



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

RAFAEL MOTA DE OLIVEIRA

**NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE FORTALEZA:
OCORRENCIAS, CAUSAS E RISCOS A SAÚDE DA POPULAÇÃO**

FORTALEZA

2023

RAFAEL MOTA DE OLIVEIRA

NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE FORTALEZA:
OCORRÊNCIAS, CAUSAS E RISCOS A SAÚDE DA POPULAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de Concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O51n Oliveira, Rafael Mota de.
Nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza : ocorrências, causas e riscos a saúde da população / Rafael Mota de Oliveira. – 2023.
124 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.
1. Compostos Nitrogenados. 2. Saneamento básico. 3. Doenças de veiculação hídrica. I. Título.
CDD 551
-

RAFAEL MOTA DE OLIVEIRA

NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE FORTALEZA:
OCORRÊNCIAS, CAUSAS E RISCOS A SAÚDE DA POPULAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de Concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 13/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eneas Oliveira Lousada
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Prof. Dr. Milton Antônio da Silva Matta
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Dr. Carlos Márcio Soares Rocha
Pesquisador Voluntário (LABHI/DEGEO/CC/UFC)

Dedico esse trabalho a todos que acreditaram em mim e me deram total apoio, em especial a minha esposa Karen Vendramini que sempre esteve ao meu lado me dando forças nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz Alves e Eliana Meireles, aos meus irmãos Luiz Filho e Louise Iara, que sempre me incentivavam a cursar o Doutorado e me deram total apoio permitindo que eu chegasse a esta etapa final.

A minha esposa Karen Vendramini, que esteve ao meu lado em todos os momentos dessa jornada, me incentivando e me dando forças para poder vencer essa etapa.

Ao meu orientador Professor Dr. Itabaraci N. Cavalcante, ao qual tenho um respeito e uma amizade muito grande, que me orienta não só na área de Hidrogeologia mas, também, nas dificuldades que enfrentamos ao longo da vida.

Aos meus amigos Maria da Conceição, João, Inácio e Joel que sempre estiveram dispostos a me ajudar no que precisasse para o desenvolvimento desta Tese.

A todos os membros constituintes da Banca Examinadora, pois suas contribuições, certamente melhoraram o meu conhecimento e o texto da Tese.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará.

E, por fim, agradeço a CAPES pela Bolsa de Pesquisa que foi fundamental para a realização desta pesquisa, culminando na Tese de Doutorado.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

(Roberto Shinyashiki)

RESUMO

O íon nitrato representa um dos parâmetros mundialmente utilizado como indicativo de contaminação da água subterrânea devido, sobretudo, às propriedades de alta mobilidade e persistência na água subterrânea, com capacidade de contaminar extensas áreas, tendo como principal fonte de contaminação a falta de saneamento básico. O Município de Fortaleza, situado na zona litorânea da porção nordeste do Estado do Ceará, abrangendo 313,8 km² e com 2.686.612 habitantes, apresentou nos últimos anos (1998 a 2018) um rápido crescimento urbano porém, os investimentos em coleta de lixo e, principalmente, no saneamento básico, não acompanharam tal crescimento, sendo comum a ocorrência das disposições inadequadas de lixo, e de acordo com os dados levantados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a taxa de cobertura de saneamento é de 50%, forçando uma parcela da população a recorrer a utilização de fossas sépticas, gerando potenciais fontes de contaminação de nitrato nas águas subterrâneas. Sendo assim, tendo como objetivo avaliar as ocorrências e causas das concentrações do nitrato nas águas subterrâneas, bem como o comportamento temporal das concentrações associado aos riscos à saúde da população fortalezense que se utiliza dessas águas para o consumo humano, foram realizadas 40 análises físico-químicas tendo como valor de referências os padrões de potabilidade para consumo humano estabelecidos pela Portaria N° 888, de 4 de Maio de 2021, onde foi possível observar que as águas subterrâneas são levemente ácidas, com pH médio de 6, com 18 amostras fora dos padrões de potabilidade, em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) 03 amostras encontram-se fora dos padrões e no íon cloreto, duas amostras localizadas na porção sul da área apresentaram concentrações fora dos padrões de potabilidade. Em relação aos compostos nitrogenados, o nitrito não apresentou concentrações fora dos padrões, porém a amônia (02 amostras) e o nitrato (16 amostras) apresentam valores acima do Valor Máximo Permitido – VMP. Tais concentrações, acima do limite máximo do padrão estabelecido pela Portaria, trazem riscos à saúde da população onde segundo o DATASUS (2021), anualmente são registradas, em média, 4.634 internações correlacionadas as doenças de veiculação hídrica, sendo a população mais jovem (0 a 14 anos) a que mais sofre, com 3.821 internações.

Palavras-chave: Compostos nitrogenados; Saneamento básico; Doenças de veiculação hídrica.

ABSTRACT

The nitrate ion is one of the parameters used worldwide as an indicator of groundwater contamination, mainly due to its properties of high mobility and persistence in groundwater, with the capacity to contaminate large areas, with the lack of basic sanitation as the main source of contamination. The Municipality of Fortaleza, located in the coastal zone of the northeast portion of the State of Ceará, covering 313.8 km² and with 2,686,612 inhabitants, has presented in recent years (1998 to 2018) a rapid urban growth, however, investments in garbage collection and, mainly, in basic sanitation, did not accompany such growth, with inadequate waste disposal being common, and according to data collected by the National Sanitation Information System (SNIS), the sanitation coverage rate is 50 %, forcing a portion of the population to resort to the use of septic tanks, generating potential sources of nitrate contamination in groundwater. Therefore, with the aim of evaluating the occurrences and causes of nitrate concentrations in groundwater, as well as the temporal behavior of concentrations associated with health risks for the population of Fortaleza that uses these waters for human consumption, 40 physical-analyses were carried out. chemicals having as a reference the potability standards for human consumption established by Ordinance No. 888, of May 4, 2021, where it was possible to observe that the groundwater is slightly acidic, with an average pH of 6, with 18 samples outside the standards of potability, in relation to Total Dissolved Solids (TDS) 03 samples are found outside the standards and in the chloride ion, two samples located in the southern portion of the area presented concentrations outside the standards of potability. Regarding nitrogenous compounds, nitrite did not show concentrations outside the standards, but ammonia (02 samples) and nitrate (16 samples) showed values above the Maximum Allowed Value – VMP. Such concentrations, above the maximum limit of the standard established by the Ordinance, bring risks to the health of the population where, according to DATASUS (2021), an average of 4,634 hospitalizations correlated with waterborne diseases are registered annually, with the younger population (0 to 14 years) the one that suffers the most, with 3,821 admissions.

Keywords: Nitrogen compounds; Basic sanitation; Waterborne diseases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Área de Pesquisa.....	20
Figura 2 – Fluxograma do Ciclo do Azoto.....	24
Figura 3 – Vestígios de vegetação pioneira nas dunas da Praia do Futuro.....	44
Figura 4 – Mata a retaguarda de dunas localizada na Sabiaguaba.....	44
Figura 5 – Vestígios de tabuleiro litorâneo localizada no Campus do Pici/UFC.....	45
Figura 6 – Vegetação de mangue localizada na Sabiaguaba.....	46
Figura 7 – Vegetação aquática localizada no Campus do Pici/UFC.....	47
Figura 8 – Vegetação antrópica localizada na Av. Aldy Menor, Praia do Futuro.....	47
Figura 9 – Bacias Hidrográficas do Município de Fortaleza, Ceará.....	49
Figura 10 – Rio Cocó próximo ao bairro Edson Queiroz.....	50
Figura 11 – Açude Santo Anastácio, UFC/Pici.....	51
Figura 12 – Distribuição Litológica no Município de Fortaleza, Ceará.....	52
Figura 13 – Neck Vulcânico localizado próximo a foz do rio Pacoti.....	53
Figura 14 – Nível conglomerático da Formação Barreiras.....	54
Figura 15 – Mangue as margens do rio Cocó, Sabiaguaba.....	55
Figura 16 – Dunas localizadas na Sabiaguaba.....	56
Figura 17 – Antiga bateria de poços da CAGECE que captava água do aquífero dunas na região da praia da Abreulândia, litoral leste.....	58
Figura 18 – Média Mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 311..	61
Figura 19 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 362...	62
Figura 20 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 363....	63
Figura 21 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 364....	64
Figura 22 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 311.....	65
Figura 23 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N°362.....	66

Figura 24 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 363.....	67
Figura 25 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N°364.....	68
Figura 26 – Representação gráfica do balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°311.....	70
Figura 27 – Representação gráfica do balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°362.....	71
Figura 28 – Representação gráfica do balanço hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°363.....	73
Figura 29 – Representação gráfica do balanço hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°364.....	74
Figura 30 – Área de influências que cada posto pluviométrico exerce em Fortaleza - CE de acordo com os Polígonos de Thiessen.....	76
Figura 31 – Evolução da mancha urbana no município de Fortaleza – CE.....	81
Figura 32 – Ocupação as margens de córrego e descarte de rejeito doméstico diretamente no córrego (Agosto/2020).....	82
Figura 33 – Evolução do crescimento populacional de Fortaleza, CE.....	83
Figura 34 – Proximidade da cacimba à fossa, Jardim América, Fortaleza – Ce.....	84
Figura 35 – Poço sem proteção sanitária. Serrinha, Fortaleza – CE.....	84
Figura 36 – Aterro Jangurussu, como morro coberto por vegetação.....	88
Figura 37 – Disposição inadequada de lixo em Fortaleza.....	89
Figura 38 – Residências abastecidas por água encanada e coleta de esgoto (2021) em Fortaleza – Ceará.....	89
Figura 39 – Isolinhas com zoneamento tendencial do pH nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	94
Figura 40 – Isolinhas com zoneamento tendencial da CE nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	96
Figura 41 – Isolinhas com zoneamento tendencial do STD nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	97

Figura 42 – Isolinhas com zoneamento tendencial do Cloreto nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	99
Figura 43 – Isolinhas com zoneamento tendencial da Amônia nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	102
Figura 44 – Isolinhas com zoneamento tendencial do Nitrito nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	103
Figura 45 – Isolinhas com zoneamento tendencial do Nitrato nas águas subterrâneas do município de Fortaleza – Ceará.....	105
Figura 46 – Comparação temporal da concentração de nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza – CE.....	106
Figura 47 – Número de internações (2010 a 2019) por doenças de veiculação hídrica em Fortaleza – Ceará.....	109
Figura 48 – Número de internações por faixa etária em Fortaleza – Ceará (2019).....	110
Figura 49 – Número de internações por tipo de doenças em Fortaleza – Ceará (2019).....	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores de K para correção da evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite, latitude entre 15° norte e 37° sul.....	39
Quadro 2 – Postos pluviométricos no município de Fortaleza – Ceará.....	40
Quadro 3 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 311 (1999 à 2022).....	61
Quadro 4 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 362 (1988 à 2022).....	62
Quadro 5 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 363 (1990 à 2022).....	62
Quadro 6 – Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 364 (1986 à 2022).....	63
Quadro 7 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 311.....	64
Quadro 8 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 362.....	65
Quadro 9 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 363.....	66
Quadro 10 – Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 364.....	67
Quadro 11 – Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°311 (1999 - 2022).....	69
Quadro 12 – Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°362 (1988 - 2022).....	70
Quadro 13 – Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°363 (1990 - 2022).....	72
Quadro 14 – Balanço Hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°364 (1986 - 2022).....	73
Quadro 15 – Dados utilizados para a distribuição da precipitação da área de estudo.....	75

Quadro 16 – Média anual da precipitação atmosférica em Fortaleza - CE, levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos pelos Polígonos de Thiessen.....	77
Quadro 17 – Média anual da temperatura de Fortaleza levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos.....	77
Quadro 18 – Média anual da infiltração estimada de Fortaleza levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos.....	78
Quadro 19 – Cemitérios do município de Fortaleza – CE.....	86
Quadro 20 – Análises físico-químicas das águas subterrâneas de Fortaleza – CE.....	92
Quadro 21 – Aumento na concentração de nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza, Ceará.....	107
Quadro 22 – Poços onde foram observados aumento na concentração de nitrato.....	107
Quadro 23 – Poços com baixa variação na concentração de nitrato.....	108
Quadro 24 – Poços onde foram observados reduções na concentração de nitrato.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CC	Centro de Ciências
CE	Condutividade Elétrica
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil
DEGEO	Departamento de Geologia
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MS	Ministério da Saúde
NE	Nível Estático
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
VMP	Valor Máximo Permitido
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM	Universal Transversal de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral	18
1.2	Objetivos específicos	18
2	ÁREA DE ESTUDO	19
2.1	Aspectos socioeconômicos	21
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	22
3.1	Uso e ocupação do solo	22
3.2	Ciclo do azoto	24
3.2.1	<i>Fixação</i>	24
3.2.2	<i>Amonificação</i>	25
3.2.3	<i>Nitrificação</i>	25
3.2.4	<i>Desnitrificação</i>	25
3.3	Ciclo do azoto e a intervenção humana	26
3.3.1	<i>Fontes de contaminação por compostos nitrogenados</i>	26
3.4	Possíveis doenças causadas pela ingestão de água contaminada por nitrato	27
3.4.1	<i>Metehemoglobinemia</i>	28
3.4.2	<i>Câncer</i>	28
3.4.3	<i>Efeitos adversos</i>	29
3.5	Métodos de remediação da contaminação por nitrato	29
3.5.1	<i>Desnitrificação</i>	29
3.5.2	<i>Troca iônica</i>	30
3.5.3	<i>Osmose reversa</i>	30
3.5.4	<i>Eletrodialise</i>	31
3.6	Estudos de caso	31
4	METODOLOGIA	35
4.1	Etapa pré-campo	35
4.2	Etapa de campo	35
4.3	Etapa pós-campo	36
4.3.1	<i>Avaliação da concentração de nitrato</i>	36
4.3.2	<i>Bases temáticas</i>	37

4.3.3	Balanco hidroclimatológico	37
4.3.3.1	<i>Balanco hidroclimatológico pelo método de Thornthwaite e Mather</i>	37
4.3.3.2	<i>Postos pluviométricos</i>	40
4.3.3.3	<i>Polígonos de Thiessen</i>	40
5	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	42
5.1	Clima	42
5.2	Solos	42
5.3	Vegetação	43
5.4	Geomorfologia	48
5.5	Hidrografia	48
5.6	Geologia	51
5.6.1	<i>Pré-cambriano</i>	53
5.6.2	<i>Cenozoico</i>	53
5.7	Hidrogeologia	56
5.7.1	<i>Aquífero aluvionar</i>	56
5.7.2	<i>Aquífero dunas</i>	57
5.7.3	<i>Aquífero barreiras</i>	58
5.7.4	<i>Domínio hidrogeológico cristalino (Fraturado)</i>	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
6.1	Postos pluviométricos	60
6.1.1	<i>Precipitação</i>	60
6.1.2	<i>Temperatura</i>	64
6.2	Balanco hidroclimatológico	68
6.2.1	<i>Polígonos de Thiessen</i>	75
6.3	Qualidade das águas subterrâneas	78
6.3.1	Potenciais fontes de poluição	79
6.3.1.1	<i>Uso e ocupação do solo no município de Fortaleza</i>	79
6.3.1.2	<i>Construção de poços</i>	83
6.3.1.3	<i>Cemitérios</i>	85
6.3.1.4	<i>Disposição inadequada de resíduos sólidos</i>	87
6.3.1.5	<i>Saneamento básico</i>	89
6.3.2	<i>Análises físico-químicas e classificação da potabilidade para consumo humano</i>	91

6.3.2.1	<i>pH</i>	93
6.3.2.2	<i>Condutividade elétrica (CE)</i>	95
6.3.2.3	<i>Sólidos totais dissolvidos(STD)</i>	95
6.3.2.4	<i>Cloreto</i>	98
6.3.2.5	<i>Compostos nitrogenados</i>	100
6.3.2.5.1	Amônia	100
6.3.2.5.2	Nitrito	101
6.3.2.5.3	N-Nitrato	104
6.3.3	<i>Comparação da evolução temporal do nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza</i>	106
6.4	Riscos à saúde da população	109
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	112
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea representa 98% da reserva de água doce do planeta sendo considerada, no geral, com qualidade superior às águas superficiais pois normalmente se encontra mais protegida de agentes poluidores (CAVALCANTE, 1998). Em escala mundial, nos últimos anos a água tem sido gradativamente reconhecida como um recurso natural cada vez mais escasso. Entretanto, deve-se fazer uma distinção entre as causas de sua escassez, sejam essas referentes às limitações qualitativas, em detrimento da poluição, ou referente às limitações quantitativas, devido as condições climáticas, à demanda crescente ligada ao aumento populacional, ao desenvolvimento econômico e ao seu uso de forma inadequada (PEREIRA, 1999).

No Brasil, a água subterrânea vem sendo bastante explorada, tendo como principais usos o consumo humano, irrigação, indústrias e lazer. Para 39% dos municípios brasileiros, a água subterrânea é a única fonte de abastecimento, enquanto 47% são abastecidos unicamente por águas superficiais e 14% por mananciais superficiais e subterrâneos segundo a ANA - Agência Nacional de Águas (ANA, 2010a).

No Ceará, 35% dos municípios são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas (ANA, 2010), principalmente aqueles localizados na faixa costeira e ao sul do estado. Na base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), sob a responsabilidade do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), estão cadastrados 23.492 poços no Ceará, dos quais 1.953 encontram-se no município de Fortaleza (BRASIL, 2022). Porém, deve ser ressaltado que o projeto desenvolvido pelo Consórcio Golder/Pivot (2002/2004), gerenciado pela COGERH/SRH, cadastrou até maio de 2002 e em campo, somente para Fortaleza, 7.300 poços.

Porém, o crescimento e desenvolvimento das cidades e diferentes formas de uso e ocupação do solo, podem trazer prejuízos à qualidade das águas subterrâneas. A falta de saneamento básico, uso de fossas sépticas, disposição inadequada de resíduos sólidos e a utilização de fertilizantes na agricultura correspondem a fontes importantes de nitrato para a contaminação das águas (VARNIER; HIRATA, 2002).

O íon nitrato representa um dos parâmetros mundialmente utilizado como indicativo de contaminação da água subterrânea devido, sobretudo, às propriedades de alta mobilidade e persistência na água subterrânea, com capacidade de contaminar extensas áreas (CETESB, 2007). No início da década de 80 do século passado, a contaminação das águas

subterrâneas por nitrato oriundo da prática da agricultura era extremamente comum na Comunidade Europeia.

O nitrato pode ser encontrado naturalmente em águas subterrâneas com teores que variam de 0,1 a 10 mg/L (BAIRD, 2002 apud BIGUELINI; GUMY, 2012), sendo que acima de 10 mg/L N-NO₃ são consideradas águas inadequadas para consumo humano pela Portaria GM/MS N°888, de 4 de Maio de 2021 (BRASIL, 2021), do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os padrões de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2021).

Doenças como metemoglobinemia e câncer podem ser resultantes do consumo de água com teores de nitrato acima de 10 mg/L (N-NO₃) (VARNIER; HIRATA, 2002). Também conhecida como síndrome do bebê azul, esta doença é causada pelo aumento da concentração de metemoglobina no sangue (NASCIMENTO et al, 2008). Crianças em seus primeiros meses de vida são consideradas como um importante grupo de risco, uma vez que o consumo de água contendo teores elevados de nitrato, mesmo em curto espaço de tempo, pode acarretar a metemoglobinemia e até mesmo resultar na morte (POHLING, 2009).

Cientistas debatem a possibilidade de consumo da água contaminada por nitrato aumentar o risco de câncer gástrico em seres humanos, isso porque tal íon no estômago se transforma em nitrito, que ao reagir produz compostos cancerígenos, as N-nitrosominas (SILVA; BROTTTO, 2014). Dores de cabeça, hipertensão (KAMINISHIKAWAHARA et al, 2011), diurese e hemorragia no baço (POHLIG, 2009) também são danos à saúde que podem ocorrer pela ingestão de água contaminada por nitrato.

Segundo VASCONCELOS (1999), o município de Fortaleza possui uma alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas em função direta das porosidades e permeabilidades de seus níveis aquíferos clásticos, um nível estático, na maioria das vezes, sub-aflorante (raso), e problemas de abastecimento de água que tendem a se agravar, progressivamente, com o crescimento urbano. Porém, a água subterrânea captada a partir dos poços tubulares e poços rasos (cacimbas, manuais) se configura em uma alternativa à falta d'água; entretanto, a presença de nitrato em elevadas concentrações é um alerta, uma vez que atua como forte indicador de contaminação antrópica e acarreta sérios riscos à saúde.

Diante do contexto acima mencionado, a realização desta pesquisa é justificada, tendo diretrizes vinculadas a avaliação da ocorrência de nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza, para que possam ser adotadas medidas preventivas e corretivas, direcionamento dos usos e preservação da qualidade deste recurso, proporcionando o fornecimento de uma água de melhor qualidade para a população e, conseqüentemente, melhor qualidade de vida.

1.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar as ocorrências e causas dos elevados teores de nitrato nas águas subterrâneas e o comportamento temporal das concentrações associado ao uso e ocupação do solo e aos riscos à saúde da população.

1.2 Objetivos específicos

Correspondem aos objetivos específicos:

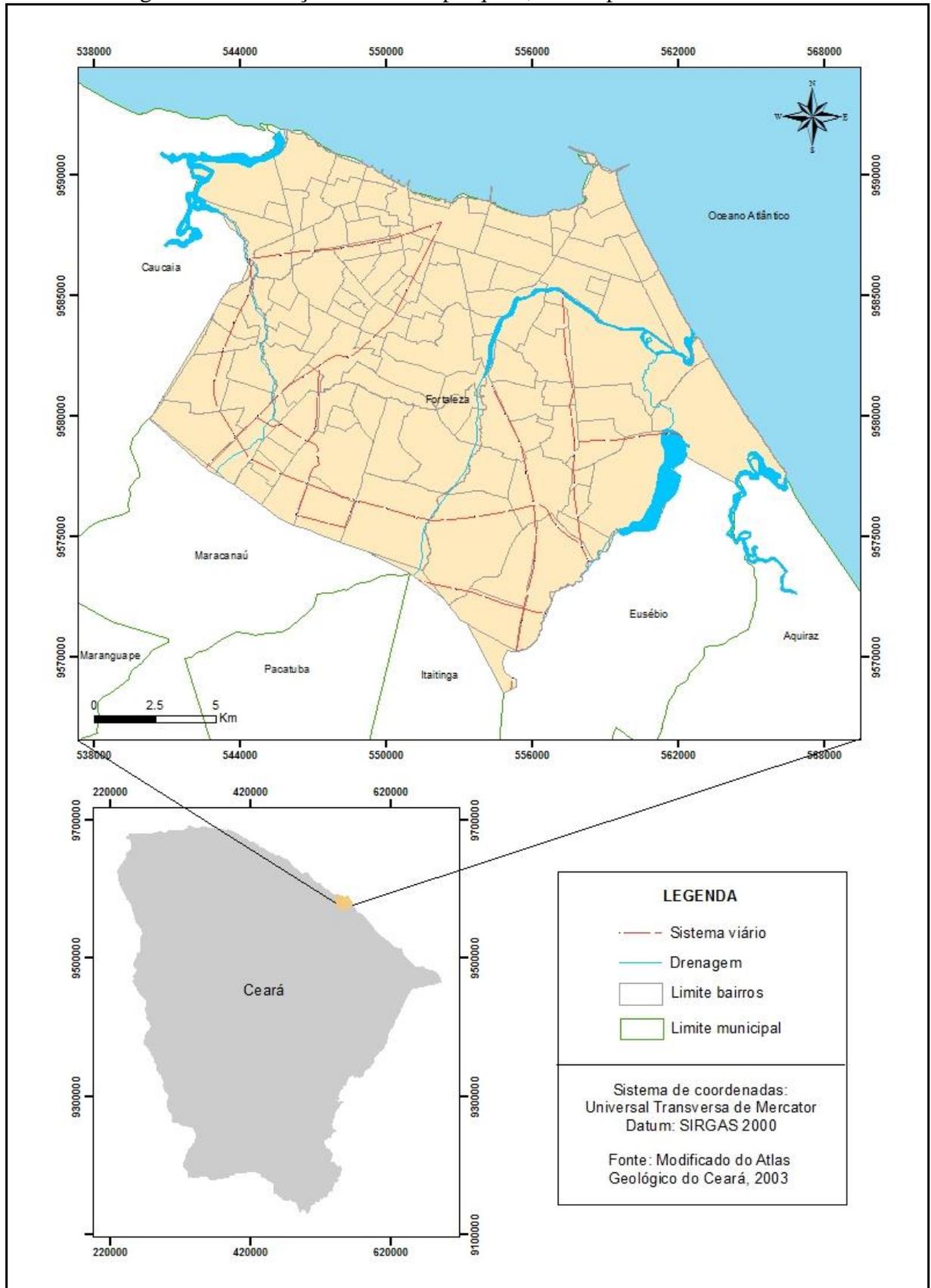
- ✓ Realizar análises químicas nas águas captadas por quarenta (40) poços para determinar as concentrações de amônia, nitrito, nitrato, pH, cloreto, condutividade elétrica (CE) e Sólidos Totais Dissolvidos (STD);
- ✓ Identificar as áreas com as maiores concentrações destes elementos, através da elaboração de mapas temáticos de zoneamentos tendenciais;
- ✓ Avaliar a evolução das concentrações de nitrato presentes nas águas subterrâneas comparando o resultado das análises atuais com outras realizadas em períodos anteriores, particularmente de 2001 a 2016, disponibilizadas no arquivo de dados qualitativos do Laboratório de Hidrogeologia (LABHI) do DEGEO/CC/UFC e outras fontes;
- ✓ Identificar as fontes efetivas e potenciais de contaminação por nitrato nas águas subterrâneas;
- ✓ Correlacionar a evolução da expansão urbana e saneamento básico com o aumento das concentrações de nitrato nas águas subterrâneas;
- ✓ Tecer considerações sobre os riscos à saúde humana derivados da ingestão de águas contaminadas por nitrato.

2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Fortaleza está localizado na zona litorânea da porção nordeste do estado do Ceará, região Nordeste do Brasil, sendo delimitado pelas coordenadas geográficas 03°41'02" a 03°53'11" de Latitude Sul e 38°24'40" a 38°39'15" de Longitude Oeste de Greenwich, e incluso na Folha AS-24-Z-C-IV – SUDENE, possuindo 313,8 km² e limitando-se com o Oceano Atlântico e diferentes municípios, a saber: ao norte com o Oceano Atlântico; ao sul com Maracanaú, Pacatuba e Itaitinga; ao leste com Eusébio, Aquiraz e Oceano Atlântico, e; ao oeste com Caucaia e Maracanaú (Figura 01).

O acesso pode ser realizado pela extensa malha viária municipal, mas, contudo, existem rodovias principais que integram o município com as demais regiões estaduais ou interestaduais, sendo elas: a BR 116 (sul), a CE 060 (norte), a BR 222 (oeste) e a CE 020 (leste), além de contar com acesso aéreo do Aeroporto Internacional Pinto Martins e o Porto do Mucuripe.

Figura 1: Localização da área de pesquisa, município de Fortaleza – Ceará



Fonte: Autor, 2023

2.1 Aspectos socioeconômicos

De acordo com o último Censo demográfico realizado pelo IBGE (2010), o município de Fortaleza, instalado em 1725, possui 313,8 km² e uma população estimada de 2.686.612 hab. para 2020, refletindo uma densidade demográfica de 8.599,72 hab./km².

No ano de 2020 o PIB do município chegou a R\$ 65,16 bilhões, o que resulta um PIB per capita, em valores correntes, de R\$ 24.253,93, tornando-se o maior PIB da região Nordeste e a 11^a economia do país. Entretanto, o IDH do município é de 0,754, o que confere ao município de Fortaleza o 467^o lugar no ranking brasileiro no Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (IBGE, 2020).

As principais atividades econômicas correspondem as indústrias (setor secundário) e os serviços (setor terciário), sendo estes os de maior participação no PIB, com destaque para o comércio e as atividades ligadas ao turismo. A capital cearense conta com 34 km de litoral, onde estão situadas inúmeras praias, além de outros atrativos, como parques aquáticos, parques ecológicos, centros culturais e complexos hoteleiros. Dispõe, ainda, de universidades federais (UFC) estaduais (UECE) e diversas universidades particulares, onde se desta a UNIFOR, uma das maiores do país. Possui jornais de grande circulação, hospitais diversos, canais de televisão, cinemas, shoppings, teatros e diversos outros empreendimentos que caracterizam uma grande metrópole.

O abastecimento de água para a população é realizado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), através da captação de água dos açudes Acarape do Meio, Pacajus e do Sistema Pacoti – Riachão – Gavião, que apresentam capacidade máxima de 266,22 hm³, fornecendo água para 98,66% da população, em relação a distribuição elétrica, 99,7% das residências têm acesso a esse recurso (IPECE, 2022). Atualmente, Fortaleza está praticamente interligada aos municípios vizinhos, a exemplo de Maracanaú, Maranguape, Caucaia e Eusébio.

A RMF concentra os principais polos industriais do Ceará, onde se encontram empresas de diversos setores produtivos, sendo a indústria de transformação a principal deles, sobretudo a produção têxtil e de vestuário. Uma refinaria da Petrobras, produtora de asfalto e óleos lubrificantes, localizada na Praia do Futuro. O setor petrolífero se destaca nas exportações de óleos e minerais betuminosos ao exterior. A pesca e a comercialização de peixes e crustáceos, sobretudo para o mercado externo, é uma das principais atividades componentes do setor primário. A agropecuária possui baixa participação na economia, com gêneros como coco-da-baía, manga, banana e castanha-de-caju (GUITARRARA, 2022).

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste item será apresentado o referencial teórico utilizado, bem como resumos de trabalhos realizados em diversas localidades correlacionados ao tema desta pesquisa.

3.1 Uso e ocupação do solo

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2010), a população mundial cada vez mais se concentra nas cidades e, dessa maneira, a urbanização será uma das tendências demográficas mais importantes do século XXI. No ano de 2008, pela primeira vez na história da humanidade, mais da metade da população mundial estava vivendo em ambientes urbanos.

O processo de urbanização brasileira deu-se no início do século XX e intensificou-se a partir da metade do mesmo, quando a indústria se tornou o setor mais importante da economia nacional, momento este que representa a passagem de uma economia agrário-exportadora para uma economia urbana industrial (ROMANELLI; ABIKO, 2011).

A urbanização no Brasil ocorreu principalmente após o início da mecanização das áreas agrícolas que forçou a população do campo a migrar para as cidades. De acordo com Barros (1998), entre as décadas de 60 e 70 do século XX, ocorreu uma inversão quanto ao lugar de residência da população brasileira, da zona rural para a urbana, consolidando-se na década de 1980. Entre 1960 e 1980 ocorreu um aumento considerável da população urbana, com mais de 50 milhões de novos habitantes. Nas décadas posteriores esse número continuou em ascensão.

Contudo, foi na década de 1970 quando a população brasileira girava em torno de 94 milhões de pessoas que o país passou a ser predominantemente urbano, com 55,9% da população vivendo em cidades. A transformação de país agrário e rural para um país urbano industrial trouxe mudanças no cenário político, econômico e social (ROMANELLI; ABIKO, 2011).

O aumento da concentração da população nas áreas urbanas faz com que ocorra um aumento da degradação do meio ambiente, porque a urbanização traz mudanças e impactos consideráveis ao mesmo. Dessa maneira, Gomes e Soares (2004) afirmam que, como fruto da urbanização desenfreada vivenciada principalmente pelos países “subdesenvolvidos”, a problemática ambiental se agrava cada vez mais à medida que as cidades se expandem.

A história da urbanização brasileira demonstra que a expansão urbana é caracterizada, sobretudo, pelo aumento irregular das áreas periféricas, que em sua maioria tem pouca obediência ao estabelecido nos planos diretores e em normas relativas à construção de novos loteamentos (TUCCI, 2003).

O uso e ocupação do solo em Fortaleza são regidos pela Lei nº 7.987 de dezembro de 1996 (FORTALEZA, 2010), conhecida como a *Lei do Uso e Ocupação do Solo Urbano*, atualizada em agosto de 2010. Ela divide o município em três Macrozonas de Planejamento: a *Macrozona Urbanizada*, atendida integralmente pela rede de abastecimento d'água e parcialmente pela rede de esgotos, onde se concentra a maior parte da população e que possui boa infraestrutura urbana; a *Macrozona Adensável*, onde existem tendências a expansão das atividades urbanas e que possui, em parte, serviço de esgoto e abastecimento de água, e; *Macrozona de Transição*, que não possui serviços urbanos de esgoto e abastecimento de água e constitui-se como espaço de reserva para expansão urbana.

Além dessas divisões, a Lei Nº 7.987/1996, em seu Art.4º, diz que para efeito da aplicação da legislação de parcelamento, de uso e ocupação do solo do município, o seu território foi dividido, também, em *Microzonas de Densidade* (subdivisões de uma macrozona) que são fundamentadas na distribuição das atividades e serviços, nas condições naturais do solo, infraestrutura básica, densidade populacional existente e projetada e, as *Zonas Especiais* identificadas por características do ambiente natural, cultural e econômico. As subdivisões desta Microzona são: Áreas de Urbanizada Especial, Preservação, Proteção, Interesse Ambiental (Dunas), Orla Marítima, Faixa de Praia, Interesse Urbanístico, Institucionais, Urbanização Prioritária e Industrial. Ressalta-se que as Microzonas foram projetadas para dez anos (1996 – 2006) e, portanto, necessitando de atualizações haja vista o imenso crescimento populacional e de ocupação do solo nas últimas duas décadas.

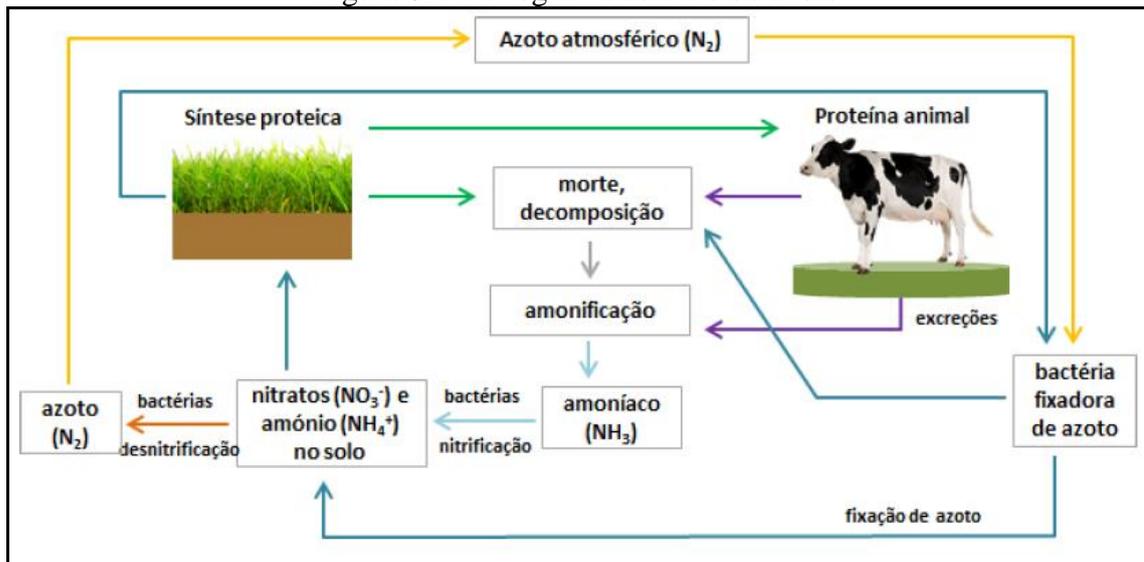
Phelps (2004) desenvolveu um estudo da química das águas subterrâneas com ênfase ao nitrato e utilizou como modelo o zoneamento de ocupação do solo na Flórida (EUA), em dois períodos (1977 e 1995), onde foi verificado um aumento nas unidades de ocupação do solo que está ligado a diversidade e expansão das atividades associadas ao processo de expansão populacional.

3.2 Ciclo do azoto

O Ciclo do Azoto, também conhecido como Ciclo do Nitrogênio, corresponde ao Ciclo Biogeoquímico do Nitrogênio, que comporta as diversas transformações que este elemento sofre no seu ciclo entre o reino mineral e os seres vivos (Figura 02).

Tal ciclo desempenha um papel importantíssimo na manutenção do equilíbrio da biosfera, sendo o azoto molecular, o gás mais abundante na atmosfera terrestre (78%), mas as suas formas combinadas são relativamente escassas no solo e na água. São poucos os seres vivos que conseguem usufruir do azoto atmosférico diretamente como fonte de azoto e, sendo assim, a disponibilidade dos compostos azotados nos ecossistemas está bastante dependente das atividades metabólicas dos microrganismos, permitindo a sua reciclagem no ambiente (MILITÃO, 2004).

Figura 02: Fluxograma do ciclo do azoto



Fonte: Dias, 2016.

O ciclo no azoto corresponde a um ciclo gasoso formado basicamente por quatro mecanismos diferenciados, descritos a seguir.

3.2.1 Fixação

É o processo através do qual o nitrogênio é capturado da atmosfera em estado gasoso (N_2) é convertido em formas de elementos úteis para outros processos químicos, como

exemplo: amoníaco (NH_3), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). Esta conversão pode ocorrer de duas formas:

- ✓ Fixação Biológica – quando algumas bactérias apresentam a capacidade de capturar o nitrogênio (N_2) e transformá-las em componentes úteis para os demais seres vivos (BRAGA *et al*, 2002).
- ✓ Fixação Atmosférica – quando descargas elétricas ocorrem na alta atmosfera onde processos fotoquímicos transformam o nitrogênio em compostos oxidados, que são carregados para a superfície através da precipitação (CHAPELLE, 2000).

3.2.2 Amonificação

A matéria orgânica, presente nas fezes de animais e nos tecidos de vegetais e animais mortos, é rapidamente quebrada em compostos simples por bactérias saprófitas do solo e vários fungos. O nitrogênio é incorporado em aminoácidos e proteínas utilizadas por esses microrganismos, e o excesso é liberado sob a forma de íons amônio (NH_4^+) ou amônia (NH_3).

3.2.3 Nitrificação

Freeze & Cherry (1979) definem nitrificação como um processo aeróbico por meio do qual ocorre a degradação de substâncias orgânicas nitrogenadas por intermédio de bactérias. A nitrificação depende da quantidade de oxigênio disponível e da matéria orgânica no solo, ocorrendo com mais facilidade nas zonas não-saturada e saturada rasa, onde tais condições são comumente satisfeitas.

3.2.4 Desnitrificação

A desnitrificação ocorre em ambientes pobres em oxigênio, causando o aumento do potencial redutor das águas. O nitrato, sob esta condição, pode ser reduzido a óxido de nitrogênio (N_2O) ou nitrogênio molecular (N_2). Neste processo as bactérias utilizam o oxigênio contido em compostos nitrogenados para sua respiração, reduzindo então, o nitrato. O óxido de nitrogênio e o nitrogênio molecular não existem como espécies dissolvidas nas águas subterrâneas, pois eles se perdem na forma de gases. Valores de pH acima de 7

favorecem a liberação de nitrogênio molecular (N_2), enquanto valores abaixo de 6 favorecem a liberação de óxido de nitrogênio (N_2O) (FREEZE & CHERRY, 1979).

3.3 Ciclo do azoto e a intervenção humana

As concentrações naturais de nitrato nas águas subterrâneas são muito baixas porque ele é utilizado em mecanismos bioquímicos que consomem o nitrato para formar as proteínas de plantas e outros compostos. O nitrato pode, ainda, ser carregado pela infiltração da água e consumido em processos de desnitrificação que ocorrem abaixo da camada superficial e aeróbica do solo. Entretanto, os processos acima descritos normalmente não removem todo o nitrato adicionado ao solo por fertilizantes ou por efluentes domésticos. Desta forma, o excedente de nitrato que pode atingir as águas subterrâneas é motivo de grande preocupação em relação à qualidade destas águas (USEPA, 1994).

O nitrogênio dissolvido na forma de íons nitrato ($N-NO_3^-$) é o contaminante mais comum encontrado nas águas subterrâneas e, segundo Santos (2008), sua concentração raramente ultrapassa 5 mg/L em águas não poluídas. Keeney (1987) estabelece que concentrações acima de 10 mg/L de nitrato são uma forte indicação de contaminação e Follet (1989), considera que uma concentração de 14 mg/L de nitrato pode ser indício de contaminação por atividades antrópicas.

Segundo Foster & Hirata (1988), a lixiviação do nitrato para as águas subterrâneas representa um sério problema de contaminação, especialmente em zonas densamente povoadas. Neste caso, o principal mecanismo de atenuação do contaminante é a diluição hidráulica, que ocorrerá ao longo do seu transporte. No entanto, Hirata (2000) esclarece que a diluição do contaminante no fluxo subterrâneo regional não é o único mecanismo capaz de reduzir as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas, uma vez que processos de desnitrificação, conforme já mencionado, também são de extrema importância para a remoção ou diminuição das concentrações de nitrato.

3.3.1 Fontes de contaminação por compostos nitrogenados

Segundo Chapelle (2000), as principais fontes de contaminação por nitrato derivado de atividades humanas nas águas subterrâneas podem ser classificadas basicamente em três atividades principais, sendo elas: pecuária (fonte de excrementos), agricultura (fertilizantes nitrogenados) e falta de saneamento básico (efluentes domésticos), sendo estes

descritos a seguir:

- ✓ A aplicação de resíduos animais para a fertilização do solo é uma fonte potencial de contaminação por nitrato em águas de muitos países. Também a criação de grandes quantidades de animais em confinamento (gado, suínos e cavalos) acaba gerando problemas de contaminação.
- ✓ A síntese industrial da amônia (NH_3) a partir do nitrogênio atmosférico (N_2), cujo processo foi desenvolvido durante a Primeira Guerra Mundial pelo alemão Fritz Haber, possibilitou o aparecimento dos fertilizantes sintéticos, com um consequente aumento da produtividade da agricultura. Entretanto, o Ciclo do Nitrogênio nem sempre está apto para assimilar o excesso de nitrogênio sintético. O excesso é carregado para as águas subterrâneas, rios e lagos, podendo causar a eutrofização (BRAGA, 2002).
- ✓ De acordo com a USEPA (1977 apud FREEZE & CHERRY, 1979), sistemas sépticos para a disposição de efluentes domésticos do tipo fossas são as principais e mais frequentes fontes de contaminação dos solos e águas subterrâneas. Estas, muitas vezes localizadas sobre aquíferos livres, os quais são utilizados como fonte de abastecimento de água. A expansão da malha urbana para áreas rurais ao redor das cidades, não supridas por sistemas de coleta de efluentes, tem aumentado significativamente a utilização de fossas.

3.4 Possíveis doenças causadas pela ingestão de água contaminada por nitrato

No Brasil, a Portaria GM/MS Nº888, de 4 de Maio de 2021 (BRASIL, 2021) estabelece o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano, onde, para o nitrato na forma de N-NO_3^- , as concentrações deste íon não devem ultrapassar os 10 mg/L. Este valor está de acordo com os aplicados pela OMS (WHO, 2011) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1995).

O nível regulatório para nitrato em águas destinadas ao consumo humano foi determinado, pela primeira vez, após um estudo sobre a ocorrência de metehemoglobinemia em crianças nos Estados Unidos. Na ocasião, observou-se que não existiam casos relacionados ao consumo de águas, cujas concentrações de nitrato fossem inferiores a 10 mg/L N-NO_3^- (WARD *et al*, 2005).

A ingestão de água com concentrações de nitrato superiores ao padrão de

potabilidade pode causar doenças como a metehemoglobinemia (*Síndrome do Bebê Azul*), alguns tipos de câncer (linfático, gástrico) ou mesmo problemas no sistema reprodutivo, em seres humanos e animais (USEPA, 1995; MANASSARAM *et al*, 2006; ALMASRI & KALUARACHCHI, 2007; WHO, 2011).

3.4.1 Metehemoglobinemia

A metehemoglobinemia, também conhecida como “*síndrome do bebê azul*”, é uma doença que acomete principalmente os bebês, a partir do acúmulo de metehemoglobina no sangue, ocasionando quedas respiratórias, cianose (mucosas azuladas), dispneia (alteração na frequência respiratória), falta de ar, além de desmaios e óbitos em casos mais agudos (WHO, 2011).

O sangue possui uma proteína denominada hemoglobina, responsável pelo transporte de oxigênio às células. A partir da ingestão de água contendo nitrato, ocorre a redução deste para nitrito no organismo. O nitrito, então, prende-se à hemoglobina presente no sangue para formar a metehemoglobina, que é incapaz de transportar o oxigênio, reduzindo assim o seu suprimento para órgãos vitais como o cérebro.

Os bebês com menos de seis meses de idade são os mais suscetíveis à metehemoglobinemia por razões diversas, tais como a maior capacidade de converter nitrato a nitrito, além de possuir níveis mais baixos de uma enzima denominada citocromo B5 redutase, que converte a metehemoglobina em hemoglobina (WHO, 2011). Salienta-se também que o pH intestinal, mais elevado nas lactentes, aumenta o poder oxidante devido ao crescimento de bactérias gram-negativas, conversoras de nitrato em nitrito.

3.4.2 Câncer

Outro possível efeito decorrente do consumo de água contaminada por nitrato está associado ao surgimento de alguns tipos de câncer, entre eles o gástrico e o linfático (linfoma de non-Hodgkin). As reações de nitrito e nitrato com aminas e amidas presentes no corpo humano podem levar à formação de nitrosaminas e nitrosamidas, duas substâncias conhecidas por seu caráter carcinogênico.

Vários trabalhos foram realizados para checar a relação entre nitrato e câncer, embora não sejam considerados conclusivos e definitivos (ZALDIVAR, 1977; FRASER & CHILVERS, 1981; PREUSSMAN & STEWART, 1984; NIESINK *et al*, 1995; WARD *et al*,

1996; SCHUBERT *et al*, 1999).

Em testes conduzidos em animais, constatou-se a ocorrência de câncer em todas as espécies testadas, associada à geração de nitrito e nitrato, o que leva a crer que os seres humanos também possam ser afetados. No entanto, ainda não há estudos conclusivos em relação a este aspecto.

Ward *et al* (2005) afirmaram que os efeitos adversos à saúde são resultados de uma interação complexa entre a quantidade de nitrato consumida, a ingestão concomitante dos subprodutos da conversão do nitrato, bem como as condições clínicas do hospedeiro. Além disso, tais efeitos podem ser atenuados por inibidores da conversão do nitrato em nitrito, como as vitaminas C e E.

3.4.3 Efeitos adversos

A ingestão de altas concentrações de nitrato pode também resultar no quadro de intoxicação crônica em animais, refletindo em baixa produtividade, redução no ganho de peso, quedas da eficiência reprodutiva, deficiência de vitamina A e abortos, sendo os ruminantes os mais suscetíveis (FAO, 1996; WHO, 2011). Adicionalmente, outras pesquisas associaram o consumo de nitrato ao aumento dos riscos de infecções respiratórias, hipertensão, más formações congênitas, nascimento de bebês prematuros e abortos espontâneos em seres humanos. Contudo, apesar de inúmeros estudos conduzidos na área, os resultados obtidos são pouco conclusivos (DORSCH *et al*, 1984; ARBUCKLE *et al*, 1988; ASCHENGRAU *et al*, 1989; FUJIWARA *et al*, 2000; BUKOWSKI *et al*, 2001; MANASSARAM *et al*, 2006).

3.5 Métodos de remediação da contaminação por nitrato

Existem alguns métodos capazes de remediar a contaminação por nitrato em águas subterrâneas, sendo os mais utilizados descritos a seguir.

3.5.1 Desnitificação

Processo no qual o nitrato é transformado biologicamente no aquífero, por meio de uma série de componentes intermediários, em nitrogênio molecular, gás nitrogênio (N₂) ou óxido nitroso (N₂O). A vantagem deste processo é que a maioria dos microorganismos não

utiliza o nitrogênio molecular, exceto as bactérias fixadoras de nitrogênio. Outra vantagem é a melhoria da qualidade da água, pois dificilmente os produtos desta reação retomam à forma de nitrato no aquífero (CESARINO, 2002).

Cesarino (2002) também observou em suas pesquisas sobre métodos de mitigação da contaminação de aquíferos por nitrato, que vários tipos de materiais atuam como aceptores de elétrons, tais como: glucose, acetato, espartano, propanol, butanol, pantanol, glicol, ácido fórmico, melão e nata de leite. Já como barreiras reativas, este mesmo autor testou serragem, enxofre elementar, palha de aço e papel jornal, sendo as substâncias, metanol, etanol e o ácido acético as estudadas para esta finalidade.

3.5.2 Troca iônica

Este processo consiste na passagem de água contaminada por nitratos em um sistema *single-beb*, onde após sua entrada no sistema, é dividida em dois fluxos. Um com 25% da vazão inicial e o outro com 75% da vazão inicial. A vazão maior percorre as colunas de troca aniônica de bases fortes onde, após a saída, o efluente formado possui sais de cloreto (NaCl, MgCl, FeCl₂ etc.) dissolvidos na água devido à troca com a resina. Ao final do sistema, os dois fluxos, o tratado na resina e o outro não tratado se juntam e formam o produto final de descontaminação. Esta coluna é preenchida por produtos sintéticos (resinas com grupos funcionais neutralizados por ânions de bases fortes), provocando a liberação de hidroxilas, até a exaustão completa da resina (CESARINO, 2002).

3.5.3 Osmose reversa

O princípio da remoção dos íons neste método baseia-se na passagem forçada pela aplicação de pressão superior à osmótica, da água contaminada por uma membrana semipermeável, que filtra o íon nitrato. No entanto, o processo não é seletivo, pois remove muitos íons junto com o nitrato. Este método também apresenta sensibilidade à presença de componentes orgânicos, suspensos, partículas coloidais, variações no pH, exposição ao cloro e elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos, sendo necessário o pré-tratamento da água (CESARINO, 2002).

3.5.4 Eletrodialise

A eletrodialise tem por princípio a troca de íons utilizando uma membrana semipermeável. Os íons são atraídos pela aplicação de corrente elétrica para o anodo e retidos pelas membranas dispostas paralelamente ao fluxo de água e perpendicular ao fluxo da corrente. Para a sua realização são necessários: água pressurizada, membranas de troca aniônica e catiônica em sequência e uma fonte de corrente contínua de energia (CESARINO, 2002).

3.6 Estudos de casos

Pohling *et al* (1981) realizaram estudo qualitativo das águas de Fortaleza trabalhando com 65 poços. Concluíram que 95% das amostras são ricas em íons de cloro e, destas, 62% são águas Cloretadas e 33% representam mistura de íons de cloro e bicarbonato sendo, portanto, águas Cloretadas e Bicarbonatadas. Nos 5% restantes, o cloro aparece junto com íons de sulfatos, dando origem a águas Cloretadas e Sulfatadas. Em 45% das amostras existem concentrações de nitrato superior aos limites internacionais para a água potável segundo critérios do U.S. Public Health Authority.

Cavalcante (1998) traçou diretrizes para otimizar o manejo integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, apresentando fundamentos hidrogeológicos integrados ao uso e ocupação do meio físico. Trabalhou com mais de 1.400 análises físico-químicas e bacteriológicas, concluindo que a qualidade físico-química das águas subterrâneas é boa, não tendo problemas maiores em nível regional. Porém, localmente, existem elevadas concentrações de nitratos, cloreto e ferro, derivadas do ambiente hidrogeológico ou do uso inadequado e ocupação do meio físico. Em termos bacteriológicos existem problemas em função do uso e ocupação, associado aos problemas de falta de saneamento básico e não aplicação de cuidados quando na construção de poços, permitindo algumas vezes, a conexão com níveis superficiais poluídos.

Biasoli (2000) relata a qualidade da água do município de Fortaleza relacionando a contaminação do nível freático com a geração e perpetuação de muitas doenças de veiculação hídrica. Trabalhou com 909 análises de água subterrânea no ano de 2000 e constatou que 21% não eram poluídas, 26% apresentaram poluição não fecal e 53% apresentavam poluição fecal.

Quesado Junior (2001) analisou a qualidade das águas subterrâneas do município

de Fortaleza, relacionando-a com os problemas das doenças de veiculação hídrica acometidas pela população. A partir de 416 análises bacteriológicas, concluiu que 34% das águas eram potáveis e 66% não potáveis, apresentando contaminação por coliformes fecais, predominando as bactérias *Escherichia coli* (62%), *Pseudomonas sp* (16%) e *Klebsiella* (13%).

Melo (2008) mostrou as características hidrogeológicas e físico-químicas das águas subterrâneas dos bairros Joaquim Távora, Dionísio Torres e São João do Tauape, Fortaleza. Concluiu que 60% das amostras coletadas apresentaram valores de nitrato, ferro e pH acima do padrão de potabilidade, segundo a Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde.

Costa (2010) enfocou a qualidade das águas subterrâneas freáticas nos bairros Monte Castelo, Parquelândia, Alagadiço/São Gerardo e Vila Élery – Fortaleza, concluindo que 86% delas apresentaram concentrações elevadas para Fe^{+} e $N-NO_3^{-}$, superior ao Valor Máximo Permitido pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, que é de 10mg/L/ $N-NO_3$.

Silva Neto (2010) analisou as características físico-químicas das águas subterrâneas nos bairros Aerolândia, Engenheiro Luciano Cavalcante, Jardim das Oliveiras e Cidade dos Funcionários, no município de Fortaleza. Das 14 amostras analisadas, as concentrações iônicas acima dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde são referentes principalmente aos valores de nitrato (42%) e ferro (36%).

Araújo (2012) estudou, em Fortaleza, os aspectos hidroquímicos nos bairros Benfica, José Bonifácio, Fátima e Jardim América. As 12 análises físico-químicas realizadas apresentaram concentrações de dureza, sódio, cloreto, fluoreto e sulfato dentro dos padrões recomendados pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, com concentrações de turbidez (10 amostras), ferro (1 amostra), nitrito (1 amostra) e nitrato (8 amostras) fora dos padrões de potabilidade.

Oliveira (2012) avaliou a qualidade das águas subterrâneas nos bairros Montese, Vila União, Parreão, Bom Futuro e Damas, em Fortaleza. As 15 análises físico-químicas mostraram concentrações de dureza, cloreto, fluoreto, sódio, sulfato e nitrito dentro dos padrões de potabilidade recomendados pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, com algumas concentrações de turbidez (11 amostras), ferro (1 amostra), e nitrato (8 amostras) encontrando-se fora dos padrões de potabilidade.

Oliveira (2013) avaliou o crescimento urbano e o risco à poluição das águas subterrâneas freáticas no entorno da lagoa da Parangaba, Fortaleza. Concluiu que algumas

amostras apresentaram valores inadequados, como pH abaixo de 6, cloreto superior a 250 mg/L e nitrato com valores acima de 10 mg/L N-NO₃. Em todas as amostras existe a presença de bactérias do grupo dos Coliformes Fecais.

Gomes (2013) analisou a situação qualitativa das águas subterrâneas de Fortaleza, como subsídio à gestão dos recursos hídricos, a partir de 291 análises físico-químicas, concluindo que, 58% das amostras apresentam contaminação por nitrato e 77% se encontram contaminadas por coliformes totais e/ou fecais, de acordo com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011 do MS, onde segundo a autora, tais contaminações estão correlacionadas a construção de poços de forma inadequada sem adotar as normas técnicas da ABNT, cemitérios, aterros (lixões) inativos, posto de combustíveis, infiltração de águas superficiais contaminadas e ausência de saneamento básico em bairros de Fortaleza.

Lemos (2013) fez uma análise integrada dos efeitos da expansão urbana nas águas subterrâneas de Fortaleza, concluindo que, em virtude de uma rápida expansão urbana, principalmente em zonas de periferia onde ocorreu de forma inadequada, causou prejuízos a qualidade da água subterrânea, principalmente pela falta de saneamento básico, onde foi possível encontrar concentrações de nitrato nas águas subterrâneas 47% acima do valor máximo permitido (VMP) estabelecido pela Portaria nº 2.914/2011 do MS.

Dias (2016) procurou identificar a origem da contaminação dos recursos hídricos no Conselho de Salvaterra de Magos, em Portugal, concluindo que, das 18 amostras analisadas, 08 apresentavam concentrações de nitrato acima no limite estabelecido pela legislação portuguesa, porém, não conseguindo identificar com clareza a origem da contaminação por nitrato, mas ao analisar a atividade agrícola na região, prevê que a disseminação da contaminação por nitrato continuará, a menos que as práticas de gestão das atividades agrícolas e pecuárias sejam drasticamente alteradas.

Crespim (2017) avaliou a qualidade das águas subterrâneas rasas no distrito de Icoaraci - Pará, concluindo que, nas 15 amostras analisadas foram encontradas concentrações médias de nitrato de 17,91 mg/L N-NO₃ no período chuvoso e 28,43 mg/L N-NO₃ no período menos chuvoso e, sendo assim, em sua maioria, as águas captadas na área de pesquisa estão impróprias ao consumo humano de acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do MS.

Bezerra *et al* (2017) avaliaram a concentração de nitrato em águas subterrâneas da Região Metropolitana de Fortaleza - Ceará, por meio das análises em 37 amostras oriundas das cidades de Aquiraz, Caucaia, Pacatuba, Horizonte, Eusébio e Fortaleza, onde 37,8% das amostras estavam em desacordo com a Portaria nº 2.914/2011 do MS, sendo o déficit em esgotamento sanitário, apontado como uma das fontes de contaminação por nitrato das águas

subterrâneas.

Ward *et al* (2018) realizaram uma revisão bibliográfica sobre os riscos da ingestão de água contaminada por nitrato, onde além da metemoglobinemia infantil, 30 estudos indicam um aumento no risco de ocorrências de câncer intestinal, bexiga e tireoide. Porém os autores relatam que, o número de estudos bem desenhados de resultados de saúde individuais ainda é muito pequeno para desenhar conclusões firmes sobre o risco da ingestão de nitrato na água potável. Estudos adicionais que incorporam avaliação de exposição aprimorada para populações em PWS, exposição medida ou prevista para usuários de poços, quantificação de bactérias redutoras de nitrato e estimativas de fatores dietéticos e outros que afetem a nitrosação são necessários.

Piliggi *et al* (2021) elaboram um método usando o nitrato como indicador de contaminação das águas subterrâneas, sendo este método, aplicado em 10 municípios com poços que captam água do Sistema Aquífero Bauru. Sendo possível observar que, em áreas com redes de esgoto instaladas antes de 2001 e ocupação urbana superior a 60% da ocupação urbana nas zonas de captação, houve aumento na concentração de nitrato de pelo menos 35%.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Com o intuito de obter subsídios para o desenvolvimento desta pesquisa, a metodologia adotada seguiu uma ordem cronológica, sendo dividida em três etapas: Pré-Campo (pesquisa bibliográfica, elaboração do cadastro de poços e bases temáticas); Campo (atualização do cadastro, estado de conservação dos poços e coleta de amostras de águas subterrâneas (40) para análises físico-químicas), e; Pós-Campo (balanço hidroclimatológico, tratamento e integração dos dados obtidos nas etapas anteriores e análises físico-químicas realizadas).

4.1 Etapa pré-campo

Iniciou-se a partir do levantamento bibliográfico sobre a área de pesquisa, com a obtenção de dados referentes a geologia, hidrogeologia, qualidade das águas, impactos do nitrato nas águas subterrâneas destinadas ao consumo humano, aspectos socioeconômicos e geoambientais publicados em livros, monografias, dissertações, teses e publicações técnicas e em órgãos públicos, tais como a CPRM (Serviço Geológico do Brasil), onde foi realizada uma avaliação do cadastro de poços no banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) dispondo de 1.953 poços cadastrados, Laboratório de Hidrogeologia/DEGEO/CC/ Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foi obtido um arquivo de dados com 290 análises de águas realizadas no período de 2001 a 2016, FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará), CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Ceará), SRH (Secretaria de Recursos Hídricos), COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos) e IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), servindo esses dados para um melhor conhecimento das características da região, ajudando na elaboração das bases preliminares de trabalho.

4.2 Etapa de campo

As atividades de campo foram basicamente subdividida em duas, sendo a primeira realizada tendo como objetivo fazer um levantamento das características geoambientais presentes na área, localização, estado de conservação e uso dos poços, bem como identificar as potenciais fontes de contaminação, já a segunda etapa, realizada em agosto/2020 (mesmo

semestre das análises dos poços selecionados no arquivo de dados), teve como objetivo coletar 40 amostras de águas dos poços para a realização das análises químicas determinando as concentrações de cloreto, amônia, nitrato e nitrito.

A seleção dos poços a serem amostrados seguiu os critérios definidos preliminarmente, tais como a distribuição na área, uso das águas, acesso e a obtenção de análises qualitativas anteriores. Para a coleta, foram utilizadas garrafas plásticas de 500 mL (medidas de pH, STD, CE, nitrato, nitrito e cloreto) e garrafas de 20 mL (análise da amônia), esterilizadas, hermeticamente fechadas, etiquetadas (contendo dados relativos ao número do ponto amostrado, local, data e hora de coleta) e acondicionadas em caixas térmicas com gelo para, em seguida, serem encaminhadas ao Laboratório de Geoquímica Ambiental no Departamento de Geologia/CC/UFC, onde foram realizadas as análises físico-químicas. O nível estático das águas nos poços foi obtido utilizando-se um medidor eletro-sonoro Jacire, com alcance de 100 metros.

4.3 Etapa pós-campo

Esta etapa constou na compilação, uniformização e integração dos dados obtidos nas etapas anteriores, dando origem a uma base de dados sendo possível elaborar gráficos e mapas utilizando programas Excel, Surfer e ambiente SIG, permitindo assim, a identificação de possíveis fontes de contaminação de nitrato bem como sua ocorrência na área.

4.3.1 Avaliação da concentração de nitrato

Para a avaliação da evolução da concentração do nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza, foram comparados os resultados das análises físico-químicas atuais com as análises mais antigas do arquivo de dados do Laboratório de Hidrogeologia/DEGEO/CC/UFC (2001 a 2016), sendo estes avaliados conforme os padrões estabelecidos pela Portaria N° 888, de 4 de Maio de 2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os padrões de potabilidade da água destinados ao consumo humano (BRASIL, 2021).

A metodologia utilizada nas análises físico-químicas foi baseada no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 1998), sendo medidos ou analisados os seguintes íons e parâmetros: pH, condutividade elétrica (CE), nitrogênio amoniacal (N-NH_{3,4}), nitrato (NO₃⁻) e nitrito (NO₂⁻).

4.3.2 Bases temáticas

A cartografia temática foi desenvolvida em ambiente SIG, por meio da utilização de programas computacionais, sendo assim possível a elaboração de mapas de localização e distribuição dos poços na área, enquanto que para os mapas de zoneamento/isolinhas tendencial dos parâmetros físico-químicos e nível estático foi utilizado o método de interpolação de krigagem, baseado no princípio de que pontos próximos no espaço tendem a apresentar valores semelhantes, se comparados com os pontos mais afastados. Landim (1998) define krigagem como um procedimento exato de interpolação que leva em consideração todos os valores observados, e que pode ser a base para a cartografia automática por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área.

4.3.3 Balanço hidroclimatológico

A avaliação do balanço hidroclimatológico é de fundamental importância para se definir a disponibilidade hídrica de uma região, permitindo estabelecer diretrizes para a implementação de políticas de gestão deste recurso (HORIKOSHI; FISCH, 2007; SANTOS *et al*, 2010); no entanto, além da precipitação, deve-se admitir o retorno da água à atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas e, portanto, a água disponível no solo é proveniente da interação desses dois fatores.

Este método tem por objetivo estimar um saldo entre o aporte e a saída de água de um determinado sistema, sendo realizado por meio de um balanço de massa onde se torna possível, entre outras atividades, avaliar as variações anuais do nível estático (CASTANY, 1975). No caso dos aquíferos livres, o balanço mostra-se importante para o cálculo dos valores de precipitação pluviométrica que podem ser considerados como o volume de recarga dos aquíferos, conforme proposto em Lerner *et al* (1990), onde a recarga foi definida como o fluxo descendente de água que alcança o aquífero, gerando adição hídrica ao reservatório de água subterrânea.

4.3.3.1 Balanço hidroclimatológico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955)

Considerando-se as condições climáticas da área em estudo, adotou-se o Método de Thornthwaite e Mather e, segundo Vasconcelos (1996), este é o que melhor se adapta às

áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados, caso da área em tese.

O cálculo do balanço hídrico foi realizado com a aplicação da equação proposta por Thornthwaite e Mather (1955), sendo necessária a determinação dos seguintes parâmetros:

- T - temperatura média (°C);
- I - índice térmico (mm) com base na temperatura;
- K - fator de correção relacionado à latitude e insolação média mensal (os valores adotados para latitudes entre 15° norte e 37° sul estão apresentados no Quadro 1);
- ETP - evapotranspiração potencial (mm);
- PPT - precipitação (mm);
- ETR - evapotranspiração real (mm).

Para obtenção dos parâmetros necessários a este balanço, deve ser aplicada a seguinte Equação 1:

$$ETP = 16 (10T/I)^a \times K \quad \text{[Equação 1]}$$

Onde:

- ETP - evapotranspiração potencial (mm);
- T - temperatura média mensal em °C (referente ao período considerado);
- I - índice térmico anual;
- K - fator de correção que depende da latitude. A área de pesquisa encontra-se associada à latitude 5°S, onde os valores para a correção utilizados estão apresentados em destaque no Quadro 1 (em destaque valores utilizados nesta pesquisa)

O índice térmico anual (I) é calculado pela Equação 2:

$$I = \sum_{i=1}^{12} I_i \quad \text{Em que: } I_i = (T_i/5)^{1,5} \quad \text{[Equação 2]}$$

Onde:

- T_i - temperatura média de cada mês do ano;
- i - índice térmico mensal, que varia de 1 a 12 e somados dão o índice térmico anual (I).

Para a obtenção do termo “a”, parâmetro obtido em função do índice térmico, sendo dado pela Equação 3:

$$a = 0,49239 + (1792 \times 10^{-5} I) - (771 \times 10^{-7} + I^2) + (675 \times 10^{-9} I^3) \quad \text{[Equação 3]}$$

Como parte da metodologia adotada, considera-se que a evapotranspiração real é

menor ou igual à evapotranspiração potencial ($ETR \leq ETP$). Para o cálculo da evapotranspiração real é necessário estabelecer as relações com as taxas de precipitação, da seguinte forma:

- Se $PPT > ETP$ então $ETR = ETP$
- Se $PPT < ETP$ então $ETR = PPT$

Quadro 1 - Fatores de K para correção da evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite, latitude entre 15° norte e 37° sul

LAT.	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
15°N	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10°N	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,05	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5°N	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
EQ	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°S	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°S	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°S	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°S	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°S	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°S	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°S	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,84	1,00	1,13	1,16	1,24
35°S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
36°S	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
37°S	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

Fonte: Villela, 1975

Para o balanço hidroclimatológico é necessário se estabelecer o valor da capacidade de armazenamento do solo (CA), sendo este arbitrado considerando-se as características físicas dos solos. Segundo Castany (1975), solos arenosos apresentam uma capacidade de retenção de 50 mm e solos argilosos de 200 mm. Na ausência de valores medidos utilizou-se, aqui, o valor de 100 mm como sendo o valor de CA.

Então, a ETR é determinada para cada um dos meses do ano, considerando-se a

retenção de água no solo CA, as médias mensais de precipitação PPT e os valores de ETP, calculados para a série de anos utilizada na determinação das médias mensais de precipitação e temperatura. Com a ETR e a PPT chega-se a uma estimativa para a infiltração estimada (Ie) que corresponde à quantidade da água de precipitação disponível para a recarga subterrânea.

4.3.3.2 Postos pluviométricos

Segundo a FUNCEME (2021), em Fortaleza existem 09 postos pluviométricos, porém apenas 04 (Números 311, 362, 363 e 364) apresentam séries históricas passíveis de utilização, com dados referentes ao período de 1976 à 2022. Os demais postos encontram-se desativados ou com grandes falhas em suas séries históricas, inviabilizando a utilização de seus dados, conforme descrito no Quadro 2.

Como os postos pluviométricos não registram dados de temperatura, os mesmos foram estimados pelo Método de Regressão Linear, por meio do programa CELINA (versão 1.0), desenvolvido pelo Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará, que utiliza as coordenadas e altitude dos postos pluviométricos estimando, assim, a média anual da temperatura.

Quadro 2 - Postos pluviométricos no município de Fortaleza - Ceará

POSTO	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO	STATUS ATUAL
Água Fria	311	560335	9580940	1999 à 2022	Ativo
Castelão	362	550090	9578262	1988 à 2022	Ativo
Pici	363	546269	9585495	1990 à 2022	Ativo
Messejana	364	557954	9576225	1986 à 2022	Ativo
Aeroporto	365	553668	9583649	1988 à 2008	Desativado
Cocó	622	557375	9587368	1995 à 2000	Desativado
Mondubim	720	546725	9578156	2005 à 2009	Desativado
Parquelândia	726	548117	9587336	2008	Desativado
Defesa Civil	761	549684	958658	2012 à 2015	Desativado

Fonte: FUNCEME, 2022

4.3.3.3 Polígonos de Thiessen

Para determinar a área de influência dos postos pluviométricos e, consequentemente, as características da área de estudo, foi utilizado o Método dos Polígonos de Thiessen. Tal método é usado para calcular a precipitação média de uma determinada

superfície, sendo atribuído um fator de peso, definido a partir das áreas de influência dos postos pluviométricos existentes na região, aos totais precipitados medidos em cada um desses postos.

A metodologia proposta por Thiessen (1911) consiste em:

- ✓ Unir os postos pluviométricos por trechos retilíneos;
- ✓ Traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos sobre a mediatriz da linha que liga os postos;
- ✓ Alongar as linhas perpendiculares até encontrar outra mediatriz;

O polígono de Thiessen é formado pela interseção das linhas das matrizes, correspondendo à área de influência de cada posto pluviométrico.

A área de influência possui um peso perante a área total, sendo calculada a partir da equação 4.

$$w_i = \frac{A_i}{A} \quad \text{[Equação 4]}$$

Onde:

- W_i - É o fator de peso;
- A_i - Área de influência da estação;
- A - Área total da bacia hidrográfica/área de estudo.

A precipitação média é calculada a partir da Equação 5.

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad \text{[Equação 5]}$$

Onde:

- P - Precipitação média na bacia/área (mm);
- P_i - Precipitação na estação;
- A_i - Área de interseção entre o polígono i e a bacia hidrográfica;
- A - Área total da bacia/área de estudo.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A análise das condições naturais do ambiente é de fundamental importância para o desenvolvimento de estudos hidrogeológicos, onde a interação entre as diversas características ambientais se reflete diretamente na disponibilidade, qualidade hídrica e no comportamento dos sistemas aquíferos.

5.1 Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), o clima do município de Fortaleza é do tipo Tropical Chuvoso (AW'), com forte irregularidade de precipitação ao longo do ano, é quente e apresenta regime de chuvas tropicais com alternância de episódios secos e úmidos ao longo do ano.

Segundo Fenzl (1988), fatores climáticos tais como precipitação, evapotranspiração, variações de temperatura etc, influenciam consideravelmente na química das águas subterrâneas, através de processos de diluição, concentração ou aumento da solubilidade.

Os dados climatológicos obtidos junto a FUNCEME (2023), com os postos pluviométricos da área de pesquisa, serão abordados no item 6.1.1 desta Tese.

5.2 Solos

Os solos originais do município de Fortaleza encontram-se substancialmente degradados devido à expansão urbana, porém, segundo o IPECE (2021) ocorrem os Argissolos, Gleissolos e Neossolos.

Os Argissolos compreendem solos constituídos por material mineral que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixas ou com caráter alumínico. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas e, mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila de A para Bt, forte a moderadamente ácidos, com saturação por bases alta ou baixa, predominantemente caulínícos e com relação Ki, em geral, variando de 1,0 a 3,3 (EMBRAPA, 2018).

Os Gleissolos compreendem solos minerais, hidromórficos que apresentam horizonte Glei imediatamente abaixo dos horizontes A ou B. Se encontram permanente, ou periodicamente, saturados por água, salvo se artificialmente drenados. São solos formados principalmente a partir de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódicos excesso d'água. Comumente, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia, podendo formar-se também em área de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos, como também em materiais residuais em áreas abaciadas e depressões (EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos compreendem solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso que não apresenta alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem (como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica), seja em razão da influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos (EMBRAPA, 2018).

5.3 Vegetação

De acordo com a Síntese Diagnóstica do Município da Prefeitura de Fortaleza (2001 *apud* TAJRA, 2001), as unidades vegetacionais são caracterizadas e classificadas conforme o Complexo Vegetacional Litorâneo do Município em vegetação pioneira, mata a retaguarda de dunas, vegetação de tabuleiro, vegetação de mangue vegetação ribeirinha, vegetação aquática e vegetação antrópica.

A *Vegetação pioneira* é encontrada em declives suaves das dunas, como espécies heliófitas herbáceas (Figura 03). Ocorrem desde a Praia das Goiabeiras, passando pela Praia do Futuro até próximo ao rio Cocó e a Lagoa da Sabiaguaba (litoral leste a oeste da orla de Fortaleza). Os principais representantes são: capim-barba-de-bode (*Remireae Marítima Aubi*); oró (*Phaseolus Panduratus Mart*) e salsa-praia (*Ipomea pés-caprae Roth*).

Figura 03: Vestígios de vegetação pioneira localizada nas dunas da Praia do Futuro, Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9584690/560517)

A *Mata a retaguarda de dunas* ocorre por trás das cristas de dunas distribuídas na faixa paralela ao mar, no litoral leste da área (Praia do Futuro e Sabiaguaba) (Figura 04). As principais representações são: quima-quina (*Coutarea Hexandra Schum*); João-mole (*Pisonia sp*); jucá (*Caesalpina ferra Mart*); juazeiro (*Zizyphus Joazene Mart*) e jurema-preta (*Mimosa Acutistipula Bentn*).

Figura 04: Mata a retaguarda de dunas localizada na Sabiaguaba (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9581904/562561)

Referente a *Vegetação de tabuleiro litorâneo*, a ocupação urbana provocou a descaracterização da fisionomia vegetal desta subunidade, sendo encontradas somente algumas manchas em áreas do Campus do Pici/UFC (Figura 05), Mondubim, Água Fria e partes leste e sul de Fortaleza. Os principais representantes são: cajueiro (*Anarcadium Occidentale*); Angelim-da-praia (*Guettard Platypoda DC*) e caraíba (*Tabebuia Caraíba Bur*).

Figura 05: Vestígios de tabuleiro litorâneo localizada no Campus do Pici/UFC (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9586372/547292)

Em relação a *Vegetação de mangue*, existem três grandes áreas de mangue no município e que ocorrem relacionados aos rios Ceará, Cocó e Pacoti (Figura 06). Os principais representantes são: mangue ratinho (*Conocarpus Erecta Linn*); mangue vermelho (*Rhizpopnora Mangle Linn*) e mangue canoé (*Avicennia Nítida Jacq*).

Figura 06: Vegetação de mangue localizado na Sabiaguaba, Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9581904/562561)

A *Vegetação ribeirinha* ocorre no baixo curso dos rios Ceará e Cocó representando o substrato arbóreo, dominado pela carnaúba (*Copernicia Cerifera Mart*); mulungu (*Erythrina Velutine Wild*); juazeiro (*Zizyphus Joazene Mart*) e oitica (*Licania Rígida Benth*).

A *Vegetação aquática* ocorre na maioria das lagoas da área, assumindo um papel fundamental no equilíbrio ecológico do ambiente lacustre. Os principais representantes são: aguapé (*Eichornia Azurea Kunt*), bistorna (*polygomun Acre*) e canudo (*Ipomea Clarinicaibir Robinson*) (Figura 07).

Figura 07: Vegetação aquática localizada no Campus do Pici/UFC (Açude Santo Anastácio) (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9586523/547298)

A *Vegetação antrópica* representa a cobertura vegetal do município que teve o homem como vetor de origem, constituindo extensas mangueiras, coqueiros e cajueiros (Figura 08). Tal vegetação pode ser observada em diversos setores de Fortaleza, nos canteiros centrais das principais avenidas da cidade (BR 116, Aldy Mentor), à medida em que os mesmos foram ocupados e a vegetação natural foi substituída.

Figura 08: Vegetação antrópica (Carnaubeiras) localizada na Praia do Futuro – Fortaleza, Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9584743/561371)

5.4 Geomorfologia

O município de Fortaleza apresenta um relevo predominantemente plano, com altitude média de 26 metros, e algumas elevações isoladas no âmbito das dunas costeiras (Praias do Futuro e Barra do Ceará), serrote do Ancuri (sudoeste de Messejana) e morro do Caruarú (limite leste), sendo constituído basicamente por Planície Litorâneas e Glacis Pré-Litorâneos, cujos limites sofrem a influência da homogeneidade das formas de relevo, altimetria, estrutura geológicas e das características do solo e vegetação (OLIVEIRA, 2012).

A Planície Litorânea apresenta altitudes inferiores a 100 metros e compreende os campos de Dunas (Praia do Futuro, Cidade 2000 e Barra do Ceará), praias (orla costeira do município) e as planícies flúvio-marinhas (associadas aos estuários dos rios Cocó, Ceará e Pacoti/Precabura). As dunas constituem cordões quase contínuos paralelos a linha de costa, sendo interrompidos em alguns locais por cursos d'água, planícies fluviais (associadas aos rios Cocó, Ceará e Pacoti), flúvio-marinha e pela Formação Barreiras (Ponta do Mucuripe) (GOMES, 2013).

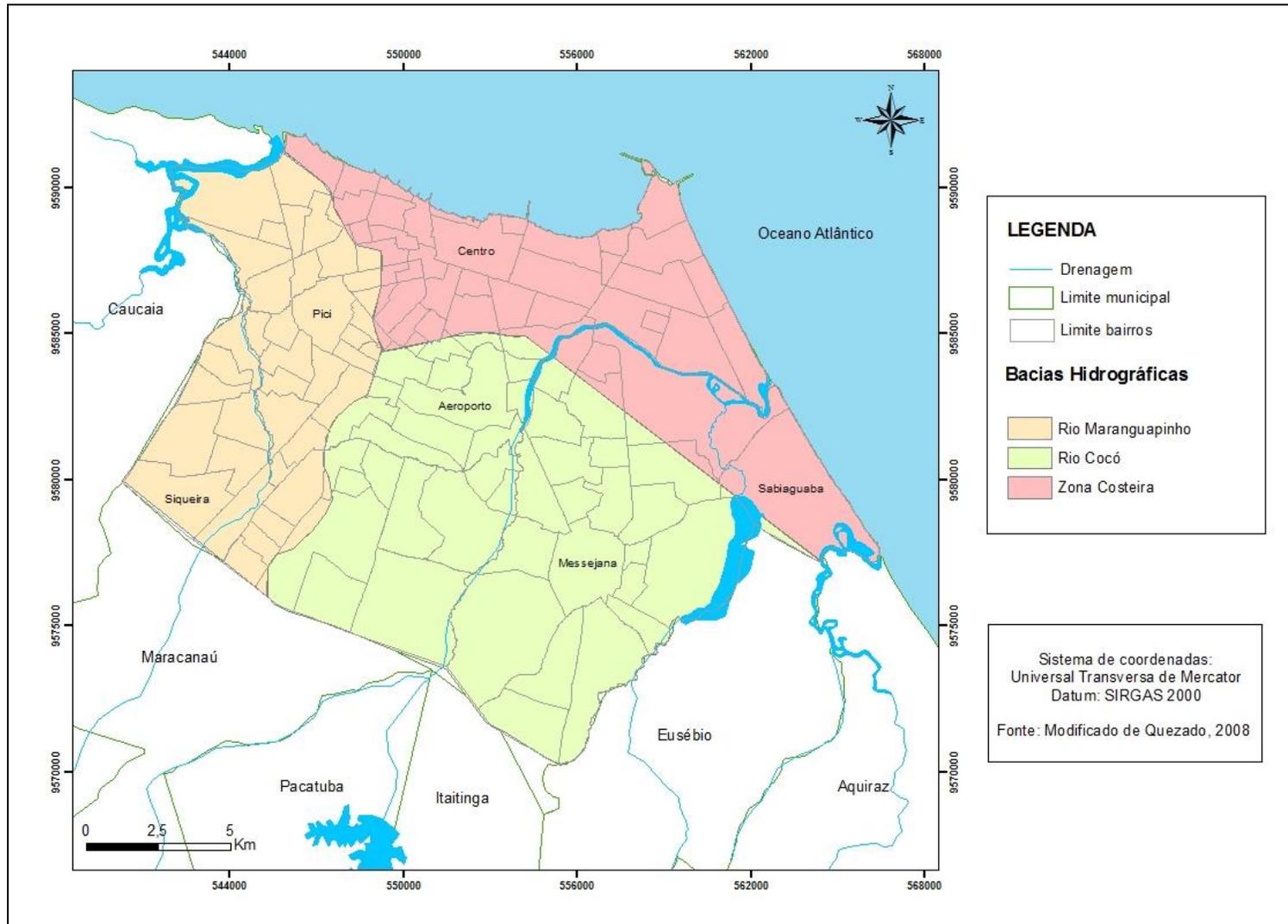
Os Glacis Pré-Litorâneos são formados pelos sedimentos pré-litorâneos Barreiras e representam a mais típica superfície de agradação do território cearense, que se caracterizam por uma superfície plana com relevos dissecados por vales alongados e de fundos chatos, com cotas altimétricas baixas, geralmente inferiores a 50 metros, e suave inclinação em direção ao mar. Apresentam-se como uma faixa de largura variável acompanhando a linha de costa, sobrepostos pelos depósitos eólicos antigos e atuais.

5.5 Hidrografia

A rede hidrográfica do município de Fortaleza é caracterizada por cursos fluviais de pequeno porte e intermitentes, mas de importância relevante no abastecimento das populações ribeirinhas, salvo aquelas que moram próximas ao mar.

As principais bacias hidrográficas que ocorrem no município de Fortaleza são as da Vertente Marítima (zona costeira) e as dos rios Cocó e a do Maranguapinho, já os seus rios de maior porte são Cocó, Ceará, Maranguapinho, Pacoti e Coaçu (QUESADO JUNIOR, 2008) (Figura 09).

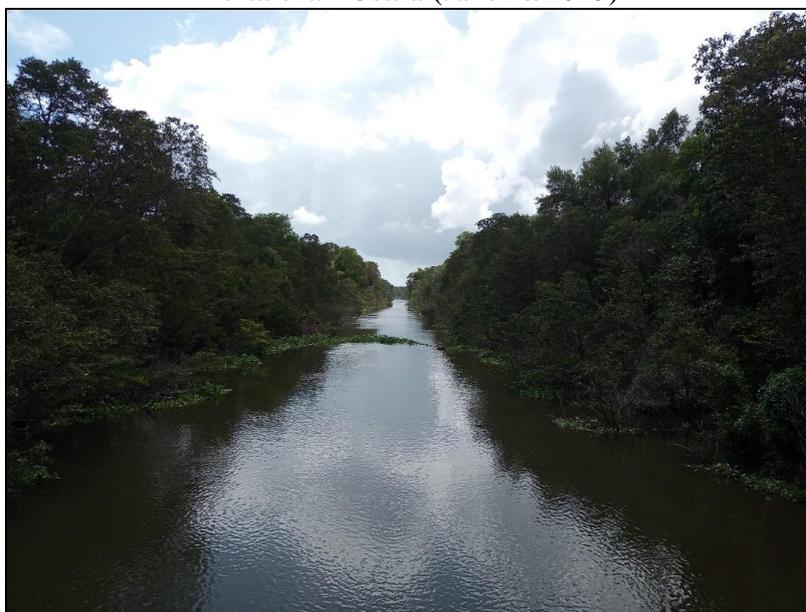
Figura 09 - Bacias hidrográficas do município de Fortaleza, Ceará



A Bacia da Vertente Marítima compreende a faixa localizada entre as desembocaduras dos rios Cocó e Ceará, tendo as lagoas do mel e os riachos Jacarecanga, Pajeú e Maceió-Papicu como principais lagoas (GOMES, 2013).

A Bacia do rio Cocó nasce na Serra da Pacatuba, com um percurso total de 45 km, sendo 25 km atravessando o município de Fortaleza (Figura 10). Representa o principal recurso hídrico superficial da área e tem como elementos macrodrenantes secundários principais as lagoas, riachos e açudes, a exemplo das lagoas da Parangaba, Maraponga, Opaia, Itaoca, Ancuri, Lagoa Grande, Lagoa Redonda, Sapiranga e Coité, do rio Coaçu; riacho da Sapiranga; Açudes Guarani I, Jangurussu, Osmani Machado, Precabura, Uirapuru, Traira e Fernando Macedo (PDD, 1998 *apud* Tajra, 2001). No rio Cocó está localizado um dos principais reservatórios do Sistema de Abastecimento de Água Bruta da Região Metropolitana de Fortaleza, o Açude Gavião, cuja Sub-bacia Hidrográfica possui 99,35 km², correspondente a 33% da área total da bacia, e é responsável pelo abastecimento da Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada próxima ao açude, na localidade de Ancuri (GOMES, 2013).

Figura 10: Rio Cocó próximo ao bairro Edson Queiroz, Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)

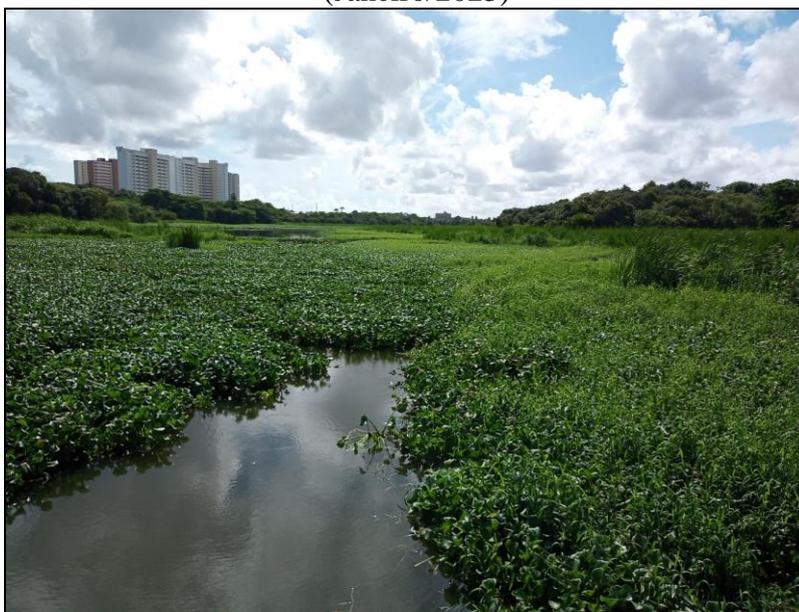


Fonte: Autor. (Coord.: 9585042/557419)

A Bacia do rio Maranguapinho corresponde a uma faixa norte-sul do município, indo de um local próximo a foz do rio Ceará, até o bairro Siqueira. O rio Maranguapinho nasce na Serra de Maranguape e percorre 42 km, dos quais 15 km são em Fortaleza; possui 09 afluentes, 05 açudes e 09 lagoas, além de alguns mananciais de

menor expressão e sem nenhuma denominação oficial. Dentre os principais elementos drenantes desta bacia, estão os riachos correntes dos Açudes João Lopes e da Agronomia (Santo Anastácio) (Figura 11), e a Lagoa do Mondubim (GOMES, 2013).

Figura 11: Açude Santo Anastácio, eutrofizado. UFC/Pici (Janeiro/2023)

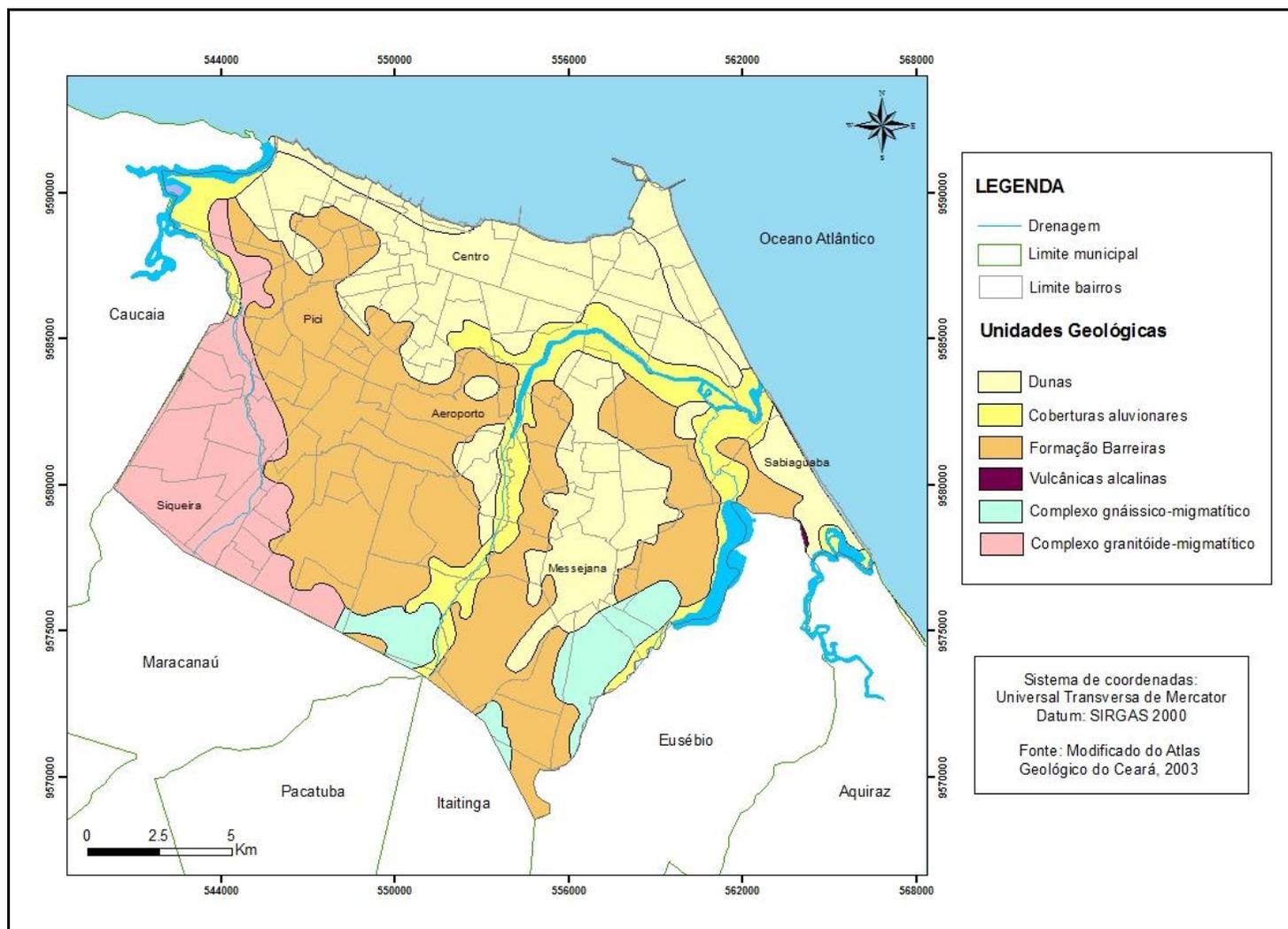


Fonte: Autor. (Coord.: 9586523/547298)

5.6 Geologia

No município de Fortaleza, a caracterização geológica é dada principalmente pela ocorrência de sedimentos Cenozóicos (Terciário, Tercio-Quaternário e Quaternário) e rochas pré-cambrianas, com a unidade geológica sedimentar cobrindo aproximadamente 80% da área, enquanto a cristalina ocorre em 20% (Figura 12).

Figura 12 - Distribuição litológica no município de Fortaleza, Ceará



5.6.1 Pré-cambriano

Sendo localmente subaflorantes, as rochas do Pré-cambriano ocorrem ao sudoeste do município, representadas por litotipos do Complexo Granitoide-Migmatítico, e nas porções sul e sudeste onde ocorrem os de natureza gnaísse-migmatítica com provável posicionamento estratigráfico relacionado ao final do Proterozóico Inferior, pertencentes ao Complexo Caicó (BRANDÃO, 1995).

Na porção centro-leste à sudeste da área, e próximo à foz do rio Pacoti, foi cartografado um corpo circular sob a forma de *neck* ou *plug*, de composição vulcânica alcalina denominado de Morrote Cararu (ALMEIDA, 1958 *apud* BRANDÃO, *op. cit.*) (Figura 13). Associado a este evento ocorrem, ainda, os diques alcalinos que, com restrita representatividade ao sul do município, são constituídos por veios de sílica, pegmatitos e microgranitos filoneados.

Figura 13: Neck Vulcânico localizado próximo a foz do rio Pacoti, Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9578178/563993)

5.6.2 Cenozóico

No município de Fortaleza, ocorrem quatro tipos diferentes de sedimentos Cenozóicos, sendo eles:

✓ Formação Barreiras: ocorrem em ampla faixa acompanhando a linha de costa, atrás dos sedimentos eólicos antigos e atuais, e que penetram em direção ao interior do município,

com espessura variando de 20 a 50m (BRANDÃO, 1995). Litologicamente é constituída por sedimentos areno-argilosos, pouco ou não litificados, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, com horizontes conglomeráticos e níveis lateríticos (Figura 14). Tais níveis não apresentam cota definida e podem estar associados à percolação de água subterrânea que lixivia o elemento ferro, concentrando-o em determinados níveis (CAVALCANTE, 1998).

Figura 14: Nível conglomerático com cimento ferruginoso da Formação Barreiras, próximo a foz do rio Pacoti, Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9578178/563993)

✓ Coberturas Colúvio-Eluviais: ocorrem no extremo sul e sudoeste da área como depósitos de material residual do intemperismo *in situ* das rochas Pré-cambrianas, podendo também apresentar, localmente, um pequeno deslocamento gravitacional. Os sedimentos inconsolidados que repousam discordantemente sobre os sedimentos Barreiras representam depósitos eólicos antigos e mais oxidados que as dunas recentes. Estão localmente encobertos por aluviões, quando o nível de erosão provocado pelas drenagens assim permite, localizados na foz do rio Pacoti e nas salinas do rio Cocó (GOMES, 2013).

✓ Depósitos Flúvio-Aluvionares e de Mangues: Estão representados por depósitos sedimentares compostos por areias, cascalhos, siltes e argilas com, ou sem, matéria orgânica e compreendem sedimentos fluviais, lacustres e estuários recentes. Ao longo dos trechos onde a drenagem é congruente a fraturas e falhas, com destaque aos trechos do rio Maranguapinho, os depósitos constituem estreitas faixas formadas por sedimentos de granulometria grosseira. Nas planícies de inundação os sedimentos apresentam uma constituição mais fina. Nos estuários, ou nos ambientes de planície flúvio-marinhas formam-se depósitos silte-argilosos,

ricos em matéria orgânica que sustentam uma vegetação de mangue, destacando-se as áreas de mangues associados aos rios Cocó e Pacoti (GOMES, 2013) (Figura 15).

Figura 15: Vegetação de mangue as margens do rio Cocó, Sabiaguaba. Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 95781929/562426)

✓ Dunas: estão dispostas como cordões contínuos que ocorrem paralelamente a linha de costa, assemelhando-se a espigões longitudinais na porção NE da área e de contorno irregular do tipo “*seif*” na foz do rio Cocó. Possuem uma largura média de 01 km e espessuras variando entre 08 e 15 metros, podendo chegar até 30 metros. O cordão de dunas atinge 1,6 km de largura na porção oeste da área, faixa compreendida entre a Ponta do Mucuripe e a foz do rio Pacoti (Figura 16). Os contatos com a geração de dunas mais antigas da unidade sotoposta ocorrem de modo abrupta, embora, por vezes, os sedimentos eólicos recentes podem ser encontrados capeando diretamente os sedimentos Barreiras. Nesta faixa é observado o fenômeno do aumento do nível estático das águas subterrâneas e a secagem das areias devido o constante trabalho eólico. Neste contexto, são enquadrados as “*Beach rocks*” encontrados ao longo das praias de Sabiaguaba, Abreulândia e foz do rio Pacoti (MORAIS, 1984).

Figura 16: Dunas localizada na Sabiaguaba. Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9581704/562283)

5.7 Hidrogeologia

Á área de estudo é caracterizada pela ocorrência de dois sistemas hidrogeológicos: Poroso Clástico e Fraturado (Fissural), sendo o primeiro formado por sedimentos não consolidados extremamente friáveis (Aquífero Aluvionar e Dunas) ou por litotipos sedimentares menos friáveis (Aquífero Barreiras) e apresentam porosidade e permeabilidade intergranulares primárias. Por sua vez, o Sistema Fraturado (Aquífero Fissural) engloba os litotipos ígneos e metamórficos (rochas cristalinas), suas porosidade e permeabilidade são secundárias, fraturas, e o armazenamento e circulação da água ocorre ao longo de fraturas interconectadas (CAVALCANTE, 1998).

5.7.1 *Aquífero Aluvionar*

Este sistema ocorre em 38,55 km² (12,25%) do município de Fortaleza, sendo caracterizado como um aquífero livre que se desenvolveu ao longo das margens das linhas de drenagens. É formado por sedimentos quaternários de granulometrias variadas, desde cascalhos até argilas, eventualmente associados à matéria orgânica. Sua espessura varia de pequena a média, com nível estático em torno de 02 metros e a água é captada por poços com profundidade moderada, onde a máxima é de 15 metros (CAVALCANTE, 1998).

Devido à mobilidade dos leitos dos rios e as constantes variações de velocidade de

sedimentação das partículas sólidas, os sedimentos aluvionares possuem características texturais muito variadas, o que produz grande heterogeneidade na distribuição das propriedades hidráulicas (MANOEL FILHO, 2008).

De acordo com Cavalcante (1998), em nível de RMF, são poucos os poços que captam água desse sistema hidrogeológico, salvo exceções em determinadas comunidades que as utilizam captando suas águas através de poços escavados (cacimbas). Em Fortaleza, praticamente todas as águas do Aquífero Aluvionar encontram-se poluídas, haja vista que todos os rios e riachos de Fortaleza são verdadeiros esgotos a céu aberto, à mercê da intensa poluição antrópica engendrada por despejos de efluentes líquidos, integração com lagoas totalmente poluídas ou drenagens que margeiam lixões urbanos, a exemplo do rio Cocó que margeia o Lixão de Jangurussu, atualmente desativado mas que continua liberando chorume para as águas do Cocó. A recarga desse aquífero se faz por infiltração pluvial direta sobre as áreas aflorantes e/ou por drenagem influente, que durante o período de estiagem, passa a funcionar como exutórios, além da evapotranspiração.

5.7.2 Aquífero Dunas

O conjunto de dunas foi considerado, para efeito de estudo, como um aquífero único que engloba Dunas e Paleodunas, recebendo a designação de Aquífero Dunas, em função das características litológicas e hidrodinâmicas similares dos corpos dunares fixos e móveis, impossibilitando uma nítida distinção (MORAIS, 2011).

Este sistema ocorre em 99,40 km² (31,58%) do município de Fortaleza, sendo caracterizado como um aquífero livre que existe bordejando a orla do município de Fortaleza (Figura 17) onde, localmente, adentra ao continente na porção leste e oeste, mais precisamente nas praias do Futuro e Barra do Ceará. Formado por sedimentos quaternários, composto por areias quartzosas de granulação fina a média, diâmetro efetivo de 0,15 a 0,25 mm, bem selecionadas, com intercalações ocasionais de níveis silte-argilosos a argilosos e espessura variando de 15 a 25 metros. Segundo Cavalcante (1998), esse sistema é caracterizado com dupla função hidrogeológica, podendo funcionar tanto como aquífero principal ou como aquífero de transferência para as unidades sotopostas, isto é, ele pode assumir a função de reservatório onde por meio da infiltração vertical descendente irá recarregar a unidade aquífera inferior que, no caso da área de estudo, corresponde ao Aquífero Barreiras.

Figura 17: Antiga bateria de poços da CAGECE que captava água do Aquífero Dunas na região da praia da Abreulândia, litoral leste de Fortaleza - Ceará (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9579347/564674)

5.7.3 Aquífero Barreiras

O Barreiras, no contexto regional, não é considerado por muitos autores como um aquífero, e sim aquitarde, já que possui porosidade e permeabilidade baixas e condutividade hidráulica estimada em $1,8 \times 10^{-6}$ m/s (BIANCHI *et al*, 1984). Porém, no município de Fortaleza, apresenta características de aquífero, com grande variação de fácies, espessura variando de 20 a 60 metros e apresentando intercalações diferenciadas de níveis silto-argilo-arenosos, que condicionam esta formação a ter diferentes parâmetros hidrodinâmicos (permeabilidade, porosidade e transmissividade), tanto vertical quanto horizontalmente, com os níveis arenosos representando os principais em termos de vocação aquífera. Em relação a área de ocorrência, no município de Fortaleza o aquífero Barreiras corresponde ao de maior extensão, com $121,40 \text{ Km}^2$ (38,56%) (CAVALCANTE, 2008).

Segundo Cavalcante (1998), os poços que se encontram inseridos neste sistema, em nível de RMF, possuem nível estático predominantemente inferior a 15 metros, com mínimo de 1,0m, máximo de 35m e média de 8,6m. Possui espessura média saturada de 15 metros e suas águas são captadas por poços com profundidades variando entre 40 a 60 metros. As vazões predominantes são inferiores a $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$, porém, localmente podem apresentar vazões bem superiores, com máxima de $17,6 \text{ m}^3/\text{h}$ e média de $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Existem poços secos neste contexto, em função dos níveis extremamente síltico-argilosos que ocorrem neste

sistema. Como exutórios naturais, o Aquífero Barreiras tem, de modo geral, a rede de drenagem e as lagoas; já como exutórios artificiais tem-se os poços tubulares que captam água desse sistema.

5.7.4 Domínio hidrogeológico Cristalino (Fraturado)

No município de Fortaleza, esse sistema ocorre em 55,45 km² (17,61%), correspondendo aos litotipos formados por rochas ígneas e metamórficas do embasamento Pré-Cambriano. A formação de aquíferos nessa unidade, ocorre por meio de acúmulo de água nas zonas de fraturas interconectadas e, segundo Cavalcante (1998), a caracterização de terrenos cristalinos como aquíferos depende da ocorrência de estruturas rúpteis, abertas e interconectadas com a zona de recarga. Devido à ausência quase total de porosidade e condutividade hidráulica primária, em alguns casos este sistema pode ser definido como aquífugo.

Em estudo hidrogeológico na RMF, Cavalcante (1998) identificou que os poços inseridos nesse sistema apresentam profundidade predominantemente de 50 a 60 metros, podendo atingir até 80 metros; o nível estático oscila entre 0,7 a 15 metros e o rebaixamento entre 5,0 e 35 metros, dependendo do tipo de equipamento utilizado para o teste de produção e do tempo de bombeamento, enquanto as vazões são em torno de 2 m³/h e a capacidade específica inferior a 1,00 [(m³/h)/m].

A análise de 101 fichas de poços construídos sob o acompanhamento da CPRM no Projeto Fortaleza (MORAIS, 1984), confirma a tendência desse valor de vazão para o município de Fortaleza, com exceção dos poços localizados nos bairros Conjunto Palmeiras (Sul) e Granja Portugal (Oeste), onde as vazões atingiram até 12 m³/h. A recarga desse sistema ocorre pela infiltração direta da água da chuva ou, indiretamente, através das coberturas aluvionares dos rios Ceará, cocó, Maranguapinho e Pacoti (GOMES, 2013).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são abordados os resultados do tratamento dos dados coletados na área de pesquisa, tais como; os postos pluviométricos refletidos no balanço hidroclimatológico, qualidade das águas subterrâneas, uso e ocupação do solo, saneamento básico e riscos à saúde da população.

6.1 Postos pluviométricos

No município de Fortaleza existem 4 postos com séries históricas passíveis de serem utilizados, com dados de precipitação de 1976 à 2022, enquanto que em relação a temperatura os postos pluviométricos não registram esta informação, sendo necessário estimá-las pelo Método de Regressão Linear utilizando-se o programa CELINA (versão 1.0).

6.1.1 Precipitação

A precipitação pluviométrica é fundamental para o estudo do clima, sendo considerado o elemento de maior importância na definição do quadro climático nas regiões semiáridas e sub-úmidas, tendo como características mais relevantes a quantidade e a frequência. Cerca de 70% da quantidade de água precipitada sobre a superfície terrestre retorna à atmosfera pelos efeitos da evaporação/evapotranspiração.

A evaporação corresponde ao processo físico no qual um líquido ou sólido passa ao estado gasoso devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Além da radiação solar, outras variáveis como temperatura do ar, vento e pressão de vapor, também interferem na evaporação, principalmente em superfícies hídricas livres. A evapotranspiração é considerada como a perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas.

A quantificação desses processos é utilizada na resolução de problemas que envolvem o manejo das águas, a exemplo, de previsão de cheias e na construção de reservatórios (cálculos das perdas de água em reservatórios, cálculo da necessidade de irrigação, aplicação de balanços hídricos para a obtenção do rendimento hídrico em bacias hidrográficas, abastecimento urbano etc.).

De acordo com as séries históricas dos postos pluviométricos localizados na área de estudo, podemos observar que para o posto pluviométrico Nº 311, localizado no bairro

Água Fria, apresenta uma precipitação atmosférica média anual de 1.482,11 mm/ano, com a menor precipitação mensal registrada em outubro, com 0,87mm, e a maior precipitação ocorrendo em abril, com 369,81mm (Quadro 3).

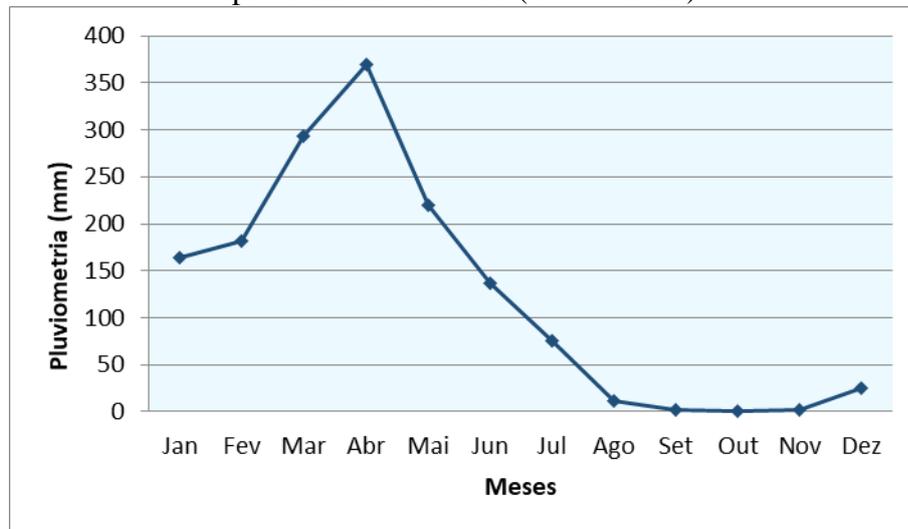
Quadro 3: Média mensal da precipitação atmosférica (mm) do posto pluviométrico N° 311 (1999 à 2022)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
163,7	182,07	293,55	369,81	219,42	136,65	75,99	11,46	1,42	0,87	1,38	25,79

Fonte: Funceme, 2023

Em nível sazonal, as maiores precipitações atmosféricas são observadas entre janeiro a junho, com média mensal de 227,53mm e total acumulado de 1.365,2mm, o que equivale a 92,11% da precipitação atmosférica anual; o período de julho a dezembro apresenta as menores médias mensais, com apenas 19,48mm (Figura 18).

Figura 18: Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 311 (1999 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

O posto pluviométrico N° 362 (Castelão) apresenta uma precipitação atmosférica média anual de 1.337,89mm/ano, sendo a menor precipitação mensal registrada em novembro, com 6,37mm, enquanto a maior precipitação, ocorre em abril, com 351,15mm (Quadro 4).

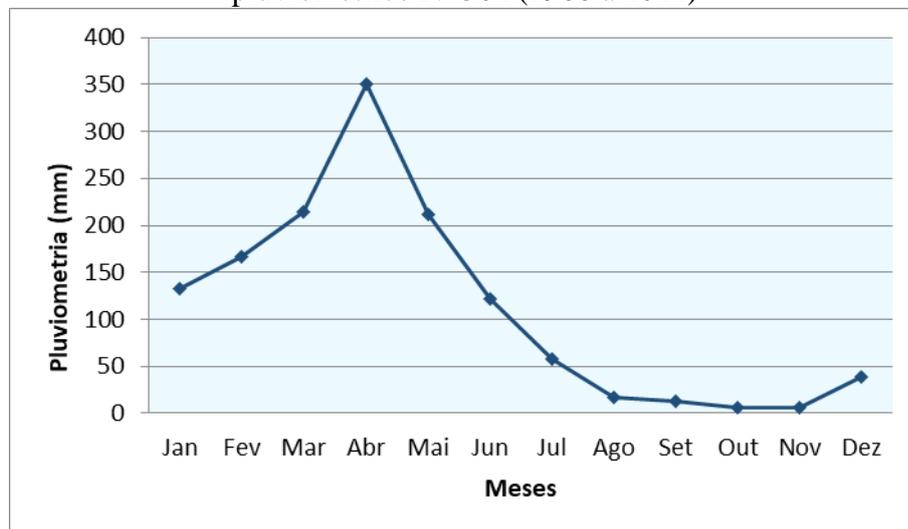
Quadro 4: Média mensal da precipitação atmosférica (mm) do posto pluviométrico N° 362 (1988 à 2022)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
133,04	166,53	214,7	351,15	211,23	122,23	57,35	16,95	13,4	6,68	6,37	38,26

Fonte: Funceme, 2023

Em nível sazonal, as maiores precipitações atmosféricas são observadas entre janeiro a junho, com média mensal de 199,81mm e total acumulado de 1.198,88mm, o que equivale a 89,61% da precipitação atmosférica anual, e o período de julho a dezembro apresenta as menores médias mensais, com apenas 23,17mm (Figura 19).

Figura 19: Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 362 (1988 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

O posto pluviométrico N°363 (bairro Pici) apresenta uma precipitação atmosférica média anual de 1.487,05mm/ano, sendo a menor precipitação mensal registrada em novembro, com 6,3mm, enquanto a maior precipitação, ocorre em abril, com 357,04mm (Quadro 5).

Quadro 5: Média mensal da precipitação atmosférica (mm) do posto pluviométrico N° 363 (1990 à 2022)

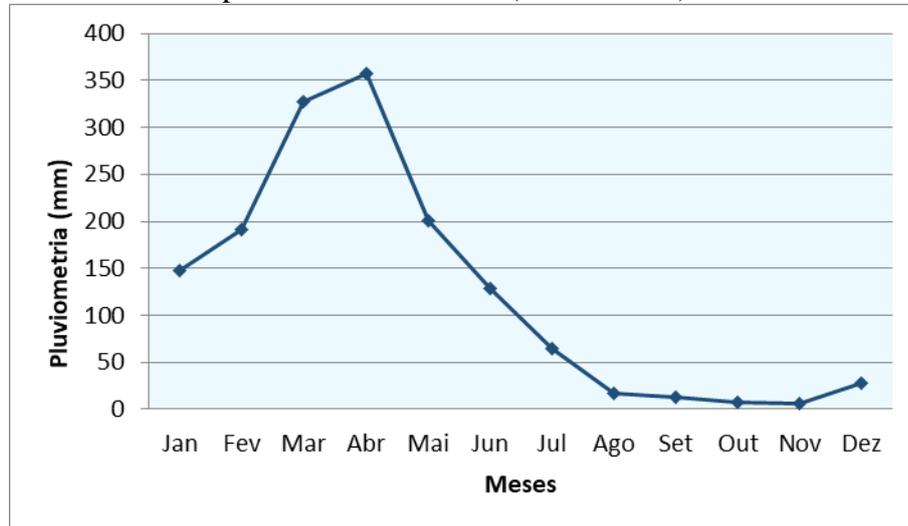
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
147,96	190,75	326,89	357,04	201,11	128,19	64,72	16,7	12,84	7,24	6,3	27,31

Fonte: Funceme, 2023

Em nível sazonal, as maiores precipitações atmosféricas são observadas entre janeiro a junho, com média mensal de 225,32mm e total acumulado de 1.351,94mm, o que

equivale a 90,91% da precipitação atmosférica anual; entre julho a dezembro se tem as menores médias mensais, com apenas 25,52mm (Figura 20).

Figura 20: Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 363 (1990 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

O posto pluviométrico N° 364 (Messejana) apresenta uma precipitação atmosférica média anual de 1.260,265mm/ano, sendo a menor precipitação mensal registrada em outubro, com 2,34mm, enquanto a maior precipitação, ocorre em abril, com 309,91mm (Quadro 6).

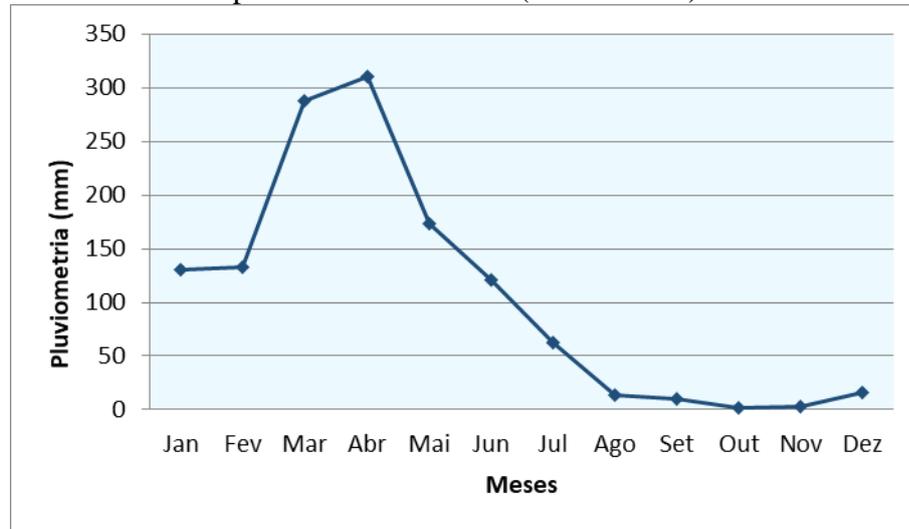
Quadro 6: Média mensal da precipitação atmosférica (mm) do posto pluviométrico N° 364 (1986 à 2022)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
130,74	132,51	288,19	309,91	172,79	120,51	62,11	13,22	9,53	2,34	2,79	15,62

Fonte: Funceme, 2023

Em nível sazonal, as maiores precipitações atmosféricas são observadas entre janeiro a junho, com média mensal de 192,44mm e total acumulado de 1.154,65mm, o que equivale a 91,62% da precipitação atmosférica anual, já entre julho a dezembro apresentam as menores médias mensais, com apenas 17,6mm (Figura 21).

Figura 21: Média mensal da precipitação atmosférica do posto pluviométrico N° 364 (1986 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

6.1.2 Temperatura

Para o posto pluviométrico N° 311 (Água fria), a temperatura média anual foi estimada em 27,05°C, com uma amplitude térmica de apenas 1,6°C ao longo do ano, sendo a menor temperatura registrada no mês de julho, com 26,1°C, enquanto a maior se refere a janeiro, com 27,7°C (Quadro 7).

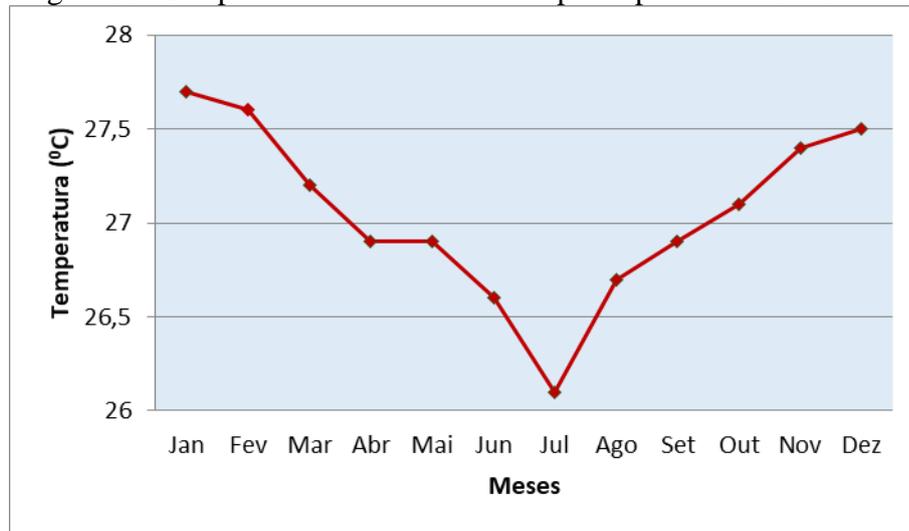
Quadro 7: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 311

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
27,7	27,6	27,2	26,9	26,9	26,6	26,1	26,7	26,9	27,1	27,4	27,5

Fonte: CELINA, 2023

O período com as menores temperaturas ocorre entre abril a setembro, com média mensal de 26,68°C, enquanto as maiores ocorrem entre outubro e março, com média mensal de 27,42°C (Figura 22).

Figura 22: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 311



Fonte: Elaborado a partir de CELINA, 2023

Para o posto pluviométrico N° 362 (Castelão), a temperatura média anual foi estimada em 26,93°C, com uma amplitude térmica de apenas 1,6°C ao longo do ano, sendo a menor temperatura registrada em julho, com 26°C, já a maior temperatura foi registrada em janeiro, com 27,6°C (Quadro 8).

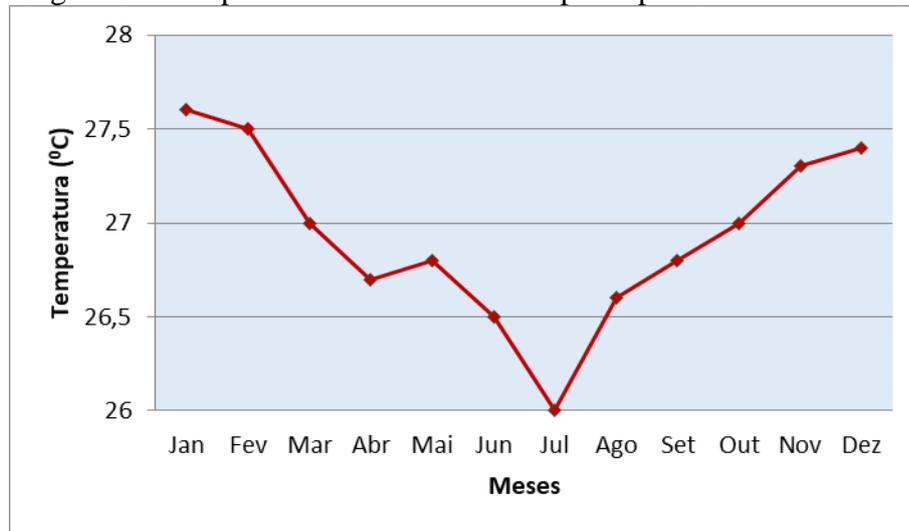
Quadro 8: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 362

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
27,6	27,5	27	26,7	26,8	26,5	26	26,6	26,8	27	27,3	27,4

Fonte: CELINA, 2023

O período com as menores temperaturas, ocorre entre abril a setembro, com médias mensais de 26,57°C, já as maiores temperaturas ocorrem entre outubro a março, com médias mensais de 27,3°C (Figura 23).

Figura 23: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N°362



Fonte: Elaborado a partir de CELINA, 2023

Para o posto pluviométrico N° 363 (Pici), a temperatura média anual foi estimada em 26,9°C, com uma amplitude térmica de apenas 1,6°C ao longo do ano, sendo a menor temperatura registrada em julho, com 26°C, e a maior temperatura foi em janeiro, com 27,6°C (Quadro 9).

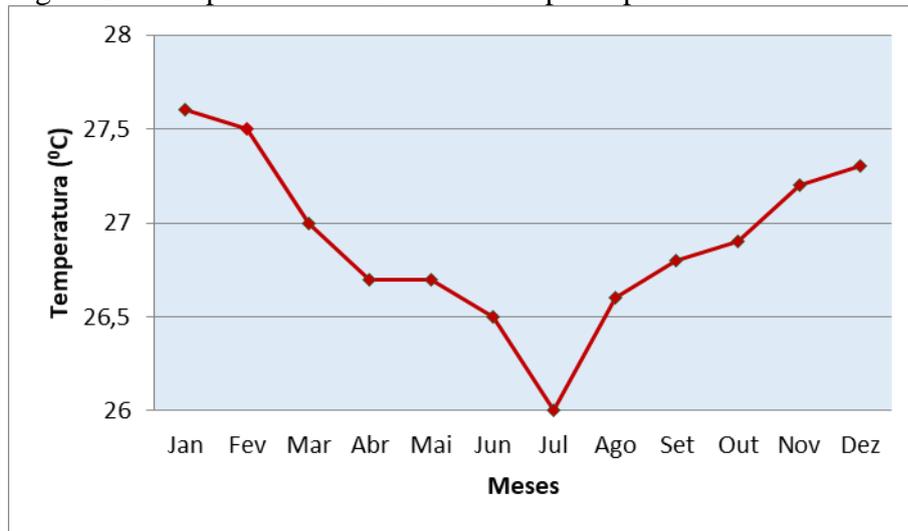
Quadro 9: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 363

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
27,6	27,5	27	26,7	26,7	26,5	26	26,6	26,8	26,9	27,2	27,3

Fonte: CELINA, 2023

O período com as menores temperaturas ocorre entre abril a outubro, com médias mensais de 26,6°C, já as maiores temperaturas ocorrem entre novembro a março, com médias mensais de 27,32°C (Figura 24).

Figura 24: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 363



Fonte: Elaborado a partir de CELINA, 2023

Para o posto pluviométrico N° 364 (Messejana), a temperatura média anual foi estimada em 26,87°C, com uma amplitude térmica de apenas 1,7°C ao longo do ano, sendo a menor temperatura em julho, com 25,9°C, e a maior temperatura em janeiro, com 27,6°C (Quadro 10).

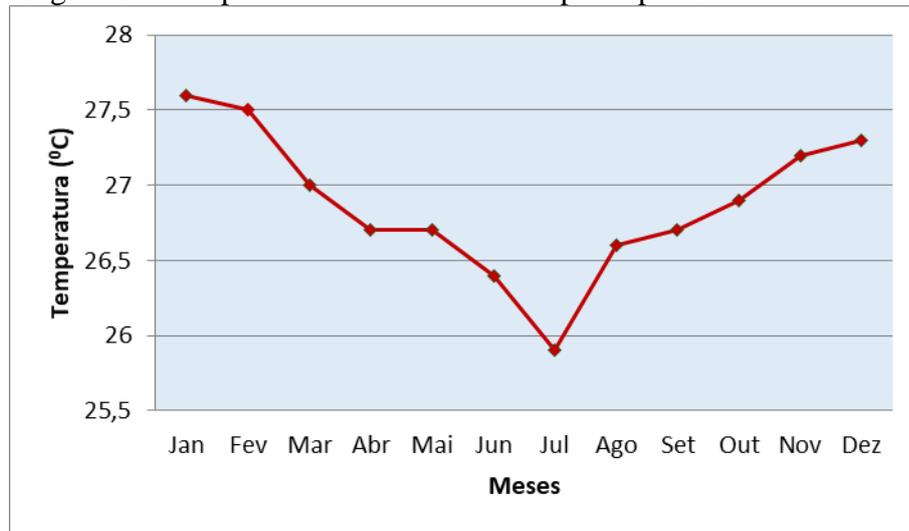
Quadro 10: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N° 364

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
27,6	27,5	27	26,7	26,7	26,4	25,9	26,6	26,7	26,9	27,2	27,3

Fonte: CELINA, 2023

As menores temperaturas ocorrem entre abril a outubro, com médias mensais de 26,56°C, já as maiores temperaturas ocorrem entre novembro a março, com médias mensais de 27,32°C (Figura 25).

Figura 25: Temperatura média mensal do posto pluviométrico N°364



Fonte: Elaborado a partir de CELINA, 2023

De acordo com os dados de temperatura estimados para cada posto pluviométrico, observou-se que a área de estudo ocorre uma baixa amplitude térmica, sendo praticamente constante ao longo do ano, sendo esta característica típica de zona tropical.

6.2 Balanço hidroclimatológico

A elaboração do cálculo do balanço hidroclimatológico é de fundamental importância em estudos qualitativos da água subterrânea, já que, em períodos chuvosos os agentes poluidores tentam a ser diluídos, tendo conseqüentemente, suas concentrações reduzidas, pois nesse período ocorrem as recargas dos aquíferos, já em períodos de estiagem, essa concentração tende a aumentar. Nesta pesquisa as análises foram realizadas apenas no período de estiagem, isso ocorreu, pois as análises selecionadas do arquivo de dados que foram utilizadas para comparação com as análises atuais também foram realizadas no período de estiagem.

O cálculo do balanço hidroclimatológico da área teve como base a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), sendo aplicado para os 04 postos pluviométricos de Fortaleza, onde foi possível estimar a quantidade de água que naturalmente entra e sai do sistema aquífero.

Segundo o balanço hídrico, calculado para o posto pluviométrico N° 311 (Água Fria), anualmente ocorre uma infiltração média estimada de 384,24mm/ano, sendo o que a infiltração ocorre de março a junho (Quadro 11).

Quadro 11: Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°311 (1999 - 2022)

Mês	PPT (mm)	T média (oC)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	163,7	27,7	13,040	1,06	166,47	-2,77	0	163,7	0
Fev	182,07	27,6	12,969	0,95	147,18	34,89	34,89	147,18	0
Mar	293,55	27,2	12,688	1,04	152,50	141,05	100	152,50	75,94
Abr	369,81	26,9	12,479	1	140,64	229,17	100	140,64	229,17
Mai	219,42	26,9	12,479	1,02	143,46	75,96	100	143,46	75,96
Jun	136,65	26,6	12,271	0,99	133,48	3,17	100	133,48	3,17
Jul	75,99	26,1	11,926	1,02	128,04	-52,05	47,95	75,99	0
Ago	11,46	26,7	12,340	1,03	140,85	-129,39	0	11,46	0
Set	1,42	26,9	12,479	1	140,64	-139,22	0	1,42	0
Out	0,87	27,1	12,618	1,05	151,85	-150,98	0	0,87	0
Nov	1,38	27,4	12,828	1,03	155,26	-153,88	0	1,38	0
Dez	25,79	27,5	12,899	1,06	161,99	-136,20	0	25,79	0
Total	1482,11	-	151,02	-	1762,37	-	482,84	997,88	384,24

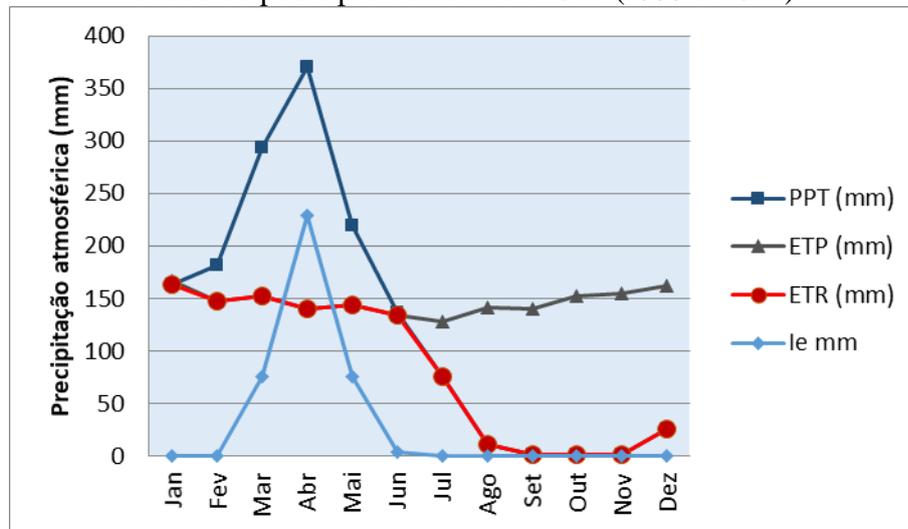
Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; T = Temperatura; I = Índice térmico mensal; K = Fator de correção que depende da latitude do lugar; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real e Ie = Infiltração estimada.

De acordo com o gráfico do balanço hidroclimatológico (Figura 26), observa-se que, entre fevereiro a junho, a precipitação atmosférica é superior a evapotranspiração real, pois neste período ocorrem os maiores índices pluviométricos promovendo, assim, a recarga do aquífero.

Entre julho a dezembro ocorrem baixas precipitações atmosféricas, promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real que, nesse período, praticamente se iguala a precipitação atmosférica, resultando em uma situação em que toda a água precipitada é evaporada.

Figura 26: Representação gráfica do balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°311 (1999 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; ETP = Evapotranspiração potencial, ETR = Evapotranspiração e Ie = Infiltração estimada

De acordo com o balanço hidroclimatológico calculado para o posto pluviométrico N°362 (Castelão), anualmente ocorre uma infiltração média estimada de 271,26mm/ano, sendo que a infiltração ocorre apenas de abril e maio (Quadro 12).

Quadro 12: Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°362 (1988 - 2022)

Mês	PPT (mm)	T média (oC)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	133,04	27,6	12,969	1,06	164,26	-31,22	0	133,04	0
Fev	166,53	27,5	12,899	0,95	145,24	21,29	21,29	145,24	0
Mar	214,7	27	12,548	1,04	148,49	66,21	87,5	148,49	0
Abr	351,15	26,7	12,340	1	136,96	214,19	100	136,96	201,69
Mai	211,23	26,8	12,409	1,02	141,66	69,57	100	141,66	69,57
Jun	122,23	26,5	12,202	0,99	131,85	-9,62	90,38	122,23	0
Jul	57,35	26	11,858	1,02	126,54	-69,19	21,19	57,35	0
Ago	16,95	26,6	12,271	1,03	139,11	-122,16	0	16,95	0
Set	13,4	26,8	12,409	1	138,88	-125,48	0	13,40	0
Out	6,68	27	12,548	1,05	149,92	-143,24	0	6,68	0
Nov	6,37	27,3	12,758	1,03	153,25	-146,88	0	6,37	0
Dez	38,26	27,4	12,828	1,06	159,87	-121,61	0	38,26	0
Total	1337,89	-	150,04	-	1736,04	-	420,36	966,64	271,26

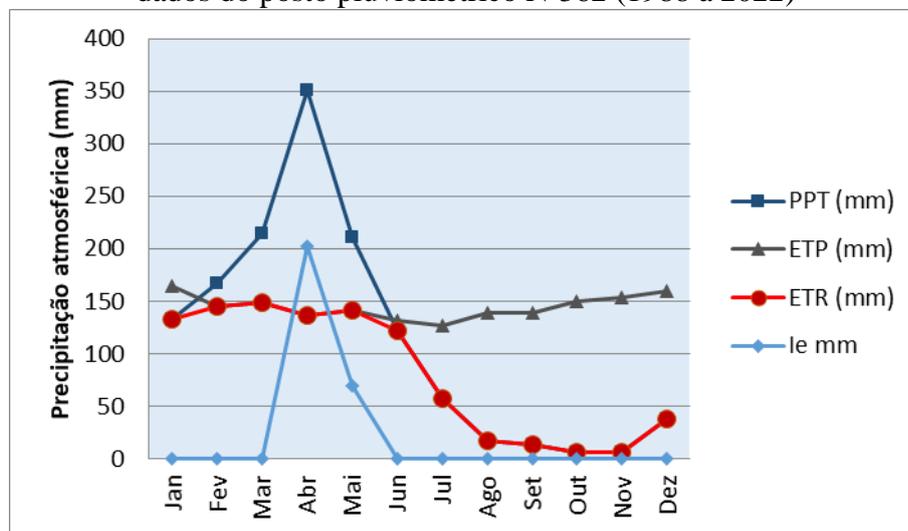
Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; T = Temperatura; I = Índice térmico mensal; K = Fator de correção que depende da latitude do lugar; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real e Ie = Infiltração estimada.

De acordo com o gráfico do balanço hidroclimatológico (Figura 27), observa-se que, entre fevereiro a maio, a precipitação atmosférica é superior a evapotranspiração real, pois neste período ocorrem os maiores índices pluviométricos, promovendo, assim, a recarga do aquífero.

Entre junho a dezembro ocorrem baixas precipitações atmosféricas, promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real, que nesse período, praticamente se iguala a precipitação atmosférica, resultando em uma situação em que toda a água precipitada é evaporada.

Figura 27: Representação gráfica do balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°362 (1988 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; ETP = Evapotranspiração potencial, ETR = Evapotranspiração e Ie = Infiltração estimada

De acordo com o balanço hidroclimatológico calculado com os dados do posto pluviométrico N°363 (Pici), anualmente ocorre uma infiltração média estimada de 405,22mm/ano, com o período de infiltração ocorrendo de março a maio (Quadro 13).

Quadro 13: Balanço hidroclimatológico dos dados do posto pluviométrico N°363 (1990 - 2022)

Mês	PPT (mm)	T média (oC)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	147,96	27,6	12,969	1,06	164,27	-16,31	0	147,96	0
Fev	190,75	27,5	12,899	0,95	145,25	45,50	45,5	145,25	0
Mar	326,89	27	12,548	1,04	148,54	178,35	100	148,54	123,85
Abr	357,04	26,7	12,340	1	137,02	220,02	100	137,02	220,02
Mai	201,11	26,7	12,340	1,02	139,76	61,35	100	139,76	61,35
Jun	128,19	26,5	12,202	0,99	131,91	-3,72	96,28	128,19	0
Jul	64,72	26	11,858	1,02	126,63	-61,91	34,37	64,72	0
Ago	16,7	26,6	12,271	1,03	139,18	-122,48	0	16,70	0
Set	12,84	26,8	12,409	1	138,94	-126,10	0	12,84	0
Out	7,24	26,9	12,479	1,05	147,92	-140,68	0	7,24	0
Nov	6,3	27,2	12,688	1,03	151,20	-144,90	0	6,30	0
Dez	27,31	27,3	12,758	1,06	157,74	-130,43	0	27,31	0
Total	1487,05	-	149,76	-	1728,36	-	476,15	981,83	405,22

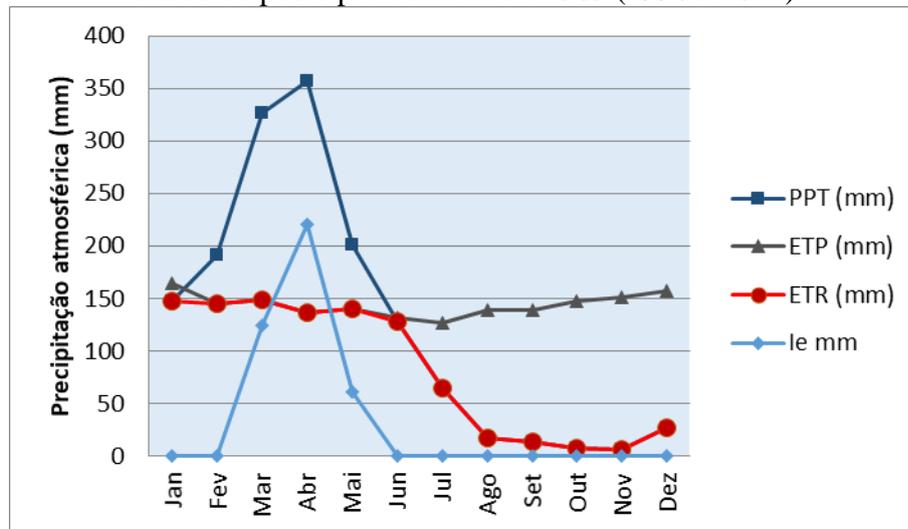
Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; T = Temperatura; I = Índice térmico mensal; K = Fator de correção que depende da latitude do lugar; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real e Ie = Infiltração estimada.

De acordo com o gráfico do balanço hidroclimatológico (Figura 28), observa-se que, entre fevereiro a maio, a precipitação atmosférica é superior a evapotranspiração real, pois neste período ocorrem os maiores índices pluviométricos, promovendo, assim, a recarga do aquífero,

Entre junho a dezembro ocorrem baixas precipitações atmosféricas, promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real, que nesse período, praticamente se iguala a precipitação atmosférica, resultando em uma situação em que toda a água precipitada é evaporada.

Figura 28: Representação gráfica do balanço hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°363 (1990 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; ETP = Evapotranspiração potencial, ETR = Evapotranspiração e Ie = Infiltração estimada

De acordo com o balanço hídrico, calculado para o posto pluviométrico N°364 (Messejana), anualmente ocorre uma infiltração média estimada de 245,46mm/ano, sendo que a ocorre de março a maio (Quadro 14).

Quadro 14: Balanço Hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°364 (1986 - 2022)

Mês	PPT (mm)	T média (oC)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	130,74	27,6	12,969	1,06	164,28	-33,54	0	130,74	0
Fev	132,51	27,5	12,899	0,95	145,26	-12,75	0	132,51	0
Mar	288,19	27	12,548	1,04	148,57	139,62	100	148,57	39,62
Abr	309,91	26,7	12,340	1	137,06	172,85	100	137,06	172,85
Mai	172,79	26,7	12,340	1,02	139,80	32,99	100	139,80	32,99
Jun	120,51	26,4	12,133	0,99	130,13	-9,62	90,38	120,51	0
Jul	62,11	25,9	11,789	1,02	124,90	-62,79	27,59	62,11	0
Ago	13,22	26,6	12,271	1,03	139,23	-126,01	0	13,22	0
Set	9,53	26,7	12,340	1	137,06	-127,53	0	9,53	0
Out	2,34	26,9	12,479	1,05	147,95	-145,61	0	2,34	0
Nov	2,79	27,2	12,688	1,03	151,22	-148,43	0	2,79	0
Dez	15,62	27,3	12,758	1,06	157,76	-142,14	0	15,62	0
Total	1260,26	-	149,55	-	1723,24	-	417,97	914,81	245,46

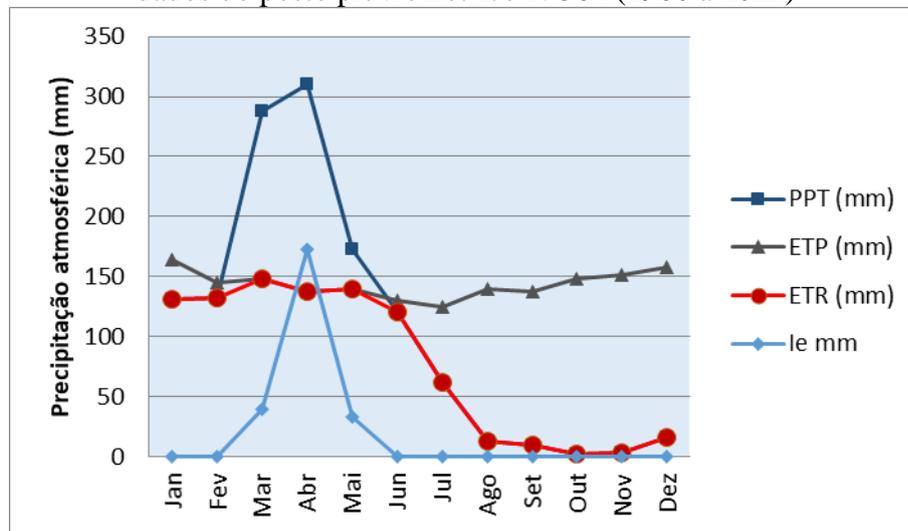
Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; T = Temperatura; I = Índice térmico mensal; K = Fator de correção que depende da latitude do lugar; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real e Ie = Infiltração estimada.

De acordo com o gráfico do balanço hidroclimatológico (Figura 29), observa-se que, entre março a maio, a precipitação atmosférica é superior a evapotranspiração real, pois neste período ocorrem os maiores índices pluviométricos, promovendo, assim, a recarga do aquífero.

Observa-se que entre junho a dezembro ocorrem baixas precipitações atmosféricas, promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real, que nesse período, praticamente se iguala a precipitação atmosférica, resultando em uma situação em que toda a água precipitada é evaporada.

Figura 29: Representação gráfica do balanço hidroclimatológico com dados do posto pluviométrico N°364 (1986 à 2022)



Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Legenda: PPT = Precipitação; ETP = Evapotranspiração potencial, ETR = Evapotranspiração e Ie = Infiltração estimada

6.2.1 Polígonos de Thiessen

A metodologia de distribuição de precipitação segundo os Polígonos de Thiessen permite aplicação sem maiores complicações ao realizar a formação de polígonos regulares equipotenciais com relação a distribuição geográfica e a pluviometria. No entanto, a informação pluviométrica requer para sua execução somente a distribuição espacial não uniforme das estações meteorológicas.

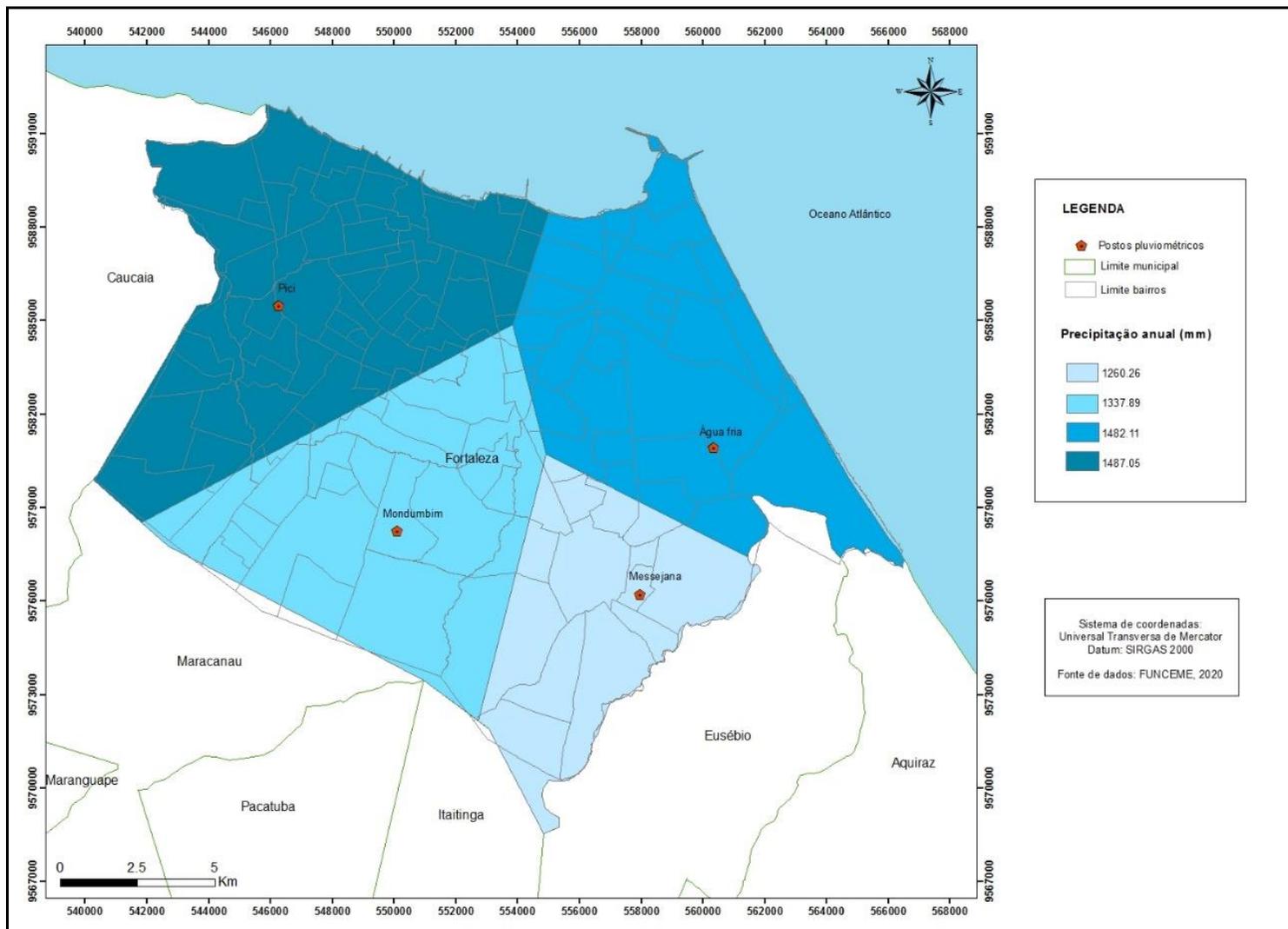
A distribuição da pluviometria foi caracterizada a partir de 04 postos pluviométricos localizados na área (Quadro 15). Os dados utilizados foram dispostos por meio dos Polígonos de Thiessen para melhor representar espacialmente esse processo. Os polígonos foram, aqui, produzidos por meio do software Qgis (Figura 30).

Quadro 15: Dados utilizados para a distribuição da precipitação da área de estudo

POSTO PLUVIOMÉTRICO	LATITUDE	LONGITUDE	PRECIPITAÇÃO (mm/ano)
311 (Água Fria)	9580940	560335	1.482,11
362 (Castelão)	9578262	550090	1.337,89
363 (Pici)	9585495	546269	1.487,05
364 (Messejana)	9576225	557954	1.260,26

Fonte: FUNCEME, 2023

Figura 30: Área de influências dos posto pluviométrico em Fortaleza - CE, de acordo com os Polígonos de Thiessen



Analisando a Figura 30, podemos observar que a área onde ocorre as maiores precipitações corresponde a área de influência do posto pluviométrico 363 (Pici), abrangendo a região nordeste e sudoeste do município.

Levando em consideração a área de influência que cada posto exerce na área, podemos observar que com relação a precipitação atmosférica, Fortaleza possui média anual de 1.410,11 mm/ano (Quadro 16).

Quadro 16: Média anual da precipitação atmosférica em Fortaleza - CE, levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos pelos Polígonos de Thiessen

POSTO PLUVIOMÉTRICO	ÁREA DE INFLUÊNCIA (km ²)	ÁREA DE INFLUÊNCIA (%)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA (mm/ano)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA PONDERADA (mm/ano)
311 (Água Fria)	82,12	26,18	1.482,11	388,02
362 (Castelão)	81,82	26,07	1.337,89	348,79
363 (Pici)	98,97	31,54	1.487,05	469,01
364 (Messejana)	50,89	16,21	1.260,26	204,29
TOTAL				1.410,11

Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Em relação a temperatura, levando em consideração a área de influência que cada posto exerce na área, Fortaleza apresenta uma temperatura média anual de 26,93°C (Quadro 17).

Quadro 17: Média anual da temperatura de Fortaleza levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos

POSTO PLUVIOMÉTRICO	ÁREA DE INFLUÊNCIA (km ²)	ÁREA DE INFLUÊNCIA (%)	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (°C)	TEMPERATURA MÉDIA PONDERADA (°C anual)
311 (Água Fria)	82,12	26,18	27,05	7,08
362 (Castelão)	81,82	26,07	26,93	7,02
363 (Pici)	98,97	31,54	26,9	8,48
364 (Messejana)	50,89	16,21	26,87	4,35
TOTAL				26,93

Fonte: Elaborado a partir de CELINA, 2022

Já em relação a parcela de infiltração, levando em consideração a área de influência que cada posto exerce na área, Fortaleza possui uma taxa de infiltração média anual de 338,91mm (Quadro 18).

Quadro 18: Média anual da infiltração estimada de Fortaleza levando em consideração o raio de influência dos postos pluviométricos

POSTO PLUVIOMÉTRICO	ÁREA DE INFLUÊNCIA (km ²)	ÁREA DE INFLUÊNCIA (%)	Ie MÉDIA ANUAL (mm)	Ie MÉDIA PONDERADA (mm/ano)
311 (Água Fria)	82,12	26,18	384,24	100,59
362 (Castelão)	81,82	26,07	271,26	70,72
363 (Pici)	98,97	31,54	405,22	127,81
364 (Messejana)	50,89	16,21	245,46	39,79
TOTAL				338,91

Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2023

Analisando o cálculos do balanço hidroclimatológico dos 04 postos pluviométricos presentes na área, associada a metodologia dos polígonos de Thiessen, pode-se observar que o posto 363 (Pici) localizado na porção noroeste do município de Fortaleza, apresenta o maior precipitação anual e conseqüentemente o maior valor da infiltração estimada porém, não necessariamente representaria a área onde ocorre a maior infiltração, pois isso vai depender de fatores como, geologia da área e nível de urbanização. Levando em consideração esses fatores, a área no município de Fortaleza que apresenta melhores condições para a infiltração corresponde a porção nordeste, área de influência do Posto 311 (Água Fria), sendo a geologia da área representada predominantemente por campos dunas e zonas aluvionares, além de apresentar menor índice de urbanização.

6.3 Qualidade das águas subterrâneas

Em se tratando do aproveitamento dos recursos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos, o aspecto qualitativo é tão ou mais importante que o aspecto quantitativo, principalmente quando a água captada é destinada ao consumo humano, pois não adianta se ter água em abundância, se a mesma estiver imprópria para o consumo (CAVALCANTE, 2008).

A qualidade das águas subterrâneas é resultante da dissolução dos minerais presentes nas rochas que representam os aquíferos por elas percolados. Mas, elas podem sofrer a influência de outros fatores, tais como a composição da água de recarga, o tempo de contato água/rocha, o clima e até mesmo da poluição antrópica. Devido ao maior contato com as rochas, baixa velocidade de fluxo e maiores pressões e temperaturas, as águas subterrâneas são geralmente mais mineralizadas do que as águas superficiais e, pelas mesmas razões, elas

possuem menores teores de matérias em suspensão e matéria orgânica, esta última devido à ação dos microrganismos presentes no solo. Também, devido às suas condições de circulação, elas tendem a possuir menor teor de oxigênio dissolvido do que as superficiais.

6.3.1 Potenciais fontes de poluição

As águas subterrâneas, por estarem mais protegidas devido à profundidade em que se encontram, são menos vulneráveis à poluição do que as superficiais, porém, quando a água subterrânea é contaminada, a sua recuperação pode levar muitos anos dependendo do tipo de contaminante e, até mesmo, tornar-se economicamente inviável.

As características naturais tanto das águas subterrâneas, quanto das superficiais, podem ser modificadas mediante sua degradação em função de diversos fatores, sendo atualmente o mais comum aqueles relacionados diretamente com as atividades humanas (falta de saneamento, indústria, agricultura e pecuária) que geram resíduos, que se forem despejados diretamente no solo e/ou lançados nos rios sem nenhum tratamento, acabará comprometendo assim a qualidade das águas.

Sendo assim, foram identificadas na área potenciais as fontes poluidoras que podem trazer prejuízos a qualidade das águas subterrâneas, tais como: uso e ocupação do solo de forma desordenada, construção de poços sem critérios técnicos, cemitérios, disposição inadequada de resíduos sólidos (lixões e aterros) e ausência de saneamento básico.

7.3.1.1 Uso e ocupação do solo no município de Fortaleza

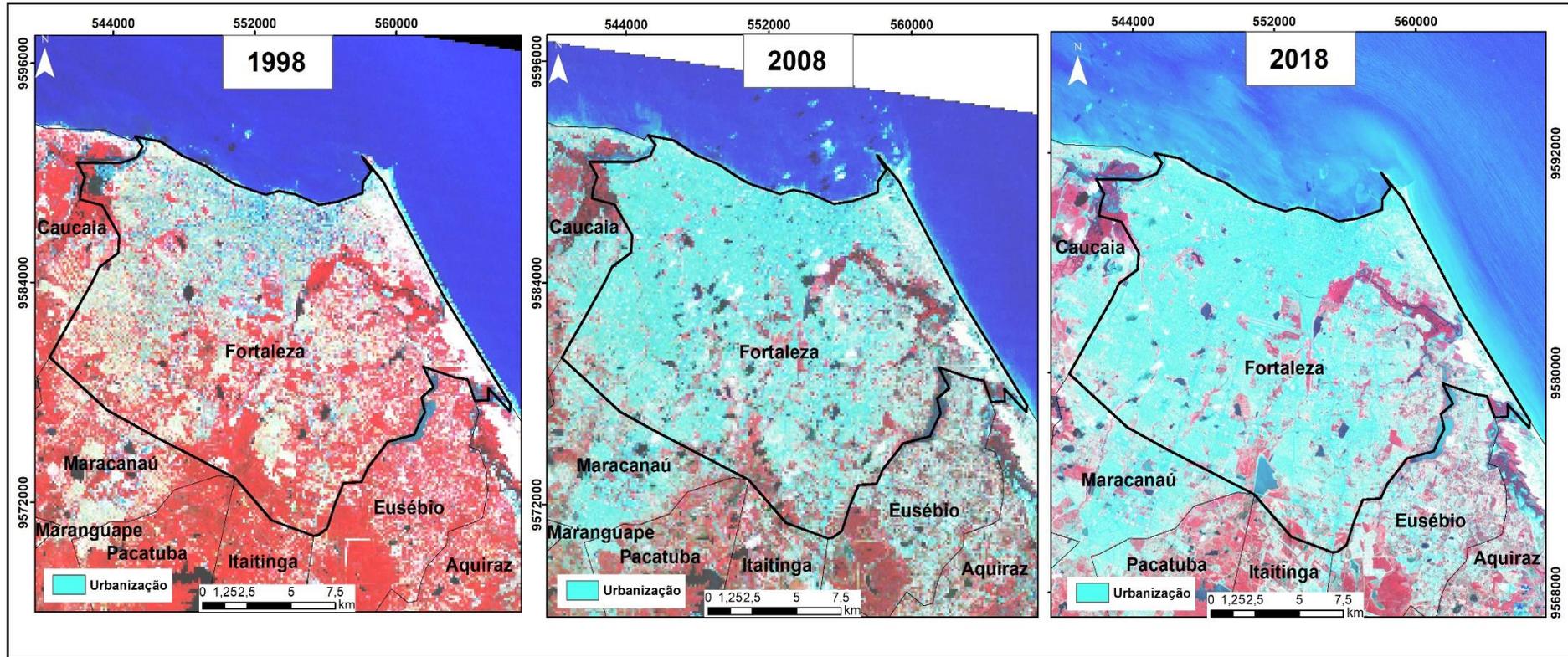
O uso e a ocupação do solo de uma região alteram a dinâmica ambiental original, tendo influência inclusive sobre os recursos hídricos que são afetados tanto em relação à quantidade quanto em relação à qualidade, haja vista que o processo de uso e ocupação do solo promove a impermeabilização do mesmo alterando o regime de infiltração e, conseqüentemente, a recarga aquífera, bem como o crescimento demográfico aumentando o risco de contaminação das águas subterrâneas em decorrência das atividades antrópicas, onde tais riscos podem ser potencializados em decorrência da falta de uma gestão integrada do uso do solo e da infraestrutura.

A expansão urbana do município de Fortaleza, assim como uma grande parte das cidades do Brasil, realizou-se de forma negligente com os recursos naturais. Caracterizou-se pela realização de aterramentos de corpos hídricos, intensa ocupação do solo, desrespeito às

Leis de Uso e Ocupação (Lei nº 7.987/96) (FORTALEZA, 2010) e infraestruturas insuficientes ao contingente populacional.

A Figura 31 mostra a evolução do crescimento urbano que ocorreu no município de Fortaleza no decorrer de duas décadas – período de 1998 a 2018 - onde é possível observar uma rápida expansão, principalmente nas extremidades do município (periferia), restando de áreas verdes apenas em locais onde existem corpos d'água remanescentes e ao longo do curso dos rios Cocó e Ceará.

Figura 31: Evolução da mancha urbana no município de Fortaleza – Ceará.



Fonte: Elaborado a partir de imagens de satélite obtidos no INMET.

De acordo com Silva, 1992 (*apud* ACCIOLY, 2009), a partir da década de 1930 começou em Fortaleza um crescimento demográfico elevado que refletiu no aumento da sua área urbana. Contudo, a expansão da cidade a partir do aumento da população não gerou a ampliação relativa da infraestrutura urbana, tais como calçamento, energia elétrica, água encanada, rede de esgotos, coleta de lixo etc. Tais aspectos foram observados durante as diversas etapas de campo desenvolvidas, sendo comum se observar áreas com casas construídas às margens de rios e córregos (Figura 32), onde acabam despejando seus efluentes domésticos diretamente nos rios e córregos contaminando suas águas e à medida que essa água contaminada for infiltrando no subsolo, consequentemente contaminará das águas dos aquíferos.

Figura 32: Ocupação as margens de córregos e descartes de rejeitos domésticos diretamente na rede de drenagem (Agosto/2020)



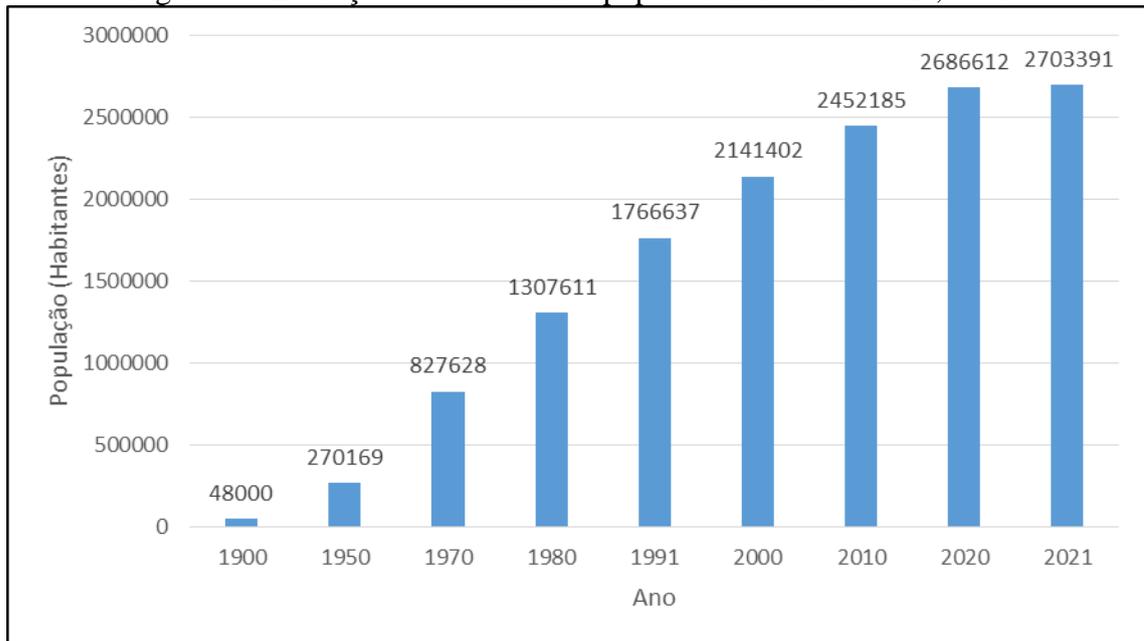
Fonte: Autor. Local: Messejana (Coord.: 9577079/556502)



Fonte: Autor. Local: José Walter (Coord.: 9576254/548774)

O crescimento populacional do município deve-se ao fenômeno de urbanização em três períodos: primeiro no início do século XX, associado a agro-exportação do algodão; segundo, nos anos 1970 e 1980, pelo incentivo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste do Brasil (SUDENE) à indústria têxtil e de confecções e, finalmente, nos anos 1990, com a reestruturação produtiva e a mobilidade de capitais financeiros oriundo do Sul do país, notadamente, para a indústria de calçados. Essa mobilidade de capitais provocou mobilidade do trabalho e da população. A Figura 33 mostra a evolução do crescimento populacional de Fortaleza.

Figura 33: Evolução do crescimento populacional de Fortaleza, Ceará



Fonte: Atlas de Fortaleza (2000) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021)

6.3.1.2 Construção de poços

Um poço tubular é uma obra de engenharia hidrogeológica, requerendo para sua construção um projeto técnico/construtivo, onde o conhecimento hidrogeológico local é de fundamental importância para o sucesso da obra (CAVALCANTE; GOMES 2011).

A interligação de águas exploradas de zonas superficiais com águas de zonas mais profundas, pela má construção de poços, pode constituir um meio direto de poluição de águas subterrâneas e, conseqüentemente, dos aquíferos. Não é comum uma vistoria durante o processo de locação e construção de poços, existindo diversos erros que ocasionam risco para os recursos hídricos subterrâneos (CAVALCANTE, 1998).

Um poço mal locado e/ou construído pode ser um elemento condutor hidráulico direto e eficiente de águas poluídas para níveis mais profundos. O emprego de várias fases executadas erradas durante a construção da obra pode resultar em algo não aceitável para funcionar como captadora de águas subterrâneas, sob o risco iminente de possibilitar a captação de uma água poluída, particularmente por nitrato e coliformes fecais, causando prejuízos à saúde do usuário.

Na área de pesquisa é comum se observar poços que foram construídos fora das normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (NBR nº 12.212 de 30/04/2006), principalmente no que se refere a distância mínima de 30m entre um poço e uma fossa, colocando em risco a obra de captação por acabar captando uma água contaminada

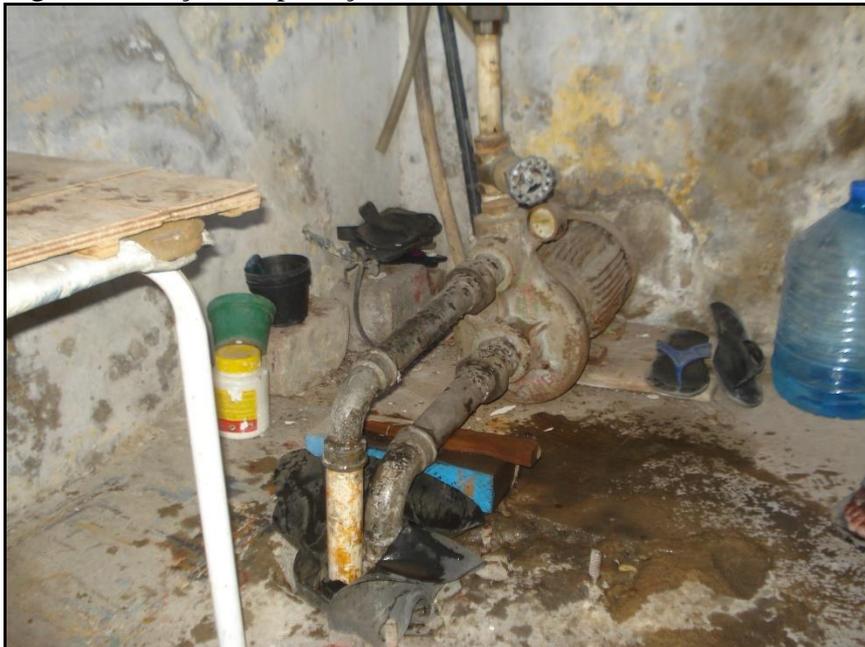
(Figura 34), e na proteção sanitária, onde poços acabam ficando expostos (abertos), com risco eminente de queda de contaminantes diretamente no aquífero (Figura 35).

Figura 34 - Proximidade da cacimba à fossa, Jardim América – Fortaleza - Ceará



(Agosto/2020). Coord.: 9585418/550497

Figura 35: Poço sem proteção sanitária. Serrinha, Fortaleza – Ceará



(Agosto/2020). Coord.: 9582749/549189

6.3.1.3 Cemitérios

A preocupação com os cemitérios como fontes potenciais de poluição das águas começou no Brasil na década de 80 por pesquisadores do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas - CEPAS/USP, que iniciaram um projeto versando sobre o assunto e, a partir daí, a pesquisa influenciou na elaboração de diretrizes básicas de localização de cemitérios e projetos de lei específicos (PACHECO, 1986; PACHECO *et al*, 1988; PACHECO & MENDES, 1990; PACHECO *et al*, 1990; MARTINS *et al*, 1991; PACHECO *et al*, 1992; MIGLIORINI, 1994 *apud* CAVALCANTE, 1998).

Dentre os impactos causados pela instalação inadequada de cemitérios destacam-se os químicos, dentre os quais o mais importante é a contaminação das águas subterrâneas por microorganismos que se proliferam durante o processo de decomposição dos corpos. No geral, a localização dos cemitérios nem sempre obedece a projetos fundamentados em estudos geológicos e hidrogeológicos (PACHECO *et al*, 1998).

Pesquisas desenvolvidas revelam o comprometimento qualitativo das águas subterrâneas por bactérias provenientes do líquido gerado pela decomposição dos corpos que, no período humoroso cuja duração varia de 06 a 08 meses a depender das condições geológicas, liberam de forma intermitente um líquido contendo duas diamíνας muito tóxicas: a putrecina (1,4 Butadiamina) e a cadaverina (1,5 Pentanodiamina), dois potentes venenos (MAIA, 2008).

No município de Fortaleza existem 07 cemitérios (Quadro 19), porém, para a instalação desses cemitérios não foram realizados estudos geológicos e hidrogeológicos para estabelecer critérios de adequação de local, ou mesmo uma preparação da área para receber tal empreendimento, evitando que eles possam constituir um risco potencial de contaminação para as águas subterrâneas.

Quadro 19: Cemitérios do município de Fortaleza - Ceará

Cemitério	Bairro	Ano Fundação
Messejana	Messejana	1836
São João Batista	Centro	1865
São Vicente de Paula	Mucuripe	1912
São José	Parangaba	1921
Santo Antônio	Antônio Bezerra	1935
Parque da Paz	Passaré	1973
Parque Bom Jardim	Bom Jardim	1994

Os Cemitérios de São Vicente de Paula e o São João Batista por exemplo, estão localizados na área costeira do município de Fortaleza, sobrepostos ao Aquífero Dunas, onde o nível estático é sub-aflorante em níveis arenosos, com porosidade e condutividade hidráulica que facilitam a acumulação de água e a migração de elementos contaminantes; os demais cemitérios se encontram atualmente integrados à malha urbana, até mesmo em áreas centrais, a exemplo do que ocorre no bairro da Messejana, onde está o cemitério mais antigo de Fortaleza (Fundado em 1836), e que se encontra em plena atividade nos dias de hoje.

Esses cemitérios foram instalados em áreas afastadas dos centros urbanos, mas pelo intenso e desordenado processo de urbanização, atualmente eles se encontram em áreas centrais e densamente povoados de bairros de Fortaleza.

Foram realizados estudos sobre o Cemitério São João Batista (MARINHO, 1998 e PONTES, 2010), na faixa costeira de Fortaleza, e no Cemitério Bom Jardim (OLIVEIRA, 2009), na poção sudoeste de Fortaleza. Esses trabalhos identificaram a ocorrência de poluição da água subterrânea causada pelo necro-churume, líquido decorrente da decomposição dos cadáveres sepultados, nos dois cemitérios.

O Cemitério São José, na Parangaba (oeste da área) está localizado em área intensamente urbanizada, sobreposto ao Barreiras (sedimentos areno-argilosos), representando uma potencial fonte de contaminação para as águas subterrâneas. O terreno apresenta-se com inclinação de 0,6° na porção NW e o nível estático médio no entorno do cemitério é de 2,6 m, sub-aflorante. Oliveira (2013) calculou o volume produzido de necro-churume gerado pelo Cemitério da Parangaba, com base no número total de sepultamentos relacionado ao sexo e idade ao longo de 23 anos de dados do Cemitério da Parangaba, obtendo 525.524 litros que, potencialmente, podem migrar para o subsolo.

Os cemitérios instalados em terrenos sedimentares, com topografia elevada em relação à circunvizinhança e com o nível estático raso, aliado a uma precipitação irregular, são necrópoles mais susceptíveis à contaminação do recurso hídrico subterrâneo. A pequena profundidade do nível estático em meio sedimentar arenoso e a grande permeabilidade fazem com que o contaminante alcance o aquífero com mais facilidade. Em áreas urbanizadas, onde existem cemitérios instalados, que possuem pequena taxa de precipitação e impermeabilização do solo, existe um alto risco a contaminação, pois a recarga com poluentes será predominantemente e a contaminação ocorre em curto espaço de tempo (OLIVEIRA, 2013).

6.3.1.4 Disposição inadequada de resíduos sólidos

A disposição de resíduos, de origem doméstica ou industrial, tem sido causadora de inúmeros incidentes de contaminação tanto das águas subterrâneas como superficiais, resultante do desenvolvimento populacional desordenado nas diversas cidades. Os mais sérios riscos ocorrem quando o empreendimento é praticado sem controle e onde a disposição de resíduos sólidos e, principalmente, líquidos perigosos, é feita em locais não apropriados, em áreas geologicamente vulneráveis.

No município de Fortaleza foram instalados cinco lixões nas últimas cinco décadas, sendo eles: Lixão do João Lopes, no bairro Monte Castelo, o primeiro da capital (1956 a 1960); Lixão da Barra do Ceará, onde surgiram os primeiros catadores vindos do interior, devido ao êxodo rural (1961 a 1965); Lixão do Buraco da Gia, no bairro Antônio Bezerra (1966 a 1967); Lixão do Henrique Jorge, com o primeiro coletor compactador do Estado (1968 a 1977) e, por último, o Lixão (antigo aterro) do Jangurussu, atualmente desativado, nas margens do rio Cocó (1978 à 1998), uma das principais drenagens de Fortaleza e que deságua na praia do Caça e Pesca.

O Aterro do Jangurussu (Figura 36), localizado na região sul de Fortaleza, foi projetado para uma vida útil de 10 anos, mas acabou funcionando por 20 anos. Durante seu tempo de funcionamento, era o único local existente para atender toda Fortaleza, recebendo uma média diária de 3.300 toneladas de lixo distribuídas em 21,6 hectares. Ao ser inaugurado, o local era um aterro que obedecia às normas técnicas para este fim. Com o passar dos anos, devido à falta de manutenção e descaso com as normas e técnicas sanitárias necessárias, o Jangurussu virou “lixão”; isso aconteceu em 1996, quando a carga máxima permitida para o funcionamento normal do aterro foi ultrapassada, sobrecarregando e representando perigo em

potencial para a comunidade vizinha, por ser um centro irradiador de animais e doenças. Na época, dentre outros problemas, ocorriam incêndios descontrolados devido à combustão do metano. Em 1997 começaram as negociações para desativação do local, o que acabou acontecendo somente em 1998; ainda hoje o bairro do Jangurussu concentra usina de reciclagem e catadores (DOURADO, 2012).

Porém, mesmo o lixão do Jangurussu, estando atualmente desativado, ainda representa uma fonte pontual de contaminação e as pesquisas realizadas por Sabadia (2001) e Souza (2002) no entorno de sua área mostram que as águas subterrâneas e superficiais estão seriamente comprometidas qualitativamente, mostrando claramente a transferência de massa dos constituintes do chorume gerado do aterro do Jangurussu aos sistemas hídricos.

Figura 36: Aterro do Jangurussu – bairro Jangurussu, recoberto com sedimentos Barreiras e com vegetação (Janeiro/2023)



Fonte: Autor. (Coord.: 9576730/552493)

É comum no município de Fortaleza, principalmente em regiões de periferia, a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos (lixo, material de construção etc.), e tal fato ocorre por falta de conscientização por parte da população e/ou por falta de ação do poder público, em promover uma coleta de forma eficaz desses resíduos (Figura 37). Muitas vezes os produtos de limpeza, lixo hospitalar, industrial e rejeitos da construção, entre outros, misturam-se num só local envolvendo reações químicas que aceleram a dissolução e liberação de produtos altamente prejudiciais para a rede de drenagem e aquíferos.

Figura 37: Disposição inadequada de lixo em Fortaleza - Ceará. Agosto/2020



Fonte: Autor. Messejana (Coord.: 9577220/556673)

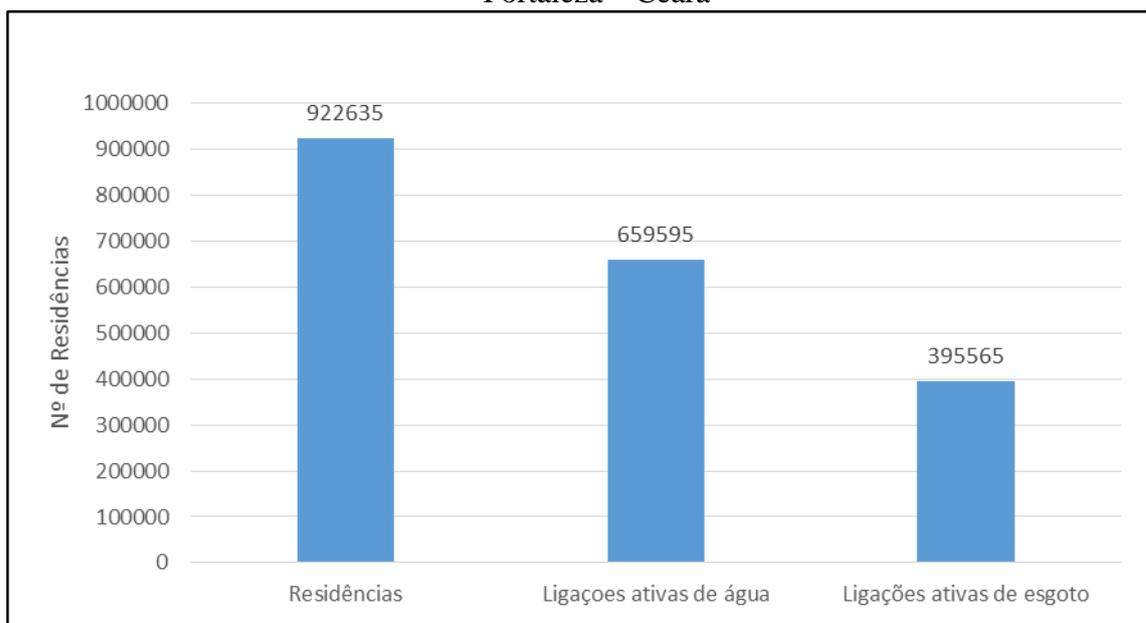


Fonte: Autor. Granja Lisboa (Coord.: 9581112/553680)

6.3.1.5 Saneamento básico

De acordo com o levantamento feito pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) (2021), no município de Fortaleza, 50% da população recebe atendimento de coleta de esgoto, sendo que apenas 59,7% dos esgotos de Fortaleza são tratados, enquanto em relação ao abastecimento de água, 24,6% da população não tem acesso a água tratada (Figura 38).

Figura 38: Residências abastecidas por água encanada e coleta de esgoto (2021) em Fortaleza – Ceará



Fonte: CAGECE, 2021

Com relação aos investimentos realizados nesse setor, segundo o Painel Saneamento Brasil (2018), entres os anos de 2010 e 2018 foram de pouco menos de R\$ 1.5 bilhão, valor este considerado alto se comparamos com as demais capitais do Brasil, principalmente as do Nordeste; porém, mesmo investindo um valor considerável nos serviços de saneamento básico em um período de 9 anos, o serviço na cidade ainda está longe do ideal a ser fornecido para sua população.

A ausência de saneamento básico leva o cidadão a utilizar fossas sépticas, que em função da oscilação sazonal do nível freático podem transformar-se em fossas negras e, neste caso, a função depuradora do sistema aquífero passa a ser mínima, ou sequer existir. As águas subterrâneas podem sofrer os impactos desta carga poluente, principalmente no contexto das Dunas que apresentam uma alta vulnerabilidade, com um nível estático sub-aflorante a aflorante (CAVALCANTE, 1998, p.89).

O nitrato é considerado como o poluente mais frequente oriundo dos sistemas sépticos. Em Fortaleza, isto é confirmado à medida que as análises das águas subterrâneas mostram a existência constante deste elemento, em concentrações quase sempre acima de 5 mg/L, que segundo SANTOS (2008) pode servir como indicativo de contaminação da água subterrânea por atividade humana (fossas, esgotos, lixões etc).

Nas pesquisas hidroquímicas realizadas pelo Laboratório de Hidrogeologia/DEGEO/CC/UFC, observou-se que nas últimas duas décadas as águas subterrâneas de Fortaleza estão seriamente comprometidas pelas elevadas concentrações de nitrato, que chegam a alcançar localmente, até 39 mg/L (N-NO₃) (Praia do Futuro).

A gestão dos serviços de saneamento ambiental é regida pela Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007), também conhecida como a Lei Nacional de Saneamento, que por sua vez estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, dispondo, entre outras questões, a respeito dos princípios fundamentais, do exercício da titularidade, da prestação regionalizada dos serviços públicos de saneamento básico, atividades de planejamento, da regulação, aspectos econômicos e sociais, aspectos técnicos, participação de órgãos colegiados no controle social e política federal de saneamento básico.

6.3.2 Análises físico-químicas e classificação da potabilidade para consumo humano

De acordo com Santos (2008), as características que definem o modelo de água destinada ao abastecimento humano, definidas pelos padrões de potabilidade, compreendem critérios essenciais (proteção contra a contaminação por microrganismos patogênicos e contra a poluição por substâncias tóxicas ou venenosas) e critérios complementares (cor, sabor, odor, turbidez, dureza, corrosividade e etc).

A água potável é definida como aquela que pode ser consumida pelo homem sem ocasionar danos à saúde. No Brasil, o padrão de potabilidade para o consumo humano é recomendado pela Portaria nº 888, de 4 de Maio de 2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os padrões de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2021).

A avaliação dos parâmetros hidroquímicos da área de pesquisa foi realizada através das 40 análises físico-químicas das águas subterrâneas, onde foram obtidas as concentrações dos íons amônia, nitrito, nitrato e cloreto, além de determinar também o pH, condutividade elétrica (CE) e os sólidos totais dissolvidos (STD) (Quadro 20).

Quadro 20 - Análises físico-químicas das águas subterrâneas de Fortaleza – Ceará (Agosto/2020)

Parâmetros analíticos	pH (25°C)	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L N-NH _{3,4})	Nitrito (mg/L N-NO ₂)	Nitrato (mg/L N-NO ₃)	Cloreto (mg/L Cl)	
Limites Portaria	6,0 - 9,0	-	500	1,2	1	10	250	
AMOSTRAS / RESULTADOS	P6	6,27	1.218	597,5	<0,01	0,001	9,2	271,9
	P54	5,98	736,2	361,4	<0,01	0,026	8,9	106
	P56	7,12	1.792	878,8	<0,01	0,017	8,2	307,9
	P65	6,33	529,4	260,4	<0,01	<0,001	7,8	90
	P70	5,62	775,1	380,9	<0,01	0,011	10,4	140
	P166	5,94	604,6	296,8	<0,01	0,003	11,7	90
	P172	6,42	449,7	220,9	<0,01	<0,001	8,7	62
	P176	5,44	453	222,8	<0,01	<0,001	9,6	82
	P177	5,87	603,9	296,8	0,15	0,157	12,8	94
	P186	7,26	596	292,8	<0,01	<0,001	0,3	30
	P189	5,05	699,3	343,4	<0,01	<0,001	10,2	92
	P191	5,53	697,5	342,3	0,07	0,001	10	116
	P201	5,92	230,6	113,7	2,6	<0,001	8,4	16
	P203	6,96	368,8	181,2	<0,01	<0,001	2,7	30
	P206	6,49	598,8	293,9	<0,01	<0,001	12,7	116
	P208	7,04	537,5	263,8	<0,01	<0,001	3,5	38
	P209	6,16	516,8	253,7	0,42	0,213	12,8	74
	P210	5,37	323	158,9	<0,01	<0,001	6,8	68
	P211	6,75	576,2	282,9	<0,01	<0,001	11,9	100
	P213	6,46	549,3	269,9	<0,01	0,019	9,5	90
	P214	7,19	759,9	372,7	0,01	0,024	15,8	70
	P217	6,17	712,5	350	<0,01	<0,001	3,1	150
	P218	4,56	631,7	309,8	0,51	0,01	15,3	110
	P219	7,06	615,4	302,2	<0,01	0,004	9,1	66
	P222	5,16	1.016	498,3	1,73	0,003	14,7	163,9
	P224	6,39	399	196	<0,01	0,022	4,7	48
	P226	6,65	859,5	422,1	<0,01	0,041	10,5	106
	P228	4,84	721,8	354,5	<0,01	0,007	9,6	126
	P229	6,64	430	211,3	<0,01	<0,001	0,4	90
	P249	5,25	684,7	336,1	0,38	0,001	12,5	154
P250	5,61	527,3	258,9	<0,01	<0,001	7,9	118	
P251	5,88	618,9	303,8	<0,01	<0,001	14,6	128	
P252	4,47	653,7	320,9	0,03	<0,001	12,5	132	
P254	7,28	565,5	277,6	<0,01	<0,001	8,9	76	
P265	5,25	588,5	288,9	<0,01	<0,001	8,8	66	
P269	7,02	1.052	516,4	0,32	0,1	6,3	179,9	
P270	4,2	341,6	167,7	<0,01	<0,001	8,7	66	
P280	6,41	596,3	292,7	<0,01	0,059	9,1	70	
P292	6,08	554,7	272,6	<0,01	0,009	12,3	122	
P309	6,63	426,5	209,5	<0,01	0,001	0,4	102	

6.3.2.1 pH

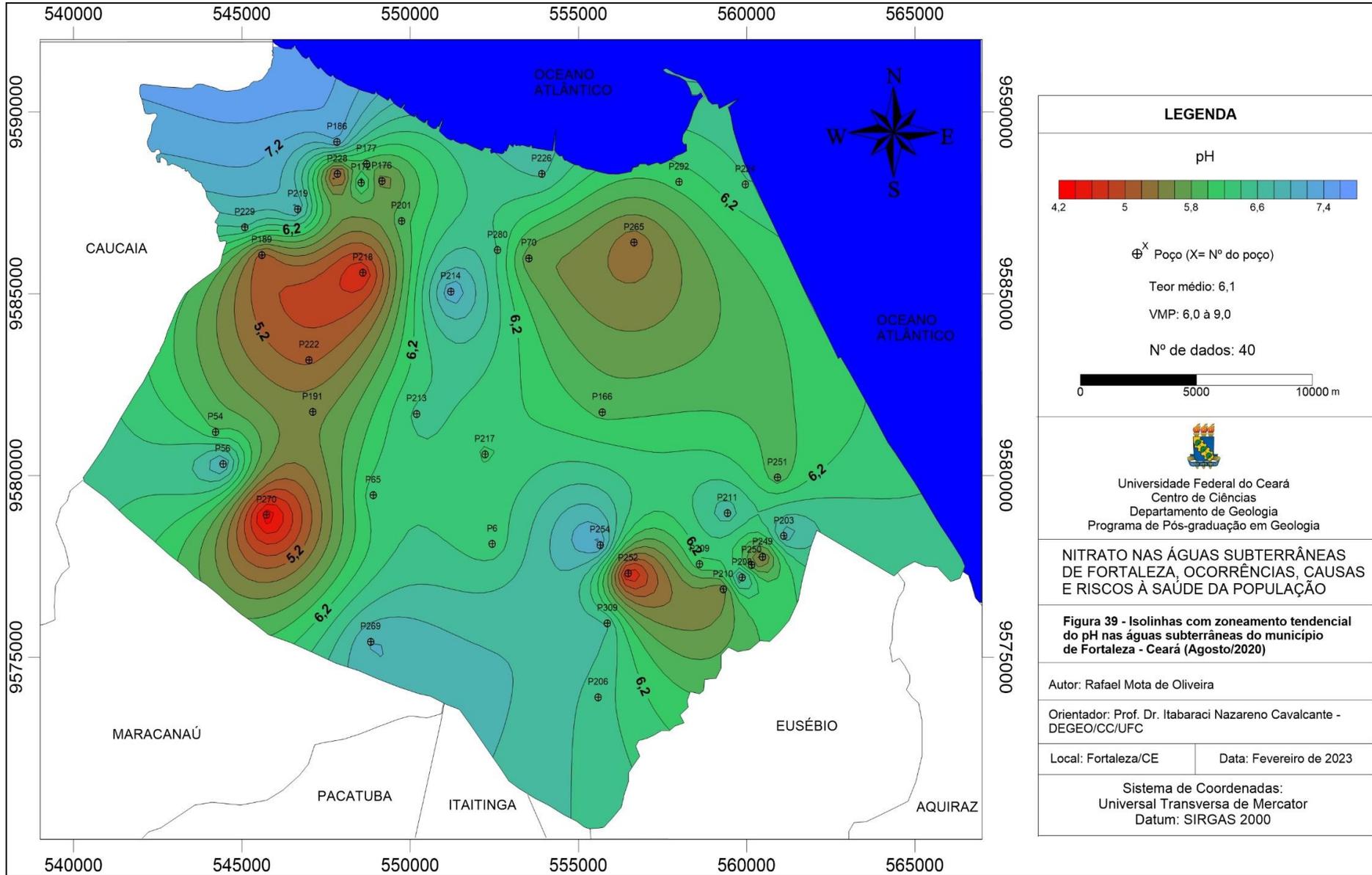
O pH é a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. A escala do pH varia de 1 a 14, sendo classificada como ácido quando inferior a 7, neutro quando igual a 7 e alcalino ou básica quando for superior a 7. Segundo SANTOS (2008), a maioria das águas subterrâneas tem pH entre 5,5 e 8,5.

De acordo com a Figura 39, a área de pesquisa é caracterizada pela predominância de águas levemente ácidas, com pH médio de 6, sendo o menor valor (ácido) encontrado na amostra P270 localizada na porção sudoeste da área, com pH de 4,2 e o maior (básica) encontrado na amostra P254, localizado na porção central da área, com pH de 7,3.

Dos 40 dados de pH, 18 (45%) deles (P54, P70, P166, P176, P177, P189, P191, P201, P210, P218, P222, P228, P259, P250, P251, P252, P265 e P270), localizados predominantemente na porção oeste da área, apresentam valores fora dos padrões de potabilidade recomendados pela Portaria nº 888, de 4 de Maio de 2021, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), que estabelece entre 6,0 e 9,0 para águas potáveis para consumo humano.

De acordo com HOUNSLOW (1995 *apud* GOMES, 2013), a principal razão dos valores de pH das águas serem inferiores a 6,0 é a quantidade significativa de minerais de argila presentes na composição dos litotipos, o que acontece com o Barreiras, que se dissolvem liberando sílica e alumínio nas águas, aumentando sua acidez. Os valores mais elevados de pH geralmente se encontram em águas com predominância de íons Na^+ e Ca^{++} ou em águas ricas em bicarbonatos.

No geral, as águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a determinados materiais (paredes de concreto e superfícies de cimento-amianto, por exemplo), enquanto as águas com pH elevado tendem a formar incrustações (GOMES, 2006).



6.3.2.2 Condutividade elétrica

É a medida da facilidade de uma água conduzir corrente elétrica, estando diretamente ligada ao teor de sais dissolvidos sob forma de íons. A condutividade aumenta proporcionalmente ao aumento da quantidade de íons dissolvidos e da elevação da temperatura na qual a medida é realizada (SANTOS, 2008).

A Figura 40 mostra a distribuição dos valores da condutividade elétrica encontrados nas 40 análises de águas subterrâneas da área de pesquisa, que variam de 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (P201) a 1.792 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (P56), com média de 570,37 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C, com os valores mais elevados observados na porção próxima ao litoral e na região sudoeste da área.

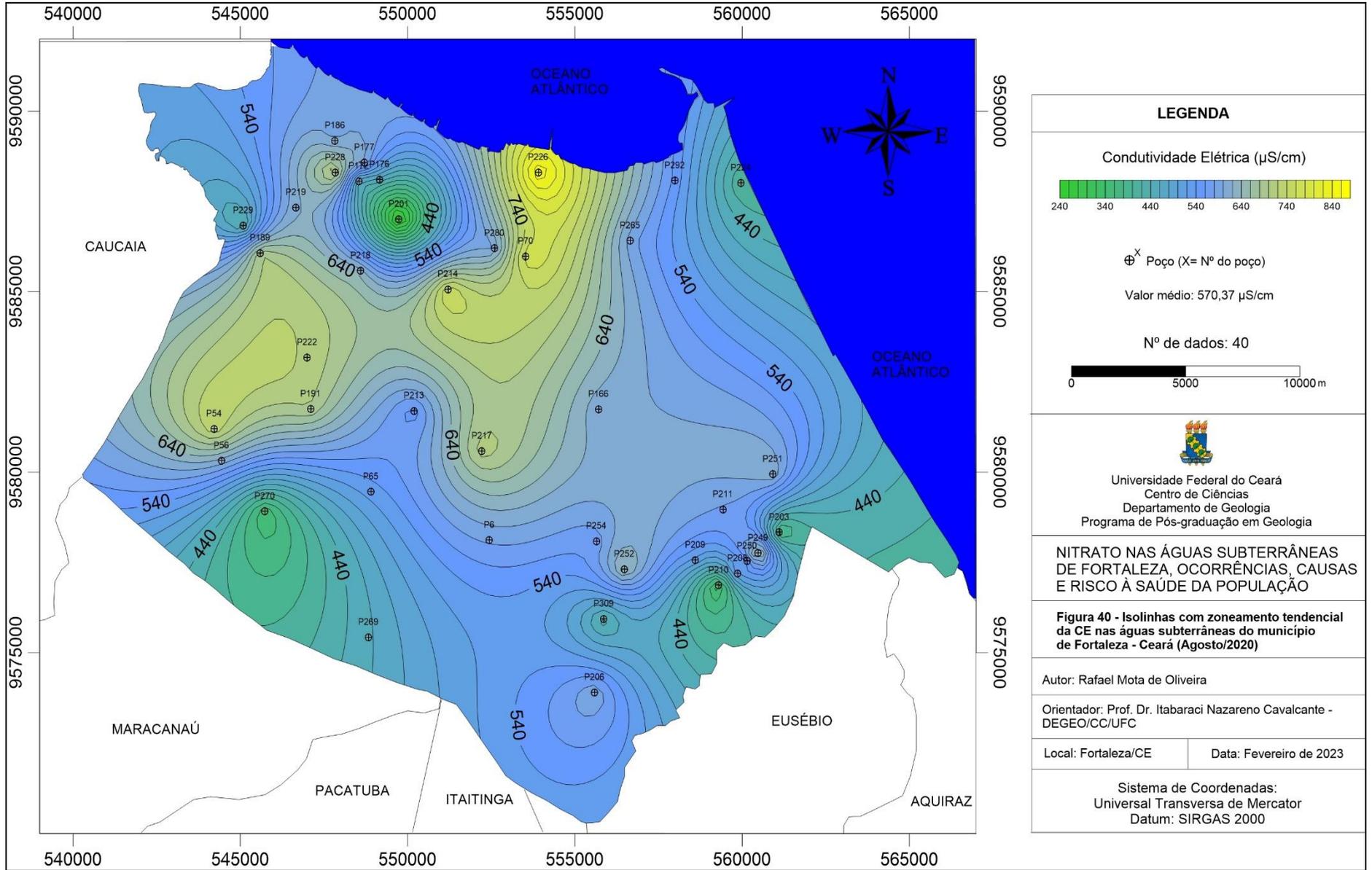
A Portaria nº 888 de 4 de Maio de 2021 (BRASIL, 2021) não estabelece um valor máximo de CE recomendado para o consumo humano. Mas, se conhecendo a relação entre a condutividade elétrica e STD, onde o valor da primeira é multiplicado pelo fator que oscila entre 0,53 a 0,75 para a obtenção da segunda, conclui-se que 3 amostras (P6, P56, e P269) apresentam valores de CE fora dos limites de águas potáveis.

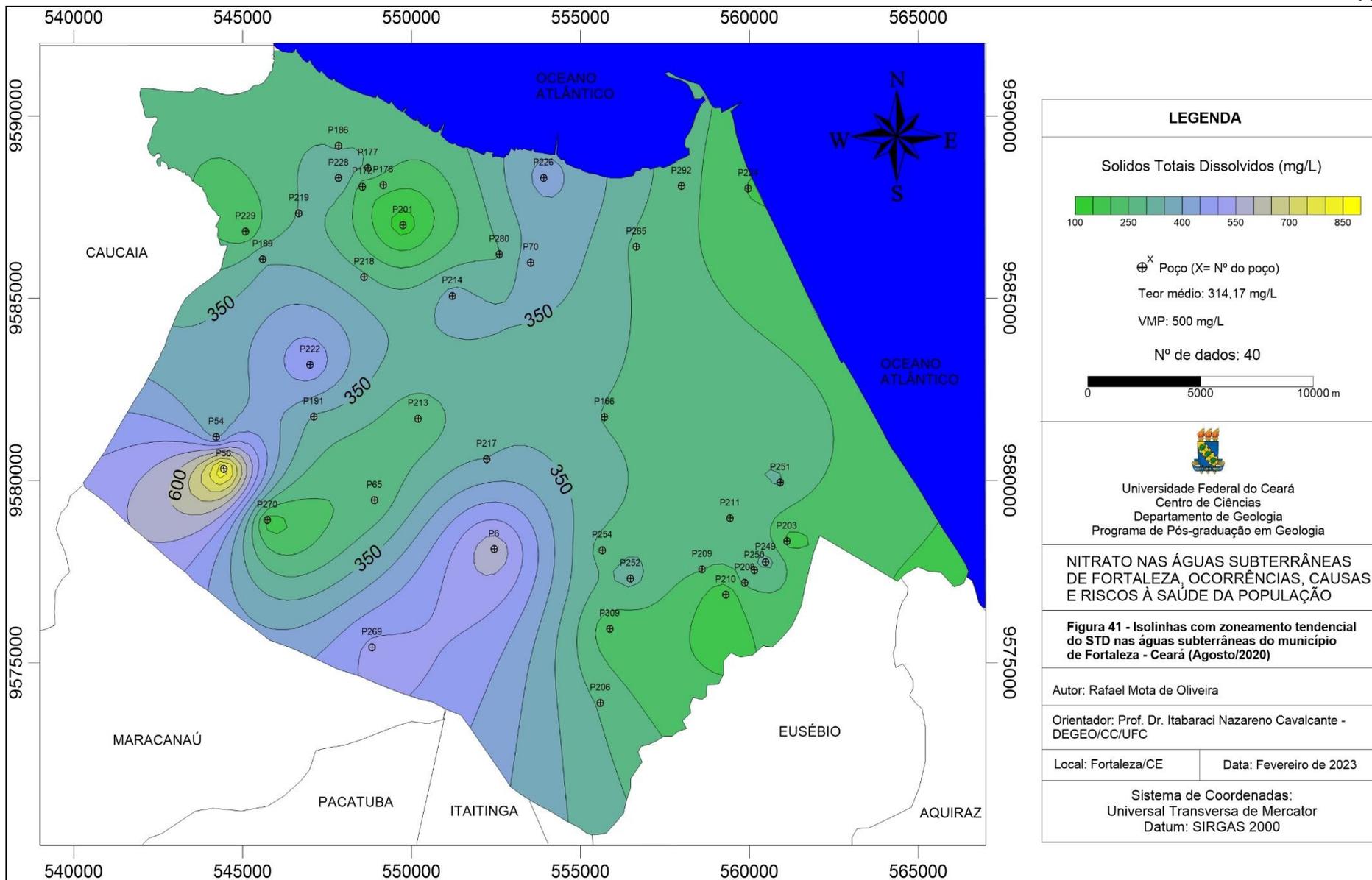
6.3.2.3 Sólidos totais dissolvidos (STD)

O STD corresponde ao peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Além de representar a concentração de todo material dissolvido na água, seja ou não volátil.

De acordo com a Figura 41, observa-se que as águas subterrâneas da área de pesquisa apresentam valores de STD variando de 113,7 mg/L (P201) a 878,8 mg/L (P56), com média de 314,37 mg/L, sendo as maiores concentrações de STD, observadas na porção sudoeste da área, podendo estar relacionadas ao baixo índice de saneamento básico, e ao meio Cristalino, pois, embora não tenha sido observado concentrações acima de 1.000 mg/L, de acordo com Cavalcante (1998), é comum as águas que se encontram inseridas nesse ambiente apresentarem concentrações de STD chegando a 2.000 mg/L em consequência da elevada concentração de cloreto.

De acordo com a Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021), a concentração de STD nas águas destinadas ao consumo humano não deve ultrapassar o valor de 500 mg/L, sendo assim, 3 amostras P6 (597,5 mg/L), P56 (878,8 mg/L) e P269 (516,4 mg/L) apresentam valores fora do padrão de potabilidade.





6.3.2.4 Cloreto (Cl^-)

O cloreto, em geral, são muito solúveis e muito estáveis em solução, logo dificilmente precipitam. Geralmente são provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos de rochas ígneas, além das observadas em rochas evaporíticas. A alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos podendo, assim, apresentar teores superiores a 100 mg/L (SANTOS, 2008).

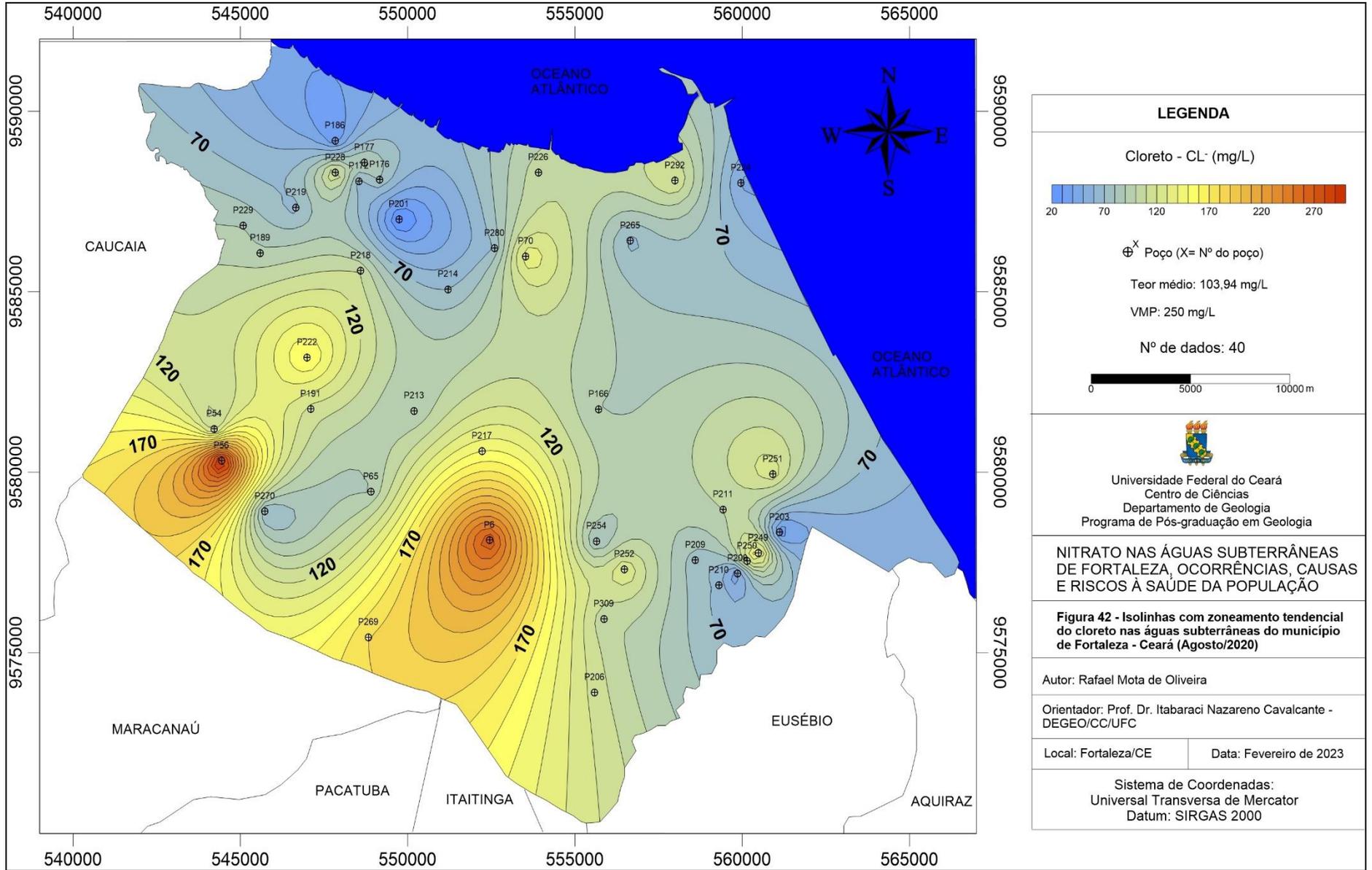
Segundo a FUNASA (2007), o cloreto é observado em dejetos de animais, por isso servem como indicadores de poluição orgânica. Santos (2008) afirma que o cloreto também é bom indicador de poluição relacionada a lixões e aterros, assim como Matta (2002) também afirma que a presença de altas concentrações de cloreto em águas subterrâneas é típica de ações antropogênicas, a exemplo de efluentes industriais e esgotos domésticos. Em regiões costeiras é comum sua origem estar associada a intrusão salina.

Na área de pesquisa, as concentrações de cloretos nas águas dos poços amostrados variam de 16 mg/L (P201) a 307,9 mg/L (P56), com média de 103,94 mg/L.

De acordo com a Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021), a concentração de cloreto nas águas potáveis para consumo humano não deve ultrapassar a 250 mg/L e, sendo assim, os poços P6 com 271,9 mg/L e P56 com 307,9mg/L, localizados na porção sul da área, apresentam águas cujas concentrações estão fora dos padrões de potabilidade (Figura 42). As maiores concentrações de cloreto podem estar relacionadas ao baixo índice de saneamento básico existente na área, onde é comum a população fazer uso de fossas ou, até mesmo, despejar seus efluentes no solo formando esgotos a céu aberto.

Segundo a CETESB (1990 apud FERNANDES, 2005), as descargas de esgotos sanitários constituem-se nas principais fontes de cloreto em meio urbano, uma vez que cada pessoa expele, pela urina, cerca de 6g de cloretos por dia. Isto faz com que os esgotos apresentem concentrações de cloretos que ultrapassam a 15 mg/L.

Teores elevados de cloreto nas águas provocam um sabor desagradável, corrosões em estruturas de metal, incrustações em tubos de revestimentos, aumento da dureza das águas e ações negativas no metabolismo de organismos (MATTA, 2002).



6.3.2.5 Compostos nitrogenados

Além de ser fortemente encontrado na natureza, na forma de proteínas e outros compostos orgânicos, o nitrogênio tem uma significativa origem antropogênica, principalmente em decorrência do lançamento em corpos d'água de despejos domésticos, industriais e de criatórios de animais, assim como de fertilizantes (FUNASA, 2014).

O nitrogênio presente em águas residuais domésticas provem da atividade humana, onde o material fecal contribui com nitrogênio orgânico através das proteínas. Estas por sua vez, sofrem a ação decompositora bacteriana com consequente liberação de nitrogênio amoniacal (NAVAL; COUTO, 2005).

O estudo e detecção de compostos de nitrogênio em águas usadas para consumo humano são importantes para o controle da saúde pública e para o entendimento do nível de degradação do meio ambiente. Neste contexto, Alaburda e Nishihara (1998) afirmam que os compostos nitrogenados, em seus diferentes estados de oxidação, estão entre as substâncias que podem colocar a saúde humana em risco. FUNASA (2007) esclarece que os compostos de nitrogênio têm como origem a matéria orgânica e sua detecção aponta poluição recente ou antiga, e quanto mais oxidados, mais antiga é a poluição.

6.3.2.5.1 Amônia ($\text{N.NH}_{3,4}^{+}$)

A amônia pode estar presente naturalmente em águas superficiais ou subterrâneas, sendo que usualmente sua concentração é bastante baixa devido a sua fácil adsorção por partículas do solo ou a oxidação para nitrito e nitrato. Entretanto, a ocorrência de concentrações elevadas pode ser resultante de fontes de poluição próximas, bem como da redução de nitrato por bactérias ou por íons ferrosos presentes no solo. A presença da amônia produz efeito significativo no processo de desinfecção da água pelo cloro, através da formação de cloraminas, que possuem baixo poder bactericida (ALABURDA, 1998).

Na área de pesquisa, as concentrações de amônia presentes nas águas dos poços amostrados variam de $<0,01$ mg/L (limite de detecção) chegando a 2,6 mg/L (P201), com média de 0,21 mg/L.

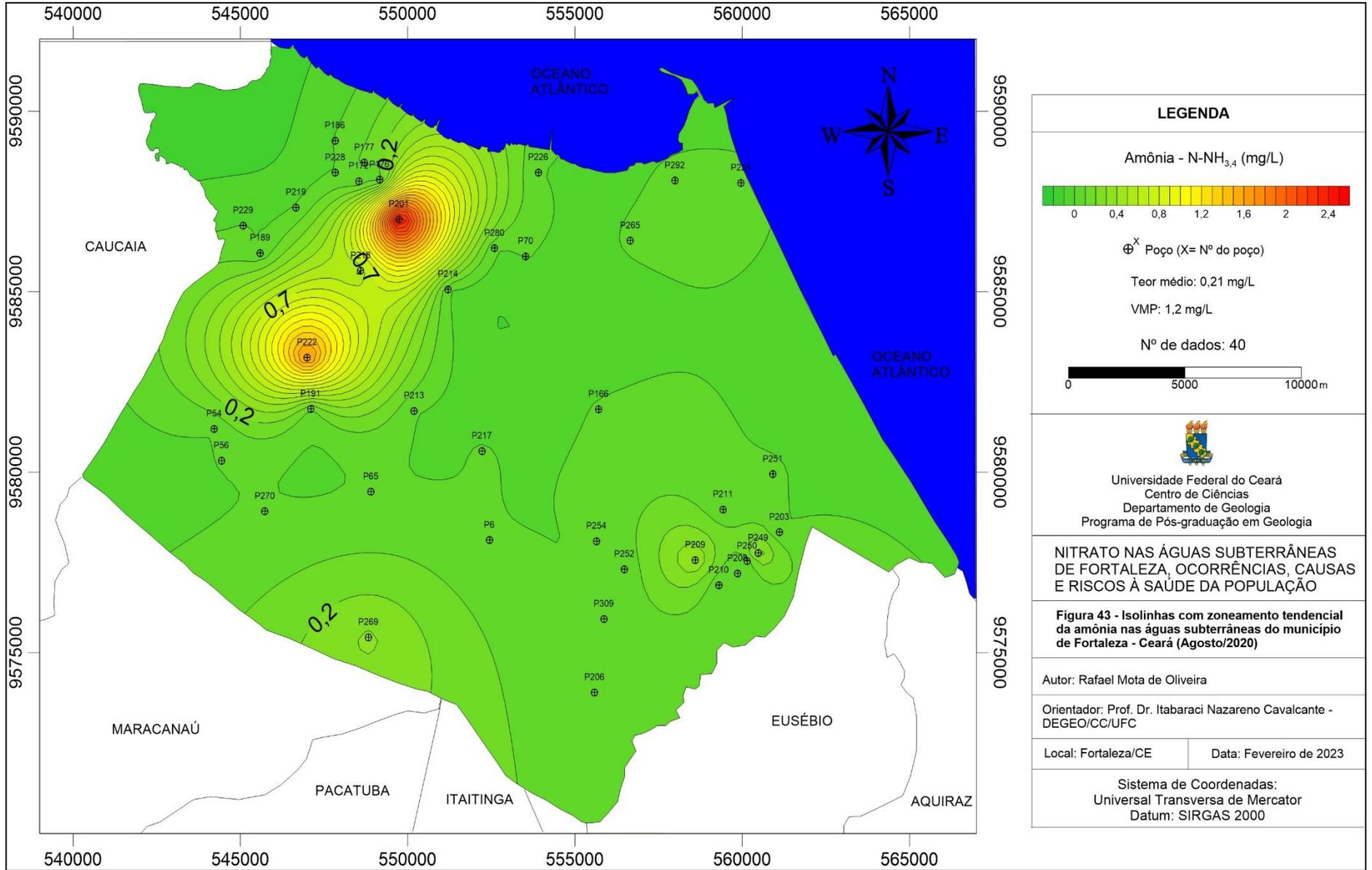
De acordo com a Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021), a concentração de amônia nas águas potáveis para consumo humano não deve ultrapassar a 1,2 mg/L; sendo assim, as amostras P201 (2,6 mg/L) e P222 (1,73 mg/L), localizadas na porção noroeste da área, apresentam concentrações fora dos padrões de potabilidade (Figura 43).

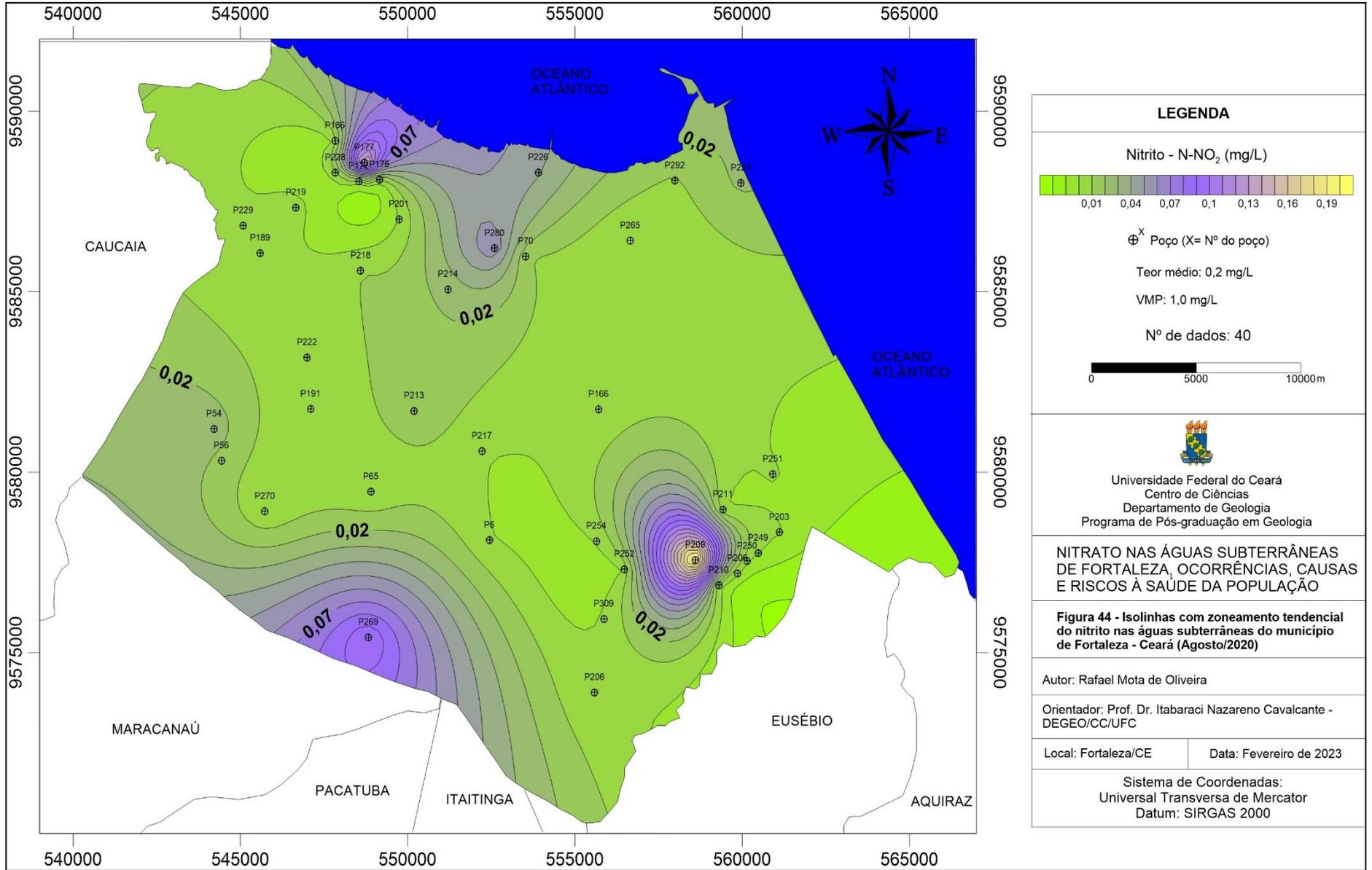
Cabral (2007) afirma que altas concentrações de amônia (N-NH_4^+) em águas representam um indicativo de que pode ocorrer oxidação para nitrato (N-NO_3^-), resultando no processo de nitrificação, assim como Custódio e Llamas (1983) afirmam que em águas subterrâneas, concentrações de amônia acima de 0,06 mg/L já apontam contaminação, pois a elevação no teor deste elemento sinaliza a interferência de fatores como fossas, esgotos domésticos, lixo, rejeitos de origem industrial ou fertilizantes agrícolas. Essa afirmação corrobora com os dados de nitrato coletados na área, pois na mesma região da área de pesquisa onde elevadas concentrações de amônia são observadas, também ocorre elevadas concentrações de nitrato.

6.3.2.5.2 Nitrito (N-NO_2^-)

O nitrito é produzido através do processo de nitrificação durante o ciclo natural do nitrogênio que, inicialmente, produz a amônia pelo processo de amonificação e, em seguida, produz o nitrito que posteriormente é convertido a nitrato pela ação de bactérias autótrofas do grupo nitrobactérias (SANTOS, 2008). Segundo Gadelha et al (2005), o nitrito é um parâmetro simples, porém muito relevante quanto à verificação da qualidade de águas destinadas ao consumo humano, pois a detecção de sua presença aponta contaminações recentes, com procedência de material orgânico animal ou vegetal. Além disso, pode ser identificado como consequência de decomposição biológica por ação de microrganismos, ou até mesmo, oriundo de ativos inibidores de corrosão em instalações de indústrias.

Na área de pesquisa, as concentrações de nitrito presentes nas águas dos poços amostrados variam de <0,001 (limite de detecção) a 0,213 (P209), estando assim, todas dentro dos padrões de potabilidade para consumo humano estabelecidos pela Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021), que estabelece uma concentração máxima de 1 mg/L (Figura 44).





6.3.2.5.3 N-Nitrato (N-NO_3^-)

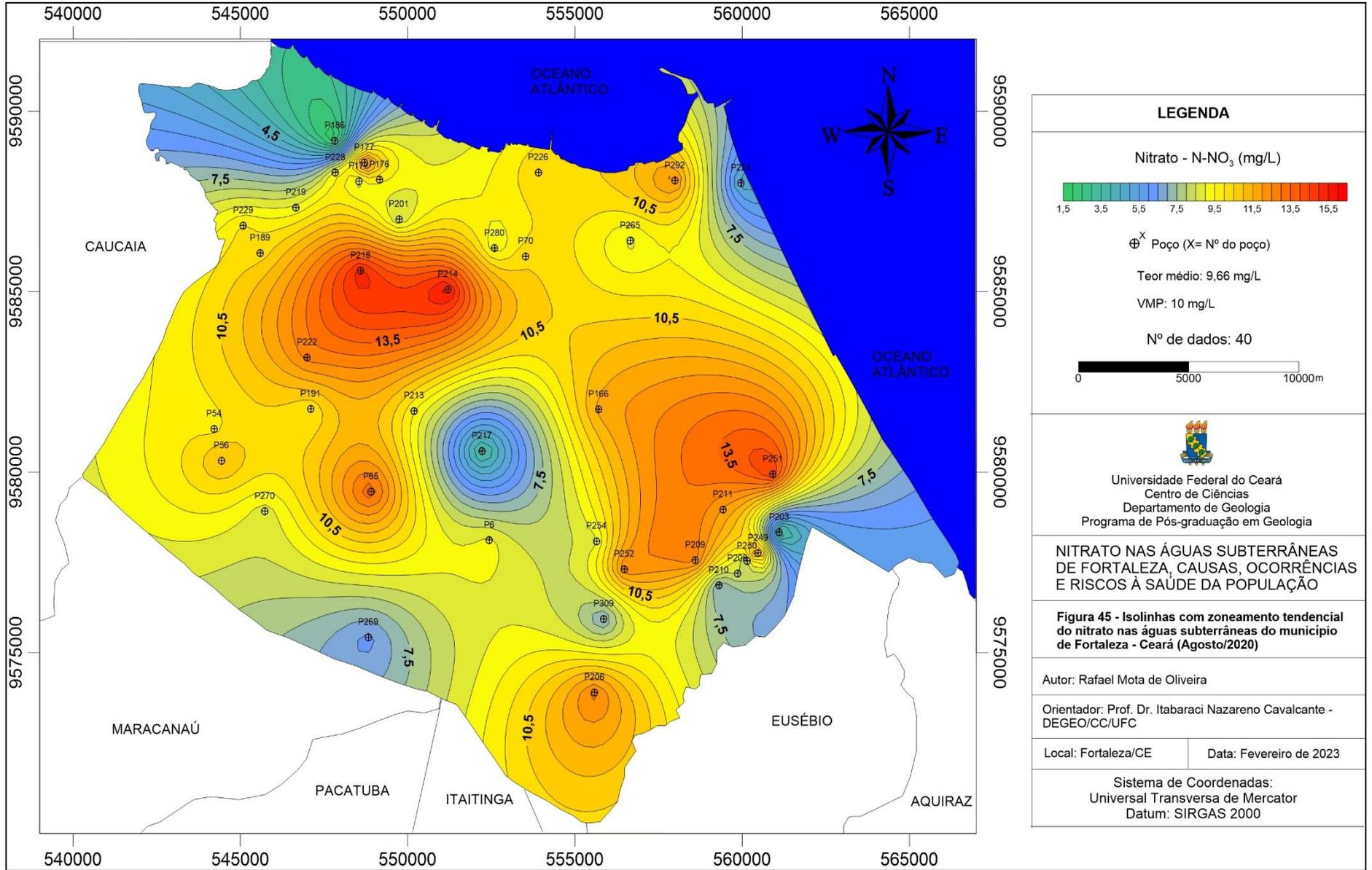
Segundo Santos (2008), o nitrato ocorre geralmente em pequenas concentrações representando o estágio final da oxidação da matéria orgânica; porém, teores acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividades antrópicas, tais como esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados e resíduos de animais. Nas águas subterrâneas, as concentrações de nitrato podem variar de 0,1 a 10mg/L, porém, em águas poluídas, os teores podem chegar a 1.000 mg/L.

Na área de pesquisa, de acordo com as análises realizadas, as concentrações de nitrato presentes nas águas dos poços variam de 0,3 mg/L (N-NO_3) (P186) a 15,8 mg/L (N-NO_3) (P214) (Figura 45).

De acordo com a Portaria nº 888/2021 (Brasil, 2021), a concentração de nitrato nas águas potáveis destinadas ao consumo humano não deve ultrapassar 10 mg/L (N-NO_3); sendo assim, 16 poços (45% das amostras) (P70, P166, P177, P189, P191, P206, P209, P211, P14, P218, P222, P226, P249, P251, P252 e P292) possuem águas cujas concentrações estão fora do padrão de potabilidade, com destaque para os poços P214 e P218 localizados na porção oeste, onde, suas concentrações chegam a 15,3 e 15,8 mg/L (N-NO_3) e o P251 localizado na porção leste da área, onde sua concentração é de 14,6 mg/L (N-NO_3).

Tais concentrações acima do máximo estabelecido pela referida portaria, podem estar relacionados a fatores presentes no município de Fortaleza que foram observados no decorrer desta pesquisa (pesquisa bibliográfica e etapa de campo), sendo algumas das prováveis causas, o uso e ocupação do solo de forma desordenada associada a falta de saneamento básico e disposição inadequada de resíduos sólidos.

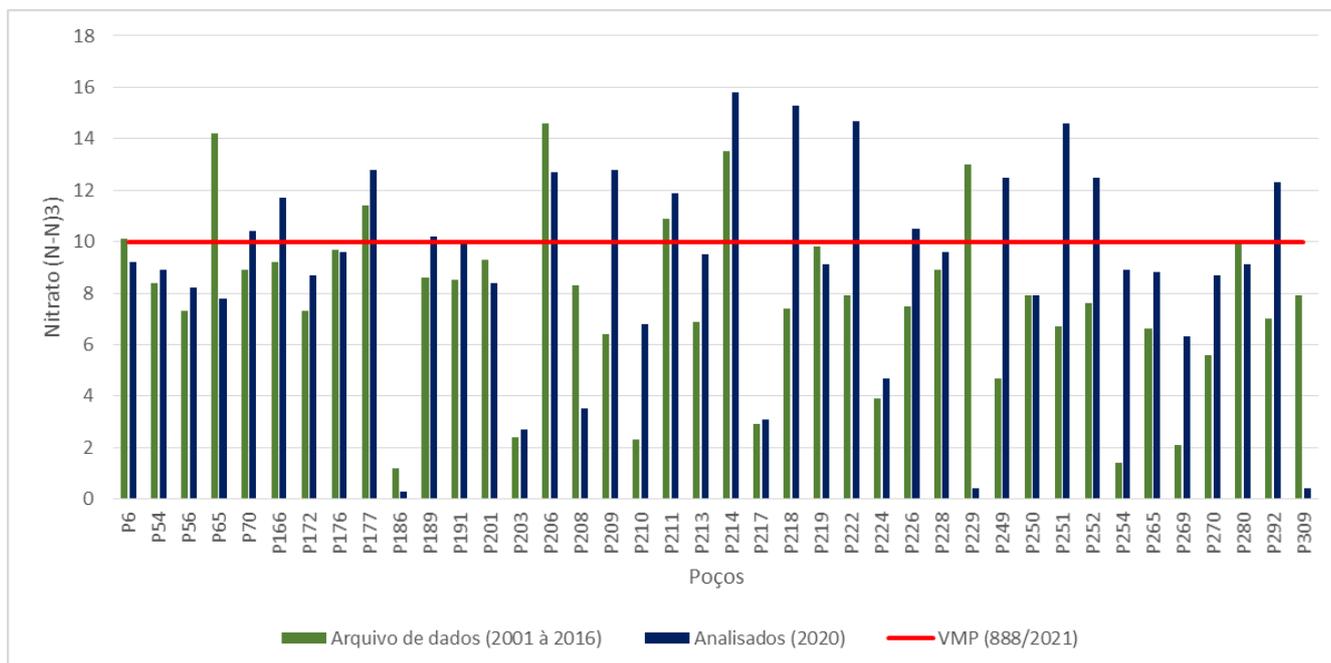
Segundo Lemos e Medeiros (2006), o consumo de água e alimentos com excesso de íons nitrato representa riscos à saúde da população, podendo levar a um aumento na incidência de doenças intestinais (diarreia) e até mesmo câncer de estômago, além de causar a metemoglobinemia, doença esta, que afeta principalmente as crianças com menos de três meses de idade, podendo levar a criança a óbito. Os casos de doenças de veiculação hídrica registrados no município de Fortaleza, serão detalhados no item 6.4.



6.3.3 Comparação da evolução temporal do nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza

Para a comparação da evolução da concentração do nitrato, foram utilizados os resultados das 40 análises físico-químicas realizadas em Agosto/2020 e análises realizadas nos mesmos 40 pontos, obtidos através do arquivo de dados do Laboratório de Hidrogeologia - LABHI/DEGEO/CC/UFC, com dados de 2001 a 2016 (Figura 46).

Figura 46: Comparação temporal da concentração de nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza – Ceará



Fonte: Autor, 2023.

Comparando as 40 análises do arquivo de dados do LABHI com as 40 amostras realizadas nesta pesquisa, podemos observar que, no período de 2001 a 2016 (LABHI) as concentrações de nitrato variavam de 1,2 mg/L (N-NO_3^-) (P186) a 14,6 mg/L (N-NO_3^-) (P206) com concentração média de 7,7 mg/L (N-NO_3^-), já as analisadas nesta pesquisa (2020), as concentrações de nitrato variaram de 0,3 mg/L (N-NO_3^-) (P186) a 15,8 mg/L (N-NO_3^-) (P214) com concentração média de 9,03 mg/L (N-NO_3^-). Sendo assim, observa-se que houve um acréscimo de 17% (1,33 mg/L) na concentração de nitrato (N-NO_3^-) nas águas subterrâneas de Fortaleza. Para uma melhor representatividade do aumento nas concentrações de nitrato, foram realizados cálculos estatísticos como moda e mediana, onde foi possível observar um aumento de 12% (1mg/L) e 15% (1,25 mg/L) de (N-NO_3^-) respectivamente (Quadro 21).

Quadro 21: Aumento na concentração de nitrato nas águas subterrâneas de Fortaleza, Ceará

	Arquivo de Dados (2001 a 2016) (mg/L de N-NO ₃)	Analisados (2020) (mg/L de N-NO ₃)	Aumento (mg/L de N-NO ₃)
MÉDIA	7,7	9,03	1,33
MODA	7,9	8,9	1
MEDIANA	7,9	9,15	1,25

Fonte: Autor, 2023

Os acréscimos nas concentrações de nitrato ocorreram em 55% (22) das amostras (Quadro 22), sendo os maiores acréscimos ocorrendo nas amostras P218, P249, P251 e P254, com aumento médio na concentração de 7,7 mg/L (N-NO₃⁻). Tais aumentos na concentração de nitrato podem estar relacionados ao crescimento desordenado da cidade, associada principalmente a falta de saneamento básico.

Quadro 22: Águas de poços onde foram observados aumento na concentração de nitrato

Poço	Arquivo de Dados (2001 a 2016) (mg/L de N-NO ₃)	Analisado (2020) (mg/L de N-NO ₃)	Aumento (mg/L de N-NO ₃)
P70	8,9	10,4	1,5
P166	9,2	11,7	2,5
P172	7,3	8,7	1,4
P177	11,4	12,8	1,4
P189	8,6	10,2	1,6
P191	8,5	10	1,5
P209	6,4	12,8	6,4
P210	2,3	6,8	4,5
P211	10,9	11,9	1
P213	6,9	9,5	2,6
P214	13,5	15,8	2,3
P218	7,4	15,3	7,9
P222	7,9	14,7	6,8
P226	7,5	10,5	3
P249	4,7	12,5	7,8
P251	6,7	14,6	7,9
P252	7,6	12,5	4,9
P254	1,4	8,9	7,5
P265	6,6	8,8	2,2
P269	2,1	6,3	4,2
P270	5,6	8,7	3,1
P292	7	12,3	5,3

Fonte: Autor, 2023

Em 32% (13) das amostras (Quadro 23), as concentrações de nitrato se mantiveram estáveis, em comparação com as mesmas amostras do arquivo de dados, com pequenas variações, em torno de 0,54 mg/L (N-NO₃⁻).

Quadro 23: Amostras de águas de poços com baixa variação na concentração de nitrato

Poço	Arquivo de Dados (2001 a 2016) (mg/L de N-NO ₃)	Analisado (2020) (mg/L de N-NO ₃)	Varição (mg/L de N-NO ₃)
P6	10,1	9,2	-0,9
P54	8,4	8,9	0,5
P56	7,3	8,2	0,9
P176	9,7	9,6	-0,1
P186	1,2	0,3	-0,9
P201	9,3	8,4	-0,9
P203	2,4	2,7	0,3
P217	2,9	3,1	0,2
P219	9,8	9,1	-0,7
P224	3,9	4,7	0,8
P228	8,9	9,6	0,7
P250	7,9	7,9	0
P280	10	9,1	-0,9

Fonte: Autor, 2023

Já em 13% (5) das amostras (Quadro 24) houve uma redução nas concentrações de nitrato, em comparação com as mesmas amostras do arquivo de dados, sendo observadas reduções de 1,9 mg/L (N-NO₃) (P206) a 12,6 mg/L (N-NO₃) (P229). Tais reduções podem ter ocorrido pela interrupção da fonte poluidora associado ao bombeamento dos poços e a recarga natural, diminuindo gradativamente ao longo do tempo a concentração do nitrato presente na água.

Quadro 24: Águas de poços onde foram observados reduções na concentração de nitrato

Poço	Arquivo de Dados (2001 a 2016) (mg/L de N-NO ₃)	Analisado (2020) (mg/L de N- NO ₃)	Varição (mg/L de N-NO ₃)
P65	14,2	7,8	-6,4
P206	14,6	12,7	-1,9
P208	8,3	3,5	-4,8
P229	13	0,4	-12,6
P309	7,9	0,4	-7,5

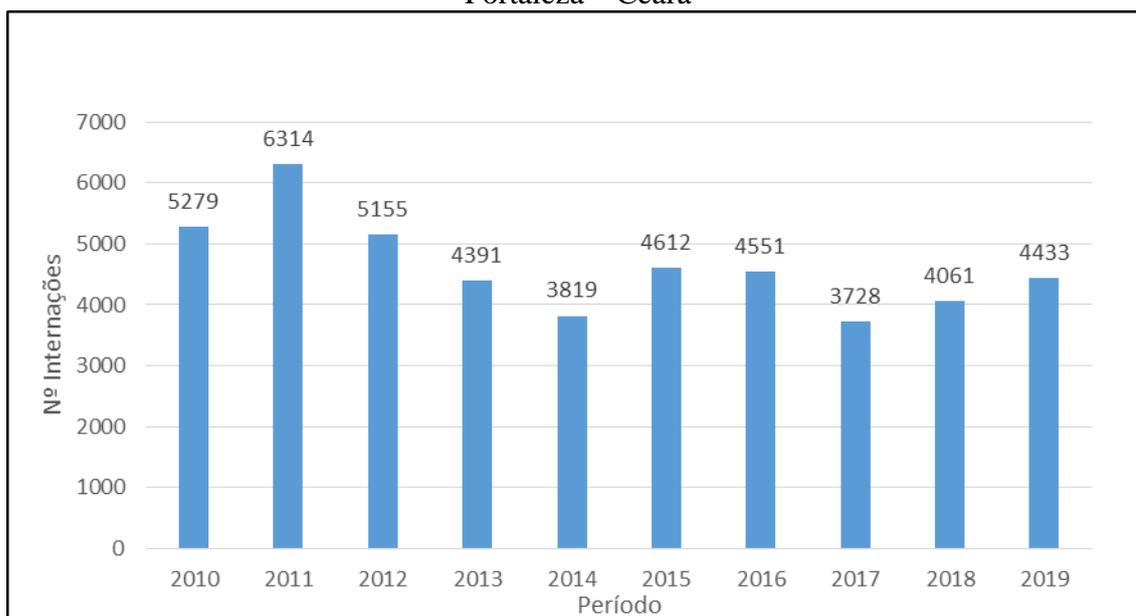
Fonte: Autor, 2023

Segundo Baird (2002), a detecção de compostos nitrogenados em seus diferentes estados de oxidação, aponta não só a contaminação das águas subterrâneas, mas também as condições precárias higiênico-sanitárias do ambiente. De acordo com Araújo (2001 apud VERNIER; HIRATA, 2000) os compostos menos oxidados, como por exemplo, o amônio mostra-se predominante próximo a sistemas sépticos ou vazamentos de tubulações de esgotos.

6.4 Riscos à saúde da população

Segundo a Secretaria de Saúde do Município de Fortaleza, não foram registrados casos de metehemoglobinemia ou câncer de estômago associados a ingestão de água contaminada por nitrato; porém, outras doenças como diarreias, dengue, leptospirose, malária e esquistossomose, associadas ao consumo de água contaminada e/ou a exposição a esgotos a céu aberto ocasionados pela falta de sistemas de saneamento básico são registradas anualmente no município. Conforme dados levantados pelo DATASUS (2021), no período de 2010 a 2019 ocorreram, anualmente, em média 4.634 internações correlacionadas a doenças de veiculação hídrica (Figura 47), com ápice em 2011 com 6.314 casos e o menor em 2017 com 3.728 casos, o que corresponde a uma incidência média de 16 internações para cada 10 mil habitantes, resultando em 22 mortes.

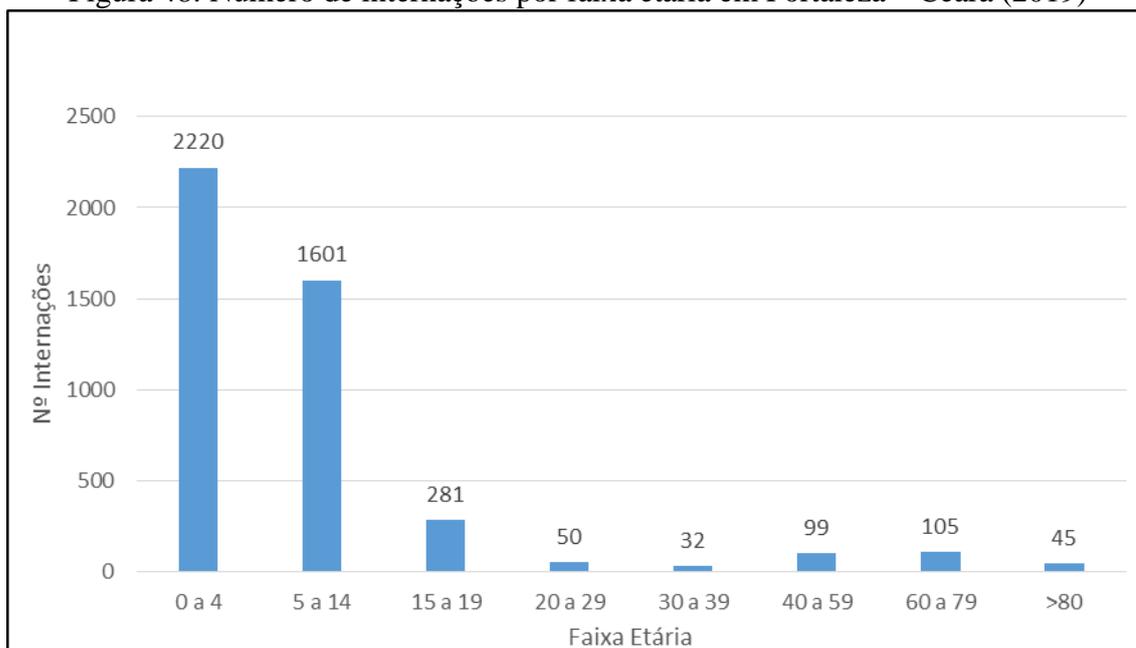
Figura 47: Número de internações (2010 a 2019) por doenças de veiculação hídrica em Fortaleza – Ceará



Fonte: DataSus, 2021

A população mais jovem de Fortaleza, principalmente as crianças e adolescentes de 0 a 14 anos, é a que mais sofre com a falta de saneamento básico, onde somente no ano de 2019 foram registradas 3821 internações de crianças até 14 anos relacionados a falta de água tratada e o contato com esgoto a céu aberto (DataSus, 2021), cerca de 86% das internações (Figura 48).

Figura 48: Número de internações por faixa etária em Fortaleza – Ceará (2019)

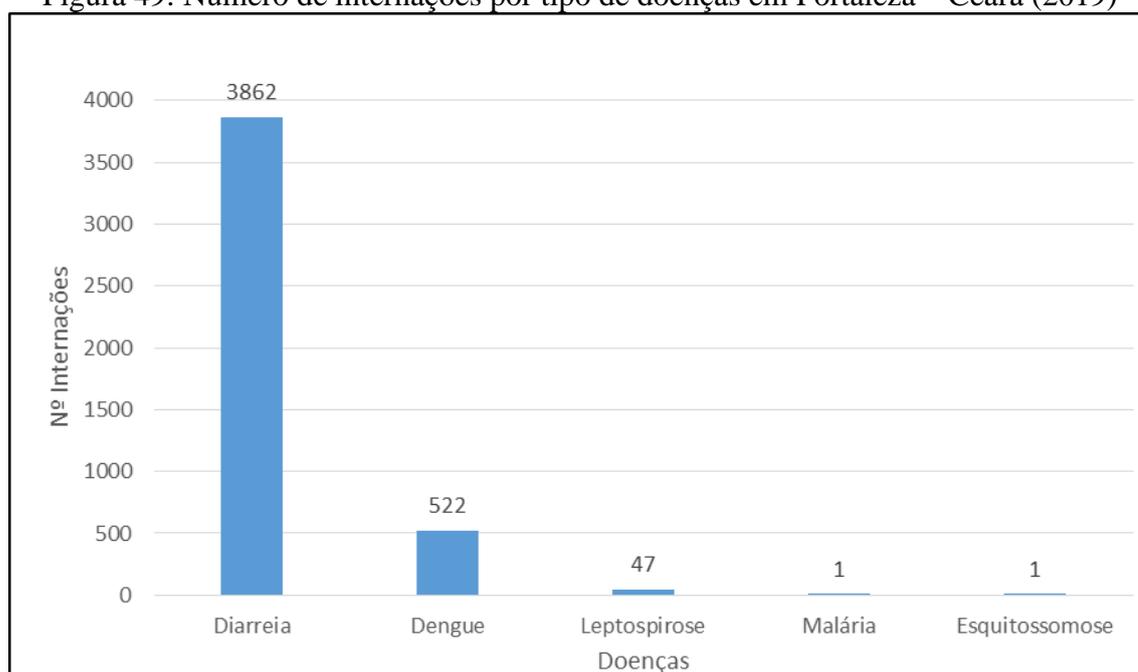


Fonte: DataSus, 2021

Das doenças de veiculação hídrica registradas no município de Fortaleza, segundo informações do DataSus (2021), a que mais impactou na saúde da população, causando o maior número de internações foi a diarreia, deixando 3.862 pessoas hospitalizadas no município, seguida da dengue (522 internações), leptospirose (47 internações) e a malária e esquistossomose (uma internação) (Figura 49).

Tais doenças, além de trazerem prejuízos a saúde da população, também trazem prejuízos aos cofres públicos, sendo gastos anualmente em torno de 2.000.000,00 (dois milhões de reais). Só no tratamento de casos de diarreia, são gastos aproximadamente R\$1,5 milhões (DATASUS, 2021).

Figura 49: Número de internações por tipo de doenças em Fortaleza – Ceará (2019)



Fonte: DataSus, 2021

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises físico-químicas realizadas nesta pesquisa, podemos concluir que, em vários pontos do município de Fortaleza, as águas subterrâneas encontram-se impróprias para consumo humano de acordo com a Portaria PRC nº 5, de 28 de Setembro de 2017, Anexo XX, do Ministério da Saúde, onde o nitrato ($N-NO_3$), corresponde ao contaminante mais presente na área.

Essa contaminação por nitrato está diretamente relacionada ao uso e ocupação do solo do município de Fortaleza, pois, de acordo com o levantamento bibliográfico junto com as observações de campo, mostraram que a área de pesquisa apresenta sérios problemas típicos de grandes centros urbanos, onde a falta de planejamento no desenvolvimento da cidade, o baixo investimento em saneamento básico, coleta e tratamento de lixo e efluentes domésticos, acabam criando um cenário prejudicial a qualidade das águas subterrâneas.

No que diz respeito a metodologia adotada para o cálculo do balanço hidroclimatológico, foi possível observar que no município de Fortaleza, as maiores precipitações ocorrem no período de fevereiro a junho, correspondendo ao período anual de recarga dos aquíferos, enquanto que no período de julho a dezembro ocorrem baixas precipitações atmosféricas promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real que, nesse período, praticamente se iguala a precipitação atmosférica, resultando em uma situação em que toda a água precipitada é evaporada.

Já a metodologia de distribuição de precipitação segundo os Polígonos de Thiessen permitiu a formação de polígonos regulares equipotenciais com relação a distribuição geográfica a partir dos 04 postos pluviométricos, sendo possível calcular a precipitação média anual (1.410,11 mm/ano) para o município de Fortaleza e, conseqüentemente, a parcela de água estimada (338,91 mm/ano) que pode infiltrar no subsolo, recarregando os aquíferos.

De acordo com as análises físico-químicas realizadas em águas de 40 poços, observa-se que em relação ao pH, são levemente ácidas, pH médio de 6, com 45% (18) das amostras (P54, P70, P166, P176, P177, P189, P191, P201, P210, P218, P222, P228, P259, P250, P251, P252, P265 e P270) localizadas predominantemente na porção oeste da área estão fora dos padrões de potabilidade, enquanto em relação ao sólidos totais dissolvidos 03 amostras (P6, P56 e P269) encontram-se fora dos padrões de potabilidade segundo a Portaria nº 888, de 4 de Maio de 2021, do Ministério da Saúde.

Em relação ao cloreto, 02 amostras, P6 com 271,9 mg/L e P56 com 307,9mg/L,

localizados na porção sul da área, apresentaram concentrações fora dos padrões de potabilidade. Podendo estas elevadas concentrações estar relacionadas ao baixo índice de saneamento básico existente na área, onde é comum a população fazer uso de fossas ou, até mesmo, despejar seus efluentes no solo formando esgotos a céu aberto.

Nos compostos nitrogenados, o nitrito foi o único que não apresentou concentrações fora dos padrões estabelecidos pela portaria, porém, em relação a amônia, 02 amostras ficaram fora dos padrões, sendo elas as P201 (2,6 mg/L) e P222 (1,73 mg/L), localizadas na porção oeste da área. Já o nitrato (N-NO_3^-) correspondeu ao contaminante com maior incidência nas águas subterrâneas, podendo ser encontrado em diferentes pontos da área de pesquisa com concentrações acima de 10 mg/L (N-NO_3^-), como pode ser observado pelas análises químicas, onde 16 amostras possuem valores acima do Valor Máximo Permitido (VMP) pela Portaria nº 888/2021 (10 mg/L N-NO_3^-), sendo o maior valor encontrado na amostra do poço P214 com 15,8 mg/L (N-NO_3^-).

Comparando as concentrações de nitrato encontradas nesta pesquisa (2020) com as análises das águas dos mesmos poços do arquivo de dados do LABHI/DEGEO/CC/UFC (2001 a 2016), observa-se que houve um acréscimo de 15% (1,25 mg/L N-NO_3^-) nas águas subterrâneas de Fortaleza, elevando sua concentração mediana para 9,15 mg/L (N-NO_3^-), tendo como base a comparação dos cálculos para a mediana das concentrações de nitrato observadas nas análises tanto do arquivo de dados (LABHI) como as realizadas nesta pesquisa.

Tais concentrações acima do VMP, bem como o aumento nas concentrações de nitrato em comparação com as análises do arquivo de dados, podem estar relacionados ao uso e ocupação do solo de forma desordenada associada a falta de saneamento básico e disposição inadequada de resíduos sólidos. Segundo o mapa da evolução urbana, observa-se que o município de Fortaleza apresentou nos últimos anos (1998 à 2018) um rápido crescimento urbano, porém, os investimentos em coleta de lixo e principalmente no saneamento básico, não acompanharam tal crescimento, sendo comum a ocorrência de disposições inadequadas de lixo e, de acordo com dados levantados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a taxa de cobertura de saneamento é de apenas 50%, forçando a parcela da população que não é atendida a utilizar fossas sépticas e/ou negras, gerando potenciais fontes de contaminação para as águas subterrâneas.

Em relação aos riscos à saúde da população, de acordo o DATASUS (2021), no município de Fortaleza, anualmente ocorrem em média 4.634 internações correlacionadas a doenças de veiculação hídrica, sendo a população mais jovem (0 a 14 anos) as que mais

sofrem, com 3.821 internações. Porém, a Secretaria de Saúde do Município não correlaciona essas doenças a ingestão de água contaminada por nitrato, mesmo sendo de amplo conhecimento que águas com elevadas concentrações de nitrato podem, sim, causar sérios danos à saúde de quem bebe essa água.

Diante do contexto apresentado nessa pesquisa, recomenda-se que o poder público realize mais investimentos em obras direcionadas ao setor ambiental, principalmente no que diz respeito ao saneamento básico, coleta e descarte de lixo em locais adequados e devidamente preparados para o recebimento desse material e planejar de forma organizada o crescimento da cidade, objetivando assim, reduzir ao máximo as potenciais fontes de contaminação não só da água subterrânea, mas do solo de uma forma geral, além de incentivar projetos de pesquisa visando o monitoramento qualitativo das águas, tendo assim, subsídios para o fornecimento de água de melhor qualidade, reduzindo os riscos de impactos negativos a saúde da população.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, V. M. **Mobilidade e expansão urbana na Região Metropolitana de Fortaleza: Da concentração a dispersão urbana.** In: EUSTÓGIO W. C. D.; COSTA M. C. L. (Org). Vulnerabilidade Sócioambiental na Região Metropolitana de Fortaleza. Edições UFC. Fortaleza: 2009. cap. 01, p. 99-136.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Consórcio Engecorps/Cobrape. **Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos.** Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional. Brasília, 2010a. v. 1.
- ALABURDA, J. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. **Revista de Saúde Pública**, v. 32 n. 2, p. 160-165, 1998.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; BARBOSA, M. C.; AZEVEDO, S. G. de; CARVALHO, A. M. de. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista de Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 32, n. 2, p. 53-61, 2011.
- ALMASRI, M.; KALUARACHCHI, J. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 211-229, 2007.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.** Washington: D.C. 1998.19.ed.
- ARAÚJO, A. L.; LEAL, S. E. C. **Aspectos qualitativos das águas subterrâneas do município de Fortaleza – CE.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 1990.
- ARAÚJO, K. V. **Aspectos hidrogeológicos e hidroquímicos nos bairros Benfica, José Bonifácio, Fátima e Jardim América – Fortaleza, Ceará.** Monografia (Graduação em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.
- ARBUCKLE, T. E. Water nitrates and CNS birth defects: A population-based case-control study. **Archives of Environmental Health**, n. 43, v. 2, p. 162-167, 1988.
- ASCHENGRAU, A.; ZIERLER, S., COHEN, A. Quality of community drinking water and the occurrence of spontaneous abortion. **Archives of Environmental Health**, v. 44, n. 5, p. 283-290, 1989.
- BARROS, M. V. F. **Análise Ambiental Urbana: Estudo Aplicado à cidade de Londrina – PR.** Tese (Doutorado em Geografia) Universidade de São Paulo: São Paulo, 1998.
- BEZERRA, A. D. A.; ROCHA, J. C.; NOGUEIRA, E. R.; ARAÚJO, F. G. D. M.; FARIAS, M. K.; BRANDÃO, M. G. A.; PANTOJA, L. D. M. Teor de nitrato em águas subterrâneas da Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará: um alerta. **Revista Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 38, n. 2, p. 129-136, 2017.

BIANCHI, L.; PADILHA, M.W.M.; TEIXEIRA, J. E. M. **Recursos de Água Subterrânea na RMF, Fatores condicionantes**. In: Plano de aproveitamento dos recursos hídricos da R.M.F - Fase I. Fortaleza: SEPLAN-AUMEF, 1984.

BIASOLI, W. M. **Água e Saúde**. Editora Livros Técnicos. Fortaleza: 2000. 224 p.

BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde Ambiental: Índices de Nitrato em Águas Subterrâneas de Poços Profundos na Região Sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, Cascavel, v. 14, n. 20, p. 153-175, 2012.

BRANDÃO, R.L. Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR. **Diagnóstico geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza**. 1. ed. Fortaleza/CE: SER/REFO/CPRM, 1995.

BRAGA B., Hespanhol L, Conejo J.G.L, Barros M.T.L, Spencer M., Porto M., Nucci N., Juliano N., Eiger S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 1. Ed. Prentice Hall, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

BRASIL. **Sistema de informações de águas subterrâneas - SIAGAS**. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Disponível em:
<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php>

BRASIL. **Portaria Nº 888, de 4 de Maio de 2021**. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. **Banco de dados do sistema Único de Saúde – DATASUS**. Ministério da Saúde. Disponível em: <http://www.datasus.gov.br>.

BUKOWSKI, J.; SOMERS, G.; BRYANTON, J. Agricultural contamination of groundwater as a possible risk factor for growth restriction or prematurity. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 43, n. 4, p. 377-383, 2001.

CABRAL, N.M.T. Teores de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) nas águas do aquífero barreiras nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal – Belém/PA. **Química Nova**, v, 30, No. 8, 1804-1808, 2007.

CARNEIRO, F. de A. **Evolução do uso e ocupação do campo de dunas do Morro Santa Terezinha, Fortaleza/CE**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2009.

CASTANY, G. **Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas**. Editora Omega S.A. Barcelona. Espanha. 738 p, 1975.

CAVALCANTE, I.N. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará**. Tese (Doutorado em Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAVALCANTE, I. N.; GOMES, M. da C. R. As Águas Subterrâneas do Ceará: Ocorrências e Potencialidades. In: Medeiros, C. N. de; Gomes, D. D. M.; Albuquerque, E. L. S.; Cruz, M. L. B. da (Org.). **Os Recursos Hídricos do Ceará: Integração, Gestão e Potencialidades**. Fortaleza: IPECE, Seção III. p. 165-199, 2011.

CESARINO, A. **Seleção de materiais para remediação de aquíferos contaminados por nitrato através de barreiras reativas**. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2002.

CRESPIM, R. C. E. **Qualidade das Águas Subterrâneas Rasas: Estudo de Caso no Distrito de Icoaraci – PA**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 2017.

CHAPELLE, F.H. **Ground-water microbiology and geochemistry**. 2. ed. John Wiley & Sons. 477 pp. 2000.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO- CETESB. **Relatório das águas subterrâneas do Estado de São Paulo: 2004-2006**. São Paulo: CETESB, 2007.

COSTA, S. A. **Qualidade das águas subterrâneas freáticas nos bairros Monte Castelo, Parqueândia, Alagadiço/São Gerardo e Vila Éllery – Fortaleza, Ceará**. Monografia (Graduação em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**. 2ª. ed. Barcelona: Omega. vol. 2. 1983.

DIAS, A.C.A. **Análise e Identificação da Origem de Contaminação dos Recursos Hídricos no Concelho de Salvaterra de Magos**. Mestrado (Mestrado em Geologia Aplicada/Especialização em Hidrogeologia) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências – Departamento de Geologia, 2016.

DORSCH, M. M. et al Congenital malformations and maternal drinking water supply in rural South Australia: A case-control study. **American Journal of Epidemiology**, v. 119, n.4, p. 473-486, 1984.

DOURADO, J. **Jangurussu passou 20 anos em atividade**. Publicado em 28/07/2009. Disponível em: <<http://www.juscelinodourado.com.br>>

EMBRAPA - **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Humberto Gonçalves dos Santos. 5ª. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FAO. **Toxicological evaluation of certain food additives and contaminants**. Roma: WHO, 1996. (WHO Food Additives Series, n. 35). Disponível em: <<http://www.who.int/foodsafety/publications/monographs/en/>>

FEITOSA F.A.C. & MANOEL FILHO J. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM, Fortaleza, 3ª Edição. 835 p. 2008.

FENZL, N. **Processos geoquímicos que determinam a composição química das águas naturais**. In: Fenzl, N.; Ramos, J. F. (Org.). Introdução à Hidrogeoquímica. 1. ed. Belém: Universidade Federal do Pará. cap. 02. p. 33-46. 1988.

FERNICOLA, N. G. G.; AZEVEDO, F. A. Metahemoglobinemia e nitrato nas águas. **Revista de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2. p. 242- 248. 1981.

FOLLET R.F. 1989. **Nitrogen management and ground water protection**. Elsevier, Amsterdam. p. 35-75. 1989.

FORTALEZA. **Lei de Uso e Ocupação do Solo N° 7.987/96**. Consolidação elaborada pela CNDU – COURB – SEINF. Atualizada em Agosto de 2010, contendo as Leis de alteração e Decretos de regulamentação de novas atividades. Fortaleza. 240 p. 2010.

FOSTER S.S.D. & Hirata R. **Determination del riesgo del contamination de aguas subterranas: uma metodologia baseada en datos existentes**. 2ª edição. Centro Panamericano de Ingenieria y Ciencias del ambiente, Peru. 81 p. 1988.

FRASER, P.; CHILVERS, C. Health aspects of nitrate in drinking water. **Science of the Total Environment**, v. 18, p. 103-116, 1981.

FREEZE R.A. & CHERRY J.A. **Groundwater**. Prentice Hall, Nova Jérsei, EUA. 604 p. 1979.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE/ FUNASA. **Manual de Saneamento**. 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde. 408 p. 2007.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE/ FUNASA. **Manual de controle de qualidade de água para técnicos que trabalham em ETAS**. Ministério da Saúde – Brasília: Funasa. 112 p. 2014.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS/FUNCEME. **Monitoramento dos postos pluviométricos do Ceará**. 2023. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/rede-de-monitoramento/postos-pluviometricos>>

FUJIWARA, N. et al Study on the relationship between plasma nitrite and nitrate level and salt sensitivity in human hypertension. **Circulation**, v. 101, n. 8, p. 856-861. 2000.

GADELHA, F.J; Verificação da presença de nitrito em águas de consumo humano da comunidade de várzea do cobra em Limoeiro do Norte-CE. **Ciências Exatas e da Terra**. 57^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - Fortaleza/CE, Universidade Estadual do Ceará, 2005

GOMES, M. A. S.; SOARES, B. R. Reflexões sobre a qualidade ambiental urbana. **Estudos Gráficos**, Rio Claro, v. 2, n.2, p. 21-30. 2004.

GOMES, M. da C. R. **Qualidade das águas subterrâneas e superficiais no Campus Universitário do Pici (Fortaleza, Ceará)**. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 122 p. 2006

GOMES, M. C. R. **Análise Situacional Qualitativa sobre as Águas Subterrâneas de Fortaleza, Ceará – Brasil como subsídio à Gestão dos Recursos Hídricos**. Tese (Doutorado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 193 p. 2013.

GUITARRARA, Paloma. "**Fortaleza**"; **Brasil Escola**. 2021. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/fortaleza.htm>>.

HIRATA R. **Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiriça, Bauru**. São Paulo, DAE/Igc-USP, 2000.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 32-46. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Senso demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ/IPECE. **Perfil Básico do Município de Fortaleza**. 2022. Disponível em: <<http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>>

KAMINISHIKAWAHARA, K. K.; KOZAKA, M.; UYETA, M. Y.; JESUS, M. R.; OHMUR, M. L. **Contaminação por nitrato do aquífero de Bauru em meio urbano**. Trabalho Acadêmico (Graduação em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 33 f. 2011.

KEENEY D. R. 1987. Sources of nitrate to ground water. *Critical Reviews in Environmental Control*. 16:257-304. 1987.

KÖPPEN, W. **Climatologia, com um estúdio de los climas de la tierra**. Version de Pedro R. Hendrichs, Fondo de Cultura Econômica, México, 478 p. 1948.

LABORATÓRIO DE CLIMATOLOGIA/UFC. **Celina: Planilha de cálculo**, versão 1,0. Departamento de Geografia, Centro de Ciências. Fortaleza, 2022.

LANDIM, P.M.B. **Análises Estatística de Dados Geológicos**. 1ª ed. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 226p. 1998.

LEMOS, E. C. L.; MEDEIROS, F.W. **Águas subterrâneas e as doenças de veiculação hídrica. Área piloto: Bairros Bom Jardim e Granja Portugal. Município de Fortaleza - Ceará**. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 95 f. 2006.

LEMOS, E. C. L. **A qualidade das águas subterrâneas no município de Fortaleza – CE**. Monografia (Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 50 f. 2010.

LEMOS, E. C. L. **Análise Integrada dos Efeitos da Expansão Urbana nas Águas Subterrâneas do Município de Fortaleza - CE**. Tese (Doutorado em Geociência) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 199 f. 2013.

LERNER, D.; ISSAI, A.; SIMMERS, I. Groundwater Recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. **International Association of hydrogeologist**. Hanover, vol. 8, 345p. 1990.

MAIA, J.T.V. **A qualidade das águas subterrâneas, a exclusão sanitária e seus impactos na saúde pública no bairro de Messejana, Fortaleza-Ceará**. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 90 p. 2008.

MANASSARAM, D.M; BACKER, L.C; MOLL, D.M. A Review of nitrates in drinking water: maternal exposure and adverse reproductive and developmental outcomes. **Journal of Environmental Health**. 114:320-327. 2006

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, cap. 02. p. 53-75. 2008.

MATTA, M. A. S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica). Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. Belém. 2002.

MELO, V. Y. B. **Características hidrogeológicas e físico-químicas das águas subterrâneas dos bairros Joaquim Távora, Dionísio Torres e São João do Tauape, Fortaleza/CE**. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 76 f. 2008.

MILITÃO, C., **Estudo do Ciclo do Azoto, uma aplicação para o ensino**. Departamento de Botânica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2004.

MORAIS, J.B.A.; SAMPAIO, T. de Q.; SALES, J.W.M. **Projeto Fortaleza. Hidrogeologia e controle tecnológico nas perfurações de poços tubulares no município de Fortaleza - CE**. Relatório Final. Fortaleza/CE. DNPM/CPRM. vol.1, textos e mapas. 208 p. 1984

NASCIMENTO, T. S.; PEREIRA, R. O. L.; MELLO, H. L. D.; COSTA, J. Metemoglobinemia: do diagnóstico ao tratamento. **Revista Brasileira de Anestesiologia**, Rio de Janeiro, v. 58, n. 6, p. 651-664. 2008

NAVAL, L. P; COUTO, T. C. **Remoção de nitrogênio amoniacal em efluentes de sistemas anaeróbios**. *In*: AIDIS; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Avanzando hacia los Objetivos de Desarrollo del Milenio en el marco de la ingeniería sanitaria ambiental. Asunción, AIDIS Paraguay, p.1-5. 2005

NIESINK, R. J. N.; VARIES, J. D.; HOLLINGER, M. A. **Toxicology principles and applications**. Boca Raton: CRC Press. 648 p. 1995.

OLIVEIRA, M. R. B de. **O crescimento urbano e o risco à poluição das águas subterrâneas freáticas no entorno da lagoa da Parangaba, Fortaleza – Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 130 f. 2013

OLIVEIRA, R. M. **Qualidade das águas subterrâneas nos bairros Montese, Vila União, Parreão, Bom Futuro e Damas – Fortaleza, Ceará.** Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 100 f. 2012

ONU, ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS. **Perspectivas da Urbanização Mundial.** 2010. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/>>

PELIGGI, F., HIRATA, R., ARANDA, N., CONICELLI, B. Support method for interpretation of regional groundwater monitoring in urban áreas. **Revista: Brazilian Journal of Geology.** v. 52, nº 2. 2021.

PEREIRA, J. S. **A Problemática dos Recursos Hídricos em Algumas Bacias Hidrográficas Brasileiras.** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS. Porto Alegre. 26 p. 1999.

PEREIRA, S. **A Qualidade das Águas subterrâneas e as doenças de veiculação hídrica nos Bairros da Barra do Ceará, Cristo Redentor e Pirambu, Fortaleza – Ceará.** Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 105 f. 2008.

PHELPS, G.G., **Chemistry of Ground Water in the Silver Springs Basin, Florida, with Emphasis on Nitrate.** U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report nº 2004-5144, 54p. 2004.

POHLING, R.; SANTIAGO, M. F.; TORQUATO, J. R.; GARRETT, L. **Estudo da qualidade da água de Fortaleza.** In: POHLING, R. (Org.). Estudos Hidrológicos do Nordeste. Serie: monografias. Fortaleza: BNB, vol. 3. p. 7-72. 1981.

POHLING, R. **Reações Químicas na Análise de Água.** Fortaleza: Arte Visual, 2009.

PREUSSMAN, R.; STEWART, B. W. N-nitroso carcinogens. In: SEARLE, C. E. (Ed.). Chemical carcinogens. Washington: ACS. 1984. p. 643-828.

QUESADO JUNIOR, N. **Contribuição da hidrogeologia à problemática das doenças de veiculação hídrica em Fortaleza, Ceará.** Dissertação (Mestrado em Geologia), Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001. 96 f.

QUESADO JUNIOR, N. **Avaliação de parâmetros físicos e hidrodinâmicos dos aquíferos do município de Fortaleza, Estado do Ceará.** Monografia (Especialização em Gestão de Recursos Hídricos e de Infraestrutura Hidráulica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 70 f. 2008.

ROMANELLI, C.; ABIKO, A. K. **Processo de Metropolização no Brasil.** São Paulo: EPUSP. 34p. 2011.

SABADIA, J. A. B. **Impacto del vertedero de Jangurussu en los recursos hídricos de la ciudad de Fortaleza (Estado de Ceará, Brasil).** Tese (Doutorado em Hidrogeologia) - Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 292 f. 2001.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3^a ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. cap. 05. p. 325-357.

SANTOS, G. O. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149. 2010.

SCHUBERT, C. Public response to elevated nitrate in drinking water wells in Wisconsin. **Archives of Environmental Health**, v. 54, n. 4, p. 242-247. 1999.

SILVA, A. B. da. **Inventário Hidrogeológico do Nordeste - Folha Nº 5 Fortaleza - SO**. Ministério do Interior/SUDENE. Recife, PE. 1970.

SILVA, L. C. M.; BROTTTO, M. E. **Nitrato em água: ocorrência e consequência**. 2014. Disponível em: <http://www.creasp.org.br/institucional/meio_ambiente>.

SILVA NETO, R. C. da. **Características físico-químicas das águas subterrâneas nos Bairros Aerolândia, Engenheiro Luciano Cavalcante, Jardim das Oliveiras e Cidade dos Funcionários, Fortaleza - CE**. Monografia (Graduação em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 71 f. 2010.

Sistema Nacional de Informação Sobre o Saneamento/SNIS 2021. **Série Histórica**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel>>.

SOUZA, A. K. P. de. **Qualidade das águas subterrâneas na região circunvizinha ao lixão do Jangurussu, Fortaleza – Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 98 f. 2002.

SOUZA, L. C. de. **A Efetividade da proteção das águas subterrâneas no Brasil**. *In*: Congresso Brasileiro do Magistério Superior da Associação dos Professores de Direito Ambiental do Brasil - Aprodab, 8. Congresso de Direito Ambiental da PUC-Rio, 1. 2002, Rio de Janeiro. PUC, 2010.

TAJRA, A. A. **Aspectos técnico-construtivos dos poços tubulares e a legislação pertinente**. Área Piloto de Fortaleza-Ceará. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001. 109 f.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, n.7, p. 1082-1089. 1911.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. **Publications in Climatology**, v. 3, nº 1, 104p. 1955.

TUCCI, C. E. M. **Inundações e drenagem urbana**. *In*: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (orgs.). Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: ABRH, p. 45-129. 2003.

United States Environmental Protection Agency/USEPA. **Nitrogen Control (manual)**. Technomic Publishing Company. p:35-36. 1994.

VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. **Revista Águas Subterrânea**, São Paulo, 2002. v. 16, n. 16, p. 97-104.

VASCONCELOS, S. M. S. Estimativa da Recarga Subterrânea a partir do Balanço Hídrico – Exemplo de Fortaleza, (CE). **Revista de Geologia**, Fortaleza, 1994. v.7., p. 27 - 34.

VASCONCELOS, S. M. S. **Recarga do Aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza - CE**. Tese (Doutorado em Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 100f. 1999.

VILELLA, S. M. 1975. **Hidrologia Aplicada**. Editora MC. GRAW–HILL Ltda. 245p. 1975.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WARD, M. H. Drinking water nitrate and the risk of non-Hodgkin's lymphoma. **Epidemiology**, v. 7, n. 5, p. 465-471. 1996.

WARD, M. H. Workgroup report: Drinking-water nitrate and health - Recent findings and research needs. **Environmental Health Perspectives**, 2005. v. 113, n. 11, p. 1607-1614.

WARD, M. H. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 2018.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: WHO, 2011. 541 p.
Disponível em:
<http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf>.

ZALDÍVAR, R. Nitrate fertilizers as environmental pollutants: Positive correlation between nitrates (NaNO and KNO) used per unit area and stomach cancer mortality rates. **Experientia**, v. 33, n. 2, p. 264-265. 1977.