apud* Lucena, 2005), o limite entre as duas bacias ocorre através de interdigitação entre os calcários Jandaíra e os arenitos Beberibe na região de Natal,

ou de natureza estrutural, a partir do controle exercido por falhamentos associados ao Graben Natal (Feitosa, 1997).

A Bacia Costeira PE/PB/RN, de idade Cretácea, é interpretada por Asmus (1975 *apud* Furrier, 2006) como sendo resultado final da evolução tectono-sedimentar das bacias marginais, onde a contínua subsidência da margem continental originou um espaçamento vertical e um avanço progradacional dos sedimentos.

Este trabalho adota o modelo evolutivo proposto por Bertani *et al.*, (1990), o qual é composto por três unidades básicas: grábens, altos internos e plataformas do embasamento. Essas unidades apresentam-se preenchidas por sequências sedimentares cretáceas a terciárias, distintas para cada compartimento morfo-estrutural.

As rochas sedimentares de idade Terciária-Quaternária da Formação Barreiras juntamente com as coberturas Cenozóicas serão descritos detalhadamente a seguir.

2.1 Unidades Litoestratigráficas

As unidades litoestratigráficas que afloram na área são as descritas a seguir (figura 2.1) e espacialmente representadas no mapa geológico da figura 2.2:

- Complexo Presidente Juscelino

Este complexo constitui a principal unidade litoestratigráfica do núcleo arqueano, conforme definição de Dantas *et al.*, (2004 *apud* Angelim *et al.*, 2006), e ocorre no trecho da BR-226 entre os municípios de Macaíba, Serra Caiada e Tangará. Os litotipos identificados constituem rochas de coloração cinza e esbranquiçada, granulação média a grossa, equigranular e bandamento milimétrico. De acordo com o grau de migmatização, o complexo foi dividido em duas unidades litoestratigráficas: unidade de Ortognaisse e unidade de Migmatito. Na área de estudo, porém, a unidade de Migmatito aflora no setor oeste da área (Angelim *et al.*, 2006).

- Formação Barreiras

As rochas da Formação Barreiras ocorrem ao longo de toda a faixa litorânea brasileira, desde o Estado do Rio de Janeiro até o Pará. Essa unidade está sobreposta discordantemente aos arenitos e calcários Mesozóicos. Segundo a bibliografia (Mabesoone *et al.*, 1977; IPT, 1982), essa formação é composta por arenitos de granulometria fina a grossa, por vezes

conglomerático e com intercalações silto-argilosas ou argilo-arenosas, além de observada a grande ocorrência de material altamente ferruginoso.

Ocorre uma grande variação lateral de fácies nas rochas do Barreiras, tanto vertical como horizontalmente. Na base, apresentam-se arenitos com granulometria grossa, por vezes conglomeráticos, de coloração avermelhada em virtude da presença de argila ferruginosa; e, em direção ao topo, os arenitos apresentam-se com granulometria fina, por vezes com intercalações silto-argilosas ou argilo-arenosas e com coloração variada (esbranquiçada, amarelada e avermelhada), podendo exibir ainda argilas caulínicas resultantes da alteração de feldspatos (SERHID, 1998). Na área de estudo, a Formação Barreiras ocupa a maior parte do território, sotoposta em alguns locais pelos sedimentos Quaternários.

- Sedimentos Quaternários

Os sedimentos quaternários são os que capeiam os litotipos da Formação Barreiras. Na área de estudo são identificados os depósitos eólicos litorâneos de paleodunas, os depósitos colúvio-eluviais e os depósitos aluvionares, os quais estão descritos a seguir:

Depósitos Eólicos Litorâneos de Paleodunas

Esses depósitos são constituídos por areias bem selecionadas, quartzosas, com granulometria variando de fina à média e coloração esbranquiçada, as quais se acumulam a partir da ação do vento (ANA, 2012). Os grãos são subangulosos a arredondados e podem ser foscos ou polidos. Apresentam-se geralmente em direção preferencial SE-NW, tendo em vista a direção predominante dos ventos na maior parte do ano. Na área de estudo desse trabalho ocorrem paleodunas em porção da região leste e, em menor proporção, na porção superior. No caso, os sedimentos não são tão bem selecionados quanto nas dunas de idade recentes.

Depósitos Colúvio-Eluviais

São depósitos de pouco a não estratificados, constituídos de sedimentos arenosos ou areno-argilosos esbranquiçados ou avermelhados, algumas vezes constituindo depósitos conglomeráticos com seixos de quartzo predominantes (Angelim *et al.*, 2006). Os colúvios são característicos por sofrerem ação gravitacional alojando-se próximo e/ou na base das encostas. Os sedimentos que formam os depósitos eluviais, por sua vez, são retrabalhados ou resultam de ação intempérica.

Depósitos Aluvionares

Os depósitos aluvionares ocorrem ao longo dos vales dos rios, acompanhando o sistema de drenagem da área. Litologicamente são constituídos por sedimentos arenosos e argiloarenosos com níveis irregulares de cascalhos, formando depósitos de canal, de barras de canal e de planície de inundação (Angelim *et al.*, 2006).

CRONOESTRATIGRAFIA		GRUPO	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS
Cenozóico	Quaternário		Depósitos Eólicos Litorâneos de Paleodunas
			Depósitos Aluvionares
			Depósitos Colúvio-Eluviais
	Terciário	Grupo Barreiras	Formação Macaíba
			Formação Guararapes
			Formação Serra do Martins
Mesozóico	Cretáceo	Grupo Apodi ou Grupo Paraíba	Fm. Açu (Ka) + Fm. Jandaíra (Kj) ou Fm. Beberibe + Fm. Gramame/Maria-Farinha
Proterozóico/Arqueano			Embasamento Cristalino (Presidente Juscelino)

Figura 2.1: Coluna litoestratigráfica com as unidades ocorrentes na área de estudo. Fonte: Alves (2015).

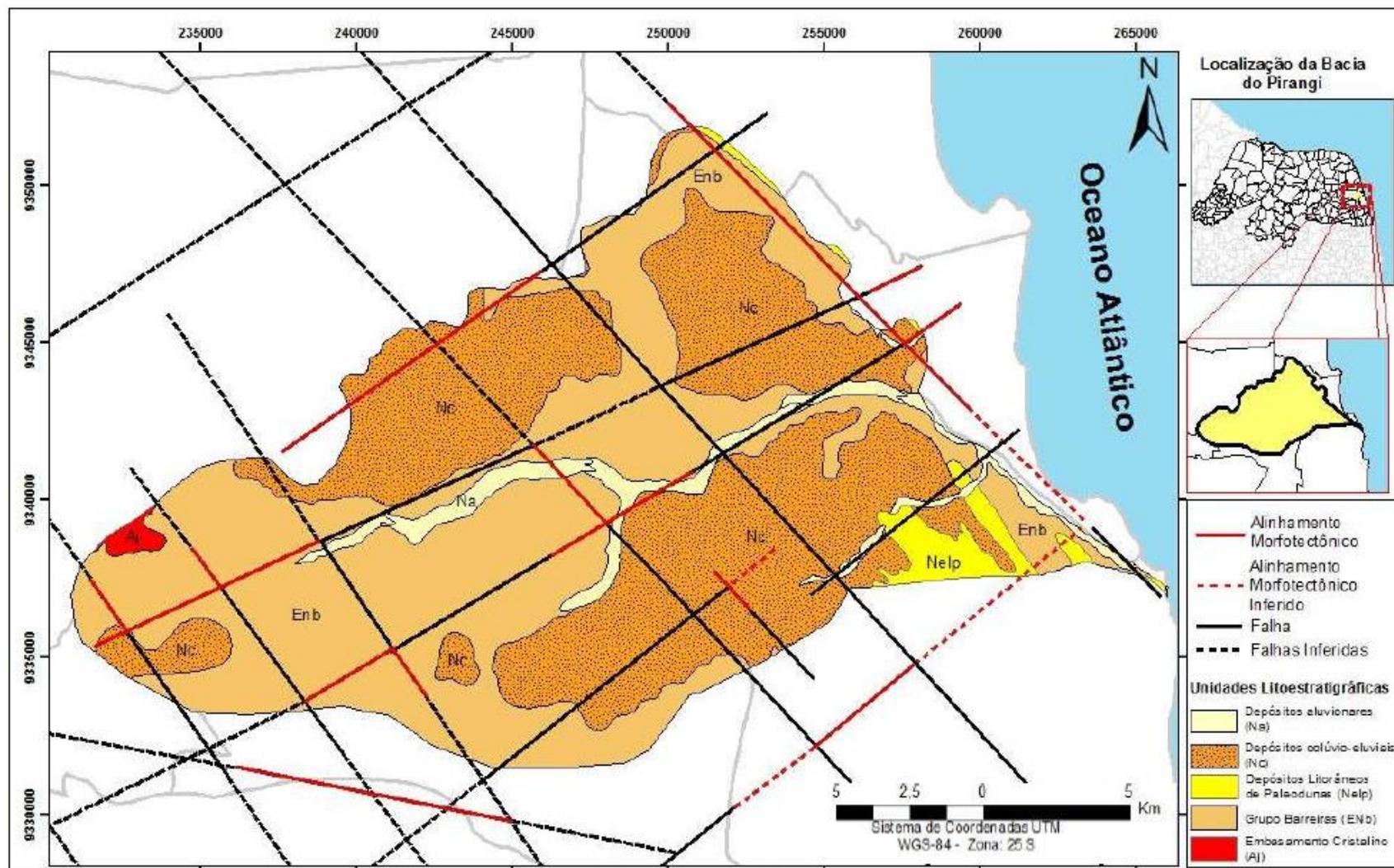


Figura 2.2: Mapa geológico simplificado contendo unidades litoestratigráficas, alinhamentos morfotectônicos e falhas geológicas ocorrentes na área de estudo.

Fonte: Alves (2015).

2.2 Contexto Tectono-Estrutural da Região

A Bacia Costeira desenvolveu-se inicialmente durante o Cretáceo, e a tectônica atuante durante toda a evolução das bacias gerou um forte controle na geometria e na deposição dos sedimentos, desde a sua ativação no Cretáceo até o Quaternário (Matos, 1987; SERHID 1998; Lucena, 1999; Bezerra *et al.*, 2001; Nogueira *et al.*, 2006). Essa tectônica está associada principalmente ao Sistema de Rifts no Nordeste Brasileiro, que é geneticamente ligado à abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior. Enquanto isso, o desenvolvimento dos falhamentos ocorre preferencialmente sob as descontinuidades pré-existentes no embasamento cristalino (Matos, 1987).

De acordo com Bezerra *et al.*, (2001), podem ser reconhecidas três principais direções de conjuntos de falhas na área, sendo elas: 040-060° NE; 300-320° NW; e 350-010° N. As direções NE e NW predominam, além de apresentarem relações sistemáticas transversais.

ANA (2012) descreve que esses falhamentos ocorreram em três eventos deformacionais: o primeiro evento, no estágio *rift*, consistiu em uma deformação distensional na direção NW-SE, gerando falhas normais de direção NE, as quais afetam o embasamento cristalino e sedimentos mais antigos; o segundo evento ocorreu no pós-rift, também apresentando caráter distensional e distinguindo as unidades mais novas com falhas de direção NE-ENE na sub-bacia Paraíba; o terceiro e último evento deformacional envolveu distensão longitudinal às bacias, na direção N-S a NNE, resultando em falhas normais E-W a ENE ou oblíquas NE a NW, o que pode ser relacionado ao campo de tensões em escala continental que afeta a Placa Sul-Americana desde o Cretáceo Superior (Córdoba *et al.*, 2007). Dois outros eventos posteriores na sub-bacia Paraíba teriam conduzido uma compartimentação tectônica controlada por falhas nas direções NW-SE e NE-SW. Um teria ocorrido antes e o outro após a deposição das rochas da Formação Barreiras (Bezerra *et al.* 2001; Nogueira *et al.* 2006).

O principal limite entre a Formação Barreiras e os depósitos quaternários é dado pelas falhas. Os falhamentos que atingiram as unidades estratigráficas ocorreram a profundidades muito rasas (Bezerra *et al.*, 2001). Com isso, tem-se que o padrão de drenagem e a morfologia aluvial são fortemente controlados por falhamentos geológicos.

Além disso, as lagoas inseridas nesta região tem sua origem relacionada a interseção de falhamentos com direções variadas. A Lagoa do Pium está disposta na direção preferencial SW-NE. Já a Lagoa do Jiqui segue na direção NW-SE (assim como o Rio Pitimbu). É acentuada a presença de vales úmidos encaixados localmente, como também a ocorrência de drenagens no

fundo desses vales. O controle dos principais vales da região e a disposição das unidades estratigráficas quaternárias em direções preferenciais se faz devido a essa compartimentação estrutural impressa na área (Lucena, 2005).

CAPÍTULO 3 - O SISTEMA AQUÍFERO DUNAS-BARRREIRAS

Segundo IPT (1982), Melo (2009) e ANA (2012), o Aquífero Dunas-Barreiras é a unidade mais importante na área de interesse do presente estudo, devido sua alta potencialidade hídrica, sua facilidade de captação de água e a excelente qualidade da mesma em sua condição natural. Se estende por toda a faixa leste da costa do Rio Grande do Norte e é a principal fonte de suprimento hídrico com água potável utilizada no abastecimento de populações urbanas e rurais, no desenvolvimento de culturas irrigadas e no desenvolvimento industrial (ANA, 2012).

O Aquífero Dunas-Barreiras apresenta um caráter poroso intersticial e é constituído por rochas sedimentares Terciária-Quaternária depositadas sobre arenitos e calcários Mesozóicos e sobrepostas por sedimentos recentes. Rochas carbonáticas cretáceas não aflorantes correspondem ao topo do limite inferior da unidade aquífera aqui descrita, comportando-se como *aquitard*, devido suas características hidrodinâmicas (IPT, 1982; Melo, 1995; SERHID, 1998).

Com geometria tabular, seus estratos dispõem-se horizontalizados e com espessuras variadas. Em escala regional (SERHID, 1998), a litologia é constituída por arenitos finos a grossos, com níveis conglomeráticos e intercalações de siltitos e argilitos, o que desencadeia grandes variações de fácies lateral e verticalmente no aquífero Dunas-Barreiras. Essa característica do aquífero ocorre devido o controle tectono-estrutural presente na área e influenciam na recarga e no armazenamento das águas subterrâneas.

A variação da espessura do Aquífero Dunas-Barreiras, por sua vez, é fortemente controlada pela compartimentação estrutural, contando com a presença de *grabens* e *horsts*. A Formação Barreiras, onde ocorre o aquífero, tem espessura de até 80 m em blocos rebaixados e de 20 a 30 m em blocos soerguidos, provavelmente devido a falhamentos sin-sedimentar e erosões (Bezerra et al., 2001). Este aquífero é reconhecido como livre a semiconfinado, a depender da presença de camadas semiconfinantes de baixa permeabilidade, ocorrentes na porção superior da camada aquífera e que definem algum confinamento aos estratos inferiores do aquífero.

A denominação Sistema Aquífero Dunas-Barreiras foi designada de modo a estabelecer que as unidades Dunas e Barreiras compõem um único sistema hidráulico. Assim, as dunas realizam a transferência das águas da chuva que percolam verticalmente, a fim de favorecer a recarga e a renovação das águas do aquífero Barreiras, localizado subjacente ao primeiro. Esse mecanismo ocorre principalmente quando a interface Dunas-Barreiras não apresenta características de confinamento, mantendo o sistema livre. Se ocorrer a presença de *aquitard*,

o Barreiras é classificado como semiconfinado, porém as dunas ainda podem alimentá-lo na direção vertical descendente, pois geralmente as dunas apresentam maior carga potenciométrica que o Barreiras, o que favorece tal processo (Alves, 2016).

3.1 Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras (SAB)

Os parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero são fundamentais nas avaliações dos recursos hídricos subterrâneos de uma determinada região. Estes parâmetros correspondem fundamentalmente a condutividade hidráulica (K), transmissividade do aquífero (T), coeficiente de armazenamento e/ou porosidade específica (μ), que são avaliados a partir da interpretação de resultados de testes de aquífero.

Os parâmetros hidrodinâmicos são avaliados a partir da análise de dados de testes de bombeamento de poços no aquífero, com a obtenção de informações sobre o rebaixamento do nível potenciométrico durante a operação.

A partir de testes de bombeamento, estudos publicados anteriormente apresentam resultados coerentes entre si dos parâmetros hidrodinâmicos na área, os quais são indicadores de alta potencialidade do aquífero, conforme vistos no comparativo da tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em estudos anteriores. Fonte: Alves (2016).

Parâmetros	Lucena (2005)	Melo (2008)	Alves (2015)
T (m ² /s)	5,18x10 ⁻² e 1,53x10 ⁻³	3,92x10 ⁻³ a 4,98x10 ⁻³ m ² /s	5,9x10 ⁻³
K (m/s)	-	1,03x10 ⁻⁶ a 3,11x10 ⁻⁴ m/s	2,82x10 ⁻⁴
K' (m/s)	-	2,0x10 ⁻⁸ m/s	-
μ	1,14x10 ⁻⁶ e 5,28x10 ⁻¹	1,48x10 ⁻⁴	0,15

Outra caracterização importante a ser citada é a das espessuras do SAB, realizada a partir da avaliação de perfis litológicos existentes no banco de dados do estudo ao qual pertence o presente trabalho. Essa avaliação indica que a espessura da Formação Barreiras, onde ocorre o citado aquífero, varia de 29 a 95 m de profundidade (com média de 57,7 m). A espessura saturada (desconsiderando os níveis argilosos), por sua vez, varia de 15,47 a 56,5 m (média de 32,45 m).

3.2 Cadastro de poços e uso de suas águas

O cadastramento de pontos d'água utilizado nesse trabalho foi realizado no período de maio a junho de 2014, associando informações coletadas em campo com dados de poços fornecidos pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e pelo Departamento de Geologia da UFRN (DG-UFRN). Dessa forma, foram cadastrados 268 poços (localizados na figura 3.1), dentre particulares e pertencentes ao sistema público de abastecimento, serviço realizado pela CAERN.

Dos poços particulares, apenas 36 foram cadastrados como poços escavados, enquanto que 140 como poços tubulares. Suas profundidades variam entre 2,26 m (cacimbão no município de Macaíba) a 100 m (poço tubular no município de Parnamirim), com média de nível estático de 15,78 m. Segundo informações obtidas através dos locais, a vazão média dos poços é de 10 m³/h, operando em regime de 6/24h. Dessa forma, foi calculado um volume total de água bombeada de cerca de 3,0x10⁶ m³/ano.

Dentre os 92 poços cadastrados operados pela CAERN, 18 estão desativados, devido a insuficiência de vazão de água. A profundidade média dos 74 poços atualmente em funcionamento é de 57,6 m, e o nível estático médio equivale a 20,04 m. A vazão varia de 20 a 105 m³/h e funcionam em regime de 24/24h. a capacidade de produção total é então estimada em 30,5x10⁶ m³/ano.

Com os dados citados acima, avalia-se que é explorado do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras um volume de 33,5x10⁶ m³/ano, incluindo os poços públicos e particulares.

Quanto ao uso das águas captadas pelos poços particulares, foi observado que mais da metade é destinada ao uso doméstico, conforme ilustra o gráfico na figura 3.2. Do restante, 20% é para uso misto (uso doméstico e irrigação ou uso doméstico e industrial), 10% para uso exclusivamente industrial e 10% para uso exclusivamente em irrigação e a menor proporção cotada foi a da água destinada para uso com os animais (2%).

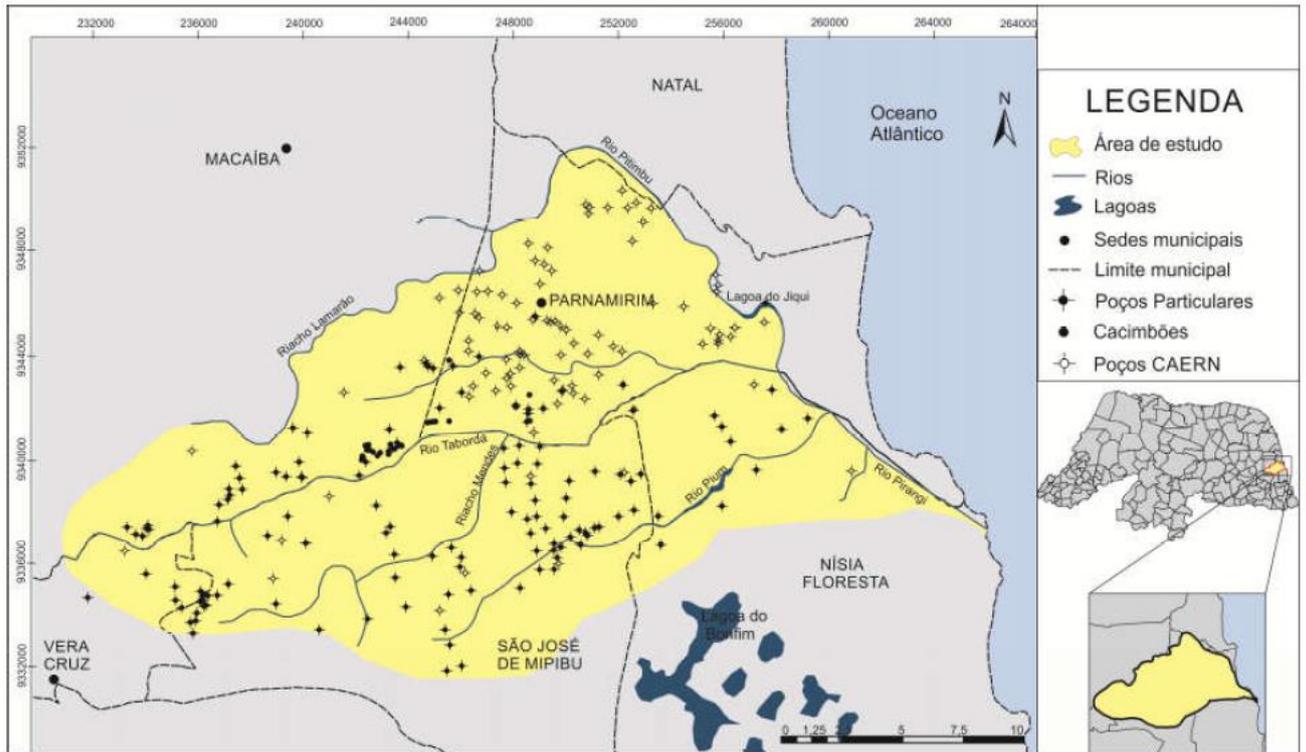


Figura 3.1: Mapa de localização dos pontos d'água cadastrados, incluindo os poços particulares e os operados pela CAERN.

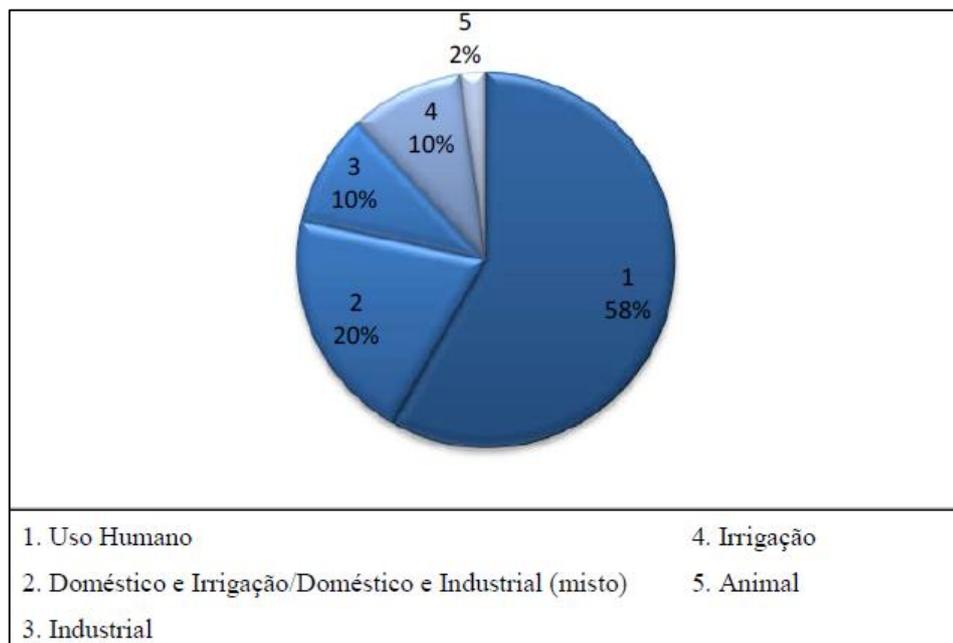


Figura 3.2: Distribuição do uso das águas nos poços particulares cadastrados.

3.3 Potenciometria e fluxo subterrâneo

O mapa potenciométrico da área, desenvolvido por Alves (2016), foi elaborado com informações coletadas pelo projeto “Potencialidades e Definição de Estratégias de Manejo das Águas Subterrâneas da Região de Parnamirim, RN”, referentes ao conhecimento das cargas hidráulicas dos pontos d’água que constituem a rede de monitoramento, relevo, disposição da rede de drenagem superficial e a concepção de um sistema aquífero livre. As cargas potenciométricas dos poços foram obtidas com o conhecimento da profundidade do nível das águas dos mesmos em condições de equilíbrio (nível estático), correlacionando com as correspondentes cotas topográficas do terreno.

Nota-se no mapa (figura 3.3) que o fluxo ocorre primordialmente de oeste para leste e que próximo a linha de costa o fluxo é sempre em direção ao Oceano Atlântico, principal ponto de escoamento da região. Ao observar as linhas equipotenciais, tem-se também que o fluxo das águas em direção aos rios presentes sugere uma condição de efluência desses corpos d’água em relação ao Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, ou seja, eles são alimentados por água subterrânea.

As regiões de dunas e dos tabuleiros costeiros configuram as zonas de recarga, enquanto que os vales dos rios e as lagoas compõem as zonas de descarga da água subterrânea do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, ou seja, essas águas alimentam os rios e lagoas perenes que ocorrem na área, conforme MELO (1995). Em determinadas situações, o comportamento do fluxo subterrâneo pode sofrer alterações pontuais, devido o bombeamento dos poços tubulares.

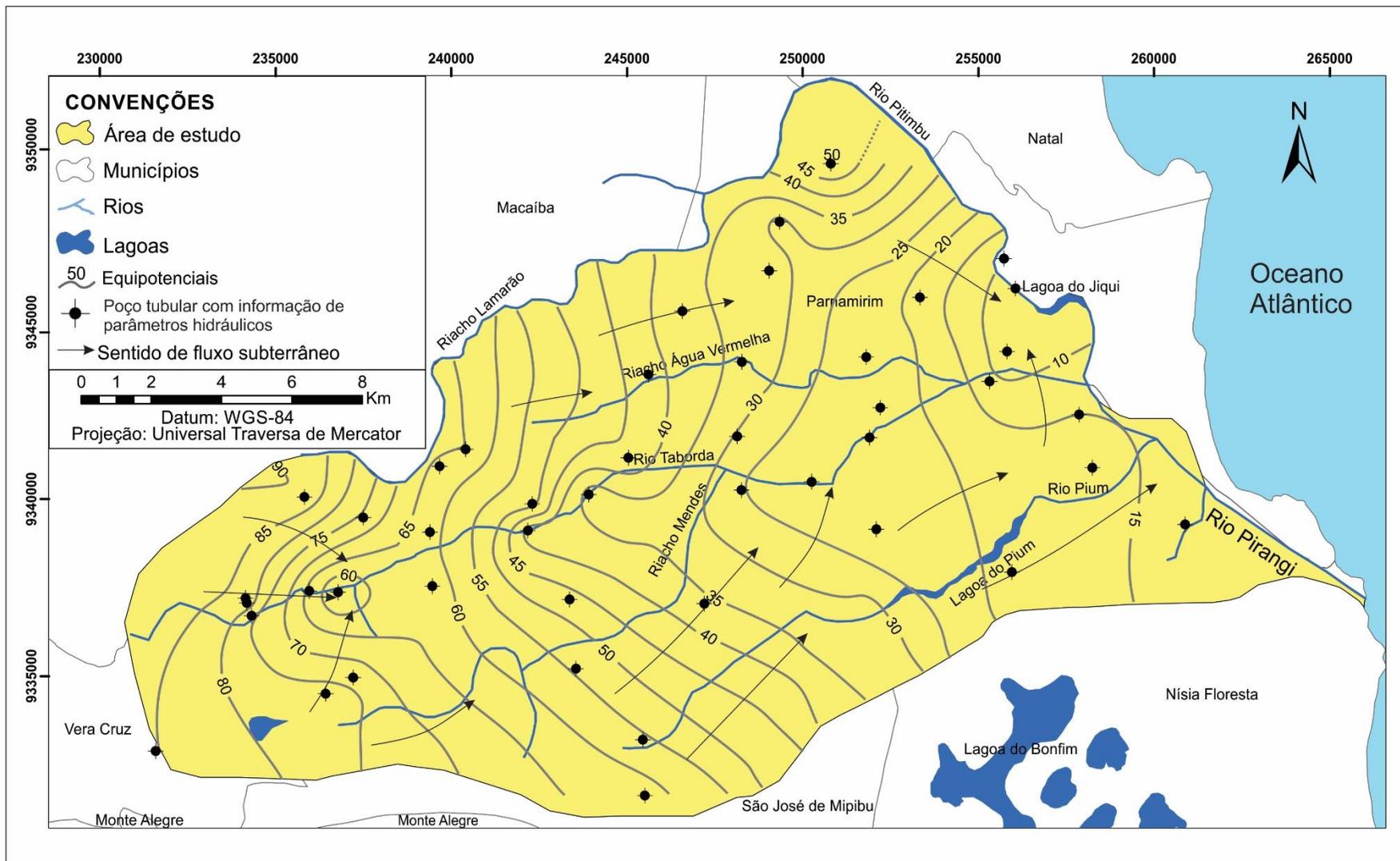


Figura 3.3: Mapa potenciométrico e de fluxo subterrâneo do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras. Fonte: Alves (2015).

CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Importância, qualidade e contaminação das águas subterrâneas

A água representa um dos componentes essenciais para a manutenção da vida, e os recursos hídricos são fundamentais para diversas atividades humanas. Historicamente a presença ou ausência de água determina a ocupação de territórios e o futuro de gerações.

A água cobre grande parte da superfície da Terra, no entanto, apenas cerca de 2,5% são de água doce, o equivalente a 8,5 milhões de quilômetros cúbicos de água doce, na forma líquida. Desses, 98,5% são de água subterrânea, totalizando $60,0 \times 10^6$ km³, os quais representam uma reserva estratégica, especialmente em momentos de falta de chuvas e de escassez de água superficial.

Além da determinação do volume de água subterrânea existente, a avaliação de sua qualidade merece enfoque. Diversas atividades humanas afetam a qualidade e a potabilidade das águas, especialmente quando desenvolvidas em áreas onde as águas subterrâneas estão em condições de maior vulnerabilidade à contaminação, representando assim uma grande ameaça à sua qualidade. Por consequência, coloca-se em risco a conservação da biodiversidade, o equilíbrio dos ecossistemas e a sobrevivência da espécie humana.

Até a década de 70, acreditava-se que as águas subterrâneas estavam naturalmente protegidas da contaminação vinda da superfície, devido à sobreposição de camadas de solo e rochas. Todavia, com o passar dos anos, passaram a ser detectados traços da presença de contaminantes em águas subterrâneas, e diversos estudos têm sido conduzidos a fim de avaliar a sua segurança. Atualmente sabe-se que vários fatores podem comprometer sua qualidade. O destino final do esgoto doméstico e industrial em fossas e tanques sépticos, a disposição inadequada de resíduos sólidos tanto urbanos quanto industriais, a má distribuição do sistema de esgoto, a presença de postos de combustíveis e a modernização da agricultura são exemplos de fontes de contaminação das águas subterrâneas por bactérias e vírus patogênicos, parasitas e substâncias orgânicas e inorgânicas (SILVA & ARAÚJO 2003).

Sabendo-se disso, identificar as áreas com maior vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação torna-se tarefa imprescindível para o planejamento e controle de atividades humanas no espaço geográfico, assim como para a elaboração e aplicação de medidas mitigadoras dos seus possíveis impactos causados nas águas subterrâneas.

4.2 Parâmetros fundamentais de reconhecimento da qualidade das águas

4.2.1 Condutividade elétrica

O parâmetro de condutividade elétrica de uma água refere-se à facilidade ou dificuldade de condução de eletricidade da água. A concentração de compostos orgânicos e inorgânicos na água interfere em sua condutividade, tendo em vista que os sais dissolvidos e ionizados presentes na água transformam-na num eletrólito capaz de conduzir a corrente elétrica. Dada essa relação de proporcionalidade entre teor de sais dissolvidos e condutividade elétrica, é possível realizar uma avaliação da salinidade ocorrente a partir da medida de condutividade de uma água e, conseqüentemente, analisar a qualidade da mesma.

Sabe-se que a condutividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura, o que torna essencial para a medida a certa representação da temperatura, ou mesmo uma correção dos valores de condutividade para uma temperatura estabelecida como padrão.

A unidade padrão de medida da condutividade pelo Sistema Internacional de Medidas é o Siemens (S) e a ordem de grandeza dos valores para as águas subterrâneas correspondem ao milionésimo do S/cm, ou seja, $\mu\text{S/cm}$, quando a uma temperatura padrão de 25°C.

4.2.2 Sólidos totais dissolvidos

As características químicas das águas subterrâneas apresentam determinada relação com os tipos de rochas por onde elas percolam, refletindo a composição dessas rochas e das substâncias provindas das atividades humanas desenvolvidas. Desse modo, as impurezas existentes na água são referentes aos sólidos incorporados ao seu meio. Para a caracterização química da água, então, se faz muito importante a análise de tais sólidos presentes. A determinação da quantidade total de sólidos presentes em uma amostra de água é chamada de sólidos totais dissolvidos (STD) (SANTOS; FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000). Íons como sódio, cloreto, magnésio, potássio e sulfatos aparecem nas águas naturais em decorrência da dissolução de minerais. Fisicamente, os sólidos dissolvidos em uma água são classificados segundo suas dimensões: sólidos totais dissolvidos possuem dimensões inferiores a 2,0 μm , e os sólidos em suspensão apresentam dimensões superiores a 2,0 μm (LIMA *et al.*, 2012). No presente trabalho mediram-se os teores de sólidos totais dissolvidos nas amostras.

Sabendo-se que a boa qualidade das águas é fator indispensável para a saúde e o bem estar humano, utiliza-se o teor de STD como um dos parâmetros para avaliar a qualidade de uma água subterrânea (SANTOS; FEITOSA e FILHO, 2000). Os sólidos dissolvidos na água indicam, portanto, a presença de sais, ácidos minerais e outros contaminantes que, ao serem integrados ao curso hídrico, possivelmente aumentam a demanda química e bioquímica de oxigênio nas águas, levando à perda de oxigênio dissolvido no meio. Além disso, os sólidos totais dissolvidos podem indicar a carga de substâncias poluentes injetadas no curso de água.

A condutividade elétrica e o teor de STD são valores que se relacionam empiricamente (TANJI *et al.*, 2007), tendo sido proposta uma equação para que se possa estimar um parâmetro em função do outro:

$$\text{STD (mg/L)} = k_e * \text{CE } (\mu\text{S/cm}),$$

onde k_e equivale a um coeficiente que pode variar de 0,5 a 0,8, calculado especificamente para cada área de estudo.

Segundo Fetter (1994), os valores de concentração de STD classificam as águas subterrâneas como doces, salobras, salinas ou salmouras, da seguinte forma: águas doces apresentam de 0 a 1.000 mg/L, águas salobras contêm de 1.000 a 10.000 mg/L, as salinas de 10.000 a 1000.000 mg/L e as salmouras apresentam concentrações com valores acima de 100.000 mg/L. A água com excessivo teor de sólidos totais dissolvidos apresenta limitações em sua viabilidade de uso. Uma água apresentando teor de STD acima de 1.000 mg/L, por exemplo, é inadequada para consumo humano, podendo até mesmo apresentar comportamento corrosivo e abrasivo (SILVA JÚNIOR, 1999). A portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde do Brasil estabelece o valor máximo permitido de 1.000 mg/L para STD na água potável para consumo humano. Esse valor é o mesmo que o valor estabelecido pelo padrão de potabilidade da Organização Mundial de Saúde (BRASIL, 2004).

4.2.3 Elementos químicos dissolvidos

A água é uma substância quimicamente muito ativa, que reage com o meio pelo qual percola, incorporando substâncias orgânicas e inorgânicas. Assim, os principais constituintes presentes nas águas de forma natural resultam de processos físicos e químicos de intemperismo de rochas. O intemperismo físico está associado à fragmentação das rochas. O intemperismo químico, por sua vez, envolve processos de alteração mineral através de reações de hidratação, dissolução, precipitação, oxi-redução, etc (Faust & Aly, 1981), as quais originam minerais secundários e liberam íons solúveis que são incorporados à água.

Nas águas subterrâneas, os solutos e suas concentrações dependem dos litotipos dos aquíferos, das alterações minerais, do fluxo subterrâneo e taxa de recarga do aquífero. Já as reações químicas de alteração mineral dependem do tempo de contato água/rocha, da temperatura, do CO₂ disponível e da presença de ácidos inorgânicos e orgânicos.

A composição física e química das águas subterrâneas caracteriza a mobilidade e solubilidade dos elementos envolvidos nos processos intempéricos (Drever, 1997). Sabe-se que os cátions Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ são móveis e tendem a ser liberados facilmente por intemperismo, que o K⁺ é intermediário e que Al³⁺ e Fe³⁺ apresentam menor mobilidade, tendendo a permanecer no solo. Desta forma, plagioclásios podem ser fontes de Na⁺ e Ca²⁺ para o ambiente aquático, enquanto que biotita e feldspato potássico podem ser fontes de Mg²⁺ e K⁺, por exemplo.

A ocorrência de elementos químicos dissolvidos nas águas subterrâneas depende também de fatores externos ao meio percolado, como o clima (Drever, 1997). As águas pluviométricas, por exemplo, podem promover a concentração ou a diluição dos constituintes iônicos das águas subterrâneas. Além disso, a composição natural das águas superficiais também é controlada por inúmeros processos naturais, como os geológicos e pedológicos, químicos, geomorfológicos e biológicos.

Essas características naturais das águas podem ser alteradas em função do uso e ocupação do meio físico. A disposição inadequada de resíduos domésticos, efluentes industriais, a utilização de pesticidas e fertilizantes, entre outras intervenções antropogênicas, constituem as principais fontes de poluição e/ou contaminação dos recursos hídricos. Uma forma de avaliar a composição natural e a verificação de indícios de poluição ou contaminação

das águas é por meio de análises de elementos químicos dissolvidos, o que é fundamental para o estudo de determinação da qualidade das águas e da sua adequabilidade em função dos seus possíveis usos.

Os principais parâmetros químicos dissolvidos nas águas subterrâneas que são monitorados para avaliar sua qualidade são:

- Sódio (Na^+): O sódio possui solubilidade elevada e difícil precipitação, e sua origem se deve principalmente devido ao intemperismo de determinados silicatos e lixiviação de sedimentos. Sua presença em quantidades elevadas atribui sabor salgado às águas e em concentrações elevadas podem ser prejudicial a agricultura, pois pode reduzir a permeabilidade do solo. As mais altas concentrações de sódio ocorrem em associação com íons Cl^- . Nas águas subterrâneas, o teor de sódio varia entre 0,1 mg/L e 100 mg/L, podendo ocorrer um enriquecimento gradativo a partir das zonas de recarga do aquífero em direção as suas porções mais confinadas ou dos exutórios.
- Cálcio (Ca^{2+}): além de ser um dos principais constituintes das águas subterrâneas naturais, o cálcio é um dos principais elementos responsáveis pela dureza nas águas. Geralmente apresenta-se em teores variando de 10 mg/L a 100 mg/L. Possui solubilidade de moderada a alta e geralmente apresenta-se sob a forma de bicarbonato e mais raramente como carbonato. Ocorre sobretudo nos minerais calcita, aragonita e dolomita, em rochas calcárias, sendo o plagioclásio e a apatita as maiores fontes de cálcio das rochas ígneas para as águas subterrâneas.
- Magnésio (Mg^{2+}): apresenta propriedades similares ao cálcio, entretanto é mais solúvel e mais difícil de precipitar. Sua ocorrência provem principalmente da dissolução de calcários dolomíticos e de silicatos magnesianos. Nas águas subterrâneas ocorre com teores entre 1 mg/L e 40 mg/L. O magnésio, depois do cálcio, é o principal responsável pela dureza das águas. Quando em excesso nas águas, gera sabor amargo e propriedade laxante.
- Cloreto (Cl^-): geralmente associado ao íon Na^+ , possui alta solubilidade e alta estabilidade em solução, portanto dificilmente precipita. Ele também não oxida e não reduz em águas naturais, alterando sua potabilidade. As águas dos oceanos são a maior

fonte de cloretos. Entretanto, o cloreto nas águas subterrâneas pode provir também da lixiviação de minerais ferromagnesianos, da dissolução de depósitos salinos, de intrusões salinas, da descarga de efluentes de indústrias químicas, de aterros sanitários, fossas sépticas, entre outros. Altas concentrações de cloreto podem ser indícios de poluição antrópica. As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de cloretos inferiores a 100 mg/L. Em concentrações superiores a 200 mg/L provoca sabor salgado à água.

- Sulfato (SO_4^{2-}): em geral são sais de moderadamente a muito solúveis. A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfetos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados, como gipsita e anidrita. Pode provir também das substâncias orgânicas do solo. Em águas doces sua concentração varia de 2 a 150 ppm.
- Bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}): não oxidam e nem reduzem em águas naturais, porém precipitam facilmente como bicarbonato de cálcio. Em águas doces suas concentrações variam de 50 a 350 ppm, e não provocam problemas de toxicidade. Sua presença está relacionada a dissolução de calcários e dolomitas e à hidrólise de silicatos, em presença de CO_2 .
- Potássio (K^+): apresenta-se normalmente em concentrações mais baixas nas águas subterrâneas, quando comparadas com as concentrações de cálcio e de magnésio, devido sua intensa participação em processos de troca iônica e sua facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila, além de que seus sais são elementos vitais para os vegetais. O potássio ocorre sempre associado ao Na e sua concentração nas águas subterrâneas normalmente é inferior a 10 mg/L.
- Ferro: ocorrendo em baixas concentrações, os tipos mais comuns de íon de ferro dissolvidos em águas subterrâneas são o Fe^{2+} (ferro ferroso) e o Fe^{3+} (ferro férico). Sua solubilidade é variável e sua oxidação ocorre com a diminuição do pH da água. O ferro é um dos íons mais abundantes nas rochas ígneas, principalmente em minerais máficos como piroxênios, anfibólios e biotitas. O alto teor de ferro na água subterrânea pode estar ligado a ocorrência de ferrobactérias ou mesmo a corrosão de revestimentos ou filtros de poços.

- Nitrato (NO_3^-): o nitrato é muito solúvel, não precipita e ocorre em pequenas quantidades nas águas subterrâneas, com tendência a ser estável. É um dos poluentes mais frequentes nas águas subterrâneas, a partir do uso de fertilizantes agrícolas ou ainda do uso de fossas rudimentares ao invés de sistemas de saneamento adequados. Em águas subterrâneas, os nitratos ocorrem em teores abaixo de 5 mg/L.
- Amônia (NH_3): Nas águas subterrâneas, amônia e nitrito costumam ser ausentes nas águas subterrâneas, pois são rapidamente convertidos a nitrato pelas bactérias. Pequenos teores constituem sinal de poluição orgânica recente.
- Dureza: medida em unidade equivalente de mg/L de CaCO_3 , a dureza consiste na capacidade da água em precipitar sabão, pelos íons de Ca e Mg. Sendo assim, constitui na soma das concentrações de compostos de cálcio e magnésio. Segundo Custódio & Llamas (2001) as águas com dureza total inferior a 50 mg/L de CaCO_3 são do tipo brandas, de 50 a 100 mg/L de CaCO_3 são ligeiramente duras, de 100 a 200 mg/L CaCO_3 são duras e acima de 200 mg/L de CaCO_3 são muito duras.
- pH: o pH é a medida da concentração hidrogeniônica da água e é função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. O pH da maioria das águas subterrâneas varia de 6,5 e 8, valor que cresce com a temperatura. Elas podem ser classificadas como águas agressivas ($\text{pH} < 7$), neutras ($\text{pH} = 7$) ou incrustantes ($\text{pH} > 7$).

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A avaliação de uso e ocupação do solo apresenta grande relevância em estudos ambientais, inclusive no estudo de qualidade de águas subterrâneas, pois ao identificar as formas de utilização dos espaços, sejam urbanos ou rurais, torna-se viável o reconhecimento de possíveis causas de problemas ou desequilíbrios ambientais, tais como contaminação de águas superficiais e subterrâneas, perda de capacidade produtiva de solos, erosão, entre outros.

Para o presente trabalho, foram previamente diferenciadas regiões de prováveis usos e ocupações das Bacias Hidrográficas do Rio Pirangi, a partir da observação e interpretação de imagens de satélite da área de interesse. De posse dessa avaliação, foram efetuadas visitas na área de estudo que contribuíram para delimitação dessas zonas de diferentes características ambientais, conforme a seguir (figura 5.1):

- Ecossistema de lagos e dunas;
- Área urbanizada;
- Área de expansão urbana;
- Vegetação antropizada;
- Cultivo de lavouras diversificadas e pecuária.

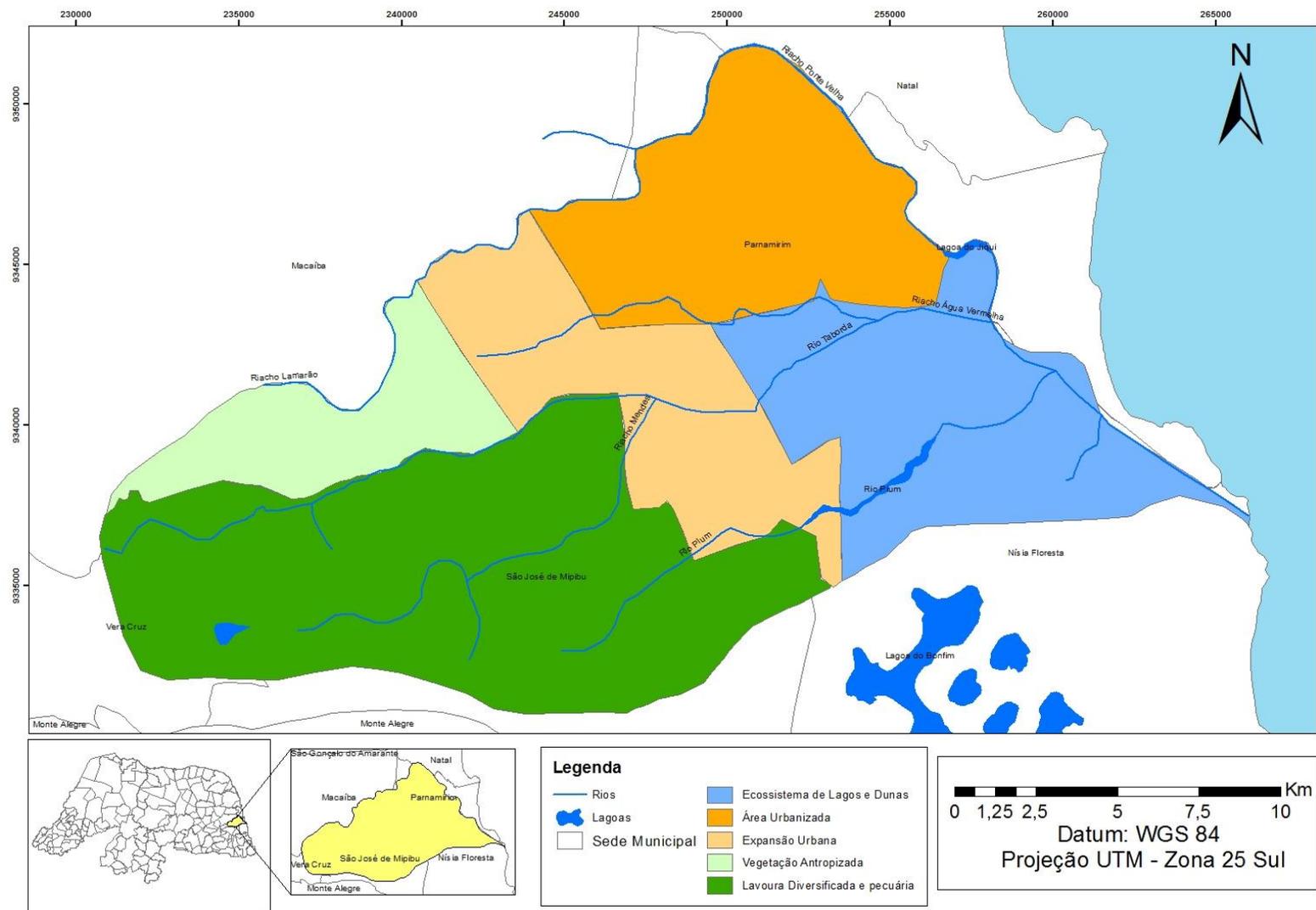


Figura 5.1: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi/RN (2015).

A distribuição apresentada no mapa mostra que a porção leste da área contempla um ecossistema de lagos e dunas. Apesar de apresentar-se pontualmente povoada, é uma região notadamente ainda bem preservada, inclusive exibindo o potencial dos recursos hídricos da Bacia (figuras 5.2 e 5.3).

Foram também identificadas áreas de dunas vegetadas, como ilustra a figura 5.4, que sugerem boas condições para o armazenamento de água subterrânea.



Figura 5.2: Vista panorâmica da Lagoa de Alcaçuz. Fonte: Aryane Assunção



Figura 5.3: Visão do vale do Rio Pirangi e, ao fundo, área de dunas. Fonte: Aryane Assunção



Figura 5.4: Região de dunas vegetadas em região conhecida como Alcaçuz. Fonte: Aryane Assunção

Os setores sul e oeste da Bacia são áreas utilizadas prioritariamente na pecuária e no cultivo de lavouras diversificadas (feijão, batata, macaxeira, cana-de-açúcar, etc.), conforme exemplificado na figura 5.5. Durante as visitas de campo foi constatado o uso de fertilizantes e pesticidas nessas atividades, o que pode oferecer risco de contaminação da água subterrânea. No setor noroeste foi identificada uma pequena área com ocorrência de vegetação antropizada, que possivelmente se tornará, com o passar dos anos, também uma potencial área de cultivo de lavoura.



Figura 5.5: Áreas destinadas a cultivo de lavouras no setor oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi.

Fonte: Aryane Assunção

Já no setor norte da área, onde está inserido o centro do município de Parnamirim, é evidente a ocupação por intensa urbanização. Esse processo vem se ampliando em direção à região central, determinando uma área classificada como área de expansão urbana, onde são

encontrados diversos espaços destinados a loteamentos para habitações, como ilustrado na figura 5.6.

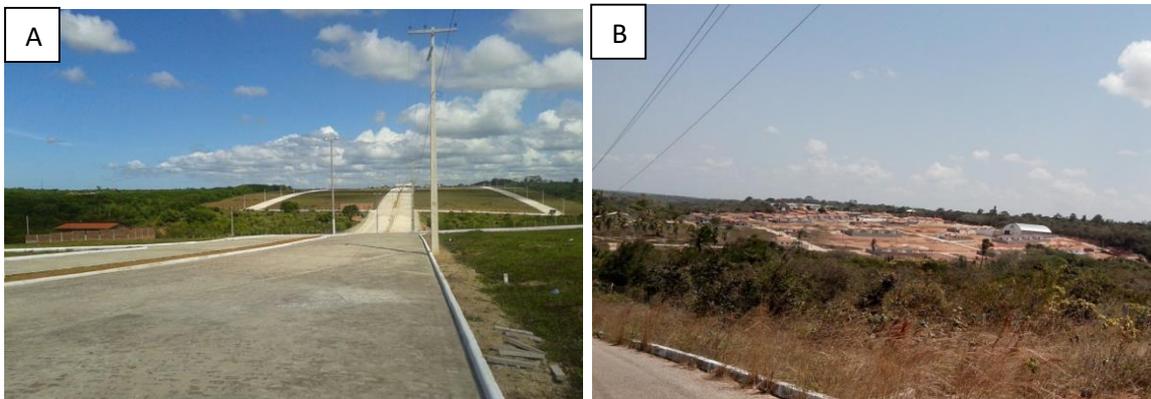


Figura 5.6: Áreas em processo de expansão urbana, caracterizadas por abertura de acessos asfaltados (A) e construção de loteamentos residenciais (B). Fonte: Aryane Assunção

Vale salientar que as áreas que apresentam urbanização avançada não possuem, em geral, sistemas de esgotamento sanitário, sendo muitas vezes utilizados sistemas de fossas rudimentares para escoamento de resíduos. A infraestrutura de drenagem também é falha. Essa situação estabelece altos riscos de contaminação para as águas subterrâneas do aquífero.

CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

6.1 Dados hidroquímicos pré-existent

Foram reunidos os resultados de análises químicas de 33 poços selecionados na área de estudo, realizadas de 2001 até 2013 pela CAERN. Essas análises, apresentadas na tabela 6.1, incluem os seguintes parâmetros: os cátions principais Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , os ânions principais Cl^- e SO_4^{2-} , além de NO_3^- , Fe total, K^+ , pH, dureza, condutividade elétrica, e sólidos totais dissolvidos. Os poços em questão concentram-se na porção norte da área de estudo, conforme mostra a figura 6.1.

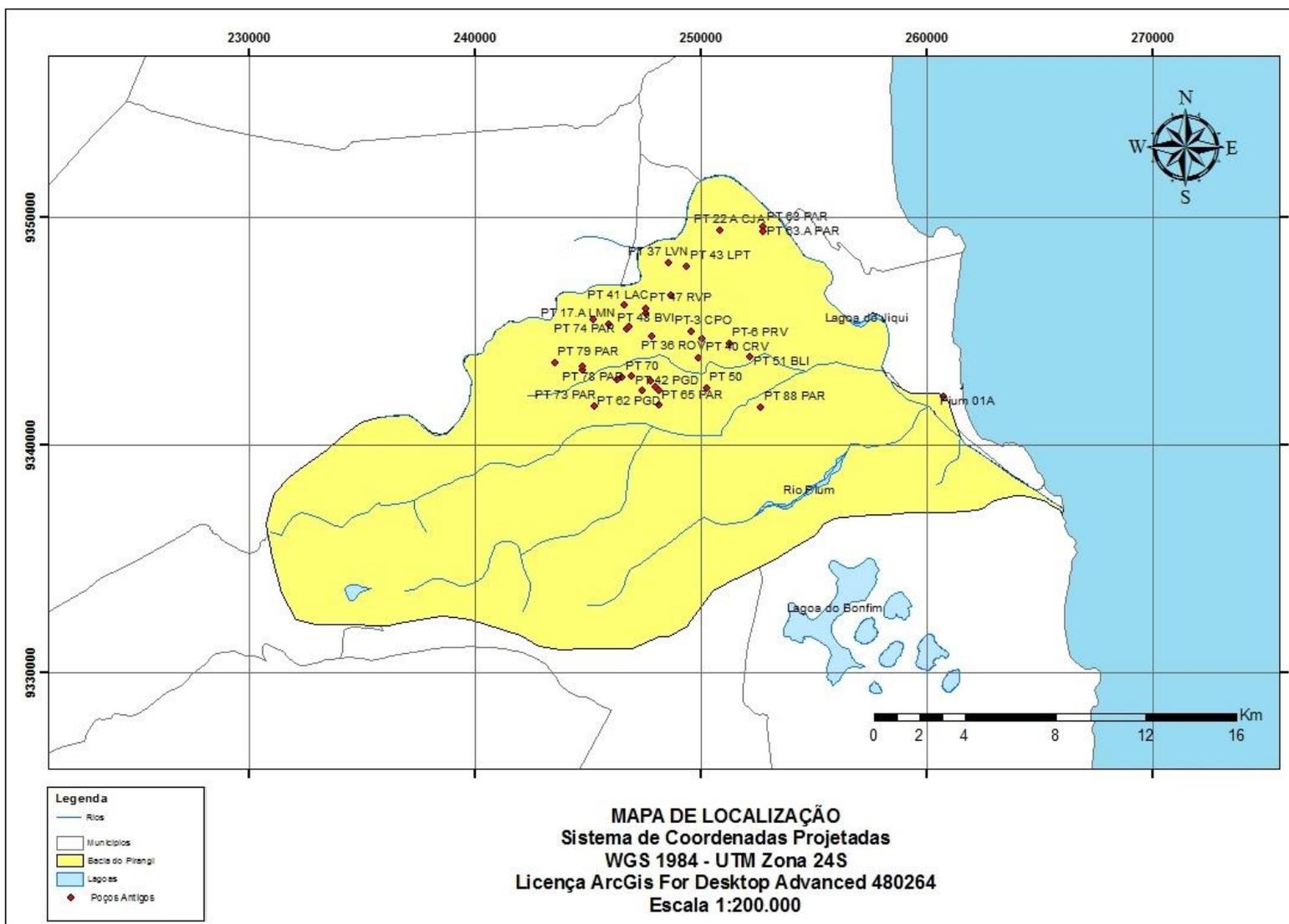


Figura 6.1: Mapa de localização dos pontos previamente analisados

Coordenadas X Y		POÇO													
			Na+ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl- (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	K+ (mg/L)	Fe (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Dureza total (mg/L de CaCO ₃)	STD (mg/L)	CE (μS/cm)	pH	DATA
260445	9341445	Pium 01A	.	0,8	3,4	24	0	0	0	7,7	16,00	107,00	156,00	5,80	23/11/2004
252636	9341658	PT 88 PAR	10,6	5	3,26	20,8	3,04	0,88	0,08	7,98	6,00	34,08	56,80	5,86	11/11/2013
250225	9342496	PT 50 CMA	33	14	8,7	35,5	.	7	0,1	0,7	70,00	165,00	243,00	6,21	29/05/2008
252164	9343874	PT 51 BLI	28	2,5	5,49	17,4	0,22	2	0,05	4,4	28,80	68,00	100,00	6,62	11/08/2009
247569	9345770	PT 52 PAR	.	4,6	3,4	22,7	0,2	.	0	11	25,60	122,00	179,00	4,90	18/11/2009
246196	9344244	PT 53 STE	13	1,08	6,66	13,9	0	1	0	1	30,14	50,00	74,00	5,56	09/12/2009
249878	9343794	PT 055 CDC	47	18,9	7,7	32	0	9	0,1	12,6	79,40	231,00	340,00	6,62	15/02/2009
247390	9342368	PT 57/LNA (PAR)	.	1,59	1,91	41,99	<1,0	.	0,14	1,6	11,83	119,00	175,00	5,76	30/06/2010
247952	9342532	PT 58 PGD	13,96	8,74	5,25	28,5	4	0,82	0,03	9,842	19,50	106,80	178,00	5,40	15/10/2010
247749	9342820	PT 59 PGD	14,44	8,99	5,55	28	4,06	0,94	0,03	9,937	21,00	125,40	209,00	5,90	04/11/2010
245266	9341710	PT 73 PAR	12,97	11,92	7,2	16,9	7,6	2,51	<0,1	0,55	58,86	69,22	128,20	6,65	22/01/2013
245205	9345520	PT 74 PAR	12,3	1,74	1,88	16,4	<1,0	1,66	<0,1	0,84	12,00	46,35	82,38	5,41	24/01/2013
246268	9342890	PT 76 PAR	7,6	1,87	1,16	9,99	<1,0	1,05	<0,1	1,4	9,38	30,52	60,96	5,46	09/05/2013
244741	9343269	PT 77 PAR	22	0,8	0,9	19	0	5	0	0	5,70	62,00	-	5,70	25/08/2007
244722	9343442	PT 78 PAR	8,96	5,16	3,24	28	4	1	0,03	3,92	25,00	45,96	91,60	6,00	09/09/2008
243502	9343616	PT 79 PAR	8,28	5,31	1,83	10,15	<1,0	3,73	<0,1	<0,1	20,56	57,15	113,70	6,49	11/07/2013
247796	9344796	PT 36 ROV	42	5	3	29	16,2	6	0,9	3,6	24,80	114,00	168,00	7,00	14/10/2001
248559	9347998	PT 37 LVN	14	2,4	2,9	25	0,4	2	0	0,7	18,00	37,40	55,00	6,20	25/06/2002
250051	9344674	PT 40 CRV	.	12	10,7	55	0	.	0,9	30	74,00	272,00	400,00	6,40	06/02/2003
246599	9346124	PT 41 LAC	21	1,6	1,4	14	5,8	3	0,1	0,7	10,00	46,00	67,00	6,50	13/09/2004
246937	9343013	PT 42 PGD	.	1,6	3,8	25	0,2	.	0,1	0,9	20,00	55,00	81,00	6,00	01/11/2004

Tabela 6.1: Tabela contendo os valores obtidos em análises químicas de estudos prévios na área (continua)

Coordenadas X Y		POÇO	Na+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl-	SO ₄ -	K+	Fe	NO ₃ ⁻	Dureza total	STD	CE	pH	
			(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L de CaCO ₃)	(mg/L)		
249356	9347855	PT 43 LPT	22	1,6	1,4	16	.	7	0,1	2,1	10,00	65,00	95,00	6,60	13/10/2002
247545	9345995	PT 47 RVP	40	4,5	8	19	0	7	0	9	45,60	102,00	-	5,60	15/04/2007
246680	9345111	PT 48 BVI	18	1,5	1,4	15	0	3	0,1	1,1	9,00	-	-	5,80	22/09/2007
248798	9345188	PT 10A CHB	4,5	5	5,6	26,5	0	7	0	11,5	35,70	76,00	213,00	6,20	17/01/2008
245924	9345293	PT 17.A LMN	34	2,4	1,9	19	0,3	5	0,2	0,8	14,00	63,00	93,00	7,00	11/09/2005
250830	9349430	PT 22A CJA	.	4,8	5,4	16	1,4	.	0	0,7	20,00	61,00	89,00	5,50	06/10/2006
248106	9342370	PT 62 PGD	14,29	10,36	7,66	22	8	2,88	0,04	7,667	16,50	135,85	209,00	5,70	01/04/2011
252721	9349574	PT 63 PAR	.	0,5	.	0,256	<1,0	.	<0,1	1,58	0,11	30,91	61,60	6,10	01/03/2011
252737	3349390	PT 63.A PAR	.	.	.	11,51	<1,0	.	0,12	4,6	11,23	41,42	82,92		17/07/2011
248110	9341740	PT 65 PAR	20	8,16	19,28	80	2,38	9,52	0	2,3	100,00	203,00	238,00	7,20	09/09/2011
246480	9342986	PT 70	18,6	8,8	9,75	21	5,6	1,54	0,06	8,057	16,00	43,68	72,80	6,00	23/05/2012
248638	9346582	PT 71 PAR	50,11	7,65	3,12	38,96	<1,0	3,12	<0,1	20,65	49,05	157,60	317,00	5,98	26/07/2012

Tabela 6.1: Tabela contendo os valores obtidos em análises químicas de estudos prévios na área

Os resultados das análises químicas das amostras apresentaram médias das concentrações dos parâmetros analisados dentro dos teores comumente encontrados em águas subterrâneas naturais, mostrando que essas águas subterrâneas mantiveram uma boa qualidade durante o tempo avaliado. O valor médio de condutividade elétrica foi de 147,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o de STD igual a 91,98 mg/L. A dureza total média das águas apresentou-se igual a 27,69 mg/L de CaCO_3 , valor que classifica as águas como brandas.

Ao longo dos anos nota-se, entretanto, que aumenta o teor de nitrato, o que pode indicar que a medida que a urbanização cresce na área, a intervenção antrópica provoca o aumento da contaminação da água subterrânea.

Convém ressaltar que os dados não são homogêneos, tanto em relação à distribuição das amostragens por toda a extensão da área quanto em relação às datas ou número de análises realizadas por cada poço. As considerações feitas servem para estabelecer uma noção prévia da situação das características hidroquímicas e da qualidade das águas nos domínios amostrados.

6.2 Reconhecimento de salinidade das águas subterrâneas ‘*in situ*’

A salinidade das águas subterrâneas foi avaliada com base em resultados de uma campanha de medição da condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos. Foram analisadas águas subterrâneas provenientes de 28 poços, dentre tubulares e artesanais, situados nas regiões urbanizadas e zona rural, de modo a alcançar a área de estudo de forma mais abrangente e homogênea. Conforme metodologia descrita, as medidas foram realizadas *in situ*, durante visitas de campo, com a utilização de um condutivímetro portátil.

Foram obtidos dados de temperatura (T), condutividade elétrica (CE) e de sólidos totais dissolvidos (STD), conforme mostra a tabela 6.2. A temperatura média encontrada nas águas dos poços avaliados foi de 29,8° C.

Tabela 6.2: Resumo dos valores obtidos de CE, STD e temperatura a partir das medições realizadas nos poços avaliados no âmbito desse trabalho.

Nome do ponto	STD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)
P-2 Captação Trairas	54,52	108,60	29,8
P-115	64,00	127,40	30,0
PS-0077	92,45	183,60	29,6
P-098	45,90	88,41	29,0
P-090	49,86	102,80	34,2
P-085	54,98	103,70	29,2
P-070	35,66	70,36	28,8
PT-65	53,92	106,20	29,8
P-25/PT-14SJM	57,57	114,50	28,9
P-046	52,05	102,50	29,7
P-02	38,59	78,33	30,7
P-174	52,54	104,20	29,7
P-04	28,39	58,08	26,6
P-169	76,55	156,20	28,7
P-151	71,26	146,90	29,0
1132A	38,68	78,48	29,9
PA-P61A	33,61	67,85	30,0
PT-60	15,67	30,99	31,1
P-65A	22,75	44,91	29,6
PT-49	57,65	116,20	27,3
PT-14	79,88	158,00	30,0
PT-13	61,40	123,20	29,9
PT-43	73,99	148,00	30,0
PT-26	35,15	68,26	30,8
PT-19	51,18	101,00	31,0
PT-35	31,94	63,22	30,0
PT-34	56,16	111,90	30,9
PT-16	55,24	108,90	30,4

Os valores de condutividade elétrica variaram de 30,99 a 183,60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 102,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A figura 6.2 ilustra a distribuição espacial dos poços analisados e as isolinhas de condutividade elétrica (CE) das águas subterrâneas. A configuração das isolinhas mostra que os maiores valores de condutividade elétrica obtidos estão concentrados nas porções norte e oeste da área estudada. A porção norte é a região de maior urbanização, portanto de maior risco potencial para as águas subterrâneas. No caso do setor oeste, a presença de águas com maior salinidade pode estar associada ao desenvolvimento agrícola, bem como a uma possível influência do domínio semiárido, com a ocorrência de rochas do embasamento cristalino.

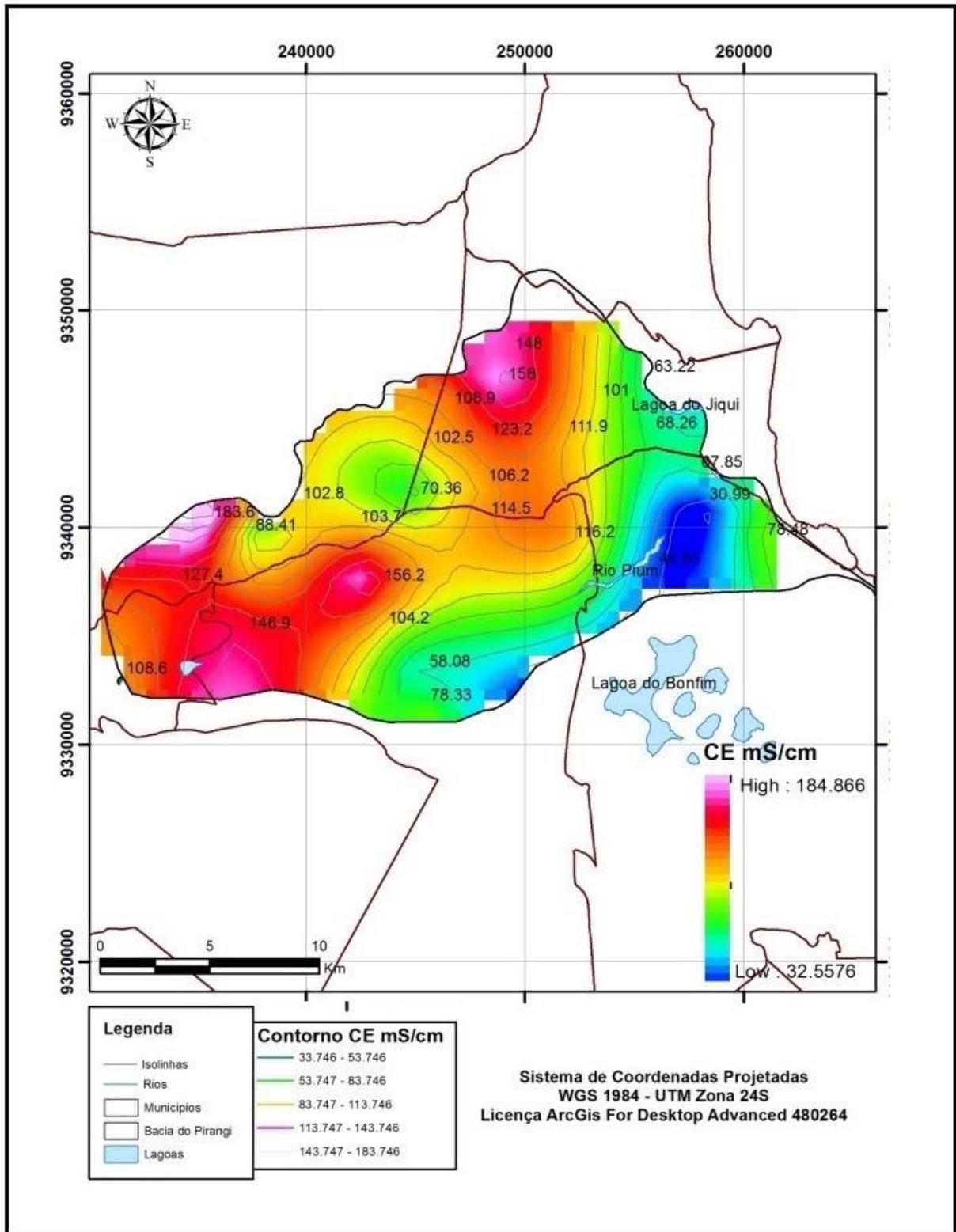


Figura 6.2: Mapas de isovalores de condutividade elétrica (CE), contendo a localização dos poços analisados nesse parâmetro.

Em contrapartida, os mais baixos valores de CE (de 30,99 a 78,48 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ocorrem em sua maioria nas porções leste e sul da área, onde estão localizados corpos de água naturais e elementos dunares, caracterizando-as como áreas com águas de menor salinidade. Sabe-se que a ocupação e a influência antrópica ocorrem em menores proporções nessas porções. Além disso, as dunas existentes a leste favorecem a recarga do aquífero, através da infiltração de águas pluviais. Esse processo de renovação e maior circulação das águas subterrâneas da área pode contribuir para sua diluição, mantendo baixa a sua salinidade.

Ao analisar o comportamento das águas com relação ao fluxo subterrâneo na área (figura 6.3), verifica-se que a salinidade diminui, em geral, na direção do fluxo: oeste-leste.

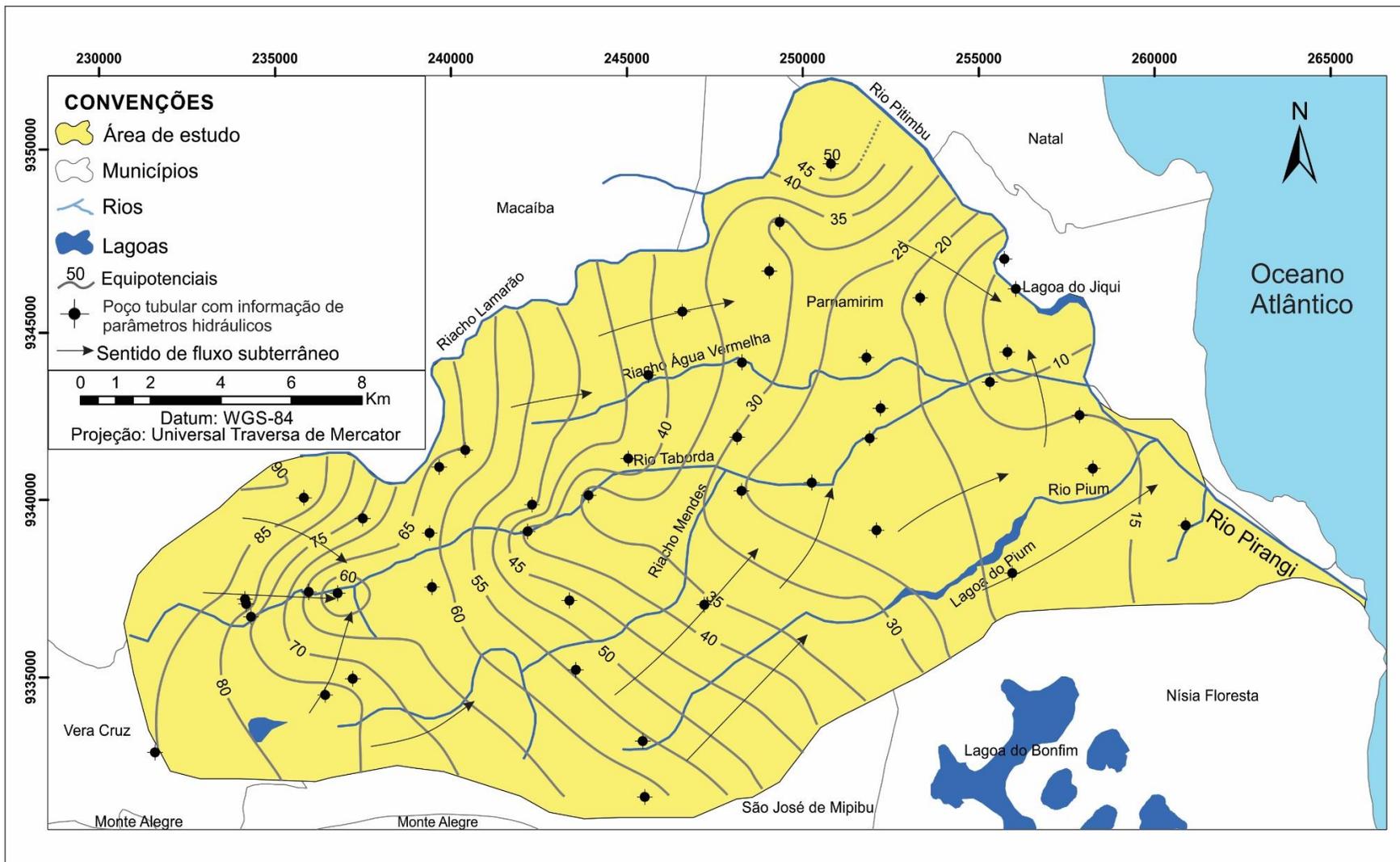


Figura 6.3: Mapa de fluxo subterrâneo do Sistema Aquífero Barreiras na região de Parnamirim. Fonte: Alves (2015).

Em relação aos teores de sólidos totais dissolvidos nas amostras, a média obtida é de 51,48 mg/L, onde os valores variam de 15,67 mg/L até 92,45 mg/L. É visto na figura 6.4 que os dados de STD seguem distribuição espacial semelhante aos dados de CE e as isolinhas traçadas seguem o mesmo padrão, conforme sugere a relação direta entre os mesmos.

Tal distribuição apresenta que, para os sólidos totais dissolvidos, os menores valores também ocorrem nas áreas mais próximas aos corpos d'água, enquanto que os maiores valores de STD ocorrem a oeste e ao norte da área, corroborando com a relação que se estabelece com a condutividade. Os altos teores de STD representam então que a água apresenta maior salinidade, diminuindo assim a sua qualidade.

Ainda que com essa média de sólidos totais dissolvidos obtida, pode-se afirmar que as águas subterrâneas da área são, em geral, adequadas para uso humano, pois não possuem teores excessivos de STD que inviabilizem o seu uso, segundo SILVA JÚNIOR (1999). Segundo a classificação de Fetter (1994), essa água pode ser classificada como doce, por possuir concentração de STD menor que 1.000 mg/L.

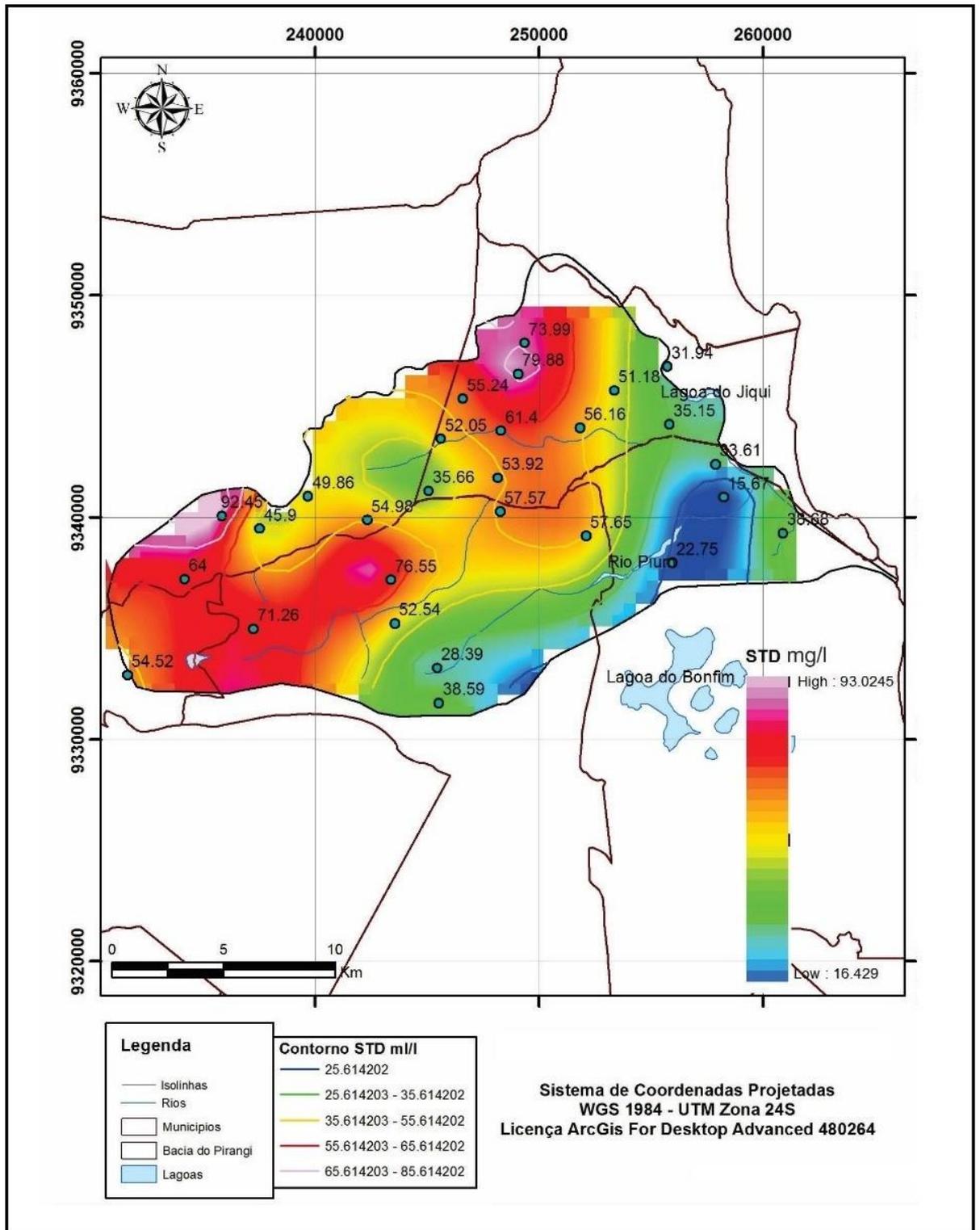


Figura 6.4: Mapas de isolinhas de sólidos totais dissolvidos (STD), contendo a localização dos poços analisados nesse parâmetro.

6.3 Reconhecimento hidroquímico atual das águas subterrâneas

Para realizar o reconhecimento hidroquímico das águas subterrâneas foram coletadas 27 amostras de água subterrânea em poços (tanto tubulares quanto cacimbões) dentro da área de estudo, as quais foram armazenadas adequadamente e encaminhadas para laboratório, a fim de serem submetidas a análises químicas para determinação dos seguintes parâmetros: cátions principais (sódio, cálcio e magnésio) e ânions principais (cloreto, sulfato e bicarbonato), ferro, potássio, carbonato, nitrato, amônia, boro, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e dureza total. A figura 6.5 consiste em um mapa contendo a localização dos poços em que as amostras foram coletadas e a tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos das análises.

A temperatura das águas dos poços estudados apresenta variação de valores entre 27,9° C e 31,1° C. Sabe-se que as águas subterrâneas possuem uma amplitude térmica pequena, isto é, suas temperaturas não são influenciadas pelas mudanças da temperatura atmosférica.

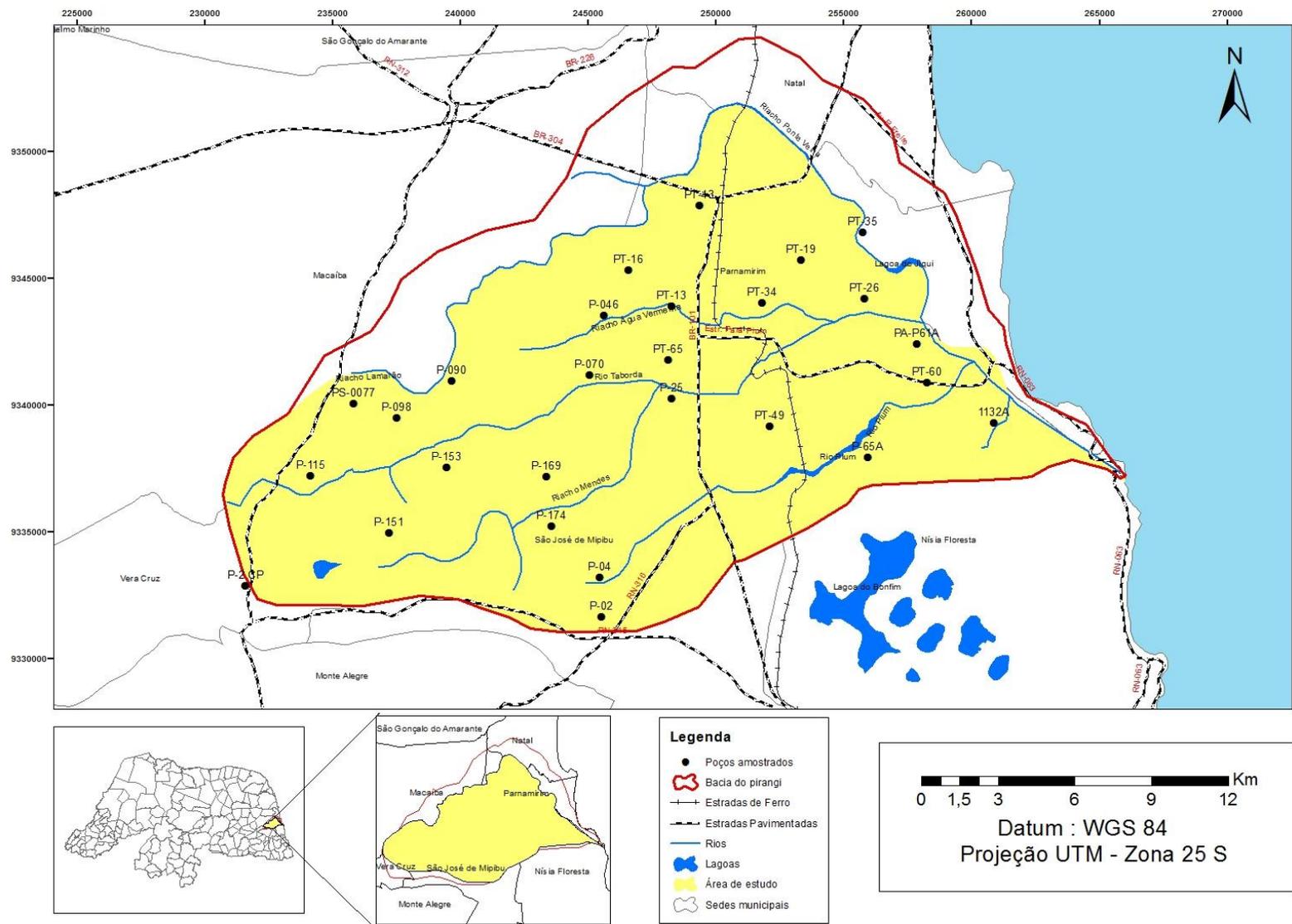


Figura 6.5: Mapa de localização dos pontos amostrados para reconhecimento hidroquímico na área de estudo

Tabela 6.3: Resultados das análises de parâmetros hidroquímicos, realizadas nas 27 amostras da área de estudo

Parâmetros	pH	Condut. Elétrica	STD	Dureza	NH ₃ ⁺	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe total	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	B
	-	μS/cm a 25°C	mg/l	mg/l	mg/l NH ₃	mg/l N	mg/l Ca ⁺	mg/l Mg	mg/l Na ⁺	mg/l K ⁺	mg/l Fe ⁺⁺	mg/l CO ₃	mg/l HCO ₃	mg/l SO ₄	mg/l Cl ⁻	mg/l B
P2 CP	7,54	141,90	80,00	20,00	0,36	3,61	4,08	2,41	13,24	3,40	0,04	0,00	9,95	0,00	29,99	<0,001
P-115	5,71	151,50	86,00	22,00	0,59	4,44	2,45	3,86	14,04	3,41	0,04	0,00	4,97	0,00	34,99	<0,001
PS-0077	5,89	209,00	122,00	18,00	0,37	1,22	0,82	3,86	28,52	3,40	0,03	0,00	3,73	0,00	56,98	0,00514
P-098	5,73	95,90	55,00	22,00	0,68	0,05	1,63	4,34	8,96	3,19	0,56	0,00	7,46	0,12	27,99	<0,001
P-090	6,01	118,70	68,00	20,60	0,32	0,74	2,45	3,52	11,89	2,50	0,32	0,00	7,46	0,00	30,49	<0,001
P-070	5,60	84,40	48,00	16,00	0,27	0,01	4,08	1,45	7,35	2,29	0,03	0,00	4,97	0,00	21,99	<0,001
PT-65	6,64	132,10	77,00	20,00	0,54	4,50	5,71	1,45	13,26	3,40	0,04	0,00	12,44	0,21	27,99	<0,001
P-25	6,00	239,00	138,00	41,60	0,26	0,39	5,71	6,65	22,89	3,39	0,02	0,00	12,44	0,02	60,48	<0,001
P-046	5,76	96,50	55,00	22,00	0,33	0,82	4,08	2,41	13,03	3,40	0,02	0,00	9,95	0,31	30,99	<0,001
P-02	4,50	80,60	48,00	20,00	0,37	5,20	0,82	4,34	3,66	1,71	0,05	0,00	2,48	0,00	16,99	<0,001
P-174	6,47	121,80	70,00	20,00	0,26	1,45	3,26	2,89	13,45	3,12	0,01	0,00	14,93	0,40	27,99	<0,001
P-04	5,93	62,20	35,00	12,00	0,33	1,14	0,82	2,41	9,56	2,33	0,04	0,00	7,46	0,60	19,99	<0,001
P-153	5,55	422,00	239,00	24,00	0,27	9,45	0,82	5,30	42,55	8,51	0,05	0,00	4,97	0,12	81,97	0,00295
P-151	5,87	169,90	97,00	20,00	0,29	4,51	2,45	3,37	19,07	3,40	0,07	0,00	12,44	0,00	36,99	<0,001
1132A	4,65	97,00	57,00	16,00	0,30	4,90	2,45	2,41	2,16	1,05	0,03	0,00	0,00	0,00	13,00	<0,001
PA-P61A	6,06	51,00	29,00	10,00	0,34	1,02	3,26	0,48	7,13	1,50	0,05	0,00	4,97	0,21	16,00	<0,001
PT-60	6,40	36,90	21,00	14,00	0,35	0,02	4,08	0,96	2,59	0,40	0,03	0,00	7,46	0,12	10,00	<0,001
P-65A	6,86	53,50	30,00	18,00	0,36	0,02	1,63	3,37	6,25	1,98	0,04	0,00	12,44	0,00	16,99	<0,001
PT-49	6,18	190,00	108,00	76,00	0,29	0,10	16,32	8,68	3,27	1,53	0,01	0,00	64,70	0,00	22,99	<0,001
PT-13	5,81	134,10	77,00	36,00	0,30	5,42	8,16	3,86	8,53	2,93	0,02	0,00	24,88	0,00	23,99	<0,001
PT-26	5,12	185,20	106,00	34,00	0,29	8,20	4,08	5,78	5,14	1,09	0,01	0,00	7,46	0,00	23,99	<0,001
PT-19	6,70	65,90	38,00	14,00	0,27	1,44	3,26	1,45	25,19	3,40	0,02	0,00	62,22	0,00	15,00	<0,001
PT-35	5,99	134,30	77,00	46,00	0,24	1,88	7,34	6,75	12,88	3,40	0,01	0,00	42,30	0,00	29,99	<0,001
PT-16	5,13	135,90	78,00	32,00	0,30	3,85	3,26	5,78	5,30	2,37	0,01	0,00	9,95	0,00	24,99	<0,001

6.3.1 Balanço iônico de massas

Inicialmente foi estabelecido um cálculo de balanço iônico entre resultados obtidos dos cátions e ânions, a fim de certificar a confiabilidade dos dados fornecidos pela análise laboratorial, tendo em vista que o somatório dos cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) e ânions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} e NO_3^-) deve ser aproximadamente igual. Para isso, utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Erro do Balanço Iônico} = \frac{\text{somatório dos cátions} - \text{Somatório dos ânions}}{\text{somatório dos cátions} + \text{Somatório dos ânions}}$$

Cátions e ânions são expressos em valores absolutos, na unidade de meq/L. O erro do balanço iônico deve preferencialmente ser menor que 5% e absolutamente abaixo de 10%. Acima desse valor, sugere-se um erro analítico e deve-se desconsiderar a análise em questão na interpretação hidrogeoquímica das águas estudadas (Lloyd and Heathcote, 1985). No caso das amostras aqui analisadas, três amostras (P-02, 1132A e PT-26) apresentaram erros entre 5 e 10%, enquanto que outras três amostras (P-169, PT-43 e PT-34) apresentaram erros superiores a 10% (tabela 6.4). Devido a esse erro acima do permitido, essas três últimas análises citadas foram descartadas nas interpretações hidrogeoquímicas para caracterização das águas realizadas nesse estudo.

Tabela 6.4: Tabela contendo valores calculados no balanço hídrico das 27 amostras realizadas.

Poço	Ânions			Σ Ânions	Cátions					Σ Cátions	Erro %
	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Fe	K ⁺		
	meq/l	meq/l	meq/l		meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l		
P2 CP	0,16	0,00	0,84	1,01	0,20	0,20	0,58	0,00	0,09	1,07	2,86
P-115	0,08	0,00	0,99	1,07	0,12	0,32	0,61	0,00	0,09	1,14	3,30
PS-0077	0,06	0,00	1,61	1,67	0,04	0,32	1,24	0,00	0,09	1,69	0,63
P-098	0,12	0,00	0,79	0,91	0,08	0,36	0,39	0,03	0,08	0,94	1,44
P-090	0,12	0,00	0,86	0,98	0,12	0,29	0,52	0,02	0,06	1,01	1,46
P-070	0,08	0,00	0,62	0,70	0,20	0,12	0,32	0,00	0,06	0,70	0,16
PT-65	0,20	0,00	0,79	1,00	0,29	0,12	0,58	0,00	0,09	1,07	3,57
P-25	0,20	0,00	1,70	1,91	0,29	0,55	1,00	0,00	0,09	1,92	0,20
P-046	0,16	0,01	0,87	1,04	0,20	0,20	0,57	0,00	0,09	1,06	0,69
P-02	0,04	0,00	0,48	0,52	0,04	0,36	0,16	0,00	0,04	0,60	7,51
P-174	0,24	0,01	0,79	1,04	0,16	0,24	0,58	0,00	0,08	1,07	1,16
P-04	0,12	0,01	0,56	0,70	0,04	0,20	0,42	0,00	0,06	0,72	1,33
P-169	0,94	0,00	0,99	1,93	0,41	0,83	1,05	0,00	0,12	2,40	10,96
P-153	0,08	0,00	2,31	2,39	0,04	0,44	1,85	0,00	0,22	2,55	3,13
P-151	0,20	0,00	1,04	1,25	0,12	0,28	0,83	0,00	0,09	1,32	2,88
1132A	0,00	0,00	0,37	0,37	0,12	0,20	0,09	0,00	0,03	0,44	9,51
PA-P61A	0,08	0,00	0,45	0,54	0,16	0,04	0,31	0,00	0,04	0,55	1,57
PT-60	0,12	0,00	0,28	0,41	0,20	0,08	0,11	0,00	0,01	0,41	0,12
P-65A	0,20	0,00	0,48	0,68	0,08	0,28	0,27	0,00	0,05	0,68	0,06
PT-49	1,06	0,00	0,65	1,71	0,82	0,71	0,14	0,00	0,04	1,71	0,10
PT-13	0,41	0,00	0,68	1,08	0,41	0,32	0,37	0,00	0,08	1,17	3,94
PT-43	0,37	0,00	0,62	0,99	0,08	0,91	0,20	0,00	0,03	1,22	10,66
PT-26	0,12	0,00	0,68	0,80	0,20	0,48	0,22	0,00	0,03	0,93	7,70
PT-19	1,02	0,00	0,42	1,44	0,16	0,12	1,10	0,00	0,09	1,47	0,80
PT-35	0,69	0,00	0,84	1,54	0,37	0,56	0,56	0,00	0,09	1,57	1,02
PT-34	0,20	0,00	0,65	0,85	0,29	0,59	0,15	0,00	0,04	1,07	11,22
PT-16	0,16	0,00	0,70	0,87	0,16	0,48	0,23	0,00	0,06	0,93	3,51

6.3.2 Síntese dos Resultados Obtidos

Com base em uma estatística simplificada, os resultados das 24 análises hidroquímicas consideradas foram sintetizados em uma tabela que apresenta os valores calculados referentes a média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo de cada parâmetro (tabela 6.5).

Tabela 6.5: Resumo dos resultados das análises químicas da área total

GERAL						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	5,92	5,91	0,68	4,50	7,54
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	76,63	73,50	45,87	21,00	239,00
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	133,72	126,95	80,63	36,90	422,00
Dureza Total	mg/L	24,76	20,00	14,20	10,00	76,00
Amônia	mg/L NH_3^+	0,35	0,31	0,11	0,24	0,68
Nitrato	mg/L de NO_3^-	2,68	1,45	2,68	0,01	9,45
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	3,88	3,26	3,29	0,82	16,32
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,66	3,45	2,04	0,48	8,68
Sódio	mg/L Na^+	12,50	10,73	9,52	2,16	42,55
Potássio	mg/L K^+	2,80	3,03	1,53	0,40	8,51
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,06	0,03	0,12	0,01	0,56
Carbonato	mg/L CO_3^{2-}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	14,67	8,71	17,24	0,00	64,70
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,09	0,00	0,16	0,00	0,60
Cloreto	mg/L Cl^-	29,28	26,49	16,41	10,00	81,97
Boro	mg/L B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

Os resultados das análises químicas foram agrupados em três subáreas que apresentam características distintas, que foram reconhecidas ao associar o conhecimento obtido na elaboração do mapa de uso e ocupação do solo e a interpretação do reconhecimento dos parâmetros hidroquímicos anteriormente realizado na área de estudo. Dos 24 pontos cujas análises químicas foram consideradas, 9 foram classificados como pertencentes à subárea A (onde ocorre maior urbanização e/ou expansão urbana), 5 pontos localizam-se na subárea B (região que envolve um ecossistema de lagoas e dunas) e 10 pontos são localizados na porção que concentra maior cultura de lavouras e vegetação antropizada, nomeada de subárea C (figura 6.6).

As tabelas 6.6, 6.7 e 6.8 apresentam sínteses dos resultados dos parâmetros hidroquímicos analisados em cada grupo de amostra, os quais também foram arranjados com base em uma estatística simplificada e calculados os valores de média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo correspondente a cada grupo.

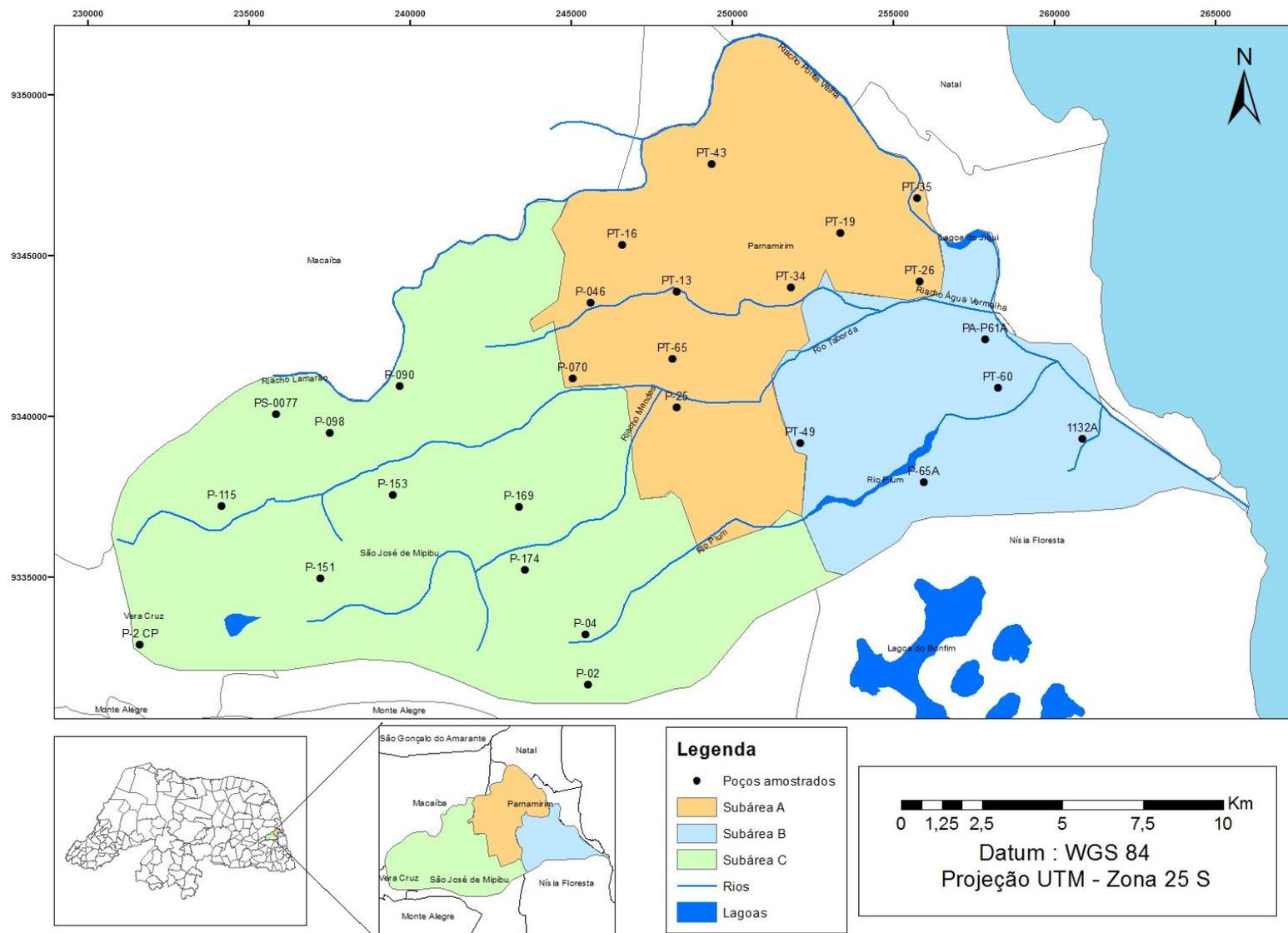


Figura 6.6: Mapa representando as três subáreas delimitadas na área de estudo

Tabela 6.6: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea A

SUBÁREA A						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	5,86	5,81	0,56	5,12	6,70
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	77,11	77,00	30,43	38,00	138,00
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	134,16	134,10	52,63	65,90	239,00
Dureza Total	mg/L	29,07	32,00	11,48	14,00	46,00
Amônia	mg/L NH_3^+	0,31	0,29	0,09	0,24	0,54
Nitrato	mg/L de NO_3^-	2,95	1,88	2,74	0,01	8,20
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	5,08	4,08	1,77	3,26	8,16
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,95	3,86	2,32	1,45	6,75
Sódio	mg/L Na^+	12,62	12,88	7,23	5,14	25,19
Potássio	mg/L K^+	2,85	3,39	0,80	1,09	3,40
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04
Carbonato	mg/L CO_3^{2-}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	20,73	12,44	19,36	4,97	62,22
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,06	0,00	0,12	0,00	0,31
Cloreto	mg/L Cl^-	28,82	24,99	12,79	15,00	60,48
Boro	mg/L B	<0,001	<0,001	0,00	0,00	0,00

Tabela 6.7: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea B

SUBÁREA B						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	6,03	6,18	0,83	4,65	6,86
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	49,00	30,00	35,67	21,00	108,00
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	85,68	53,50	62,51	36,90	190,00
Dureza Total	mg/L	26,80	16,00	27,66	10,00	76,00
Amônia	mg/L NH_3^+	0,33	0,34	0,03	0,29	0,36
Nitrato	mg/L de NO_3^-	1,21	0,10	2,10	0,02	4,90
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	5,55	3,26	6,09	1,63	16,32
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,18	2,41	3,28	0,48	8,68
Sódio	mg/L Na^+	4,28	3,27	2,26	2,16	7,13
Potássio	mg/L K^+	1,29	1,50	0,60	0,40	1,98
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05
Carbonato	mg/L CO_3^{2-}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	17,91	7,46	26,54	0,00	64,70
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,07	0,00	0,10	0,00	0,21
Cloreto	mg/L Cl^-	15,80	16,00	4,86	10,00	22,99
Boro	mg/L B	<0,001	<0,001	0,00	0,00	0,00

Tabela 6.8: Resumo dos resultados das análises químicas da subárea C

SUBÁREA C						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	5,92	5,88	0,76	4,50	7,54
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	90,00	75,00	58,01	35,00	239,00
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	157,35	131,85	102,53	62,20	422,00
Dureza Total	mg/L	19,86	20,00	3,20	12,00	24,00
Amônia	mg/L NH_3^+	0,38	0,35	0,14	0,26	0,68
Nitrato	mg/L de NO_3^-	3,18	2,53	2,86	0,05	9,45
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	1,96	2,04	1,16	0,82	4,08
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,63	3,69	0,91	2,41	5,30
Sódio	mg/L Na^+	16,49	13,35	11,29	3,66	42,55
Potássio	mg/L K^+	3,50	3,30	1,85	1,71	8,51
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,12	0,05	0,18	0,01	0,56
Carbonato	mg/L CO_3^{2-}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	7,59	7,46	3,91	2,48	14,93
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,12	0,00	0,21	0,00	0,60
Cloreto	mg/L Cl^-	36,44	30,24	19,34	16,99	81,97
Boro	mg/L B	0,00	0,00	0,00	<0,001	0,01

Analisando os valores de pH da área total observa-se que o parâmetro varia de 4,50 a 7,54, com o valor médio de 5,92. Isso indica uma tendência a serem, de modo geral, águas ácidas ($\text{pH} < 7$). Localmente, a subárea B apresenta a maior média de pH, equivalente a 6,03. As águas subterrâneas mais próximas às porções de lagoas e dunas tendem mais para uma situação de neutralidade do que as das outras porções.

Os valores de STD e de condutividade elétrica fornecidos pelas análises químicas laboratoriais confirmam as condições de salinidade das águas individualmente analisadas anteriormente. Desse modo, tem-se que as porções mais ao norte e mais a oeste da área de estudo (subáreas A e C, respectivamente) apresentam valores de STD e de condutividade elétrica bem maiores do que os valores da subárea B, indicando que a salinidade dessa última área é a mais baixa de toda a região estudada.

A dureza corresponde ao conteúdo de íons alcalinos terrosos, essencialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} . Em geral é medida em unidade de mg/L de Ca/CO_3 . O valor mínimo da dureza (D) obtido, foi de 10,00 mg/L de CaCO_3 e o máximo de 76,00 mg/L de CaCO_3 , ambos na subárea B. A média total foi de 24,76 mg/L de CaCO_3 , com desvio padrão de 14,20 mg/L de CaCO_3 . As águas, portanto, são classificadas como águas brandas (tabela 6.9), o que se atribui aos baixos conteúdos de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Tabela 6.9: Classificação das águas quanto à dureza, segundo Custodio & LLamas (2001)

Dureza, em mg/L de CaCO ₃	Classificação das águas
D < 50	Águas brandas
50 < D < 100	Águas ligeiramente duras
100 > D < 200	Águas moderadamente duras
> 200	Águas muito duras

Ao analisar o parâmetro amônia, tem-se na área total a média de 0,35 mg/L, com os teores pouco variando, no intervalo de 0,24 mg/L até 0,68 mg/L.

Os íons bicarbonato e carbonato relacionam-se com a alcalinidade das águas. O bicarbonato apresentou-se em menor média na subárea C (7,59 mg/L), apresentando também menor variação de valores nas amostras, variando de 2,48 mg/L até 14,93 mg/L (desvio padrão de 3,91 mg/L). Nas subáreas A e B, por sua vez, os valores médios desse parâmetro são bem maiores, de 20,73 mg/L e 17,91 mg/L, respectivamente. Os valores de desvio padrão também são bem maiores, indicando que existe uma grande amplitude de variação de teores entre as amostras pertencentes a esses grupos.

O íon carbonato, por sua vez, não chegou a ser detectado em nenhuma das amostras analisadas.

As análises químicas identificaram a maior média de íon nitrato na subárea C (3,18 mg/L), seguido na subárea A (2,95 mg/L) e, em menor, valor na subárea B (1,21 mg/L). Esses valores indicam que a porção que apresenta maior adensamento de lavouras (subárea C) está mais contaminada por nitrato, provavelmente devido ao uso de pesticidas, agrotóxicos e/ou fertilizantes nos solos, que acaba infiltrando para as águas subterrâneas. O teor ocorrente na subárea A é proveniente da crescente urbanização ocorrente na região. A região de lagos e dunas, por sua vez, é a que se mantém mais preservada quanto a esse tipo de contaminação.

O cloreto apresentou menor valor médio na subárea B (15,80 mg/L), região onde as análises obtiveram o menor valor de desvio padrão (4,86). Isso significa que esse grupo de amostras possui menor variação de valores para esse parâmetro, além de ser a que menos concentra esse íon. A maior média se deu na subárea C (36,44 mg/L), enquanto que a subárea A apresentou média de 28,82 mg/L, provavelmente devido a infiltrações oriundas da ação antrópica e urbanização nessas localidades.

Na subárea B, o teor médio do sódio foi de 4,28 mg/L, variando apenas de 2,16 até 7,13 mg/L, configurando então a subárea com a menor média e o menor desvio padrão também deste

íon. Provavelmente a maior ocorrência de influência antrópica nas subáreas A e C justifica os maiores teores médios nessa região, de 12,62 mg/L e 16,49 mg/L, respectivamente.

Os íons cloreto e sódio costumam ocorrer associados, e a equivalência observada nas análises químicas confirmam esse fato.

Os teores de potássio também seguiram a tendência de comportamento dos teores de cloreto e de sódio. Dessa forma, a média obtida desse íon de menor valor na subárea B (1,50 mg/L), enquanto que a subárea A apresentou média de 2,85 mg/L e a subárea C 3,50 mg/L. Os valores de todas as amostras analisadas estão dentro dos valores que normalmente se concentra o íon potássio nas águas subterrâneas (inferior a 10 mg/L).

O teor de cálcio ocorre em menor valor na subárea C, seguido do valor na subárea A e, em maior valor, na subárea B, que é onde se observa também o maior desvio padrão. O teor de magnésio, por sua vez, apresenta comportamento oposto, onde o menor valor é o da subárea B, depois o da subárea A e, por último, o da subárea C.

O íon sulfato apresentou maior média na subárea C, ainda assim, os valores são todos baixos, muito menores do que os valores máximos permitidos estabelecidos pelo padrão de potabilidade de água para o consumo humano (Brasil, Portaria nº 1469/GM em 29 de dezembro de 2000), equivalente a 250 mg/L.

O ferro, de mesmo modo, mostrou-se em teores bem baixos em toda a área, tendo sido identificados apenas duas amostras com valores maiores do que 0,1 mg/L (0,56 e 0,32 mg/L). Essas amostras integram a subárea C, tornando maior a média do íon ferro nessa região do que nas outras duas subáreas delimitadas.

No caso do boro, quando detectado, ocorreu sempre em valores menores que 0,001 mg/L.

6.3.3 Correlação entre parâmetros químicos

A tabela 6.10 apresenta uma matriz de coeficientes de correlação entre determinados parâmetros hidroquímicos das águas subterrâneas na área de estudo, incluindo condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e bicarbonato.

Tabela 6.10: Correlação matricial entre parâmetros hidroquímicos

		Na ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	COND	STD
Na	mg/l	1	0,881	-0,269	0,086	0,853	-0,292	0,0032	0,725	0,725
K	mg/l		1	-0,203	0,169	0,827	-0,191	-0,049	0,754	0,750
Ca	mg/l			1	0,481	-0,142	-0,392	0,701	0,082	0,080
Mg	mg/l				1	0,393	-0,39	0,339	0,562	0,564
Cl	mg/l					1	-0,413	-0,218	0,903	0,905
SO4	mg/l						1	0,116	-0,399	-0,404
HCO3	mg/l							1	-0,034	-0,036
COND	µS/cm								1	1
STD	mg/l									1

Coefficiente de variação (r) e os respectivos graus de correlação

Valor de "r _{x,y} "	Correlação
0	nula
0 - 0.3	fraca
0.3 - 0.6	média
0.6 - 0.9	forte
0.9 - 0.99	fortíssima
1	perfeita

A condutividade elétrica, em geral, é o parâmetro utilizado na análise da salinidade das águas, tanto pelas facilidades de medição como principalmente pela elevada correlação que o mesmo apresenta com os sólidos totais dissolvidos. A correlação chega a ser perfeita (100%) no caso do presente estudo.

Nas águas do aquífero estudado, a condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos apresentam boas correlações com o cloreto, o potássio e o sódio (de forte a fortíssima). A obtenção desses coeficientes de correlação ratifica o predomínio destes íons em relação aos demais, sendo esses os principais contribuintes da salinidade das águas. A boa correlação dentre esses íons pode indicar também que eles possuem a mesma proveniência.

Sabendo que a condutividade elétrica expressa salinidade das águas nos poços, sabe-se que a concentração de cloretos é cada vez mais elevada nos poços mais salinos, tendo em vista a forte correlação apresentada (90,5%). Observando o mapa de fluxo subterrâneo, nota-se que a concentração de cloreto diminui no sentido do fluxo. Ou seja, o mecanismo de recarga provavelmente contribui para a diluição dos sais e, conseqüentemente para a redução de concentração do cloreto.

Os ânions HCO_3^- e SO_4^{2-} apresentam baixas correlações com a condutividade elétrica e com os sólidos totais dissolvidos, indicando que esses ânions não são afetados pela salinização das águas.

6.3.4 Representação gráfica em diagramas

A partir dos dados obtidos através das análises químicas realizadas, foram confeccionados diagramas representativos (Piper e Durov expandido), de modo a classificar hidroquimicamente as águas subterrâneas estudadas e estabelecer relações e comparações entre as águas existentes em diferentes pontos, apresentando as relações entre os íons que as compõem. Foi utilizado o *software AQUAQUEM 4.70* na elaboração dos referidos gráficos.

a) Diagrama de Piper

O diagrama de Piper é comumente utilizado no intuito de classificar e comparar diferentes grupos de água, de determinadas áreas, de acordo com os cátion e ânions ocorrentes em cada um. O diagrama de Piper é um diagrama trilinear, onde são plotadas as porcentagens (em miliequivalente por litro) de cada cátion e ânion em relação aos totais de cátions e ânions, respectivamente. Tais valores são projetados no losango do gráfico, onde o cruzamento desses dois pontos indica a tipologia química da amostra de água em questão (figura 6.7).

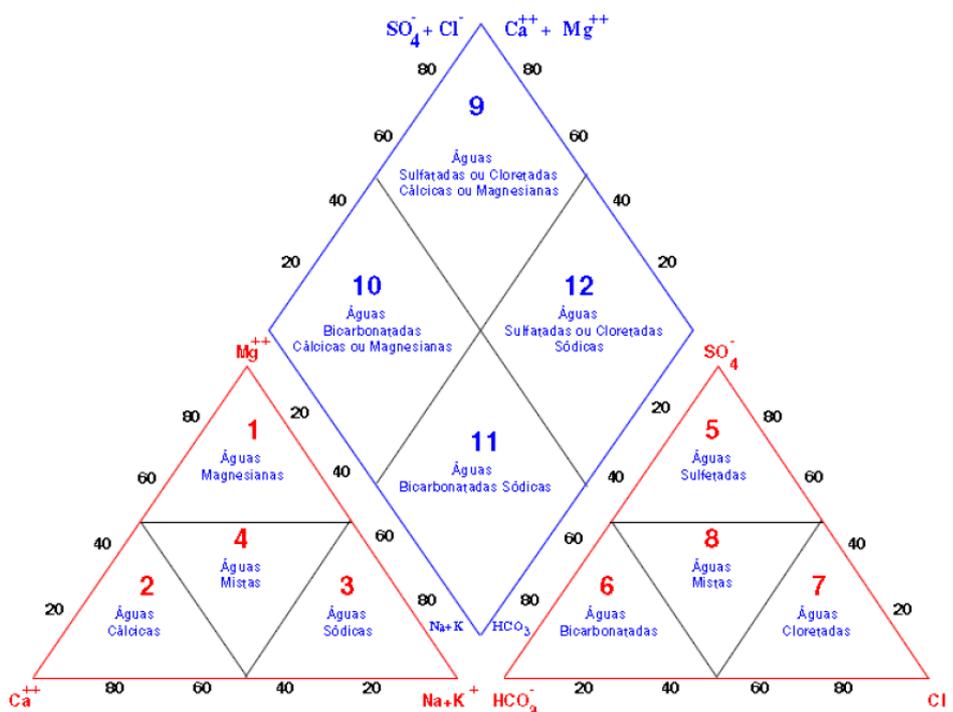


Figura 6.7: Esquema do diagrama de Piper

Com isso, os resultados das análises químicas desse trabalho foram utilizados na construção de diagramas de Piper, a fim de classificar as águas subterrâneas, seguindo a divisão de subáreas que vem sendo considerada (figura 6.8).

De acordo com o Diagrama de Piper das subáreas, o comportamento das águas existentes nas subáreas A e B é semelhante. Pode-se diferenciar classificando as águas da subárea A como cloretadas-mistas e sódica-magnesianas a mistas, enquanto que na subárea B as águas seriam cloretadas-mistas. Na subárea C, por sua vez, a classificação dada pelo diagrama indica a presença de águas cloretadas sódicas. A classificação da subárea C provavelmente é decorrente do uso de pesticidas, agrotóxicos e/ou fertilizantes nos solos. Além disso, o fato da subárea C está localizado na porção oeste, onde o clima e a estrutura geológica começam a se aproximar da região mais árida, pode influenciar na composição hidroquímica das águas ali existentes.

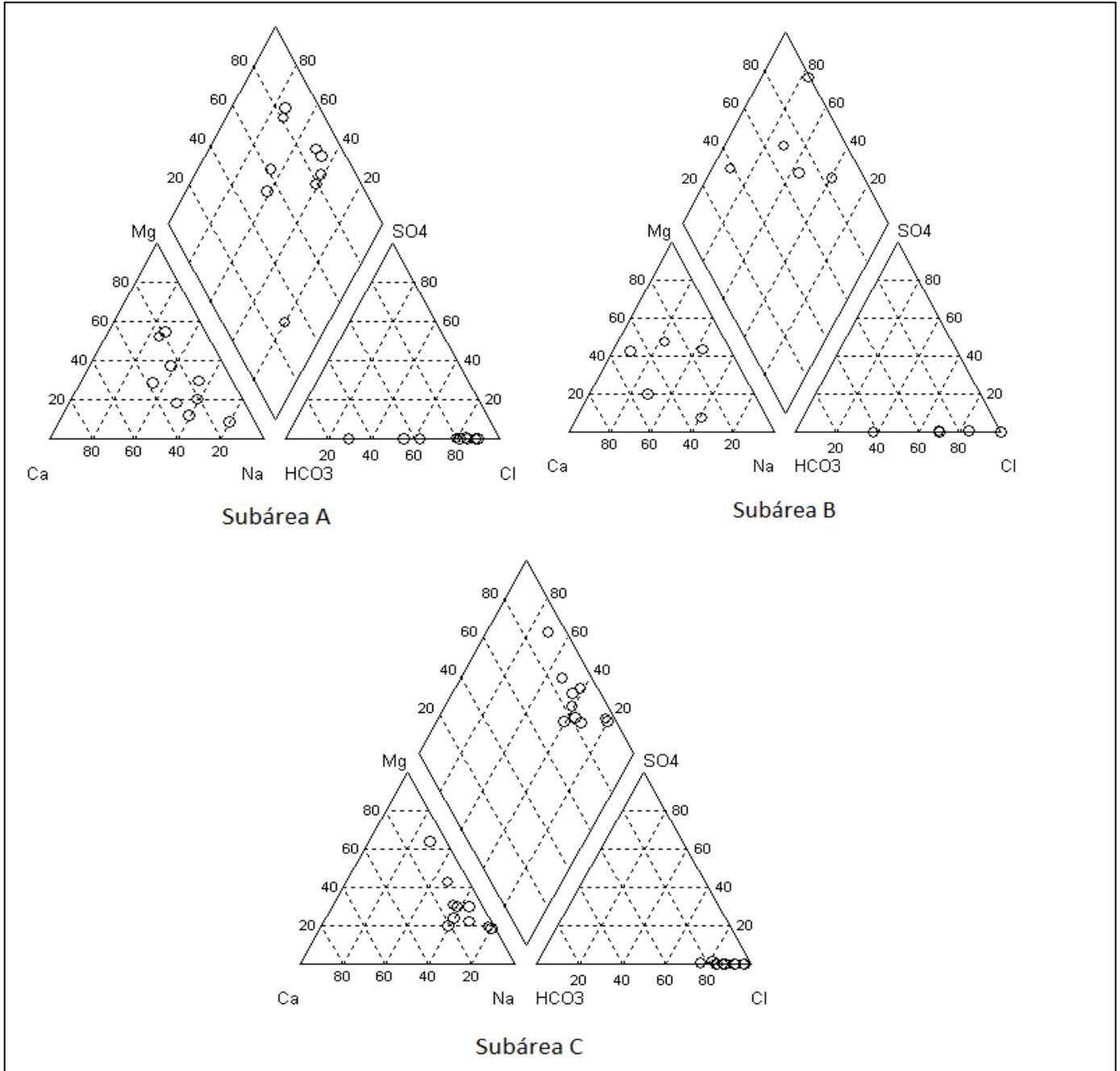


Figura 6.8: Diagramas de Piper com as amostras referentes a cada uma das subáreas definidas

Foram geradas também tabelas listando os tipos de águas ocorrentes em cada um dos poços amostrados, de acordo com os íons dominantes (tabelas 6.11, 6.12 e 6.13). Essas classificações corroboram com as classificações dadas a partir da interpretação dos diagramas de Piper para cada área.

Tabela 6.11: Tipos de águas ocorrentes na subárea A

ÁREA A	
AMOSTRA	TIPO DAS ÁGUAS
P-046	Na-Cl
P-070	Na-Ca-Cl
P-25	Na-Mg-Cl
PT-13	Ca-Na-Mg-Cl-HCO
PT-16	Mg-Na-Cl
PT-19	Na-HCO ₃ -Cl
PT-26	Mg-Na-Ca-Cl
PT-35	Na-Mg-Ca-Cl-HCO
PT-65	Na-Ca-Cl

Tabela 6.12: Tipos de águas ocorrentes na subárea B

ÁREA B	
AMOSTRA	TIPO DAS ÁGUAS
1132A	Mg-Ca-Na-Cl
P-65A	Mg-Na-Cl-HCO ₃
PA-P61A	Na-Ca-Cl
PT-49	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
PT-60	Ca-Na-Cl-HCO ₃

Tabela 6.13: Tipos de águas ocorrentes na subárea C

ÁREA C	
AMOSTRA	TIPO DAS ÁGUAS
P-02	Mg-Na-Cl
P-04	Na-Mg-Cl
P-090	Na-Mg-Cl
P-098	Na-Mg-Cl
P-115	Na-Mg-Cl
P-151	Na-Mg-Cl
P-153	Na-Cl
P-174	Na-Mg-Cl-HCO ₃
P2 CP	Na-Cl
PS-0077	Na-Cl

b) Diagrama de Durov Expandido

O diagrama de Durov é uma variação do diagrama de Piper, que relaciona os principais cátion e ânion das amostras de água (em meq/L), por meio de dois diagramas ternários. O diagrama de Durov Expandido, por sua vez, é uma visão alternativa, que associa os diagramas de Piper e de Durov, com a vantagem de melhor exibir os tipos hidroquímicos e alguns possíveis processos de evolução que possam ter ocorrido nas águas estudadas (figura 6.13).

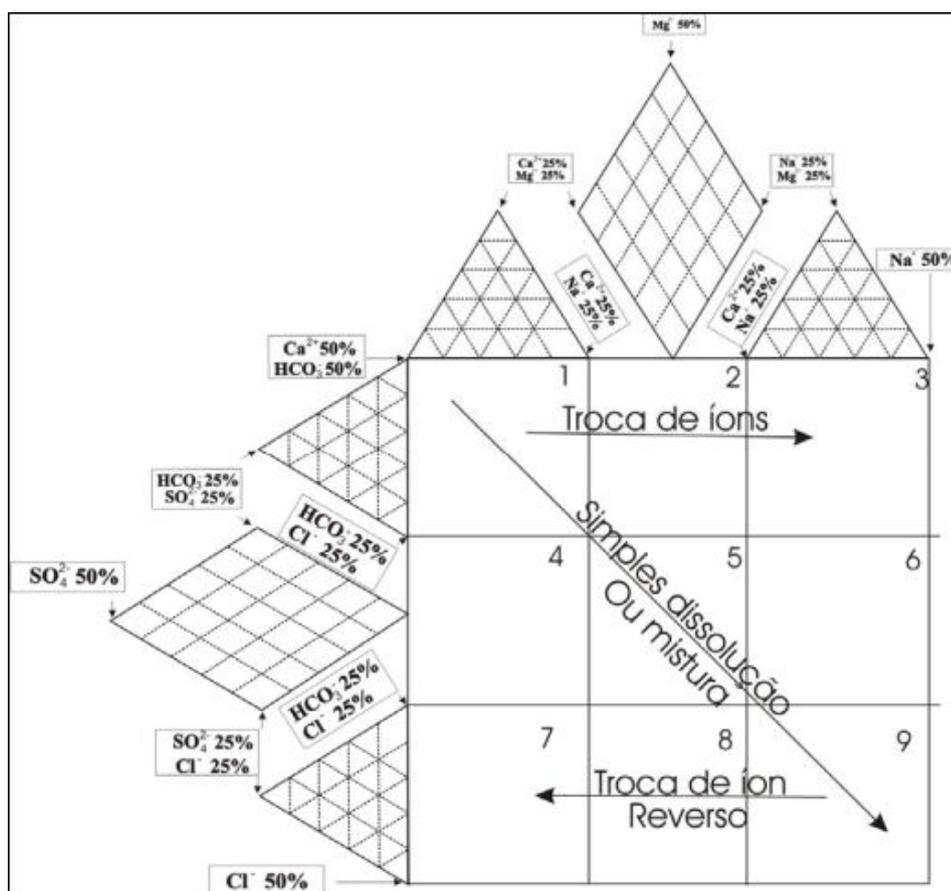


Figura 6.13: Diagrama de Durov Expandido, com subdivisões e processos amostrados.

No diagrama de Durov Expandido são identificados 9 campos com diferentes características hidroquímicas (Melo, Vasconcelos & Alves, 2012), as quais são descritas abaixo:

Campo 1) Águas bicarbonatadas e cálcicas dominantes, que frequentemente indicam águas de recarga em aquíferos calcários, arenitos e outros;

Campo 2) Águas predominantemente bicarbonatadas e magnesianas ou cátions indiscriminadamente, com Mg^{2+} dominante ou Ca^{2+} e Mg^{2+} importante, indicando águas

associadas com dolomitas, onde Ca^{2+} e Na^+ são importantes. Troca parcial de íons pode ser indicada nesse tipo de água;

Campo 3) Bicarbonatadas e sódicas dominantes, normalmente indicando águas com íons trocados;

Campo 4) Águas com SO_4^{2-} dominante ou ânions indiscriminadamente e Ca^{2+} dominante. A predominância desses íons normalmente indica recarga de águas em lavas e depósitos gipsíferos. Além disso, água exibindo simples dissolução ou mistura pode ser indicativo desse tipo de recarga;

Campo 5) Nenhum cátion ou ânion dominante, indicando águas que provavelmente sofreram simples dissolução ou mistura;

Campo 6) SO_4^{2-} dominante ou ânions indiscriminadamente e Na^{2+} dominante, caracterizando um tipo de água encontrado com pouca frequência, na qual ocorre provável influência de misturas;

Campo 7) Águas cloretadas e cálcicas dominantes, as quais não são frequentemente encontradas. Esse tipo de águas pode resultar de trocas de íons reversas de águas Na-Cl.

Campo 8) Cloretada dominante e nenhum cátion dominante: indica que as águas subterrâneas podem estar relacionadas a troca iônica reversa de águas Cl-Na;

Campo 9) Águas cloretadas e sódicas dominantes, as quais geralmente são águas em sua fase final. O diagrama de Durov não permite muita distinção entre águas Cl-Na.

O diagrama de Durov Expandido, com as amostras da área de estudo (figura 6.14), confirma a predominância de águas do tipo cloretadas sódicas, tendo em vista que a maioria das amostras foram plotadas no campo 9. Nota-se uma tendência de evolução das amostras em direção ao campo 8 e ao campo 7, sugerindo que as águas sofram processos de trocas de íons no sentido do fluxo subterrâneo.

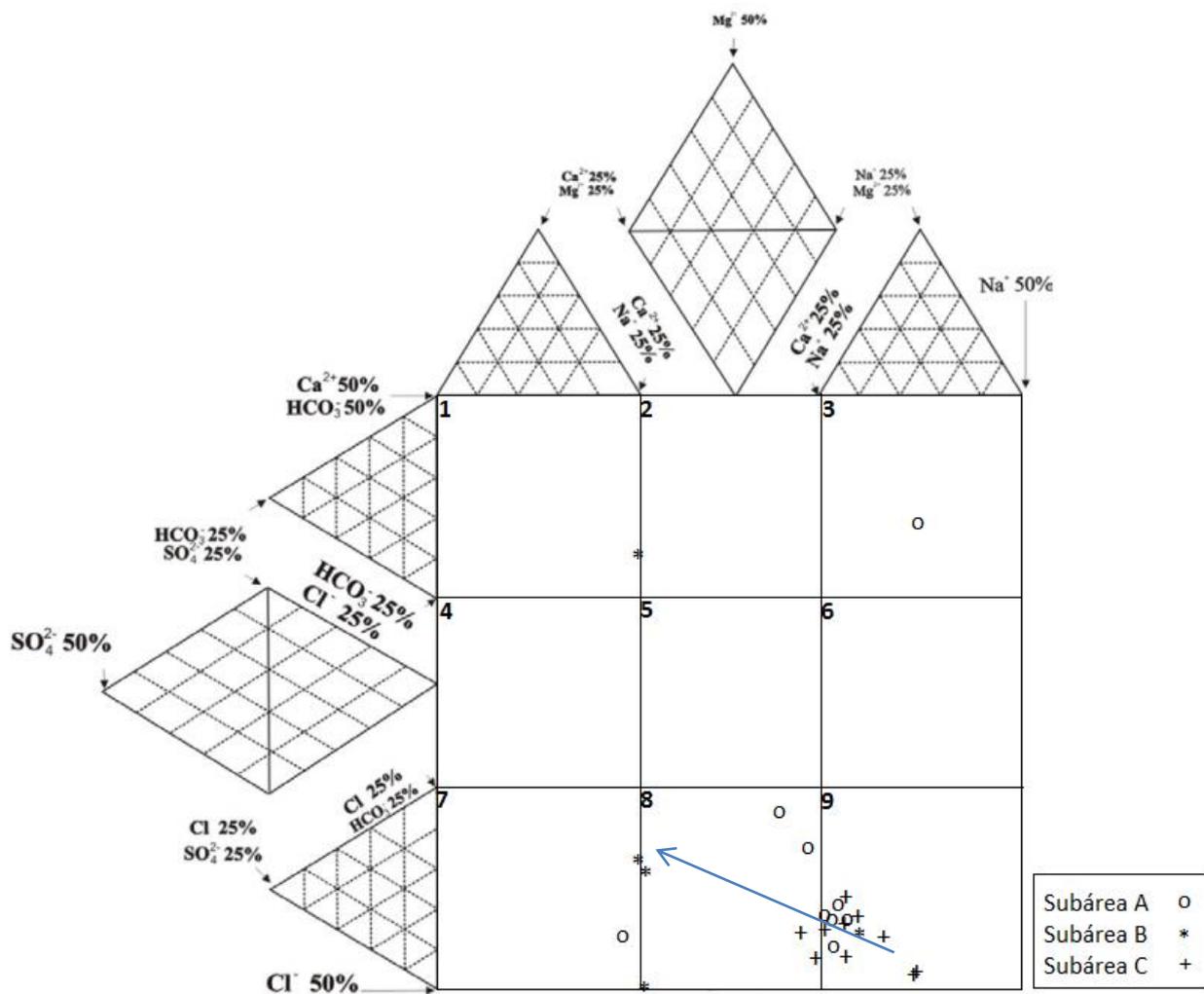


Figura 6.14: Diagrama de Durov Expandido com as amostras das três subáreas

6.3.5 Mapas hidroquímicos

A elaboração de mapas hidroquímicos contribui para a análise da variação dos parâmetros hidroquímicos de acordo com a área de estudo e com o sentido do fluxo subterrâneo, através de curvas de isovalores. É válido salientar que alguns dos parâmetros não foram utilizados nessa etapa, pois apresentaram concentrações muito baixas ou de pequena variação entre as amostras, gerando mapas não representativos.

Dentre os mapas gerados, o de isovalores de condutividade elétrica (figura 6.15) confirma que esse parâmetro diminui no sentido do fluxo subterrâneo. Conseqüentemente, a salinidade das águas diminui no mesmo sentido.

Os mapas correspondentes às curvas de isovalores de cloreto, sódio e nitrato (figuras 6.16, 6.17 e 6.18) apresentam comportamento semelhante, mostrando a diminuição das

concentrações desse parâmetro na direção do fluxo subterrâneo, indicando que as águas se diluem à medida que se aproximam da porção leste da área de estudo, o que também caracteriza a diminuição da sua salinidade. Nota-se que as concentrações desses sais ocorrem nos pontos mais afetados por antropização.

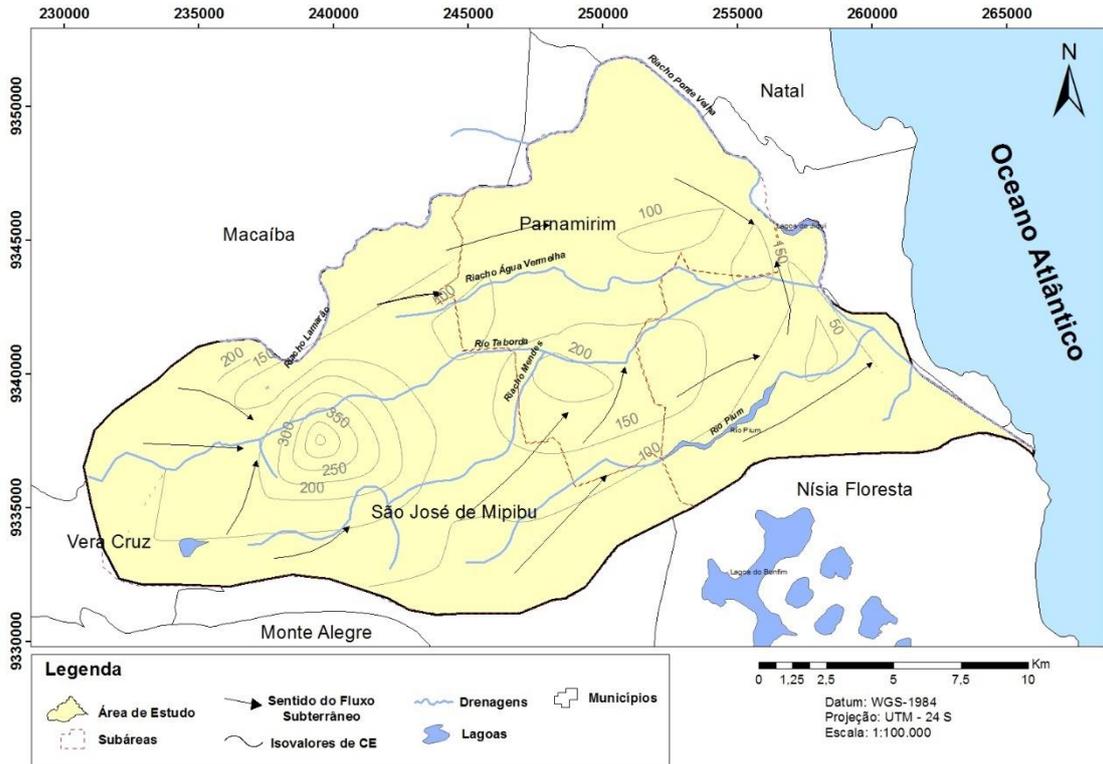


Figura 6.15: Curvas de isovalores de condutividade elétrica

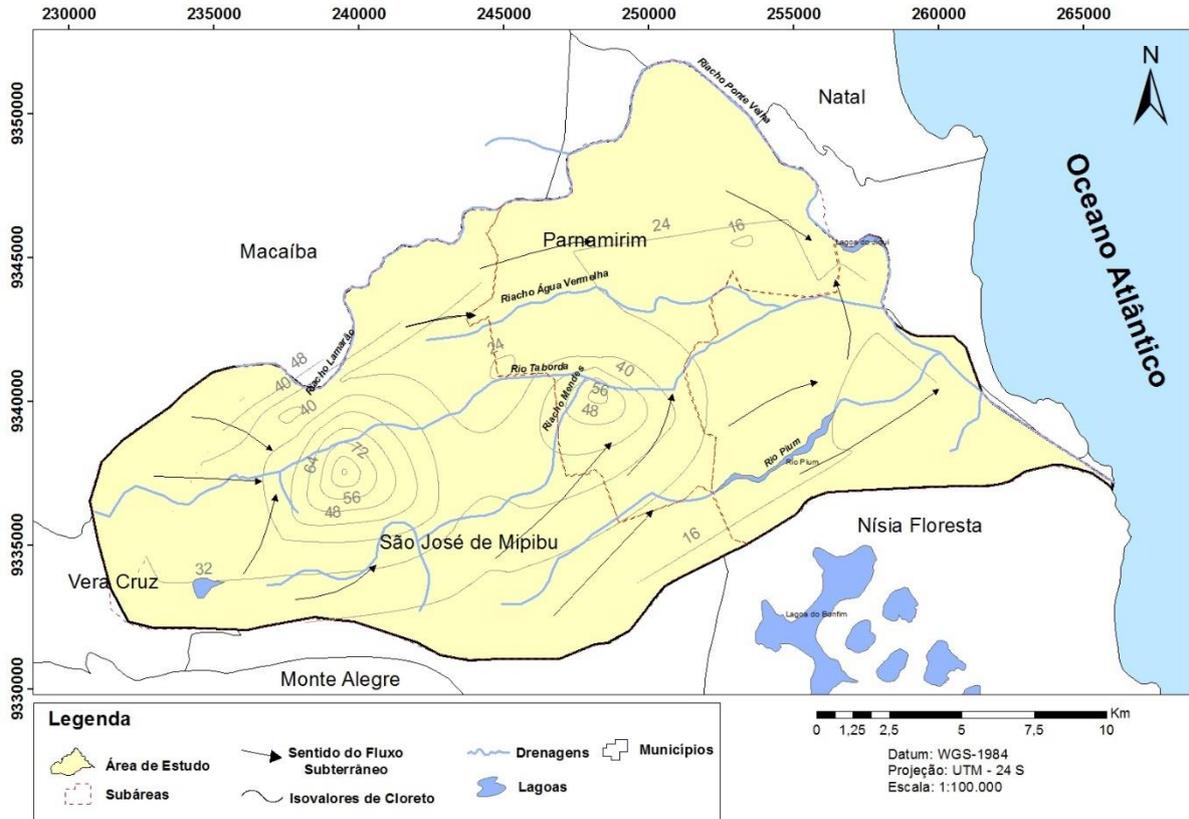


Figura 6.16: Curvas de isovalores de cloreto

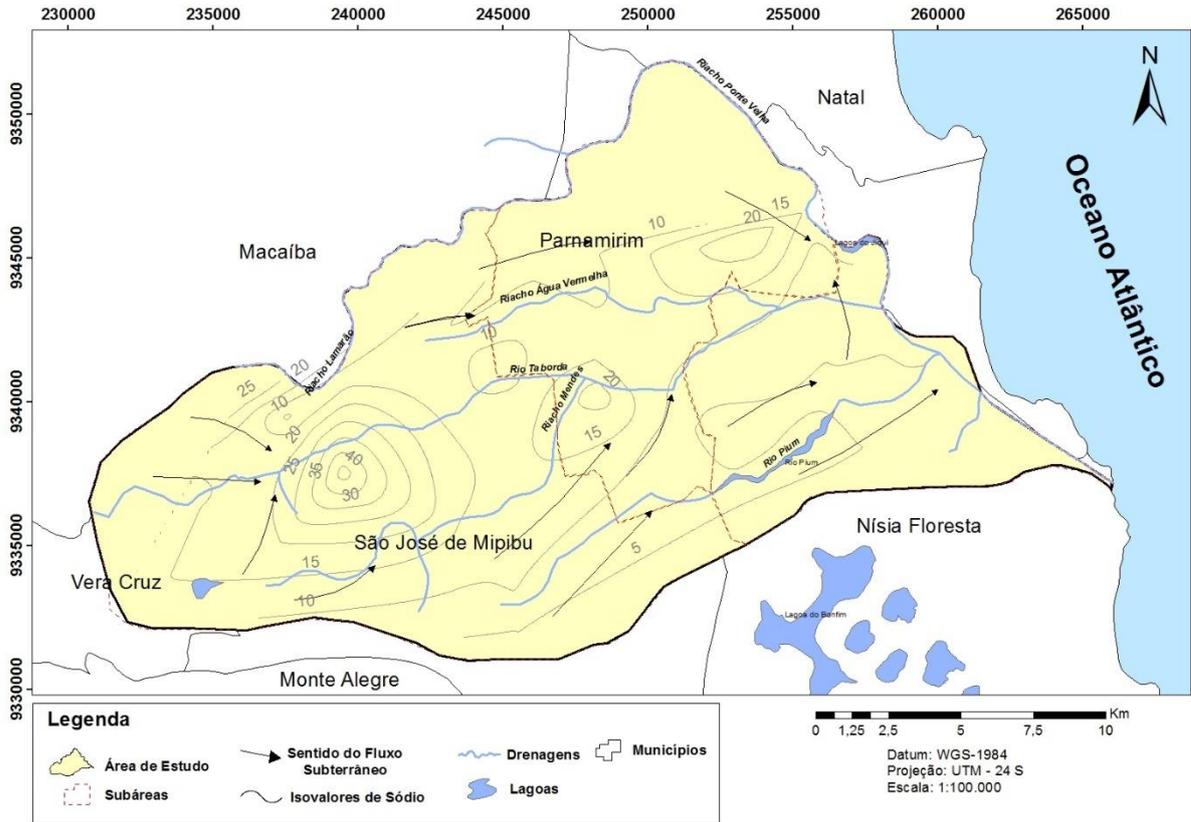


Figura 6.17: Curvas de isovalores de sódio

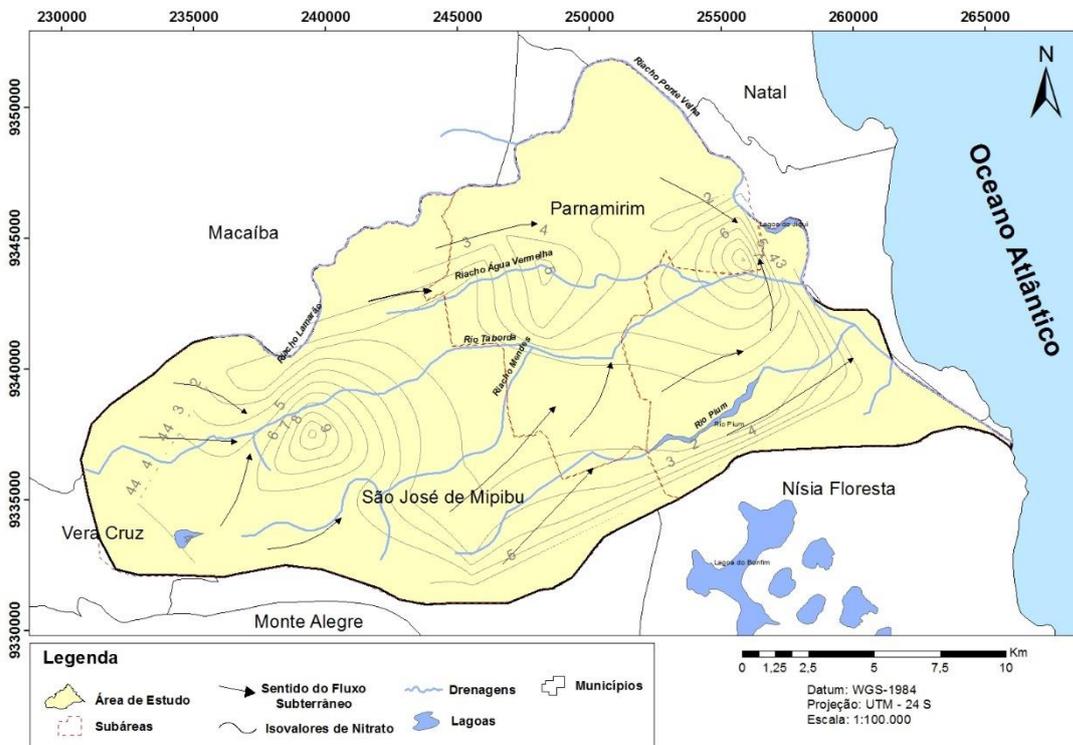


Figura 6.18: Curvas de isovalores de nitrato

6.4 Avaliação de qualidade para utilização das águas subterrâneas

Tendo em vista que as águas subterrâneas podem ter diversas utilizações, a análise química de seus constituintes permite verificar a qualidade das águas de acordo com os padrões estabelecidos para cada diferente uso. Nesta etapa do trabalho foi avaliada a qualidade das águas amostradas para uso industrial, uso em irrigação e para consumo humano.

6.4.1 Uso como consumo humano

O capítulo V da Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, trata do padrão de potabilidade da água para consumo humano. A partir dos dados referidos nos Artigos nº 37 e nº 39, a tabela 6.14 foi elaborada, compilando os valores máximos permitidos dos parâmetros que coincidem com os parâmetros analisados no corrente trabalho. As concentrações obtidas nas análises químicas das realizadas nos poços da área de estudo mostram valores menores do que os valores máximos permitidos para consumo humano, indicando que, para os parâmetros comparados, as águas estão dentro do padrão de potabilidade determinado.

Tabela 6.14: Valores máximos permitidos para consumo humano de alguns parâmetros em água, adaptado de Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde

PARÂMETRO	VALOR MÁXIMO PERMITIDO (mg/L)	MÉDIA DE CONCENTRAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO (mg/L)
Nitrato	10	2,68
Amônia	1,5	0,35
Cloreto	250	29,28
Dureza	500	24,76
Ferro	0,3	0,06
Sódio	200	12,50
Sólidos totais dissolvidos	1000	76,63
Sulfato	250	0,09

6.4.2 Uso para irrigação

Para a avaliação da qualidade das águas para utilização em irrigação, três parâmetros são utilizados e combinados, de modo a classifica-las: a salinidade, a sodicidade e a toxicidade de íons. A salinidade baseia-se nos valores de condutividade elétrica das águas. Na área de estudo, a condutividade média é de 133,72 $\mu\text{S}/\text{cm}$, configurando-se uma água de baixa salinidade (classe C1, conforme Richards, 1954). Essas águas podem ser utilizadas na irrigação

da maioria dos tipos de culturas e em quase todos os solos, exceto os de muito baixa permeabilidade.

A sodicidade, por sua vez, tem relação com o acúmulo de íons de sódio presentes na água, sendo determinado a partir do cálculo da razão de adsorção de sódio (RAS), que relaciona as concentrações (em meq/L) de sódio, cálcio e magnésio pela seguinte equação:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

A partir da equação citada, o valor calculado de RAS é de 1,091, caracterizando as águas da área como sendo de baixa sodicidade (classe S1, conforme Richards, 1954). Essa classificação também significa que essas águas podem ser utilizadas com segurança na maior parte dos solos existentes.

A toxicidade de íons diz respeito ao efeito de certos íons sobre as plantas, podendo afetar o rendimento de suas produções. A concentração de sódio na área de estudo equivale a 0,0054 mmolc/L. Segundo a classificação de Ayers & Wetoc (1991) esse valor é baixo o suficiente (menor que 3) para indicar risco de nenhum problema de toxicidade às plantas na área. Dessa forma, as águas podem ser classificadas como T1.

Sobrepondo esses resultados, pode-se classificar as águas da área de estudo como de tipo C1S1T1, evidenciando que possuem baixa salinidade, baixa sodicidade e baixa toxicidade. Sendo assim, as águas subterrâneas analisadas, em geral, não apresentam restrição de uso para irrigação.

6.4.3 Uso industrial

Os padrões de potabilidade de água para uso industrial são diversificados, tendo em vista que cada processo industrial requer qualidades específicas das águas (Manoel Filho, 2000). A figura 6.19 mostra um quadro com os valores máximos permitidos de concentração parâmetros para uso de água em diferentes tipos de indústrias.

Tipo de Indústria	Dureza	Alcalinidade	STD	NO ₃	Ca	Fe	Mn	Cl	SO ₄	pH
	(mg/L CaCO ₃)		(mg/L)							
Curtume	50	135	-	-	-	0,2	0,2	-	100	8
Têxtil	50	-	-	-	10	0,25	0,25	100	-	-
Cervejaria	50	75	1.000	10	200	0,1	0,1	100	-	7
Sucos e Refrigerante	25	128	850	-	-	0,2	0,2	250	250	-
Laticínios	180	-	< 500	30	-	0,3	0,1	30	60	-
Açucareira	30-100	-	-	-	20	0,1	-	-	-	-
Água de Refrigeração	50	-	-	-	-	0,5	0,5	-	-	-
Conservas	50-80	80-150	850	15	500	0,2	0,2	-	-	7,5
Papel	100	200	200	-	-	0,1	0,05	75	-	-

MATHESS, 1982; DRISCOLL, 1986; SZIKSZAY, 1993; apud SANTOS, 1997

Figura 6.18: Quadro com valores máximos permitidos de parâmetros para qualidade de água para uso em diferentes tipos de indústrias (Freitas, 2009)

Todos os parâmetros que foram analisados na área de estudo e que constam no quadro acima estão abaixo do limite de valores máximos permitidos para os usos listados, com exceção do cloreto, na subárea C. Essa subárea é a que apresenta as águas subterrâneas mais cloretadas, possuindo concentração média de 36,44 mg/L desse parâmetro, o que limita o possível uso de suas águas em indústrias de laticínios.

CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

As águas subterrâneas da Região de Parnamirim estão armazenadas no Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, de caráter predominantemente livre. O Sistema possui elevado potencial hidrogeológico e constitui a principal fonte de suprimento hídrico das populações urbanas e rurais da área de estudo. O estudo de qualidade das águas subterrâneas é, então, de suma importância para o conhecimento de suas condições de salinização e contaminação.

O estudo de uso e ocupação do solo realizado indicou diversos tipos de atividades que vem sendo desenvolvidas na área de estudo. Esse estudo associado ao reconhecimento da salinidade das águas subterrâneas, subsidiou a delimitação de três subáreas (subárea de urbanização/expansão urbana, subárea de sistema de lagoas e dunas e subárea de cultura de lavouras e vegetação antropizada). A avaliação hidrogeoquímica, realizada a partir das análises de diversos parâmetros em amostras coletadas na área contribuiu para a caracterização do comportamento da qualidade das águas.

Diante dos resultados discutidos, pode-se concluir que as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras apresentam, de modo geral, baixa salinidade, podendo ser ainda consideradas águas de boa qualidade. Quanto a dureza, as águas foram classificadas como águas brandas, de acordo com a classificação de Custodio & Llamas (2001). As representações gráficas em diagramas constataam que as águas subterrâneas da área estudada são prioritariamente cloretadas-sódicas a mistas, com composições variando entre magnesianas e bicarbonatadas.

Analisando individualmente as subáreas distintas, as concentrações dos íons nas amostras indicam que as águas da subárea B são as que mantem melhor qualidade em relação às outras. As subáreas C e A, respectivamente, mostraram maiores teores médios de íons dissolvidos, ou seja, de salinização das águas. Além disso, os valores obtidos de pH (de 4,65 a 6,86) indicam que as águas da subárea B tendem para uma situação de neutralidade maior do que as demais subáreas. Certamente, a preservação da qualidade das águas na subárea B é decorrente da menor influência antrópica nessa região. Junto a isso, um sistema de dunas e lagoas caracteriza essa subárea. As feições dunares favorecem a recarga do aquífero através da infiltração de águas pluviais, e esse processo de renovação contribui na diluição das concentrações iônicas das águas subterrâneas do sistema, mantendo sua baixa salinidade.

A situação de maior salinidade das águas da subárea C (em relação às outras subáreas) é muito provavelmente decorrente do possível excesso de aplicação de pesticidas, agrotóxicos e/ou fertilizantes nos cultivos de lavouras que são ali desenvolvidas, conforme observado no

estudo de uso e ocupação do solo, gerando fontes de contaminação. Esse fator pode influenciar no aumento da salinidade das águas (principalmente se houver a utilização de nitrato e cloreto), imprimindo riscos de diminuição de sua qualidade. Além disso, a localização geográfica dessa subárea (porção oeste da área) pode influenciar na composição hidroquímica das águas subterrâneas, tendo em vista que o clima e a estrutura geológica começam a tender para a região semiárida. As condições climáticas dessa região sugerem que a evapotranspiração da água ocorre em maior intensidade, fazendo com que os sais dissolvidos e ionizados aumentem sua concentração na água.

A condição de relativamente alta salinidade das águas da subárea A é diretamente relacionada ao processo de expansão urbana que vem se amplificando ao longo dos anos, inclusive sem a infraestrutura sanitária adequada (redes de esgotos, drenagens, distribuição adequada das águas) que acompanhe esse crescimento, o que influencia diretamente na qualidade as águas subterrâneas do aquífero, principalmente na região no município de Parnamirim.

Comparando o mapa de fluxo subterrâneo e os mapas hidroquímicos, nota-se que a condutividade elétrica e as concentrações de cloreto, sódio e nitrato diminuem no sentido do fluxo. Tendo em vista que esses parâmetros são indicadores de salinidade da água, conclui-se que sua salinidade diminui à medida que se aproxima da porção leste da área de estudo, sendo notável então que essas concentrações ocorrem nos pontos mais afetados por antropização. Aponta-se também que o mecanismo de recarga provavelmente contribui para a diluição desses íons existentes naquela porção.

O estudo específico de qualidade de águas subterrâneas para distintos usos confirma que as águas da área de estudo são, de forma geral, de boa qualidade. Foi diagnosticado que elas atualmente ainda podem ser utilizadas sem prejuízo para consumo humano, para irrigação e em indústrias. A exceção é das águas da subárea C, que tem seu uso limitado especificamente para indústrias de laticínios, devido sua concentração média de cloreto (36,44 mg/L).

A qualidade identificada nas águas subterrâneas na área de estudo sugere a possibilidade de continuidade do aproveitamento dessas águas para as diversas demandas da região.

A seguir recomendações são apresentadas que visam aprofundar os estudos e preservar a qualidade do recurso hídrico subterrâneo, além de promover a exploração equilibrada do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras:

- Realizar monitoramento mensal dos níveis d'água e das descargas bombeadas nos poços, medição de parâmetros hidroquímicos (condutividade elétrica,

sólidos totais dissolvidos e temperatura) seguido de coletas mensais de amostras de água para análise físico-química completa;

- Projetar perfuração de poços penetrantes no Sistema Aquífero Dunas-Barreiras em zonas de menor risco de contaminação por atividades antrópicas (subárea C);
- Realizar estudos específicos de reconhecimento de possíveis fontes de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo;
- Desenvolver ou aplicar alternativas que venham a mitigar a contaminação de águas subterrâneas oriundas de atividade agrícola;
- Exigir a instalação de infraestrutura e planejamento urbano adequados ao crescimento das cidades, melhorando e ampliando os sistemas de abastecimento de água, de saneamento e de drenagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, O. A. **Qualidade da Água de Irrigação. Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas**, 1 ed., 2010.
- ALVES, R. S. **O Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim, RN: Uso das Águas e Potencialidades**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN. 2015. 89p.
- ALVES, R. S., MELO, J. G., SILVA, C. T. X., OLIVEIRA, C. C. C. **Recursos Hídricos Subterrâneos Da Região De Parnamirim, RN: Uso Das Águas e Potencialidades**. Revista Águas Subterrâneas, n. 30, p. 37-52. Março, 2016.
- ANA – Agência Nacional das Águas. Ministério do Meio Ambiente. **Estudos Hidrogeológicos para a orientação do Manejo das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana de Natal**. V. 2 – Avaliação da Urbanização e de outras Atividades Antrópicas nas Águas Subterrâneas, 2012.
- ANGELIM, L. A. A.; NESI, J. R.; TORRES, H. H. R.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A.; VEIGA JÚNIOR, J. P.; MENDES, V. A., 2006. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 119p.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. GHEYI, H. R., MEDEIROS, J. F., DAMASCENO, F. V. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, Campina Grande: UFPB. 218 p. revisado, 1991.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G. & MATOS, R. M. D. 1990. **Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e “habitat” do petróleo na Bacia Potiguar**. In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. (eds.), **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, Petrobras, pp. 291-310.
- BEZERRA, F. H. R.; AMARO, V. E.; VINTA-FINZI, C.; SAADI, A. **Pliocene-quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*. 2001. p. 61-75.
- BORGES, A. N. **Implicações ambientais na bacia hidrográfica do Rio Pitimbú, RN, decorrentes das diversas formas de uso e ocupação do solo**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária da UFRN, 2002.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria N.º 1469**, 2000. (*) e **Portaria N.º 36/GM**, Brasília: Ministério da Saúde, 1990.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria N.º 518/2004**. Brasília: Ministério da Saúde, 2004.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria N.º 2.914**, Brasília: Ministério da Saúde, 2011.

- CÓRDOBA, V. C.; Jardim de SÁ, E. F.; SOUZA, D. C.; ANTUNES, A. F. **Bacia Pernambuco-Paraíba**. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2): 391-403. 2007.
- COSTA, W.D. & SALIM, J., 1972. **Aspectos estruturais da faixa sedimentar costeira da região de Natal-RN**, Revista Estudos Sedimentológicos, V2:133-144, Natal, RN.
- CPRM - **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte**, escala 1:500.000, 2006.
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Serviço geológico do Brasil. 2005. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea - **Diagnóstico dos municípios do Rio Grande do Norte**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso em setembro de 2015.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**. 2ed. Barcelona: Omega. 2001.
- DREVER, JAMES. I. **The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments**, 3rd ed. p. 438. 1997.
- DUARTE, C. R.; PETTA, E. A.; MEDEIROS, C. N.; ARAUJO, L. P. **Mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do rio Pitimbu, RN**. Anais II Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Aracaju, SE, 2004.
- FAUST, S.D. & ALY, O.M. (Eds.). **Chemistry of Natural Waters**. Butterworths Publishers, Sydney, 400p. 1981.
- FEITOSA, E.C. **Plano estadual de recursos hídricos do Rio Grande do Norte - os recursos hídricos subterrâneos**. HIDROSERVICE Engenharia Ltda. Natal, v.1. 96 p. Relatório diagnóstico. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. 1997.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. Prentic Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1994.
- FOSTER, S; HIRATA, R; GOMES, D; D'ELIA, M; PARIS, M. **Protección de la calidad Del Agua Subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. Madri: Ediciones Mundi – Prensa. 2003.
- FREITAS, L. C. B. **Qualidade das Águas Subterrâneas - Área no Município de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza – Ceará**. Dissertação de mestrado. UFC. 2009.
- IPT. **Estudo Hidrogeológico Detalhado do Estado do Rio Grande do Norte**. Instituto de Israfilov, R.G. Anthropogenic Changes to Hydrogeological Conditions in Urban Areas. Urban Groundwater Management and Sustainability. NATO Science Series. Volume 74, pp 11-28. 2006.
- KOBAYASHI, R. T.; MOREIRA, L. F. P.; ANDRADE, H. T. A. **Pitimbu River low land portion water and sediment monitoring data, Natal, Brazil**. International Congress an Environment Moddeling and software, Ottawa, Canada, 2010.

LLOYD, J. W.; HEATHCOTE, J.A. **Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, an introduction.** Oxford: Clarendon Press, 1985.

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

LUCENA, L. R. F. **Implicações Tectônicas na Hidrologia do Aquífero Barreiras e Sistema Lacustre do Bonfim, Nísia Floresta-RN.** Dissertação(Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1999.

MABESOONE, J. M.; ROLIM, J. L.; CASTRO, C. **Late cretaceous and Cenozoic history of northeastern, Brasil.** Geologie Mijnbouw, 1977. p. 56-129-139.

MABESOONE, J.M. et al. **Revisão Geológica da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Parte do Rio Grande do Norte.** Estudos Geológicos. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 252 p. 1991.

MANOEL FILHO, J. **Contaminação das Águas Subterrâneas.** Cap.06. In: Feitosa, C.A.F. & Filho, J.M. 109-132p, 2000.

MATOS, R. M. D. 1987. **Sistema de rifts cretáceos do Nordeste Brasileiro.** In: Seminário de Tectônica da Petrobrás, 1, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987. PETROBRAS/DEPEX, Rio de Janeiro, Atas, pp. 126-159.

MELO, J. G. **Avaliação das potencialidades e condições para a exploração das águas subterrâneas da área de Emaús, Parnamirim - RN.** Recursos hídricos e qualidade das águas. Departamento de Geologia da UFRN. Natal, 2008.

MELO, J. G. **Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal – RN.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1995.

MELO, J. G.; ALVES, R. S.; DA SILVA, J. G., **Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Pirangi, RN.** Revista Águas Subterrâneas, 28(2): 68-81. 2014.

MELO, J. G.; VASCONCELOS, M. B.; ALVES, R.S. **Origem e Mecanismos de Salinização das Águas Subterrâneas na Borda Sul da Bacia Potiguar, RN.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol. 17, n.4, 161-169, 2012.

MELO, J. G.; VASCONCELOS, M. B.; OLIVEIRA, J.; MEDEIROS, J. I. **Avaliação das condições hidroambientais e definição de estratégias de manejo dos recursos hídricos nos domínios urbanos e periurbanos da zona norte de Natal/RN.** Relatório final de pesquisa. MCT/CNPq/CT-Hidro/CT-Agro, 2009.

MELO, J.G.; ALVES, R.S.; SILVA, J.G. **Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Pirangi, RN**. Revista águas Subterrâneas, n. 28, p. 68-81 ago. 2014.

MELO, J.G.; VASCONCELOS, M. B.; DE MORAIS, S. D.; ALVES, R. S. **Avaliação hidrogeológica da Zona Norte da cidade de Natal, RN, e os problemas associados ao desenvolvimento urbano**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH. V. 17, no1, p. 123-134, 2012.

NOGUEIRA, F. C. C.; BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, D. L. **Deformação rúptil em depósitos da formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar**. Geol. USP, Sér. cient. [online], vol.6, n.2. São Paulo, p. 51-59. 2006.

PESSOA NETO, O. C.; SOARES, U. M.; DA SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; DE SOUZA, C. A. V. **Bacia Potiguar**. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2): 357-369. 2007.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and álcali soils**. USDA Agriculture Handbook, 60, Washington D.C.: U.S. Salinity Laboratory. 160p. 1954.

SANTOS, A. C.; FEITOSA, F. A. C. e FILHO, J. M. (Coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.

SERHID – Secretaria do Estado de Recursos Hídricos. **Caracterização Hidrogeológica Dos Aquíferos. Plano Estadual De Recursos Hídricos**. Relatório HE-1358-R11-0798. Hidroservice/SERHID, 1998.

SILVA JÚNIOR, L. G. A.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. **Composição Química de Águas do Cristalino do Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 3, n. 1, 1999.

SILVA, R. C. A.; ARAÚJO, T. M. **Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA)**. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 1019-1028, 2003.

TANJI, K. K.; ROLLINS, L. e SUYAMA, P., **The Salinity Management Guide**, University of California at Davis, 2007.

Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras da Região de Parnamirim, RN

Quality of Groundwater of the Dunas-SAB Aquifer System of Parnamirim Region, RN

RESUMO

A área de estudo, inserida na bacia do rio Pirangi, RN, abrange 370 km² na região do município de Parnamirim, apresentando alto potencial hidrogeológico. Esse estudo objetivou caracterizar a qualidade das águas subterrâneas e diagnosticar modificações hidroquímicas provenientes do desenvolvimento de atividades urbanas e agrícolas. Desenvolveu-se uma avaliação de uso e ocupação do solo, identificando atividades existentes que possam influenciar na contaminação das águas. Com essas características dividiu-se a área de estudo em três subáreas, para comparar a hidroquímica das águas entre elas. O reconhecimento hidrogeoquímico realizou-se por análises químicas de amostras, obtendo dados de CE, STD, cátions e ânions principais, e outros parâmetros. Interpretou-se os resultados das análises, mapas hidroquímicos e diagramas de Piper, Stiff e Durov Expandido, identificando a fácies hidroquímica predominante como cloretada sódica. As águas do SADB apresentam, em geral, boa qualidade, com baixa salinidade. Identifica-se uma tendência à contaminação a norte da área, próxima ao centro de Parnamirim, onde cresce a expansão urbana. Ocorre também essa tendência nas regiões com agropecuária, a oeste da área. A porção leste, que engloba sistemas de lagoas e dunas, apresenta águas com menores salinidades. Nota-se que a salinidade das águas diminui na direção do fluxo subterrâneo.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Dunas-Barreiras; Hidroquímica; Contaminação das águas.

ABSTRACT

The study area, inserted in the basin of the river Pirangi, RN covers 370 km² in the Parnamirim region. Has a high potential hydrogeological. This study aimed to characterize the quality of groundwater and diagnose hydrochemical changes due the urban development and agriculture. An assessment of use and occupation of land was made, identifying existing activities and the might influence water contamination. Based on these characteristics, the study area was divided in three subareas, to compare the hydrochemical between them. The Hydrogeochemical recognition was performed by chemical analysis of samples, obtaining such as EC, TDS, major cations and anions and other parameters. Interpreted the results of the analysys, hydrochemical maps and Piper, Stiff and Expanded Durov diagrams, identifying the predominant hydrochemical facies as sodium chlorinated. The BAS groundwater have generally good quality with low salinity. There is a tendency to

contamination originating from the northern of the area, on the center of Parnamirim city, which has been undergoing urban expansion processes. The same tendency is seen in the portions with agriculture, in the western area. The east portion of the area, which comprises ponds and dunes systems, is the one with lower salinity levels. Is noted that the salinity of the water decreases in the direction of groundwater flow.

Keywords: Dunas-Barreiras Aquifer System; Hydrochemical; Water Contamination.

INTRODUÇÃO

Este artigo foi elaborado a partir de resultados obtidos em um projeto de pesquisa vinculado ao projeto da rede FINEP/CNPq-CT-Hidro, o qual intitula-se como “Potencialidades e Definição de Estratégias de Manejo das Águas Subterrâneas da Região de Parnamirim, RN”.

O estudo discute os aspectos hidrogeoquímicos e de qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na região de Parnamirim que abrange o município de Parnamirim e trechos de municípios adjacentes. Foi realizado com base em dados já existentes, reconhecimento de salinidade “*in loco*”, estudo de uso e ocupação do solo, além de resultados de análises químicas provenientes de uma campanha de amostragem na área. Estudos anteriores indicam que as águas do Aquífero Dunas-Barreiras, em geral, apresentam baixa salinidade (Stein et al., 2012). Estudos como Silva (2014), Stein (2011), Lucena (2008), entre outros, caracterizam o Aquífero em função de suas potencialidades e sua qualidade no município de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte. Porém, em áreas adjacentes, como a região de Parnamirim, estudos sobre a qualidade dessas águas subterrâneas são mais escassos. Os recursos hídricos subterrâneos dessa região apresentam elevado potencial e vem sendo cada vez mais explorados pela população, haja visto o crescimento cada vez mais elevados das demandas hídricas.

A taxa de crescimento da cidade de Parnamirim é elevada (cerca de 7,8% ao ano, segundo Fernandes, 2010) e a infraestrutura urbana da cidade, composta por abastecimento de água, saneamento e drenagem não é adequada para acompanhar esse crescimento. Além disso, a exploração das águas disponíveis muitas vezes ocorre de forma desordenada, sem o ideal manejo dos recursos disponíveis (MELO et al, 2014). Esses fatores geram impactos ambientais, oferecendo riscos potenciais de contaminação para as águas subterrâneas, podendo afetar inclusive na saúde da população (MELO e QUEIROZ, 2001).

Em ambientes urbanos em geral as condições de fluxo subterrâneo comumente são modificadas, bem como os riscos de contaminação para as águas situadas sob o seu domínio são elevados,

principalmente em países em desenvolvimento. Na zona rural, os setores que apresentam desenvolvimento de atividades agrícolas também causam preocupação ambiental na área, tendo em vista que nos sistemas de irrigação não são realizados controle de uso de produtos defensivos agrícolas, podendo proporcionar riscos na qualidade das águas subterrâneas (MELO et al, 2014).

O mapeamento de uso e ocupação do solo é um componente metodológico de essencial importância em estudos ambientais, pois permite conhecer modos de utilização dos espaços e identificar áreas com possíveis atividades, as quais possam gerar desequilíbrios ambientais, tais como contaminação de águas superficiais e subterrâneas, perda de capacidade produtiva de solos, erosão, entre outros.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange uma superfície de 370 km² e está localizada na bacia hidrográfica do Rio Pirangi, no Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Ela está limitada a Norte pelo Rio Pitimbu e a Leste pelo rio Pirangi, e compreende grande parte do município de Parnamirim e parcialmente os municípios de Nísia Floresta, São José de Mipibu, Macaíba e Vera Cruz (Figura 1). A bacia do Rio Pirangi é formada pelos rios Pitimbu, Taborda e Pium, além dos Riachos dos Mendes, Água Vermelha e Taborda e das lagoas do Jiqui, de Pium e a lagoa Azul.

O Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, assim designado por Melo (1995), constitui a principal fonte do RN de suprimento hídrico com água potável, utilizada tanto no abastecimento de populações urbanas e rurais, quanto no desenvolvimento de culturas irrigadas e no desenvolvimento industrial (ANA, 2012). Apresenta caráter poroso intersticial, geometria tabular e estratos horizontalizados e com espessuras variadas de acordo com a compartimentação estrutural. É um aquífero denominado de livre a semiconfinado, a medida que ocorrem camadas semiconfinantes de baixa permeabilidade na porção superior da camada aquífera, determinando algum confinamento aos estratos inferiores do aquífero. É composto por sedimentos Tercio-Quaternários do Grupo Barreiras e capeado por sedimentos cenozoicos (aluviões e dunas) que ocorrem sobrepostos a sedimentos carbonáticos mesozoicos de idade Cretácea (Figura 2).

No contexto geomorfológico, dominam na área de estudo os Tabuleiros costeiros e as planícies fluviais correspondentes aos vales dos rios. A espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras (desconsiderando os níveis argilosos), varia de 15,47 a 56,5 m (Alves, 2015), de acordo com a compartimentação estrutural na área. Com dados fornecidos pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e do projeto ao qual esse artigo se vincula, estima-se que o volume de 33,5x10⁶ m³ é explorado do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras anualmente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos de estudo e materiais utilizados no trabalho foram:

Uso e ocupação do solo:

Utilizando imagens de satélite foi gerado um mapa preliminar da área de estudo no âmbito de uso e ocupação do solo. Em seguida, trabalhos de campo permitiram a formatação do mapeamento, estabelecendo melhor os limites entre os tipos de uso identificados. A partir daí delimitou-se três subáreas, para que se identifique o comportamento e a qualidade das águas em relação ao fluxo subterrâneo.

Reconhecimento da salinidade das águas:

Uma campanha de aquisição de dados “*in loco*” de condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD), parâmetros que caracterizam a salinidade das águas subterrâneas, foi realizada em poços previamente cadastrados pelo projeto vinculado. A seleção dos pontos de coleta contemplou tanto regiões urbanizadas quanto regiões da zona rural. Para a obtenção dos dados utilizou-se o Medidor de Condutividade Portátil Modelo – TEC-4P-MP, que mede os parâmetros através de uma célula de vidro e de um sensor de temperatura, em amostras de aproximadamente 100 mL de água coletadas em cada poço selecionado.

Coleta de amostras e análises hidroquímicas:

Em 27 poços distribuídos ao longo da área de estudo foram coletadas amostras de águas subterrâneas em poços tubulares e cacimbões, as quais foram devidamente armazenadas, seguindo as normas padronizadas para coleta, preservação e transporte de amostras, e encaminhadas para laboratório de análises químicas. Os poços amostrados foram selecionados a partir dos poços cadastrados, dos analisados anteriormente e de acordo com a disponibilidade de acesso naquele momento, na intenção de permanecer abrangendo homogeneamente toda a área de estudo. As amostras foram coletadas nas descargas de água dos poços operantes ou com o auxílio de um *bayler*, nos pontos que não dispunham de dispositivos de bombeamento. Foram determinadas, para cada amostra, as concentrações dos cátions principais (sódio, cálcio e magnésio), dos ânions principais (cloreto, sulfato e bicarbonato), além do ferro, potássio, carbonato, nitrato, amônia, boro, pH, CE, STD e dureza total. Registrou-se também as temperaturas das amostras durante cada coleta.

Avaliação hidrogeoquímica e interpretação dos dados de análises químicas coletados:

Um balanço de massas verificou a confiabilidade das análises hidroquímicas e selecionou quais resultados seriam válidos para interpretação. O cálculo determina que a concentração total dos cátions

(em meq) deve ser aproximadamente igual à concentração dos ânions (em meq), definindo a seguinte fórmula:

$$\text{Erro do Balanço Iônico} = \frac{\text{somatório dos cátions} - \text{Somatório dos ânions}}{\text{somatório dos cátions} + \text{Somatório dos ânions}}$$

Os resultados de três amostras foram excluídos das interpretações por apresentarem erro maior que 10%, segundo o balanço de massas. Os parâmetros analisados foram tabelados e seus comportamentos foram observados para cada uma das subáreas. Com o uso dos *softwares* *AQUACHEM 3.7* e *ARCGIS 10.0*, foram elaborados e interpretados diagramas de Piper e Durov Expandido, além de mapas hidroquímicos que permitem visualizar a distribuição de concentração de cada parâmetro pela área, caracterizando as águas e sua qualidade.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram delimitadas três subáreas a partir da identificação dos principais tipos de uso e ocupação do solo na área de estudo, conforme observa-se no mapa da figura 3. No norte da área, porção que abrange o bairro central de Parnamirim e adjacências, identifica-se uma “**área urbanizada e de expansão urbana**” (subárea A), onde são observadas características de antropização e urbanização já consolidada, além de abertura de vias e construção de loteamentos, indicando o avanço do crescimento urbano. Essa área não possui infraestrutura adequada de drenagem e de esgotamento sanitário, oferecendo riscos de contaminação das águas subterrâneas do aquífero. Na porção leste identificou-se uma “**área de ecossistema de lagoas e dunas**” (subárea B), região pouco povoada e ainda bastante preservada ambientalmente, onde a presença de grandes lagoas evidencia o potencial hídrico da região. As porções sul e oeste da Bacia foram reconhecidas como “**área de cultura de lavouras e vegetação antropizada**” (subárea C), em que se identificam atividades agrícolas diversas (feijão, batata, macaxeira, cana-de-açúcar, entre outras) e pecuária, além de uma pequena área de vegetação que vem sendo antropizada de forma gradual e que seguirá a mesma função. São utilizados fertilizantes e pesticidas no desenvolvimento dessas atividades, o que estabelece risco de contaminação da água subterrânea.

Os resultados das medições realizadas “*in loco*” de condutividade elétrica e de sólidos totais dissolvidos indicaram que a salinidade das águas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, em geral, é baixa. Essa análise contribuiu para subsidiar a delimitação das três subáreas, tendo em vista a distribuição dos valores desses parâmetros pela área de estudo, conforme mostra a figura 4.

A avaliação hidrogeoquímica da área de estudo foi realizada de modo a identificar os tipos de águas a partir dos seus íons dominantes e caracterizar a qualidade das mesmas em cada subárea de acordo com as normas vigentes. Os resultados válidos das análises químicas das amostras coletadas na área de estudo foram submetidos a estatística descritiva para cálculo de média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo, e os valores obtidos foram agrupados de acordo com as subáreas em que as amostras se localizam, e foram conforme tabelas 1, 2 e 3. A seguir serão discutidos os principais resultados.

O pH da área total varia de 4,50 a 7,54, com o valor médio de 5,92; portanto, de modo geral, águas ácidas. Localmente, a subárea B apresenta a maior média de pH, equivalente a 6,03. Ou seja, as águas dessa subárea tendem mais para uma situação de neutralidade do que as das outras porções.

O valor mínimo da dureza (D) obtido, foi de 10,00 mg/L de CaCO_3 e o máximo de 76,00 mg/L de CaCO_3 , ambos na subárea B. A média total foi de 24,76 mg/L de CaCO_3 , com desvio padrão de 14,20 mg/L de CaCO_3 . As águas, portanto, são classificadas como águas brandas (segundo Custodio & Llamas, 2001).

A CE é o parâmetro utilizado para avaliar a salinidade das águas subterrâneas. Ela varia de 36,90 a 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na área total, diferenciando-se consideravelmente em cada subárea. A subárea A apresenta média de 134,16 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a B média de 85,68 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a subárea C com média de 157,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Desse modo, tem-se que as porções mais ao norte e mais a oeste da área de estudo (subáreas A e C, respectivamente) apresentam valores de CE bem maiores do que os valores da subárea B, indicando que a salinidade dessa última área é a mais baixa de toda a região estudada. O mapa hidroquímico da figura 5 indica, por meio de isolinhas, que a condutividade elétrica e, conseqüentemente, a salinidade das águas, diminuem no sentido do fluxo subterrâneo. Os valores de sólidos totais dissolvidos seguem o mesmo comportamento, tendo em vista que esses parâmetros possuem uma relação direta de proporcionalidade.

A maior média de íon nitrato foi na subárea C (3,18 mg/L), seguido na subárea A (2,95 mg/L) e, em menor, valor na subárea B (1,21 mg/L). Esses valores indicam que a porção que apresenta maior adensamento de lavouras (subárea C) possui concentração maior de nitrato, provavelmente devido ao uso de pesticidas, agrotóxicos e/ou fertilizantes nos solos, que acaba infiltrando para as águas subterrâneas. O teor ocorrente na subárea A é proveniente da crescente urbanização ocorrente na região. A região de lagos e dunas (subárea B), por sua vez, é a que se mantém mais preservada quanto a esse tipo de contaminação. No contexto do fluxo subterrâneo na área, o mapa de isovalores de nitrato (figura 6) representa que essas concentrações diminuem no sentido do fluxo.

O cloreto apresenta menor valor médio na subárea B (15,80 mg/L), e menor valor de desvio padrão (4,86). Isso significa que esse grupo de amostras possui menor variação de valores para esse

parâmetro, além de ser a que menos concentra esse íon. A maior média se deu na subárea C (36,44 mg/L), enquanto que a subárea A apresentou média de 28,82 mg/L, provavelmente devido a infiltrações oriundas da ação antrópica e urbanização nessas localidades.

Na subárea B, o teor médio do sódio foi de 4,28 mg/L, variando apenas de 2,16 até 7,13 mg/L, configurando então a subárea com a menor média e o menor desvio padrão também deste íon. Provavelmente a maior ocorrência de intemperismo antrópico nas subáreas A e C justifica os maiores teores médios nessa região, de 12,62 mg/L e 16,49 mg/L, respectivamente.

Os íons cloreto e sódio costumam ocorrer associados, e a equivalência observada nas análises químicas confirmam esse fato. Os mapas de isovalores também ilustram a diminuição desses íons na área seguindo o sentido do fluxo subterrâneo (figuras 7 e 8).

O potássio também segue a tendência de comportamento do cloreto e do sódio. Dessa forma, a média obtida desse íon de menor valor na subárea B (1,50 mg/L), enquanto que a subárea A apresentou média de 2,85 mg/L e a subárea C 3,50 mg/L. Os valores de todas as amostras analisadas estão dentro dos valores que normalmente se concentra o íon potássio nas águas subterrâneas (inferior a 10 mg/L).

O íon sulfato apresentou maior média (0,12 mg/L) na subárea C, ainda assim, os valores são todos relativamente baixos (de 0 a 0,60 mg/L), muito menores do que os valores máximos permitidos estabelecidos pelo padrão de potabilidade de água para o consumo humano (BRASIL, Portaria nº 1469/GM em 29 de dezembro de 2000), equivalente a 250 mg/L.

O íon bicarbonato apresentou menor média na subárea C (7,59 mg/L), menor desvio padrão (de 3,91 mg/L). Nas subáreas A e B, por sua vez, os valores médios desse parâmetro são bem maiores, de 20,73 mg/L e 17,91 mg/L, respectivamente. Os valores de desvio padrão também são bem maiores, indicando grande amplitude de variação de teores entre as amostras desses grupos.

O teor de cálcio ocorre em menor valor na subárea C, seguido do valor na subárea A e, em maior valor, na subárea B, que é onde se observa também o maior desvio padrão. O teor de magnésio, por sua vez, apresenta comportamento oposto na área de estudo, onde o menor valor é o da subárea B, depois o da subárea A e, por último, o da subárea C.

Os resultados de amônia, carbonato, ferro e boro foram irrelevantes para a avaliação hidroquímica.

A partir dos dados do reconhecimento descrito, foram definidas as fácies hidroquímicas existentes no aquífero, através de diagramas trilineares de Piper, onde foram plotadas as concentrações, em meq/L, dos principais íons existentes nas águas subterrâneas em cada subárea, conforme visto nas figuras 9, 10 e 11: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} . O comportamento das águas amostradas referentes às subáreas A e B é semelhante, pode-se diferenciar classificando as da subárea A como cloretadas-mistas e sódica-magnesianas a mistas, e as da subárea B as águas como cloretadas-mistas

em geral. Na subárea C, por sua vez, o diagrama indica prioritariamente a presença de águas cloretadas sódicas.

Os resultados das análises químicas foram também representados no diagrama de Durov Expandido (Figura 12), o qual fornece mais informações sobre os tipos hidroquímicos e sobre a evolução da qualidade das águas do que o diagrama de Piper (HUSSEIN, 2004; LLOYD; HEATHCOTE, 1985; PETALAS & DIAMANTIS, 1999). A localização das amostras no diagrama de Durov Expandido confirma a predominância de águas do tipo cloretadas sódicas (campo 9). A partir daí, existe também uma tendência de evolução das amostras em direção aos campos 8 e 7, o que sugere a ocorrência de trocas iônicas de águas $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$.

A tabela 4 apresenta a matriz de correlação obtida para determinados parâmetros hidroquímicos das águas subterrâneas estudadas, tais como condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e bicarbonato.

A condutividade elétrica, em geral, é o parâmetro utilizado na análise da salinidade das águas, tanto pelas facilidades de medição como principalmente pela elevada correlação que o mesmo apresenta com os sólidos totais dissolvidos. A correlação chega a ser perfeita (100%) no caso do presente estudo.

A condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos apresentam altas correlações com o cloreto, o potássio e o sódio. A obtenção desses coeficientes de correlação ratifica o predomínio destes íons em relação aos demais, sendo esses os principais contribuintes da salinidade das águas. A boa correlação dentre esses íons pode indicar também que eles possuem a mesma proveniência.

Tendo em vista a forte correlação apresentada com a condutividade elétrica (90,5%), sabe-se que a concentração de cloretos é cada vez mais elevada nos poços mais salinos. O mapa de fluxo subterrâneo mostra que a concentração de cloreto diminui no sentido do fluxo, ou seja, o mecanismo de recarga provavelmente contribui para a diluição dos sais e, conseqüentemente para a redução de concentração do cloreto.

Os ânions HCO_3^- e SO_4^{2-} apresentam baixas correlações com a condutividade elétrica e com os sólidos totais dissolvidos, indicando que esses ânions não são afetados pela salinização das águas.

CONCLUSÕES

As águas subterrâneas da Região de Parnamirim estão armazenadas no SADB, de caráter predominantemente livre, o qual possui elevado potencial hidrogeológico e constitui a principal fonte de suprimento hídrico das populações urbanas e rurais da área de estudo. O conhecimento da qualidade das águas subterrâneas é de grande importância para a caracterização de suas condições de salinização e possível contaminação.

A associação do estudo de uso e ocupação do solo com o reconhecimento da salinidade das águas subterrâneas subsidiou a delimitação de três subáreas, de características distintas: subárea de urbanização/expansão urbana, subárea de sistema de lagoas e dunas e subárea de cultura de lavouras e vegetação antropizada. A avaliação hidrogeoquímica, realizada a partir das análises de diversos parâmetros, contribuiu para a caracterização do comportamento da qualidade das águas em cada uma das subáreas.

Em geral, as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras apresentaram baixa salinidade, podendo ser consideradas águas de boa qualidade. Elas foram classificadas como águas brandas, de acordo com a classificação de dureza de Custódio & Llamas (2001). As representações gráficas em diagramas constataam que as águas subterrâneas são classificadas prioritariamente como de fácies cloretadas-sódicas a mistas, com composições variando entre magnesianas e bicarbonatadas.

Analisando individualmente as subáreas, constata-se que as águas da subárea B são as que mantem melhor qualidade em relação às outras. As subáreas C e A, respectivamente, mostraram maiores teores de íons dissolvidos e de salinização das águas. Os valores de pH indicam que as águas da subárea B tendem para uma situação de neutralidade maior do que as demais subáreas. Certamente, a preservação da qualidade nessas águas é resultante da menor influência antrópica na subárea B. Junto a isso, o sistema de dunas e lagoas que caracteriza essa região favorece a recarga do aquífero através da infiltração de águas pluviais, e essa renovação contribui na diluição das concentrações iônicas das águas subterrâneas do sistema, mantendo sua baixa salinidade.

A situação de maior salinidade e possíveis contaminações das águas da subárea C é muito provavelmente decorrente do excesso de aplicação de pesticidas, agrotóxicos e/ou fertilizantes nos cultivos de lavouras ali realizadas. Esse fator influencia no teor de salinidade das águas (principalmente se houver a utilização de nitrato e cloreto), imprimindo riscos de diminuição de sua qualidade. Além disso, a localização geográfica dessa subárea (porção oeste da área) pode influenciar na composição hidroquímica das águas subterrâneas, tendo em vista que o clima e a estrutura geológica começam a tender para a região semiárida. As condições climáticas dessa região sugerem que a evapotranspiração da água ocorre em maior intensidade, fazendo com que os sais dissolvidos e ionizados aumentem sua concentração na água.

A condição de contaminação das águas da subárea A é diretamente relacionada ao processo de expansão urbana que vem se desenvolvendo ao longo dos anos, inclusive sem a infraestrutura sanitária adequada (redes de esgotos, drenagens, distribuição adequada das águas) que acompanhe esse crescimento, o que influencia diretamente na qualidade das águas subterrâneas do aquífero, principalmente na região no município de Parnamirim.

A análise dos mapas de fluxo subterrâneo e hidroquímicos mostra que a condutividade elétrica e as concentrações de cloreto, sódio e nitrato diminuem no sentido do fluxo, ou seja, de oeste para leste. Tendo em vista que esses parâmetros são indicadores de salinidade da água, é possível concluir que sua salinidade diminui à medida que se aproxima da porção leste da área de estudo, sendo notável então que essas concentrações ocorrem nos pontos mais afetados por antropização. Conclui-se também que o mecanismo de recarga provavelmente contribuiu para a diluição desses íons existentes.

A qualidade identificada nas águas subterrâneas na área de estudo reconhece a possibilidade de continuidade do aproveitamento dessas águas para as diversas demandas da região, porém sob medidas que busquem preservar a qualidade do recurso hídrico subterrâneo e que realizem a exploração das águas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras de maneira equilibrada.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. S., MELO, J. G., SILVA, C. T. X., OLIVEIRA, C. C. C. **Recursos Hídricos Subterrâneos Da Região De Parnamirim, RN: Uso Das Águas e Potencialidades**. Revista Águas Subterrâneas, n. 30, p. 37-52. Março, 2016.

ANA – Agência Nacional das Águas. Ministério do Meio Ambiente. **Estudos Hidrogeológicos para a orientação do Manejo das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana de Natal**. V. 2 – Avaliação da Urbanização e de outras Atividades Antrópicas nas Águas Subterrâneas, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria N.º 1469**, de 29 de dezembro de 2000. (*) e **Portaria N.º 36/GM**, de 19 de janeiro de 1990.

CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**. 2ed. Barcelona: Omega. p. 274, 2001

FERNANDES, T. M. T., **Uso e Potencialidade Das Aguas Subterrâneas Da Região Do Município De Parnamirim/RN**. Monografia, UFRN, 2010.

FOSTER, S. S. D; MORRIS, B.; LAWRENCE, A.; CHILTON, JOHN. **Groundwater impacts and issues in developing cities – An Introductory review**. In: Groundwater in the Urban Environment. Selected City Profiles. Volume 21 of the International Contributions to Hydrogeology. Rotterdam: A.A. Bakema, 1999.

HUSSEIN, M. T. **Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques**. Hydrogeology Journal, v. 12, n. 2, p. 144-158, 2004

LUCENA, L.R.F.; Medeiros, J. D. F., Santos, N. C. F. **A disponibilidade hídrica das lagoas Jiqui e Pium e o caráter local efluente em relação ao Aquífero Barreiras-litoral sul de Natal-RN.** Revista Águas Subterrâneas, c. 22, n. 1, 2008.

MELO, J. G. **Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal – RN.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1995.

MELO, J.G.; ALVES, R.S.; SILVA, J.G. **Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Pirangi, RN.** Revista Águas Subterrâneas, n. 28, p. 68-81 Agosto de 2014.

MELO, J.G.; QUEIROZ, M. A. **The effects of urban development on the groundwater recharge and its quality in Natal, RN, Brasil.** In: SEILER, K. P.; WOHNLICH, S. New Approches Characterizing Groundwater Flow. Netherland: v. 2, p. 1233 – 1236, 2001

PETALAS CP; DIAMANTIS IB, **Origin and distribution of saline groundwater in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, Northeastern Greece.** Hydrogeology J 7(3):305-316, 1999.

STEIN, P., DINIZ FILHO J.B., LUCENA L.R.F., CABRAL, N. M. T., **Qualidade das águas do aquífero Barreiras no setor sul de Natal e norte de Parnamirim, Rio Grande do Norte, Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, vol. 42, supl.1 São Paulo, dez. 2012.

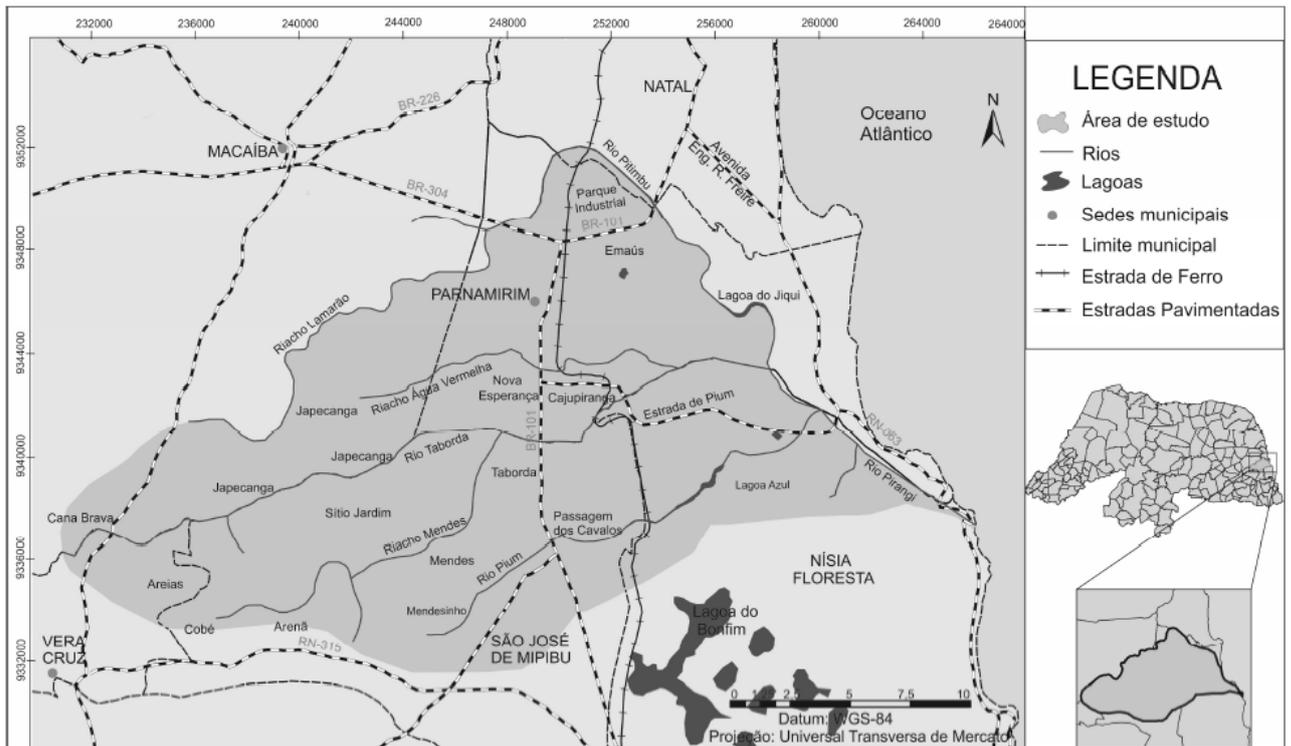


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, com acessos e rede hidrográfica

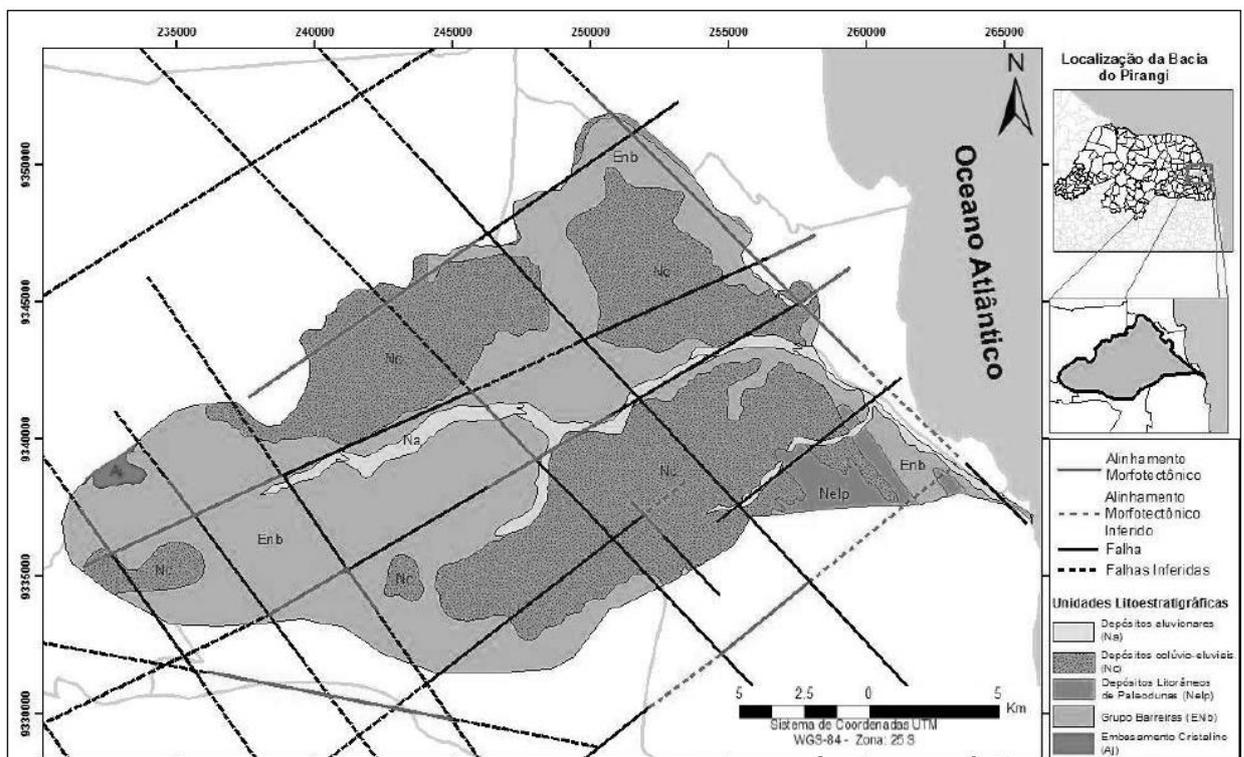


Figura 2. Mapa geológico simplificado contendo unidades litoestratigráficas, alinhamentos morfotectônicos e falhas geológicas ocorrentes na área de estudo. Fonte: Alves (2016)

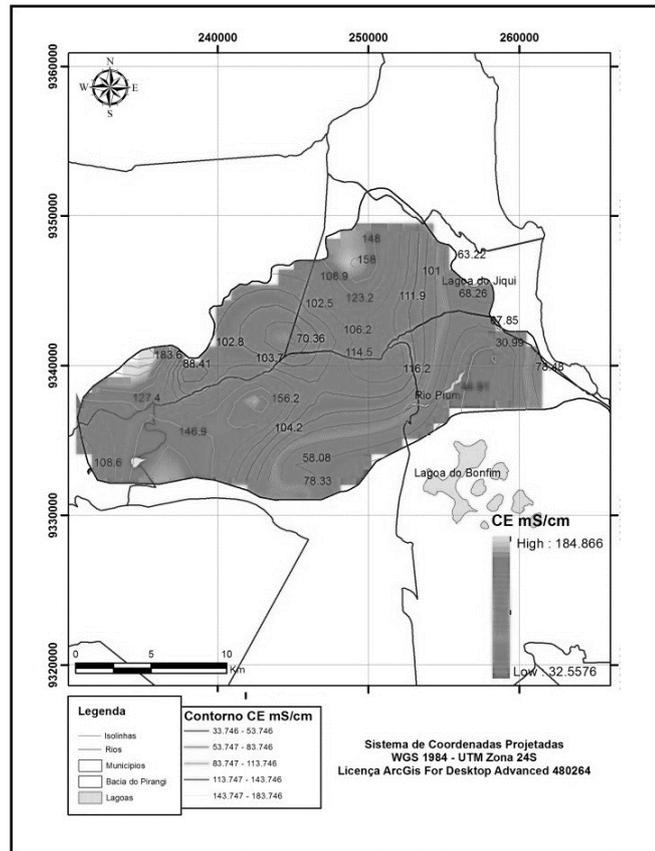


Figura 3. Mapas de isolinhas de condutividade elétrica (CE), contendo a localização dos poços analisados nessa etapa

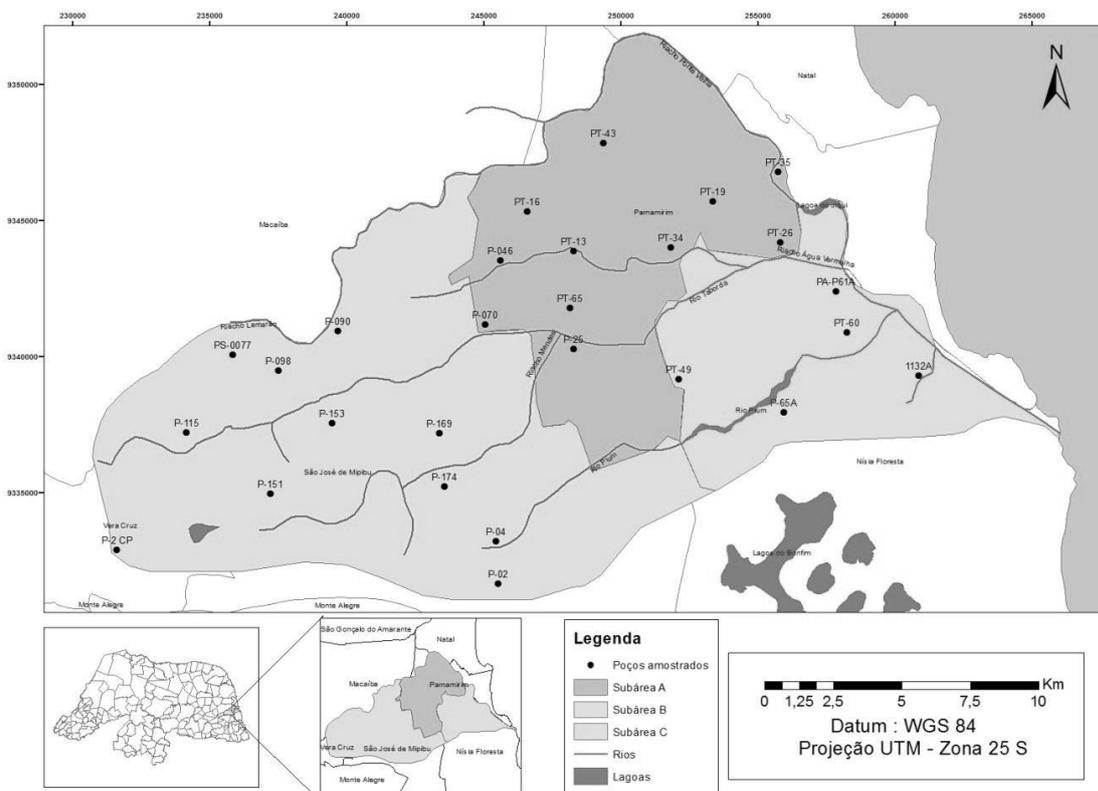


Figura 4: Mapa representativo das três subáreas delimitadas na área de estudo

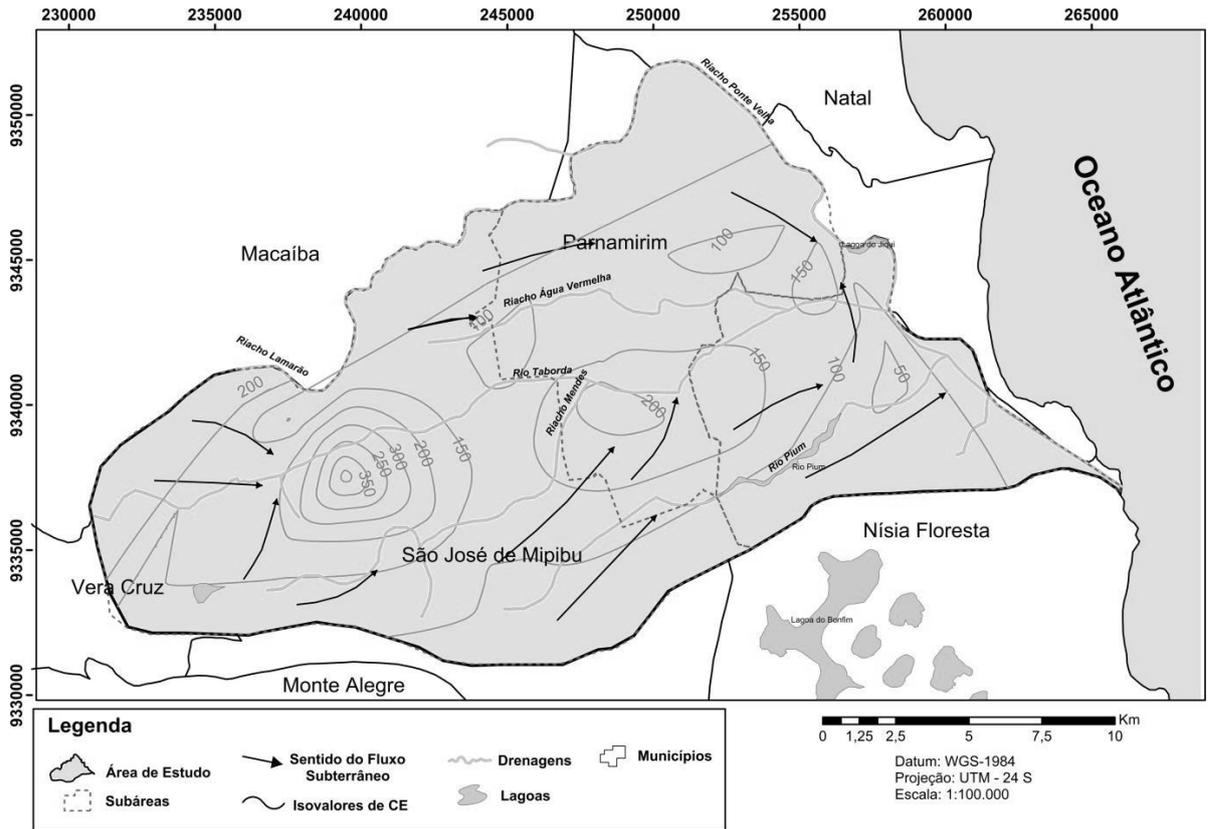


Figura 5. Mapa de curvas de isovalores de condutividade elétrica

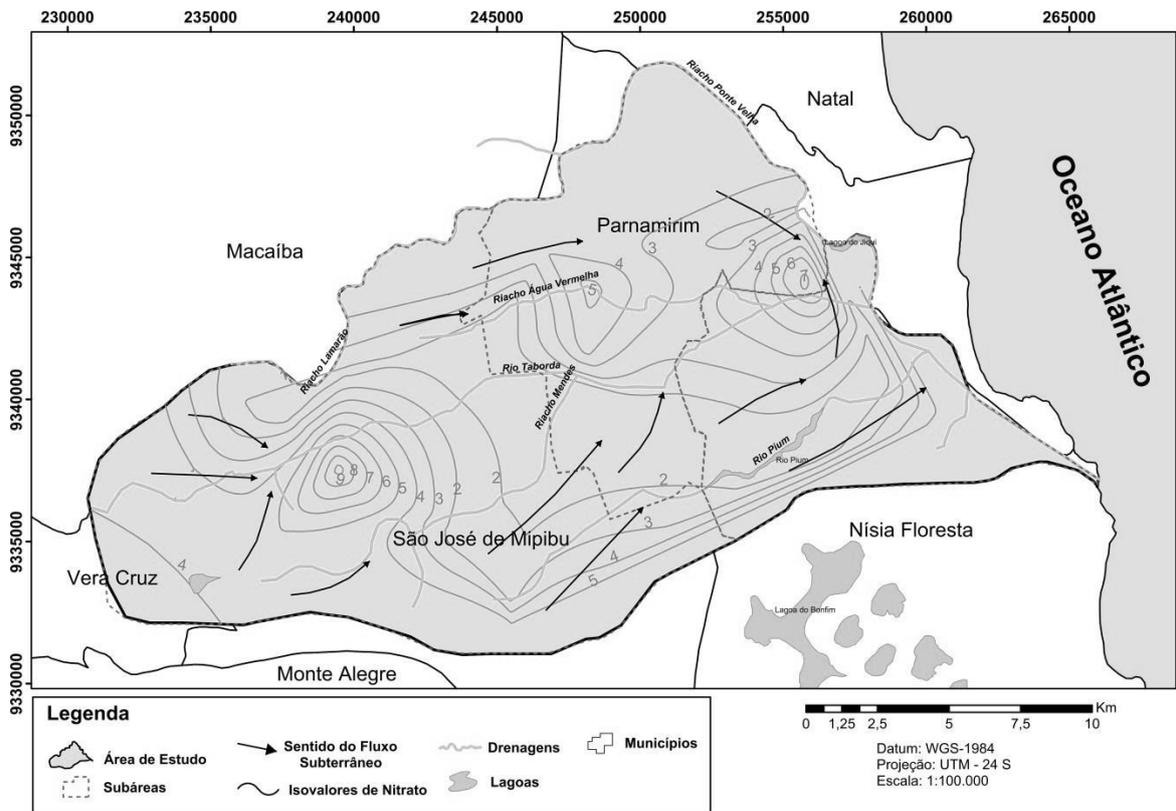


Figura 6. Mapa de curvas de isovalores de nitrato

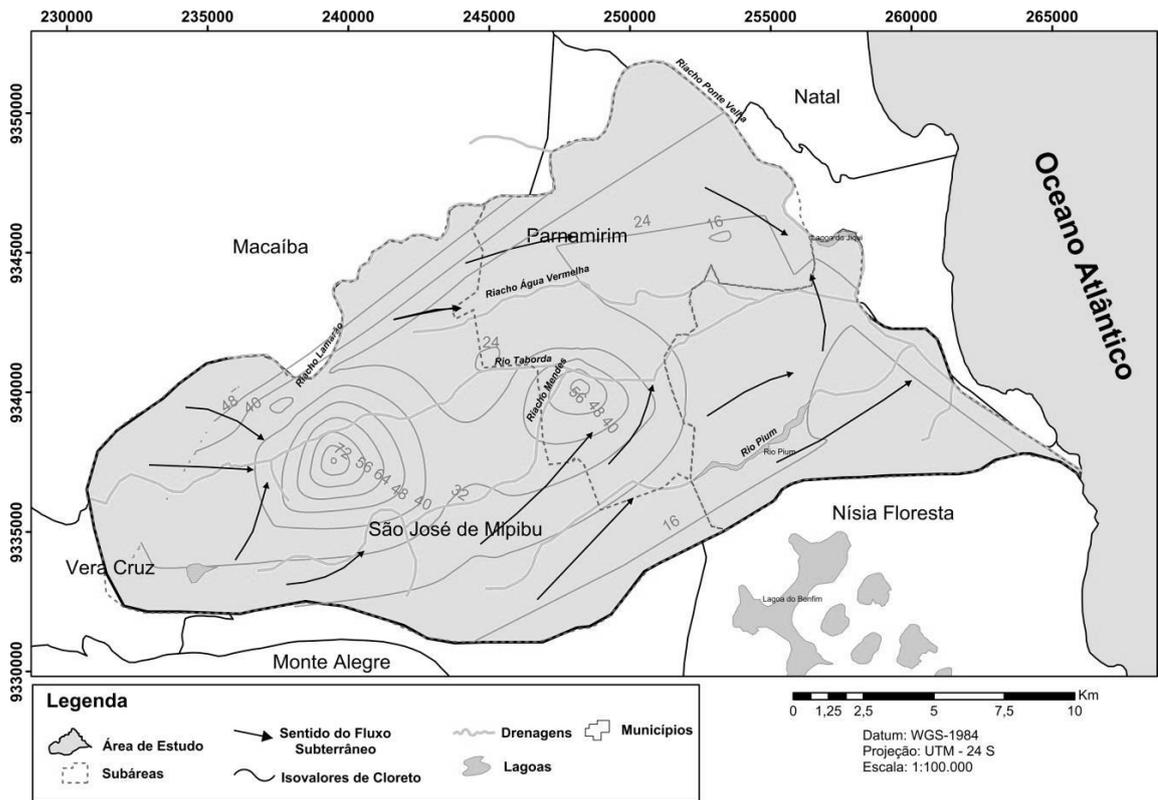


Figura 7. Mapa de curvas de isovalores de cloreto

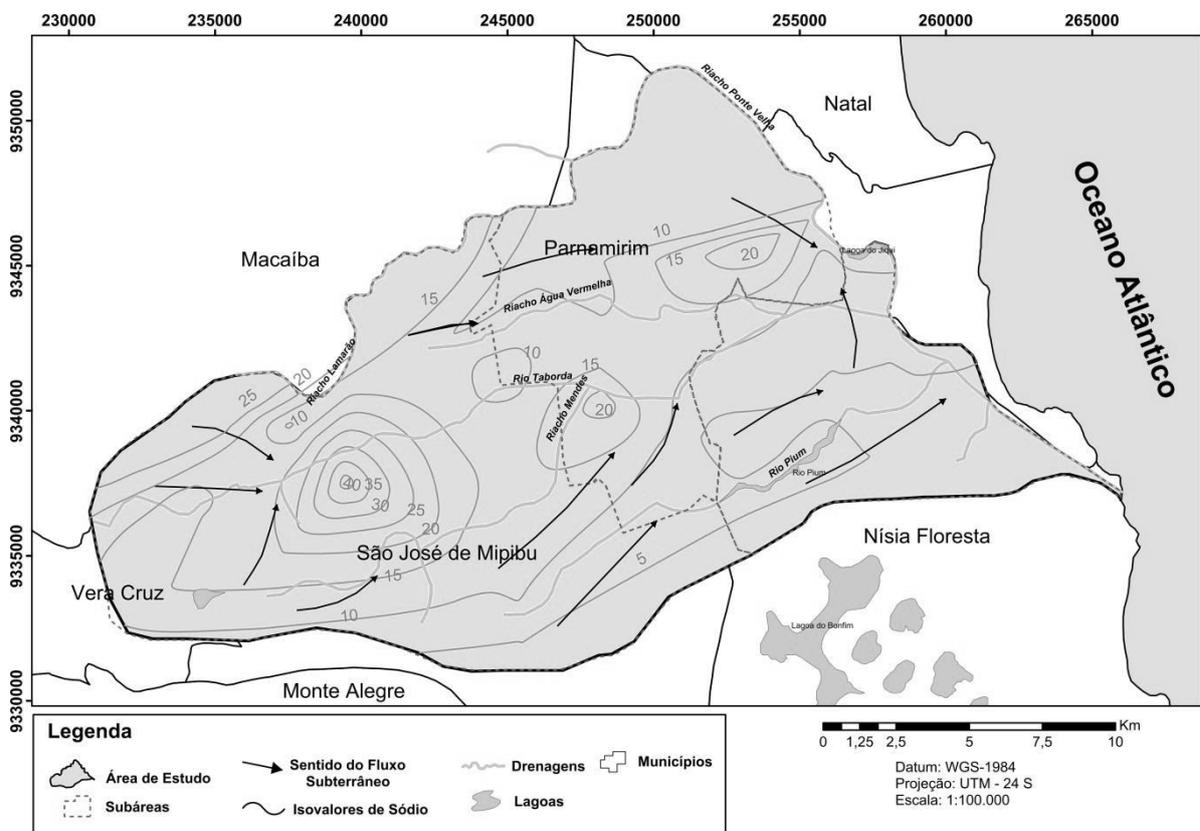


Figura 8. Mapa de curvas de isovalores de sódio

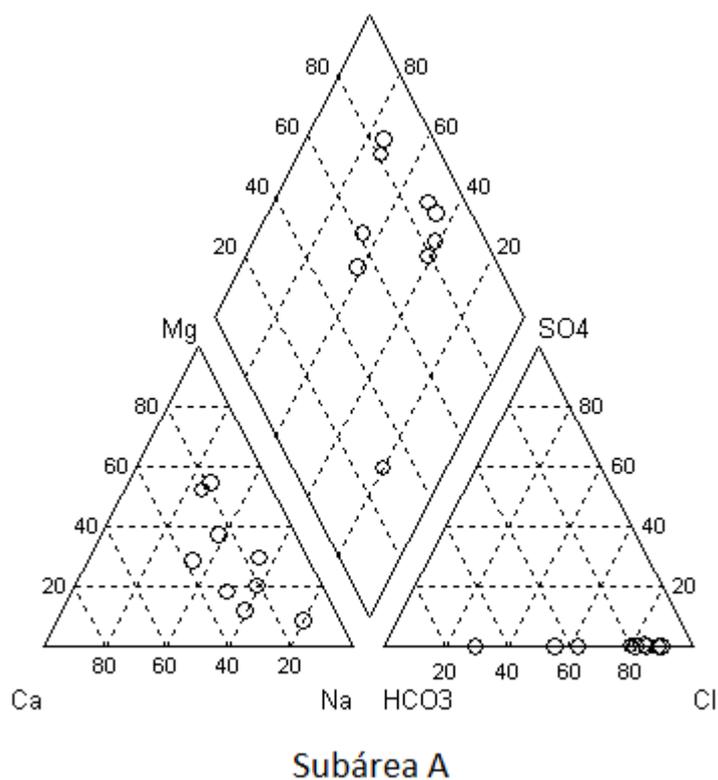


Figura 9. Diagrama de Piper referente à subárea A

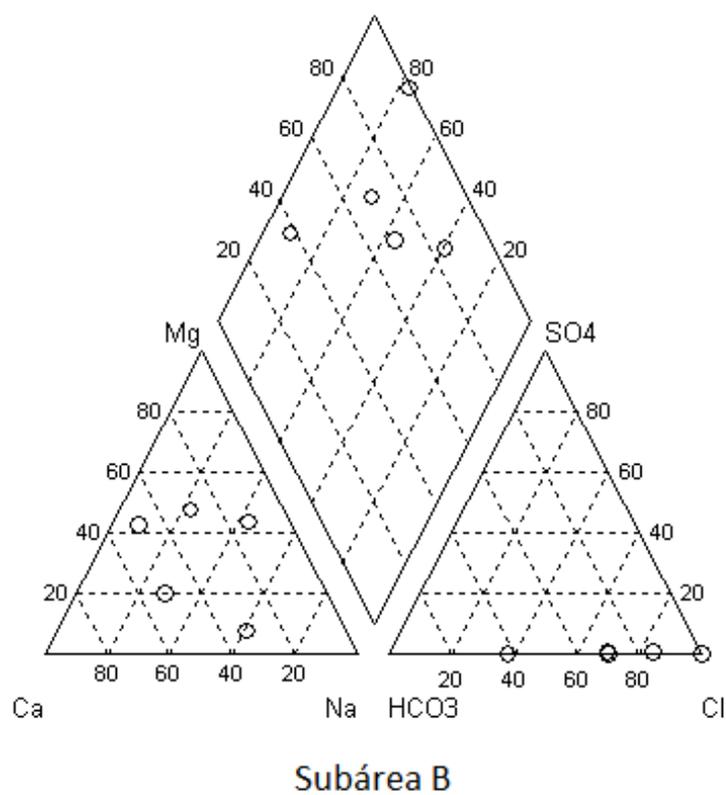


Figura 10. Diagrama de Piper referente à subárea B

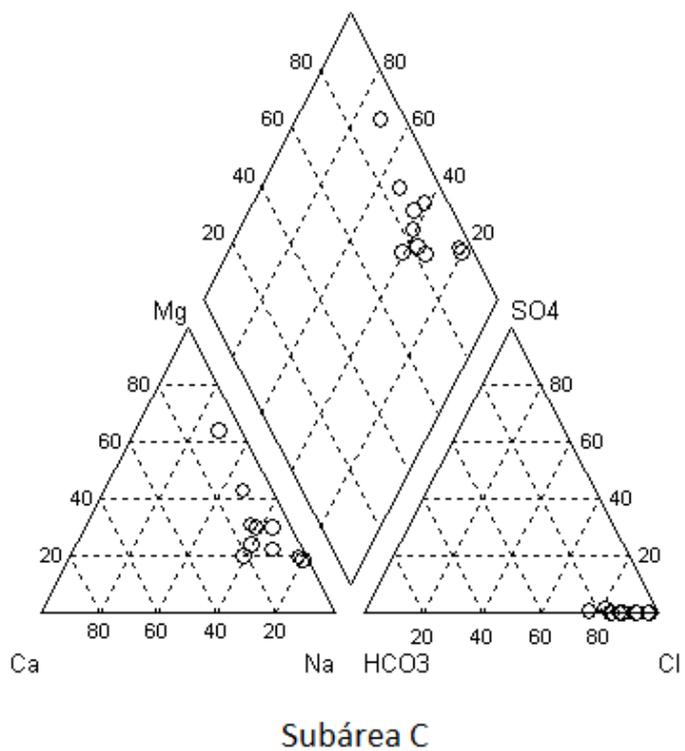


Figura 11. Diagrama de Piper referente à subárea C

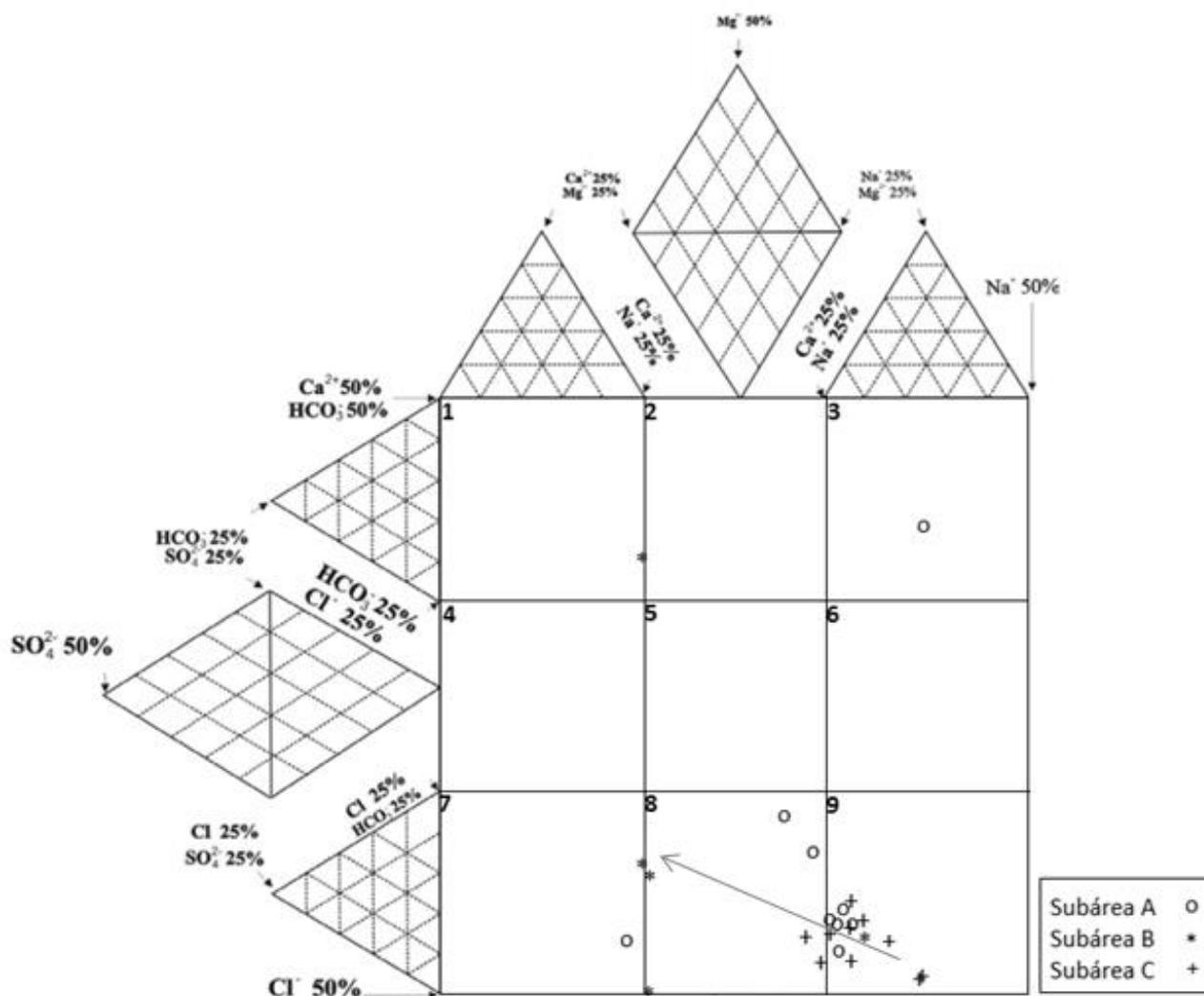


Figura 12. Diagrama de Durov Expandido com amostras plotadas

Tabela 1. Resumo dos resultados das análises químicas da subárea A

SUBÁREA A						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	5,86	5,81	0,56	5,12	6,70
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	77,11	77,00	30,43	38,00	138,00
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	134,16	134,10	52,63	65,90	239,00
Dureza Total	mg/L	29,07	32,00	11,48	14,00	46,00
Amônia	mg/L NH_3	0,31	0,29	0,09	0,24	0,54
Nitrato	mg/L de NO_3^-	2,95	1,88	2,74	0,01	8,20
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	5,08	4,08	1,77	3,26	8,16
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,95	3,86	2,32	1,45	6,75
Sódio	mg/L Na^+	12,62	12,88	7,23	5,14	25,19
Potássio	mg/L K^+	2,85	3,39	0,80	1,09	3,40
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04
Carbonato	mg/L CO_3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	20,73	12,44	19,36	4,97	62,22
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,06	0,00	0,12	0,00	0,31
Cloreto	mg/L Cl^-	28,82	24,99	12,79	15,00	60,48
Boro	mg/L B	<0,001	<0,001	0,00	0,00	0,00

Tabela 2. Resumo dos resultados das análises químicas da subárea B

SUBÁREA B						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	6,03	6,18	0,83	4,65	6,86
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	49,00	30,00	35,67	21,00	108,00
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	85,68	53,50	62,51	36,90	190,00
Dureza Total	mg/L	26,80	16,00	27,66	10,00	76,00
Amônia	mg/L NH_3	0,33	0,34	0,03	0,29	0,36
Nitrato	mg/L de NO_3^-	1,21	0,10	2,10	0,02	4,90
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	5,55	3,26	6,09	1,63	16,32
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,18	2,41	3,28	0,48	8,68
Sódio	mg/L Na^+	4,28	3,27	2,26	2,16	7,13
Potássio	mg/L K^+	1,29	1,50	0,60	0,40	1,98
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05
Carbonato	mg/L CO_3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	17,91	7,46	26,54	0,00	64,70
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,07	0,00	0,10	0,00	0,21
Cloreto	mg/L Cl^-	15,80	16,00	4,86	10,00	22,99
Boro	mg/L B	<0,001	<0,001	0,00	0,00	0,00

Tabela 3. Resumo dos resultados das análises químicas da subárea C

SUBÁREA C						
Parâmetros	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
pH	Adimensional	5,92	5,88	0,76	4,50	7,54
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	90,00	75,00	58,01	35,00	239,00
Condutividade elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	157,35	131,85	102,53	62,20	422,00
Dureza Total	mg/L	19,86	20,00	3,20	12,00	24,00
Amônia	mg/L NH_3	0,38	0,35	0,14	0,26	0,68
Nitrato	mg/L de NO_3^-	3,18	2,53	2,86	0,05	9,45
Cálcio	mg/L de Ca^{2+}	1,96	2,04	1,16	0,82	4,08
Magnésio	mg/L de Mg^{2+}	3,63	3,69	0,91	2,41	5,30
Sódio	mg/L Na^+	16,49	13,35	11,29	3,66	42,55
Potássio	mg/L K^+	3,50	3,30	1,85	1,71	8,51
Ferro	mg/L Fe^{++}	0,12	0,05	0,18	0,01	0,56
Carbonato	mg/L CO_3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato	mg/L HCO_3^-	7,59	7,46	3,91	2,48	14,93
Sulfato	mg/L SO_4^{2-}	0,12	0,00	0,21	0,00	0,60
Cloreto	mg/L Cl^-	36,44	30,24	19,34	16,99	81,97
Boro	mg/L B	0,00	0,00	0,00	<0,001	0,01

Tabela 4. Correlação matricial entre parâmetros hidroquímicos, sendo COND a condutividade elétrica e STD os sólidos totais dissolvidos

		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	COND	STD
Na^+	mg/l	1	0,881	-0,269	0,086	0,853	-0,292	0,0032	0,725	0,725
K^+	mg/l		1	-0,203	0,169	0,827	-0,191	-0,049	0,754	0,750
Ca^{2+}	mg/l			1	0,481	-0,142	-0,392	0,701	0,082	0,080
Mg^{2+}	mg/l				1	0,393	-0,39	0,339	0,562	0,564
Cl^-	g/l					1	-0,413	-0,218	0,903	0,905
SO_4^{2-}	mg/l						1	0,116	-0,399	-0,404
HCO_3^-	mg/l							1	-0,034	-0,036
COND	$\mu\text{S}/\text{cm}$								1	1
STD	mg/l									1