



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

**AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO DUNAS NA
REGIÃO DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PONTA DO
TUBARÃO – (RDSEPT) / MACAU-GUAMARÉ/RN**

Autor:

HÉLIO FERNANDO MAZIVIERO

Orientador:

PROF. DR. JOSÉ GERALDO DE MELO

Dissertação n° 226/PPGG

Natal/RN, julho de 2019



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

AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO DUNAS NA
REGIÃO DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PONTA DO
TUBARÃO – (RDSEPT) / MACAU-GUAMARÉ/RN

HÉLIO FERNANDO MAZIVIERO

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

Prof. Dr. José Geraldo de Melo

(Orientador: Departamento de Geologia da UFRN)

Prof. Dr. José Braz Diniz Filho

(Membro externo – Departamento de Geologia da UFRN)

Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos

(Membro externo - Serviço Geológico do Brasil – CPRM)

Natal/RN, julho de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Maziviero, Hélio Fernando.

Avaliação hidrogeológica e hidroquímica do Aquífero Dunas na região da reserva de desenvolvimento sustentável Ponta do Tubarão - (RDSEPT) / Macau-Guamaré/RN / Hélio Fernando

Maziviero. - 2019.

89 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo de Melo.

1. Aquífero Dunas - Dissertação. 2. Hidrogeologia - Dissertação. 3. Hidroquímica - Dissertação. I. Melo, José Geraldo de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 556.3

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a todos meus ancestrais que de alguma maneira me ajudaram a chegar onde cheguei, pela história que passaram, pelas mais diversas situações tristes e alegres, transmitindo a memória genética de gerações para gerações.

Agradeço aos meus pais, Hélio (in memorian) e Maria (in memorian) pelo amor, carinho e atenção que sempre tiveram com os filhos e quem sabe, ainda estejam olhando por mim.

Agradeço aos meus filhos Mariana, Helena e Fernando, filhos que tanto amo e dediquei uma boa parte da minha vida para torná-los cidadãos que respeitem as diferenças, sejam solidários e vivam uma vida plena fazendo o que gostam.

Agradeço meus amigos em especial Cleide e Filipe que muito me ajudaram na elaboração da dissertação. A Jana, Mateus Araújo e Alexandre Paixão, pela força, pelas brigas e discussões que tivemos por todos esses anos de convivência e por todos outros amigos que aqui faltaria espaços para relacionar os nomes, mas que fazem parte da minha vida e são muito importantes.

Ao Prof. Geraldo de Melo, meu orientador, que muito ajudou a realizar esse trabalho.

A Itá, Vera e Nazaré dando apoio logístico nas visitas de campo na área de estudo, fornecendo casa, alimentação, muito carinho e compreensão.

A EMPARN representada por seu diretor Dr. Simplício que tanto me apoiou, fornecendo transporte para área de estudo e laboratório para análises químicas e físico-químicas das amostras coletadas.

Agradeço ao GEMA – Laboratório de Geologia Marinha, coordenado pelo Profa. Helenice Vital, e o apoio em disponibilizar o equipamento GPS geodésico para trabalho em campo.

Aos funcionários da secretaria, da limpeza e dos laboratórios do Departamento de Geologia pela amizade e os serviços prestados.

E por fim, ao grande amor da minha vida, TERESA MEDEIROS, que, após três anos juntos, é sempre uma alegria, felicidade, emoção e muito amor.

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo.....	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Justificativa.....	11
1.4 Localização da área e vias de cesso.....	13
1.5 Atividades metodológicas.....	13
1.5.1 Pesquisa bibliográfica.....	14
1.5.2 Cadastramento de poços e medições físico-químicas.....	14
1.5.3 Coletas de amostras de águas de poços para análises químicas.....	14
1.5.4 Tratamentos de dados, elaboração de mapas e gráficos.....	15

2 CONDICIONANTES AMBIENTAIS

2.1 Clima.....	17
2.2 Balanço hídrico	20
2.3 Aspectos fisiográficos.....	22
2.3.1 Relevo.....	22
2.3.2 Hidrografia.....	24
2.3.3 Vegetação	25

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geologia regional.....	28
3.2 Geologia local.....	29

4 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

4.1 Cadastramento dos poços	35
4.2 Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero dunas.....	38
4.3 Fluxo das águas subterrâneas.....	39
4.4 Vazão de escoamento natural.....	43
4.5 Reservas das águas subterrâneas.....	43
4.5.1 Reserva reguladora (Rr)	44
4.5.2 Reservas permanentes (Rp)	47
4.5.3 Recursos exploráveis.....	47

5 AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	
5.1 Análise da consistência dos dados.....	49
5.2 Síntese dos dados obtidos.....	51
5.3 Correlação entre parâmetros químicos.....	55
5.4 Classificação das águas subterrâneas.....	56
5.5 Distribuição espacial dos parâmetros hidroquímicos.....	58
6 ARTIGO - Aspectos hidrogeológicos e avaliação hidroquímica da Reserva de Desenvolvimento Sustentável-Ponta do Tubarão – Macau/RN.	65
7 CONSIDERAÇÕES FINAS E CONCLUSÕES.....	82
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

RESUMO

A região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão está situada no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte e integrada a Bacia Potiguar. Possui uma área de 130 Km² dividida em uma porção marinha, tabuleiro costeiro, mangues e 47,25 Km² de dunas vegetadas e não vegetadas que comportam um Sistema Aquífero Dunas e fornece água doce para população local e entorno. Mantém o sistema estuarino, rico em espécies animais e vegetais. O principal objetivo desta pesquisa foi investigar e avaliar a hidrogeologia, a hidroquímica e o comportamento do Aquífero Dunas. O clima da região é semiárido, com uma precipitação média de 521 mm/ano e evapotranspiração potencial de 2.054 mm/ano, caracterizando um elevado déficit hídrico de 1533 mm/ano. Os parâmetros hidráulicos de transmissividade (T) de $1,67 \times 10^{-3}$ m²/s, condutividade hidráulica (K) de $4,13 \times 10^{-4}$ m/s e porosidade específica (μ) de 5%, apurados em trabalhos anteriores. Para o mapa potenciométrico foram cadastrados 56 poços, distribuídos na área de estudo. Foi identificado que na área existe um divisor divergente do fluxo subterrâneo promovendo um fluxo em direção ao oceano e outro no sentido oposto. Para avaliação hidroquímica foram utilizados os gráficos de Piper, Stiff e Durov expandido. Foram selecionadas 20 amostras de água de poços e uma de água superficial (lagoa), distribuídas no espaço de pesquisa para melhor representar as características hidroquímicas e a sua interação com a natureza geológica dos extratos que compõem o aquífero. Quanto à qualidade química das águas, das 21 amostras analisadas, 11 amostras encontram-se no intervalo de classificação para água doce, 7 para água salobra e 3 para água salgada. O tipo bicarbonatada predomina nessas águas (48%), registrando-se maior incidência de águas bicarbonatadas cálcicas (33%) que frequentemente sugerem águas de recarga de carbonatos e cloretadas sódicas (24%) que sugerem influência da água do mar, águas salinas antigas ou dissolução de halita. As águas subterrâneas apresentam uma tendência de troca de fácies, indicando uma simples dissolução ou mistura, durante o fluxo das águas subterrâneas.

Palavras chaves: Aquífero Dunas. Hidrogeologia. Hidroquímica.

ABSTRACT

The Ponta do Tubarão State Sustainable Development Reserve region is located on the northern coast of the state of Rio Grande do Norte and is part of the Potiguar Basin. It has an area of 130 km² divided into a marine portion, coastal board, mangroves and 47.25 km² of vegetated and non-vegetated dunes that support a dune aquifer system and provides fresh water to local and surrounding population. Maintains the estuarine system, rich in animal and plant species. The main objective of this research was to investigate and evaluate the hydrogeology, hydrochemistry and behavior of the Dunas Aquifer. The climate of the region is semi-arid, with an average rainfall of 521 mm / year and potential evapotranspiration of 2,054 mm / year, characterizing a high water deficit of 1533 mm / year. The hydraulic transmissivity (T) parameters of $1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{ s}$, hydraulic conductivity (K) of $4.13 \times 10^{-4} \text{ m} / \text{ s}$ and specific porosity (μ) of 5%, found in previous work. For the potentiometric map 56 wells were registered, distributed in the study area. It was identified that in the area there is a divergent underground flow divider promoting one flow towards the ocean and another in the opposite direction. For hydrochemical evaluation, Piper, Stiff and Durov expanded graphs were used. Twenty water samples from wells and one from surface water (lagoon) were selected, distributed in the research space to better represent the hydrochemical characteristics and their interaction with the geological nature of the aquifer extracts. Regarding the chemical quality of the waters, of the 21 samples analyzed, 11 are in the classification range for freshwater, 7 for brackish water and 3 for saltwater. The bicarbonated type predominates in these waters (48%), with a higher incidence of calcic bicarbonated waters (33%) which often suggest carbonate and sodium chlorinated recharge waters (24%) suggesting the influence of seawater, ancient saline waters. or dissolution of halite. Groundwater tends to change facies, indicating simple dissolution or mixing during groundwater flow.

Keywords: Dunes Aquifer. Hydrogeology. Hydrochemistry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa da localização geográfica da área de estudo	13
Figura 2.1 Precipitações pluviométricas médias mensais (mm), estação Macau/RN. 1961 a 2017-Fonte: Dados da Rede INMET	18
Figura 2.2 Precipitações pluviométricas médias mensais no período de 1961 – 2017 - Fonte: Dados da rede INMET	19
Figura 2.3 Evapotranspirações potenciais médias mensais (mm), estação Macau/RN. - 2003 a 2017-Fonte: Dados da rede INMET	20
Figura 2.4 Balanço hidroclimatológico da região de Macau/RN-Fonte: Dados da rede INMET	21
Figura 2.5 Mapa do relevo da área de estudo e perfil topográfico	23
Figura 2.6 Mapa da rede hidrográfica da região de Macau e Guamaré / RN	24
Figura 2.7 Foto de Manguezal da RDSEPT no Distrito de Diogo Lopes /Macau / RN	25
Figura 2.8 Exemplo de vegetação de caatinga localizada no município de Guamaré/RN	26
Figura 2.9 Vegetação de restinga localizada na RDSEPT no Distrito de Barreiras/Macau/RN.	27
Figura 3.1 Mapa estrutural da porção emersa da Bacia Potiguar. (Angelim et al., 2006, Hoerlle et al. 2007).	28
Figura 3.2 Mapa de geológico da Bacia Potiguar (Angelim et al., 2006; Mohriak, 2003).	29
Figura 3.3 Coluna estratigráfica da geologia da área de estudo (Vital et al. 2011)	30
Figura 3.4 Mapa geológico da área do estudo (Vital et al., 2011).	31
Figura 4.1 Foto de poço tipo amazonas encontrado na área 32	35
Figura 4.2– Foto de poço tipo tubular encontrado na área 34	36
Figura 4.3 Mapa com os poços cadastrados	37
Figura 4.4 Perfil construtivo e descrição litológica dos poços	38
Figura 4.5 Mapa potenciométrico com indicação da divisão e direção do fluxo subterrâneo.	42
Figura 4.6 – Esquema dos recursos renováveis através da variação sazonal do nível potenciométrico.	44

Figura 4.7 Diferença entre NE máximo e NE mínimo no período de Jan/2015 a Ago/2017. 41	45
Figura 5.1 Comparação das somatórias entre cátions e ânions	50
Figura 5.2 Diagrama de Piper com plotagem das amostras da zona urbana e zona rural.	57
Figura 5.3 Curvas de Isovalores de sólidos totais dissolvidos (STD)	60
Figura 5.4 Curvas de Isovalores de Sódio (Na ⁺)	61
Figura 5.5 Curvas de Isovalores de Cálcio (Ca ⁺)	62
Figura 5.6 Curvas de Isovalores de cloreto (Cl ⁻)	63
Figura 5.7 Curvas de Isovalores de bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	64
Artigo	
Fig.1 Localização da área de estudo.	68
Fig. 2 Unidades de uso e ocupação do solo, suas dimensões e percentuais	69
Fig.3 Unidades de uso e ocupação de solo da área de estudo.	71
Fig.4 Mapa indicação dos poços cadastrados e direções do fluxo subterrâneo	73
Fig. 5 Mapa das equipotenciais indicando a direção do fluxo subterrâneo e divisor de fluxo.	74
Fig.6 Localização dos poços com coleta das amostras de águas para análise química.	76
Fig. 7 Mapa com localização dos poços e representação gráfica do diagrama de Stiff.	77
Fig. 8 Diagrama de Piper – comparação entre a concentração de cloreto a direita (a) e cloreto mais nitrato (b).	78
Fig. 9 Curvas de isoconcentração de nitrato nas águas subterrâneas.	79
Fig. 10 Diagrama de Durov expandido com indicações das mudanças de fácies.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estação Macau – Fonte: Dados da Rede INMET	17
Tabela 2.2 Média das precipitações médias (mm), estação Macau/RN. 1961 a 2017	18
Tabela 2.3 Média das temperaturas médias (°C) referentes ao ano de 1961 a 2017	23
Tabela 2.4 – Média das evapotranspirações potenciais (ETp) (mm) referentes ao ano de 2003 a 2017	19
Tabela 2.5 Balanço hídrico de Macau/RN	21
Tabela 4.1 Tabela dos poços para determinação das cargas potenciométricas	41
Tabela 4.2 Variações sazonais do nível potenciométrico (NE)	46
Tabela 5.1 Qualidade dos resultados das análises, segundo classificação da diferença percentual	49
Tabela 5.2 Tabela dos valores da somatória do balanço iônico e dos erros calculados	50
Tabela 5.3 Resultado da síntese dos dados estatísticos simplificados	52
Tabela 5.4 Classificação da água em função dos sólidos totais dissolvidos (STD)	53
Tabela 5.5 Comparação entre valor máximo CONAMA Nº 357/2005 e valores amostrais	55
Tabela 5.6 Matriz de correlação dos parâmetros químicos analisados	55
Tabela 5.7 Intervalo de coeficiente e os graus de correlação	56
Tabela 5.8 Resumo e classificação geral das águas subterrâneas da zona urbana e rural	58
Tabela 5.9 Poços usados nas interpolações dos mapas de isovalores com as concentrações iônicas	59
Artigo:	
Tabela 1 Resultados das análises químicas	75

1 INTRODUÇÃO

O trabalho, intitulado “Avaliação Hidrogeológica e Hidroquímica Do Aquífero Dunas na região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Ponta do Tubarão – RDSEPT/ Macau-Guamaré/RN”, situada na Porção do litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, correspondente dissertação de mestrado para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós- Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do rio Grande do Norte (UFRN).

1.1 Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo geral a caracterização das dunas nos aspectos hidrogeológicos, hidroquímicos e qualidade das águas, tendo em vista o aproveitamento racional desse recurso.

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar mapas de uso e ocupação do solo;
- Uso das águas subterrâneas;
- Identificar as reservas;
- Avaliação hidroquímica e qualidade das águas;

1.3 justificativa

A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão - RDSEPT/RN e seu entorno está situada no litoral norte, região semiárida do Rio Grande do Norte, circundada pelas plataformas de produção de petróleo e gás da Petrobrás, pelo Polo Petroquímico, pelos dutos de óleo e gás, usinas eólicas, além das empresas salineiras. Ela foi criada em 18 de julho de 2003 sob a Lei Estadual 8349/03, apresenta um Conselho Gestor, tendo o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente - IDEMA como órgão ambiental responsável.

A principal atividade econômica das comunidades da RDSEPT/RN é a atividade pesqueiras. A região possui 8.000 habitantes (IBGE, 2010). As mais populosas estão concentradas ao norte da reserva, junto a linha de costa, representadas pelos distritos de Diogo Lopes, Barreiras e Sertãozinho que faz parte do município de Macau. A atividade agrícola é pouca desenvolvida e está localizada ao sul da reserva nas vilas de Mangue seco 1 e 2 e Lagoa Doce que pertence ao município de Guamaré.

Na RDSEPT/RN a barra ou restinga separa o alto mar do estuário, que se desenvolveu nas planícies de maré, e é intensamente afetado pelas condições

hidrodinâmica, eólicas e, possivelmente, pela reativação de estruturas pretéritas (RIOS E AMARO, 2012). O estuário, que se desenvolveu na região, é um ecossistema de transição entre o ambiente marinho e terrestre, sujeito ao regime de marés. (SCHAEFFER-NOVELLI 1995). A vegetação do mangue, que se desenvolve no ambiente estuarino, é suprida pela água doce do aquífero dunas. Esta água doce é captada nas áreas desnudas de dunas móveis e fixas que compreende o compartimento dos sedimentos eólicos e, na base, os sedimentos que compõem estratigraficamente o intemperismo Potengi, regido pelas condições de paleorelevo (RIOS E AMARO, 2012). A água da chuva infiltra para estes reservatórios rasos que compõe o aquífero, objeto desse estudo. Essa massa de água subterrânea que chega no manguezal, única na região, vem do continente e se mistura gradativamente com a água marinha e formam um estuário subterrâneo de águas salobras que suporta e mantêm o desenvolvimento do ecossistema estuarino (BORGES E SILVA, 2013).

Historicamente Barreiras e Diogo Lopes, além das comunidades pesqueiras artesanais, supriam de água doce a cidade de Macau. Eles coletavam a água doce nos afloramentos das falésias, na linha de costa, e a transportavam usando suas embarcações pelo mar, até a cidade de Macau.

A seca entre 2012 e 2015, (MARTINS e MAGALHÃES, 2015), que se prolonga até 2018 e o uso intensivo dos recursos hídricos tem comprometido a qualidade e quantidade das reservas no aquífero dunas. A superexploração e o consumo excessivo, seja para uso e consumo doméstico, expansão industrial, atividade petrolífera, agricultura e pecuária, além de aquicultura de larvas de camarões tanto das comunidades locais como das cidades circunvizinhas podem promover declínio de seu volume e da qualidade da água. (VILLAR, 2016)

As atividades econômicas diversas como eólicas, petrolíferas, construções e aumento populacional provavelmente estão afetando o processo de recarga. Os estudos parecem necessitar de mais dados para melhor planejamento e menor impacto ambiental. Dessa forma, esse estudo das águas subterrâneas do aquífero, que tem nas dunas a sua principal área de recarga, possibilita o entendimento de sua dinâmica durante o ano, tanto da quantificação de seu volume como de sua qualidade.

1.4. Localização da área e vias de acesso

A área está inserida entre os municípios de Macau/RN (95% da área), e Guamaré/RN (5% da área) e tem dimensão de 91,2 Km², sendo que 69.56 Km² distribuídos entre dunas e zonas do tabuleiro costeiro e 21,64 Km² de área estuarina, composta por canais, ilhas barreiras e mangues. O limite máximo da área a leste e a oeste tem como coordenadas longitudinais geográficas 36°24'09"O e 36°32'18"O, respectivamente, e o limite máximo da área a norte e a sul são, respectivamente, as latitudes de 5°02'45"S e 5°08'57"S.

O acesso, a partir de Natal, distante 200Km da área de estudo, é feito pela rodovia federal BR 406 até a entrada no Município de Guamaré, após segue pela rodovia estadual RN 401 até a Refinaria Clara Camarão, com acesso à rodovia estadual RN 221 no sentido E-W e RN 403, no sentido S-N, ligando Macau aos distritos de Barreiras e Diogo Lopes, figura 1.1.

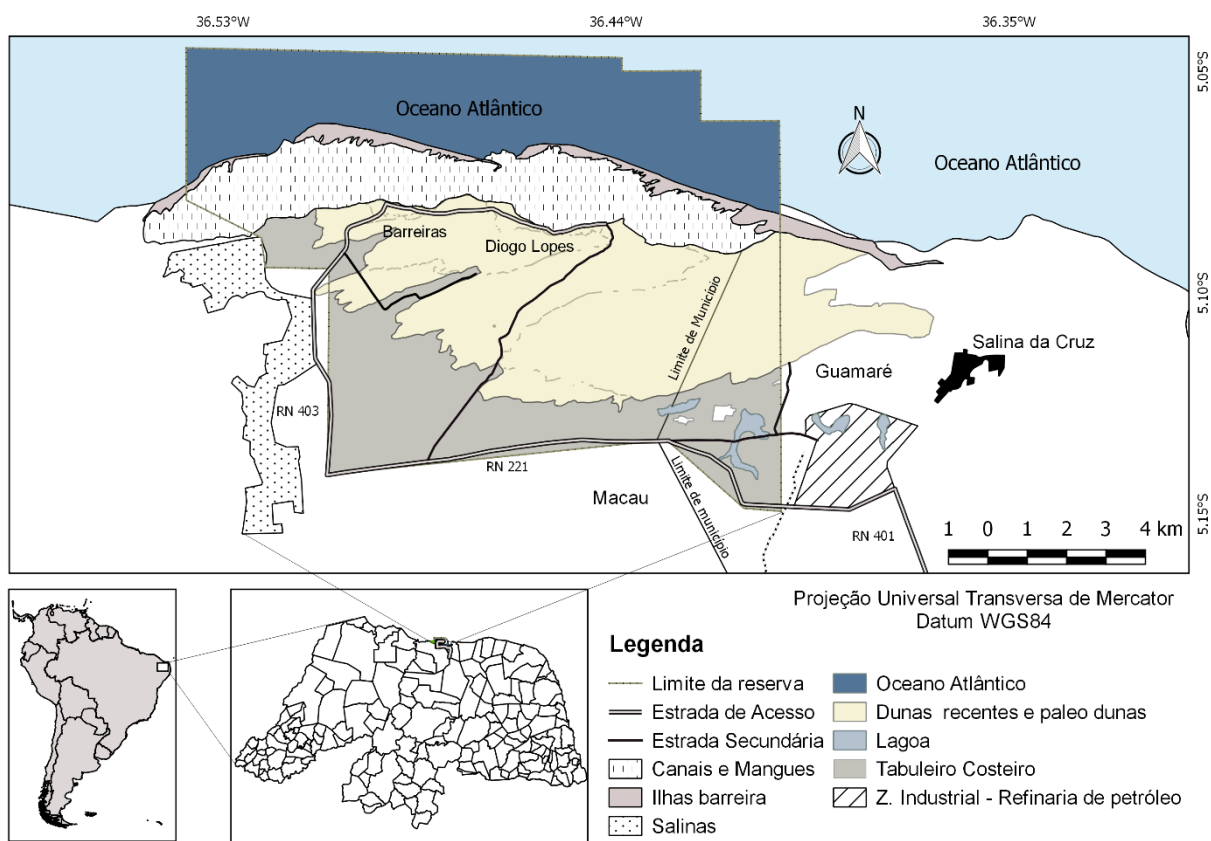


Figura 1.1 Mapa da localização geográfica da área de estudo

1.5 Atividades metodológicas

Durante a fase de desenvolvimento da pesquisa foram efetuadas várias etapas, nas quais podemos relacionar: pesquisa bibliográfica, cadastramento de poços e medições físico-químicas, coleta de amostras de águas de poços para análises

químicas, tratamento de dados, elaboração e interpretação de mapas temáticos e avaliação e interpretação hidrogeológica e hidroquímica.

1.5.1 Pesquisa bibliográfica

Para embasamento teórico da pesquisa foi efetuada uma revisão bibliográfica para melhor compreensão dos conceitos. Levantamentos de dados existentes como os aspectos socioeconômicos, ambientais, geológicos, mapas temáticos e informações de interesses hidrogeológicos e hidroquímicos foram pesquisadas para subsidiar as várias etapas do trabalho na área de estudo. Essa pesquisa foi realizada em órgãos privados e públicos como IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), SEMARH/RN (Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte) e universidades. Esta fase do estudo foi relevante para o conhecimento dos problemas e orientou os próximos passos do trabalho, minimizando o tempo.

1.5.2 Cadastramento de poços e medições físico-químicas

Foi realizado um levantamento em campo e elaborado um cadastro preliminar de poços na área de estudo, que compreende a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão – RDSEPT e seu entorno. Para o cadastramento dos poços, seguiu-se uma orientação geográfica leste/oeste e norte /sul formando uma malha, com distância de 500 metros por célula. Após, foi verificado a disponibilidade de poços já existentes dentro de cada célula da malha, para melhor representar a região de estudo.

Em seguida, foram cadastrados 47 poços distribuídos dentro da área e obteve-se a medição física e dados hidrogeológicos dos poços como: localização, tipo construtivo (escavados ou tubular), identificação do proprietário, uso da água (doméstica ou irrigação), profundidade, diâmetro, altura da boca em relação à superfície do solo. Para o nivelamento topográfico dos poços foi utilizado GPS geodésico RTK-Topcon. Após, foi estabelecido rotina de visitação mensal, com início em janeiro de 2014 e término em dezembro de 2017, para medições do nível estático, temperatura, condutividade elétrica, pH, sólidos totais dissolvidos e salinidade.

1.5.3 Coletas de amostras de águas de poços para análises químicas

Foram coletadas 21 amostras de águas subterrâneas de poços, localizadas na área de estudo, no mês de janeiro de 2018. Os poços foram escolhidos levando-se

em consideração a distribuição geográfica que melhor representava o aquífero e refletisse suas condições físico-químicas e que permitisse identificar não apenas essas condições, mas informações sobre a origem e mobilidade dos íons das águas e o processo de salinização.

As amostras foram coletadas diretamente dentro dos poços com o auxílio de um *bayler*. O processo de coleta seguiu um padrão determinado para todos os poços, que consiste na retirada de três amostras para lavagem com agitação da água dentro das garrafas para ambientação dos frascos. Após lavagem e descarte da água, é retirada a última amostra e acondicionada nos frascos que foram acomodadas em caixas de isopor com gelo e encaminhadas para o laboratório (EMPARN) no dia posterior a coleta. Para cada amostra foram utilizadas 03 garrafas de PET com capacidade de 500ml por garrafa.

Os parâmetros analisados das amostras coletadas foram os seguintes: principais cátions (cálcio, magnésio, potássio e sódio) e os principais ânions (cloretos, sulfetos e bicarbonatos). Também foram analisadas a condutividade elétrica, o pH e a concentração de nitrato. Seis amostras destacadas, entre as 21 amostras analisadas, com base na distribuição geográfica para melhor representar a área, foram analisadas as concentrações dos metais pesados (cádmio, cobre, chumbo, cromo, ferro, manganês, níquel e zinco).

1.5.4 Tratamentos de dados, elaboração de mapas e gráficos

Os dados obtidos com o cadastramento dos poços, medições físico-químicas em campo e análises laboratoriais hidroquímicas das amostras coletadas foram tratados em processos eletrônicos informatizados, afim de orientar e gerar subsídios para interpretação dos trabalhos subsequentes. A ferramenta utilizada para confecção de tabelas, tratamentos estatísticos e gráficos foi usado o *software Excel 2013*. Os *softwares QGIS 2.18 e ARCMAP 10.1* foram utilizados para confecção dos mapas temáticos como: mapa de localização da área, que integra informações do sistema informação geográfica (SIG), mapa geológico, mapa potenciométrico, mapas de zoneamento de uso e ocupação do solo e mapas hidroquímicos com a interpolação dos parâmetros iônicos das águas subterrâneas, sua concentração e distribuição na área de estudo. A interpretação da análise hidroquímica e elaboração dos gráficos de Piper, Stiff e Durov Expandido foram utilizados os *softwares AQUACHEM 3.70 e*

QUALIGRAF 1.17. A qualidade da água e o padrão de potabilidade segundo CONAMA 357/2005 do Ministério do Meio Ambiente.

2 CONDICIONANTES AMBIENTAIS

2.1 Clima

A pesquisa da climatologia da área de interesse foi interpretada a partir da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na cidade de Macau (Tabela 2.1). A estação está localizada a 13,6 Km do centro da área de estudo. Foram considerados os parâmetros climáticos médios mensais e anuais dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo que a precipitação e a evapotranspiração constituem os mais importantes para o trabalho.

Tabela 2.1 - Estação Macau – Fonte: Dados da Rede INMET

Estação	Latitude	Longitude:	Altitude:	Situação:
82594-Macau -RN	-5.11	-36.76	3.43m	Operante

Fonte: Dados da rede INMET

Os fatores climáticos estão relacionados diretamente a evolução e a dinâmica do aquífero, influenciando o volume da água nos reservatórios naturais e a química das águas naturais subterrâneas, mediante os processos de diluição e concentração dos íons dissolvidos (FEITOSA, 2008).

No estudo da climatologia local e a sua influência no ciclo hidrológico foram utilizadas as séries de dados históricos meteorológicos das precipitações pluviométricas, no período de janeiro/1961 a dezembro/2017, (INMET). O volume de dados e sua amplitude no tempo, permite análises mais consistentes na interpretação das variáveis consideradas.

As precipitações pluviométricas no período de 57 anos (1961 a 2017), atingiram uma média mensal máxima de 128,3 mm no mês de abril e uma média mensal mínima de 2,2 mm no mês de outubro, sendo que a precipitação pluviométrica máxima mensal foi de 332,0 mm no mês de abril/2016 (Tabela 2.2). A média de precipitação anual é de 521 mm. As maiores precipitações pluviométricas ocorrem nos meses de janeiro a maio e as menores nos meses de agosto a novembro, atingindo precipitações próximas a zero ou ausência de precipitação na maioria dos anos. Figura 2.1.

A direção dos ventos no mês de abril é de 187° (graus) e no mês de dezembro a direção é de 43°. A direção mais constante é entre os meses de maio até meados de novembro, com média de 110°. A velocidade dos ventos na média anual é de 4,5 Km/h. Os maiores valores ocorrem nos meses de novembro a janeiro, atingindo uma

velocidade máxima de 7 Km/h e o menor valor nos meses de março até meados de junho, registrando 2 Km/h no mês de março.

Tabela 2.2 – Média das precipitações médias (mm), estação Macau/RN. 1961 a 2017

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec. (mm)	35,9	65,4	113,3	128,3	69,0	63,2	26,1	7,2	3,3	0,9	2,2	6,2

Fonte: Dados da rede INMET

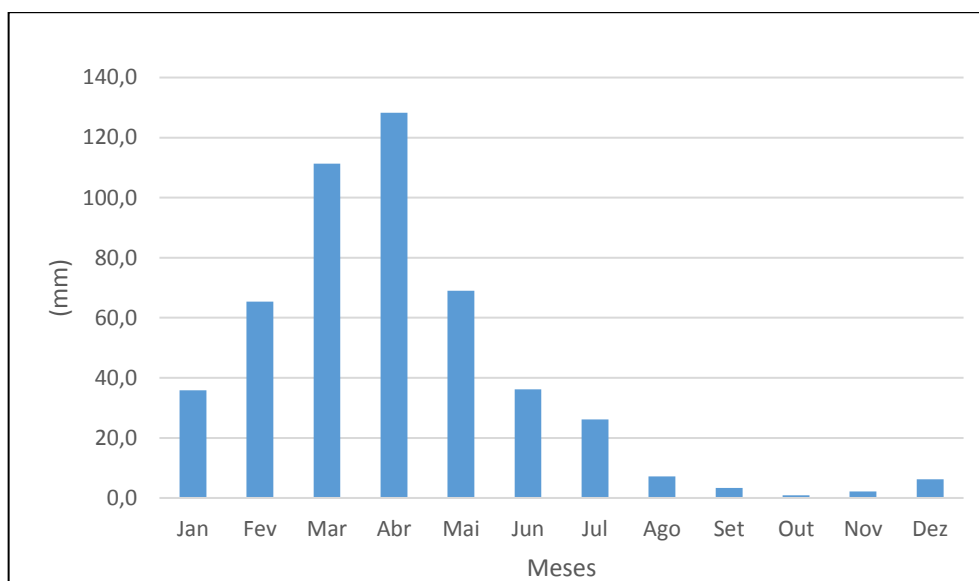


Figura 2.1 Precipitações pluviométricas médias mensais (mm), estação Macau/RN. 1961 a 2017-Fonte: Dados da Rede INMET

A temperatura média anual é de 27,5 °C, com variação de 27,8°C a 26,8°C e amplitude térmica de 1 °C (Tabela 2.3). Os meses com temperaturas médias mais elevadas são dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril que corresponde a estação climática do verão e início do outono. Os meses com temperaturas mais baixas são junho, julho, agosto, setembro e outubro que corresponde a estação climática do inverno e da primavera. A Temperatura média máxima mensal registrada no período foi de 35°C em outubro/2016 e a temperatura média mínima mensal no período foi de 18,8°C em julho/1964 Figura 2.2.

Tabela 2.3 – Média das temperaturas médias (°C) referentes ao ano de 1961 a 2017

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp.(°C)	27,8	27,8	27,8	27,8	27,7	27,1	26,8	27,2	27,5	27,5	27,3	27,6

Fonte: Dados da rede INMEP

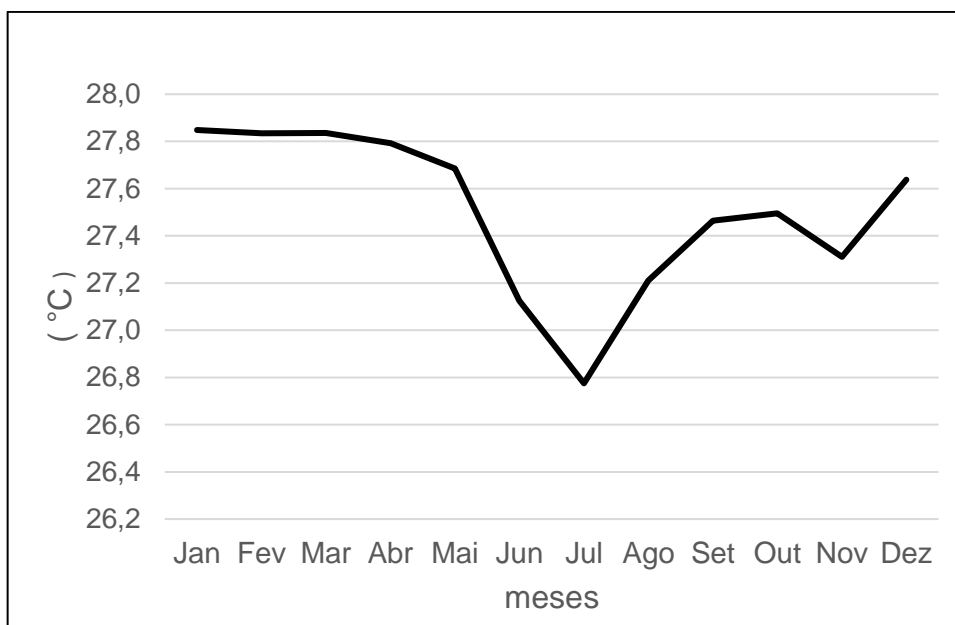


Figura 2.2 Precipitações pluviométricas médias mensais no período de 1961 - 2017

Fonte: Dados da rede INMET

A umidade relativa do ar tem sua maior elevação no mês de abril, registrando 87% de umidade e a menor no mês de dezembro com 46%. Os períodos mais secos estão entre setembro a janeiro que corresponde a baixa precipitação e maior insolação e os períodos mais úmidos são de fevereiro a agosto que correspondem a maior precipitação e a menor insolação.

A evapotranspiração potencial é o resultado das variáveis climáticas, como a temperatura, pressão, umidade, vento e insolação, (CAMARGO, 2000). Os dados foram extraídos diretamente dos arquivos do INMET.

Tabela 2.4 – Média das evapotranspirações potenciais (ETp) (mm) referentes ao ano de 2003 a 2017

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ETP	184,5	168,2	178,7	173,3	173,9	154,4	152,9	161,5	164,5	179,4	177,5	186,1

Fonte: Dados da rede INMET

A evapotranspiração potencial (ETp) média anual é de 171,2 mm com variação de 152,9 mm a 186,1 mm com uma amplitude de 33,2 mm (tabela 2.4). Os meses com ETp média mais elevadas estão nos meses de dezembro e janeiro e os menores valores médios da ETp estão entre os meses de junho a setembro (Figura 2.3).

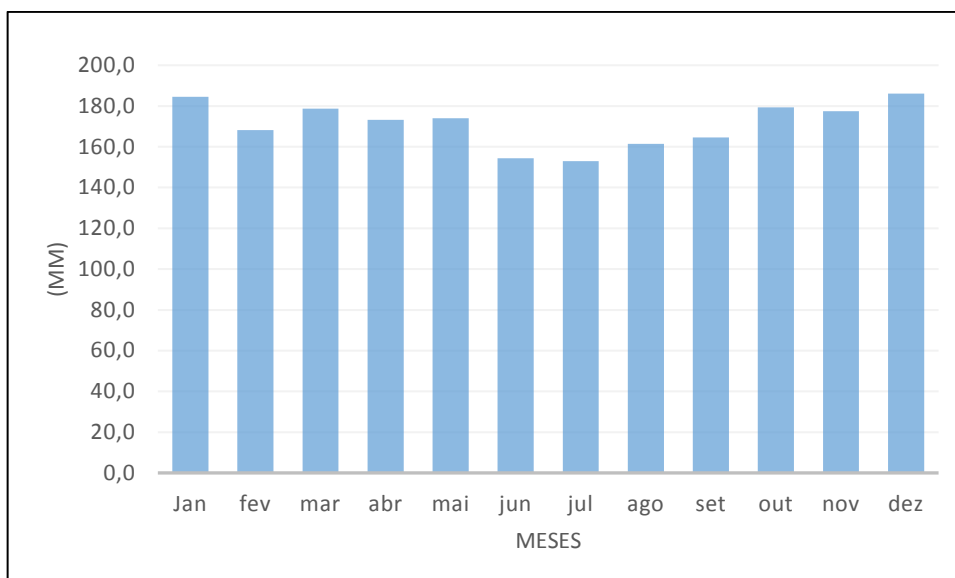


Figura 2.3 Evapotranspirações potenciais médias mensais (mm), estação Macau/RN. - 2003 a 2017-Fonte: Dados da rede INMET

2.2. Balanço Hídrico

A técnica utilizada para o balanço hídrico foi de (THONTHWAITE & MATER, 1955). A aplicação do método, tem como ponto fundamental, admitir a capacidade de água do solo de 100mm, sendo que o excesso hídrico ocorre caso precipite mais do que evapotranspire, se acontecer o contrário, isto é, a evapotranspiração for maior que a precipitação, ocorrerá déficit hídrico.

A evapotranspiração real (ET_r), pode ser estimada a partir da diferença entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ET_p), utilizando os seguintes parâmetros:

$$\text{se } P - E_{tp} > 0 \rightarrow E_{tr} = E_{tp} \quad (1)$$

$$\text{se } P - E_{tp} < 0 \rightarrow E_{tr} = P \quad (2)$$

Os resultados obtidos no balanço hídrico (Tabela 2.5), mostram que a evapotranspiração potencial (ET_p) é de 2.054,9 mm, sendo que a evapotranspiração real é de 521,0 mm, o excedente hídrico é 0,0 mm e o déficit é da ordem de 1.533,9 mm. Assim, a região é caracterizada pelo elevado déficit hídrico (Figura 2.4).

Segundo a classificação (KÖPPEN-GEIGER, 1928), a área está inserida em regiões áridas e seu tipo climático é classificado como BSh (Clima semiárido quente).

Tabela 2.5 – Balanço hídrico de Macau/RN

Data	(P) (mm)	Temperatura (° C)	ETp (mm)	P- ETp (mm)	ETr (mm)	Armaz.	Deficit (mm)
Jan	35,9	28,2	184,5	148,6	35,9	0,0	148,6
Fev	65,4	28,3	168,2	102,8	65,4	0,0	102,8
Mar	113,3	27,6	178,7	65,4	113,3	0,0	65,4
Abr	128,3	28,1	173,3	45,0	128,3	0,0	45,0
Mai	69,0	28,6	173,9	104,0	69,0	0,0	104,0
Jun	63,2	28,0	154,4	91,2	63,2	0,0	91,2
Jul	26,1	27,4	152,9	126,8	26,1	0,0	126,8
Ago	7,2	28,5	161,5	154,3	7,2	0,0	154,3
Set	3,3	28,3	164,5	161,2	3,3	0,0	161,2
Out	0,9	28,7	179,4	178,5	0,9	0,0	178,5
Nov	2,2	28,6	177,5	175,3	2,2	0,0	175,3
Dez	6,2	28,2	186,1	179,9	6,2	0,0	179,9
Ano	521,0		2.054,9	1.533,9	521,0	0,0	1.533,9

Fonte: Dados da rede INMET

P = Precipitação **ETp** = Evapotranspiração Potencial **ETr** = Evapotranspiração Real

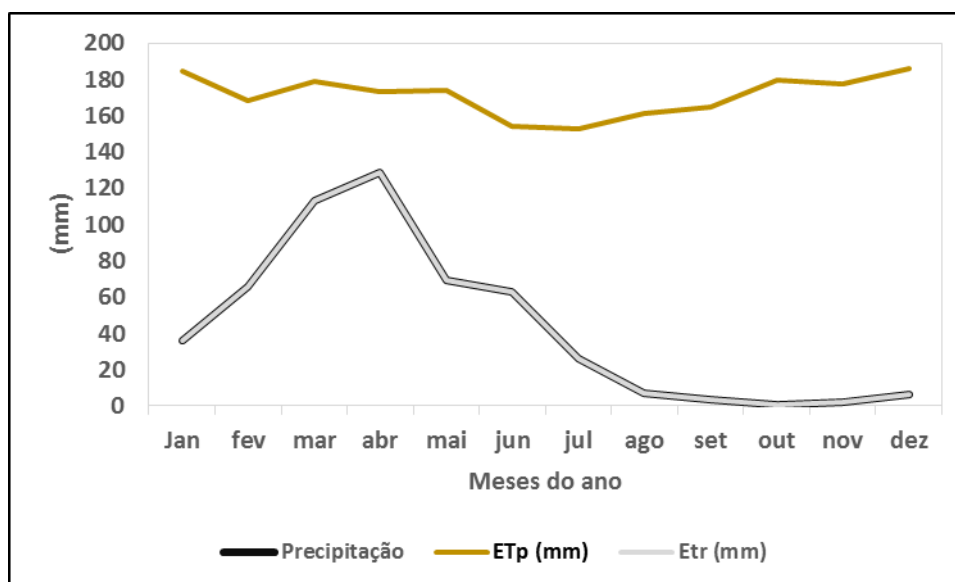


Figura 2.4 Balanço hidroclimatológico da região de Macau/RN-Fonte: Dados da rede INMET

2.3 Aspectos Fisiográficos

Os principais aspectos fisiográficos da parte setentrional do litoral do Rio grande do Norte com destaque principal na porção semiárida do litoral. As interações entre o relevo, a hidrografia, o clima e a vegetação traduzem um ambiente único, caracterizado por baixa precipitação pluviométrica e uma costa litorânea altamente dinâmica proporcionada pelos ventos SE/NO e correntes marítimas com características próprias no Brasil. Os municípios que compreendem são: Pedra Grande, São Bento do Norte, Caiçara do Norte, Galinhos, Guamaré, Macau, Porto do Mangue, Areia Branca. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população estimada no ano de 2016, para o conjunto dos municípios é de 95.957 habitantes, com uma área de 2.738 Km².

2.3.1 Relevo

São características da região a predominância de planos suaves com cotas altimétricas baixas, que variam de 0 metro a 32 metros. A paisagem é dominada por campos de dunas e interdunares. As cotas mais elevadas na área variam entre 16m a 32m e correspondem as dunas e paleodunas mais distais da costa. As dunas observadas na porção proximal, possuem uma baixa elevação altimétricas e variam entre 4m a 8m. As dunas estão sobrepostas ao tabuleiro costeiro, composto pelas Formações Potengi, Barreira e Tibau.

As Planícies marinhas de inundação estão representadas pelos canais de maré e mangues que estão sob influenciam da flutuação das marés, tem baixa elevação altimétricas e atingem no máximo 7 metros. As falésias são observadas em toda região do estudo e são produtos do conjunto do modelamento geomorfológicos da zona costeira, resultante da evolução geológica, alteradas pelas regressões e transgressões marinhas, da interação climática, das correntes oceânicas e da ação antrópica (EZEQUIEL et al., 2015) (Figura 2.5).

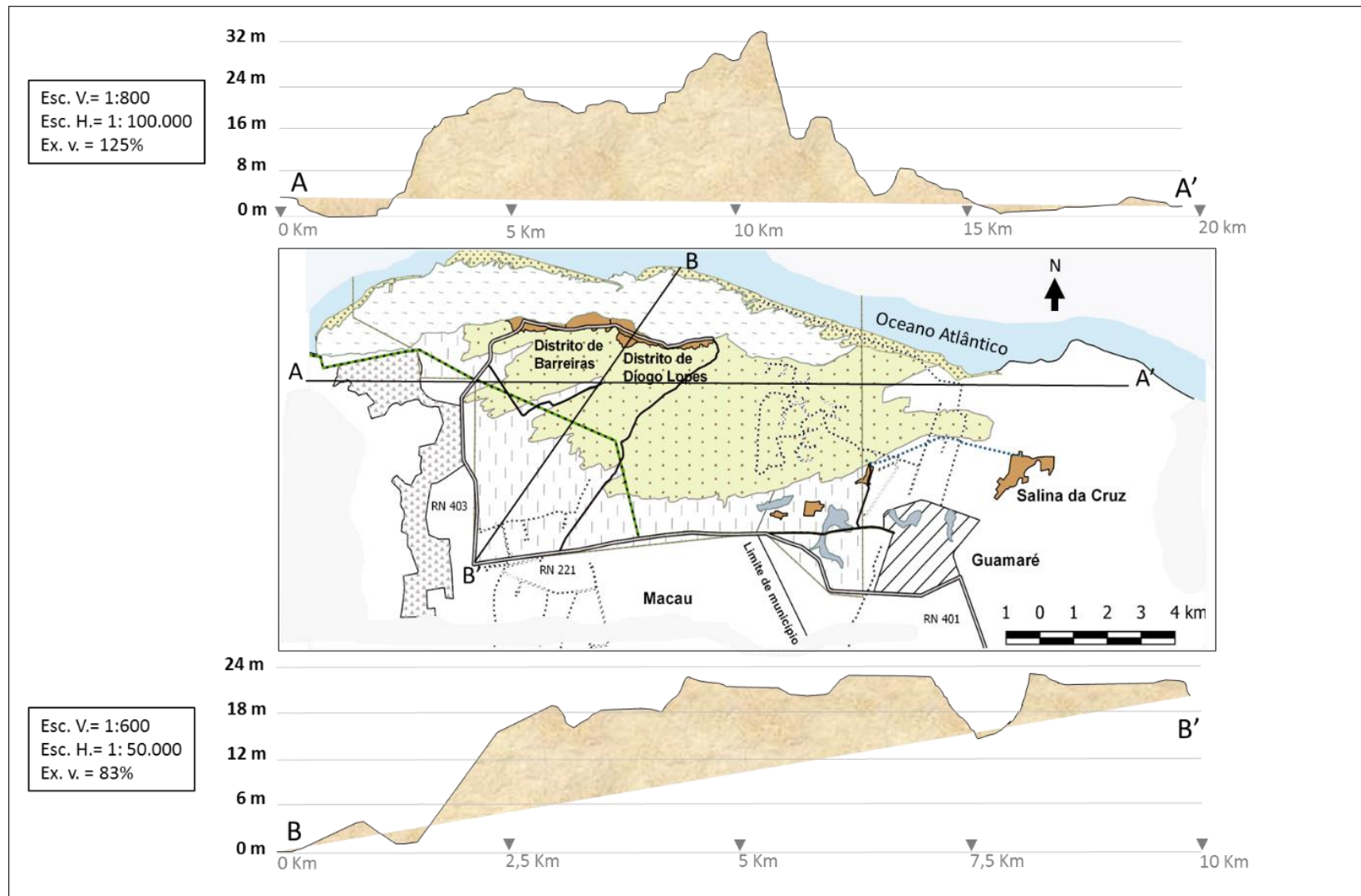


Figura 2.5 Mapa do relevo da área de estudo e perfil topográfico

2.3.2 Hidrografia

A rede hidrográfica da região tem como principal representante o Rio Açú localizado a leste da área de estudo e tem como afluente o Rio Cifrão. As águas pluviais contribuem para alimentação desses rios que aumentam seu volume contribuindo para a formação do estuário, que junto com a oscilação dos níveis das águas, influenciados pela flutuação da maré que oscila entre 0,4 m na baixa-mar e de 2,3 m na preamar, Centro da Hidrografia da Marinha (CHM), formam depósitos lamosos que favorecem o desenvolvimento da vegetação de mangue. Canais de marés cortam toda a região representados pelo Rio Casqueira, Rio Conceição, Rio Furadinho e outros, delimitando ilhas e controlando as zonas de supra maré e intermaré. Esses canais são aproveitados para captação de águas para suprirem as salinas existente na região e para o desenvolvimento da carcinicultura.

Riachos intermitentes, permanecem secos durante a maior parte do ano, devido a influência do clima semiárido e da alta permeabilidade do solo. Durante o período chuvoso a água começa a correr com alta energia que é atestado por grandes seixos depositados nas cavidades de escoamento (Figura 2.6).

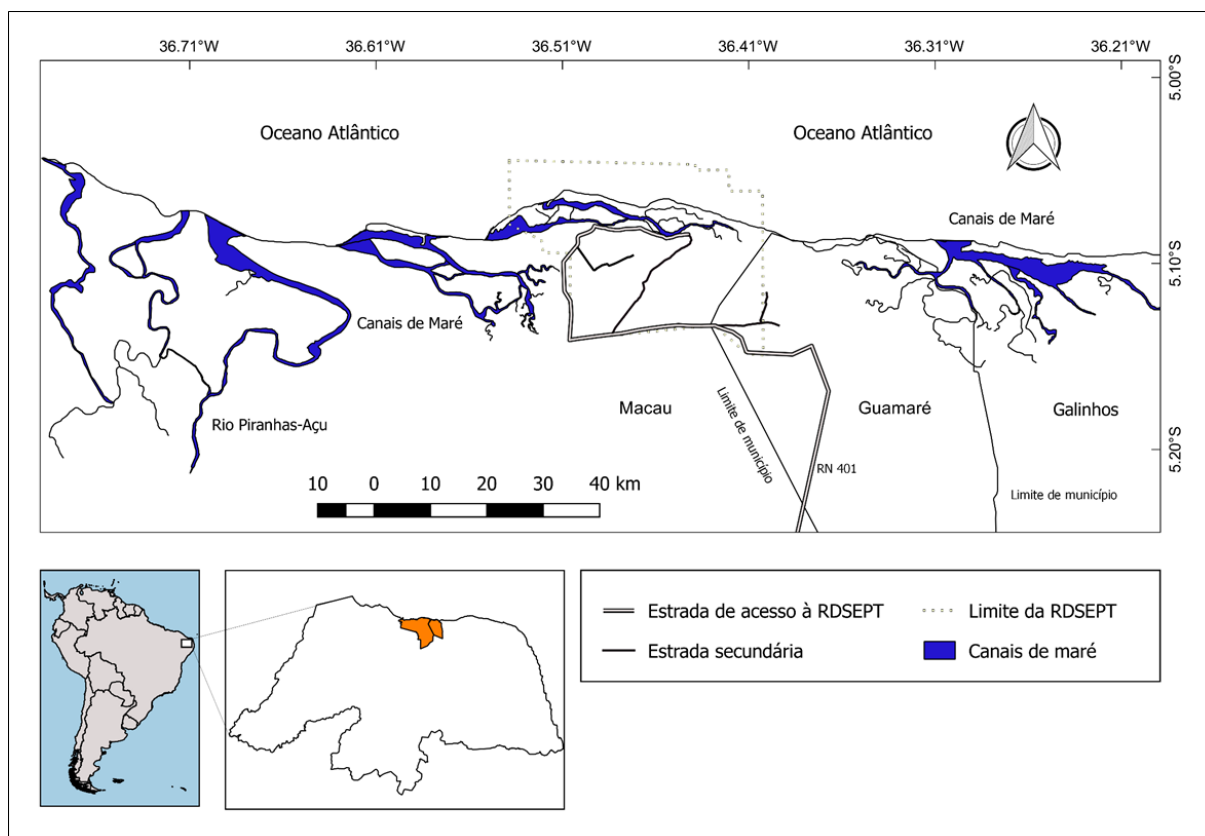


Figura 2.6 Mapa da rede hidrográfica da região de Macau-Guamaré e Galinhos / RN

2.3.3 Vegetação

A cobertura vegetal na região é muito diversificada e reúne três sistemas distintos de vegetação: mangue, caatinga e restinga. Os ambientes e as formações vegetais estão diretamente ligados aos fatores climáticos, ao tipo de solo e as flutuações de maré.

❖ Mangue

Composto essencialmente de arbustos de longas raízes que sustentam as árvores no solo lamoso, rico em nutrientes localizado na transição entre o meio terrestre e o marinho. Vivem nas zonas de influência das marés e se desenvolvem nos canais próximos a costa formando estuários. As espécies mais comuns na região é o mangue vermelho, o mangue preto e mangue branco. Essa baixa diversidade se deve às condições desse ecossistema, pois poucas espécies conseguem sobreviver em ambientes com pouco oxigênio, alta concentração de sal e solo instável.

As riquezas de suas águas formam um verdadeiro santuário para o desenvolvimento das diversas espécies de crustáceos como caranguejos, ostras, camarões e várias espécies de peixes que encontram as condições ideais para depositar seus ovos e abrigo para o desenvolvimento das larvas até que os filhotes possam alcançar o mar aberto (WILSON e MORRIS, 2012), (GHOSH, 2011). (Figura 2.7).



Figura 2.7 Foto de Manguezal da RDSEPT no Distrito de Diogo Lopes /Macau / RN - Foto: Fevereiro/2017

❖ **Caatinga**

A maioria das espécies vegetais da caatinga possui características xerofíticas que lhes permitem sobreviver em condições de aridez. Algumas armazenam água, outras possuem raízes superficiais para captar o máximo de água da chuva. E há as que contam com recursos para diminuir a transpiração, como espinhos e poucas folhas. A vegetação é formada por três estratos: o arbóreo, com árvores de 8 a 12 metros de altura; o arbustivo, com vegetação de 2 a 5 metros; e o herbáceo, abaixo de 2 metros. (Figura 2.8). Entre as espécies mais comuns estão a amburana, o umbuzeiro e o mandacaru. Algumas dessas plantas podem produzir cera, fibra, óleo vegetal e frutas (SILVA, 2004).



Figura 2.8 Exemplo de vegetação de caatinga localizada no município de Guamaré/RN - Foto: Fevereiro/2017

❖ **Restinga**

A vegetação de restinga possuem fatores abióticos, entre os quais se destacam a topografia do terreno, que apresentam faixas de elevações e faixas de depressões dependendo dos processos de deposição e remoção de materiais nessas regiões. A influência marinha, que diminui à medida que se avança para o interior, e o solo, é um importante condicionador e fator limitante da distribuição das formações florísticas. Essas condições ambientais determinam as diferentes fisionomias vegetais da restinga.

A vegetação herbácea ou subarbusciva é composta de vegetação rasteira com alguns arbustos, atingindo cerca de 1 metro de altura. Ocorre próximo ao mar, em praias, dunas, lagunas, banhados e depressões e são adaptadas às condições de salinidade e solo arenoso. A vegetação arbustiva localiza-se sobre cordões arenosos, formada por plantas arbustivas com até cinco metros de altura, que podem formar moitas separadas por áreas sem vegetação ou um adensamento contínuo. (ARAUJO E HENRIQUES, 1984) (Figura 2.9).



Figura 2.9 Vegetação de restinga localizada na RDSEPT no Distrito de Barreiras/Macau/RN - Foto: Fevereiro/2017

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geologia Regional

A área estudada está inserida na Bacia sedimentar potiguar, que faz parte do sistema de riftes cretáceos do nordeste brasileiro. Sua formação relaciona-se ao processo de estiramento crustal que resultou no rompimento do Supercontinente Gondwana, a partir do Mesozoico, e que culminou com a separação entre as placas Sul-Americana e Africana e a formação do Oceano Atlântico (BERTANI et al., 1990; SOARES et al., 2003). A porção emersa do Rifte Potiguar alonga-se segundo a direção SW / NE e compreende três unidades básicas: grábens, altos internos e plataformas do embasamento. (Figura 3.1).

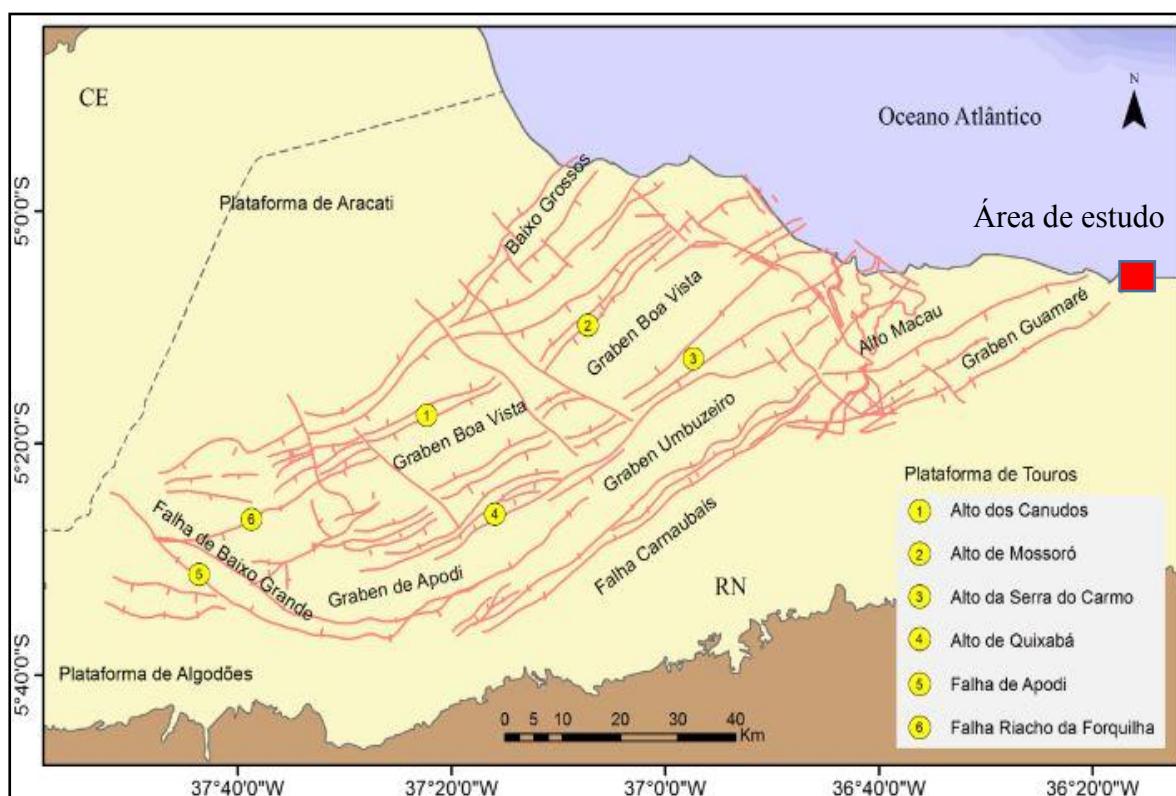


Figura 3.1 Mapa estrutural da porção emersa da Bacia Potiguar. (ANGELIM et al., 2006, HOERLLE et al., 2007)

O embasamento da bacia é formado por rochas pré-cambrianas da Província Borborema, constituída pelo amalgamento de blocos crustais arqueanos e proterozóicos compostos por sequências litoestratigráficas de rochas ígneas e metamórficas, (PEDROSA JUNIOR et al., 2010). De acordo com (ARARIPE E FEIJÓ,

1994) as rochas sedimentares da Bacia Potiguar estão organizadas em três grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha. A maior parte destas unidades litoestratigráficas foi definida com base na interpretação de dados de poço e de sísmica, uma vez que a exposição em afloramentos só contempla as rochas das formações Açú, Jandaíra, Tibau e Barreiras. (Figura 3.2).

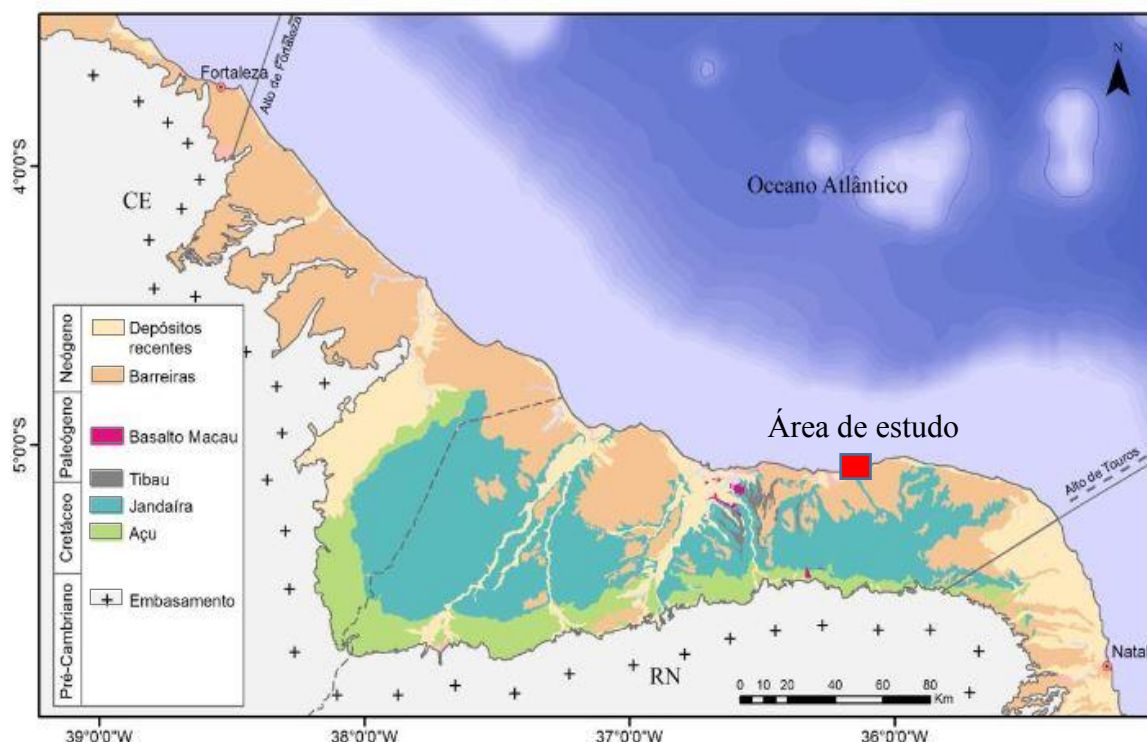


Figura 3.2 Mapa de geológico da Bacia Potiguar (Angelim et al., 2006; Mohriak, 2003)

3.2 Geologia Local

A geologia da área de estudo é constituída por rochas sedimentares e sedimentos eólicos não consolidados, que compreendem desde o Paleógeno, Neógeno até o Quaternário Recente, assim descritas na folha Macau, (BEZERRA et al.,2009) e folha Jandaíra, (VITAL et al.,2011).

As unidades que serão apresentadas em ordem cronológica (Figura 3.3), tem um papel importante do ponto de vista hidrogeológico, destacando-se os sedimentos eólicos litorâneos vegetados e não vegetados quanto ao armazenamento e fluxo das águas subterrâneas que compõem a área do aquífero dunas. As unidades adjacentes interagem com o aquífero dunas que suporta os ecossistemas que se desenvolveram na região (Figura 3.4).

➤ Grupo Barreiras – Enb

Cobertura sedimentar terrígena continental, de idade pliocênica, depositada por sistemas fluviais entrelaçados associados a leques aluviais. Esses sedimentos têm grande ocorrência no litoral brasileiro, estendendo-se desde o vale amazônico, por toda região costeira norte e nordeste, até o estado do Rio de Janeiro. Para o sul, sequências equivalentes têm sido encontradas até o Uruguai. Durante o Quaternário, as fases de erosão que se seguiram à deposição desses sedimentos resultaram na dissecação da superfície pós-Barreiras em modelados residuais de topos planos e encostas íngremes, dos quais os denominados Tabuleiros Costeiros são os representantes mais importantes e estão presentes ao sul da área e ao norte nas falésias, junto a linha de costa. VITAL, 2011).

➤ **Formação Tibau – E3N1t**

De acordo com (ARARIPE E FEIJÓ, 1994) é composta por arenitos calcíferos grossos, que podem estar interdigitados lateralmente com rochas das formações Guamaré e Barreiras. De acordo com (FARIAS, 1997), a Formação Tibau encontra-se topograficamente sobreposta aos basaltos e diabásios que compõem o Magmatismo Macau. Os afloramentos estão presentes na falésia de Chico Martins, ao norte da área de estudo, no assoalho praial, localizada geograficamente na frente da escarpa da Ponta do Tubarão. Este afloramento é constituído por arenito grosso, composto por grãos calcíferos dolomitizados, concreções ferrosas e por grânulos de quartzo.

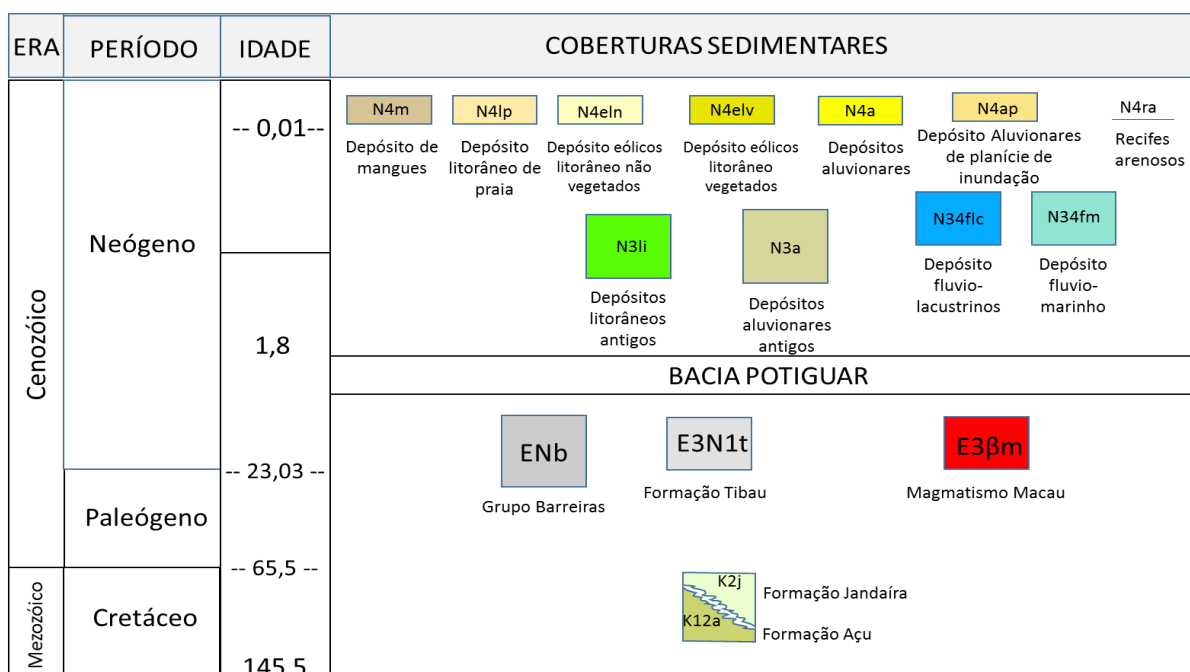


Figura 3.3 Coluna estratigráfica da geologia da área de estudo (Vital et al. 2011)

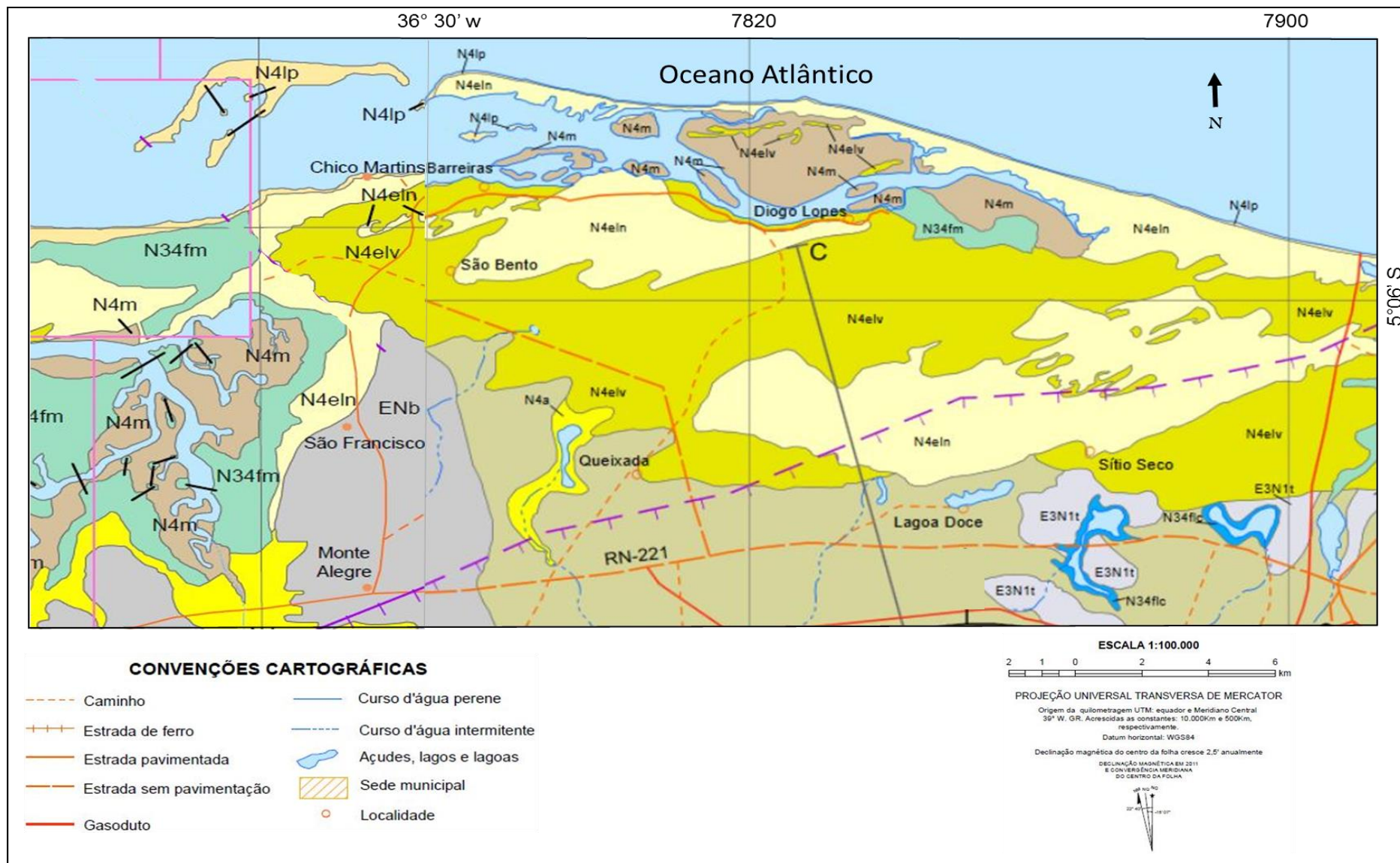


Figura 3.4 Mapa geológico da área do estudo adaptado. (VITAL et al., 2011).

2.2.2 Neógeno

➤ Depósitos Aluvionares antigos - N3a

Formam os terraços fluviais dos vales mais antigos cartografados na margem esquerda do rio Piranhas ou Açú. São constituídos por cascalhos, areias grossas e médias com intercalações subordinadas de areias finas e argilas, representando fácies fluviais meandringues proximais a distais e depósitos de transbordamento associados. Esses terraços estão associados à migração do paleocanal do rio Piranhas / Açú para leste até a posição atual. Está localizado ao sul da área do estudo, subposta as dunas móveis e fixas. (Figura 3.4). (BEZERRA *et al.*, 2006).

➤ Depósitos Flúvio – Marinheiros – N34fm

Formam as ilhas nos baixos cursos das principais drenagens e os terraços das margens das baías, sofrendo influência dos rios e das marés. Encontram-se no nordeste da área (Figura 3.4). São constituídos de areias finas, esbranquiçadas, quartzosas e texturalmente maduras. Esses depósitos são originados por processos de tração subaquosa, caracterizada pela migração de dunas de acreção lateral, constituindo fácies de canal e barras de canal (VITAL *et al.*, 2011).

➤ Depósitos Flúvio-Lacustrinos – N34flc

São constituídos por depósitos de barra de pontal, originários do regime meandrante dos rios, formados de areia fina a média intercalada com pelitos, depósitos de transbordamento constituídos por planície de inundação, ocasionada pelas cheias, com grande aporte de material siltico-argiloso e depósitos lacustres, com deposição sob baixa energia, resultando em fácies mais argilosas. Associados aos sedimentos de fundo de lagoas e bordejam os lagos formados ao sul da área. (Figura 3.4) (VITAL *et al.*, 2011).

➤ Depósitos de mangues - N4m

Encontrados ao longo da faixa litorânea (Figura 3.4). São constituídos por lamas arenosas, não adensadas e bioturbadas, contendo restos de vegetais em decomposição, recobertos por vegetação arbustiva característica. São originados por processos de tração/suspensão subaquosa, pela ação das marés, representando fácies de intermaré/submaré rasa. Associados aos sedimentos de mangues encontram-se as turfeiras. Esses depósitos encontram-se nos distritos de Sertãozinho, Diogo Lopes e Barreiras. (VITAL *et al.*, 2011).

➤ **Depósitos litorâneos de praias – N4lp**

Os depósitos de praia localizados nas ilhas barreiras, ao norte da área. (Figura 3.4). Ocorrem em uma faixa estreita e paralela à linha de costa constituídos por areias esbranquiçadas de granulação fina a grossa, quartzosas, bem selecionadas, limpas, ricas em bioclastos e por vezes em minerais pesados. Mostram estruturas sedimentares como marcas de onda de corrente e de interferência, *ripples* de adesão, *parting lineation* e bioturbação. São originados por processos de tração subaquosa, sob influência de marés em planície costeira suavemente inclinada; correspondendo a fácies de intermaré (BEZERRA et al.,2009)

➤ **Depósitos eólicos litorâneos vegetados – N4elv**

Os depósitos eólicos litorâneos são formados por sedimentos eólicos móveis e fixados por vegetação (Figura 3.4). Os depósitos eólicos vegetados e os não vegetados são as mais importantes unidades para o armazenamento de água subterrânea na área. São provenientes das areias da plataforma e dos terraços estuarinos sob forma de dunas, se diferenciando das dunas móveis por apresentarem baixo relevo, descontinuidade das estruturas típicas das dunas, muitas vezes com áreas totalmente ofuscadas destas feições sedimentológicas, e pelo recobrimento vegetal (VITAL et al., 2011).

➤ **Depósitos eólicos litorâneos não vegetados – N4eln**

Esta unidade é representada pelas dunas móveis. É constituída por areias esbranquiçadas de granulometria fina a média, bem selecionadas, com grãos arredondados. São do tipo barcana, barcanóide e parabólica formando campos de dunas e interdunas atuais. Apresentam formas com relevo que se destacam na paisagem, com pouca ou nenhuma vegetação. Elas se superpõem às paleodunas num processo migratório, deslocando-se no mesmo sentido das paleodunas. As discordâncias entre os depósitos eólicos vegetados e não vegetados são representadas por contatos abruptos entre dunas de diferentes texturas e colorações (Figura 3.4) (PINHEIRO, 2009).

➤ **Depósitos Aluvionares – N4a**

Ocorrem ao longo dos vales dos principais rios que drenam o estado e bordejando os lagos no sudoeste da área, local denominado como Queixada (Figura 3.4). São constituídos por sedimentos arenosos e argilo-arenosos, com níveis irregulares de cascalhos, formando os depósitos de canal de barras de canal e da

planície de inundação dos cursos médios dos rios. Originam-se por processos de tração subaquosa, compreendendo fácies de canal e barras de canal fluvial. Os depósitos de canal se constituem nos principais jazimentos de areia em volume de reservas para uso na construção civil, enquanto nos depósitos de planície (várzea) encontram-se as argilas vermelhas e subordinadamente as argilas brancas (VITAL et al. (2011).

4 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Neste capítulo serão analisadas e interpretadas as informações e dados referentes a uma caracterização do aquífero dunas, bem como aquelas coletadas em campo dos poços selecionados (Figura 4.3). Estas informações serão apresentadas em mapas, tabelas e gráficos para auxiliar e gerar subsídios para melhor definir o comportamento do aquífero dunas.

4.1 Cadastramento dos poços

O cadastramento de campo foi efetuado mediante visita a vários setores da área de estudo, na busca de captações de águas subterrâneas e outros corpos d'água de interesse para o estudo. As figuras 4.1 e 4.2 ilustram com fotos, alguns dos materiais utilizados no processo de cadastro e os tipos de poços cacimbões (escavados) e tubulares encontrados na área de estudo (VASCONCELOS, 2017).



Figura 4.1 Foto de poço tipo cacimbão encontrado na área e procedimentos de nivelamentos topográficos.



Figura 4.2– Foto de poço tipo tubular encontrado na área e procedimentos de nivelamentos topográficos.

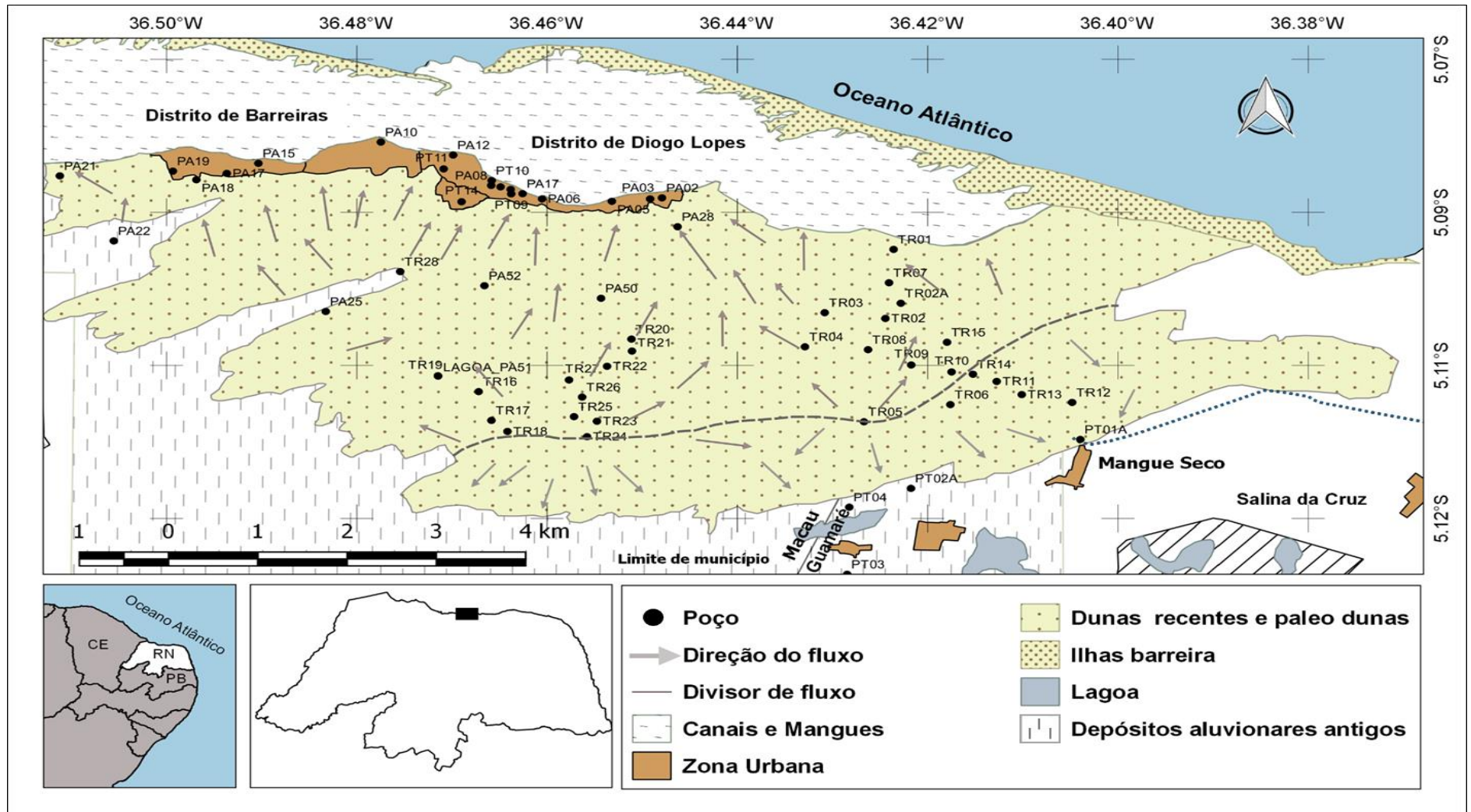


Figura 4.3 Mapa com os poços cadastrados e direção do fluxo das águas subterrâneas (PA – escavados-cacimbões, PT-tubulares, TR-afloramentos interdunas)

4.2 Parâmetros hidráulicos do aquífero dunas

Conforme (VARELA e BARBOSA, 1994), os parâmetros hidráulicos foram realizados através do método simplificado de Jacob (COOPER & JACOB, 1946). Foram realizados testes em 15 poços do aquífero dunas, com vazão que variavam de 2,0 a 5,59 m³. Conforme figura 4.4, perfil construtivo e descrição litológica dos poços utilizados para os testes. Os testes de dois poços foram acompanhados em piezômetros localizados a 10 e 14,71 metros. Entretanto, apenas em um dos poços, o teste foi realizado com duração de 24h, enquanto que nos outros poços, o tempo de bombeamento foi de 12h.

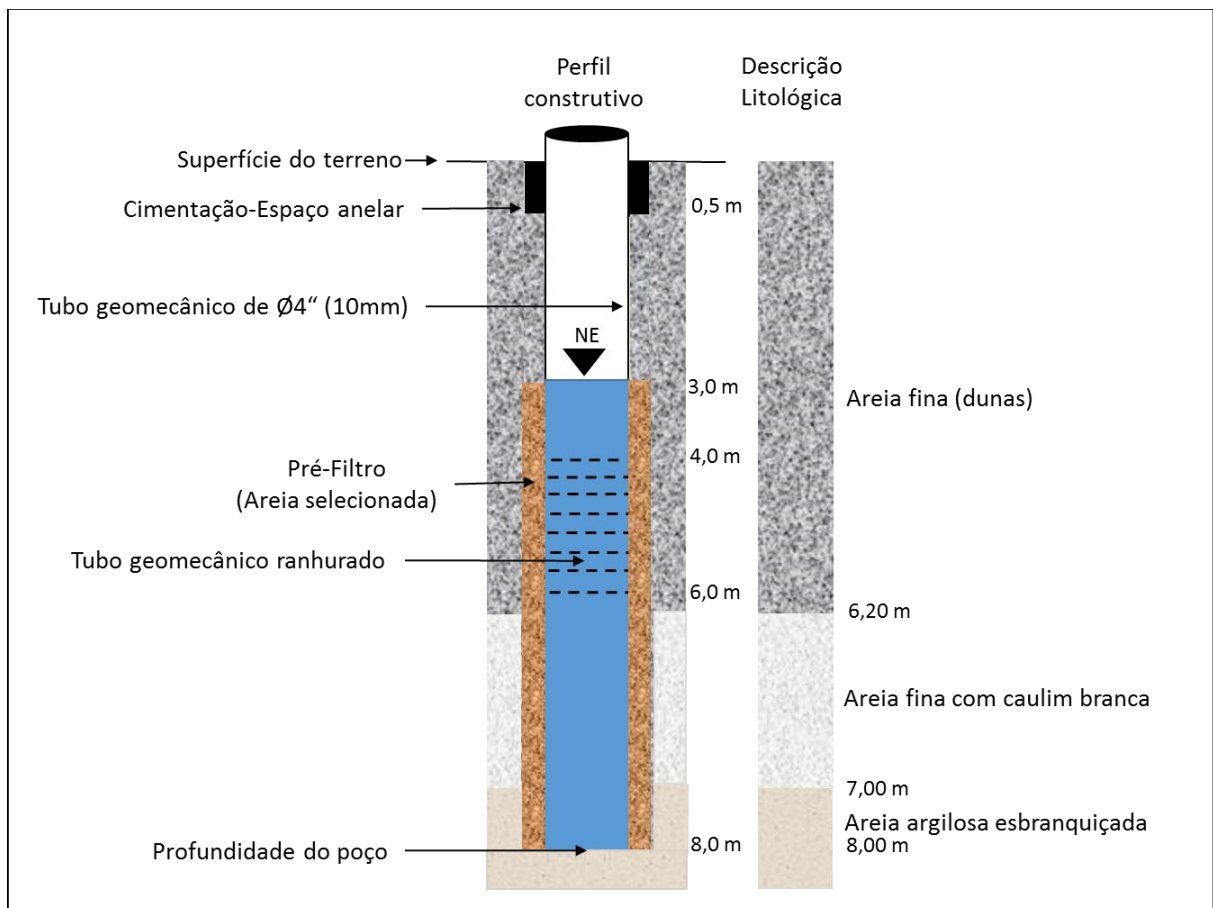


Figura 4.4 Perfil construtivo e descrição litológica dos poços encontrados na área de pesquisa

Os valores da transmissividade (T) variaram entre $1,15 \times 10^{-3}$ a $2,93 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo que, para efeito de cálculo foi considerado um T médio de $1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, com desvio padrão de 0,36, e foram obtidos através da expressão matemática:

$$T = \frac{0,183 \times Q}{S(10)} \quad (1)$$

Q= Vazão

S (10) = rebaixamento por ciclo logarítmico

Os valores da condutividade hidráulica (K) foram calculados para o valor de (b) igual a 4 metros e variaram entre $2,82 \times 10^{-4}$ a $7,32 \times 10^{-3}$, sendo considerado como K médio o valor de $4,13 \times 10^{-4}$ m/s, com desvio padrão de 0,36, e foram obtidos através da expressão matemática:

$$K = \frac{T}{b} \quad (2)$$

b = espessura saturada

A porosidade específica (μ) foi determinada através do teste de bombeamento com duração de 24h e acompanhado em um piezômetro a uma distância de 14,71 metros. O valor obtido foi de 0,05 ou 5% através da expressão matemática:

$$\mu = \frac{2,25 \times T \times t_0}{r^2} \quad (3)$$

t_0 = tempo que o rebaixamento é nulo

r = distância entre o poço bombeado e o piezômetro

4.3 Fluxo das águas subterrâneas

O fluxo das águas subterrâneas obedece às leis da hidrodinâmica que regem o escoamento das águas, sendo que o gradiente hidráulico, a partir da maior carga hidráulica, flui para pontos de menor carga. As cargas hidráulicas são determinadas através da medição da cota (Z) e do nível potenciométrico (NE) do poço. Após as medições, é feito o cálculo da carga hidráulica (h) utilizando a expressão matemática:

$$h = Z - NE \quad (1)$$

Z = Cota topográfica

NE = Nível potenciométrico

Para obtenção das cargas hidráulicas foi feito cadastramento e medição, em dois dias subsequentes, de 56 pontos de água, sendo poços tubulares, escavados (cacimbões) e afloramentos (Tabela 4.1), seguindo uma orientação geográfica e

distribuídos na área, para melhor representar a região de estudo sobre as informações hidrogeológicas. Após, foi elaborado o mapa potenciométrico da área (Figura 4.5).

Os fluxos das águas subterrâneas têm duas direções preferenciais na área de estudo. De sul para o norte com descarga na região estuarina e oceânica e do norte para o sul com descarga nos depósitos aluvionares antigos.

Tabela 4.1 Tabela de pontos de água para determinação das cargas potenciométricas

Poco	X	Y	Z	Ne	Carga
PA02	783367,93	9437358,52	2,624	1,92	0,704
PA03	783229,90	9437344,61	3,335	2,7	0,635
PA05	782785,85	9437313,55	3,770	2,97	0,800
PA06	781976,18	9437349,98	3,279	2,23	1,049
PA08	781387,05	9437536,63	8,921	2,23	6,691
PA10	780108,80	9438137,06	12,723	2,01	10,713
PA12	780946,59	9437955,95	2,349	1,54	0,809
PA15	778687,15	9437850,92	9,147	0,39	8,757
PA17	778319,54	9437713,92	13,320	4,29	9,030
PA18	777966,25	9437627,89	14,885	6,06	8,825
PA19	777693,90	9437747,66	13,991	5,15	8,841
PA21	776382,32	9437687,94	11,756	5,52	6,236
PA22	777004,82	9436792,41	12,573	3,05	9,523
PA25	779460,54	9435813,39	17,761	6,3	11,461
PA27	781613,00	9437481,00	4,275	2,11	2,165
PA28	783547,00	9436961,00	3,644	1,71	1,934
PT01A	788208,00	9434021,00	8,460	4,71	3,750
PT02A	786240,00	9433357,00	9,568	2,21	7,358
PT03	785494,98	9432180,66	13,850	7,21	6,640
PT04	785523,73	9433101,62	9,142	3,21	5,932
PT09	781618,15	9437419,83	6,934	5,62	1,314
PT10	781392,08	9437603,50	2,911	2,5	0,411
PT11	780836,07	9437765,94	20,070	10,35	9,720
PT13	781495,03	9437516,21	4,558	3,87	0,688
PT14	781041,80	9437314,43	14,989	3,72	11,269
PA17	781750,25	9437422,15	4,068	3,75	0,318
PA50	782655,00	9435982,00	12,740	2,28	10,460
PA52	781303,00	9436160,00	16,723	1,08	15,643
LAGOA_PA51	780758,00	9434926,00	11,564	0	11,564
TR01	786052,00	9436640,00	1,641	0	1,641
TR02	785953,00	9435692,00	12,314	0	12,314
TR02A	786133,00	9435900,00	6,665	0	6,665
TR03	785249,00	9435774,00	13,038	0	13,038
TR04	785018,00	9435306,00	12,559	0	12,559
TR05	785699,00	9434274,00	16,294	0	16,294
TR06	786702,00	9434506,00	11,571	0	11,571
TR07	785997,00	9436182,00	2,594	0	2,594
TR08	785750,00	9435264,00	11,346	0	11,346
TR09	786250,00	9435052,00	11,196	0	11,196
TR10	786718,00	9434954,00	11,125	0	11,125
TR11	787241,00	9434822,00	9,411	0	9,411
TR12	788115,00	9434530,00	8,265	0	8,265
TR13	787531,00	9434640,00	9,254	0	9,254
TR14	786966,00	9434922,00	12,377	0	12,377
TR15	786667,00	9435362,00	11,124	0	11,124
TR16	781230,00	9434706,00	11,609	0	11,609
TR17	781377,00	9434310,00	14,096	0	14,096
TR18	781562,00	9434158,00	14,685	0	14,685
TR19	780760,00	9434920,00	11,529	0	11,529
TR20	783006,00	9435420,00	11,145	0	11,145
TR21	783011,00	9435256,00	11,726	0	11,726
TR22	782721,00	9435048,00	11,580	0	11,580
TR23	782601,00	9434294,00	14,533	0	14,533
TR24	782485,00	9434082,00	18,488	0	18,488
TR25	782335,00	9434358,00	17,950	0	17,950
TR26	782430,00	9434626,00	15,577	0	15,577
TR27	782279,00	9434862,00	12,407	0	12,407
TR28	780326,00	9436358,00	17,000	0	17,000

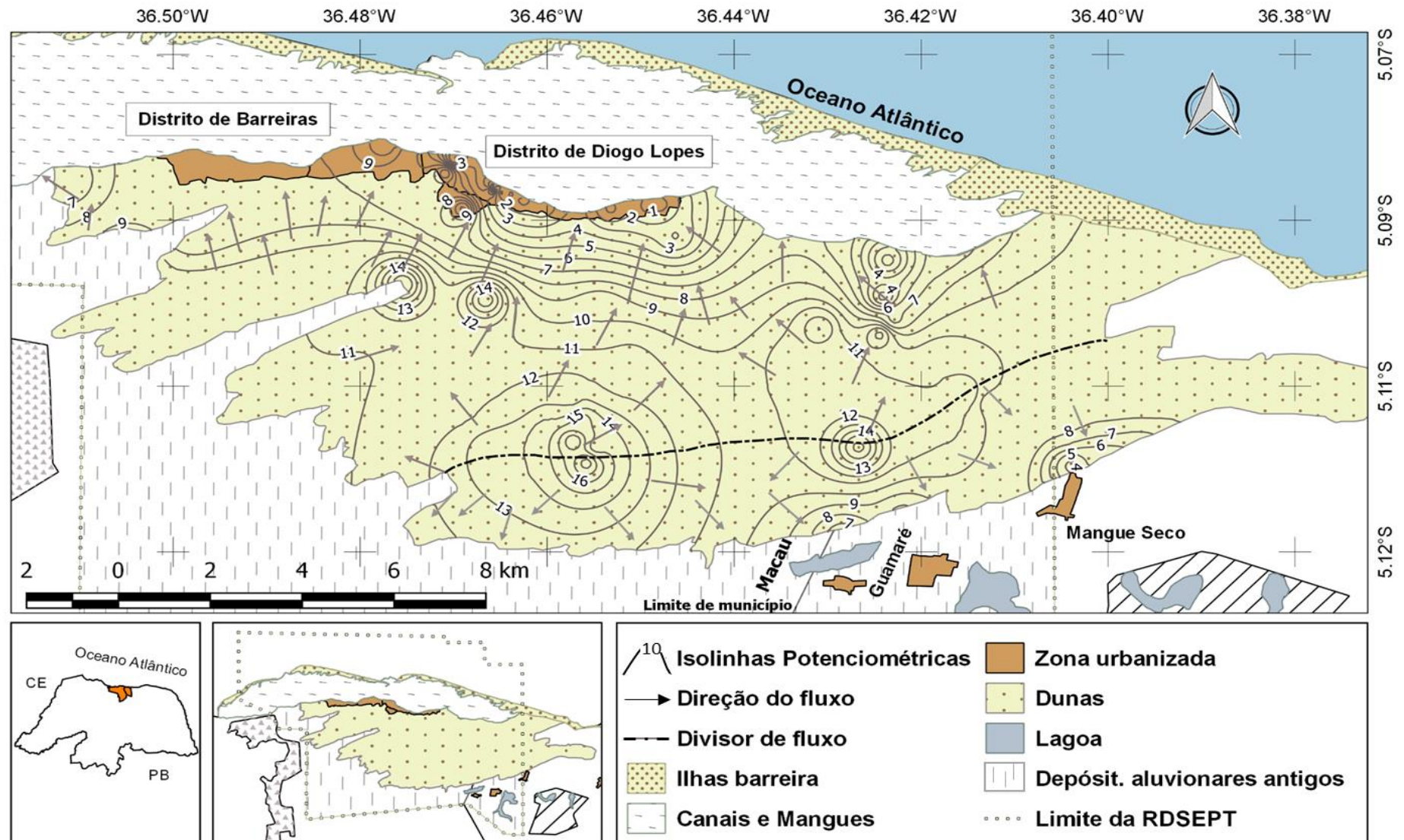


Figura 4.5 Mapa potenciométrico com indicação da divisão e direção do fluxo subterrâneo

4.4 Vazão de escoamento natural

A vazão de escoamento natural foi calculada em duas frentes de escoamento: frente de escoamento norte e frente de escoamento sul e foi feita com base no mapa potenciométrico, conforme figura 4.5.

A frente de escoamento norte direciona a vazão para o litoral, onde encontramos o estuário e o oceano e a frente de escoamento sul tem a vazão para depósitos aluvionares antigos. Os parâmetros utilizados para o cálculo foram:

$T = 1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $K = 4,13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Para o cálculo da vazão de escoamento é utilizada a equação:

$$Q = TiL \quad (1)$$

Onde: T= Transmissividade; i = gradiente hidráulico e L= frente de escoamento

A frente de escoamento norte, a distância medida do comprimento foi de 9.300 metros e o gradiente hidráulico, entre o intervalo das equipotenciais, foi calculado em 0,03. O resultado obtido para frente de escoamento norte foi de $Q = 1,46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A frente de escoamento sul, a distância medida do comprimento foi de 7400 metros e o gradiente hidráulico, entre o intervalo das equipotenciais, foi calculado em 0,002. O resultado obtido para frente de escoamento sul foi de $Q = 0,78 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

É importante salientar que a frente de escoamento norte é compatível com os valores encontrados da reserva reguladora que é de $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4.5 Reservas das águas subterrâneas

Segundo Feitosa (2008), as reservas reguladoras ou recursos renováveis representam a quantidade de água livre armazenada pelo terreno do aquífero ao curso de uma recarga por alimentação natural e estão submetidas ao efeito do ritmo sazonal das precipitações. No caso dos aquíferos livres, as variações sazonais é o resultado das infiltrações das precipitações meteóricas nos períodos chuvosos e descargas no período de estiagem que produzem variações no nível potenciométrico, entre um valor máximo no período chuvoso ou logo após esse período e um valor mínimo na estiagem ou logo após o período (Figura 4.6).

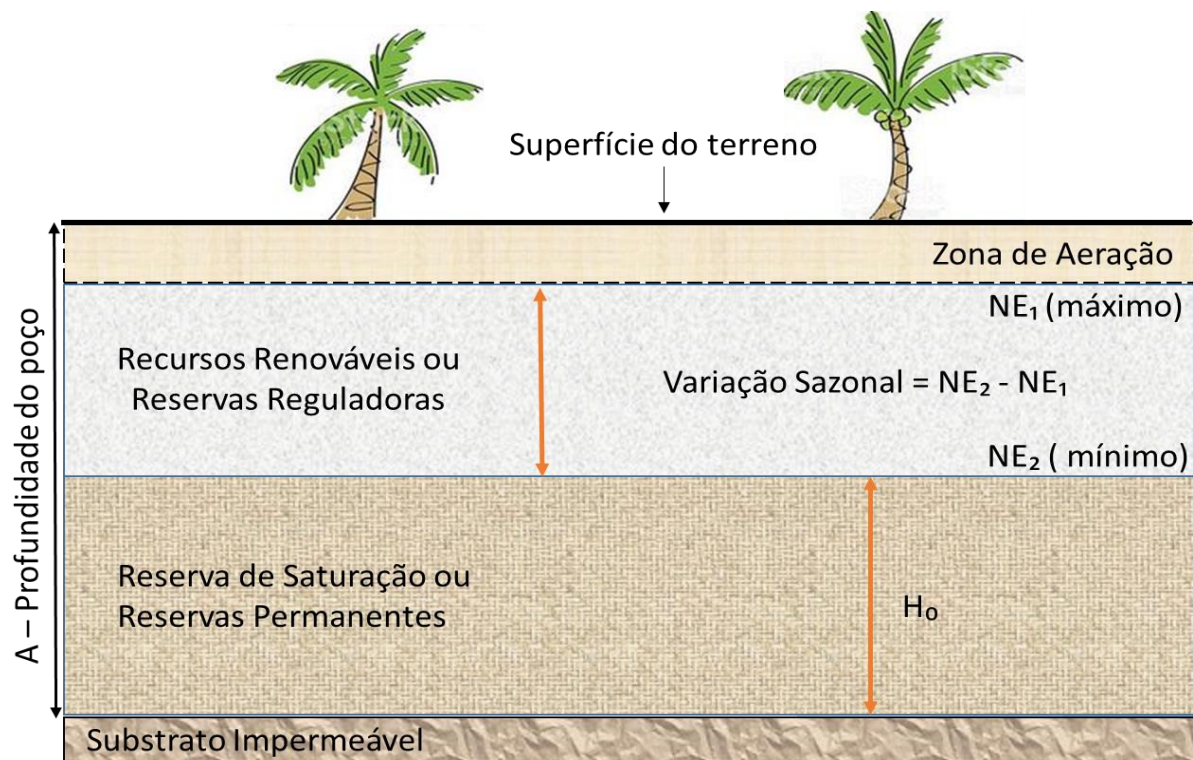


Figura 4.6 – Esquema dos recursos renováveis através da variação sazonal do nível potenciométrico .

4.5.1. Reserva reguladora (Rr)

Variação média temporal é obtida com o monitoramento de poços distribuídos na área do aquífero que considera a oscilação do nível potenciométrico máximo (NE_1) e do nível estático mínimo (NE_2), sendo assim, para obter a avaliação da reserva reguladora deve-se conhecer essas variações sazonais, bem como, a porosidade específica do aquífero. O seu cálculo pode ser determinado pela equação a seguir:

$$Rr = A * \Delta h * \mu \quad (1)$$

Onde:

A - Área em m^2

Δh – Variação de altura da superfície potenciométrica

μ – Porosidade efetiva

Para o cálculo da reserva reguladora foi definida uma área de $47,25 \text{ Km}^2$ que corresponde a porção dos sedimentos eólicos litorâneos vegetados e sedimentos eólicos litorâneos não vegetados, da área de estudo. A porosidade específica (μ)

adotada foi de 5%, (VARELLA e BARROSO, 1994). A variação potenciométrica foi obtida pelos valores coletados de cada poço entre o mês de janeiro/2015 a agosto/2017 e a média foi calculada em 0,61m de variação, como apresentado na Figura 4.7 e Tabela 4.2.

Assim, a reserva reguladora é da ordem de $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$.

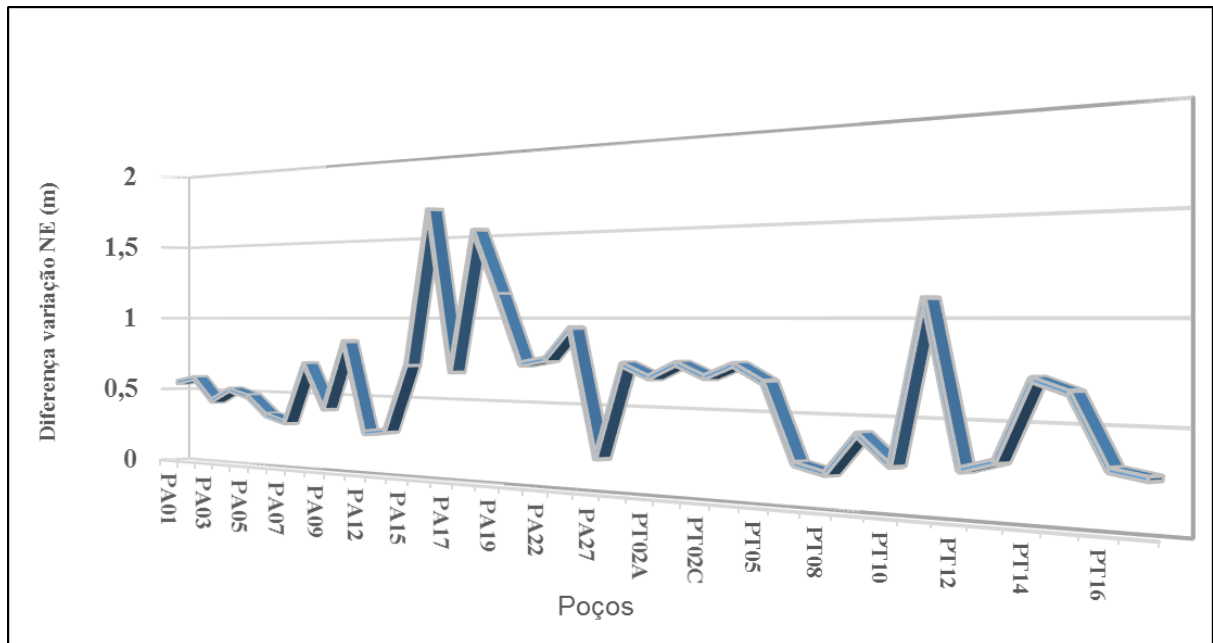


Figura 4.7 Diferença entre NE máximo e NE mínimo no período de Jan/2015 a Ago/2017

Tabela 4.2 Variações sazonais do nível potenciométrico (NE)

Poço	(A)Profundidade poço (m)	Variação (NE)		Variação (NE ₂) - (NE ₁) (m)	Reserva de Saturação (A) - (NE ₂)
		Mínimo (NE ₂) (m)	Máximo (NE ₁) (m)		
PA01	2,61	2,18	1,63	0,55	0,43
PA02	1,92	1,69	1,11	0,58	0,23
PA03	2,33	2,11	1,68	0,43	0,22
PA04	2,5	1,9	1,39	0,51	0,6
PA05	3,16	2,77	2,3	0,47	0,39
PA06	2,5	2,36	2,01	0,35	0,14
PA07	3,12	2,55	2,24	0,31	0,57
PA08	2,22	2,02	1,32	0,7	0,2
PA09	5,38	5,34	4,93	0,41	0,04
PA10	2,38	1,72	0,87	0,85	0,66
PA12	1,8	1,41	1,14	0,27	0,39
PA14	4,3	3,99	3,7	0,29	0,31
PA15	1,18	0,74	0,03	0,71	0,44
PA16	4,54	4,39	2,72	1,67	0,15
PA17	3,52	3,52	3,03	0,49	0
PA18	6,52	5,9	4,37	1,53	0,62
PA19	4,7	4,7	3,65	1,05	0
PA21	5,65	4,63	3,9	0,73	1,02
PA22	3,45	3,34	2,58	0,76	0,11
PA25	5,18	5,18	4,72	0,46	0
PA27	2,35	1,78	1,58	0,2	0,57
PA28	1,7	1,7	0,97	0,73	0
PT02A	5,2	2,34	1,67	0,67	2,86
PT02B	5,45	1,83	1,08	0,75	3,62
PT02C	5,9	2,47	1,79	0,68	3,43
PT04	3,36	3,1	2,35	0,75	0,26
PT05	5,23	3,65	2,99	0,66	1,58
PT06	5,01	4,16	3,92	0,24	0,85
PT08	3,15	1,68	1,48	0,2	1,47
PT09	6,42	5,71	5,3	0,41	0,71
PT10	3,72	2,34	2,08	0,26	1,38
PT11	13,65	10,8	9,7	1,1	2,85
PT12	13,96	6,51	6,25	0,26	7,45
PT13	6,95	3,74	3,43	0,31	3,21
PT14	5,65	3,61	2,9	0,71	2,04
PT15	16,56	10,07	9,42	0,65	6,49
PT16	3,32	2,73	2,43	0,3	0,59
PT17	9,35	3,57	3,3	0,27	5,78

PA= Poço escavado (cacimbão), PT= Poço tubular

4.5.2 Reservas permanentes (Rp)

Considera-se reserva permanente ou reserva de saturação no caso de aquífero livre, o volume de água subterrânea armazenado abaixo da posição mínima das flutuações da zona saturada do nível freático (Figura 4.2). Essa reserva participa do ciclo hidrológico através do tempo numa escala plurianual, centenária ou até milenar. O cálculo da reserva permanente pode ser avaliado pela seguinte expressão matemática:

$$Rp = A * H_0 * \mu \quad (2)$$

Onde:

A - Área em m^2

H_0 – Espessura saturada mínima

μ – Porosidade efetiva

O valor do (H_0) foi calculado em função da profundidade de cada poço, menos os valores mínimos (NE_2) da flutuação sazonal. A partir dos valores apurados, a média das espessuras saturadas foi calculada em 1,40m. De acordo com (VARELLA E BARROSO, 1994), a espessura saturada é de 4m, no pico do verão. Levando em consideração que a área está passando por uma das piores estiagens da história (MARTINS e MAGALHÃES, 2015), o valor da reserva permanente de $3,42 \times 10^6 m^3$ está coerente com o trabalho.

Somando a equação (1) e (2), pode-se obter a reserva total que é de $4,91 \times 10^6 m^3$. O cálculo da reserva é difícil de ser estimado com precisão, uma vez que não é conhecido o comportamento da espessura saturada em toda área do aquífero.

4.5.3 Recursos exploráveis

A precipitação média pluviométrica na região foi calculada em 521mm (INMET) com dados da estação meteorológica de Macau e a área do aquífero dunas foi calculada em $47,5 km^2$. Pesquisas efetuadas por (VARELLA e BARROSO, 1994) na área da reserva em Diogo Lopes e (SILVEIRA, 2002) na região de Guamaré, com características hidrogeológicas e climáticas semelhantes, determinou um coeficiente de infiltração na ordem de 20%(vinte por cento). Considerando os dados, pode-se estimar os recursos renováveis (recarga) em cerca de $4,95 \times 10^6 m^3 / ano$.

A demanda necessária para o abastecimento da região da reserva e entorno é da ordem de $5,84 \times 10^4 m^3 / ano$, com uma população estimada em 8000 pessoas (IBGE) e considerando um volume de 20 litros de água por pessoa por dia, para suprir

as necessidades mínimas básicas, a uma distância não superior a mil metros. Essas fontes incluem ligações domésticas, fontes públicas, fossos, poços e nascentes protegidas, (ONU).

O cálculo da reserva é difícil de ser estimado com precisão uma vez que não é conhecido o comportamento da espessura saturada em toda região. Considerando a porosidade específica de 5% e a média calculada em 0,61m de variação do rebaixamento anual, entre os anos de 2015 e 2017, com médias abaixo das precipitações históricas (MARTINS e MAGALHÃES, 2015), a reserva reguladora é da ordem de $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$, que representa 24 vezes o volume anual requerido para região.

Os cálculos de recursos e reservas, embora simplistas, permitem concluir que o aquífero dunas tem condições de abastecer a região em anos normais de precipitações pluviométricas e até mesmo em anos com baixa precipitações.

5 AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A avaliação hidroquímica e qualidade da água na área de estudo, reuniu trabalhos anteriores de pesquisa hidrogeológica, hidroquímica e amostras de águas coletadas em janeiro/2018. Para as coletas, foram selecionados 20 amostras de água de poços e uma amostra de água superficial (lagoa), totalizando 21 amostras de águas, distribuídas no espaço de pesquisa para melhor representar as características hidroquímicas e a sua interação com a natureza geológica dos extratos que compõem o aquífero.

5.1 Análise da consistência dos dados

Para avaliar a qualidade, a confiabilidade e a consistência dos dados das análises laboratoriais, foi aplicada a equação do cálculo de erro do balanço iônico (e%), baseado no erro prático (Ep), definido por Logan, (1965).

$$(e\%) = \frac{r\sum\text{ânions} - r\sum\text{cátions}}{r\sum\text{ânions} + r\sum\text{cátions}} \times 100 \quad (2)$$

Foram considerados as somatórias dos cátions (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) e somatória dos ânions (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻), expresso nas unidades em meq/L. Conforme Custodio & Llamas (1983), o erro do balanço iônico deve ser preferencialmente menor que 5%, no entanto considerou-se uma margem absoluta abaixo de 10%, acima desse valor, deve-se desconsiderar a análise na interpretação hidroquímica. Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Qualidade dos resultados das análises, segundo classificação da diferença percentual.

Qualidade dos resultados	Excelente	Bom	Razoável	Não aceitável
Erro (%)	≤ 2,5	2,5 a 5	5 a 10	>10

Fonte: Custodio&Llamas (1983)

Conforme tabela 5.2, foram analisadas 21 amostras, cinco apresentaram erros entre 5% e 10% (PA03, PA08, PA20, PA21 e PA25), representando 23% das amostras analisadas, sete apresentaram erros entre 2,5% a 5% (PA05, PA12, PA28, PT01A, PT02B, PT14 e PT51), representando 33% das amostras e oito amostras apresentaram erros abaixo de 2,5%, representando 38% das amostras e uma amostra apresentou erro (10,78) acima de 10% (PA06). Não foi necessário excluir nenhuma amostra da análise. Figura 5.1

Tabela 5.2 Tabela dos valores da somatória do balanço iônico e dos erros calculados

Nome Amostra	Cátions			ânions			Somatória (Σ)		Erro (e%)
	Na + K (me/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl + NO ₃ (meq/L)	CO ₃ + HCO ₃	SO ₄ (meq/L)	Σ cátions (meq/L)	Σ ânions (meq/L)	
LAG 51	21,7357	2,6745	10,2981	23,7847	4,8697	7,3994	34,7083	36,0538	-1,90
PA 03	41,7161	6,1408	10,8738	55,6048	4,8898	5,0359	58,7307	65,5305	-5,47
PA 05	10,6738	5,8003	3,0092	13,0483	4,8098	2,7357	19,4833	20,5938	-2,77
PA 06	6,1915	4,5081	1,829	10,3099	3,4598	1,7857	12,5286	15,5554	-10,78
PA 08	2,3502	3,1459	1,5198	4,2336	3,3698	0,8692	7,0159	8,4726	-9,41
PA 10	1,2404	2,7549	0,8101	1,3369	3,3398	0,0548	4,8054	4,7315	0,77
PA 12	10,6531	7,0326	2,8694	11,6354	9,1096	1,7866	20,5551	22,5316	-4,59
PA 15	1,5705	2,384	0,7731	1,4822	2,9999	0,0729	4,7276	4,555	1,86
PA 18	6,3724	2,9254	0,8397	6,7729	1,9899	1,8072	10,1375	10,57	-2,09
PA 20	6,4815	6,6422	2,8694	13,0035	3,8498	1,935	15,9931	18,7883	-8,04
PA 21	22,9391	1,6832	2,4483	18,8544	9,5495	3,864	27,0706	32,2679	-8,76
PA 25	6,6224	2,0036	1,2492	3,7675	5,4897	2,0862	9,8752	11,3434	-6,92
PA 27	0,7901	3,1559	0,7295	1,0816	3,2198	0,2065	4,6755	4,5079	1,83
PA 28	2,2007	0,9718	1,2994	1,6824	2,2299	0,8313	4,4719	4,7436	-2,95
PA 50	8,2239	7,263	1,9392	10,5151	6,7997	0,5234	17,4261	17,8382	-1,17
PT 01 A	0,7102	2,0636	0,69	0,3907	3,259	0,066	3,4638	3,7157	-3,51
PT 02 B	0,56	0,5009	0,4902	0,5107	0,95	0,204	1,5511	1,6647	-3,53
PT 04	0,6602	2,6445	1,0708	1,2264	2,9199	0,3296	4,3755	4,4759	-1,13
PT 14	1,5101	3,5863	1,1596	2,3302	4,2498	0,3177	6,256	6,8977	-4,88
PT 50	0,8701	2,7849	1,1793	1,0443	3,5599	0,4283	4,8343	5,0325	-2,01
PT 51	2,7594	0,6214	3,4286	2,8634	3,8898	0,4347	6,8094	7,1879	-2,70

Fonte: Dados das análises laboratoriais

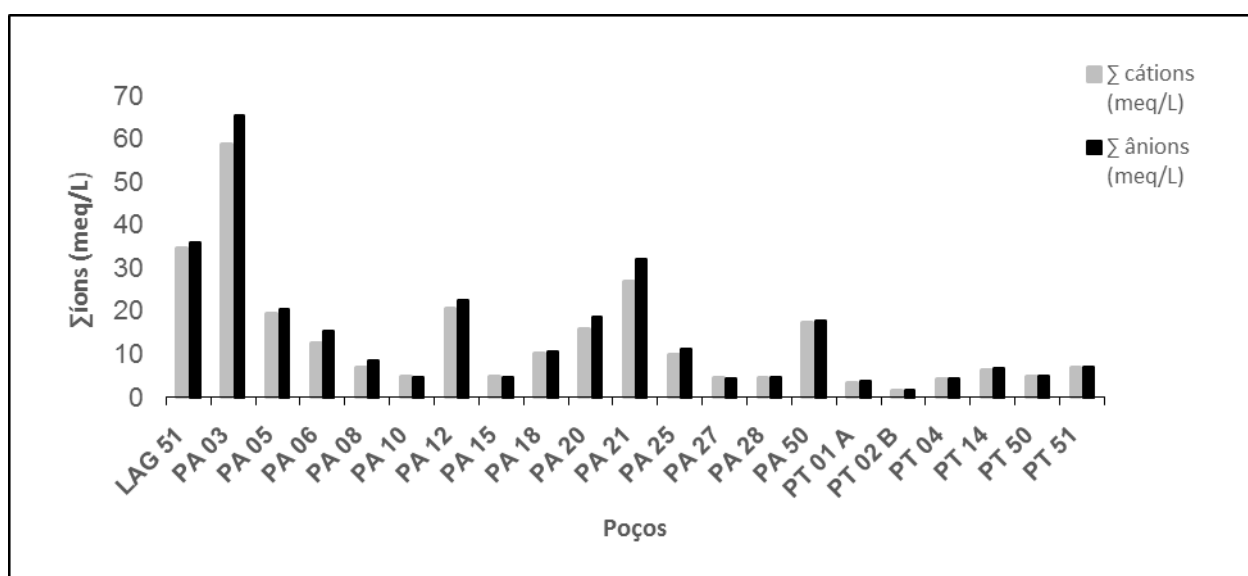


Figura 5.1 Comparação das somatórias entre cátions e ânions

5.2 Síntese dos dados obtidos

Os valores estatísticos simplificados considerados no contexto desse trabalho, referem-se aos dados das 21 amostras e apresenta os valores referentes ao máximo, ao mínimo, a mediana, a média e o desvio padrão, conforme tabela 5.3.

Os dados obtidos apresentam valores do desvio padrão bastante elevados nos principais íons da análise, caracterizando grandes diferenças entre os locais coletados.

Os resultados das análises foram divididos em duas áreas distintas, agrupados conforme estudo de uso e ocupação do solo. Das 21 amostras analisadas, 12 amostras estão localizadas na área urbana, concentrada na direção norte junto a linha de costa e 09 amostras estão localizadas nas áreas rurais com baixa ocupação urbana.

Os valores do pH observados oscilam entre 6,50 a 8,90, com valor médio de 7,80 com um desvio padrão de 0,57. Na média as águas subterrâneas analisadas têm uma tendência alcalina ($\text{pH} > 7$), sendo que apenas duas amostras (P18 e PT02B) tem valores abaixo de 7,0. Essa tendência de alcalinidade é observada na zona urbana como na zona rural.

Tabela 5.3 Resultado da síntese dos dados estatísticos simplificados

Parâmetros	Unidade	Máximo	Mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
pH		8,90	6,50	7,70	7,80	0,57
Cond. Elétrica (CE)	µS/cm	6135,00	146,00	904,50	1378,00	1382,80
Sól. Tot. Dissolv. (STD)	mg/L	3987,80	94,90	488,20	865,66	887,40
Cálcio (Ca ²⁺)	mg/L	145,28	10,02	55,71	67,93	40,29
Magnésio (Mg ²⁺)	mg/L	132,22	5,95	15,80	29,85	33,87
Sódio (Na ⁺)	mg/L	920,92	11,04	47,84	161,51	217,88
Potássio (K ⁺)	mg/L	69,81	1,95	10,92	17,29	18,82
Cloreto (Cl ⁻)	mg/L	1967,77	13,85	84,14	290,25	436,19
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	mg/L	49,80	0,00	0,00	5,67	14,12
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	mg/L	533,23	57,96	211,09	246,34	114,25
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	355,40	2,63	39,93	74,96	88,64
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L de N	50,97	0,00	2,92	9,82	15,23
Cádmio (Cd ⁺)	mg/L	0,007	0,000	0,000	0,001	0,003
Cobre (Cu)	mg/L	0,430	0,013	0,064	0,123	0,147
Chumbo (Pb)	mg/L	0,110	0,010	0,055	0,058	0,031
Cromo (Cr)	mg/L	0,133	0,007	0,023	0,038	0,043
Ferro (Fe)	mg/L	7,240	0,620	0,825	1,918	2,389
Manganês (Mn)	mg/L	0,273	0,107	0,130	0,151	0,058
Níquel (Ni)	mg/L	0,047	0,007	0,020	0,022	0,013
Zinco (Zn)	mg/L	0,207	0,073	0,092	0,110	0,045

Fonte: Resultados das análises amostrais e tratamento estatístico *software Excel*

Os sólidos totais dissolvidos (STD) variam de 94,90 mg/L a 3987,80 mg/L, com média de 865,66 mg/L. O desvio padrão é de 887,40 mg/L é considerado bastante elevado, seguindo a tendência da condutividade elétrica. A relação STD/CE fica assim definida: $865,66 / 1378 = 0,63$. Com base na relação calculada e STD estimado, seguiu-se a classificação proposta pela resolução CONAMA 357/2005. Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Classificação da água em função dos sólidos totais dissolvidos (STD)

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

Fonte: CONAMA 357/2005

No total de 21 amostras analisadas, 11 amostras encontram-se no intervalo de classificação para água doce, 7 amostras para água salobra e 3 amostras para água salgada.

A condutividade elétrica (CE) variou 146 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 6135 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com uma média de 1378 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e desvio padrão muito elevado de 1382,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esses valores indicam que as águas subterrâneas analisadas, em geral, são de baixa a média salinidade. As amostras com maiores valores em condições naturais estão localizadas próximas a linha de costa, indicando influência da água do mar, sendo que as águas analisadas na zona rural, apresentam baixas condutividades elétricas.

Teor de cálcio apresenta máximo de 145,28 mg/L e mínimo de 10,02 mg/L, com média de 67,93 mg/L e desvio padrão de 40,29 mg/L. A sua presença, em geral, é sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato. O magnésio apresentou valor máximo de 132,22 mg/L e mínimo de 5,95 mg/L e média de 33,87 mg/L com desvio padrão de 33,87 mg/L. A variação máxima e mínima ocorreu entre as amostras PA03 e PA15 respectivamente. O potássio apresentou grande variação entre as análises amostrais. Valor máximo de 69,81 mg/L e mínimo de 1,95 mg/L com média de 17,29 mg/L, sendo que entre as 21 amostras analisadas, 11 amostras apresentaram teores acima de 10 mg/L. A frequência de teor de potássio em águas subterrâneas é inferior a 10 mg/L, sendo mais frequente valores entre 1 a 5mg/L (Santos, 2008).

Entre os cátions, o sódio é o que apresenta o maior valor 920,92 mg/L, com média de 161,51 mg/L e desvio padrão de 217,88 mg/L, indicando uma amplitude de variação expressiva entre as amostras analisadas

O cloreto variou de 1967,77 mg/L a 13,85 mg/L com média de 290,25 mg/L e um alto desvio padrão de 436,19, considerado elevado em comparação a outros íons. É habitual sua ocorrência estar associado ao sódio e grande concentração indica uma boa correlação com a condutividade elétrica e aos sólidos totais dissolvidos.

Os bicarbonatos estão presentes em todas as amostras analisadas. Os valores variam entre um máximo de 533,23 mg/L a mínimo de 57,96 mg/L, com a média de 246,34 mg/L e desvio padrão de 114,25. Os carbonatos foram observados em quatro amostras: PA12 (pH - 8,5), PA21 (pH – 8,9), PA28 (pH – 8,5) e LAG51 (pH – 8,9). Conforme Younger (2008), a sua presença, dissolvido em águas, somente se verifica quando o pH é superior a 8,5, como verificado nas análises das amostras.

O sulfato variou de 355,40 mg/L a 2,63 mg/L com média de 74,96 mg/L e desvio padrão de 88,64. Apenas uma amostra (LAG51) está com valor acima do recomendado, que é de 250 mg/L SO₄, para Águas Classe 1 – Águas Doces, resolução do CONAMA N° 357/2005.

O nitrato está presente em 16 amostras e duas não foram identificadas sua presença, em um total de 21, sendo que três amostras não foram possíveis realizar a análise. Das 18 amostras, cinco apresentaram teores acima dos limites recomendados, que é de 10 mg/L N, para Águas Classe 1 – Águas Doces, resolução CONAMA N° 357/2005 do Ministério do Meio Ambiente. A concentração máxima encontrada foi de 50,97 mg/L. Os poços analisados que possuem concentrações acima do limite estabelecido encontram-se em área urbana, onde não há saneamento básico e as fossas estão próximas aos poços na direção do fluxo subterrâneo, que provavelmente, está contaminando as águas subterrâneas por nitrato.

Alguns íons secundários e traços (metais pesados) foram analisado em 6 amostras, distribuídas na área de estudo. Tabela 5.5. Todos apresentaram valor máximo amostral acima do limite permitido para Águas Classe 1 – Águas Doces, resolução CONAMA N° 357/2005. O íon que apresentou a maior diferença entre o valor máximo permitido e o valor máximo amostral foi o ferro. Estudos mais abrangentes se faz necessário para determinação da contaminação e, em função desses resultados, verifica-se uma restrição da qualidade das águas subterrâneas.

Tabela 5.5 Comparação entre valor máximo CONAMA N° 357/2005 e valores amostrais.

Parâmetros – Íons Traços	Valor Máximo CONAMA N°357/2005	Valor Máximo Amostral (mg/L)	Valor Médio Amostral (mg/L)
Cádmio (Cd ⁺)	0,001 mg/L Cd	0,007	0,001
Cobre (Cu)	0,009 mg/L Cu	0,430	0,123
Chumbo (Pb)	0,01mg/L Pb	0,110	0,058
Cromo (Cr)	0,05 mg/L Cr	0,133	0,038
Ferro (Fe)	0,3 mg/L Fe	7,240	1,918
Manganês (Mn)	0,1 mg/L Mn	0,273	0,151
Níquel (Ni)	0,025 mg/L Ni	0,047	0,022

Fonte: Resultados das análises amostrais e Resolução CONAMA N°357/2005

5.3 Correlação entre parâmetros químicos

A análise de correlação entre os parâmetros químicos foi elaborada com base no coeficiente do índice de similaridade e calculada pelo *software AguaChem 3.70*. Através da matriz de correlação dos parâmetros químicos representados pelos cátions sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), ânions cloreto (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻) e bicarbonato (HCO₃⁻), verificou-se o grau de relacionamento entre as variáveis, tabela 5.6. Conforme tabela 5.7, os intervalos dos coeficientes determinam os graus de correlação.

Tabela 5.6 Matriz de correlação dos parâmetros químicos analisados.

	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ^{- -}	HCO ₃ ⁻	STD	COND.
Na ⁺	1,0	0,852	0,366	0,847	0,980	0,832	0,437	0,968	0,989
K ⁺		1,0	0,270	0,952	0,842	0,919	0,301	0,873	0,871
Ca ⁺⁺			1,0	0,292	0,432	0,215	0,534	0,522	0,473
Mg ⁺⁺				1,0	0,879	0,867	0,184	0,900	0,876
Cl ⁻					1,0	0,785	0,340	0,986	0,989
SO ₄ ^{- -}						1,0	0,269	0,825	0,831
HCO ₃ ⁻							1,0	0,403	0,509
STD								1,0	0,992
COND.									1,0

COND.: Condutividade elétrica; STD: Sólidos totais dissolvidos

O coeficiente de correlação entre a condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos (0,992) demonstra a forte interação entre esses dois parâmetros. A condutividade elétrica apresenta fortíssima correlação com o cátion sódio, seguido do potássio, magnésio e fraca correlação com o cálcio. Quanto aos ânions, a condutividade elétrica tem fortíssima correlação com o cloro, forte com o sulfato e fraca com o bicarbonato. Já os sólidos totais dissolvidos (STD) tem fortíssima correlação com o sódio e magnésio, seguida pelo potássio e moderada correlação com o cálcio.

O sódio ocorre nas águas subterrâneas, principalmente em função da dissolução da halita (NaCl), portanto sua correlação muito forte com o íon cloreto (Cl). A correlação do sódio com o potássio (K), magnésio (Mg) e sulfato (So₄) apresenta-se forte. Já com o bicarbonato apresenta-se fraca (HCO₃).

O potássio tem correlação forte com o cloreto devido a dissolução de rochas evaporíticas como a silvita. O cálcio tem correlação desprezível a fraca com os íons sódio, potássio, magnésio, cloreto e sulfato e correlação moderada com o bicarbonato, em função, principalmente da dissolução de rochas calcárias.

Tabela 5.7 Intervalo de coeficiente e os graus de correlação

Coeficiente (ρ)	Correlação
0 a 0,3	Desprezível
0,3 a 0,5	Fraco
0,5 a 0,7	Moderada
0,7 a 0,9	Forte
0,9 a 1,0	Fortíssima

Fonte: MUKAKA, 2016

5.4 Classificação das águas subterrâneas

A representação gráfica é um importante recurso gráfico para classificação hidroquímica e estabelecer relações e comparações das águas subterrâneas. Nesse trabalho foi utilizado o diagrama de Piper, para representar e classificar os grupos de águas presentes na área de estudo. Na elaboração dos gráficos foram utilizados os softwares *AguaChem 3.70* e o *QualiGraf 2017*.

Conforme figura 5.2, os dados plotados foram divididos em dois grupos: 12 amostras denominada da zona urbana e 9 amostras denominada da zona rural. Observa-se nos diagramas de Piper que as amostras analisadas, da zona urbana e

da zona rural, seguem um padrão semelhante e diversificado. Há predominância dos ânions cloretos e bicarbonatos e dos cátions sódio e cálcio provavelmente decorrem dos aerossóis marinhos e potencializado por ser uma região de clima semiárido, com alta evapotranspiração, presente nesse ambiente litorâneo. Foram classificadas as águas da zona urbana como cloretadas sódicas, mistas, cloretadas mistas sódicas, bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas magnesianas. As águas da zona rural como cálcicas bicarbonatadas, sódicas, mistas sódicas, bicarbonatadas mistas e cloretadas mistas. (Tabela 5.8).

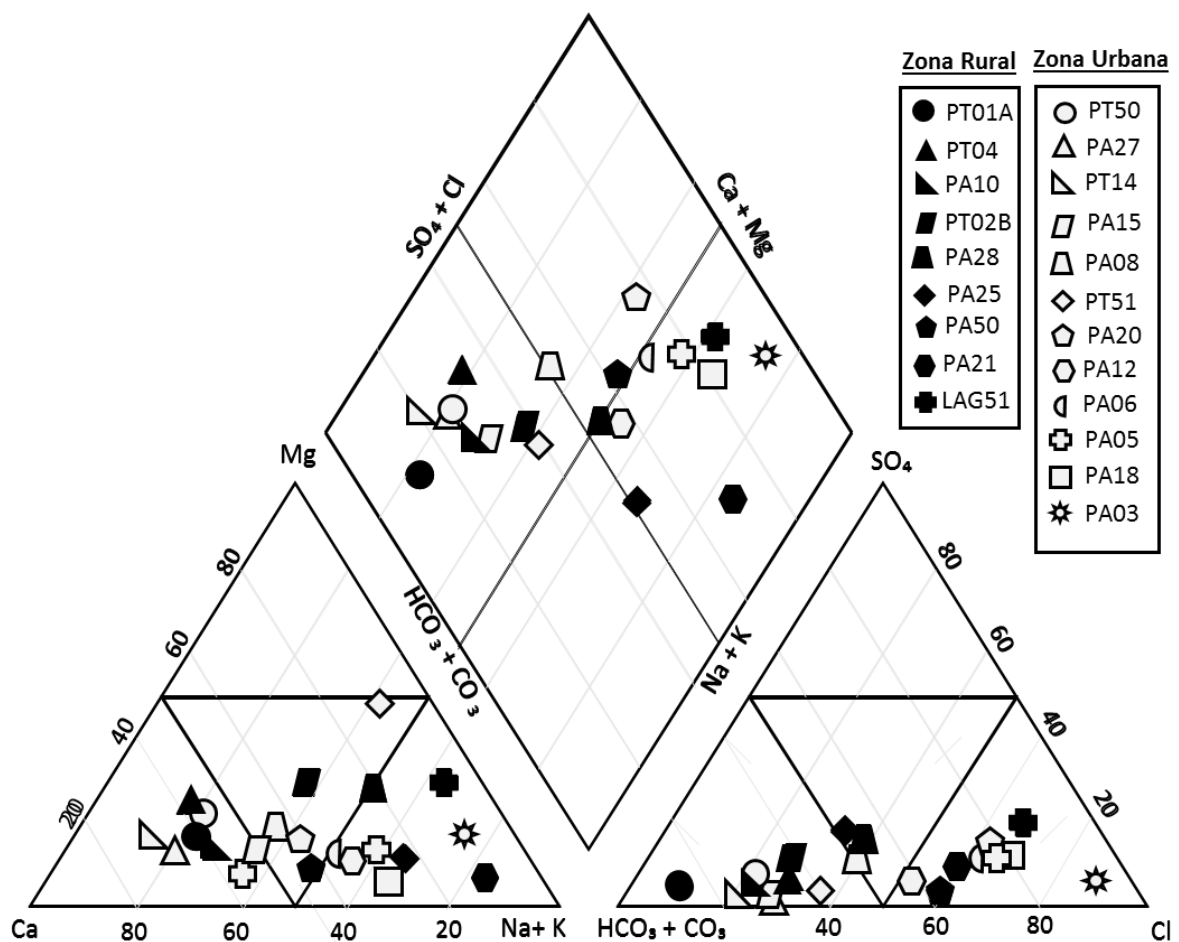


Figura 5.2 Diagrama de Piper com plotagem das amostras da zona urbana e zona rural.

Tabela 5.8 – Resumo e classificação geral das águas subterrâneas da zona urbana e rural

Classe das águas	Quant.	%	Classe das águas	Quant.	%
Cloretadas Sódicas	5	24	Cloretadas magnesianas	0	0
Bicarbonatadas Sódicas	0	0	Bicarbonatadas magnesianas	1	5
Sulfatadas Sódicas	0	0	Sulfatadas magnesianas	0	0
Mistas Sódicas	2	10	Mistas magnesianas	0	0
Cloretadas cálcicas	0	0	Cloretadas mistas	3	14
Bicarbonatadas cálcicas	7	33	Bicarbonatadas mistas	2	10
Sulfatadas cálcicas	0	0	Sulfatadas mistas	0	0
Mistas cálcicas	0	0	Mistas	1	5

5.5 Distribuição espacial dos parâmetros hidroquímicos

Com base nas concentrações hidroquímicas analisadas, 21 amostras, sendo 12 amostras da zona urbana e 09 amostras zona rural, foram elaborados os mapas de isovalores dos sólidos totais dissolvidos (STD), sódio, cálcio, cloreto e bicarbonato. Os códigos utilizados nos mapas de isovalores e os poços correspondentes estão relacionados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 Poços usados nas interpolações dos mapas de isovalores com as concentrações iônicas

Poco	UTM - 24 M	UTM- 24 M	STD	Sódio (Na)	Cálcio (Ca)	Cloreto (Cl)	Bicarbonato (HCO ₃)
	(E)	(S)					
(mg/L)							
LAG 51	780758	9434926	2152,4	458,62	53,5	843,13	195,84
PA 03	783229,9	9437344,6	3751,5	920,92	122,84	1967,77	298,34
PA 05	782785,9	9437313,6	1281,7	233,45	116,03	442,69	293,46
PA 06	781976,2	9437350	848,3	129,95	90,18	238,92	211,09
PA 08	781387,1	9437536,6	498,6	46,46	62,92	84,14	205,6
PA 10	780108,8	9438137,1	347,2	26,91	55,31	45,44	203,77
PA 12	780946,6	9437956	1150,1	226,78	140,67	372,4	533,23
PA 15	778687,2	9437850,9	333,7	34,04	47,69	52,54	183,03
PA 18	777966,3	9437627,9	604,5	140,07	58,51	238,92	121,41
PA 20	777997,8	9438010,7	1036,3	135,47	133,06	330,15	234,89
PA 21	776382,3	9437687,9	1466	508,76	33,67	667,4	489,3
PA 25	779460,5	9435813,4	485,9	145,36	40,08	129,93	334,94
PA 27	781613	9437481	336,5	15,87	63,32	38,34	196,45
PA 50	782655	9435982	1167,5	186,99	145,28	365,3	414,87
PA28	783547	9436961	230,8	47,38	19,44	59,64	111,04
PT 01 A	788208	9434021	164,5	14,95	41,28	13,85	195,84
PT 02 B	786246	9433393	80,1	11,04	10,02	13,85	57,96
PT 04	785523,7	9433101,6	312,2	14,03	52,9	31,6	178,15
PT 14	781041,8	9437314,4	461,8	29,67	71,74	50,77	259,29
PT 50	780976	9437348	250,5	17,25	55,71	28,05	217,2
PT 51	781135	9437380	346,6	47,84	12,42	80,59	237,33

- Distribuição espacial sólidos totais dissolvidos (STD)

As maiores concentrações de íons estão localizadas ao norte, na zona urbana, representados pelos poços PA-03, com valor de 3751,5 mg/L, PA-05, com valor de 1281,7 mg/L, PA-12 com valor de 1150,1 mg/L, PA-50 com valor de 1167,5 mg/L, PA-20 com valor de 1036,3 e LAG 51 com valor de 2152,4. A maior contribuição para os índices elevados de STD são os íons de sódio e cloreto para os poços PA-03, que sugere interação da água do mar com o aquífero e LAG 51, que tem águas superficiais e é um afloramento d aquífero dunas. Nesse ambiente semiárido os íons (Na) e (Cl) do solo são carregados para o lago. Os poços PA-05, PA-12, PA-20 e PA-50 tem os íons (Cl) e (HNO₃) como contribuinte maior no STD. Provavelmente influenciado por

dissolução de carbonatos na região. No restante da área de estudo, os valores estão abaixo de 1000 mg/L e estão abaixo do limite para água de consumo humano, estabelecidos na Resolução CONAMA 396/2008. Figura 5.3.

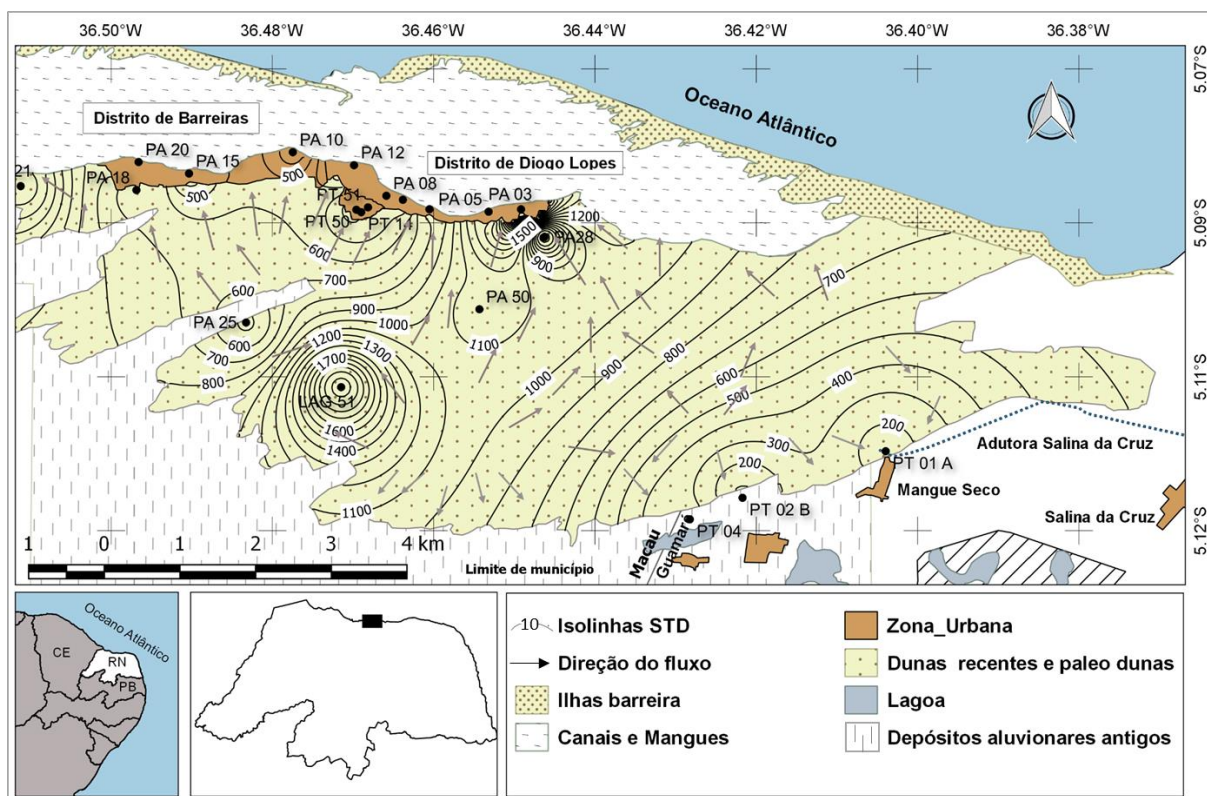


Figura 5.3 Curvas de Isovalores de sólidos totais dissolvidos (STD)

- Distribuição espacial do sódio (Na)

As maiores concentrações de sódio, estão distribuídas na direção norte da área. Os maiores valores, acima da Resolução CONAMA 396/2008 que é de 200 mg/L, são dos poços PA-03, PA-05, PA-12, PA-21 e LAG 51. Essa maior concentração pode indicar aumento gradativo dos teores de sódio nas águas subterrâneas, a partir da zona de recarga, em direção a suas porções mais confinadas, (SANTOS, 2008) ou aerossóis marinhos presentes na região. Os menores valores encontram-se representados pelos poços PT-01 A, PT-02 B e PT-04, localizados ao sul da área de estudo. É importante destacar que esses poços estão localizados próximos ao divisor de águas, na frente de escoamento sul, e sugere baixa concentração, devido a pequena distância que separa a zona de recarga e os poços. Figura 5.4.

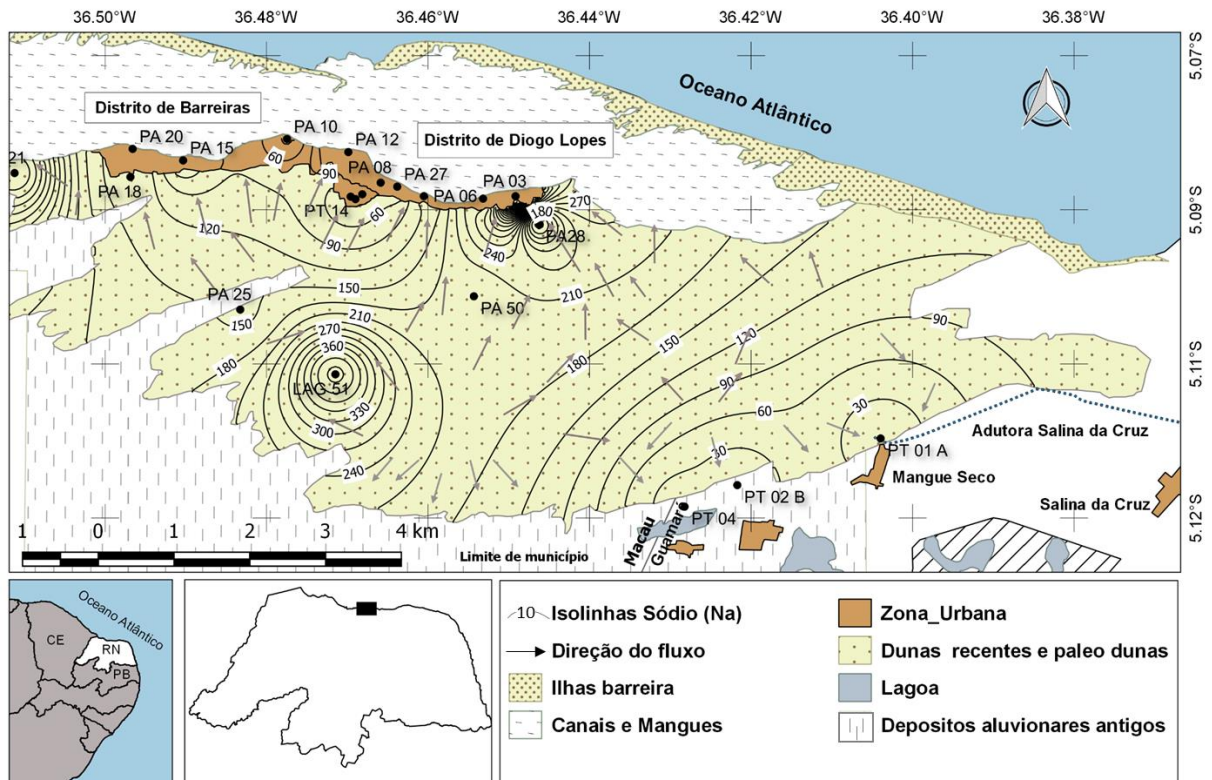


Figura 5.4 Curvas de Isovalores de sódio (Na)

- Distribuição espacial do cálcio (Ca)

Cinco poços têm concentração acima de 100mg/L: PA-03 com valor de 122,84 mg/L, PA-05 com valor de 116,03 mg/L, PA-12 com valor de 140,67 mg/L PA-20 com valor de 133,06 mg/L e PA-50 com valor de 145,28 mg/L. Todos os outros poços da área estão abaixo de 100 mg/L. Nas águas subterrâneas, os teores de cálcio variam, em geral, entre 10 a 100 mg/L (SANTOS, 2008). Essa grande diferença de concentração indica localmente uma interação das águas subterrâneas com dissolução de minerais carbonáticos (Figura 5.5).

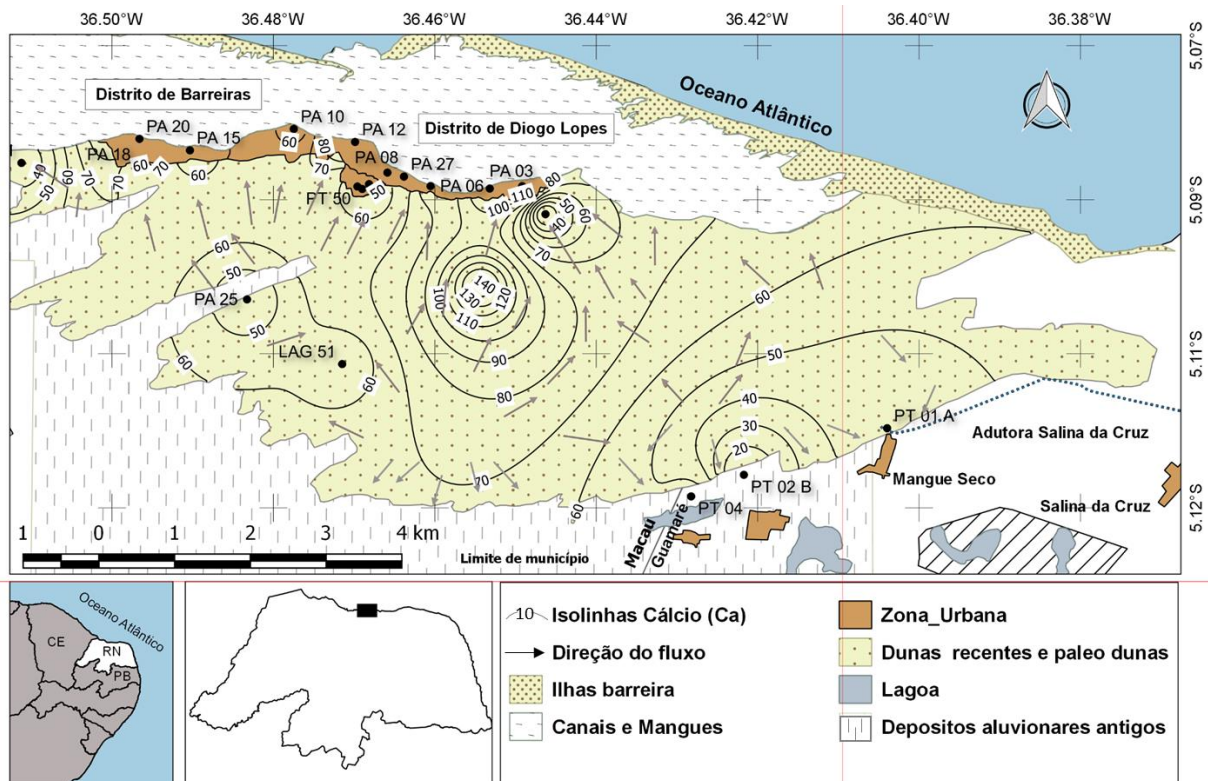


Figura 5.5 Curvas de Isovalores de cálcio (Ca)

- Distribuição espacial do cloreto (Cl)

A concentração de cloreto na área de estudo tem alta variação de 13,85 mg/L a 1967,77 mg/L. Os menores valores são obtidos nos poços PT-01 A e PT-02 B, no extremo sul da área, e o maior valor é obtido no poço PT-03, localizado ao norte da área de estudo. O valor mais elevado está situado junto a linha de costa, indicando uma possível interação com águas do mar. Conforme (SANTOS, 2008), a alta solubilidade do cloreto e o lento movimento das águas subterrâneas vão provocando aumentos gradativos na direção do fluxo, situação que se observa na área. Figura 5.6.

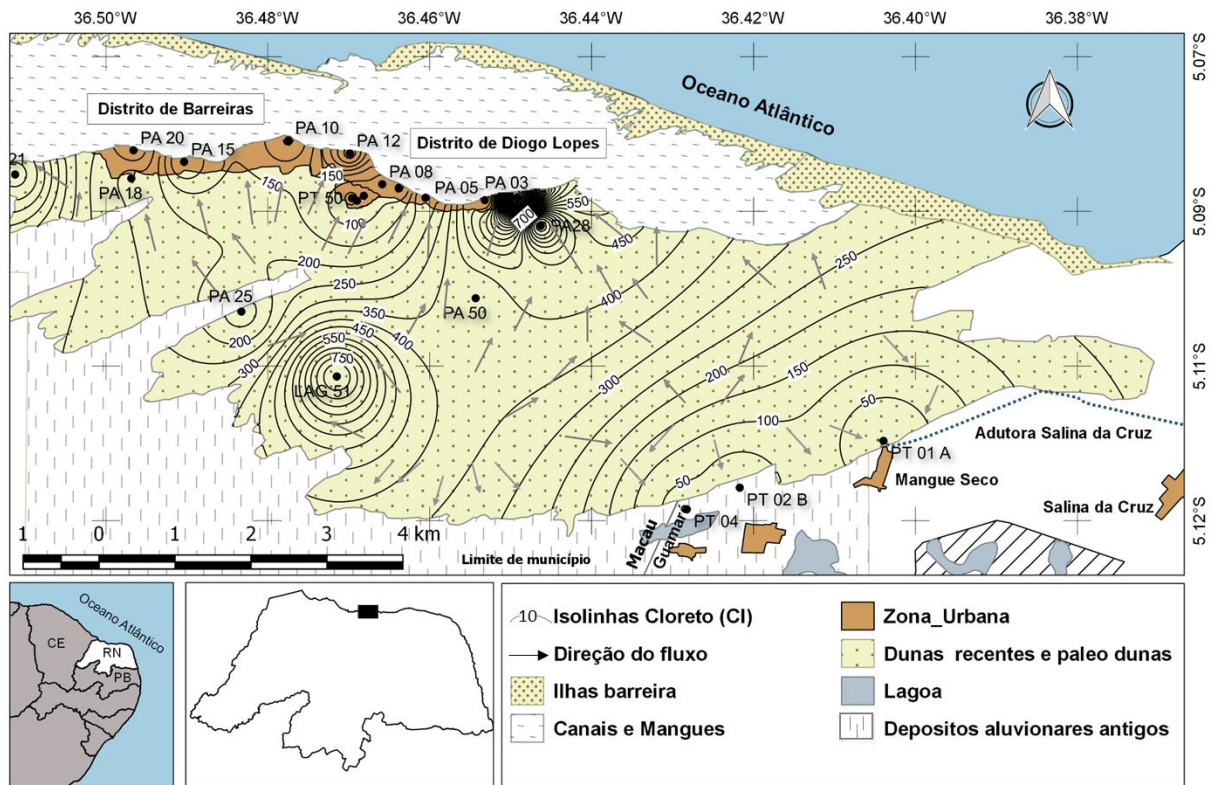


Figura 5.6 Curvas de Isovalores de cloreto (CI)

- Distribuição espacial do bicarbonato (HCO_3)

Apenas um poço, PT-02 B, está abaixo de 100 mg/L de concentração bicarbonato. As maiores concentrações ocorrem nos poços PT-12 com valor de 533,23 mg/L e PT-50 com valor de 414,87 mg/L. Os poços com maiores concentrações estão associados a maiores concentrações de cálcio, ver figura 5.9, indicando influência de dissolução de rochas calcárias constituídas por calcita (carbonato de cálcio) e/ou dolomita (carbonato de cálcio e magnésio). Figura 5.7.

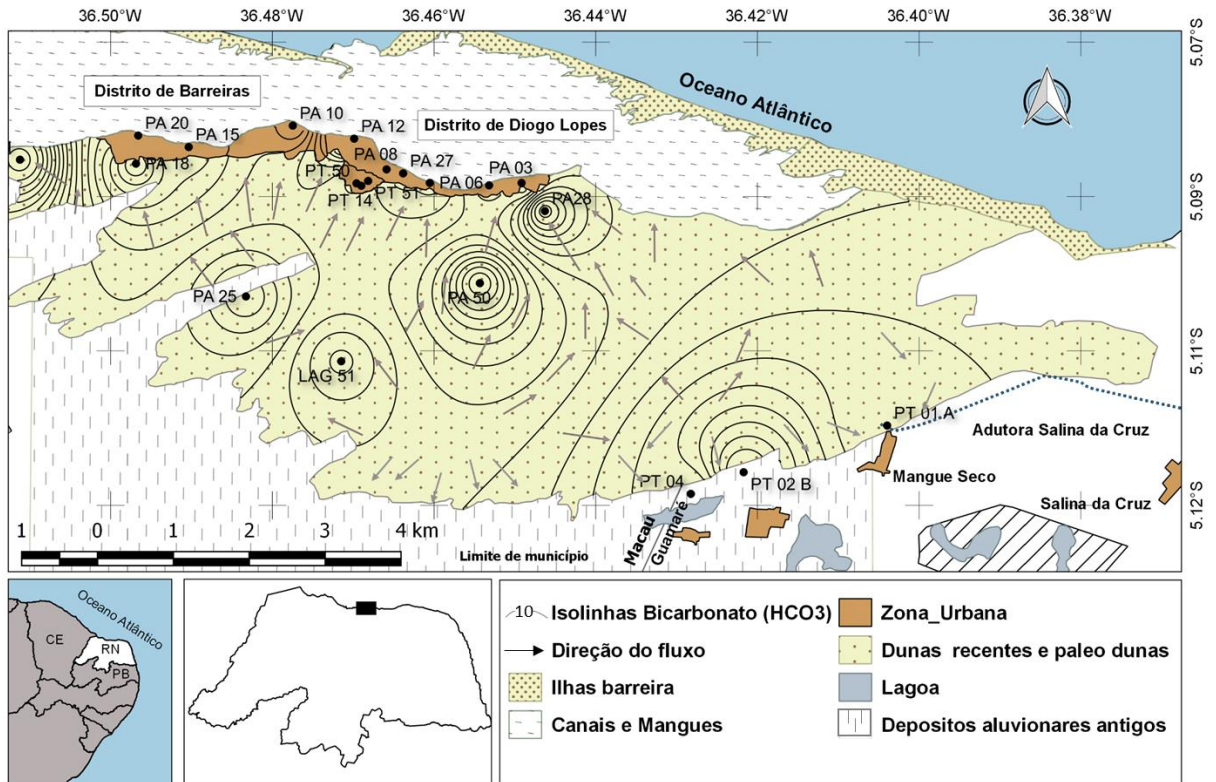


Figura 5.7 Curvas de Isovalores de bicarbonato (HCO_3)

6 ARTIGO SUBMETIDO

Aspectos hidrogeológicos e avaliação hidroquímica da Reserva de Desenvolvimento Sustentável-Ponta do Tubarão – Macau/RN

Hydrogeological aspects and hydrochemical evaluation of the Sustainable Development Reserve - Ponta do Tubarão - Macau / RN

Resumo: A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Ponta do Tubarão (RDSPT) está situada no litoral norte- RN, com 130 Km². O Sistema Aquífero dunas que abastece de água doce a reserva cobre uma superfície de 47,25 Km² e supre parte das necessidades da população local e do Sistema estuarino. O clima da região é semiárido, sem ocorrência de águas superficiais, o que torna o aquífero dunas de fundamental importância para preservação. Foram obtidas informações sobre os parâmetros hidráulicos do aquífero e foi elaborado o mapa potenciométrico do aquífero dunas, que permitiu a caracterização do fluxo subterrâneo. Para avaliação hidroquímica foram selecionados 21 poços com a coleta de amostras e determinação dos parâmetros físico-químicos fundamentais. Na interpretação dos resultados, foram utilizados os diagramas de Piper e Durov Expandido. Verificou-se a ocorrência dos seguintes tipos de água ou fácies hidroquímicas: águas bicarbonatadas cálcicas ($\text{Ca}^{++} - \text{HCO}_3^-$), que sugerem águas influenciadas pela dissolução de rochas carbonáticas que se sotopõem as dunas e águas cloretadas sódicas ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) que sugerem influência de água do mar, resultantes da influência de maré e aerossóis marinhos. As águas apresentam uma tendência da mudança de fácies hidroquímicas, sugerindo simples dissolução ou mistura, troca de íons direta e reversa, durante o fluxo das águas subterrâneas.

Palavras chaves: Aquífero dunas. Parâmetros hidráulicos. Hidroquímica. Fácies. Qualidade da água

Abstract: The Ponta do Tubarão Sustainable Development Reserve (RDSPT) is located on the north coast of the state of RN, with 130 Km². The dune aquifer system that supplies fresh water reserves covers an area of 47.25 Km² and meets the needs of the local population and the estuarine system. The climate of the region is semi-arid, without surface water occurrence, which makes the dune aquifer of fundamental importance for preservation. Information was obtained on the hydraulic parameters of the aquifer and the potentiometric map of the dune aquifer was elaborated, allowing the characterization of the underground flow. For the hydrochemical evaluation, 21 wells were selected with the collection of samples and determination of the fundamental physicochemical parameters. In the interpretation of the results, the diagrams of Piper and Durov Expanded. It was verified the occurrence of the following water types or hydrochemical facies: calcium bicarbonate waters (Ca⁺⁺ –HCO₃⁻), which suggest waters influenced by the dissolution of carbonate rocks that suppress the dunes and sodium chlorate waters (Na⁺–Cl⁻) that suggest influence of sea water, resulting from the influence of tide and marine aerosols. The waters present a tendency of the change of hydrochemical facies, suggesting simple dissolution or mixture, exchange of ions direct and reverse, during the flow of groundwater.

Keywords: Aquifer dunes. Hydraulic parameters. Hydrochemistry. Facies. Water quality.

Introdução

A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão - RDSEPT/RN e seu entorno está situada no litoral norte, região semiárida do Rio Grande do Norte, circundada pelas plataformas de produção de petróleo e gás, polo petroquímico, dutos de óleo e gás e usinas eólicas, além das empresas salineiras. A reserva foi criada em 2003 sob a Lei Estadual 8349/03, apresenta um Conselho Gestor, tendo o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente - IDEMA como órgão ambiental responsável. A principal atividade econômica das comunidades da RDSEPT/RN, com 8000 habitantes (IBGE, 2018) é a pesca. Na RDSEPT/RN, a barra ou restinga separa o alto mar do estuário e do porto e sofre forte influência das correntes marinhas e dos ventos. Os braços de mar formam mangues, suportados pela interação da água salgada do mar e da água doce proveniente do aquífero dunas. A água doce é captada nas dunas móveis e fixas vegetadas que compreende o compartimento dos sedimentos eólicos e regido pelas condições do paleorelevo. Essas águas migram para estes reservatórios rasos que compõe o aquífero dunas que, além de fornecer água doce de boa qualidade para consumo humano, ajuda, provavelmente, no desenvolvimento e manutenção dos mangues, ricos em espécies animais e vegetais (WILSON e MORRIS, 2012), (GHOSH, 2011). Historicamente as comunidades pesqueiras artesanais, supriam de água doce a cidade de Macau. Eles a transportavam usando suas embarcações pelo mar, o que diminuía distâncias, e retiravam essa água dos afloramentos à beira do estuário. A seca entre 2012 e 2015, (MARTINS e MAGALHÃES, 2015), que se prolonga até 2018 e o uso intensivo dos recursos hídricos tem comprometido a qualidade e quantidade das reservas no aquífero dunas. A superexploração, a falta de saneamento urbano e o consumo excessivo das comunidades locais, como das cidades circunvizinhas, seja para uso e consumo doméstico, industrial, atividade petrolífera, agricultura, pecuária, além da carcinicultura, podem promover declínio de seu volume e da qualidade da água. As atividades econômicas diversas e o aumento populacional estão afetando o processo de recarga e a qualidade da água (SINGH, 2000). O conhecimento hidrogeológico e hidroquímico é necessário para melhor planejamento e menor impacto ambiental. Assim, esse estudo das águas subterrâneas, possibilita o entendimento da dinâmica e da qualidade das águas do aquífero dunas.

Localização e área de estudo

A área está inserida entre os municípios de Macau/RN (95% da área), e Guamaré/RN (5% da área) e tem dimensão de 91,2 Km², sendo que 69.56 Km² distribuídos entre dunas e zonas do tabuleiro costeiro e 21,64 Km² de área estuarina, composta por canais, ilhas barreiras e mangues. O limite máximo da área a leste e a oeste tem como coordenadas longitudinais geográficas 36°24'09"E e 36°32'18"O, respectivamente, e o limite máximo da área a norte e a sul são, respectivamente, as latitudes de 5°02'45" S e 5°08'57" S. Fig.1. O clima da região é semiárido, com uma precipitação média de 521 mm/ano e evapotranspiração potencial de 2.054 mm/ano, caracterizando um elevado déficit hídrico de 1533 mm/ano. As maiores precipitações pluviométricas ocorrem nos meses de janeiro a junho com média de 79,1mm e as menores, nos meses de julho a dezembro, com precipitação média de 7,6 mm. (INMET,2019)

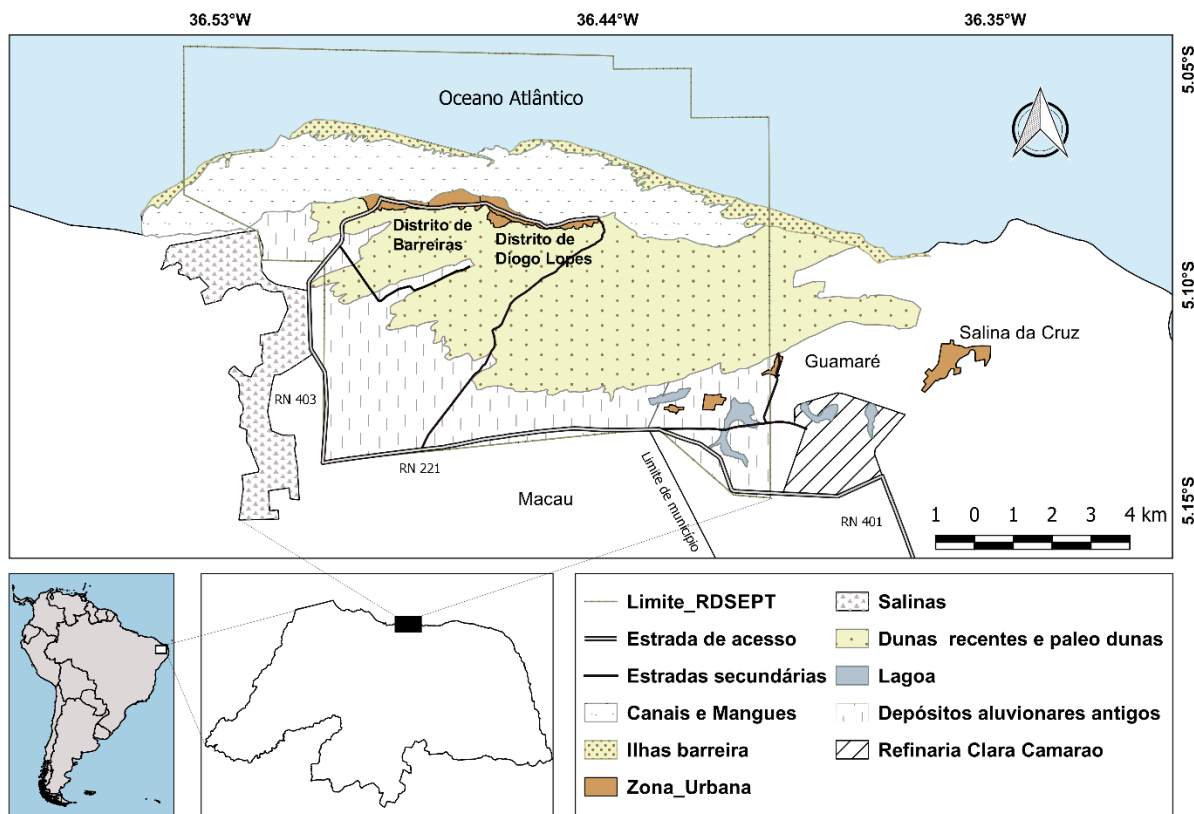


Fig.1 Localização da área de estudo

Uso e ocupação do solo

O estudo do uso e a ocupação do solo é de fundamental importância para proteção e preservação do meio ambiente, neste contexto está inserido a qualidade e a quantidade das reservas das águas subterrâneas. Assim, a identificação das áreas ambientais, as alterações antrópicas, sua geomorfologia e dimensionamento se faz necessário para maior compreensão dos ecossistemas e sua interação com as águas subterrâneas. A evolução do uso e ocupação do solo da zona urbana foi analisado ao longo do tempo e sua expansão verificada entre os anos de 2002 a 2017 (GOOGLE EARTH, 2018). Foram classificadas na área de estudo e seu entorno, nove unidades do usos e ocupações do solo que compreendem: zona urbana, lagoas, dunas, vegetação natural, ilhas barreiras, mangues e canais, zona industrial, salinas e carcinicultura, conforme fig.2.

Unidade	Área (Km ²)
Zona Urbana	2,04
Lagoas	1,19
Dunas	47,25
Vegetação Natural	63,1
Ilhas barreiras	3,12
Mangues e canais	21,5
Zona Industrial	5,47
Salinas	8,69
Carcinicultura	0,72
Total	153,08

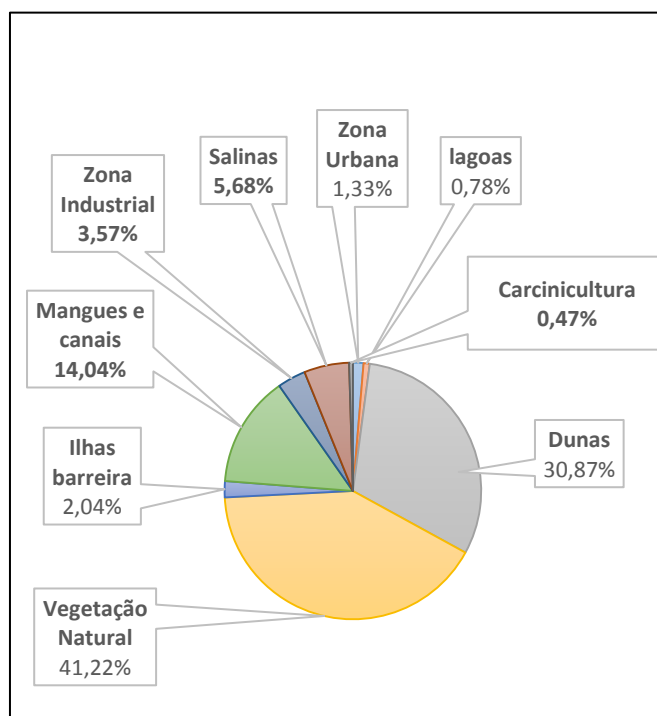


Fig. 2 Unidades de uso e ocupação do solo, suas dimensões e percentuais

No ano de 2002, a área urbanizada ocupava uma área de 1,90 Km². Após 15 anos, até o ano de 2017, a área expandiu 7 % em direção as dunas. A área da zona urbanizada atingiu 2,04 Km² ou 1,33% do total. Nota-se que o crescimento urbanístico representa um baixo índice de avanço sobre as dunas no período, preservando as áreas de recarga, mas colocando em risco a preservação e qualidade do aquífero

dunas presente no local, devido a instalação e uso de fossas e sumidouros que podem contaminar as águas subterrâneas por nitrato.

As dunas ocupam uma área de 47,25 Km² ou 30,87 % do total. É a unidade mais importante, devido sua alta porosidade e permeabilidade que contribuem para a recarga do aquífero presente no local. De acordo com Vital et al. (2014), as dunas são divididas em duas unidades. A primeira, é denominada sedimentos eólicos litorâneos não vegetados, ocupa uma área de 31,48 Km² ou 20,5% da área total. O segundo, é denominado sedimentos eólicos litorâneos vegetados, também chamado de paleodunas e ocupa uma área de 15,77 Km² ou 10,37 %. O tabuleiro costeiro ou depósitos aluvionares antigos, ocupam uma área de 63,10 Km² ou 41,22 % do total, possui solo pobre com poucos nutrientes e vegetação escassa, (CINTRA e LIBARDI, 1998). No tabuleiro costeiro e nos depósitos eólicos litorâneos vegetados são desenvolvidas a criação de cabras e ovelhas de forma extensiva para subsistência da população local.

A atividade de carcinicultura e salineira na região ocupa 6,15% da área total. O mangue abrange 14,04 % da área total e tem importância relevante no desenvolvimento e proteção de várias espécies de peixes e crustáceos e na principal atividade econômica da região que é a pesca.

A principal atividade industrial da região é a refinaria de derivados de petróleo. Iniciou as atividades operacionais em 2009 produzindo gás liquefeito de petróleo, diesel, querosene de aviação e nafta petroquímica e a partir de 2010 começou a produzir gasolina automotiva. Essa atividade industrial pode comprometer o meio ambiente com riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas por metais pesados e orgânicos sintéticos.

Os parques eólicos distribuídos na área possuem 83 km de estradas e caminhos de acesso e tem 126 aerogeradores no entorno e dentro da reserva. Estão situados sobre o tabuleiro costeiro, dunas móveis, dunas vegetadas e nas ilhas barreiras. As bases das torres dos aerogeradores são de concreto armado e profundos atingindo o lençol freático. Os impactos sobre as águas subterrâneas ainda não são bem definidos. Fig.3.

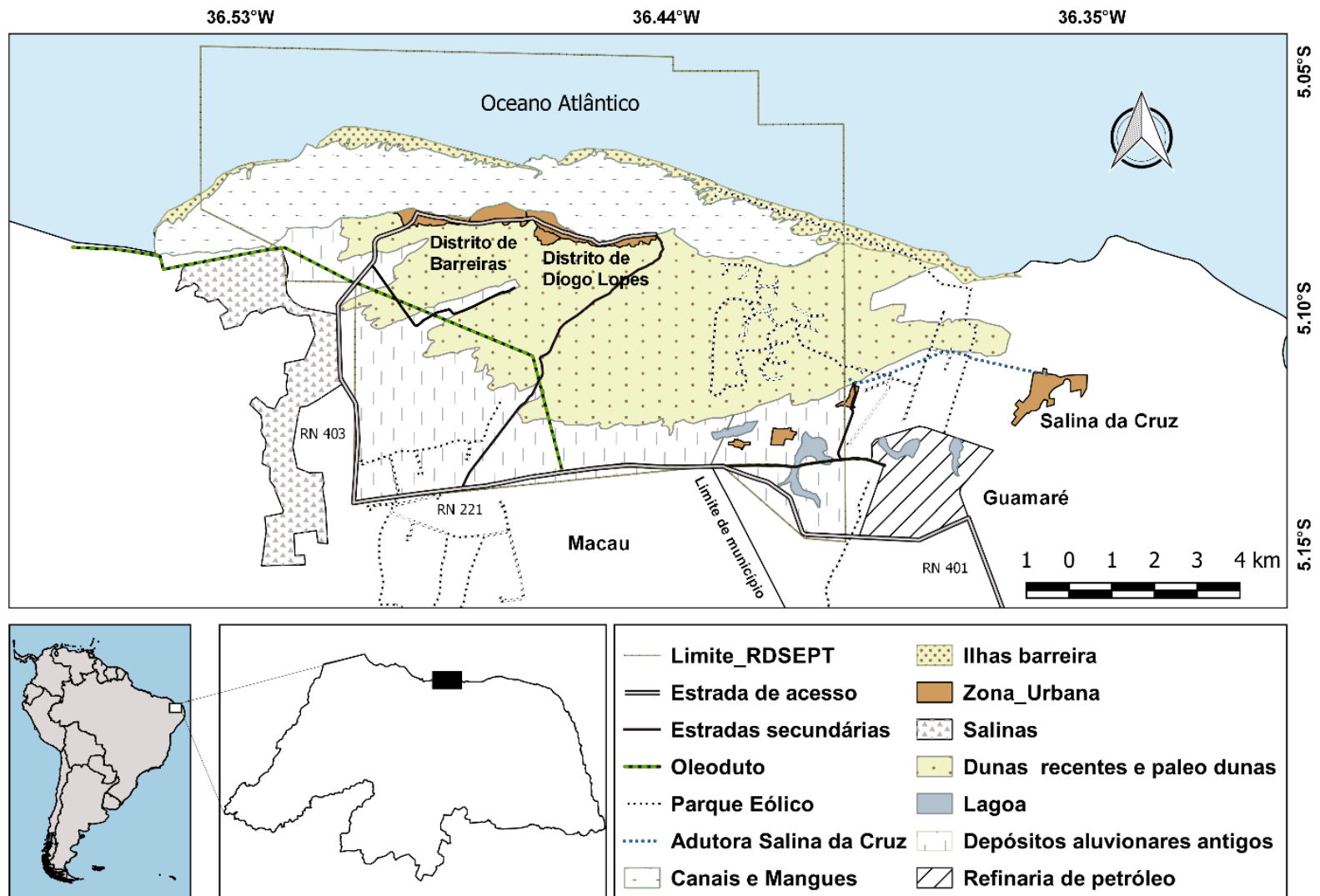


Fig.3 Unidades de uso e ocupação de solo da área de estudo

Contexto geológico e hidrogeológico

A área de estudo está inserida na Bacia sedimentar potiguar, que faz parte do sistema de riftes cretáceos do nordeste brasileiro. Sua formação relaciona-se ao processo de estiramento crustal que resultou no rompimento do Supercontinente Gondwana, a partir do Mesózoico, e que culminou com a separação entre as placas Sul-Americana e Africana e a formação do Oceano Atlântico (BERTANI et al., 1990; Soares et al., 2003). As unidades geológicas são constituídas por rochas sedimentares e sedimentos eólicos não consolidados, que compreendem desde o Paleógeno representado pelo Grupo Barreiras e Formação Tibau, Neógeno até o Quaternário Recente representados pelos depósitos aluviais antigos, depósitos litorâneos vegetados e não vegetados, depósitos litorâneos de praia e de mangues, assim descritas na folha Macau e folha Jandaíra, (BEZERRA et al., 2009), (VITAL et al., 2011).

As unidades geológicas têm um papel importante do ponto de vista hidrogeológico, destacando-se os sedimentos eólicos litorâneos vegetados e não vegetados, que compõem a área do aquífero dunas não confinado. As unidades geológicas adjacentes e subjacentes interagem com o aquífero dunas que suporta os ecossistemas que se desenvolvem na região.

Materiais e Métodos

Conforme fig.4, foi realizado um levantamento em campo para o cadastramento de 56 poços tubulares e cacimbões, seguindo uma orientação geográfica e distribuídos na área, para melhor representar a região de estudo sobre as informações geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas. O sistema de posicionamento global (GPS), Topcom, RTK Hiperlite+ foi utilizado para determinação das coordenadas e elevação dos poços. Para a medição do nível potenciométrico (NE) foi utilizado o medidor de nível da marca *Solinst*, mod. TLC. A transmissividade (T), a condutividade hidráulica (K) e porosidade específica (μ) foram obtidos de estudos anteriores e revisados (VARELLA e BARROSO, 1994). O estudo compreendeu 15 poços, sendo que dois poços foram acompanhados com dispositivo de piezômetro, durante um período de bombeamento de 12 horas e 24 horas, localizados a 10m e 14,71m respectivamente. Para análise hidroquímica foram selecionadas 21 amostras coletadas nos poços por *bailer* e armazenadas em garrafas de polietileno, sendo que as duas primeiras coletas, de cada amostra, eram descartadas para remover contaminantes externos ao poço e

obter amostras representativas da composição físico-química. Para avaliar a qualidade, a confiabilidade e a consistência dos dados das análises laboratoriais, aplicou-se a equação do cálculo de erro do balanço iônico (e%), sendo que 87% das amostras estão abaixo de 5% de erro e 13% até 10% de erro, assim todas as amostras foram consideradas na interpretação hidroquímica. (Custódio & Llamas, 1983). As amostras foram posteriormente analisadas em laboratório quando a condutividade elétrica (CE), pH, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ e NO₃⁻. Os sólidos totais dissolvidos (STD) foram calculados utilizando o *software* *AQUACHEM*, versão 3.7 em função da condutividade elétrica medida por eletrometria. Sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) pelo método de fotometria-Chama. Cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), cloro (Cl⁻), bicarbonato (HCO₃⁻) pelo método de titulometria. Sulfato (SO₄²⁻) pelo método de turbidimetria e nitrato (NO₃⁻) pelo método de espectrometria-UV.

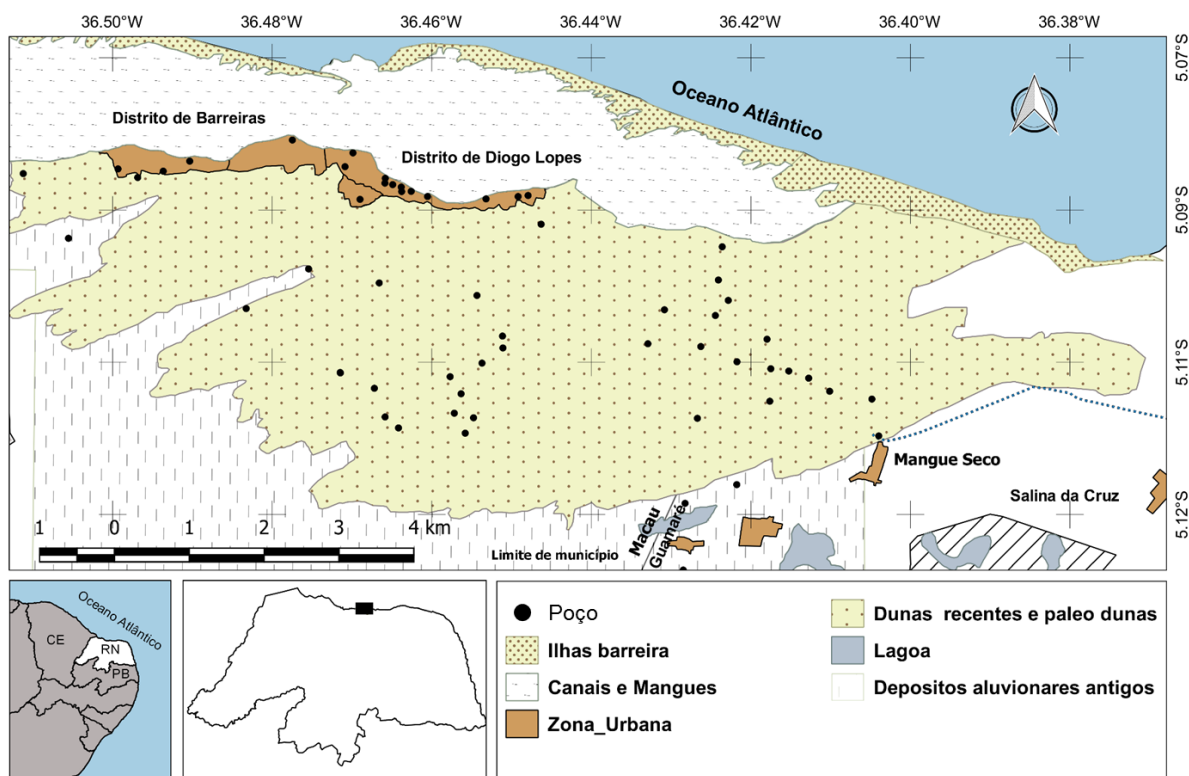


Fig.4 Mapa com indicação dos poços cadastrados

Resultados e interpretação

Sistema de águas subterrâneas

A água proveniente das precipitações e a alta taxa de infiltração da cobertura sedimentar eólica, percola facilmente nos sedimentos pouco consolidados. O aquífero apresenta uma área de 47,25 Km² e a recarga da água subterrânea é por precipitação. As condições hidrogeológicas indicam duas direções do fluxo das águas subterrâneas

existente no aquífero dunas. Do sul para o norte com descarga no sistema estuarino e oceânico e do norte para o sul no extremo sul da área, com descarga nos depósitos aluvionares antigos. Fig.5. O nível potenciométrico da água subterrânea varia entre 01 a 05 metros e é limitado na sua base por uma camada argilosa. A espessura saturada é de 4 m, variando 0,7m entre as estações secas e chuvosas. Conforme (VARELLA e BARROSO, 1994), a transmissividade (T) varia entre $1,15 \times 10^{-3}$ a $2,93 \times 10^{-2}$ m²/s que para efeito de cálculo foi considerado um T representativo de $1,67 \times 10^{-3}$ m²/s e a condutividade hidráulica (K) varia de $2,82 \times 10^{-4}$ a $7,32 \times 10^{-3}$ m/s, sendo considerado como K representativo o valor de $4,13 \times 10^{-4}$ m/s a porosidade específica é de 5%.

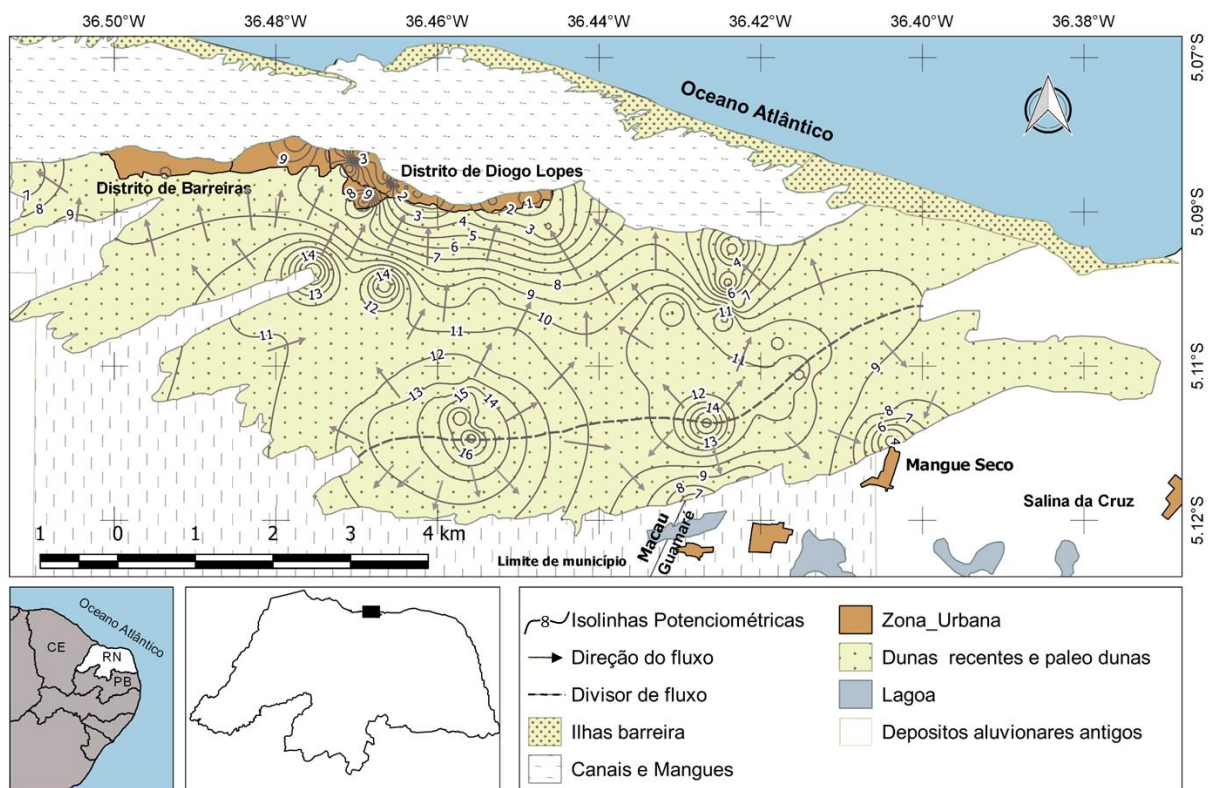


Fig. 5 Mapa das equipotenciais indicando a direção do fluxo subterrâneo e divisor de fluxo

Qualidade da água subterrânea

Os dados químicos de todas as amostras estão relacionados na tabela 1 e sua localização na área estão plotados na fig.6. Os constituintes químicos variam em toda região pesquisada.

Tabela 1 Resultados das análises químicas

Poço	Lat.	Long.	pH	CE	STD	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	
				μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	LAG 51	780758	9434926	7,6	3260,00	2152,4	458,42	69,99	53,50	126,26	842,01	195,84	355,40	0,00
2	PA 03	783230	9437345	7,9	6135,00	3751,5	920,51	64,90	122,84	132,22	1965,16	298,34	241,88	5,72
3	PA 05	782786	9437314	7,7	1.978,00	1281,7	233,35	20,33	116,03	36,58	442,10	293,46	131,40	34,32
4	PA 06	781976	9437350	7,9	1256,00	848,3	129,89	21,11	90,18	22,36	238,60	211,09	85,77	216,30
5	PA 08	781387	9437537	7,9	751,00	498,6	46,44	12,90	62,92	18,47	84,02	205,60	41,75	112,46
6	PA 10	780109	9438137	8,1	416,00	347,2	26,90	2,74	55,31	9,97	45,38	203,77	2,63	3,34
7	PA 12	780947	9437956	8,5	1941,00	1150,1	226,68	30,89	140,67	35,00	371,90	533,23	85,81	68,64
8	PA 15	778687	9437851	7,6	427,00	333,7	34,02	3,52	47,69	9,48	52,47	183,03	3,50	0,00
9	PA 18	777966	9437628	6,5	1108,00	604,5	140,01	10,95	58,51	10,21	238,60	121,41	86,80	2,02
10	PA 20	777998	9438011	7,9	1608,00	1036,3	135,41	23,07	133,06	35,00	329,71	234,89	92,94	224,27
11	PA 21	776382	9437688	8,9	2920,00	1466	508,53	31,67	33,67	30,14	666,52	489,30	185,59	1,67
12	PA 25	779461	9435813	8,0	1058,00	485,9	145,30	11,73	40,08	15,19	129,76	334,94	100,20	6,16
13	PA 27	781613	9437481	7,4	444,00	336,5	15,86	3,91	63,32	8,87	38,29	196,45	9,92	N/Anal.
14	PA 28	783547	9436961	8,5	467,00	230,8	47,36	5,47	19,44	15,80	59,56	111,04	39,93	0,00
15	PA 50	782655	9435982	7,6	1692,00	1167,5	186,91	3,52	145,28	23,58	364,81	414,87	25,14	12,85
16	PT 01 A	788208	9434021	7,5	326,00	164,5	14,94	2,35	41,28	8,39	13,83	195,84	3,17	0,00
17	PT 02 B	786246	9433393	6,9	146,00	80,1	11,04	3,13	10,02	5,95	13,83	57,96	9,80	7,30
18	PT 04	785524	9433102	7,3	404,00	312,2	14,02	1,95	52,90	13,12	31,55	178,15	15,83	20,33
19	PT 14	781042	9437314	7,5	581,00	461,8	29,66	8,60	71,74	14,10	50,70	259,29	15,26	54,47
20	PT 50	780976	9437348	7,7	407,00	250,5	17,24	4,69	55,71	14,44	28,01	217,20	20,57	15,36
21	PT 51	781135	9437380	7,6	642,00	346,6	47,82	26,59	12,42	41,68	80,48	237,33	20,88	36,12

Análise da EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

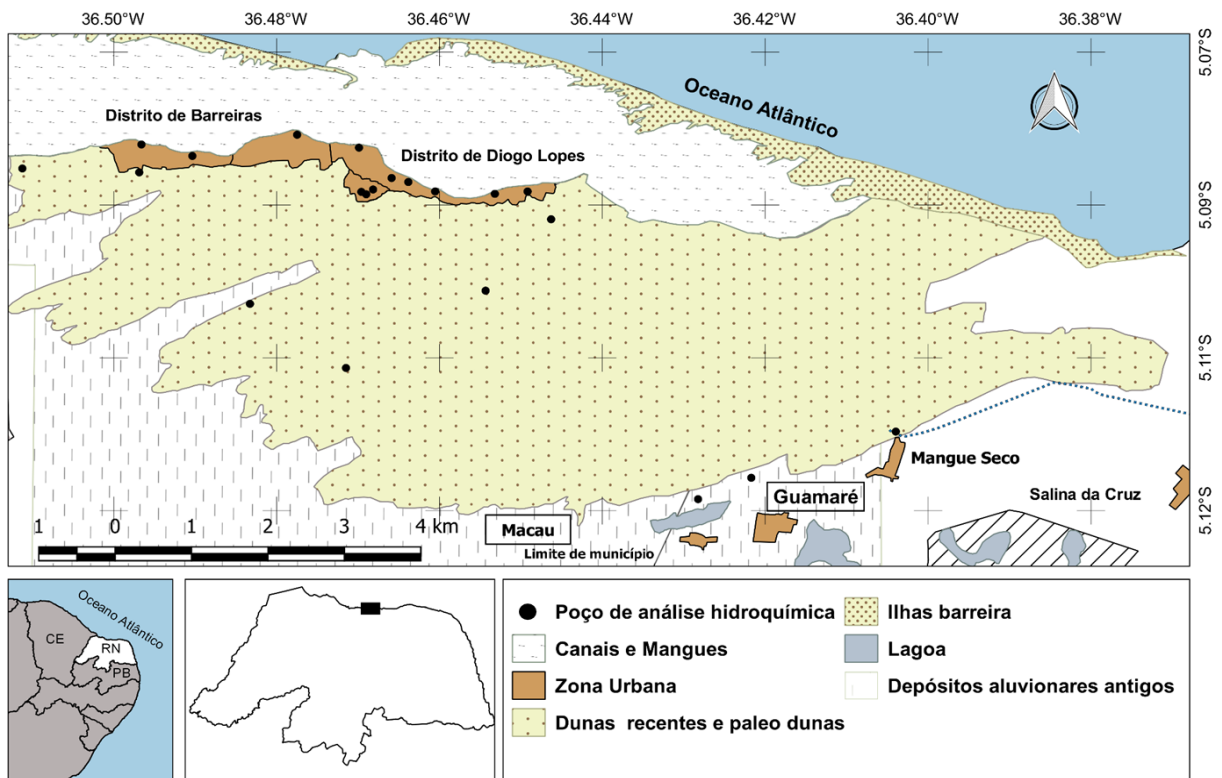


Fig.6 Localização dos poços com coleta das amostras de águas para análise química Conforme (ALLEN, GRASBY, VOORMEIJ, 2006), as variações das concentrações podem ser representadas visualmente nos diagramas de Stiff (YOUNGER, 2008), nos quais os íons e suas concentrações são plotados, em miliequivalentes, de cátions (a esquerda do gráfico) e ânions (a direita do gráfico) ao longo de um eixo vertical. Nota-se que as espécies químicas estão diversificadas na região e são classificadas de acordo com as fácies hidroquímicas. As fácies são em função da litologia, dos movimentos dos íons na solução e na direção do fluxo subterrâneo (BACK, 1966). Na zona urbana, ao norte da área, há prevalência dos íons sódio e cloreto ao leste e a oeste, devido a interação de águas marinhas com o aquífero. No centro, da zona urbana, os íons cálcio e bicarbonato são predominantes, provavelmente pela dissolução de rochas calcárias. Na região, denominada rural, há diversidade com predominância dos íons Na^+ e Cl^- relacionados aos aerossóis marinhos (LEWIS e SCHWARTZ, 2004), como também os íons Ca^{++} e HCO_3^- apresentando maiores concentrações, provavelmente ligados a dissolução de rochas carbonáticas e evaporíticas. Fig.7.

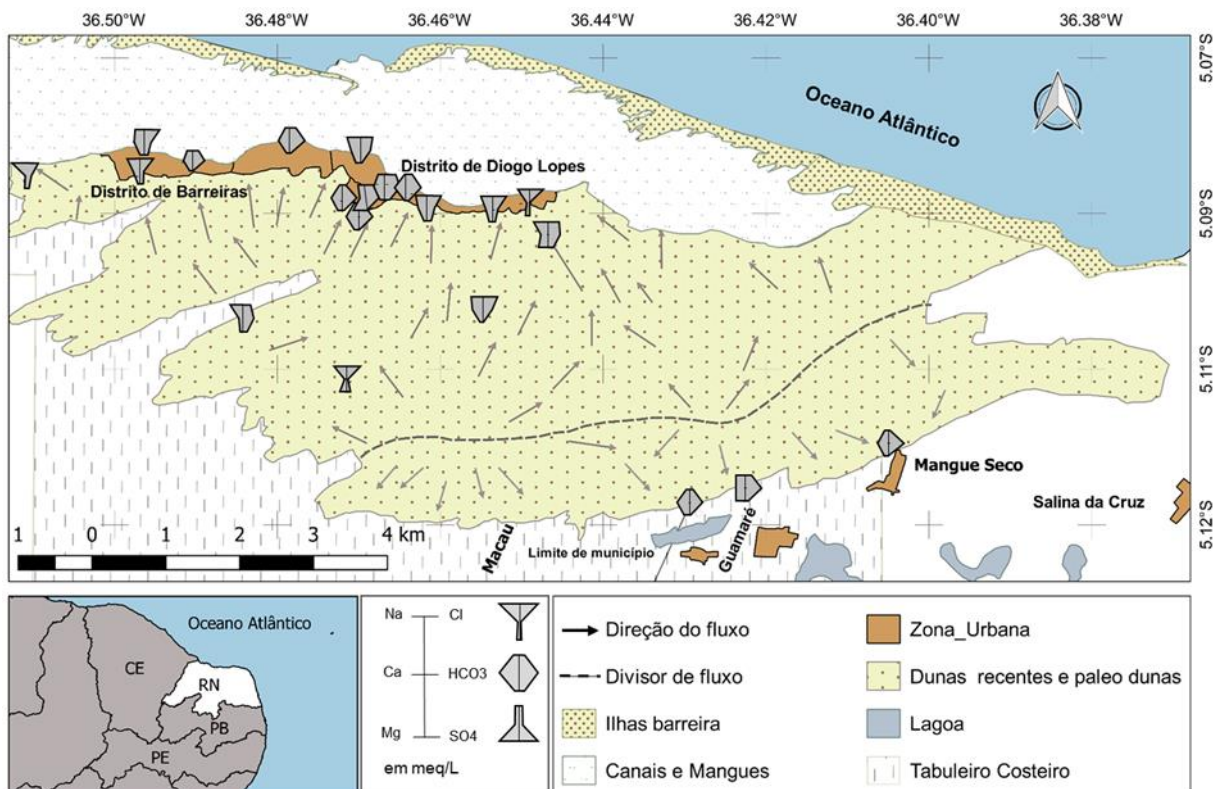


Fig. 7 Mapa com localização dos poços e representação gráfica do diagrama de Stiff Conforme dados plotados no diagrama de Piper (YOUNGER, 2008), as análises das amostras das águas foram divididas em dois grupos: 13 amostras da zona urbana e 8 amostras da zona rural, em um total de 21 amostras, fig. 8 (a) e fig.8 (b). Observa-se nos diagramas de Piper que as amostras analisadas, da zona urbana e da zona rural, seguem um padrão semelhante e diversificado. Foram classificadas as águas da zona urbana como sódicas cloretadas, mistas cloretadas, mistas sódicas, cálcicas bicarbonatadas. As águas da zona rural como cálcicas bicarbonatadas, sódicas cloretadas, mistas sódicas, mistas bicarbonatadas e mistas cloretadas. Essa variabilidade da salinidade da água subterrânea está ligada ao padrão de vento e às chuvas. A velocidade dos ventos, que é superior a 4m/s, (INMET, 2019) é responsável pela geração de aerossóis marinhos a partir da superfície do mar, que estão presentes nesse ambiente litorâneo.

A somatória do nitrato com a cloreto, no gráfico de Piper, desloca as plotagens para o vértice, que é representada por 100% da concentração total dos ânions, $Cl^- + NO_3^-$, em miliequivalentes, da amostra analisada, fig.8 (b). Essa concentração, $Cl^- + NO_3^-$, altera a classificação de duas amostras (PA-8 e PA-20) passando de águas cloretadas mistas para nitratadas mistas. Das 21 amostras analisadas, 4 não apresentaram presença de nitrato, 11 apresentaram nitrato com valores abaixo de 45 mg/L e 5

amostras apresentaram nitrato acima do limite estabelecido pela resolução n°396, de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005) que é de 45 mg/L para águas doces, classe especial, destinada para consumo humano. A presença do nitrato nas águas subterrâneas são indicação de decomposição orgânica, influenciada por aglomerações urbanas e falta de saneamento, nas quais as construções residências e comerciais utilizam fossas para esgotamento sanitário comprometendo a qualidade da água subterrânea (BOGÁRDI e KUZELKA, 1990). Esta situação é observada no norte da área de estudo, onde há maior concentração urbana e a frente de escoamento subterrâneo tem pouca influência local na concentração dos íons de NO_3^- . Na zona denominada rural, as concentrações de nitrato estão abaixo do limite da resolução CONAMA396/2005. Fig. 9.

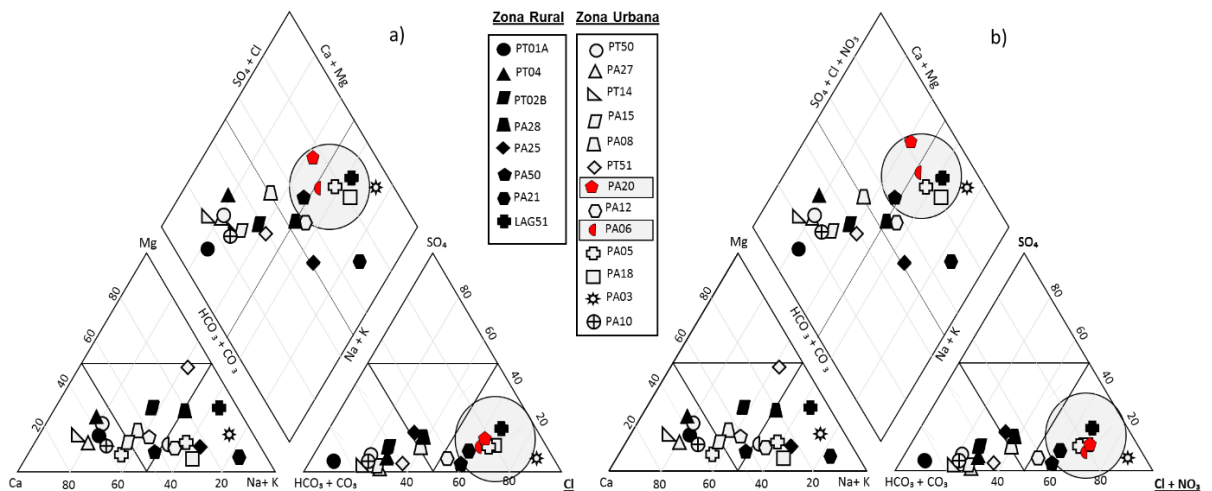


Fig. 8 Diagrama de Piper – comparação entre a concentração de cloreto a direita (a) e cloreto mais nitrato (b)

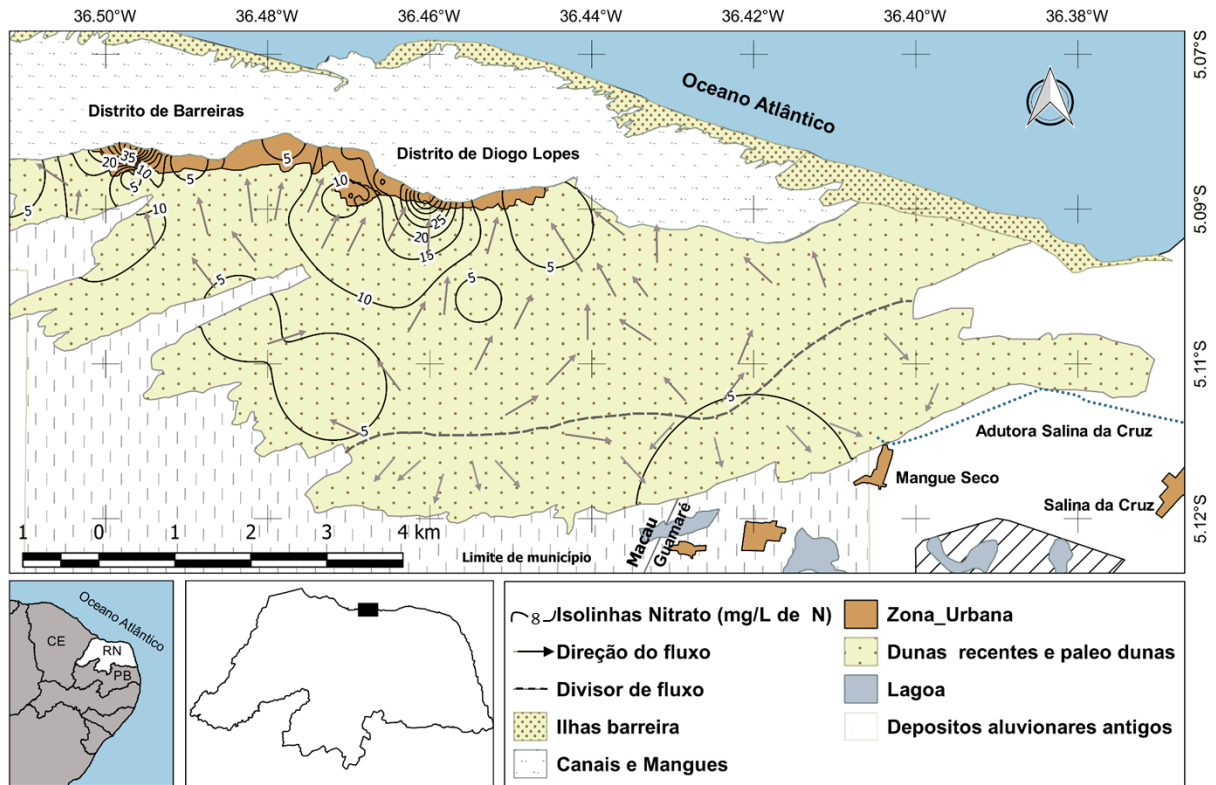


Fig. 9 Curvas de isoconcentração de nitrato nas águas subterrâneas

Fácies Hidroquímicas

Conforme (YOUNGER, 2008), o diagrama de Durov Expandido é uma combinação dos diagramas de Piper e Durov, baseado na somatória dos íons (cátions e ânions) em meq/L, como sendo 100%, ou seja, os cátions representam 50% e os ânions 50%. O diagrama Durov Expandido representa uma vantagem em relação ao diagrama de Piper, pois além de classificar as águas quanto as concentrações predominantes, mostra o provável processo para identificar diferentes fácies hidroquímicas e a tendência de uma fácies para outra, sendo possível inferir a predominância dos processos que afetam a química das águas subterrâneas. Na área central do diagrama são identificados nove campos de plotagem e relacionados com as fácies hidroquímicas e a tendência das fácies.

As tendências da troca de fácies das águas subterrâneas foram divididas em dois grupos: zona urbana e zona rural. As amostras das águas da zona urbana foram plotadas em quatro campos (1, 2, 8 e 9), sendo que a maior concentração de pontos se encontram no campo 9, indicando águas cloretadas sódicas ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$). Em hidroquímica, entende-se que $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-) < 0,5$ indica que a água é proveniente da troca iônica inversa e $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-) \geq 0,5$ indica que a água pode ser proveniente

da dissolução da halita (HOUNSLOW, 1995). No campo 9 com exceção da amostra PA-21, todas as amostras indicam troca iônica inversa. No campo 1 a indicação é de águas bicarbonatadas cálcicas ($\text{Ca}^{++} - \text{HCO}_3^-$) dominantes, que frequentemente sugerem diluição de rochas carbonáticas. As plotagens apresentam uma tendência clara da passagem de uma fácies para outra, indicando uma simples dissolução ou mistura durante o fluxo das águas subterrâneas de sul para o norte. As amostras da zona rural estão dispersas em 6 campos (1, 2, 5, 6, 8 e 9), indicando maior variabilidade de ocorrência de fácies. No campo 1, águas bicarbonatadas cálcicas ($\text{Ca}^{++} - \text{HCO}_3^-$) como simples dissolução de rochas carbonáticas. No campo 9, águas cloretadas sódicas ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) influência de água marinha ou dos aerossóis marinhos. No campo 2, águas bicarbonatadas magnesianas ($\text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^-$) com misturas de água doce com águas salinas ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$). Nos campos 5 e 6, normalmente o resultado da mistura de duas ou mais diferentes fácies. É identificada uma leve tendência de trocas iônicas, tanto direta como reversa, fig.10.

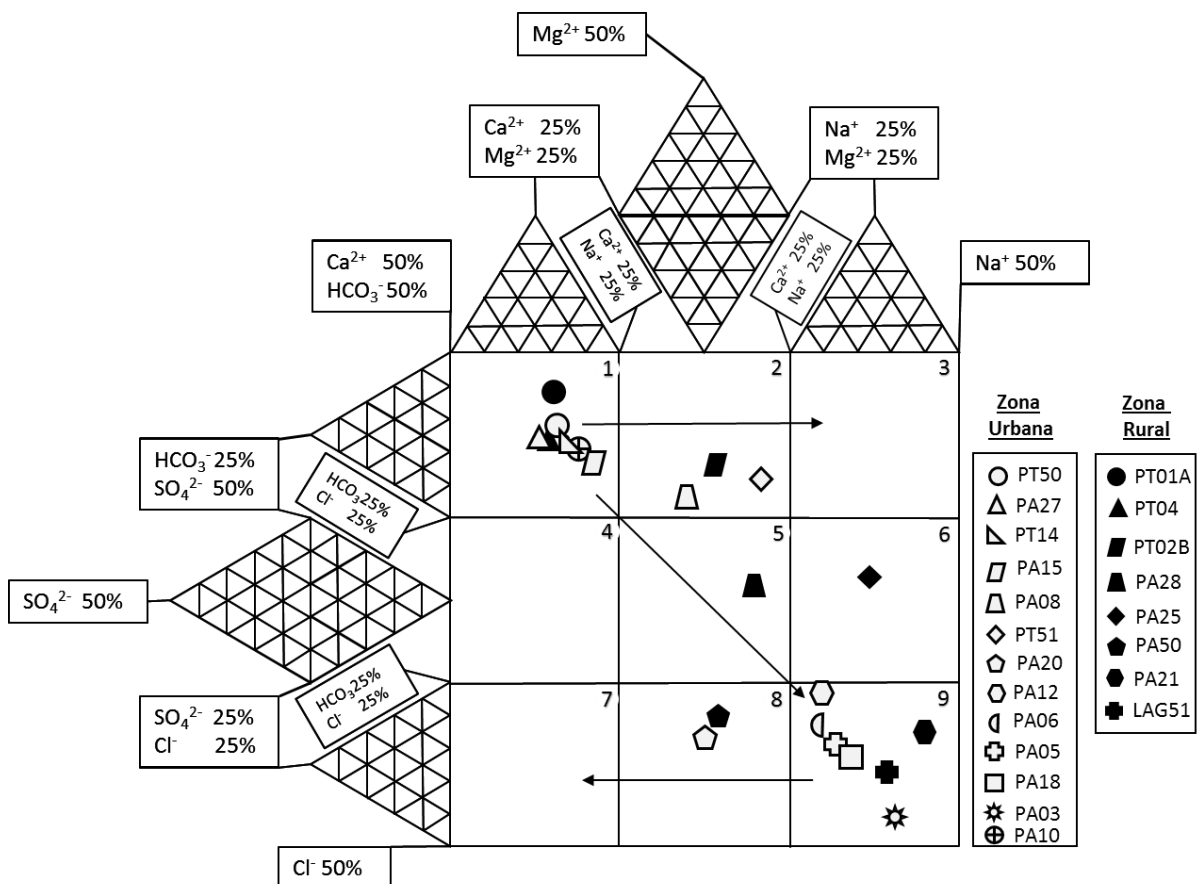


Fig. 10 Diagrama de Durov expandido com indicações das mudanças de fácies

Conclusões (Artigo)

De acordo com os estudos realizados, o aquífero dunas é um importante reservatório de água para região litorânea semiárida. O aquífero dunas é responsável pelo abastecimento de água doce da população da RDSEPT e entorno e provavelmente pela manutenção e equilíbrio do manguezal existente na área. A recarga por precipitação ocorre em toda extensão das dunas, facilitada pela alta permeabilidade dos sedimentos pouco consolidados das dunas vegetadas e não vegetadas. A transmissividade média é de $1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, a condutividade hidráulica média é de $4,13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ e a porosidade específica é de 0,05. A direção do fluxo subterrâneo ocorre em duas frentes de escoamento. Uma frente de escoamento na direção sul para o norte com descarga no oceano e outra frente do norte para o sul. A hidroquímica é diversificada em toda área de estudo. Tanto, na zona urbana como na zona rural, há predominância dos íons Na^+ , Cl^- , Ca^{++} e HCO_3^- . As águas, da zona norte e da zona sul, foram classificadas as águas da zona urbana como sódicas cloretadas, mistas cloretadas, mistas sódicas, cálcicas bicarbonatadas, mistas sódicas e mistas bicarbonatadas. O nitrato (NO_3^+) é a principal fonte poluente do aquífero, os altos valores da concentração são atribuídos a atividades antrópicas e a falta de esgotamento sanitário adequado. As fácies hidroquímicas das águas subterrâneas indicam trocas iônica, tanto direta como reversa, águas de recarga de rochas calcárias, arenitos e outros, simples dissolução ou mistura durante o fluxo das águas subterrâneas e misturas de água doce com águas salinas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

De acordo com os estudos realizados:

- ✓ O aquífero dunas, na área de estudo, é um importante reservatório de água para região litorânea semiárida com área de 47,25 Km², representando 30,88% da área.
- ✓ O aquífero dunas é responsável pela maior parte do abastecimento de água doce da população da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Estado do Rio Grande do Norte – RDSEPT e seu entorno.
- ✓ É a única fonte de água doce que mantêm o equilíbrio do ecossistema estuarino na zona costeira.
- ✓ Elevado déficit hídrico anual de 1.533,9 mm.
- ✓ A área é classificada como clima semiárido quente.
- ✓ As estruturas geológicas locais são constituídas pela Formação Barreiras, Formação Tibau (Paleógeno) e pelos depósitos aluvionares antigos, depósitos fluvio-marinhos, flúvio-lacustrino, de mangues, litorâneos de praias, eólicos litorâneos vegetados, não vegetados e aluvionares.
- ✓ A Recarga do aquífero dunas é por precipitação com volume estimado em $4,95 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$. Ocorre em toda extensão das dunas, facilitada pela alta permeabilidade dos sedimentos pouco consolidados das dunas vegetadas e não vegetadas.
- ✓ A variação do nível estático sazonal, no período de 18 meses, foi de 0,61m.
- ✓ A transmissividade (T) média é de $1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, a condutividade hidráulica (K) média é de $4,13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ e a porosidade específica (μ) é de 0,05.
- ✓ A Vazão de escoamento norte (Q) é de $1,46 \times 10^6 \text{ m}^3/ \text{ano}$ e a Vazão de escoamento sul (Q) é de $0,78 \times 10^6 \text{ m}^3/ \text{ano}$.
- ✓ O mapa potenciométrico indica um divisor de águas e duas frentes de escoamento. Uma frente de escoamento com vazão na direção sul para o norte, com descarga no oceano e no sistema estuarino e outra frente do norte para o sul, com descarga nos sedimentos aluvionares antigos.
- ✓ A reserva reguladora e permanente são de $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $3,42 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente. A reserva total é de $4,91 \times 10^6 \text{ m}^3$. A demanda necessária para o abastecimento da região da reserva e entorno é da ordem de $5,84 \times 10^4$

m³ / ano. A reserva reguladora representa 24 vezes o volume anual requerido para região.

- ✓ A hidroquímica é diversificada em toda área de estudo. Tanto, na zona urbana como na zona rural, há predominância dos íons Na⁺, Cl⁻, Ca⁺⁺ e HCO₃⁻.
- ✓ As águas da zona urbana e da zona rural foram classificadas como sódicas cloretadas, mistas cloretadas, mistas sódicas, cálcicas bicarbonatadas, mistas sódicas e mistas bicarbonatadas.
- ✓ O nitrato (NO₃⁺) é a principal fonte poluente do aquífero, os altos valores da concentração nas águas subterrâneas em alguns poços do aquífero dunas são atribuídos a decomposição de material orgânico das atividades antrópicas e a falta de esgotamento sanitário adequado.
- ✓ As fácies hidroquímicas das águas subterrâneas indicam trocas iônica, tanto direta como reversa águas, simples dissolução ou mistura durante o fluxo das águas subterrâneas e misturas de água doce com águas salinas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D.M; GRASBY,S.E; VOORMEJ, D.A. Determining the circulation depth of thermal springs in the southern Rock Mountain Trench, south-eastern British Columbia, Canada using geothermometry and borehole temperature logs. Springer-Verlag, January 2006, volume 14, Issue 159-172, 2006.

ARAÚJO, D.S.D. e HENRIQUES, R.P.B. Análise florística das restingas do Estado do Rio de Janeiro. In: LACERDA, LD; ARAÚJO, D.S.D.; CERQUEIRA, R.& TURCQ, B. (orgs). Restingas, Origem, Estrutura e processos. Niterói: Centro Editorial da Universidade Federal Fluminense, p 327-342, 1984

ANGELIM, L. A. A., Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte -Escala 1:500.000. / Luiz Alberto de Aquino Angelim ... [et al.]. - Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.119 p.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. P., Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, v.8, n.1, p.127-141,1994.

BACK W., Origin of hydrochemical in groundwater in the Atlantic Coastal Plain. In: Proceedings of International Geological Congress, Copenhagen, vol I, pp 87-95, 1966.

BERTANI, R.T.; COSTA, I.G.; MATOS, R.M.D. Evolução tectono -sedimentar, estilo estrutural e hábitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Coord.) Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: Petrobras. SEREC.CENSUD, p. 291-310. 1990

BEZERRA, F.H.R.; AMARAL R F.; SILVA, F.O.; SOUZA, M.O.L.; FONSECA, V.P.; VIEIRA, M.M.; Geologia e recursos minerais da folha Macau. SB.24-X-D-II e SB.24-X-B-V: Estado do Rio Grande do Norte. Escala: 1:100.000 Texto Explicativo. CPRM/UFRN, 2009.

BOGÁRDI, I.; KUZELLKE, R.D. Nitrate Contamination- Exposure, Consequence and Control, Published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, Springer-Verlag, p.513, 1990.

BORGES, A.C.; SILVA, V. M. Influência hidrogeoquímica da água subterrânea em manguezais. *Geochimica Brasiliensis* 27(2), p. 98-103, 2013.

BRASIL - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, Resolução Nº 357, de 17 março de 2005, publicada no DOU nº 053 de 18/03/2005, p. 58 - 63 – Alterada pela resolução 410/2009 e pela 430 2011.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, vol. 59, nº2, Campinas, 2000

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.55, p.367-378, 1998.

CHM - CENTRO DA HIDROGRAFIA DA MARINHA - Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). Disponível em < <https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-bndo/acesso-a-dados-e-produtos> >

CONAMA - Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 março de 2005.

COOPER, H.H.; JACOB, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, v.27, p 526-634, 1946.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/> >

CUSTODIO, E.; LLAMS, M.R. Hidrogeologia Subterrânea. Barcelona. Ed. Omega, v.2,1983

EMPARN – EMPRESA DE PESQUISA AGRAPECUARIA DO RIO GRANDE DO NORTE. Disponível em < <http://www.emparn.rn.gov.br> >

EZEQUIEL, F.S.; AMARO, V.E.; MATOS, M.F.A., Análise Multitemporal do Campos de Dunas Móveis do Litoral setentrional do Rio Grande do Norte. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, INPE, 2015.

FARIAS, P.R.C., Geologia de Superfície da Área de Detalhe de Macau-RN. Relatório Final. PETROBRAS/GEXP/GELAB, Relatório Interno, 76 p., 1997.

GHOSH, D. R. Manguezais – O ecossistema florestal mais frágil. Ressonância, Volume 16, Ed. Springer-Verlag, pp47-60, 2011

GOOGLE. Google Earth website Disponível em: <http://earth.google.com/>, 13/03/2018.

HOUNSLOW, A.W. Water Quality Data: Analysis and interpretation; Lewia Publisher, 397p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. (Estudos e Pesquisas: informação demográfica e socioeconômica). Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IDEMA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE – IDEMA. Disponível em < <http://www.idema.rn.gov.br/> > Acesso em 15 de janeiro de 2018.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf > Acesso em 10 de janeiro de 2018.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

LEWIS, E.R, SCHWARTZ, S. Produção de aerossóis marinhos; mecanismos, métodos. Medição e Modelos, Washington DC, EUA, 2004.

LOGAN, J., Interpretação de Análises Químicas da Água. US. Agency for International Development. Recife, 1965.

MARTINS, E.S.P.R.; MAGALHÃES, A.R. A Seca de 2012 – 2015 no Nordeste e seus Impactos - Políticas Nacionais da Seca, Parc. Estrat., ed. Esp. Brasília/DF-v.20, n.41, p. 107-128, 2015.

MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: textos, mapas & SIG. Brasília, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2003.p.87-165.Disponível em:

<http://www.cprm.gov.br/publique/media/abertura.pdf> Acesso em: 19 nov. 2014.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: a guide to appropriate use of Correlation Coefficient in medical research. Malawai Medical Journal.< <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/pmc3576830/> > consultado em 6 de agosto de 2019.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Disponível em < <https://nacoesunidas.org/acao/agua/#> >. Acessado em 20/01/2019.

PEDROSA JR, N. C., CASTRO, D.L. D., & MATOS, J. P. L. D. Assinaturas magnéticas e gravimétricas do arcabouço estrutural da bacia Potiguar emersa no NE do Brasil. Revista Brasileira de Geofísica, v. 28, n. 2, p. 265-278,2010.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v28n2/v28n2a10.pdf>>Acesso em: 05 dez.2014

PINHEIRO, M.V.A., Evolução Geoambiental e Geohistórica das Dunas Costeiras do Município de Fortaleza, Ceará. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geografia, Fortaleza, 94-96p, 2009

RIOS, V.P.L; AMARO, V. E., Caracterização dos depósitos sedimentares Holocênicos no sistema de ilhas barreiras do estuário Diogo Lopes, litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Revista de Geologia, Vol. 25, HIDROSEMA, 55 – 69, 2002

SEMARH – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em < <http://www.semarh.rn.gov.br/> >

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. São Paulo, Caribbean Ecological Research, 1995.

SANTOS, A.C., Cap.5 - Noções de Hidroquímica In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J., (coord.), Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, 2º edição, Fortaleza/CE: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, p. 81-108, 2000

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L. V. (org). Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília (DF): MMA/UFPE/Conservation International – Biodiversitas – Embrapa Semi-árido, 2004. 382p.

SILVEIRA, I.M., Estudo Evolutivo das condições Ambientais da Região Costeira do Município de Guamaré – RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, p. 49-51, 2002.

SINGH, R.B. Desafios, Monitoramento, e Desenvolvimento de Águas Subterrâneas no Norte da Índia. In. Sato K., Iwasa Y. (eds) Atualizações das Águas Subterrâneas. Springer, Tóquio. Pp 67- 72, 2000.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton, v. 8, n.1. 1955.

VARELLA NETO, P.L., BARROSO T.T. Pesquisa para Avaliar a Viabilidade do Abastecimento de Diogo Lopes Através da Água Subterrânea. CDM-Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte, 1994.

VASCONCELOS, M. B., O que são poços? Um panorama das terminologias utilizadas para captações de águas subterrâneas. ABAS-Associação Brasileiras de Águas Subterrâneas. Águas Subterrâneas 31(2), p. 44-57, 2017

VILLAR, P.C., As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. Ambiente & Sociedade, São Paulo v. XIX, n. 1, p. 83-102, 2016

VITAL, HELENICE. Geologia e recursos minerais da folha Jandaíra SB.24-X-D-III: estado do Rio Grande do Norte / Helenice Vital ...[et al.] ... – Recife: CPRM, 2013. 1 DVD Programa Geologia do Brasil. ISBN 978-85-7499-192-4 1.Geologia regional – Brasil – Rio Grande do Norte. 2.Recursos minerais – Brasil – Rio Grande do Norte.

YOUNGER, P. L., Groundwater in the Environment, Ed. John Wiley Professional, 2008. P.90.

WILSON, A.M.; MORRIS, J.T. A influência das marés forçando o fluxo de água subterrânea e a troca de nutrientes em um estuário dominado pelo pântano salgado, Biogeoquímica, Volume 108, ed. 1-3, pag. 27-38, 2012.