



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
POSPETRO – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOQUÍMICA:
PETRÓLEO E MEIO AMBIENTE**

RODOLFO SANTOS GASSER

**VULNERABILIDADE E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE
NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA**

Salvador

2017

RODOLFO SANTOS GASSER

**VULNERABILIDADE E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE
NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente - POSPETRO da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geoquímica do Petróleo e Ambiental

Orientador: Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz
Co-Orientador: Dr. Manuel Vítor Portugal Gonçalves

Salvador

2017

RESUMO

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, na região centro-norte da Bahia, no contexto geológico da Formação Salitre, no domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilutitos, calcissiltitos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas. O objetivo principal do estudo é avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação natural do aquífero cárstico Salitre, no município de Cafarnaum, para isso usou-se a metodologia COP. Além da vulnerabilidade, buscou-se a caracterização hidroquímica, identificando os principais constituintes químicos presentes e identificar os possíveis fatores naturais e antropogênicos influentes na qualidade das águas subterrâneas. A metodologia deste estudo utiliza métodos hidroquímicos, hidrodinâmicos e estatísticos/geoestatísticos para compreender as condições hidrogeoquímicas, além do uso de imagens de satélites para a individualização das feições cársticas. Foram coletadas amostras de água retiradas de 31 poços tubulares distribuídos no município, com o uso da sonda multiparâmetros, foram medidos in situ os parâmetros físico-químicos: pH, EH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido. No laboratório, foram determinados os íons NO_3^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , Ba^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Zn^{+2} , e K^+ , utilizando-se de técnicas fluorimétricas, titrimétricas e espectrofométricas. Para a distribuição espacial dos resultados hidroquímicos foram confeccionados mapas de pontos, utilizando o método de krigagem ordinária. Para a classificação do tipo de água, foi utilizado o diagrama triangular de Piper, para o diagnóstico da água para irrigação, foi usado o diagrama SAR. Os aquíferos cársticos são especialmente vulneráveis à contaminação devido a sua pouca profundidade, a alta velocidade do fluxo de água, a sua conexão direta com a superfície e a sua recarga através de formas de absorção abertas. Para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero cárstico à contaminação através da metodologia COP, levam-se em consideração três parâmetros hidrogeológicos: concentração do fluxo, camadas sobrepostas e regime de precipitação. A análise do mapa de vulnerabilidade intrínseca a contaminação, permitiu a delimitação de 4 classes de vulnerabilidade na área: muito alta (12,5% - 70,20 km²), alta (0,5% - 2,0 km²), moderada (32,7%, 183,30 km²) e baixa (54,4%, 305,70 km). A individualização das feições cársticas e de sua área de influência é o fator que teve um papel significativo para a delimitação da classe de vulnerabilidade muito alta. O aquífero é livre e anisotrópico, com direção preferencial de fluxo potenciométrico SW – NE. Foram obtidos valores mais elevados que os valores máximos permitidos para os seguintes elementos: cálcio, nitrato, magnésio, sólidos totais dissolvidos, sulfato, cloreto, fluoreto e sódio. O mecanismo de dissolução das rochas e o processo evaporação controlam a mineralização da água. Os resultados obtidos mostraram que as águas estudadas classificam-se de maneira geral como sulfatas ou cloretadas e águas cálcicas ou magnesianas, consideradas de risco alto a muito alto de salinidade e risco baixo a médio de sódio. A detecção de elevadas concentrações de NO_3^- , em regiões com alta densidade populacional, sugere a contaminação por efluentes domésticos, justamente pela falta de esgotamento sanitário em grande parte do município.

Palavras-chave: Aquífero Salitre, Vulnerabilidade, Hidroquímica, Aquífero Cárstico, Metodologia COP.

ABSTRACT

The Salitre karst aquifer is located in the Carbonic Basin of Irecê, in the north-central region of Bahia, in the geological context of the Salitre Formation, in the Una Group domain. It consists of thick sequences of calcarenites, calcilitites, calcissiltites and dolomites intercalated, sometimes with subordinate terrigenous sequences, constituted by siltstones, sandstones, siltstones, laminations and marls. The main objective of the study is to evaluate the intrinsic vulnerability to the natural contamination of the karst aquifer Salitre, in the municipality of Caparnaum, for which the COP methodology was used. In addition to the vulnerability, the hydrochemical characterization was identified, identifying the main chemical constituents present and identifying the possible natural and anthropogenic factors influencing the quality of the groundwater. The methodology of this study uses hydrochemical, hydrodynamic and statistical / geostatistical methods to understand hydrogeochemical conditions, as well as the use of satellite images for the individualization of karstic features. Samples of water collected from 31 wells distributed in the city were collected using the multiparameter probe. The physical-chemical parameters were measured in situ: pH, EH, electrical conductivity, dissolved solids, temperature, turbidity and dissolved oxygen. In the laboratory, the NO_3^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , Ba^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Zn^{+2} , e K^+ ions were determined, fluorimetric, titrimetric and spectrophotometric techniques. For the spatial distribution of the hydrochemical results point maps were made using the ordinary kriging method. For the classification of the type of water, the Piper triangular diagram was used to diagnose water for irrigation, the SAR diagram was used. Karstic aquifers are especially vulnerable to contamination due to their shallow depth, the high velocity of water flow, their direct connection to the surface and their recharge through open forms of absorption. For the evaluation of the natural vulnerability of the karstic aquifer to the contamination through the POP methodology, three hydrogeological parameters are considered: flow concentration, overlapping layers and precipitation regime. The analysis of the vulnerability map intrinsic to the contamination allowed the delimitation of 4 classes of vulnerability in the area: very high (12.5% - 70.20 km²), high (0.5% - 2.0 km²), moderate 32.7%, 183.30 km²) and low (54.4%, 305.70 km²). The individualization of the karstic features and their area of influence is the factor that played a significant role in the delimitation of the very high vulnerability class. The aquifer is free and anisotropic, with preferential direction of potentiometric flow SW - NE. Higher values were obtained than the maximum permitted values for the following elements: calcium, nitrate, magnesium, total dissolved solids, sulphate, chloride, fluoride and sodium. The mechanism of rock dissolution and the evaporation process control the mineralization of water. The results obtained showed that the studied waters are generally classified as sulfates or chlorinated and calcium or magnesian waters, considered as high to very high risk of salinity and low to medium risk of sodium. The detection of high concentrations of NO_3^- , in regions with high population density, suggests the contamination by domestic effluents, due to the lack of sewage in a large part of the municipality.

Keywords: Salitre aquifer, Vulnerability, Hydrochemistry, Karstic aquifer, COP methodology.

SUMÁRIO

| | | |
|-----------------|--|------------------|
| <u>1</u> | <u>INTRODUÇÃO</u> | <u>6</u> |
| <u>2</u> | <u>OBJETIVOS</u> | <u>8</u> |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 8 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 8 |
| <u>3</u> | <u>METODOLOGIA EMPREGADA</u> | <u>9</u> |
| 3.1 | PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CADASTRAMENTO DE POÇOS | 9 |
| 3.2 | DADOS PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE | 9 |
| 3.3 | PESQUISA DE CAMPO E AMOSTRAGEM | 10 |
| 3.4 | ANÁLISES LABORATORIAIS | 11 |
| 3.5 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS | 13 |
| 3.6 | PROCESSAMENTO DE DADOS E CONSTRUÇÃO DE MAPAS | 13 |
| 3.7 | INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS | 14 |
| <u>4</u> | <u>AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA A CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA</u> | <u>15</u> |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 4.2 | ÁREA DE ESTUDO | 16 |
| 4.2.1 | Geologia | 18 |
| 4.2.2 | Solos | 21 |
| 4.2.3 | Hidrogeologia | 22 |
| 4.3.2 | Dados para análise da vulnerabilidade | 28 |
| 4.4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 28 |
| 4.4.1 | Feições cársticas e declividade | 29 |
| 4.4.2 | Concentração do fluxo (Fator C) | 29 |
| 4.4.3 | Camadas de proteção (Fator O) | 31 |
| 4.4.4 | Regime de precipitação (Fator P) | 32 |
| 4.4.5 | Índice COP | 32 |
| 4.5 | CONCLUSÕES | 33 |
| <u>5</u> | <u>CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA</u> | <u>36</u> |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 36 |
| 5.2 | ÁREA DE ESTUDO | 37 |
| 5.2.1 | Geologia | 38 |
| 5.2.2 | Solos | 41 |
| 5.2.3 | Hidrogeologia | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 45 |
| 5.3.1 | Pesquisa bibliográfica e cadastramento de poços | 45 |
| 5.3.2 | Pesquisa de campo e amostragem | 45 |
| 5.3.3 | Análises laboratoriais | 47 |
| 5.3.4 | Análise estatística dos resultados | 48 |
| 5.3.5 | Processamento de dados e construção de mapas | 49 |
| 5.3.6 | Interpretação dos resultados | 49 |
| 5.4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 5.4.1 | Caracterização hidroquímica | 50 |
| 5.4.2 | Análise dos componentes principais (PCA) | 61 |
| 5.4.3 | Mecanismos que controlam a geoquímica das águas subterrâneas | 63 |
| 5.4.4 | Classificação hidroquímica | 63 |
| 5.4.5 | Qualidade das águas subterrâneas para irrigação | 66 |
| 5.5 | CONCLUSÕES | 68 |
| 6 | <u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u> | 71 |
| | <u>REFERÊNCIAS</u> | 75 |
| | <u>APÊNDICES</u> | 81 |
| | APÊNDICE A – Valores utilizados para os parâmetros do método COP | 81 |
| | APÊNDICE B – Mapas de distribuição dos parâmetros hidroquímicos | 83 |

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural imprescindível à vida no planeta, sendo empregado como insumo básico para a maioria das atividades econômicas, principalmente para a agricultura. Cerca de 3% da água do planeta é doce, sendo que a água subterrânea perfaz cerca de 30% desse número, sendo 69% situada em geleiras e calotas polares, e menos 1% de águas superficiais. Nas últimas décadas, o consumo da população mundial de água subterrânea vem aumentando exponencialmente, junto com a preocupação da sociedade com a degradação da mesma.

A composição química das águas subterrâneas depende da natureza das rochas pelas quais flui, do tempo de residência da água dentro do sistema e das condições climáticas prevaletentes do local (BAKALOWICZ, 1995; MUDRY, 1987). Do ponto de vista hidrogeológico, a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo. A disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos para determinados tipos de uso depende, da qualidade físico-química, biológica e radiológica (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Aproximadamente 20 a 25% da população mundial dependem parcialmente ou totalmente de recursos hídricos proveniente de aquíferos cársticos (FORD; WILLIAMS, 2007) e devido às características especiais dos sistemas cársticos, a qualidade desta água pode ser facilmente degradada como resultado de impactos antrópicos (IVÁN; MÁDL-SZŐNYI, 2017).

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, localizado na região centro-norte do estado da Bahia, no contexto geológico dos carbonatos da Formação Salitre, Domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilitos, calcissiltitos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas.

O aquífero Salitre é muito importante para a população rural do município de Cafarnaum, já que partes destas comunidades são abastecidas exclusivamente pelas águas subterrâneas do aquífero estudado. Além do abastecimento público, essas águas são usadas para a irrigação e dessedentação animal, sendo considerado um recurso estratégico para o município.

As regiões cársticas são áreas de enorme interesse econômico e hidrogeológico, dado que, possuem solos férteis, não apresentam drenagem superficial, exibem relevo pouco acidentado, possuem valiosas reservas de água no subsolo e têm grande importância ambiental. O aquífero cárstico é oriundo do resultado da dissolução de rochas carbonáticas por águas ligeiramente ácidas que se infiltram nas rochas através da presença de uma drenagem de sentido

predominantemente vertical e subterrânea seguindo fraturas, condutos e cavernas. Embora existam muitas pesquisas e trabalhos em diversas regiões cársticas do mundo, seus resultados não podem ser extrapolados ou aplicados para todos os sistemas cársticos conhecidos, uma vez que as suas características geomorfológicas e hidrogeológicas variam de um lugar a outro (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

O aquífero Salitre é anisotrópico, com condutividade hidráulica variável, sendo considerado um aquífero livre e com grande capacidade de recarga e elevada velocidade de fluxo subterrâneo através da rápida recarga pelas feições cársticas, fazendo com que a água passe diretamente da zona não saturada para a zona saturada sem sofrer os efeitos da filtração natural, tornando-o particularmente vulnerável a contaminação. A baixa profundidade da zona saturada e espessura dos solos são fatores que aumentam a vulnerabilidade desse aquífero.

Vrba; Zaporozec (1994) definem a vulnerabilidade como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade do mesmo aos impactos humanos e/ou naturais. A vulnerabilidade de um aquífero é caracterizada por meio dos seguintes fatores naturais: a) acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes, b) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação ao poluente na zona não saturada e, c) a diluição e a remobilização dos contaminantes (FOSTER et al., 2002). A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é decorrente das propriedades físico-químicas inerentes do meio aquífero que expressa a susceptibilidade hidrogeológica da água em ser afetada por contaminantes (MAIA; CRUZ, 2011).

Para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero cárstico a contaminação, leva-se em consideração quatro fatores naturais: concentração de fluxo, camadas de proteção, regime de precipitação e, desenvolvimento da carste. A metodologia COP, desenvolvida por Vías et al. (2006), usada para avaliar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero Salitre em Cafarnaum, considera três parâmetros hidrogeológicos: concentração do fluxo (C), camadas de proteção (O), e precipitação (P).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do estudo é avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação natural do aquífero cárstico Salitre, no município de Cafarnaum.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Caracterizar hidrogeoquimicamente o aquífero cárstico Salitre no Município de Cafarnaum, Bahia;
- II. identificar os possíveis fatores naturais e antropogênicos influentes na qualidade das águas subterrâneas;
- III. elaboração de mapas de vulnerabilidade intrínseca, mapas para cada parâmetro hidroquímico e um potenciométrico;
- IV. diagnosticar, por meio de dados hidrogeoquímicos, a situação atual do aquífero e relacioná-lo com os dados de vulnerabilidade para a avaliação de possíveis alterações;
- V. comparar os dados hidroquímicos obtidos na pesquisa com os valores de referência estabelecidos pela legislação brasileira.

3 METODOLOGIA EMPREGADA

A concepção metodológica deste estudo integra dados para a análise da vulnerabilidade, dados hidroquímicos, dados hidrodinâmicos e dados estatísticos/geostatísticos para compreender o grau de vulnerabilidade intrínseca, as condições hidrogeoquímicas, evolução e grau de contaminação das águas pertencentes ao aquífero Salitre no município de Cafarnaum.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CADASTRAMENTO DE POÇOS

Consistiu no levantamento bibliográfico de trabalhos teórico e técnico-descritivo realizado através da busca de dados e informações disponíveis em livros, teses, artigos e periódicos científicos. Cadastro de poços perfurados do aquífero estudo, distribuídos pela superfície territorial da área estudada, para a obtenção de dados hidrodinâmicos e hidroquímicos cedidos pela Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia (CERB), pelo Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Durante essa etapa, o meio físico da área de estudo, será descrita através de dados espaciais (unidades geológicas, mineralizações associadas, morfologia, vegetação, tipos de solo, área) e não espaciais (qualidade da água, nível estático, nível dinâmico, vazão, tipos de culturas, quantidades de água explorada, etc.).

3.2 DADOS PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE

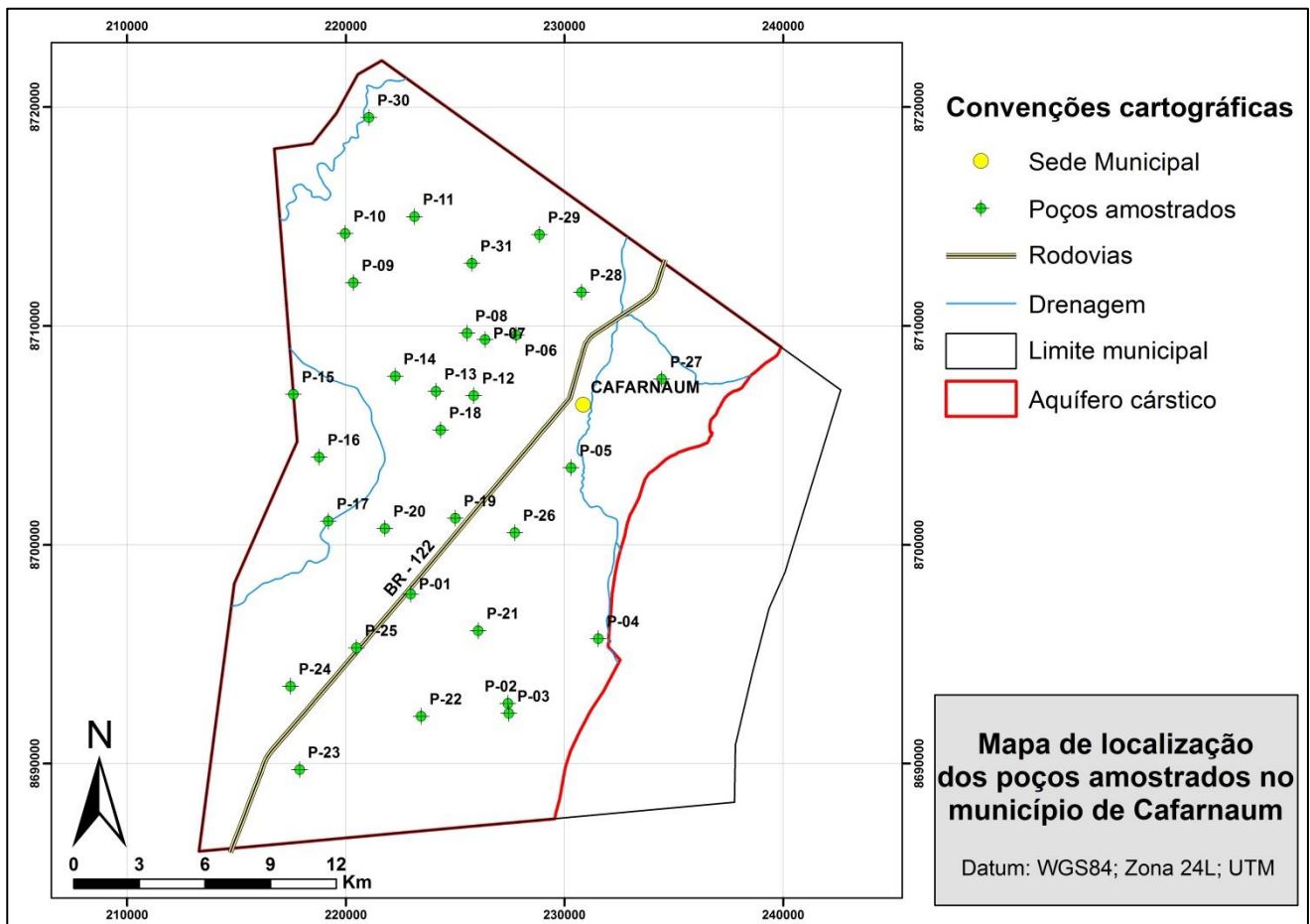
Para a avaliação da vulnerabilidade através do método COP foram usados dados de 48 poços tubulares do município de Cafarnaum. Para os dados relacionados ao fator C, a individualização das feições cársticas e da cobertura vegetal foi realizado por meio de imagens do banco de dados do software ArcGIS 10.1. Os dados relacionados à declividade da área foram retirados através do mapa de declividade produzido por meio do software ArcGIS 10.1, com base no modelo digital do terreno (MDT), a partir de imagens de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), projeto Topodata. Para os dados relacionados ao fator O, todos serão retirados das fichas técnicas dos poços disponíveis no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM). Os dados relacionados ao fator P serão retirados através do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), que disponibiliza séries históricas da quantidade de

precipitação diária durante um determinado período de tempo. No Apêndice A estão representados os valores utilizados para os fatores.

3.3 PESQUISA DE CAMPO E AMOSTRAGEM

A pesquisa de campo foi realizada entre os dias 20 e 26 de novembro de 2016, onde foi realizado o reconhecimento da área, identificação e localização dos 31 poços tabulares analisados, assim como, a verificação das possíveis fontes de contaminação do aquífero estudado (Figura 1). A água foi coletada após ser expurgada e bombeada por cerca de 20 minutos, tempo suficiente para renovar a água do poço.

Figura 1 - Mapa de localização dos poços tubulares analisados no município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

Foram efetuadas medidas *in situ* de parâmetros físico-químicos, tais quais, pH, eH, turbidez, temperatura, salinidade, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e sólidos totais dissolvidos (STD) utilizando a sonda multiparâmetros Horiba modelo U-52G

(Quadro 1). Além disso, foram coletadas 93 amostras de água in natura para a realização de análises hidroquímicas. As amostras de água subterrânea coletadas para análises hidroquímicas foram armazenadas em recipientes de polietileno de 0,5 e 1,0 litro, devidamente lavados e descontaminados em laboratório, acondicionadas e mantidas refrigeradas em caixa de isopor térmico até o envio para laboratório. As amostras para a análises dos constituintes principais foram previamente filtradas em campo utilizando-se filtros de porosidade 0,45 μm .

Para evitar alterações físico-químicas ou biológicas nas amostras d'água até a chegada ao laboratório, fez-se necessário a utilização de 5 ml de HNO_3 , mantendo-as refrigeradas. As técnicas de amostragem e preservação das amostras seguiram as orientações técnicas especializadas do APHA, 1995 (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*).

Quadro 1 - Parâmetros físico-químicos medidos em campo

| Parâmetro | Equipamento | Faixa | Precisão |
|--------------------|----------------|----------------------------------|------------------------------|
| pH | Horiba - U-52G | 0 a 14 | ± 0.1 pH |
| ORP | | -2000 a +2000 mV | ± 15 mV |
| OD | | 0 a 50,0 mg L^{-1} | $\pm 0,5$ mg L^{-1} |
| CE | | 0.0 a 99.9 $\mu\text{S cm}^{-1}$ | $\pm 1\%$ |
| STD | | 0 a 100 g L^{-1} | ± 5 g L^{-1} |
| Temperatura | | - 5° a 55° C | $\pm 0.3 + 0.005$ |

Fonte: Gorgen, 2010

3.4 ANÁLISES LABORATORIAIS

Durante esta etapa foram realizadas as análises hidroquímicas das 93 amostras colhidas no campo, incluindo duplicatas. Os parâmetros hidroquímicos analisados foram:

- (i) ânions de, nitrato, sulfato e fosfato pelo método de Espectrofotometria UV/IS realizadas no Laboratório do Plasma, do Instituto de Geociências/UFBA(Quadro 2);

Quadro 2 - Ânions medidos por Espectrofotometria UV/IS e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Ânions | LQ | Unidade |
|----------------|-------|--------------------|
| Nitrato | 0,1 | mg L^{-1} |
| Sulfato | 0,1 | mg L^{-1} |
| Fosfato | 0,001 | mg L^{-1} |

- (ii) ânions de fluoreto pelo método Colorimétrico SPANDS (Quadro 3);

Quadro 3 - Ânions medidos por Colorimétrico SPANDS e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Ânions | LQ | Unidade |
|-----------------|------|--------------------|
| Fluoreto | 0,02 | mg L ⁻¹ |

- (iii) cloreto, alcalinidade e bicarbonato pelo método Titrimétrico no Laboratório do Plasma, do Instituto de Geociências/UFBA e;
- (iv) cátions de Ca, Mg, Na, K, Al, Sr, Fe, Cu, Pb, Zn, Ba, Ni e Mn pelo método de Espectrometria de Absorção Atômica realizados no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo do Estado da Bahia (CEPED – SECTI), no Laboratório de absorção e emissão atômica (Quadro 4).

Quadro 4 - Cátions medidos por Espectrometria de Absorção Atômica e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Cátions | LQ | Unidade |
|-----------------------|------|--------------------|
| Alumínio (Al) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Bário (Ba) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Cálcio (Ca) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Chumbo (Pb) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Cobre (Cu) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Estrôncio (Sr) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Magnésio (Mg) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Manganês (Mn) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Ferro (Fe) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Níquel (Ni) | 0,02 | mg L ⁻¹ |
| Sódio (Na) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Zinco (Zn) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Potássio (K) | 1,00 | mg L ⁻¹ |

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Parâmetros convencionais como média aritmética, mediana e desvio padrão foram calculados para todos os dados analisados através do software BioEstat 5.0.

Para a escolha do método estatístico mais adequado, foi executado o teste de normalidade de Shapiro-Wilks no software BioEstat 5.0, onde a obtenção do resultado maior que 0,05 indica uma normalidade nos dados da amostra. Diante dos resultados, observou-se que quase todas as amostras ficaram abaixo de 0,05, portanto provém de uma população sem normalidade, sendo denominado não-paramétricos. Por esse motivo o método mais adequado e escolhido para essa pesquisa foi a Análise dos Componentes Principais (PCA) realizado pelo software Statistica 10.0.

3.6 PROCESSAMENTO DE DADOS E CONSTRUÇÃO DE MAPAS

O tratamento geoestatístico foi feito a partir da interpolação dos dados do índice de vulnerabilidade, dados hidroquímicos e elaboração de mapas de distribuição hidroquímica dos elementos. Para tal será utilizou-se o software ArcGIS 10.1 com o auxílio da ferramenta Geostatistical Analyst através do método de Krigagem Ordinária. O mapas para cada parâmetro hidroquímico estão no Apêndice B.

Para a classificação do tipo químico das águas subterrâneas de acordo com o conteúdo iônico dominante, resultante da interação água-rocha, foi gerado o diagrama triangular de Piper (1944), utilizando os softwares Qualigraf (MOBUS, 2003) e Diagrammes.

Após os resultados das análises químicas e físico-químicas, foram utilizadas diretrizes para determinar a qualidade das águas nos pontos analisados. Para tal, utilizou-se prioritariamente a Portaria MS 2914/2011 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e a Resolução CONAMA 396/2008 (BRASIL, 2008), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e outras providências, por serem as normativas mais recentes em uso na legislação brasileira. Para os demais elementos que não apresentam parâmetros de Valor Máximo Permitido (VMP) nas portarias supracitadas, utilizou-se a Guidelines for Drinking-water Quality (WHO, 2011), que promovem recomendações da Organização Mundial de Saúde para o gerenciamento de riscos e perigos que podem comprometer a segurança da água potável.

Os mapas foram construídos através dos softwares ArcGIS 10.1 por meio do SIG, tais quais: mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero, mapa potenciométrico e mapas de distribuição de cada parâmetro hidroquímico.

3.7 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Após obter os resultados analíticos das 31 amostras das águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum, foram confeccionados arquivos de dados em planilhas do Excel, onde foram desenvolvidos tabelas e gráficos. Também foi utilizado o software ArcGis 10.1 para a confecção de mapas de distribuição de valores de pH, CE, STD, alcalinidade, fluoreto, fosfato, nitrato, sulfato, cloreto, cálcio, sódio, potássio, magnésio e bário. Tais mapas auxiliam na compreensão e na espacialização dos dados em relação à área. Ademais foram produzidos tabelas e gráficos que juntamente com as medições e observações feitas em campo possibilitaram a elaboração desta dissertação.

A interpretação dos resultados foi realizada, através da análise crítica do estudo cartográfico, utilizando o programa ArcGIS 10.1, para a análise dos mapas de vulnerabilidade e de risco de contaminação do aquífero, por meio da sobreposição.

4 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA A CONTAMINAÇÃO DO AQUIFERO CÁRSTICO SALITRE NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA

Resumo:

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, na região centro-norte da Bahia, no contexto geológico da Formação Salitre, no domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilutitos, calcissiltitos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas. O objetivo principal do estudo é avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação natural do aquífero cárstico Salitre, no município de Cafarnaum, para isso usou-se a metodologia COP. Os aquíferos cársticos são especialmente vulneráveis à contaminação devido a sua pouca profundidade, a alta velocidade do fluxo de água, a sua conexão direta com a superfície e a sua recarga através de formas de absorção abertas. Para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero cárstico à contaminação através da metodologia COP, levam-se em consideração três parâmetros hidrogeológicos: concentração do fluxo, camadas sobrepostas e regime de precipitação. A análise do mapa de vulnerabilidade intrínseca a contaminação, permitiu a delimitação de 4 classes de vulnerabilidade na área: muito alta (12,5% - 70,20 km²), alta (0,5% - 2,0 km²), moderada (32,7%, 183,30 km²) e baixa (54,4%, 305,70 km²). A individualização das feições cársticas e de sua área de influência é o fator que teve um papel significativo para a delimitação da classe de vulnerabilidade muito alta.

4.1 INTRODUÇÃO

As regiões cársticas são áreas de enorme interesse econômico e hidrogeológico, dado que, possuem solos férteis, não apresentam drenagem superficial, exibem relevo pouco acidentado, possuem valiosas reservas de água no subsolo e têm grande importância ambiental. O aquífero cárstico é oriundo do resultado da dissolução de rochas carbonáticas por águas ligeiramente ácidas que se infiltram nas rochas através da presença de uma drenagem de sentido predominantemente vertical e subterrânea seguindo fraturas, condutos e cavernas. Embora existam muitas pesquisas e trabalhos em diversas regiões cársticas do mundo, seus resultados não podem ser extrapolados ou aplicados para todos os sistemas cársticos conhecidos, uma vez que as suas características geomorfológicas e hidrogeológicas variam de um lugar a outro (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Aproximadamente 20 a 25% da população mundial dependem parcialmente ou totalmente de recursos hídricos proveniente de aquíferos cársticos (FORD; WILLIAMS, 2007) e devido às características especiais dos sistemas cársticos, a qualidade desta água pode ser facilmente degradada como resultado de impactos antrópicos (IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017).

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, localizado na região centro-norte do estado da Bahia, no contexto geológico dos carbonatos da Formação Salitre,

Domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilitos, calcissiltos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas.

O aquífero estudado é muito importante para a população rural do município de Cafarnaum, já que partes destas comunidades são abastecidas exclusivamente pelas águas subterrâneas do aquífero estudado. Além do abastecimento público, essas águas são usadas para a irrigação e dessedentação animal, sendo considerado um recurso estratégico para o município.

O aquífero Salitre é anisotrópico, com condutividade hidráulica variável, sendo considerado um aquífero livre e com grande capacidade de recarga e elevada velocidade de fluxo subterrâneo através da rápida recarga pelas feições cársticas, fazendo com que a água passe diretamente da zona não saturada para a zona saturada sem sofrer os efeitos da filtração natural, tornando-o particularmente vulnerável a contaminação. A baixa profundidade da zona saturada e espessura dos solos são fatores que aumentam a vulnerabilidade desse aquífero.

Vrba e Zaporozec (1994) definem a vulnerabilidade como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade do mesmo aos impactos humanos e/ou naturais. A vulnerabilidade de um aquífero é caracterizada por meio dos seguintes fatores naturais: a) acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes, b) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação ao poluente na zona não saturada e, c) a diluição e a remobilização dos contaminantes (FOSTER et al., 2002). A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é decorrente das propriedades físico-químicas inerentes do meio aquífero que expressa à susceptibilidade hidrogeológica da água em ser afetada por contaminantes (MAIA; CRUZ, 2011).

Para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero cárstico a contaminação, leva-se em consideração quatro fatores naturais: concentração de fluxo, camadas de proteção, regime de precipitação e, desenvolvimento da carste. A metodologia COP, desenvolvida por Vías et al. (2006), usada para avaliar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero Salitre em Cafarnaum, considera três parâmetros hidrogeológicos: concentração do fluxo (C), camadas de proteção (O), e precipitação (P).

4.2 ÁREA DE ESTUDO

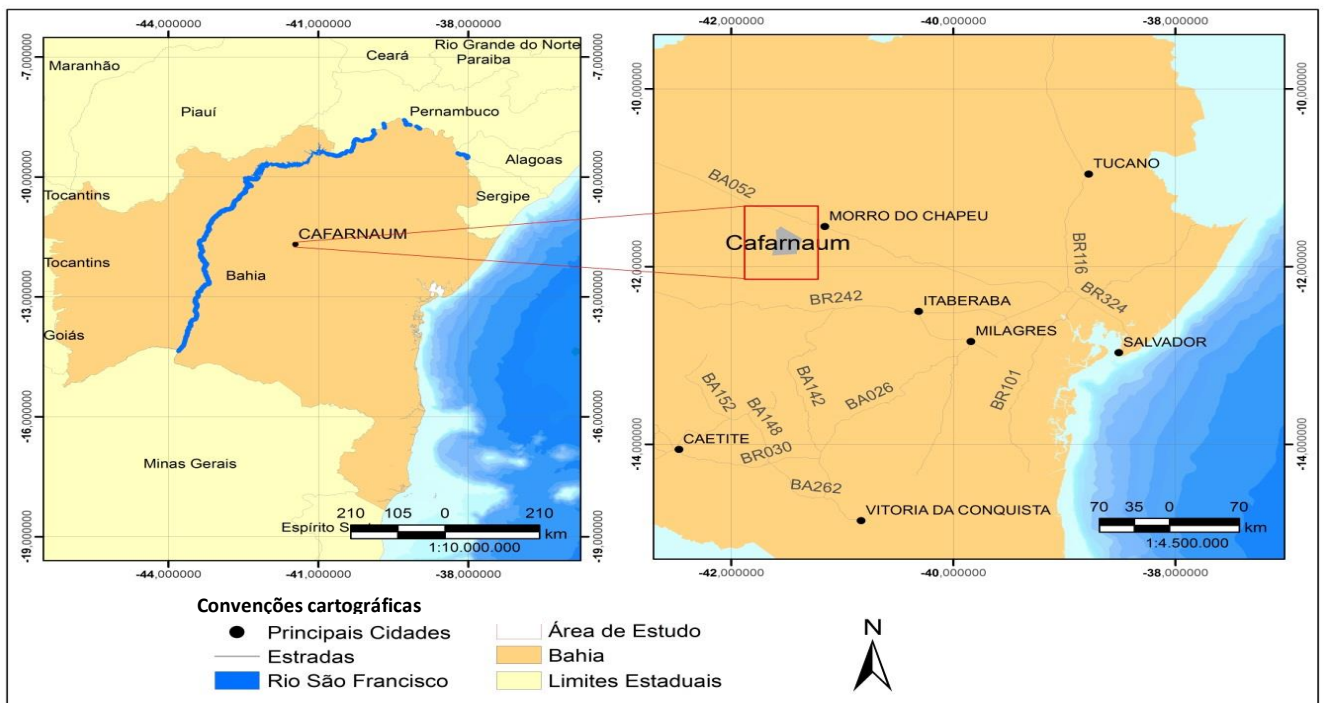
A área de estudo pertence ao município de Cafarnaum, que está situado no centro norte do estado da Bahia, faz parte da microrregião de Irecê e da mesorregião do Centro-norte baiano

(Figura 2).

O município possui uma área com cerca de 927,491 km² e uma população total estimada em 17.209 habitantes (IBGE, 2010). Cafarnaum localiza-se entre as coordenadas 11° 41' 37" sul e 41° 28' 06" oeste, estando a uma altitude de 770 metros, limitando-se a norte com os municípios de Morro do Chapéu e América Dourada, a leste com o município de Bonito, a oeste com o município de Canarana e a sul com o município de Mulúngu do Morro.

Situa-se a 430 km de Salvador, o principal acesso ao município é efetuado através da rodovia BR-324 até o entroncamento com a BA-052, seguindo pela BA-052 até o entroncamento com a BR-122 e chegando a sede municipal.

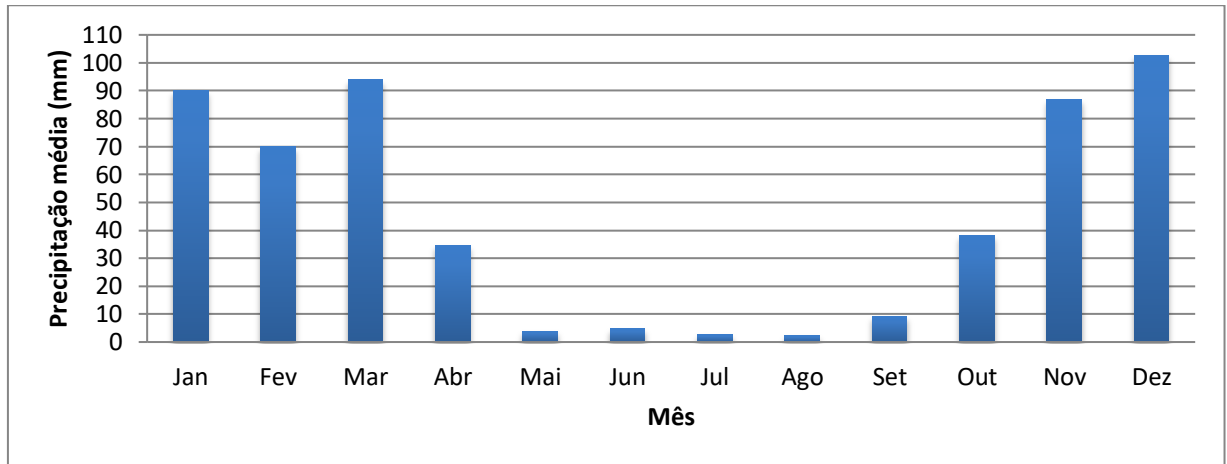
Figura 2 - Localização do município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

A área de estudo está situada na faixa climática do semiárido conforme a Superintendência de Estudos Econômicos (SEI, 2011), com uma pluviosidade média anual de 503,3 mm, com período chuvoso de novembro a março e temperatura média anual de 22,2 °C. Do ponto de vista local, o regime pluviométrico da região, observado em postos pluviométricos instalados na área estudada, referente ao período de 1964 a 1991, revela que os meses com maior índice pluviométrico têm valores de precipitações médias mensais oscilando entre 69 e 102 mm (Figura 3). A partir do mês de abril e prolongando-se até o mês de outubro os índices pluviométricos são reduzidos, com variação média mensal inferiores a 40 mm.

Figura 3 - Diagrama ilustrando os valores médios da precipitação medida nos postos pluviométricos do município de Cafarnaum no período de 1964 a 1991



Elaboração: O autor. Fonte dos dados: ANA, 2017

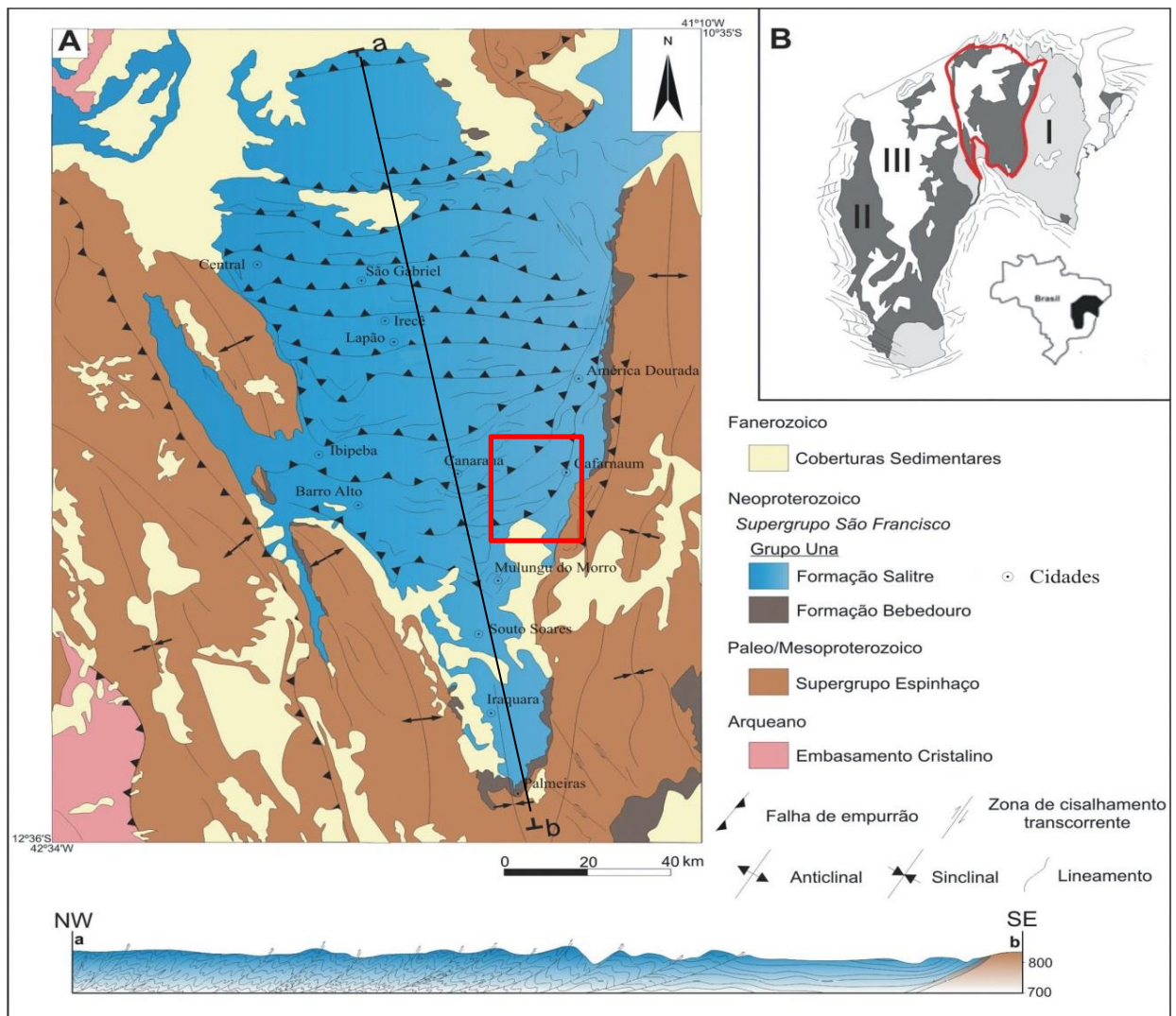
4.2.1 Geologia

A área de trabalho situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, por sua vez, inserida na porção norte do Cráton do São Francisco, definido por Almeida (1977) como uma entidade geotectônica consolidada no Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico), cujos limites foram redefinidos por Alkimim et al. (1993). Afloram na bacia as rochas do Complexo Xique-Xique (embasamento cristalino), de idade Paleoproterozoica, seguido por rochas do Supergrupo Espinhaço, de idade Mesoproterozoica, e do Supergrupo São Francisco de idade Neoproterozoica, além da presença de Coberturas Fanerozoicas Tércio-Quaternárias (INDA; BARBOSA, 1978) (Figura 4).

O Complexo Xique-Xique é formado por itabiritos e quartzitos com intercalações de cherts (INDA; BARBOSA, 1978) e ocorre a noroeste e sudoeste da Bacia de Irecê.

O Supergrupo Espinhaço, com espessura superior a 2000m, ocorre no entorno da Bacia de Irecê representado pelo grupo Paraguaçu, composto por pelitos e psamitos, e Grupo Chapada Diamantina, dividido da base para o topo na Formação Tombador (metarenitos, quartzitos conglomeráticos e conglomerados); Formação Caboclo (metassiltitos e metargilitos com intercalações de metarenitos) e Formação Morro do Chapéu (metarenitos estratificados com lobos sigmoidais). Conforme Pedreira (1994), na região da Chapada Diamantina tais unidades integram quatro grandes sequências deposicionais, sedimentadas em um sistema do tipo rift-sag.

Figura 4 - Mapa e perfil geológicos simplificados da Bacia de Irecê e adjacências, mostrando a área em estudo no retângulo vermelho. (B) Cráton do São Francisco e faixas marginais



Fonte: Santos, 2017

O Supergrupo São Francisco é constituído pelos grupos Bambuí e Una (INDA; BARBOSA, 1978), este último com ocorrência na Bacia de Irecê e unidade que aflora no município de Cafarnaum. O Grupo Una, de acordo com Pedreira et al. (1987), é composto pela Formação Bebedouro na base e Formação Salitre no topo, esta última objeto de estudo dessa dissertação.

A Formação Bebedouro é constituída por diamictitos, pelitos e arenitos, estratificados e maciços, depositados sob influência glacial (DOMINGUEZ, 1996; GUIMARÃES, 1996; FIGUEIREDO, 2008). Ocorre em superfície de maneira localizada e descontínua, restrita às

bordas da bacia, delimitando os Supergrupos Espinhaço e São Francisco através de uma discordância angular regional.

Recobrando os sedimentos glaciogênicos da Formação Bebedouro, houve a introdução gradativa de um clima semiárido que possibilitou a deposição de uma espessa sucessão carbonática plataformal da Formação Salitre, tendo sido depositada em uma bacia formada no contexto de um mar epicontinental (DOMINGUEZ, 1993). Ocupa a maior parte da Bacia de Irecê e é constituída fundamentalmente por calcilutitos e calcarenitos, podendo conter níveis de arenitos, margas, siltitos e pelitos. Estas últimas representam importantes ocorrências de barita, conhecidas, sobretudo, na borda leste da bacia e hospedadas em unidades contendo pseudomorfos nodulares de gipsita (SOUZA et al., 1993).

4.2.1.1 Formação Salitre

A Formação Salitre, objeto de estudo desta dissertação, foi inicialmente chamada de Calcáreo Salitre por Branner (1911), relacionado à localidade onde foi encontrada, no vale do rio Salitre, na Bahia. Sendo a primeira descrição como um conjunto de rochas predominantemente carbonáticas, com níveis de pelitos, considerada como um depósito de plataforma estável.

Misi, (1979); Pedreira et al. (1987) e Sampaio et al. (2001), descreveram a Formação Salitre como uma formação constituída por espessas sequências de calcarenitos, calcilutitos, calcissiltitos e dolomitos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas constituídas por silexites, arenitos, siltitos, laminitos e margas. Os sedimentos carbonáticos (calcários e dolomitos) da Formação Salitre podem alcançar espessuras superiores a 1.000m (MISI, 1993).

Utilizando métodos de datação radiométrica por Rb/Sr, Neves et al.,(1980); Macedo; Bonhome (1984), chegaram a uma idade de 760 Ma para as rochas da Formação Salitre, ou seja, idade Neoproterozoica.

Misi (1979) subdividiu a Formação Salitre em cinco unidades informais, chamando-as, da base para o topo, de unidades C, B, B1, A e A1. Já Souza et al. (1993) a subdividiram em três unidades ,da base para o topo, de Unidades Nova América, Jussara e Irecê e foram interpretadas como pertencentes a quatro ciclos de sedimentação. Na Unidade Nova América ocorreu dois ciclos regressivos e nas Unidades Jussara e Irecê foram registrados dois ciclos transgressivos.

Nessa artigo adotou-se a nomenclatura e subdivisão estabelecida por Bomfim et al. (1985) e Pedreira et al. (1987), que propuseram subdividir a Formação Salitre em quatro

unidades, representando fácies carbonáticas distintas e assim representadas da base para o topo: Unidades Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê (Quadro 5). Foram relacionadas pelo autor três ciclos de sedimentação, sendo dois transgressivos e um regressivo.

Quadro 5 - Características litológicas e interpretação sedimentológica da Formação Salitre

| FORMAÇÃO | UNIDADE | LITOLOGIA | ESTRUTURAS SEDIMENTARES | INTERPRETAÇÃO |
|---------------------------|-----------------|--|--|---|
| SALITRE 100 - 240m | Irecê | Calcilutito Marga Calcarenito Arenito Siltito Sílex | Laminação plano- paralela | Talude proximal e distal. Sedimentação em <i>ponds</i> |
| | Jussara | Calcirrudito Calcarenito intraclástico Calcissiltito Calcilutito Arenito Siltito | Oncólitos Estratificação plano-paralela e <i>herring bone</i> | Submaré e localmente intermaré |
| | Gabriel | Calcarenito intraclástico Calcissiltito Calcilutito | Laminação cruzada <i>Bird's eyes</i> Ondulações com intraclastos Lenticularidade | Intermaré a submaré sujeito a tempestades |
| | Nova América | Laminito algais Dolomitos Argilitos Sílex | Tapetes algais Intraclastos Laminação cruzada Ondulações Lenticularidade <i>Bird's eyeys</i> <i>Tepees</i> | Intermaré a submaré com exposição subaérea periódica (supramaré) |

Fonte: Sampaio, 2001

4.2.2 Solos

Os solos que recobrem o aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum são: Latossolo Vermelho Eutrófico e o Cambissolo Háptico Ta Eutrófico.

A caracterização e descrição dos solos da região foram realizadas com base no Boletim de Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos da Margem Direita do Rio São Francisco - Estado da Bahia (Boletim Técnico nº 52 da Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária – EMBRAPA), incorporado ao Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Verde e Jacaré, Margem Direita do Lago de Sobradinho da Secretaria de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, (BAHIA, 1995).

a) Latossolo Vermelho Eutrófico

Compreende solos com horizonte B latossólico, não hidromórficos, de coloração da matriz avermelhada. Suas dificuldades naturais para o cultivo agrícola são corrigidas com o uso da água subterrânea.

b) Cambissolo Háptico Ta Eutrófico

Os Cambissolos são tipos de solos rasos e bem drenados, que guardam nos seus horizontes vestígios do material de origem, apresentam uma matriz avermelhada e textura argilosa ou muito argilosa.

4.2.3 Hidrogeologia

Os aquíferos cársticos são sistemas complexos do ponto de vista hidrogeológico, onde as condições de circulação das águas subterrâneas são muito dependentes da capacidade de dissolução das rochas carbonáticas e de sua densidade de fraturamento associada. A principal característica do aquífero cárstico é a presença dominante da porosidade secundária resultante dos processos de carstificação (GUERRA, 1986).

O processo de carstificação é influenciado pela quantidade e qualidade química da água, clima e fatores geológicos (estratigráficos, estruturais e petrológicos). As fissuras e falhas desempenham um importante papel nos processos de carstificação, recarga, circulação e armazenamento da água subterrânea, e podem ser expandidas através da dissolução das rochas. Essa expansão produz condutos em que a circulação da água se dá por meio de fluxos turbulentos.

As características dos processos de infiltração, recarga e escoamento superficial dos calcários, apresentam comportamentos peculiares, dificultando a determinação do balanço hídrico em aquíferos cársticos através da aplicação de fórmulas empíricas. De acordo com o grau de carstificação que o aquífero exhibe, a infiltração se faz basicamente por meio das feições cársticas (dolinas, sumidouros e a rede fissural), com elevada velocidade de fluxo em que o aquífero responde de forma imediata às precipitações.

Guerra (1986) caracterizou o comportamento hidrogeológico do aquífero cárstico Salitre como sendo de grande capacidade de recarga e elevada velocidade de fluxo subterrâneo, sobretudo através da rápida percolação da água por meio das formas de absorção do aquífero, como sumidouros, dolinas e fraturas. Nossa (2011) classificou o aquífero cárstico Salitre como anisotrópico, com condutividade hidráulica variável de acordo com a densidade de fraturas, podendo ser considerado como um aquífero livre, em função da baixa espessura dos solos na área e que descontinuidades laterais e verticais da transmissividade, pode ocasionar a formação de aquíferos isolados.

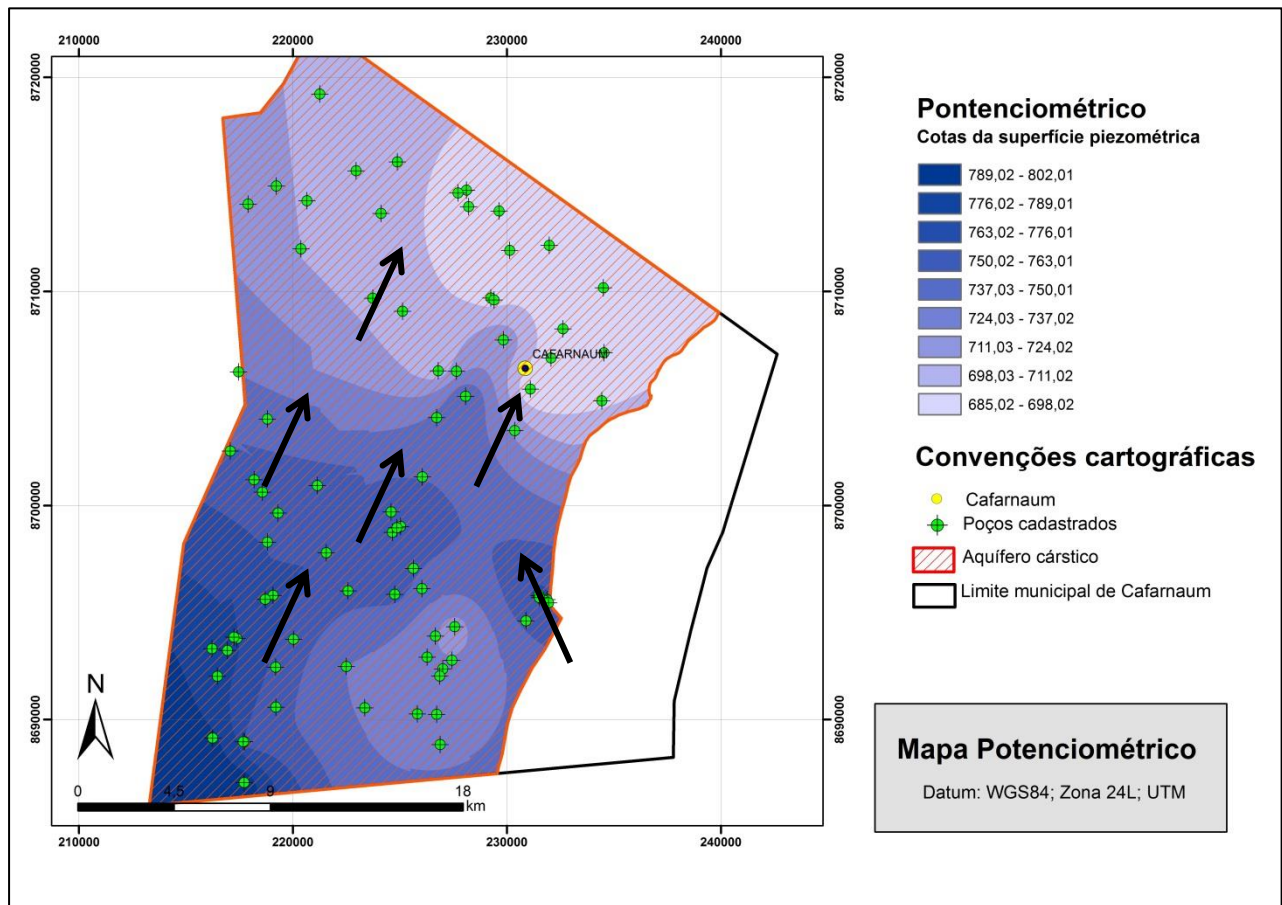
Foram selecionados 78 poços oriundos do banco de dados do SIAGAS que continham as informações necessárias para a elaboração do mapa potenciométrico preliminar do aquífero estudado. As curvas piezométricas foram geradas com os valores da diferença entre as medidas de altitude, ou seja, a cota do poço no terreno, e a profundidade do nível estático, que é distância da superfície do terreno ao nível de água dentro do poço. O mapa foi produzido através do software ArcGIS 10.1 por interpolação através do método de krigagem.

A direção do fluxo subterrâneo preferencial do aquífero estudado no município de Cafarnaum com direção SW – NE, que corrobora com o fluxo descrito por Guerra (1986). Outra direção de fluxo foi identificada na área central do aquífero com direção SE – NW, convergindo para NE, localizado na área de contato com as rochas do grupo Chapada Diamantina, confirmando um importante vetor de infiltração de água subterrânea para o aquífero Salitre (Figura 5).

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A concepção metodológica deste estudo integra os dados usados na metodologia escolhida para compreender o grau de vulnerabilidade intrínseca do aquífero Salitre no município de Cafarnaum.

Figura 5 - Mapa potenciométrico do Aquífero Salitre no município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

4.3.1 Metodologia COP

O método COP desenvolvido por Vías et al. (2006), baseia-se nos argumentos da Ação Europeia COST 620 (ZWHALEN, 2004), sendo derivado do método *Hazard-pathway-target* (DALY et al., 2002) sobre avaliação da vulnerabilidade de aquíferos cársticos à contaminação.

Esse método considera três parâmetros hidrogeológicos para avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos à contaminação: Concentração do fluxo (C), Camadas de proteção (O), e Precipitação (P).

O fator (C) representa a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, em função da infiltração da água através da camada de proteção, ou seja, representa o potencial da água de ignorar a proteção fornecida pelas camadas sobrepostas. Dessa forma, este fator representa o grau que a precipitação atravessa a zona não saturada e infiltram no interior do aquífero cárstico. Dois cenários podem ocorrer na análise desse fator:

- Cenário 1 – Este descreve a situação que a bacia é coberta por finas camadas de baixa permeabilidade, em que a infiltração acontece de forma concentrada através das feições cársticas (sumidouros e/ou dolinas), ou seja, o fluxo penetra facilmente pela zona não saturada e infiltra no aquífero. A avaliação do fator (C) neste cenário considera quatro variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A vulnerabilidade do aquífero diminui com o aumento da distância entre as áreas de recarga e as dolinas e sumidouros. A avaliação da cobertura vegetal considera a percentagem de cobertura da área pela vegetação que influi diretamente no regime infiltração-escoamento. A declividade subdivide-se em quatro classes e correlaciona-se com a presença ou ausência da cobertura vegetal e essa combinação origina o parâmetro (sv). Os valores sv demonstram que quando a declividade aumenta, a vegetação tende a ser mais escassa e a vulnerabilidade tende a aumentar. A pontuação dos valores do fator (C) neste é obtida através da equação 1:

$$\text{Fator (C)} = sv.ds \text{ ou } sv. dh \quad (\text{Equação 1})$$

- Cenário 2 – Este descreve a situação onde a infiltração ocorre de forma difusa, podendo ser através de fraturas. A avaliação do fator (C) neste cenário é avaliada pela combinação de três variáveis: feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v). A variável feições superficiais (sf) considera características geomorfológicas específicas para rochas carbonáticas e a presença ou ausência de camadas de recobrimento (permeáveis ou impermeáveis), as quais determinam a importância dos processos de escoamento superficial e/ou infiltração atuantes na área. A variável vegetação e declive (sv) neste cenário possui o valor oposto do cenário 1, ou seja, quanto mais íngreme e conseqüentemente menos vegetação, a água escoar para longe do aquífero. A pontuação dos valores do fator (C) neste é obtida através da equação 2:

$$\text{Fator (C)} = sv.sf \quad (\text{Equação 2})$$

Nas zonas com infiltração concentrada através de dolinas e sumidouros a proteção natural dada pelo fator O é ignorada, por causa dos baixos valores atribuídos ao fator C. Por outro lado, onde a infiltração difusa ocorre na ausência de características cársticas ou onde há

escoamento fora do aquífero, então o aquífero mantém alguma proteção natural atribuída ao fator O.

O fator (O) considera a proteção fornecida para o aquífero em função de propriedades físicas, como textura e litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Para a avaliação do parâmetro (O) é considerado o subfator solo [Os] e subfator litologia das camadas da zona insaturada [Ol].

Para a avaliação do subfator solo [Os] são considerados os seguintes parâmetros: textura, distribuição de tamanho dos grãos e espessura.

O subfator [Ol] reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona insaturada do aquífero. Para a avaliação subfator [Ol] os parâmetros para a sua quantificação são o tipo de rocha e o grau de fraturamento (ly), a espessura de cada camada (m) e as condições de fraturamento às quais está submetido o aquífero (cn). O somatório do produto dos parâmetros produz o índice que está associado com a proteção do aquífero: $\Sigma [ly.m].cn$.

A capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção, ou seja, valores mais do fator (O) são correspondentes a regiões em que o grau de proteção é alta, devido a presença de um solo desenvolvido e litologias com baixa permeabilidade. O fator (O) é obtido pelo somatório dos subfatores solo [OS] e litologia [OL] representados na equação 3:

$$\text{Fator O} = [\text{Os}] + [\text{Ol}], \text{ sendo } \text{Ol} = \Sigma [ly.m].cn \quad (\text{Equação 3})$$

O fator (P) inclui a quantidade de precipitação da área e fatores que influenciam na taxa de infiltração, como: frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremos. Esses fatores determinam a capacidade da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero. Quanto maior for a capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero. Portanto, o fator (P) é avaliado por dois subfatores: quantidade de precipitação [Pq] e distribuição temporal da precipitação [Pi].

O subfator [Pq] representa o efeito da quantidade das chuvas, relacionado à média anual de chuvas das séries históricas dos anos úmidos, e a recarga anual sobre a vulnerabilidade do aquífero. É considerada a precipitação média dos anos úmidos, pois é quando o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica e o aquífero, nesse momento, é mais vulnerável à contaminação. Vários métodos (PI e DRASTIC) consideram que a vulnerabilidade do aquífero aumenta com o aumento da quantidade de chuva e o consequente aumento da recarga do aquífero, porém, outros métodos (SINTACS) propõem que com o aumento da

quantidade de chuva, as taxas mais elevadas de recarga proporcionam uma maior diluição do contaminante e, conseqüentemente, a vulnerabilidade diminui. Portanto, fica estabelecido que com o aumento da precipitação até cerca de 800 a 1200 mm, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação tende a aumentar por consequência do aumento do transporte de contaminantes para o aquífero, sendo mais importante do que o processo de diluição. No entanto, quando a precipitação anual é superior a 1200 mm, o processo de diluição de potenciais contaminantes é mais provável do que o transporte destes e, por conseguinte, a vulnerabilidade tende a ser menor. Quando a precipitação é superior a 1600 mm, a capacidade de proteção do aquífero não se modifica, permanecendo de certa forma, constante.

O subfator [Pi] representa a distribuição temporal da precipitação em um determinado período de tempo, isto é, indica a intensidade da precipitação. Para estimar esse subfator é considerado o número obtido da divisão da precipitação anual pelo número de dias chuvosos. Portanto, quanto maior a precipitação anual e o menor número de dias chuvosos, maior será a vulnerabilidade do aquífero, isto é, aumenta o escoamento para as feições cársticas que favorece a concentração do fluxo para o aquífero.

Valores mais altos do fator (P) indicam um menor impacto sobre o nível de proteção conferido pela fator (O). No entanto os valores mais baixos indicam que a precipitação, como uma função da quantidade e intensidade, diminui a proteção conferida pelo fator (O) e aumenta a vulnerabilidade do aquífero. O fator (P) é obtido pelo somatório dos subfatores quantidade de precipitação [Pq] e distribuição temporal da precipitação [Pi] representados na equação 4:

$$\text{Fator (P)} = [\text{Pq}] + [\text{Pi}] \quad (\text{Equação 4})$$

Vías et al. (2006) ressaltou que a base conceitual deste método é avaliar a proteção natural das águas subterrâneas determinada pelas propriedades dos solos e da zona não-saturada e, estimar como essa proteção pode ser modificada pelo processo de infiltração - difusa ou concentrada – e pelas diferentes condições climáticas. O resultado é agrupado em cinco classes de variação de vulnerabilidade (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), com índices que variam em intervalos de 0 a 15, determinadas pela seguinte equação (5) (Quadro 6).

$$\text{Índice} = \text{C.O.P} \quad (\text{Equação 5})$$

Quadro 6 - intervalos e classes de vulnerabilidade da Metodologia COP

| Índice COP | Classes de Vulnerabilidade |
|-------------|----------------------------|
| [0 - 0,5] | Muito alta |
| [0,5 - 1,0] | Alta |
| [1,0 - 2,0] | Moderada |
| [2,0 - 4,0] | Baixa |
| [4,0 - 15] | Muito alta |

4.3.2 Dados para análise da vulnerabilidade

Para a avaliação da vulnerabilidade através do método COP foram usados dados de 48 poços tubulares do município de Cafarnaum. Para os dados relacionados ao fator C, a individualização das feições cársticas e da cobertura vegetal foi realizado por meio de imagens do banco de dados do software ArcGIS 10.1. Os dados relacionados à declividade da área foram retirados através do mapa de declividade produzido por meio do software ArcGIS 10.1, com base no modelo digital do terreno (MDT), a partir de imagens de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), projeto Topodata. Para os dados relacionados ao fator O, todos serão retirados das fichas técnicas dos poços disponíveis no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM). Os dados relacionados ao fator P serão retirados através do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), que disponibiliza séries históricas da quantidade de precipitação diária durante um determinado período de tempo.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse parágrafo será apresentado a individualização das feições cársticas, os valores usados nos respectivos parâmetros da metodologia COP e a apresentação do mapa da vulnerabilidade intrínseca a contaminação da área estudada.

4.4.1 Feições cársticas e declividade

As feições cársticas apresentadas na figura 6 foram individualizadas a partir da interpretação de imagens oriundas do banco de imagens do software ArcGIS 10.1 e levantamento de campo. Esse banco de dados agrupa imagens de diversos satélites e empresas, entre os quais, Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP e Swisstopo, com resoluções de até 15m x 15m na área de estudo.

A área é largamente carstificada, com uma vasta concentração de dolinas, com uma área total de 5,43 km². As dolinas apresentam tamanhos que variam de dezenas a centenas de metros. Uma das particularidades das dolinas é a presença de uma vegetação mais densa que a vegetação comum do semiárido. Outro fato é que algumas delas são preenchidas por água pluvial.

Na porção norte as dolinas apresentam um tênue alinhamento, que possivelmente estão seguindo zonas de fraqueza das rochas, relacionadas a fraturas e condutos cársticos, no sentido SW – NE, coincidente com fluxo potenciométrico preferencial do aquífero. A porção leste apresenta uma intensa redução do processo de carstificação, contrastando com o restante da área, que pode estar ligado ao processo de deposição de sedimentos siliciclásticos oriundos das rochas do Grupo Chapada Diamantina.

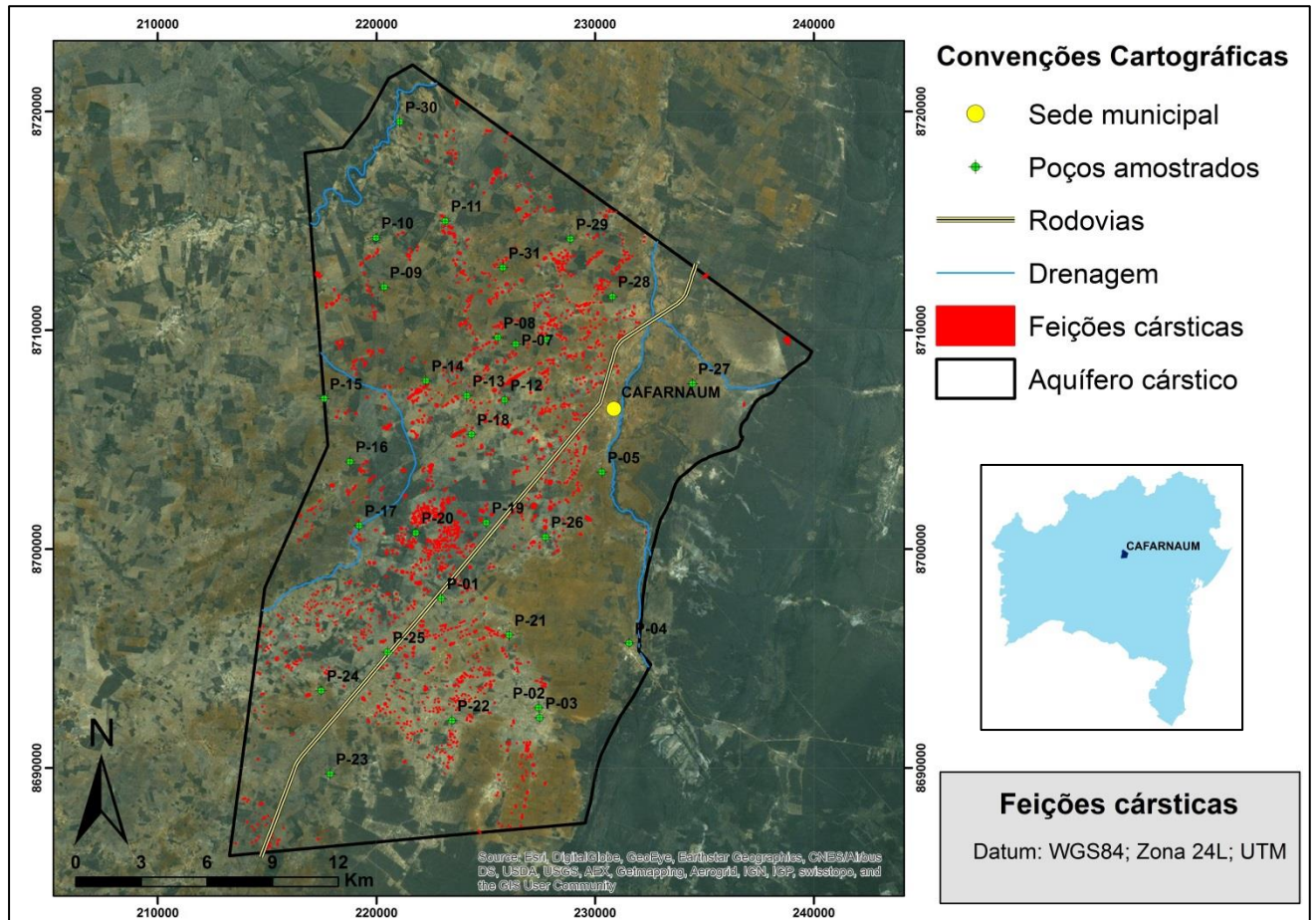
O mapa de declividade da área de estudo foi produzido por meio do software ArcGIS 10.1, com base no modelo digital do terreno (MDT), a partir de imagens de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), através do projeto Topodata. Os valores da declividade não passam de 6% (Figura 7).

4.4.2 Concentração do fluxo (Fator C)

Na área estudo foram observados os dois cenários relacionados ao fator C descritos na metodologia utilizada para o mapeamento da vulnerabilidade. Nas áreas relacionadas ao Cenário 1, onde ocorre o fluxo concentrado de infiltração, a avaliação do fator C considera a distância da área de recarga ao sumidouro (dh) e às dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). Das feições cársticas relacionadas ao cenário 1, foram identificadas e mapeadas com base em uma análise morfológica do terreno, através do uso de imagens de satélites e trabalho de campo, a presença de dolinas. Nesse caso os valores atribuídos às dolinas

(dh), até um raio de 10 metros do centro é atribuído o valor 0 e de um raio entre 10 e 100 m é atribuído o valor 0,5. O valor atribuído ao subfator de declividade e cobertura vegetal (sv) é 1,0, já que a declividade, com base no mapa de modelo digital do terreno (MDT), está abaixo de 8%.

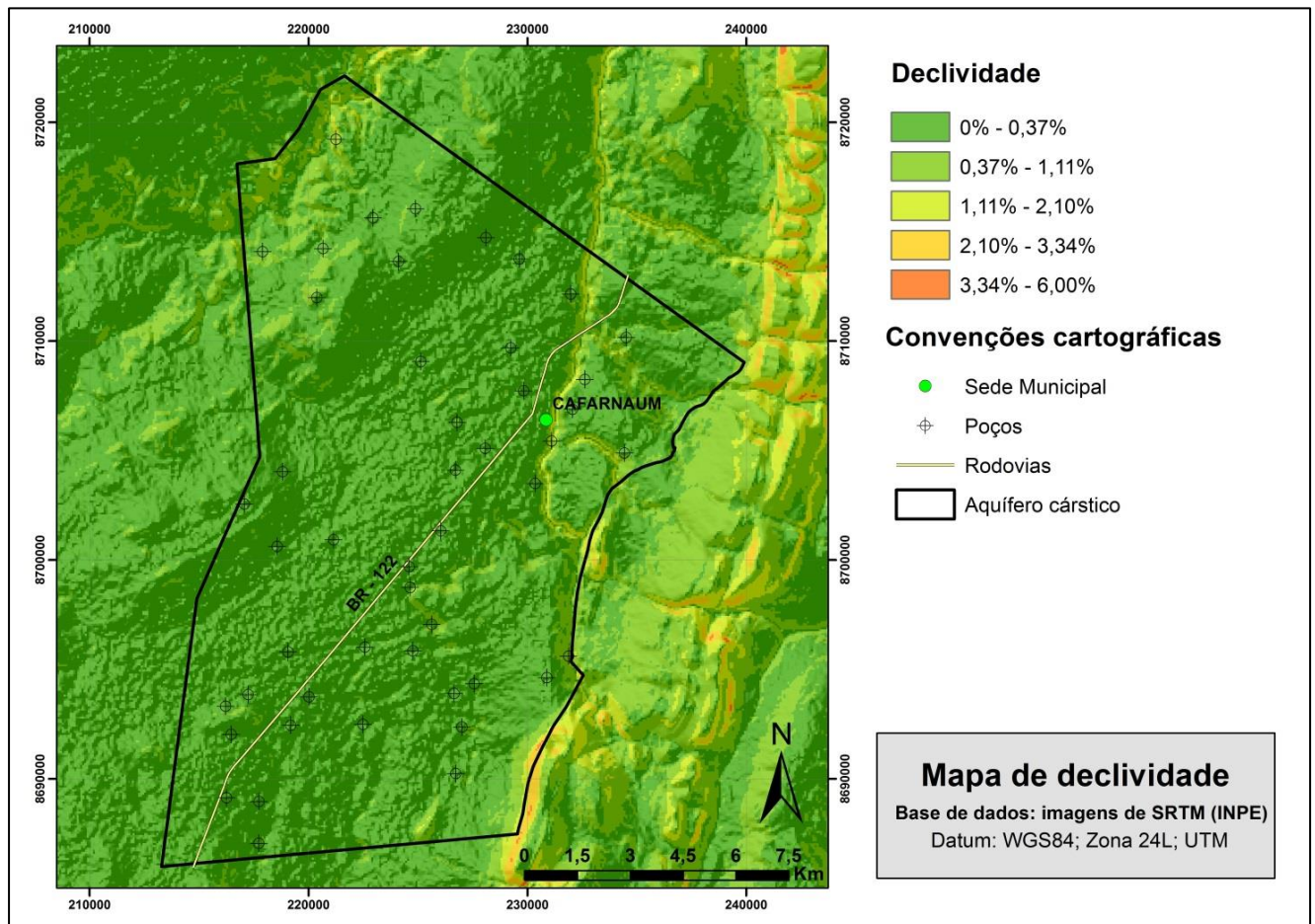
Figura 6 - Mapa de distribuição das feições cársticas do aquífero Salitre no município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

Nas áreas relacionadas ao Cenário 2, no restante da área de estudo onde ocorre a infiltração difusa, considera a presença de feições cársticas e camadas superficiais (sf) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). Não foi mapeado e identificado nenhuma ocorrência de carste devido a falta de afloramento das rochas que compõem o aquífero, então para o subfator presença de feições cársticas e camadas superficiais (sf) foi atribuído o valor 1,0 e ao subfator de declividade e cobertura vegetal (sv) foi indicado o valor 0,75, já que a declividade do terreno está abaixo de 8%.

Figura 7 - Mapa de declividade da área de estudo



Elaboração: O autor

Dentro do domínio relevante ao cenário 1, o valor estimado para o fator C causa uma redução da proteção do aquífero de “muito alta”, devido a presença do fluxo concentrado de infiltração nas dolinas, então a proteção natural dada pelo fator O é ignorada nessas áreas. Já no domínio relacionado ao cenário 2, o valor medido para o fator C causa uma redução da proteção “baixa”.

4.4.3 Camadas de proteção (Fator O)

O fator O é avaliado por dois subfatores: subfator de solo (Os) e subfator litologia das camadas da zona insaturada [OI]. As informações sobre o tipo de solo, espessura e litologia das camadas da zona insaturada foram retiradas das fichas técnicas dos poços perfurados e sua distribuição espacial foi obtida através da interpolação desses dados através de Krigagem Ordinária.

Os parâmetros que entram em jogo na avaliação do subfator (Os) são a textura e a espessura do solo. Os valores para esse subfator variam de 0, para a ausência de solo ou solo arenoso com menos de meio metro de espessura, até 5, para solos argilosos com mais de 1 metro de espessura.

O subfator (Ol) da litologia reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona insaturada. Três parâmetros contribuem para sua avaliação: o tipo de rocha e o grau de fraturamento (ly), a espessura de cada camada (m) e a condição de confinamento do aquífero (cn). Os valores referentes a esse fator variam de 1 a 4, onde o valor mínimo está associado a rochas cársticas fraturadas ou não, e o valor máximo está associado à presença de camadas de argila na zona insaturada. O aquífero estudado não é confinado.

O valor final estimado para o fator O indica o grau de proteção do aquífero “alta” a “muito baixa”.

4.4.4 Regime de precipitação (Fator P)

O fator P é avaliado por dois subfatores: quantidade de precipitação (Pq) e distribuição temporal da precipitação (Pi). Para sua determinação, foram utilizados os dados de precipitação da região para o período de 1964 a 1991 fornecidos pela ANA (Agência Nacional de Águas).

O subfator (Pq) está relacionado à média da quantidade de chuva dos anos mais chuvosos. Para a região essa média é de 726 mm, que corresponde ao valor 0,3. Já o subfator (Pi) é referente aos dias de chuva dos anos mais chuvosos, ou seja, a intensidade da precipitação. Para a região essa média é de 30 dias chuvas por ano, portanto 32 mm de chuva por dia, que é atribuído o valor 0,2.

O valor final estimado para o fator P (0,5) está associado a uma redução da proteção “muito alta”.

4.4.5 Índice COP

A aplicação da metodologia COP, na avaliação da vulnerabilidade do aquífero estudado, permitiu a subdivisão da área em quatro classes de vulnerabilidade (Figura 8):

- muito alta – 12,5%, 70,20 km² da área;
- alta – 0,5%, 2,0 km² da área;
- moderada – 32,7%, 183,30 km² da área;

baixa – 54,4%, 305,70 km² da área.

A delimitação da classe de vulnerabilidade muito alta está diretamente relacionada ao cenário 1 do fator C. Este cenário é formado pela presença de dolinas, onde a infiltração se faz de forma concentrada e direta através dos condutos oriundo da dissolução das rochas carbonáticas. Neste cenário, a proteção do aquífero referente proporcionada pelas camadas da zona insaturada e pelo solo (fator O) é totalmente ignorada.

Já a delimitação das classes de vulnerabilidade alta, moderada e baixa, onde a infiltração ocorre de forma difusa (Cenário 2 do fator C), a vulnerabilidade depende essencialmente do fator O. Nas áreas com vulnerabilidade alta ocorre a presença de solos pouco espessos ou a ausência do mesmo, diminuindo a capacidade de proteção do aquífero. As áreas com o vulnerabilidade moderada e alta foi determinada a partir da existência de solos espessos e impermeáveis, e também devido à ocorrência de camadas argilosas na zona insaturada, aumentando o fator de proteção do aquífero.

O fator P não contribui diretamente no zoneamento das classes de vulnerabilidade, devido ao pequeno tamanho da área de estudo e da presença de apenas um regime de precipitação.

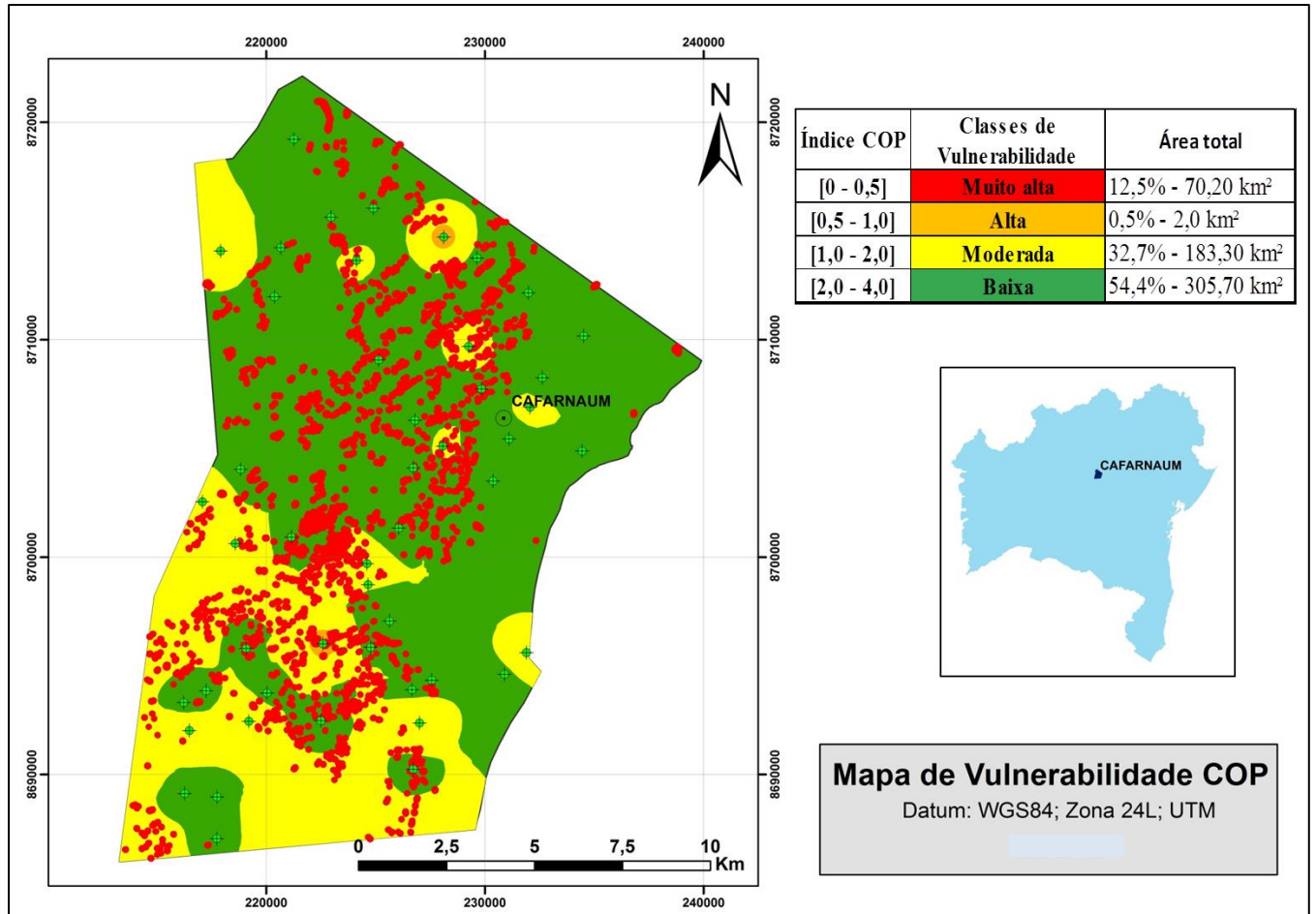
4.5 CONCLUSÕES

A partir da análise do mapa de vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, permitiu a delimitação de 4 classes de vulnerabilidade na área: muito alta (12,5% - 70,20 km²), alta (0,5% - 2,0 km²), moderada (32,7%, 183,30 km²) e baixa (54,4%, 305,70 km²). A individualização dessas classes de vulnerabilidade foi obtida através da análise dos parâmetros descritos na metodologia COP.

Para o fator C, a individualização das feições cársticas (dolinas) e de sua área de influência, até 100 metros da borda da dolina, é o fator que teve um papel significativo para a delimitação da classe de vulnerabilidade muito alta do índice COP gerados na área. As dolinas fornecem conexão direta do aquífero com a superfície, acarretando no transporte de contaminantes para a zona saturada, sem sofrer nenhum tipo de retenção química ou física na zona insaturada. A ausência de outras feições cársticas, devido à falta de afloramentos e conseqüentemente, a baixa intensidade dos processos de carstificação nas demais áreas do aquífero, influenciou a delimitação da classe de vulnerabilidade moderada a baixa no índice

COP. A baixa declividade na área de pesquisa foi um fator que não teve influência significativa na delimitação das classes de vulnerabilidade.

Figura 8 - Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação - Metodologia COP



Elaboração: O autor

O fator O é totalmente ignorado nas áreas de vulnerabilidade muito alta, pois, na presença de dolinas, ocorre a concentração do fluxo de recarga do aquífero. Para as áreas com vulnerabilidade moderada a baixa, o fator O teve um papel fundamental para a proteção do aquífero, devido à ocorrência de solos espessos e impermeáveis, além da presença de camadas argilosas na zona insaturada.

O fator P é constante e não contribui de forma direta na delimitação das classes de vulnerabilidade, em função do pequeno tamanho da área de estudo e a presença de apenas um regime de precipitação.

O mapa de vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, apresentado nessa dissertação, pode e deve ser utilizado para o

planejamento e gestão hídrica e territorial pelos agentes municipais e estaduais, uma vez que delimita as áreas mais vulneráveis à contaminação, como um indicativo de que devem ser áreas protegidas, de forma a viabilizar programas de gestão comprometidos com a preservação ambiental.

5 CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NO MUNICÍPIO DE CAFARNAUM, BAHIA

Resumo:

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, na região centro-norte da Bahia, no contexto geológico da Formação Salitre, no domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilitos, calcissiltos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas. O objetivo principal do estudo é a caracterização hidroquímica, identificando os principais constituintes químicos presentes e os possíveis fatores naturais ou antropogênicos influentes na qualidade das águas subterrâneas. A metodologia deste estudo utiliza métodos hidroquímicos, hidrodinâmicos e estatísticos/geostatísticos para compreender as condições hidrogeoquímicas, além do uso de imagens de satélites para a individualização das feições cársticas. Foram coletadas amostras de água retiradas de 31 poços tubulares distribuídos no município, com o uso da sonda multiparâmetros, foram medidos in situ os parâmetros físico-químicos: pH, EH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido. No laboratório, foram determinados os íons NO_3^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , Ba^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Zn^{+2} , e K^+ , utilizando-se de técnicas fluorimétricas, titrimétricas e espectrofométricas. Para a distribuição espacial dos resultados hidroquímicos foram confeccionados mapas de pontos, utilizando o método de krigagem ordinária. Para a classificação do tipo de água, foi utilizado o diagrama triangular de Piper, para o diagnóstico da água para irrigação, foi usado o diagrama SAR. Foram obtidos valores mais elevados que os valores máximos permitidos para os seguintes elementos: cálcio, nitrato, magnésio, sólidos totais dissolvidos, sulfato, cloreto, fluoreto e sódio. O mecanismo de dissolução das rochas e o processo evaporação controlam a mineralização da água. Os resultados obtidos mostraram que as águas estudadas classificam-se de maneira geral como sulfatas ou cloretadas e águas cálcicas ou magnesianas, consideradas de risco alto a muito alto de salinidade e risco baixo a médio de sódio. A detecção de elevadas concentrações de NO_3^- , em regiões com alta densidade populacional, sugere a contaminação por efluentes domésticos, justamente pela falta de esgotamento sanitário em grande parte do município.

5.1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural imprescindível à vida no planeta, sendo empregado como insumo básico para a maioria das atividades econômicas, principalmente para a agricultura. Cerca de 3% da água do planeta é doce, sendo que a água subterrânea perfaz cerca de 30% desse número, sendo 69% situada em geleiras e calotas polares, e menos 1% de águas superficiais. Nas últimas décadas, o consumo da população mundial de água subterrânea vem aumentando exponencialmente, junto com a preocupação da sociedade com a degradação da mesma.

A composição química das águas subterrâneas depende da natureza das rochas pelas quais flui, do tempo de residência da água dentro do sistema e das condições climáticas prevalentes do local (BAKALOWICZ, 1995; MUDRY, 1987). Do ponto de vista hidrogeológico, a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo. A disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos para determinados tipos de uso depende, da qualidade físico-química, biológica e radiológica (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Aproximadamente 20 a 25% da população mundial dependem parcialmente ou totalmente de recursos hídricos proveniente de aquíferos cársticos (FORD; WILLIAMS, 2007) e devido às características especiais dos sistemas cársticos, a qualidade desta água pode ser facilmente degradada como resultado de impactos antrópicos (IVÁN; MÁDL-SZŐNYI, 2017).

O aquífero cárstico Salitre situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, localizado na região centro-norte do estado da Bahia, no contexto geológico dos carbonatos da Formação Salitre, Domínio do Grupo Una. É constituído por espessas sequências de calcarenitos, calcilitos, calcissilitos e dolomíticos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas, constituídas por silexitos, arenitos, silitos, laminitos e margas.

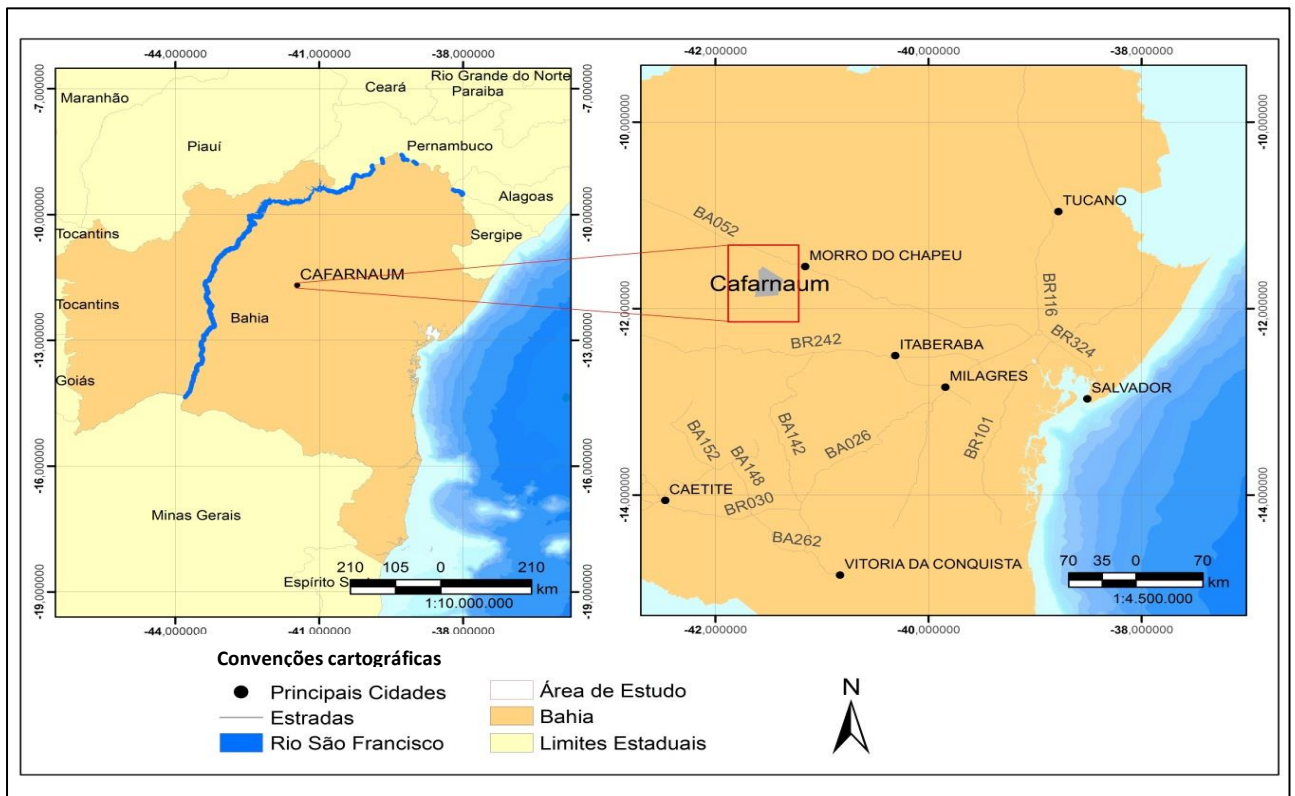
5.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo pertence ao município de Cafarnaum, que está situado no centro norte do estado da Bahia, faz parte da microrregião de Irecê e da mesorregião do Centro-norte baiano (Figura 9).

O município possui uma área com cerca de 927,491 km² e uma população total estimada em 17.209 habitantes (IBGE, 2010). Cafarnaum localiza-se entre as coordenadas 11° 41' 37" sul e 41° 28' 06" oeste, estando a uma altitude de 770 metros, limitando-se a norte com os municípios de Morro do Chapéu e América Dourada, a leste com o município de Bonito, a oeste com o município de Canarana e a sul com o município de Mulungu do Morro.

Situa-se a 430 km de Salvador, o principal acesso ao município é efetuado através da rodovia BR-324 até o entroncamento com a BA-052, seguindo pela BA-052 até o entroncamento com a BR-122 e chegando a sede municipal. A área de estudo está situada na faixa climática do semiárido conforme a Superintendência de Estudos Econômicos (SEI, 2011), com uma pluviosidade média anual de 503,3 mm, com período chuvoso de novembro a março e temperatura média anual de 22,2 °C.

Figura 9 - Localização do município de Cafarnaum



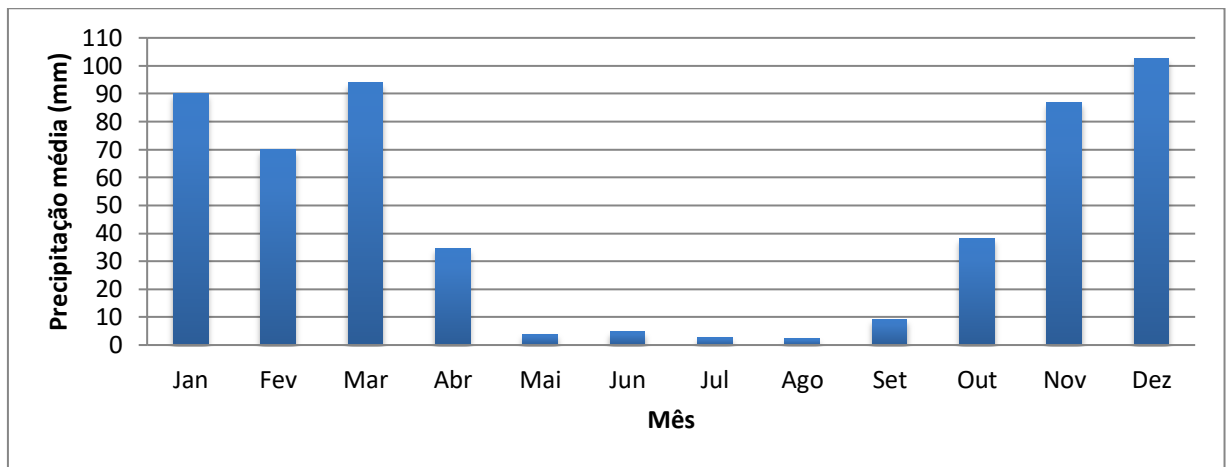
Elaboração: O Autor

Do ponto de vista local, o regime pluviométrico da região, observado em postos pluviométricos instalados na área estudada, referente ao período de 1964 a 1991, revela que os meses com maior índice pluviométrico têm valores de precipitações médias mensais oscilando entre 69 e 102 mm (Figura 10). A partir do mês de abril e prolongando-se até o mês de outubro os índices pluviométricos são reduzidos, com variação média mensal inferiores a 40 mm.

5.2.1 Geologia

A área de trabalho situa-se na Bacia Carbonática de Irecê, por sua vez, inserida na porção norte do Cráton do São Francisco, definido por Almeida (1977) como uma entidade geotectônica consolidada no Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico), cujos limites foram redefinidos por Alkimim et al. (1993). Afloram na bacia as rochas do Complexo Xique-Xique (embasamento cristalino), de idade Paleoproterozoica, seguido por rochas do Supergrupo Espinhaço, de idade Mesoproterozoica, e do Supergrupo São Francisco de idade Neoproterozoica, além da presença de Coberturas Fanerozoicas Tércio-Quaternárias (INDA; BARBOSA, 1978) (Figura 11).

Figura 10 - Diagrama ilustrando os valores médios da precipitação medida nos postos pluviométricos do município de Cafarnaum no período de 1964 a 1991



Elaboração: O autor. Fonte dos dados: ANA, 2017

O Complexo Xique-Xique é formado por itabiritos e quartzitos com intercalações de cherts (INDA; BARBOSA, 1978) e ocorre a noroeste e sudoeste da Bacia de Irecê.

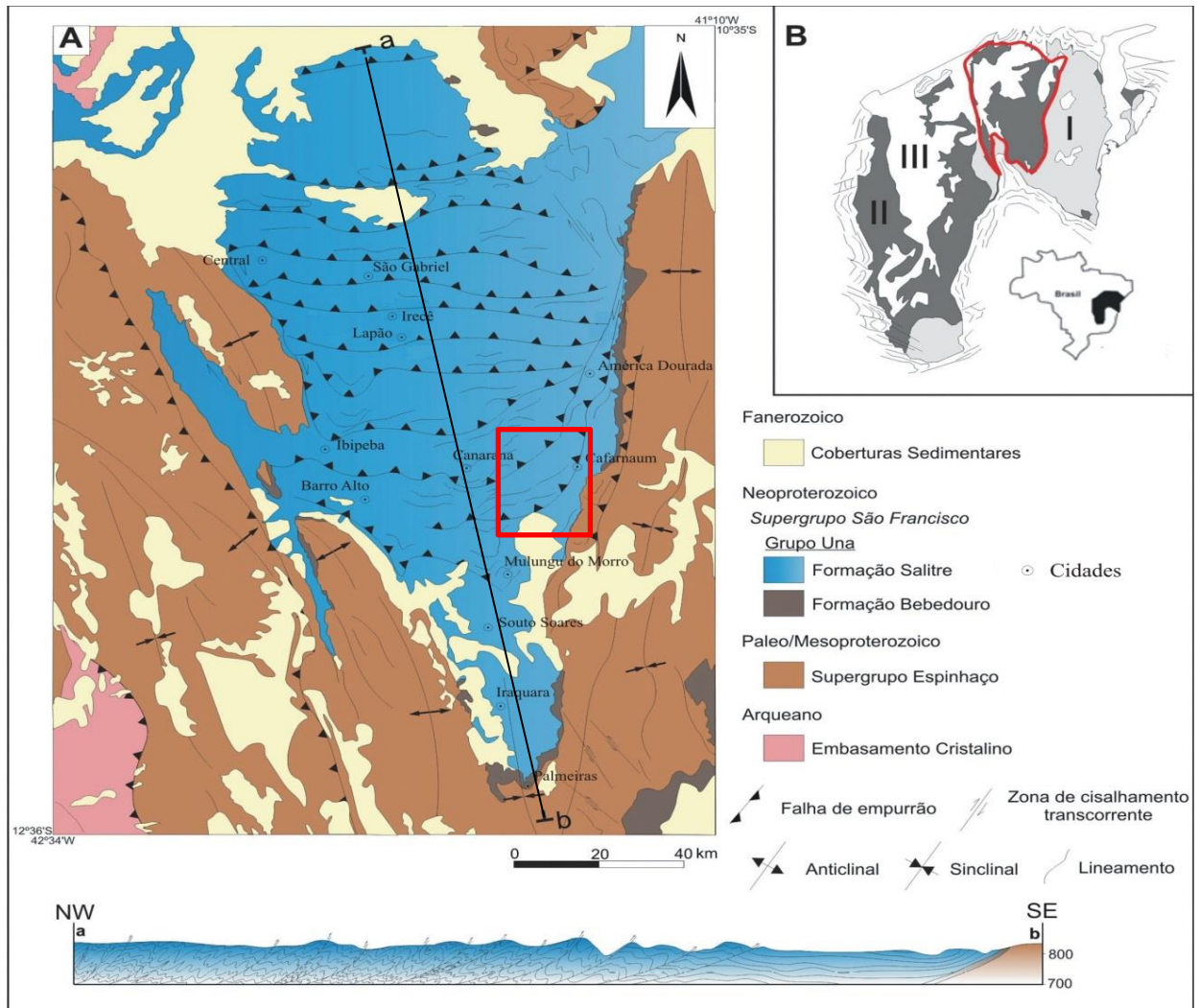
O Supergrupo Espinhaço, com espessura superior a 2000m, ocorre no entorno da Bacia de Irecê representado pelo grupo Paraguaçu, composto por pelitos e psamitos, e Grupo Chapada Diamantina, dividido da base para o topo na Formação Tombador (metarenitos, quartzitos conglomeráticos e conglomerados); Formação Caboclo (metassiltitos e metargilitos com intercalações de metarenitos) e Formação Morro do Chapéu (metarenitos estratificados com lobos sigmoidais). Conforme Pedreira (1994), na região da Chapada Diamantina tais unidades integram quatro grandes seqüências deposicionais, sedimentadas em um sistema do tipo rift-sag.

O Supergrupo São Francisco é constituído pelos grupos Bambuí e Una (INDA; BARBOSA, 1978), este último com ocorrência na Bacia de Irecê e unidade que aflora no município de Cafarnaum. O Grupo Una, de acordo com Pedreira et al. (1987), é composto pela Formação Bebedouro na base e Formação Salitre no topo, esta última objeto de estudo dessa dissertação.

A Formação Bebedouro é constituída por diamictitos, pelitos e arenitos, estratificados e maciços, depositados sob influência glacial (DOMINGUEZ, 1996; GUIMARÃES, 1996; FIGUEIREDO, 2008). Ocorre em superfície de maneira localizada e descontínua, restrita às bordas da bacia, delimitando os Supergrupos Espinhaço e São Francisco através de uma discordância angular regional.

Recobrimo os sedimentos glaciogênicos da Formação Bebedouro, houve a introdução gradativa de um clima semiárido que possibilitou a deposição de uma espessa sucessão carbonática plataformar da Formação Salitre, tendo sido depositada em uma bacia formada no contexto de um mar epicontinental (DOMINGUES, 1993). Ocupa a maior parte da Bacia de Irecê e é constituída fundamentalmente por calcilutitos e calcarenitos, podendo conter níveis de arenitos, margas, siltitos e pelitos. Estas últimas representam importantes ocorrências de barita, conhecidas, sobretudo, na borda leste da bacia e hospedadas em unidades contendo pseudomorfos nodulares de gipsita (SOUZA et al., 1993).

Figura 11 - Mapa e perfil geológicos simplificados da Bacia de Irecê e adjacências, mostrando a área em estudo no quadrado vermelho. (B) Cráton do São Francisco e faixas marginais



Fonte: Santos, 2017

5.2.1.1 *Formação Salitre*

A Formação Salitre, objeto de estudo desta dissertação, foi inicialmente chamada de Calcáreo Salitre por Branner (1911), relacionado à localidade onde foi encontrada, no vale do rio Salitre, na Bahia. Sendo a primeira descrição como um conjunto de rochas predominantemente carbonáticas, com níveis de pelitos, considerada como um depósito de plataforma estável.

Misi, (1979); Pedreira et al. (1987) e Sampaio et al. (2001), descreveram a Formação Salitre como uma formação constituída por espessas sequências de calcarenitos, calcilutitos, calcissiltitos e dolomitos intercalados, por vezes, com sequências terrígenas subordinadas constituídas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas. Os sedimentos carbonáticos (calcários e dolomitos) da Formação Salitre podem alcançar espessuras superiores a 1.000m (MISI, 1993).

Utilizando métodos de datação radiométrica por Rb/Sr, Neves et al.,(1980); Macedo; Bonhome (1984), chegaram a uma idade de 760 Ma para as rochas da Formação Salitre, ou seja, idade Neoproterozoica.

Misi (1979) subdividiu a Formação Salitre em cinco unidades informais, chamando-as, da base para o topo, de unidades C, B, B1, A e A1. Já Souza et al. (1993) a subdividiram em três unidades ,da base para o topo, de Unidades Nova América, Jussara e Irecê e foram interpretadas como pertencentes a quatro ciclos de sedimentação. Na Unidade Nova América ocorreu dois ciclos regressivos e nas Unidades Jussara e Irecê foram registrados dois ciclos transgressivos.

Nesse artigo adotou-se a nomenclatura e subdivisão estabelecida por Bomfim et al. (1985) e Pedreira et al. (1987), que propuseram subdividir a Formação Salitre em quatro unidades, representando fácies carbonáticas distintas e assim representadas da base para o topo: Unidades Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê (Quadro 7). Foram relacionadas pelo autor três ciclos de sedimentação, sendo dois transgressivos e um regressivo.

5.2.2 **Solos**

Os solos que recobrem o aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum são: Latossolo Vermelho Eutrófico e o Cambissolo Háplico Ta Eutrófico.

Quadro 7 - Características litológicas e interpretação sedimentológica da Formação Salitre

| FORMAÇÃO | UNIDADE | LITOLOGIA | ESTRUTURAS SEDIMENTARES | INTERPRETAÇÃO |
|---------------------------|--------------|---|---|--|
| SALITRE 100 - 240m | Irecê | Calcilutito Marga Calcarenito Arenito Siltito Sílex | Laminação plano-paralela | Talude proximal e distal. Sedimentação em <i>ponds</i> |
| | Jussara | Calcirrudito Calcarenito intraclástico Calcissiltito Calcilutito Arenito Siltito | Oncólitos Estratificação plano-paralela e <i>herring bone</i> | Submaré e localmente intermaré |
| | Gabriel | Calcarenito intraclástico Calcissiltito Calcilutito | Laminação cruzada <i>Bird' s eyes</i> Ondulações com intraclastos Lenticularidade | Intermaré a submaré sujeito a tempestades |
| | Nova América | Laminito algais Dolomitos Argilitos Sílex | Tapetes algais Intraclastos Laminação cruzada Ondulações Lenticularidade <i>Bird' s eyeys</i> <i>Tepees</i> | Intermaré a submaré com exposição subaérea periódica (supramaré) |

Fonte: Sampaio, 2001

A caracterização e descrição dos solos da região foram realizadas com base no Boletim de Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos da Margem Direita do Rio São Francisco - Estado da Bahia (Boletim Técnico nº 52 da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA), incorporado ao Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Verde e Jacaré, Margem Direita do Lago de Sobradinho da Secretaria de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, (BAHIA, 1995).

a) Latossolo Vermelho Eutrófico

Compreende solos com horizonte B latossólico, não hidromórficos, de coloração da matriz avermelhada. Suas dificuldades naturais para o cultivo agrícola são corrigidas com o uso da água subterrânea.

b) Cambissolo Háptico Ta Eutrófico

Os Cambissolos são tipos de solos rasos e bem drenados, que guardam nos seus horizontes vestígios do material de origem, apresentam uma matriz avermelhada e textura argilosa ou muito argilosa.

5.2.3 Hidrogeologia

Os aquíferos cársticos são sistemas complexos do ponto de vista hidrogeológico, onde as condições de circulação das águas subterrâneas são muito dependentes da capacidade de dissolução das rochas carbonáticas e de sua densidade de fraturamento associada. A principal característica do aquífero cárstico é a presença dominante da porosidade secundária resultante dos processos de carstificação (GUERRA, 1986).

O processo de carstificação é influenciado pela quantidade e qualidade química da água, clima e fatores geológicos (estratigráficos, estruturais e petrológicos). As fissuras e falhas desempenham um importante papel nos processos de carstificação, recarga, circulação e armazenamento da água subterrânea, e podem ser expandidas através da dissolução das rochas. Essa expansão produz condutos em que a circulação da água se dá por meio de fluxos turbulentos.

As características dos processos de infiltração, recarga e escoamento superficial dos calcários, apresentam comportamentos peculiares, dificultando a determinação do balanço hídrico em aquíferos cársticos através da aplicação de fórmulas empíricas. De acordo com o grau de carstificação que o aquífero exibe, a infiltração se faz basicamente por meio das feições cársticas (dolinas, sumidouros e a rede fissural), com elevada velocidade de fluxo em que o aquífero responde de forma imediata às precipitações.

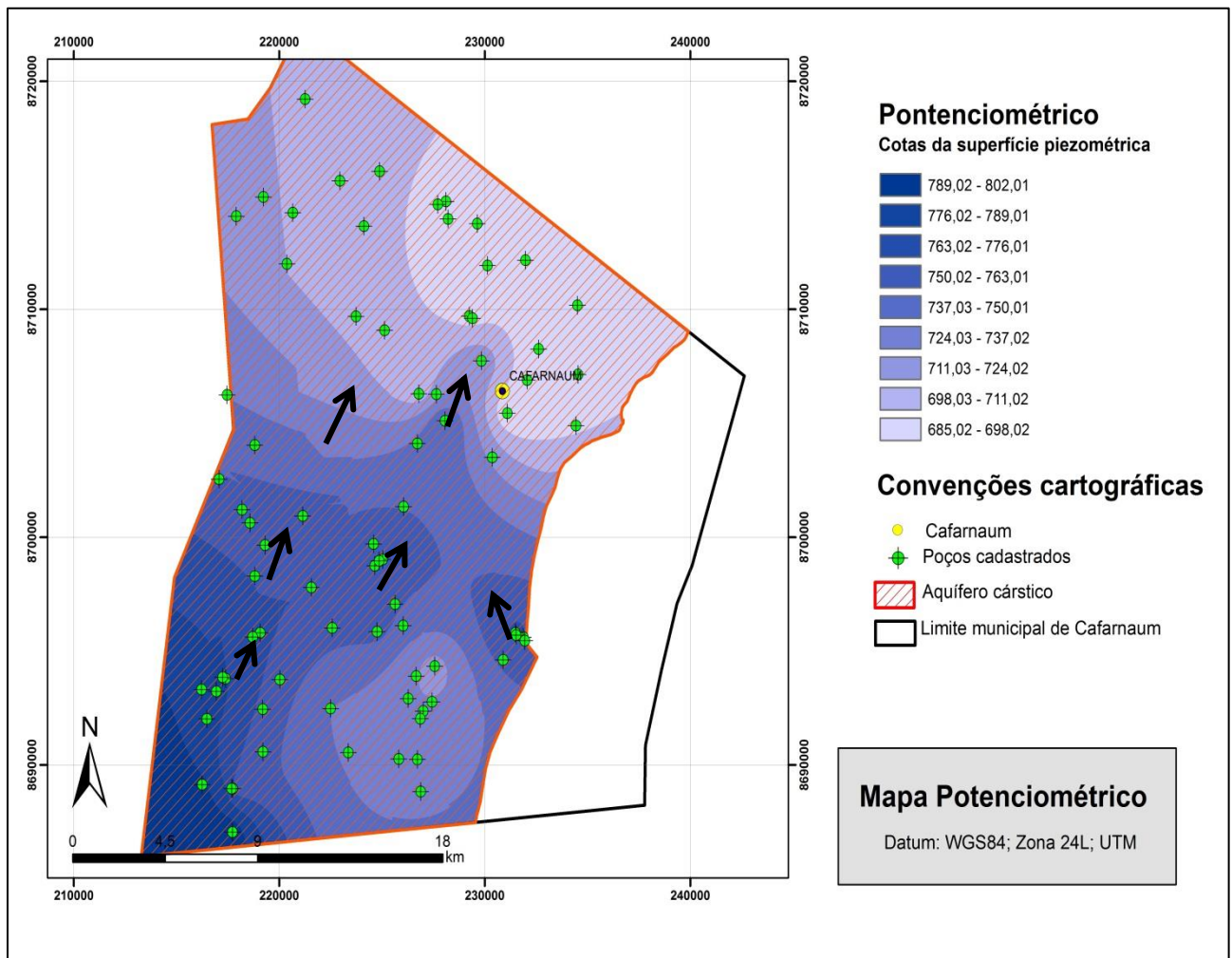
Guerra (1986) caracterizou o comportamento hidrogeológico do aquífero cárstico Salitre como sendo de grande capacidade de recarga e elevada velocidade de fluxo subterrâneo, sobretudo através da rápida percolação da água por meio das formas de absorção do aquífero, como sumidouros, dolinas e fraturas. Nossa (2011) classificou o aquífero cárstico Salitre como anisotrópico, com condutividade hidráulica variável de acordo com a densidade de fraturas, podendo ser considerado como um aquífero livre, em função da baixa espessura dos solos na área e que descontinuidades laterais e verticais da transmissividade, pode ocasionar a formação de aquíferos isolados.

Foram selecionados 78 poços oriundos do banco de dados do SIAGAS que continham as informações necessárias para a elaboração do mapa potenciométrico preliminar do aquífero

estudado. As curvas piezométricas foram geradas com os valores da diferença entre as medidas de altitude, ou seja, a cota do poço no terreno, e a profundidade do nível estático, que é distância da superfície do terreno ao nível de água dentro do poço. O mapa foi produzido através do software ArcGIS 10.1 por interpolação através do método de krigagem.

A direção do fluxo subterrâneo preferencial do aquífero estudado no município de Cafarnaum com direção SW – NE, que corrobora com o fluxo descrito por Guerra (1986). Outra direção de fluxo foi identificada na área central do aquífero com direção SE – NW, convergindo para NE, localizado na área de contato com as rochas do grupo Chapada Diamantina, confirmando um importante vetor de infiltração de água subterrânea para o aquífero Salitre (Figura 12).

Figura 12 - Mapa potenciométrico do Aquífero Salitre no município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A concepção metodológica deste estudo integra dados hidroquímicos, dados hidrodinâmicos e dados estatísticos/geoestatísticos para compreender as condições hidrogeoquímicas, evolução e grau de contaminação das águas pertencentes ao aquífero Salitre no município de Cafarnaum.

5.3.1 Pesquisa bibliográfica e cadastramento de poços

Consistiu no levantamento bibliográfico de trabalhos teórico e técnico-descritivo realizado através da busca de dados e informações disponíveis em livros, teses, artigos e periódicos científicos. Cadastro de poços perfurados do aquífero estudo, distribuídos pela superfície territorial da área estudada, para a obtenção de dados hidrodinâmicos e hidroquímicos cedidos pela Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia (CERB), pelo Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Durante essa etapa, o meio físico da área de estudo, será descrita através de dados espaciais (unidades geológicas, mineralizações associadas, morfologia, vegetação, tipos de solo, área) e não espaciais (qualidade da água, nível estático, nível dinâmico, vazão, tipos de culturas, quantidades de água explorada, etc.).

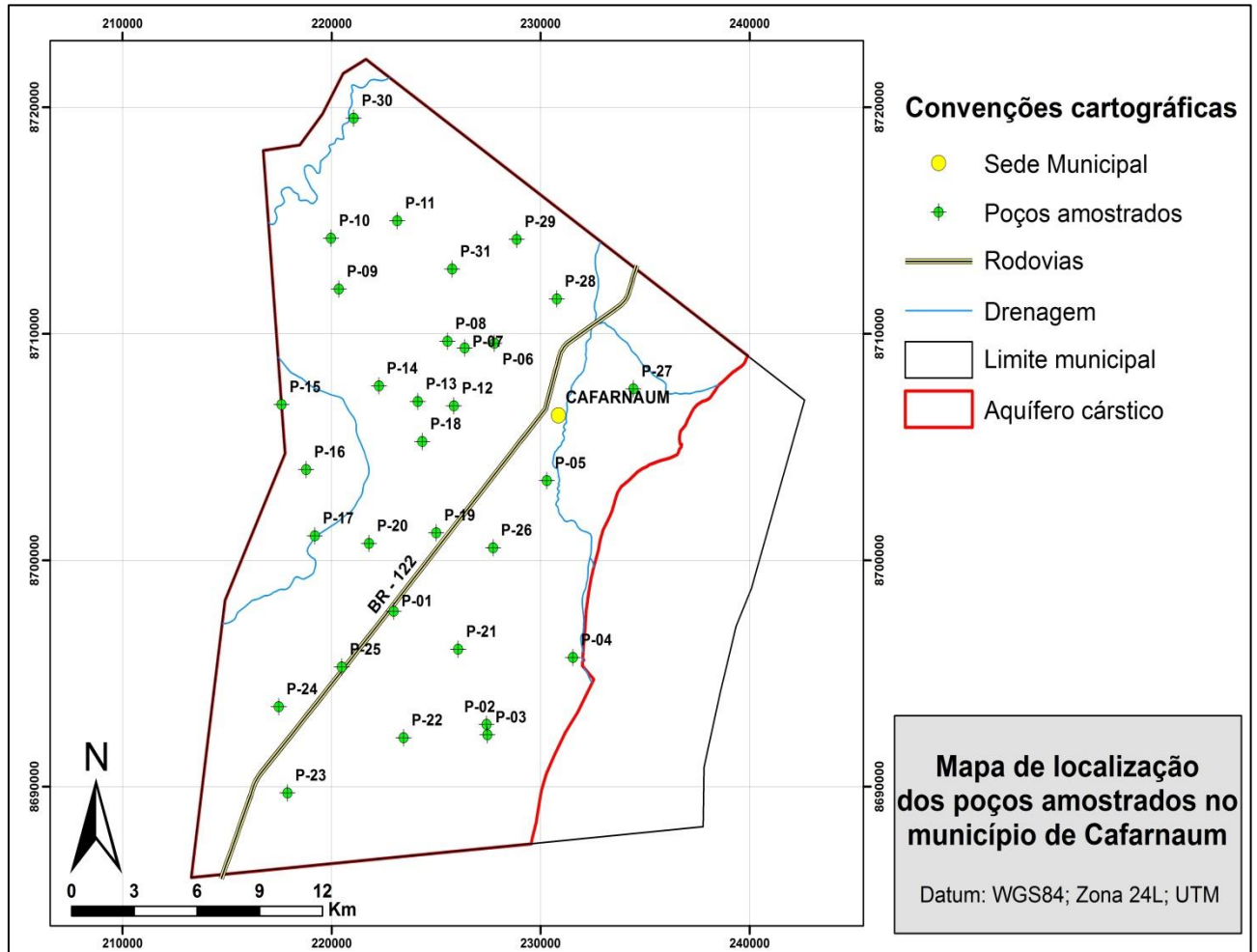
5.3.2 Pesquisa de campo e amostragem

A pesquisa de campo foi realizada entre os dias 20 e 26 de novembro de 2016, onde foi realizado o reconhecimento da área, identificação e localização dos 31 poços tabulares analisados, assim como, a verificação das possíveis fontes de contaminação do aquífero estudado (Figura 13). A água foi coletada após ser expurgada e bombeada por cerca de 20 minutos, tempo suficiente para renovar a água do poço.

Foram efetuadas medidas *in situ* de parâmetros físico-químicos, tais quais, pH, eH, turbidez, temperatura, salinidade, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e sólidos totais dissolvidos (STD) utilizando a sonda multiparâmetros Horiba modelo U-52G (Quadro 8). Além disso, foram coletadas 93 amostras de água *in natura* para a realização de análises hidroquímicas. As amostras de água subterrânea coletadas para análises hidroquímicas foram armazenadas em recipientes de polietileno de 0,5 e 1,0 litro, devidamente lavados e descontaminados em laboratório, acondicionadas e mantidas refrigeradas em caixa de isopor

térmico até o envio para laboratório. As amostras para a análises dos constituintes principais foram previamente filtradas em campo utilizando-se filtros de porosidade 0,45 µm.

Figura 13 - Mapa de localização dos poços tubulares analisados no município de Cafarnaum



Elaboração: O autor

Para evitar alterações físico-químicas ou biológicas nas amostras d'água até a chegada ao laboratório, fez-se necessário a utilização de 5 ml de HNO_3 , mantendo-as refrigeradas. As técnicas de amostragem e preservação das amostras seguiram as orientações técnicas especializadas do APHA, 1995 (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*).

Quadro 8 - Parâmetros físico-químicos medidos em campo

| Parâmetro | Equipamento | Faixa | Precisão |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|
| pH | Horiba - U-52G | 0 a 14 | ± 0.1 pH |
| ORP | | -2000 a +2000 mV | ± 15 mV |
| OD | | 0 a 50,0 mg L ⁻¹ | ± 0,5 mg L ⁻¹ |
| CE | | 0.0 a 99.9 µS cm ⁻¹ | ± 1% |
| STD | | 0 a 100 g L ⁻¹ | ± 5 g L ⁻¹ |
| Temperatura | | - 5° a 55° C | ±0.3 + 0.005 |

Fonte – Gorgen, 2010.

5.3.3 Análises laboratoriais

Durante esta etapa foram realizadas as análises hidroquímicas das 93 amostras colhidas no campo, incluindo duplicatas. Os parâmetros hidroquímicos analisados foram:

- (i) ânions de, nitrato, sulfato e fosfato pelo método de Espectrofotometria UV/IS realizadas no Laboratório do Plasma, do Instituto de Geociências/UFBA(Quadro 9);

Quadro 9 - Ânions medidos por Espectrofotometria UV/IS e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Ânions | LQ | Unidade |
|----------------|-------|--------------------|
| Nitrato | 0,1 | mg L ⁻¹ |
| Sulfato | 0,1 | mg L ⁻¹ |
| Fosfato | 0,001 | mg L ⁻¹ |

- (ii) ânions de fluoreto pelo método Colorimétrico SPANDS (Quadro 10);

Quadro 10 - Ânions medidos por Colorimétrico SPANDS e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Ânions | LQ | Unidade |
|-----------------|------|--------------------|
| Fluoreto | 0,02 | mg L ⁻¹ |

- (iii) cloreto, alcalinidade e bicarbonato pelo método Titrimetrico no Laboratório do Plasma, do Instituto de Geociências/UFBA e;
- (iv) cátions de Ca, Mg, Na, K, Al, Sr, Fe, Cu, Pb, Zn, Ba, Ni e Mn pelo método de Espectrometria de Absorção Atômica realizados no Centro de Pesquisas e

Desenvolvimento da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo do Estado da Bahia (CEPED – SECTI), no Laboratório de absorção e emissão atômica (Quadro 11).

Quadro 11 - Cátions medidos por Espectrometria de absorção atômica e seus respectivos limites de quantificação (LQ)

| Cátions | LQ | Unidade |
|-----------------------|-----------|--------------------|
| Alumínio (Al) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Bário (Ba) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Cálcio (Ca) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Chumbo (Pb) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Cobre (Cu) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Estrôncio (Sr) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Magnésio (Mg) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Manganês (Mn) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Ferro (Fe) | 0,10 | mg L ⁻¹ |
| Níquel (Ni) | 0,02 | mg L ⁻¹ |
| Sódio (Na) | 1,00 | mg L ⁻¹ |
| Zinco (Zn) | 0,01 | mg L ⁻¹ |
| Potássio (K) | 1,00 | mg L ⁻¹ |

5.3.4 Análise estatística dos resultados

Parâmetros convencionais como média aritmética, mediana e desvio padrão foram calculados para todos os dados analisados através do software BioEstat 5.0.

Para a escolha do método estatístico mais adequado, foi executado o teste de normalidade de Shapiro-Wilks no software BioEstat 5.0, onde a obtenção do resultado maior que 0,05 indica uma normalidade nos dados da amostra. Diante dos resultados, observou-se que quase todas as amostras ficaram abaixo de 0,05, portanto provém de uma população sem normalidade, sendo denominado não-paramétricos. Por esse motivo o método mais adequado e escolhido para essa pesquisa foi a Análise dos Componentes Principais (PCA) realizado pelo software Statistica 10.0.

5.3.5 Processamento de dados e construção de mapas

O tratamento geoestatístico foi feito a partir da interpolação dos dados do índice de vulnerabilidade, dados hidroquímicos e elaboração de mapas de distribuição hidroquímica dos elementos. Para tal será utilizado o software ArcGIS 10.1 com o auxílio da ferramenta Geostatistical Analyst através do método de Krigagem Ordinária.

Para a classificação do tipo químico das águas subterrâneas de acordo com o conteúdo iônico dominante, resultante da interação água-rocha, foi gerado o diagrama triangular de Piper (1944), utilizando os softwares Qualigraf (MOBUS, 2003) e Diagrammes.

Após os resultados das análises químicas e físico-químicas, foram utilizadas diretrizes para determinar a qualidade das águas nos pontos analisados. Para tal, utilizou-se prioritariamente a Portaria MS 2914/2011 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e a Resolução CONAMA 396/2008 (BRASIL, 2008), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e outras providências, por serem as normativas mais recentes em uso na legislação brasileira. Para os demais elementos que não apresentam parâmetros de Valor Máximo Permitido (VMP) nas portarias supracitadas, utilizou-se a Guidelines for Drinking-water Quality (WHO, 2011), que promovem recomendações da Organização Mundial de Saúde para o gerenciamento de riscos e perigos que podem comprometer a segurança da água potável.

Os mapas foram construídos através dos softwares ArcGIS 10.1 por meio do SIG, tais quais: mapa potenciométrico e mapas de distribuição de cada parâmetro hidroquímico.

5.3.6 Interpretação dos resultados

Após obter os resultados analíticos das 31 amostras das águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum, foram confeccionados arquivos de dados em planilhas do Excel, onde foram desenvolvidos tabelas e gráficos. Também foi utilizado o software ArcGis 10.1 para a confecção de mapas de distribuição de valores de pH, CE, STD, alcalinidade, fluoreto, fosfato, nitrato, sulfato, cloreto, cálcio, sódio, potássio, magnésio e bário. Tais mapas auxiliam na compreensão e na espacialização dos dados em relação à área. Ademais foram produzidos tabelas e gráficos que juntamente com as medições e observações feitas em campo possibilitaram a elaboração desta dissertação.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse parágrafo será apresentado a caracterização hidroquímica, a classificação hidroquímica, os mecanismos que controlam a geoquímica das águas subterrâneas e a análise dos componentes principais dos dados obtidos durante a pesquisa.

5.4.1 Caracterização hidroquímica

A caracterização hidroquímica tem por finalidade identificar, quantificar e classificar as principais propriedades e constituintes químicos da água subterrânea de um aquífero, procurando-se estabelecer uma relação com o meio físico.

O estudo hidroquímico das águas subterrâneas no seu estado natural, sem a interferência de fatores antrópicos, está diretamente relacionada às condições geológicas do aquífero, tais quais, litologia do aquífero, fluxo subterrâneo, recarga, profundidade e do tempo de permanência da água no sistema aquífero, além dos fatores climáticos da região. Além disso, características extremas podem comprometer a qualidade da água, a exemplo de áreas mineralizadas e, principalmente, ação antrópica (SANTOS, 2011).

O conjunto de todos os elementos que compõem a água permite estabelecer padrões de qualidade da água, classificando-a de acordo com seus limites estudados e seus usos (consumo humano, dessedentação animal, irrigação, industrial, piscicultura, aquicultura, recreação e urbano). avaliação da qualidade das águas, de modo a assegurar o seu uso, foi estabelecida de acordo com o que determina a Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), RESOLUÇÃO CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 (BRASIL, 2008) e as normas da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011).

Os resultados das análises físico-químicas dos domínios de Cafarnaum, cujas pesquisas e resultados são apresentados nessa dissertação, foram sistematizados em planilha Excel com o intuito de fornecer elementos para a construção de gráficos de concentração iônica e a confecção de mapas contendo a distribuição espacial de cada variável nas águas subterrâneas do município (Tabela 1).

Tabela 1 - Análises químicas dos poços tubulares do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum

| Poços | utm | utme | Temp °C | pH | ORP (mV) | C.E. (µS/cm) | OD (mg L ⁻¹) | STD (mg L ⁻¹) | NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | Alc Total (mg.L ⁻¹) | F ⁻ (mg L ⁻¹) | Cl ⁻ (mg L ⁻¹) | SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹) | PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹) | HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | Ba ⁺ (mg L ⁻¹) | Ca ²⁺ (mg L ⁻¹) | Sr ²⁺ (mg L ⁻¹) | Mg ²⁺ (mg L ⁻¹) | Na ⁺ (mg L ⁻¹) | Zn ²⁺ (mg L ⁻¹) | K ⁺ (mg L ⁻¹) | Localidade |
|-----------------------------|---------|--------|---------|--------|----------|--------------|--------------------------|---------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---|---|---------------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|
| P-01 | 8697739 | 222973 | 26,05 | 6,93 | 248 | 1110,00 | 6,86 | 708,0 | 21,25 | 66,12 | 0,39 | 110,91 | 49,24 | 0,14 | 66,12 | <LQ | 114,50 | 0,21 | 48,00 | 19,85 | <LQ | 3,35 | Pov. Empate |
| P-02 | 8692748 | 227423 | 28,10 | 6,73 | 259 | 1550,00 | 10,37 | 990,0 | 48,10 | 57,93 | 0,17 | 230,91 | 76,50 | 0,16 | 57,93 | 0,15 | 152,50 | 0,30 | 34,15 | 59,00 | <LQ | 5,40 | Pov. Conquista |
| P-03 | 8692289 | 227470 | 27,06 | 6,89 | 298 | 1370,00 | 3,47 | 873,0 | 50,39 | 61,92 | 0,15 | 178,18 | 66,28 | 0,27 | 61,92 | 0,12 | 142,00 | 0,27 | 33,00 | 48,00 | <LQ | 4,70 | Pov. Conquista |
| P-04 | 8695702 | 231560 | 27,72 | 6,78 | 276 | 1200,00 | 8,70 | 769,0 | 42,93 | 55,93 | 0,08 | 145,45 | 66,74 | 0,39 | 55,93 | 0,23 | 121,00 | 0,23 | 36,00 | 44,50 | <LQ | 6,40 | Pov. Pedras |
| P-05 | 8703512 | 230316 | 26,96 | 6,73 | 272 | 1480,00 | 1,90 | 944,0 | 67,20 | 45,94 | 0,38 | 194,54 | 67,20 | 0,24 | 45,94 | 0,15 | 144,00 | 0,22 | 44,50 | 44,00 | <LQ | 6,30 | Cafarnaum |
| P-06 | 8709577 | 227807 | 26,00 | 6,89 | 264 | 1070,00 | 10,06 | 686,0 | 13,24 | 69,91 | 0,59 | 78,18 | 81,40 | 0,15 | 69,91 | <LQ | 113,50 | 0,36 | 53,00 | 14,00 | <LQ | 3,85 | Pov. Alecrim |
| P-07 | 8709368 | 226377 | 26,05 | 6,92 | 297 | 1000,00 | 7,94 | 643,0 | 3,98 | 71,91 | 0,34 | 136,36 | 106,33 | 0,13 | 71,91 | <LQ | 115,50 | 0,30 | 50,00 | 10,00 | <LQ | 3,05 | Pov. Alecrim |
| P-08 | 8709668 | 225553 | 27,66 | 6,83 | 274 | 966,00 | 6,87 | 618,0 | 10,63 | 73,91 | 0,44 | 32,73 | 108,38 | 0,27 | 73,91 | <LQ | 109,00 | 0,27 | 52,50 | 7,30 | <LQ | 3,50 | Pov. Alecrim |
| P-09 | 8711973 | 220359 | 27,69 | 7,06 | 220 | 2260,00 | 9,34 | 1440,0 | 93,43 | 61,92 | 0,97 | 317,27 | 400,00 | 0,23 | 61,92 | <LQ | 178,00 | 5,85 | 131,00 | 47,50 | 0,04 | 5,35 | Pov. Umbuzeiro |
| P-10 | 8714222 | 219979 | 29,17 | 7,28 | 278 | 2950,00 | 4,12 | 1890,0 | 26,78 | 41,45 | 2,18 | 375,45 | 951,25 | 0,15 | 41,45 | <LQ | 113,00 | 5,40 | 122,50 | 355,50 | <LQ | 13,50 | Pov. Bandeira |
| P-11 | 8714994 | 223154 | 27,76 | 6,89 | 84 | 2600,00 | 2,55 | 1660,0 | 9,18 | 71,91 | 1,34 | 314,54 | 725,13 | 0,20 | 71,91 | <LQ | 192,00 | 2,80 | 146,50 | 91,00 | 0,04 | 7,90 | Pov. Barbosa |
| P-12 | 8706812 | 225863 | 25,25 | 6,84 | 146 | 1040,00 | 9,68 | 657,0 | 12,87 | 73,91 | 0,30 | 52,73 | 243,80 | 0,22 | 73,91 | 0,13 | 114,00 | 0,29 | 45,00 | 11,00 | <LQ | 4,50 | Pov. Baraúna |
| P-13 | 8707007 | 224141 | 26,13 | 7,02 | 172 | 886,00 | 6,38 | 567,0 | 3,89 | 67,92 | 0,44 | 32,73 | 94,38 | 0,39 | 67,92 | <LQ | 103,50 | 0,30 | 44,00 | 7,55 | <LQ | 2,75 | Pov. Baraúna |
| P-14 | 8707693 | 222273 | 26,64 | 6,94 | 172 | 845,00 | 7,88 | 541,0 | 3,30 | 66,92 | 0,36 | 25,45 | 74,88 | 0,31 | 66,92 | <LQ | 97,50 | 0,31 | 44,50 | 6,85 | <LQ | 4,15 | Pov. Cigana |
| P-15 | 8706872 | 217620 | 27,48 | 6,92 | 169 | 2320,00 | 8,18 | 1490,0 | 111,95 | 47,94 | 1,39 | 299,99 | 277,95 | 0,38 | 47,94 | <LQ | 212,50 | 0,83 | 58,00 | 93,50 | 0,02 | 4,25 | Pov. Erva Cidreira |
| P-16 | 8703996 | 218793 | 27,48 | 7,18 | 167 | 1320,00 | 6,50 | 846,0 | 20,00 | 63,92 | 0,95 | 83,63 | 260,35 | 0,12 | 63,92 | <LQ | 143,00 | 1,20 | 69,50 | 16,00 | <LQ | 4,75 | Pov. Queimada do Tiano |
| P-17 | 8701077 | 219209 | 27,09 | 6,91 | 51 | 752,00 | 7,80 | 481,0 | 9,85 | 73,91 | 0,04 | 9,09 | 29,75 | 0,20 | 73,91 | 0,24 | 96,50 | 0,22 | 39,50 | 5,30 | <LQ | 5,50 | Pov. Lagoa do Gado |
| P-18 | 8705237 | 224349 | 28,57 | 7,05 | 167 | 1000,00 | 8,73 | 641,0 | 31,54 | 75,91 | 0,32 | 63,64 | 154,40 | 0,17 | 75,91 | 0,17 | 118,50 | 1,20 | 44,00 | 21,00 | <LQ | 4,60 | Pov. Queima Roupa |
| P-19 | 8701210 | 225020 | 27,99 | 7,04 | 170 | 778,00 | 8,57 | 498,0 | <LQ | 69,91 | 0,41 | 21,82 | 60,83 | 0,41 | 69,91 | <LQ | 91,00 | <LQ | 39,50 | 6,85 | <LQ | 4,15 | Pov. Lagoa Grande |
| P-20 | 8700742 | 221800 | 27,40 | 7,01 | 182 | 882,00 | 8,43 | 565,0 | 6,82 | 71,91 | 0,44 | 45,45 | 131,58 | 0,46 | 71,91 | 0,14 | 102,50 | <LQ | 47,00 | 9,65 | <LQ | 3,35 | Pov. Queimada |
| P-21 | 8696068 | 226063 | 27,08 | 7,08 | 163 | 1390,00 | 17,56 | 889,0 | 98,36 | 71,91 | 0,26 | 123,63 | 49,03 | 0,14 | 71,91 | <LQ | 124,50 | 0,37 | 45,50 | 57,00 | <LQ | 3,50 | Pov. Lagoa do Agostinho |
| P-22 | 8692160 | 223454 | 28,41 | 6,77 | 191 | 1640,00 | 6,45 | 1050,0 | 33,15 | 69,91 | 0,12 | 216,36 | 116,35 | <LQ | 69,91 | <LQ | 148,00 | 0,85 | 44,50 | 84,00 | 0,03 | 3,90 | Pov. Grama 2 |
| P-23 | 8689723 | 217895 | 27,93 | 7,07 | 115 | 1720,00 | 8,97 | 1100,0 | 10,21 | 44,94 | 2,03 | 207,27 | 343,75 | <LQ | 44,94 | <LQ | 134,00 | 0,24 | 89,50 | 84,00 | 0,29 | 6,00 | Pov. Boa Vista do Canal |
| P-24 | 8693526 | 217478 | 28,84 | 6,39 | 223 | 1600,00 | 14,36 | 1020,0 | 37,82 | 63,92 | 0,61 | 201,81 | 160,88 | 0,29 | 63,92 | <LQ | 152,50 | 0,74 | 72,50 | 27,00 | <LQ | 4,75 | Pov. Ouricuri |
| P-25 | 8695287 | 220497 | 28,12 | 8,08 | 119 | 1760,00 | 15,35 | 1130,0 | 83,93 | 67,92 | 0,52 | 339,99 | 90,35 | 0,28 | 67,92 | 0,12 | 147,00 | 0,45 | 64,50 | 27,50 | <LQ | 3,70 | Pov. Junco do Sergipano |
| P-26 | 8700550 | 227738 | 28,58 | 8,78 | 78 | 1140,00 | 11,99 | 730,0 | 0,35 | 65,92 | 0,54 | 103,63 | 83,18 | <LQ | 65,92 | <LQ | 94,00 | 2,30 | 50,00 | 53,50 | <LQ | 6,00 | Pov. Lagoa das Pedras |
| P-27 | 8707560 | 234458 | 27,20 | 5,83 | 217 | 1120,00 | 19,06 | 715,0 | 36,58 | 55,43 | 0,03 | 136,36 | 33,10 | <LQ | 55,43 | 0,26 | 103,50 | 0,12 | 38,00 | 41,50 | <LQ | 8,95 | Pov. Melancia |
| P-28 | 8711540 | 230793 | 27,80 | 7,03 | 196 | 1100,00 | 11,85 | 705,0 | 17,16 | 55,93 | 0,23 | 120,00 | 60,40 | <LQ | 55,93 | 0,12 | 100,00 | 0,28 | 44,00 | 24,50 | <LQ | 5,00 | Pov. Lagoa do Cazuzo |
| P-29 | 8714166 | 228874 | 27,99 | 6,93 | 200 | 982,00 | 16,87 | 692,0 | 4,69 | 67,92 | 0,51 | 32,73 | 176,13 | 0,31 | 67,92 | <LQ | 113,00 | 0,45 | 52,00 | 9,40 | <LQ | 3,60 | Pov. Boa Hora |
| P-30 | 8719521 | 221067 | 30,84 | 7,82 | 17 | 2340,00 | 6,96 | 1500,0 | 79,10 | 68,91 | 0,84 | 254,54 | 517,38 | 0,28 | 68,91 | <LQ | 195,00 | 1,40 | 103,50 | 88,50 | <LQ | 4,90 | Pov. Presídio |
| P-31 | 8712859 | 225780 | 28,62 | 8,28 | 9 | 1500,00 | 14,73 | 959,0 | 38,11 | 57,93 | 0,87 | 127,27 | 311,75 | 0,02 | 57,93 | <LQ | 152,00 | 1,20 | 76,50 | 21,00 | <LQ | 4,40 | Pov. Guaraiá |
| Mínimo | | | 5,83 | 9 | 752,00 | 1,90 | 481,0 | 0 | 41,45 | 0,03 | 9,09 | 29,75 | 0 | 41,45 | 0 | 91,00 | 0 | 33 | 5,3 | 0 | 2,75 | | |
| Máximo | | | 8,78 | 298 | 2950,00 | 19,06 | 1890,0 | 111,95 | 75,91 | 2,18 | 375,45 | 951,25 | 0,46 | 75,91 | 0,26 | 212,50 | 5,85 | 146,50 | 355,50 | 0,29 | 13,50 | | |
| Média | | | 7,06 | 183,7 | 1408,74 | 9,31 | 903,1 | 33,12 | 63,93 | 0,59 | 148,80 | 192,54 | 0,20 | 63,93 | 0,06 | 130,24 | 0,93 | 60,09 | 46,33 | 0,01 | 5,03 | | |
| Mediana | | | 6,93 | 182 | 1200,00 | 8,57 | 769 | 21,25 | 66,92 | 0,44 | 127,27 | 106,325 | 0,20 | 66,92 | 0 | 118,5 | 0,305 | 48 | 27 | 0 | 4,6 | | |
| Desvio Padrão | | | 0,54 | 79,37 | 566,12 | 4,24 | 360,98 | 31,87 | 9,34 | 0,53 | 105,15 | 210,81 | 0,13 | 9,34 | 0,09 | 31,68 | 1,41 | 29,23 | 64,04 | 0,05 | 2,08 | | |
| Erro Padrão | | | 0,10 | 14,26 | 101,68 | 0,76 | 64,83 | 5,72 | 63,93 | 0,10 | 18,89 | 37,86 | 0,02 | 63,93 | 0,02 | 5,69 | 0,25 | 5,25 | 11,50 | 0,01 | 0,37 | | |
| Coefficiente de Variação | | | 7.66% | 43.21% | 40.19% | 45.61% | 39.97% | 96.21% | 14.62% | 89.91% | 70.67% | 109.49% | 65.36% | 14.62% | 146.17% | 24.32% | 150.74% | 48.65% | 138.23% | 392.13% | 41.43% | | |
| Teste de normalidade SW p = | | | 0.0089 | 0.1137 | 0.0097 | 0.1262 | 0.0097 | 0.0095 | 0.0099 | 0.0090 | 0.0476 | 0.0079 | 0.1656 | 0.0099 | 0.0077 | 0.0099 | 0.0066 | 0.0084 | 0.0063 | 0.0031 | 0.0085 | | |

Elaboração: O autor

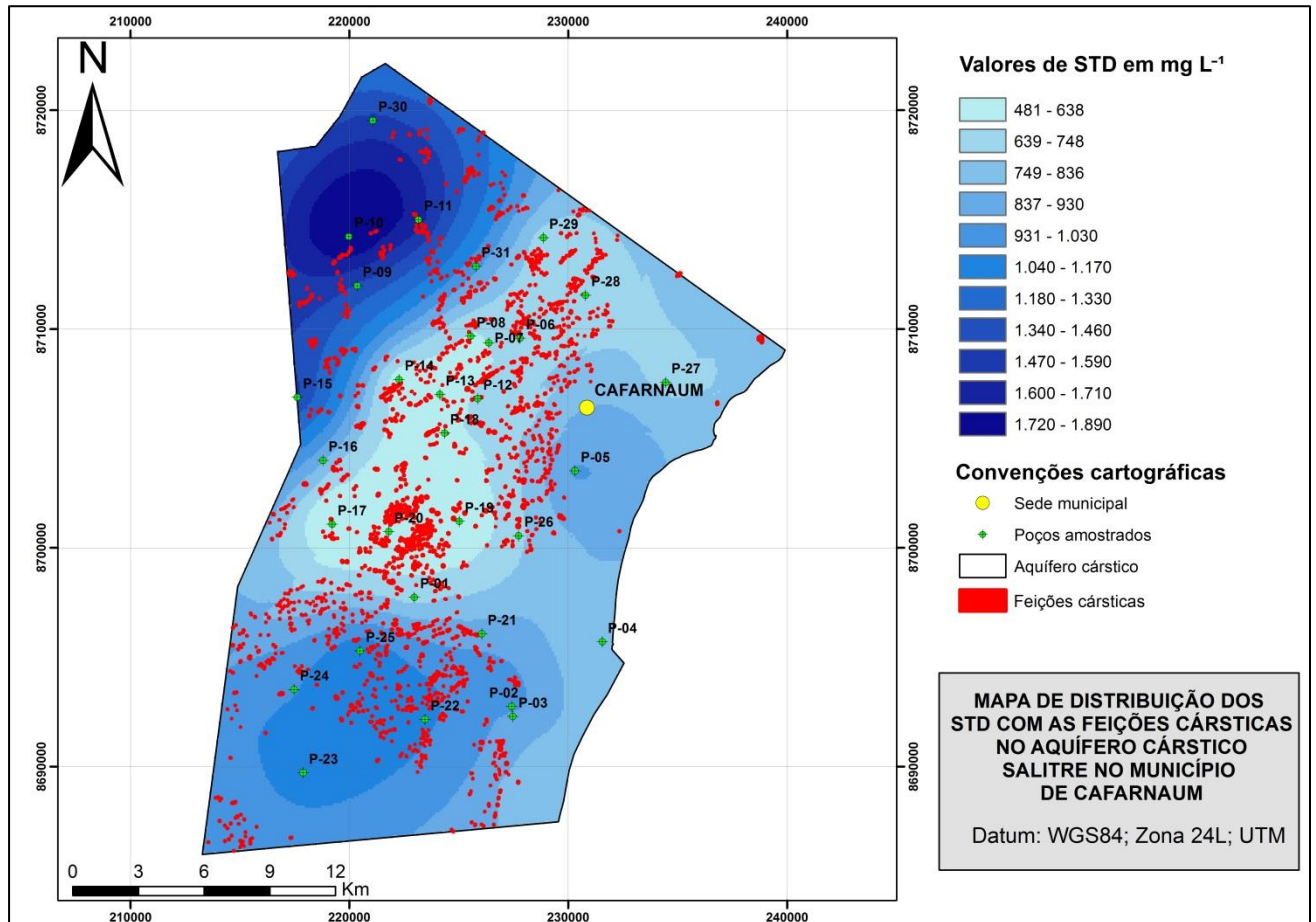
Na área de estudo os valores de pH mostram uma variação entre 8,78 (P-26) e 5,83 (P-27), com valor médio de 7,06. Geralmente, as águas de um aquífero cárstico possuem a propriedade natural de neutralizar a acidez da água da chuva com o CO₂ dissolvido e também da água oriunda de aquíferos não cársticos em zonas de contato com o aquífero cárstico, que comumente possuem águas mais ácidas. Os valores de pH ligeiramente mais ácidos estão relacionados a águas que estão fluindo em uma zona no aquífero com baixo conteúdo de material carbonático, isso é observado no ponto 27, onde foi encontrado nos arredores afloramentos de barita. Outro fator que pode explicar esses valores mais ácidos é o processo de oxidação dos sulfetos presentes nas litologias da Formação Salitre.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) é o peso total dos constituintes minerais presentes na água por unidade de volume, refletindo a concentração de todo o material dissolvido na água, seja ou não volátil. Esses teores indicam uma relação direta com a composição mineralógica da rocha/reservatório e com o tempo de percolação/residência das águas subterrâneas no interior do sistema aquífero (SANTOS, 2011). Os valores de STD obtidos nas amostras de águas subterrâneas são bastante elevados, variando de 481 mg L⁻¹ (P-17) a 1890 mg L⁻¹ (P-10), com valor médio de 674,90 mg L⁻¹. O valor máximo permitido (VMP) pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde é de 1000 mg L⁻¹, dessa forma, foram encontradas concentrações acima do VMP em 29% das amostras. Os valores elevados de STD normalmente estão relacionados à facilidade do processo de solubilização das rochas carbonáticas. Os baixos valores de STD nos pontos P-17 (481 mg L⁻¹), P-19 (498 mg L⁻¹) e P-20 (565 mg L⁻¹), na porção central, estão relacionados a maior concentração de feições cársticas (dolinas) na área de estudo (Figura 14). Por essas feições cársticas ocorre a maior parte da recarga do aquífero através da precipitação, dessa forma, a água dessa região pode ter pouco tempo de residência no interior do aquífero e consequentemente menor dissolução das rochas carbonáticas nessa região.

A condutividade Elétrica (CE) é a medida da facilidade de uma água conduzir a corrente elétrica e está diretamente ligada com a concentração de sais dissolvidos sob a forma de íons, possibilitando a quantificação do grau de mineralização de forma indireta da água subterrânea. Quanto mais substâncias ionizadas dissolvidas na água, maior é corrente elétrica e maior a condutividade, portanto, menor a resistividade. Para Mendes; Oliveira (2004) os sais existentes na água possuem origens diversas, podendo resultar de processos de lixiviação do solo, de carbonatos, bicarbonatos, cloretos, nitratos e outros solúveis, ou podem provir de efluentes e resíduos agrícolas e/ou industriais, que contaminam essas águas. Os valores da CE variam de 752 µS/cm (P-17) a 2950,0µS/cm (P-10), com valor médio de 1408,74 µS/cm. Os

valores da CE do aquífero estudado estão diretamente associados à dissolução das rochas carbonáticas. Não existe um valor máximo permitido para a condutividade elétrica na legislação brasileira.

Figura 14 - Mapa de distribuição da STD com as feições cársticas



Elaboração: O autor

Oxigênio dissolvido é a concentração deste elemento químico contido na água, sendo essencial para todas as formas de vida aquática. Os sistemas aquáticos produzem e consomem o oxigênio, o qual é retirado da atmosfera na interface água - ar e também é obtido como resultado de atividades fotossintéticas de algas e plantas. Geralmente a concentração de OD nas águas subterrâneas é baixa, já que maior parte do ar dissolvido é consumida na oxidação da matéria orgânica durante a percolação da água na zona de insaturada. Os valores do OD variam de 1,90 mg L⁻¹ (P-05) a 19,06 mg L⁻¹ (P-27), com valor médio de 9,31 mg L⁻¹. Na legislação brasileira não existe um valor máximo permitido para o OD. A alta concentração de oxigênio dissolvido reflete nas altas concentrações de sulfato e nitrato.

O cálcio é um dos principais constituintes da água subterrânea e junto ao magnésio são os principais responsáveis pela dureza da água subterrânea. É o elemento mais abundante existente na maioria das águas naturais e rochas, Nas águas subterrâneas, sua concentração é controlada principalmente pelos minerais mais solúveis, como a calcita (CaCO_3), a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_2)_2$) e a anidrita (CaSO_4) (LIMA, 2010), em solução, ocorre predominantemente sob a forma de bicarbonatos. A solubilidade do bicarbonato de cálcio aumenta em presença de sais de Na^+ e K^+ . Os valores da concentração do cálcio variam $91,00 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 19) a $212,50 \text{ mg L}^{-1}$, com valor médio de $130,24 \text{ mg L}^{-1}$. A concentração do cálcio nas águas subterrânea não é um parâmetro legislado pelas leis brasileiras, porém nas normas da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) estabelece uma concentração aceitável de até $75,0 \text{ mg L}^{-1}$, portanto, todos os valores da concentração de cálcio no aquífero estudado são superiores aos recomendados.

O magnésio apresenta propriedades equivalentes ao cálcio, porém, é mais solúvel e mais difícil de precipitar (SANTOS, 2008). Ocorre principalmente em rochas carbonatadas e tem como minerais fontes mais frequentes a magnesita e a dolomita. Os valores da concentração de magnésio variam $33,00 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 03) a $146,50 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 11), com valor médio de $60,09 \text{ mg L}^{-1}$. A concentração de magnésio nas águas subterrânea não é um parâmetro legislado pelas leis brasileiras, porém nas normas da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) estabelece uma concentração aceitável de até $50,0 \text{ mg L}^{-1}$, dessa forma, foram encontradas concentrações acima do VMP em 48,4% das amostras. A principal fonte de magnésio das águas subterrâneas na área de estudo são os níveis de calcários dolomíticos presentes na Formação Salitre.

O sódio é um dos metais alcalinos mais abundantes nas águas subterrâneas, sua abundância está ligada com as seguintes características: ampla distribuição nos minerais fontes; baixa estabilidade química dos minerais que o contêm; solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução (SANTOS, 2008). Nas águas subterrâneas o sódio ocorre, principalmente, sob a forma de cloretos, tendo como mineral fonte os feldspatos plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios. É o principal responsável pelo aumento da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico. Pode aparecer como um indicativo de contaminação por efluentes residuais domésticos, uma vez que este é um elemento comum nas excreções humanas e é usado também em fertilizantes (MENDES; OLIVEIRA, 2004). As águas naturais com elevados teores de Na^+ , geralmente possuem elevadas concentrações de F^- (SANTOS, 2008), formando sais que são acumulados no solo e na zona não saturada no período seco, devido aos processos de evapotranspiração, que no período chuvoso são lixiviados e transportados para a zona saturada.

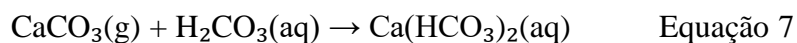
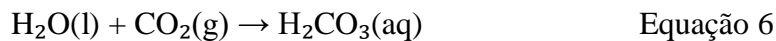
Os valores da concentração de sódio variam $5,30 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 17) a $355,50 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 10), com valor médio de $46,33 \text{ mg L}^{-1}$, a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde estabelece para águas potáveis um valor máximo permitido de 200 mg L^{-1} . Dessa forma, foi encontrada concentração acima do aceitável somente no ponto P-10 ($355,50 \text{ mg L}^{-1}$). Portanto, concentrações mais elevadas de sódio na área de estudo estão diretamente relacionadas à dissolução dos níveis argilosos na Formação Salitre, às taxas de evapotranspiração ou fontes pontuais de poluição.

O potássio ocorre em pequenas quantidades nas águas subterrâneas devido à sua intensa atuação em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e, ainda, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais. Apresenta solubilidade muito elevada (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983). Concentrações elevadas de potássio em aquíferos cársticos podem estar ligadas ao uso de fertilizantes agrícolas (PERRIN et al., 2003; STEUBER; CRISS, 2005). A Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde e a Resolução Conama nº 396/08 não estabelecem um valor máximo permitido para os teores da concentração de potássio. Na área de estudo os valores da concentração de potássio variam $2,75 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 13) a $13,50 \text{ mg L}^{-1}$ (P – 10), com valor médio de $5,03 \text{ mg L}^{-1}$. Segundo Negrão (1987), os teores de potássio nas águas subterrâneas da Bacia de Irecê, provavelmente, são fornecidos pelos minerais argilosos existentes nos níveis de margas calcíferas presentes nas rochas carbonáticas da Formação Salitre.

O cloreto, em geral, é muito solúvel e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita, não se oxidando e nem se reduzindo em águas naturais e, geralmente, associando-se com o cálcio. A alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo. Devido à acentuada solubilização das rochas dos aquíferos cársticos, ocorre a formação de compostos de cloretos cálcicos, magnesianos e sódicos. As fontes naturais de cloreto geogênico devem ser insignificantes em aquíferos cársticos que não contenham minerais evaporíticos como a halita. A concentração natural de cloreto na água subterrânea é em função da concentração de cloreto na precipitação local e sua concentração aumenta pela evapotranspiração (SCHMIDT et al., 2013). As potenciais fontes antrópicas de cloretos são a infiltração de águas residuais, eliminação de resíduos sólidos (lixiviados em aterro), prática agrícola (fertilizantes) e pecuária (dejetos/estrupe), bem como a aplicação de sal de desengorduramento (SCHMIDT et al., 2013).

Os valores da concentração do cloreto variam de 9,09 mg L⁻¹ (P-17) a 375,45 mg L⁻¹ (P-10), com valor médio de 148,80 mg L⁻¹. O valor máximo permitido (VMP) pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde é de 250,00 mg L⁻¹, dessa forma, foram encontradas concentrações de cloreto acima do VMP em 19,4% das amostras. Guerra (1986), estudando o aquífero Salitre na Bacia Carbonática de Irecê, concluiu que as concentrações de cloreto estão diretamente relacionadas a taxas de evapotranspiração ou inversamente a taxas de infiltração, estando às concentrações anormais de cloreto associadas a focos pontuais de poluição.

A alcalinidade é definida como a capacidade de uma água neutralizar ácidos, sendo resultado direto da presença e/ou ausência de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Os valores da alcalinidade total variam de 41,45 mg L⁻¹ (P-10) a 75,91 mg L⁻¹ (P-18), com valor médio de 63,93 mg L⁻¹. Esses valores estão relacionados com a presença do bicarbonato. A presença do bicarbonato nas águas subterrâneas é oriunda da primeira reação originada da dissolução dos carbonatos do aquífero Salitre através do dióxido de carbono dissolvido na água da chuva (Equações 6 e 7).



Portanto, os maiores valores da alcalinidade total localizados na porção central da área de estudo, onde estão localizadas as maiores concentrações de dolinas, demonstra a importante contribuição dessas feições cársticas na recarga do aquífero.

O sulfato forma sais modernamente solúveis a muito solúveis e, em meios redutores, com abundante matéria orgânica, pode sofrer redução bacteriana (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983). O sulfato nas águas subterrâneas pode originar-se de fontes naturais como a dissolução de minerais contendo enxofre, por exemplo, gipsita, pirita e outros sulfetos. Já as fontes antrópicas desse composto na água subterrânea incluem: fertilizantes sintéticos e orgânicos, vazamentos de sistemas de esgoto, fossas sépticas, aterros municipais e industriais, deposição atmosférica e rejeitos de minas (JAKÓBCZYK-KARPIERZA et al., 2017).

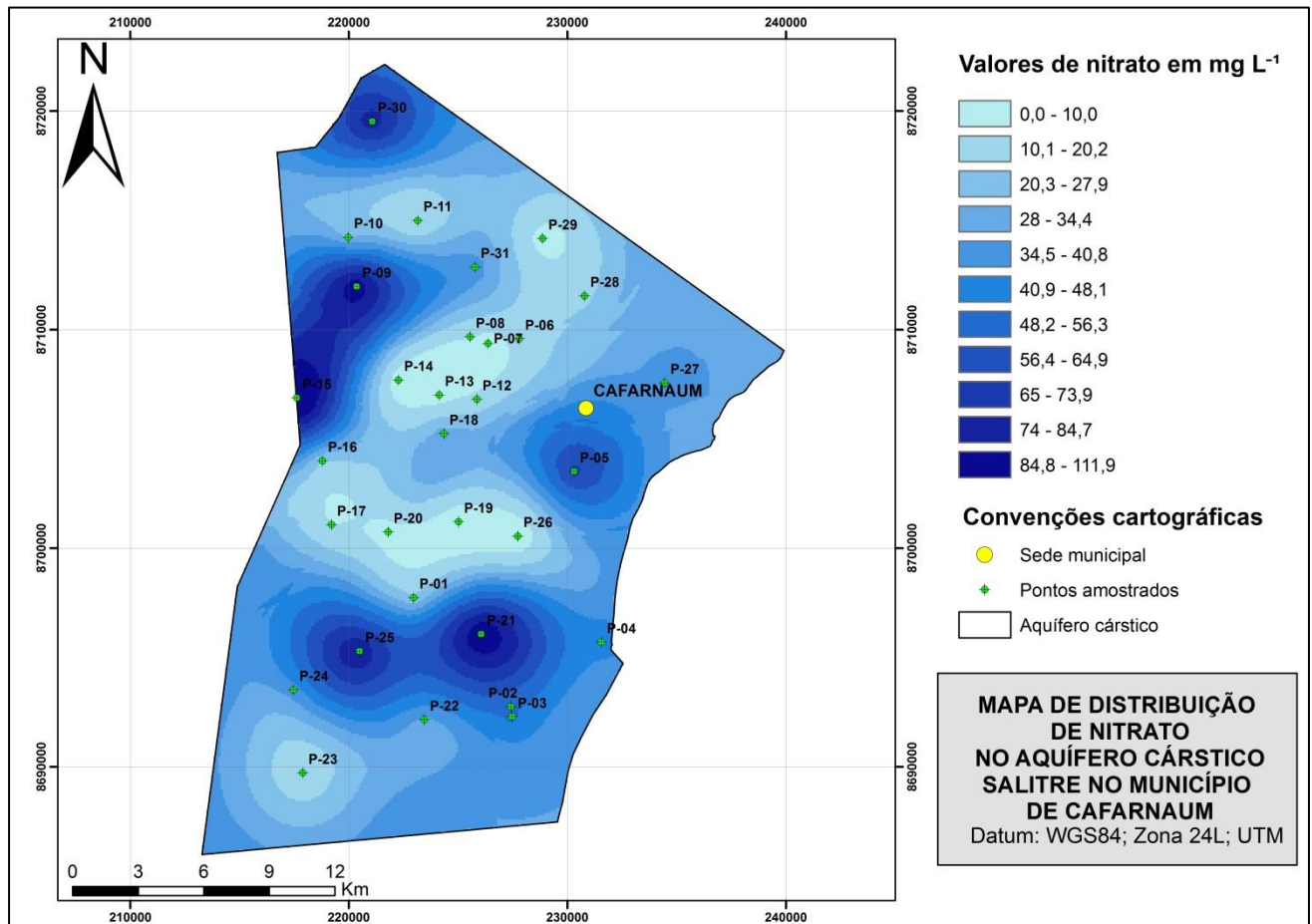
Os valores da concentração do sulfato variam de 29,75 mg L⁻¹ (P-17) a 951,25 mg L⁻¹ (P-10), com valor médio de 192,54 mg L⁻¹. A Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde não estabelece um valor máximo permitido para os teores da concentração de sulfato, porém a Resolução do Conama nº 396/08, estabelece um valor máximo permitido de 250 mg L⁻¹, dessa forma, foram encontradas concentrações acima do VMP em 25,8% das amostras. Durante o

levantamento de campo, observou-se que no ponto P-10, onde ocorre o maior valor da concentração de sulfato, foi detectado um odor muito forte de ovo podre, relacionado à presença de gás sulfídrico (H_2S). Misi; Souto (1975), estudando mineralizações de chumbo, zinco, flúor e bário disseminados em níveis dolomíticos da Formação Salitre, identificaram a presença de galena (PbS), esfalerita (ZnS), covellita (CuS), pirita (FeS_2) e calcopirita (CuFeS_2). Portanto concentrações mais elevadas em sulfatos dissolvidos na água subterrânea estão relacionadas diretamente a oxidação desses sulfetos metálicos.

O nitrato em águas naturais ocorre em pequenas concentrações relacionadas à presença de matéria orgânica em estágio avançado de oxidação. A lixiviação de nitratos para a água subterrânea está relacionada às condições hidrogeológicas, uso da terra e tipo de solo (OENEMA et al., 2005). Sendo muito móvel, o nitrato tem uma enorme facilidade de ser removido das camadas superiores do solo para as águas subterrâneas pouco profundas, através de aquíferos com alta permeabilidade e/ou muito fraturados, como é o caso dos aquíferos cársticos, em ambientes intensamente oxidantes. O nitrato pode persistir nas águas subterrâneas durante décadas e acumular-se a níveis elevados à medida que mais é aplicado à superfície terrestre todos os anos. O nitrato é um composto que pode ocorrer naturalmente em concentrações muito baixas na água subterrânea. Santos (2008) indica que valores da concentração de nitrato acima de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividades antrópicas, tais como esgotos domésticos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, resíduos de animais e uso de adubos nitrogenados.

Contudo, a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde estabelece para águas potáveis um valor máximo de 45 mg L^{-1} (10 mg L^{-1} expresso em N) para nitrato. Os teores da concentração de nitrato variam de <LQ (P-19) a $111,95 \text{ mg L}^{-1}$ (P-15), com valor médio de $33,12 \text{ mg L}^{-1}$, dessa forma, foram encontradas concentrações acima do VMP em 25,8% das amostras. Os valores mais elevados da concentração de nitrato no aquífero estudado estão localizados em povoados do município de Cafarnaum, onde se tem alta densidade populacional, que não possuem rede de coleta de esgoto para as residências, tendo seus efluentes domésticos despejados em fossas negras e, conseqüentemente, contaminando a água subterrânea da região. Os menores valores do teor de nitrato estão concentrados na parte central da área de estudo, região com baixa densidade populacional (Figura 15). No município de Cafarnaum somente 4,6% da população são atendidos com esgotamento sanitário adequado (IBGE, 2010). Portanto, um possível da causa para os altos valores da concentração de nitrato está relacionado à falta de saneamento básico.

Figura 15 - Mapa de distribuição dos valores de nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



Elaboração: O autor

Águas subterrâneas em meios cársticos podem conter elevados teores de flúor (GONÇALVES, 2014), relacionados ao intemperismo de minerais como a fluorita (CaF_2) e apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$), causado pela interação água-rocha que promove a lixiviação e dissolução como fluoreto. O flúor apresenta uma mobilidade bastante alta, a qual representa provavelmente uma das razões para a distribuição de altas concentrações do íon fluoreto observados na água subterrânea (RAFIQUE et al., 2009). A contaminação das águas subterrâneas por fluoreto ocorre também devido a atividades antrópicas, através da fabricação ou aplicação de fertilizantes fosfatados, fabricas de tijolos, indústria siderúrgica e queima de carvão. Fatores como a temperatura, a precipitação da calcita em meio alcalino e reações de troca de bases promovem a solubilização da fluorita e o aumento das atividades do sódio e flúor (HANDA, 1975; RAO, 2011).

Os valores da concentração de fluoreto variam de $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ (P-27) a $2,18 \text{ mg L}^{-1}$ (P-10), com valor médio de $0,59 \text{ mg L}^{-1}$. O valor máximo permitido (VMP) pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde é de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$, dessa forma, foram encontradas concentrações de fluoreto acima do VMP em 6,4% das amostras. Araujo (2012), estudando as rochas da Formação Salitre na Bacia de Carbonática de Irecê, identificou a presença de veios de fluorita nas rochas da unidade B1 de Misi: Silva (1996), referente à unidade Nova América de Bomfim et al. (1985), nomenclatura usada nessa dissertação. Portanto, as concentrações mais elevadas do fluoreto dissolvidas na água subterrânea estão relacionadas diretamente a dissolução da fluoritas contidas nas rochas da Formação Salitre.

O fósforo ocorre nas águas naturais sob a forma de fosfato e devido à ação dos microrganismos, a concentração de fosfato é geralmente é baixa, entre $0,01$ e $1,0 \text{ mg L}^{-1}$. Valores acima de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, geralmente são indicativos de águas poluídas (SANTOS, 2008). Geralmente a presença do fosfato nas águas subterrâneas está associada à dissolução de minerais de fósforo, como a apatita e sua origem antropogênica está relacionada aos derivados de fertilizantes, detergentes, efluentes domésticos, inseticidas e pesticidas. O fosfato apresenta uma nítida tendência para formar compostos com vários íons e coligações fortes com os minerais de argila, que dificulta a sua solubilização. A presença de Fe , Ca_2^+ e NO_3^- limita a concentração do fosfato (QIAN, et al., 2011) e a ocorrência do CO_2 dissolvido a favorece (SANTOS, 2008). Ambiente levemente alcalino favorece a dissolução do fósforo (JIN et al., 2006).

A Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde e a Resolução Conama nº 396/08 não estabelecem um valor máximo permitido para os teores da concentração de fosfato nas águas subterrâneas. Na área de estudo os valores da concentração do fosfato variam de um valor mínimo abaixo do limite de detecção nos pontos P-26, P-27, P-28, P-22 e P-23 a $0,46 \text{ mg L}^{-1}$ (P-20), com valor médio de $0,20 \text{ mg L}^{-1}$. A baixa concentração de fosfato nas águas subterrâneas do aquífero estudado pode estar ligada as altas concentrações de Ca_2^+ e NO_3^- , que limita a sua solubilização, já que, na região, ocorre o uso de grandes quantidades de fertilizantes contendo fosfato na agricultura. Outro fator que pode ter limitado a concentração do fosfato é o aprisionamento do mesmo nos níveis argilosos das rochas carbonáticas da Formação Salitre.

O estrôncio é um elemento alcalino terroso e tem uma forte correlação geoquímica com cálcio a baixas temperaturas (WANG et al., 2006), por vezes, o substituindo de forma restrita na apatita e no carbonato de cálcio (FAURE, 1986). Geralmente é produto da interação água-rocha de aquíferos contendo carbonatos, como a estroncianita (SrCO_3), e sulfatos, como

a celestina (SrSO_4). Possui um comportamento similar ao cálcio, porém seus sais são menos solúveis (SANTOS, 2008).

A Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde e a Resolução Conama nº 396/08 não estabelecem um valor máximo permitido para os teores da concentração de estrôncio. Os valores da concentração de estrôncio variam de um valor mínimo abaixo do limite de detecção nos pontos P-19 e P-20 a $5,85 \text{ mg L}^{-1}$ (P-09), com valor médio de $0,93 \text{ mg L}^{-1}$. A concentração de estrôncio na área de estudo é relacionada à dissolução das rochas carbonáticas contendo minerais de estrôncio.

O bário é um metal alcalino terroso, ocorre especialmente sobre a forma de Witherita (BaCO_3) e de barita (BaSO_4). Os compostos de bário são admitidos com baixa nocividade, devido às baixas solubilidades dos minerais de bário (GONÇALVES, 2014), entretanto, sob condições ácidas, alguns compostos de bário (ex.: sulfato de bário) podem se tornar solúveis e disponíveis nas águas subterrâneas (LAGAS et.al., 1984). Esses minerais dissolvem-se na água gerando hidróxido de bário (Ba(OH)_2), de forte ação alcalina. Concentrações de bário também pode ter origem antrópica, já que o fluorsilicato de bário (BaSiF_6) é usado como inseticida (SANTOS, 2008).

A Portaria nº 2914/11 não estabelece um valor máximo permitido para os teores da concentração de bário, porém a Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008, estabelece um valor máximo permitido de $0,7 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores da concentração de bário só foram detectados em onze amostras, com um valor médio de $0,06 \text{ mg L}^{-1}$. Todos os valores estão abaixo do valor máximo permitido pela legislação. A presença de bário nas águas subterrâneas do aquífero estudo pode está ligada a dissolução da barita.

O zinco é o metal pesado mais solúvel e seus sais são extremamente resistentes nas águas subterrâneas. Sua mobilidade é elevada em condições ácidas e oxidantes e baixas em meios redutores e alcalinos (SANTOS, 2011). Determinado sais de zinco podem ser absorvidos por sedimentos, atenuando os riscos da alta solubilidade destes (GONÇALVES, 2014). Também são absorvidos pelo processo de adsorção de argilas, óxidos de ferro e manganês (LIMA, 2010). A dissolução de suas espécies químicas é em função do pH. Ocorre na água subterrânea oriundo da lixiviação do solo e rochas contendo minerais de zinco (esfalerita), da corrosão de canalizações feitas em ferro galvanizado e por contaminação por influentes industriais (MENDES; OLIVEIRA, 2004; LIMA, 2010).

A Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde estabelece para águas potáveis um valor máximo permitido de 5 mg L^{-1} . Na área de estudo, os valores da concentração de zinco só foram

detectados em cinco amostras, com todos os valores estão abaixo do valor máximo permitido. Misi; Souto (1975), estudando mineralizações na Formação Salitre de chumbo, zinco, flúor e bário na porção nordeste da área de estudo, identificaram a presença de esfalerita (ZnS), portanto a presença de zinco dissolvido na água subterrânea é consequência direta da dissolução desse sulfeto.

A concentrações de Al, Fe, Cu, Pb, Ni e Mn, estão abaixo do limite de quantificação.

5.4.2 Análise dos componentes principais (PCA)

A Análise dos Componentes Principais (PCA), conhecida também como Análise Multivariada, foi realizada para caracterizar as águas do aquífero Salitre, através da correlação ou covariância entre um conjunto de variáveis principais.

O PCA é matematicamente definido como uma transformação linear ortogonal, que transforma os dados para um novo sistema de coordenadas, de forma que a maior variância, por qualquer projeção dos dados, fica ao longo do primeiro componente, a segunda maior variância fica ao longo do segundo componente e, assim por diante.

O produto final da análise fatorial é uma matriz de cargas em forma de números, positivos ou negativos, geralmente menores que 1, que expressam o quanto uma variável analisada está carregada ou saturada em um determinado fator, ou seja, quanto maior for o valor de um fator, mais a variável se identifica com o que representa este fator. O número de componentes usados no PCA foi determinado com base no critério de Kaiser (1960), para o qual apenas os componentes com autovalores superiores a 1 são analisados. A investigação das componentes principais (PCA) demonstrou que os 4 primeiros fatores representam cerca de 76% da variância dos dados (Tabela 2).

O fator 1 descreve cerca de 42,4% da variância total do conjunto de dados, sendo definida pela forte correlação entre as variáveis STD, F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Sr⁺, Mg²⁺ e Na⁺. A existência dessas variáveis neste fator sugere a existência de dois processos geoquímicos que controlam as fontes de constituintes químicos dissolvidos na água. A forte correlação do STD com o F⁻, SO₄²⁻, Sr⁺ e Mg²⁺ sugere o processo de dissolução, devido a interação água-rocha, das rochas carbonáticas (dolomitos) contendo sulfetos e fluorita disseminados. A forte correlação entre do STD com o Cl⁻ e o Na⁺ pode ser explicada pelo processo de salinização da água subterrânea causado pela evapotranspiração no período de seca, atuante durante a percolação da água no solo e zona insaturada, concentrando os sais dissolvidos

nessas zonas. Durante o período chuvoso, esses sais são lixiviados e transportados para a zona saturada.

Tabela 2 - Matriz de Componentes do Método Análise dos Componentes Principais (PCA)

| VARIÁVEIS | FATOR 1 | FATOR 2 | FATOR 3 | FATOR 4 |
|-------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------|
| pH | -0,225 | -0,686 | -0,149 | -0,286 |
| ORP | 0,129 | 0,738 | 0,065 | 0,352 |
| OD | 0,279 | -0,170 | 0,158 | -0,684 |
| STD | -0,966 | -0,005 | 0,217 | 0,003 |
| NO ₃ ⁻ | -0,381 | 0,022 | 0,840 | -0,200 |
| HCO ₃ ⁻ | 0,532 | -0,520 | -0,048 | 0,273 |
| F ⁻ | -0,836 | -0,119 | -0,238 | 0,093 |
| Cl ⁻ | -0,850 | 0,124 | 0,373 | -0,108 |
| SO ₄ ²⁻ | -0,905 | -0,086 | -0,249 | 0,151 |
| PO ₄ ³⁻ | 0,140 | 0,010 | 0,333 | 0,676 |
| Ba ⁺ | 0,350 | 0,552 | 0,168 | -0,337 |
| Ca ²⁺ | -0,628 | -0,217 | 0,649 | 0,110 |
| Sr ⁺ | -0,798 | -0,061 | -0,186 | 0,029 |
| Mg ²⁺ | -0,867 | -0,269 | -0,107 | 0,132 |
| Na ⁺ | -0,825 | 0,322 | -0,226 | -0,060 |
| K ⁺ | -0,661 | 0,514 | -0,358 | -0,250 |
| Autovalor | 6,789 | 2,148 | 1,850 | 1,498 |
| Variância total (%) | 42,434 | 13,423 | 11,563 | 9,364 |
| Variância acumulativa (%) | 42,434 | 55,858 | 67,420 | 76,784 |

Elaboração: O autor

O processo de salinidade das águas subterrâneas é amplificado em regiões áridas, como o local de estudo, devido à alta taxa de evaporação e baixa precipitação que estimulam os processos anteriormente mencionados e também reduzem os efeitos de diluição na água salina.

O fator 2 descreve cerca de 13,4% da variância total do conjunto de dados, sendo definida pela forte correlação com o ORP. Esse fator sugere que o potencial redox não tem correlação com as outras variáveis, assim sendo, não possui influência na dissolução/mobilidade dos constituintes químicos no aquífero.

O fator 3 descreve cerca de 11,5% da variância total do conjunto de dados, sendo definida pela forte correlação com NO₃⁻. Esse fator sugere que o nitrato não tem correlação com as outras variáveis, portanto, comprova que o nitrato é de origem antrópica. O fator 4 descreve cerca de 9,3% da variância total do conjunto de dados.

5.4.3 Mecanismos que controlam a geoquímica das águas subterrâneas

Para determinar os principais mecanismos naturais que controlam as fontes dos constituintes químicos dissolvidos, podem ser utilizados os diagramas químicos que foram propostos por Gibbs (1970). Que propôs dois diagramas para avaliar os efeitos dominantes da precipitação, da interação água-rocha ou evaporação sobre a evolução geoquímica das águas subterrâneas em regiões semiáridas e áridas. São utilizados dois diagramas com as proporções de peso do $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ e $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ contra os sólidos dissolvidos totais (TDS) em um eixo logarítmico .

Inicialmente o diagrama de Gibbs foi utilizado para avaliar as águas superficiais, mas em estudos recentes de qualidade das águas subterrâneas, esses diagramas foram usados para avaliar as fontes de constituintes químicos dissolvidos das águas subterrâneas em aquíferos não confinados e com potencial para serem influenciados pelas águas superficiais (NGUYEN et al., 2015; VENKATRAMANAN et al., 2015; KUMAR et al., 2015; NAGARAJU et al., 2016;). As amostras caem predominantemente no campo de dominância da interação água-rocha com leve tendência para o campo da evaporação. Portanto, o mecanismo de dissolução das rochas do aquífero e o processo evaporação controlam a mineralização da água, tornando-se as principais fontes de íons (Figuras 16 e 17).

5.4.4 Classificação hidroquímica

Para a classificação hidroquímica das águas subterrâneas do aquífero Salitre no município de Cafarnaum foram utilizado os valores dos cátions (Ca^2 , Mg^2 , Na e K) e dos ânions (CO^- , HCO^- , Cl^- e SO^{2-}), dispostos no diagrama triangular de Piper (1944) (Figura 18). Este diagrama é composto por diagramas ternários, compostos por grupos de cátions e ânions, definindo suas respectivas classificações. Um terceiro diagrama apresenta o resultado da classificação para os cátions e ânions.

Figura 16 - Diagrama de Gibbs STD x Na/(Na + Ca)

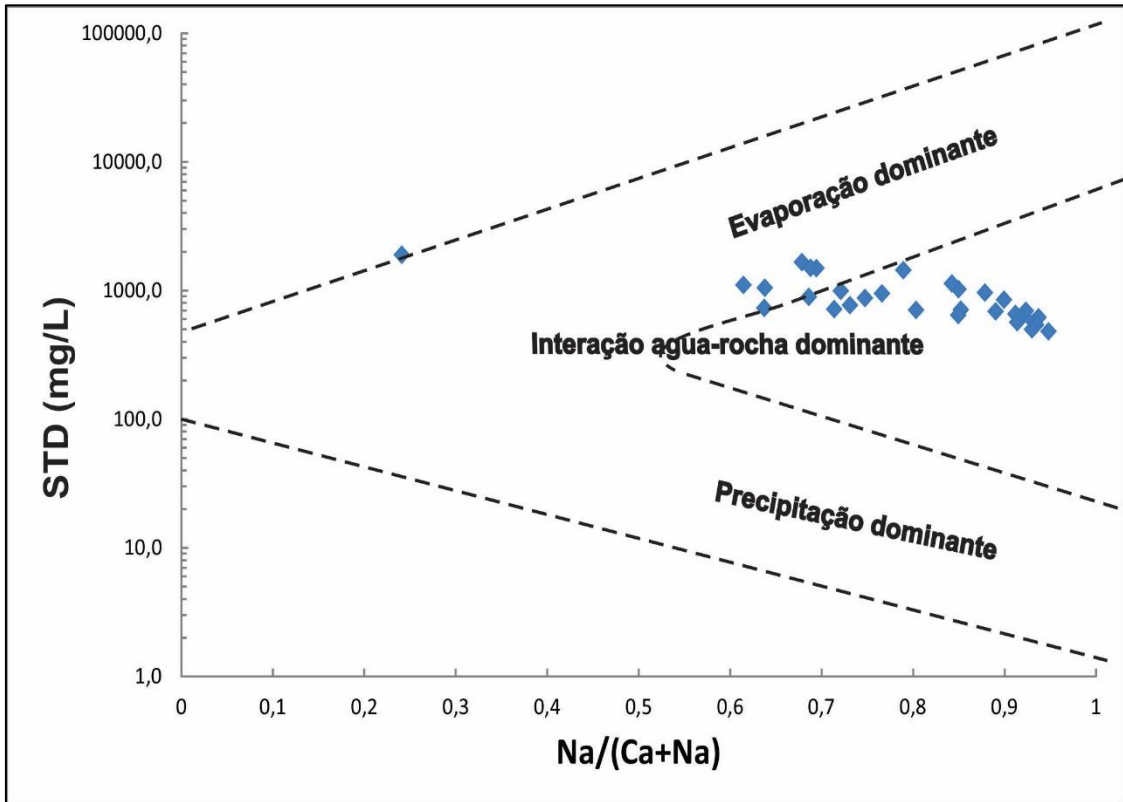
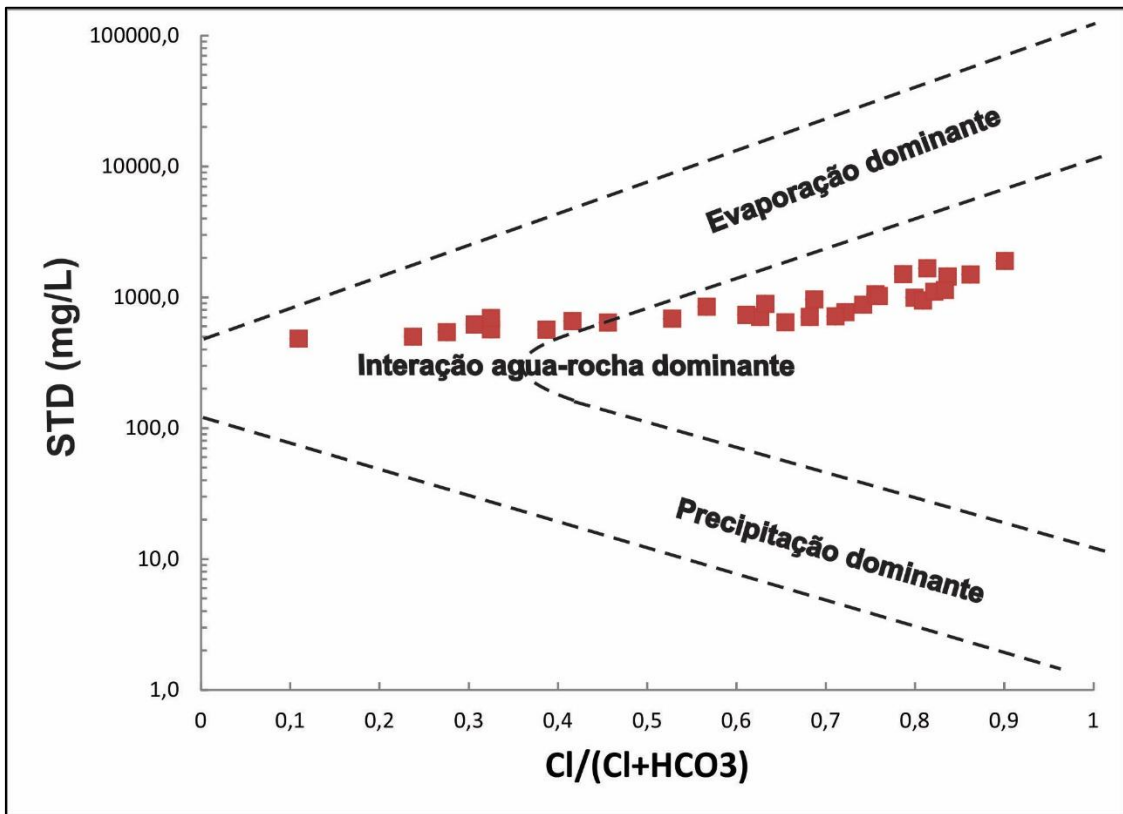
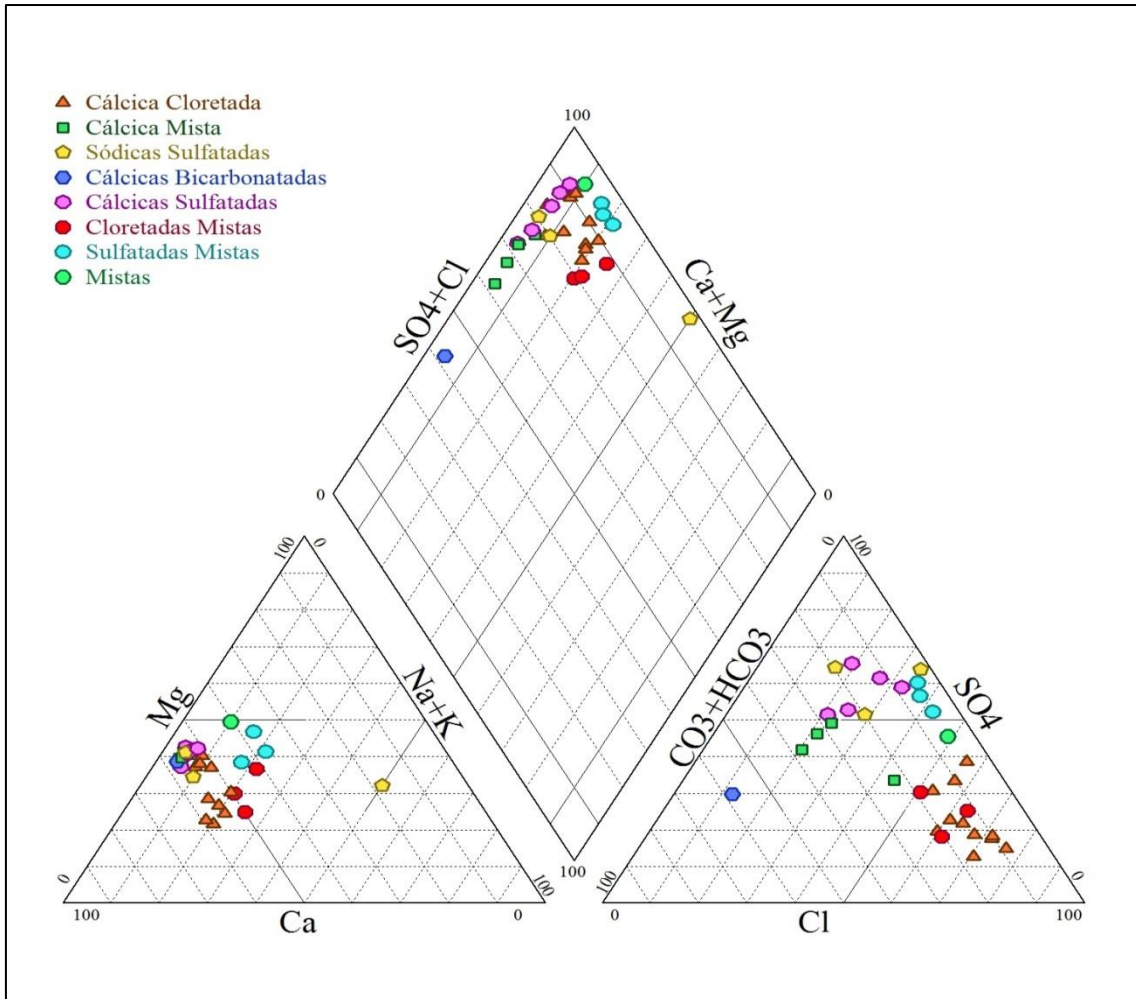


Figura 17 - Diagrama de Gibbs STD x Cl/(Cl + HCO₃)



Elaboração: O autor

Figura 18 - Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



Elaboração: O autor

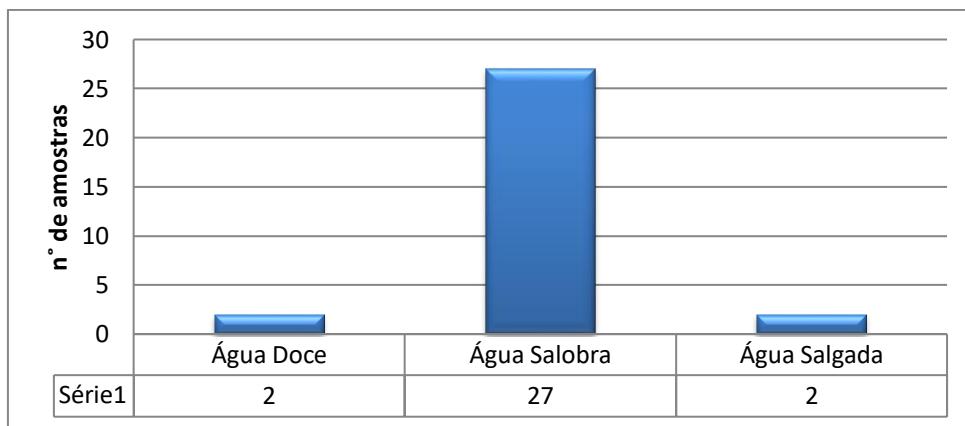
De acordo com a interpretação do diagrama, é permitido classificar as águas do aquífero estudado como:

- cálceias cloretadas – 35%;
- cálceias sulfatadas – 23%;
- cálceias mistas – 13%;
- cloretadas mistas – 10%;
- sulfatadas mistas – 10%;
- cálceias bicarbonatadas – 3%;
- sódicas sulfatadas – 3%
- mistas – 3%.

Esta variedade na classificação hidroquímica das águas subterrâneas do aquífero estudado reflete a variação da composição química das rochas que compõem o aquífero, estando também subordinada às condições locais de recarga e circulação subterrânea.

Em relação à salinidade da água, a classificação no Qualigraf permitiu verificar que, dos poços amostrados, 2 (6,4%) poços apresentaram água doce, 26 (87,1%) apresentaram água salobra e 2 (6,4%) apresentaram água salgada (Figura 19).

Figura 19 - Classificação em relação à salinidade das águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



Elaboração: O autor

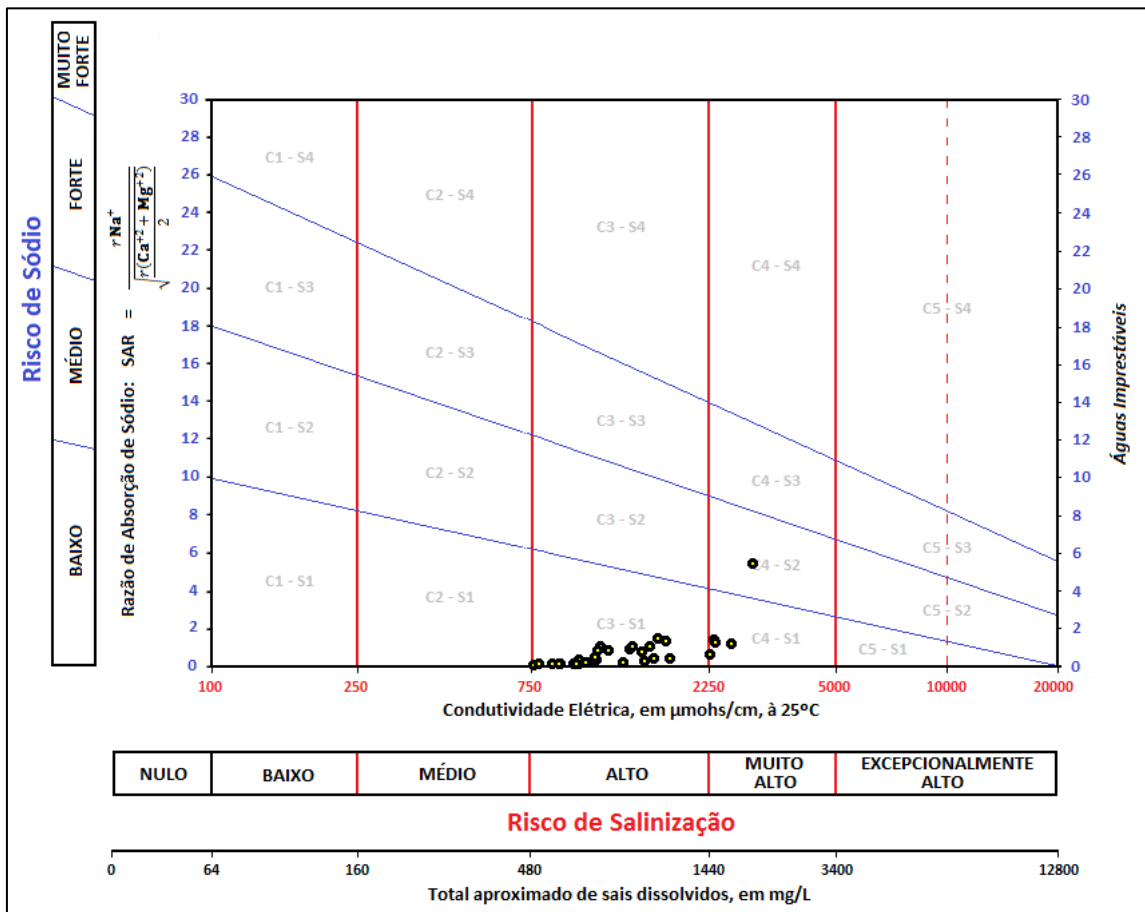
5.4.5 Qualidade das águas subterrâneas para irrigação

No município de Cafarnaum, devido à escassez hídrica superficial, todos os poços amostrados são empregados na irrigação. O uso da água subterrânea para a irrigação podem gerar diversos problemas aos solos da região, devido às suas características físico-químicas, entre eles, salinização, alcalinização e sodificação. Esses possíveis problemas podem ser amplificados pela elevada evapotranspiração e a baixa quantidade de chuvas na região.

Neste estudo, os parâmetros utilizados para se estabelecer a qualidade da água subterrânea para irrigação foram a razão de adsorção de sódio (SAR, em inglês) e a condutividade elétrica, identificados através do Diagrama SAR, adotado pelo U.S. Salinity Laboratory (USSL, 1954) (Figura 20). Para isso, utilizou-se o software Qualigraf.

A razão de adsorção de sódio é um índice que indica a proporção relativa do Na^+ em relação ao Ca^{2+} e Mg^{2+} , esse índice é importante especialmente quando são altas as taxas de sódio, pois estes tendem a substituir o cálcio e o magnésio, comprometendo o solo.

Figura 20 - Classificação das águas subterrâneas do aquífero Salitre para agricultura



Elaboração: O autor

De acordo com o diagrama acima, as águas da área de estudo, estão classificadas nas classes:

- C3 – S1: 83,9% ou 27 amostras, indicando alto risco de salinidade e baixo risco de sódio;
- C4 – S1: 12,9% ou 4 amostras, indicando risco muito alto de salinidade e risco baixo de sódio;
- C4 – S2: 3,2% ou 1 amostra, indicando risco muito alto de salinidade e risco médio de sódio.

Dessa forma, as águas subterrâneas do aquífero Salitre no município de Cafarnaum possuem alto risco de salinidade, não sendo indicados para o uso na irrigação sem algum tipo de tratamento, e baixo risco de sódio.

A tabela 3 mostra a classificação das águas subterrâneas do aquífero cárstico Salitre em Cafarnaum.

Tabela 3 – Classificação geral das águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum

| Poços | Classificação das águas baseada em íons principais | Classificação das águas baseada na salinidade | Classificação das águas baseada no Diagrama SAR |
|-------|--|---|---|
| P01 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P02 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P03 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P04 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P05 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P06 | Cálcica Mista | Água Salobra | C3 - S1 |
| P07 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P08 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P09 | Mista | Água Salobra | C4 - S1 |
| P10 | Sódica Sulfatada | Água Salgada | C4 - S2 |
| P11 | Mista Sulfatada | Água Salgada | C4 - S1 |
| P12 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P13 | Cálcica Mista | Água Salobra | C3 - S1 |
| P14 | Cálcica Mista | Água Salobra | C3 - S1 |
| P15 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C4 - S1 |
| P16 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P17 | Cálcica Bicarbonatada | Água Doce | C3 - S1 |
| P18 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P19 | Cálcica Mista | Água Doce | C3 - S1 |
| P20 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P21 | Mista Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P22 | Mista Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P23 | Mista Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P24 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P25 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P26 | Mista Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P27 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P28 | Cálcica Cloretada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P29 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |
| P30 | Mista Sulfatada | Água Salobra | C4 - S1 |
| P31 | Cálcica Sulfatada | Água Salobra | C3 - S1 |

Elaboração: O autor

5.5 CONCLUSÕES

A interação química água-rocha durante a percolação da água no solo, zona insaturada e na zona saturada é um dos fatores fundamentais para a ocorrência das diversas espécies químicas identificadas nas águas subterrâneas do aquífero Salitre. Somando-se a isso, outro

fator importante para a diferenciação dessas espécies químicas é o processo de evapotranspiração, característico em regiões de clima semiárido, altas temperatura o ano inteiro e baixo volume de precipitação, que contribui para a salinização das águas subterrâneas. Além dos fatores naturais acima mencionados, a ocorrência de atividades antrópicas poluentes tem influência expressiva no comportamento hidroquímico do aquífero, afetando a qualidade da água para o consumo.

Com relação aos aspectos hidrogeológicos, o aquífero Salitre em Cafarnaum é um aquífero livre e anisotrópico, com direção preferencial de fluxo potenciométrico SW – NE. Outra direção de fluxo identificada tem direção SE – NW, convergindo para NE, localizado na área de contato com as rochas do grupo Chapada Diamantina, confirmando um importante vetor de infiltração de água subterrânea para o aquífero.

A caracterização hidroquímica do aquífero Salitre em Cafarnaum permitiu verificar que suas águas são altamente mineralizadas, possuindo elevadas concentrações de STD, onde os principais íons responsáveis por concentração, de acordo com o fator 1 da análises dos componentes principais (PCA), são: F^- , Cl^- , SO_4^{2+} , Sr^+ , Mg^{2+} e Na^+ . Essa caracterização permitiu também a detecção de NO_3^- , PO_4^{3-} , além do Ca^{2+} , Ba^+ , Sr^+ , K^+ e Zn^{2+} . Todos esses elementos em maior ou menor grau contribuem para a salinidade da água. A detecção de elevadas concentrações de NO_3^- , em regiões com alta densidade populacional, sugere a contaminação por efluentes domésticos, justamente pela falta de esgotamento sanitário em grande parte do município.

Baseado nas legislações aplicáveis sobre a portabilidade da água, as águas do aquífero Salitre em Cafarnaum, excedem os valores máximos permitidos (VMP) para os seguintes elementos, em porcentagem de análises: cálcio (100%), magnésio (48,40%), sólidos totais dissolvidos (29%), nitrato (25,80%), sulfato (25,80%), cloreto (19,40%), fluoreto (6,4%) e sódio (3,2%). Para todos os outros elementos analisados (estrôncio, bário, fosfato e zinco), as concentrações estão abaixo do VMP. A concentrações de Al, Fe, Cu, Pb, Ni e Mn, não foram detectados através do método de análise proposto. Assim sendo, as águas do aquífero estudado não deve ser usado para o consumo humano sem nenhum tipo de tratamento, que a torne potável.

A análise dos componentes principais (PCA) revelou que o Fator 1 demonstrou elevada correlação entre variáveis que indicam a existência de dois processos geoquímicos que controlam as fontes de constituintes químicos dissolvidos na água, dissolução devido a interação água-rocha no aquífero e processo de sinalização oriundo da

evapotranspiração/lixiviação. O Fator 2 revelou que o potencial redox não possui influência na dissolução/mobilidade dos constituintes químicos no aquífero. O Fator 3 mostrou que o nitrato não tem correlação com as outras variáveis, portanto, comprova que o nitrato é de origem antrópica.

De acordo com o diagrama de Gibbs (1970), o mecanismo de dissolução das rochas e o processo evaporação controlam a mineralização da água, tornando-se as principais fontes de íons para as águas subterrâneas.

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas de Cafarnaum, plotadas no Diagrama de Piper (1944), permitiu verificar que predominam nessa área de estudo águas sulfatas ou cloretadas e águas cálcicas ou magnesianas. Corroborando com o resultado dos constituintes químicos encontrados nas águas. Já a classificação das águas subterrâneas para irrigação utilizando o Diagrama SAR, indica de forma geral que as águas analisadas classificam-se como sendo de risco alto a muito alto de salinidade e risco baixo a médio de sódio, sendo consideradas inapropriadas para a agricultura pelo alto risco de salinização do solo irrigado. Em relação à salinidade, 87,1% dos poços analisados apresentam água salobra, 6,4% apresentam água salgada e 6,4% apresentam água doce.

A presente dissertação possibilitou a execução de um diagnóstico acerca da qualidade das águas subterrâneas do aquífero cárstico Salitre em Cafarnaum e a realização de um mapeamento das condições hidrogeoquímicas locais do aquífero. Essas informações certamente serão muito úteis para o desenvolvimento de políticas públicas locais, aliado a construção de um possível Plano Municipal de Gestão dos Recursos Hídricos, para orientar os usos e controles da água subterrânea, bem como para impedir a contaminação dessas águas, através da instalação de uma rede de esgotos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da análise do mapa de vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, permitiu a delimitação de 4 classes de vulnerabilidade na área: muito alta (12,5% - 70,20 km²), alta (0,5% - 2,0 km²), moderada (32,7%, 183,30 km²) e baixa (54,4%, 305,70 km²). A individualização dessas classes de vulnerabilidade foi obtida através da análise dos parâmetros descritos na metodologia COP.

Para o fator C, a individualização das feições cársticas (dolinas) e de sua área de influência, até 100 metros da borda da dolina, é o fator que teve um papel significativo para a delimitação da classe de vulnerabilidade muito alta do índice COP gerados na área. As dolinas fornecem conexão direta do aquífero com a superfície, acarretando no transporte de contaminantes para a zona saturada, sem sofrer nenhum tipo de retenção química ou física na zona insaturada. A ausência de outras feições cársticas, devido à falta de afloramentos e conseqüentemente, a baixa intensidade dos processos de carstificação nas demais áreas do aquífero, influenciou a delimitação da classe de vulnerabilidade moderada a baixa no índice COP. A baixa declividade na área de pesquisa foi um fator que não teve influência significativa na delimitação das classes de vulnerabilidade.

O fator O é totalmente ignorado nas áreas de vulnerabilidade muito alta, pois, na presença de dolinas, ocorre a concentração do fluxo de recarga do aquífero. Para as áreas com vulnerabilidade moderada a baixa, o fator O teve um papel fundamental para a proteção do aquífero, devido à ocorrência de solos espessos e impermeáveis, além da presença de camadas argilosas na zona insaturada.

O fator P é constante e não contribui de forma direta na delimitação das classes de vulnerabilidade, em função do pequeno tamanho da área de estudo e a presença de apenas um regime de precipitação.

O mapa de vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, apresentado nessa dissertação, pode e deve ser utilizado para o planejamento e gestão hídrica e territorial pelos agentes municipais e estaduais, uma vez que delimita as áreas mais vulneráveis à contaminação, como um indicativo de que devem ser áreas protegidas, de forma a viabilizar programas de gestão comprometidos com a preservação ambiental, já que foi detectado a presença de contaminantes de origem antrópica (nitrato) no aquífero nas áreas mais vulneráveis.

A interação química água-rocha durante a percolação da água no solo, zona insaturada e na zona saturada é um dos fatores fundamentais para a ocorrência das diversas espécies

químicas identificadas nas águas subterrâneas do aquífero Salitre. Somando-se a isso, outro fator importante para a diferenciação dessas espécies químicas é o processo de evapotranspiração, característico em regiões de clima semiárido, altas temperatura o ano inteiro e baixo volume de precipitação, que contribui para a salinização das águas subterrâneas. Além dos fatores naturais acima mencionados, a ocorrência de atividades antrópicas poluentes tem influência expressiva no comportamento hidroquímico do aquífero, afetando a qualidade da água para o consumo.

Com relação aos aspectos hidrogeológicos, o aquífero Salitre em Cafarnaum é um aquífero livre e anisotrópico, com direção preferencial de fluxo potenciométrico SW – NE. Outra direção de fluxo identificada tem direção SE – NW, convergindo para NE, localizado na área de contato com as rochas do grupo Chapada Diamantina, confirmando um importante vetor de infiltração de água subterrânea para o aquífero.

A caracterização hidroquímica do aquífero Salitre em Cafarnaum permitiu verificar que suas águas são altamente mineralizadas, possuindo elevadas concentrações de STD, onde os principais íons responsáveis por concentração, de acordo com o fator 1 da análises dos componentes principais (PCA), são: F^- , Cl^- , SO_4^{2+} , Sr^+ , Mg^{2+} e Na^+ . Essa caracterização permitiu também a detecção de NO_3^- , PO_4^{3-} , além do Ca^{2+} , Ba^+ , Sr^+ , K^+ e Zn^{2+} . Todos esses elementos em maior ou menor grau contribuem para a salinidade da água. A detecção de elevadas concentrações de NO_3^- , em regiões com alta densidade populacional, sugere a contaminação por efluentes domésticos, justamente pela falta de esgotamento sanitário em grande parte do município.

Baseado nas legislações aplicáveis sobre a portabilidade da água, as águas do aquífero Salitre em Cafarnaum, excedem os valores máximos permitidos (VMP) para os seguintes elementos, em porcentagem de análises: cálcio (100%), magnésio (48,40%), sólidos totais dissolvidos (29%), nitrato (25,80%), sulfato (25,80%), cloreto (19,40%), fluoreto (6,4%) e sódio (3,2%). Para todos os outros elementos analisados (estrôncio, bário, fosfato e zinco), as concentrações estão abaixo do VMP. A concentrações de Al, Fe, Cu, Pb, Ni e Mn, não foram detectados através do método de análise proposto. Assim sendo, as águas do aquífero estudado não deve ser usado para o consumo humano sem nenhum tipo de tratamento, que a torne potável.

A análise dos componentes principais (PCA) revelou que o Fator 1 demonstrou elevada correlação entre variáveis que indicam a existência de dois processos geoquímicos que controlam as fontes de constituintes químicos dissolvidos na água, dissolução devido a

interação água-rocha no aquífero e processo de sinalização oriundo da evapotranspiração/lixiviação. O Fator 2 revelou que o potencial redox não possui influência na dissolução/mobilidade dos constituintes químicos no aquífero. O Fator 3 mostrou que o nitrato não tem correlação com as outras variáveis, portanto, comprova que o nitrato é de origem antrópica.

De acordo com o diagrama de Gibbs (1970), o mecanismo de dissolução das rochas e o processo evaporação controlam a mineralização da água, tornando-se as principais fontes de íons para as águas subterrâneas.

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas de Cafarnaum, plotadas no Diagrama de Piper (1944), permitiu verificar que predominam nessa área de estudo águas sulfatas ou cloretadas e águas cálcicas ou magnesianas. Corroborando com o resultado dos constituintes químicos encontrados nas águas. Já a classificação das águas subterrâneas para irrigação utilizando o Diagrama SAR, indica de forma geral que as águas analisadas classificam-se como sendo de risco alto a muito alto de salinidade e risco baixo a médio de sódio, sendo consideradas inapropriadas para a agricultura pelo alto risco de salinização do solo irrigado. Em relação à salinidade, 87,1% dos poços analisados apresentam água salobra, 6,4% apresentam água salgada e 6,4% apresentam água doce.

A presente dissertação possibilitou a execução de um diagnóstico acerca da qualidade das águas subterrâneas do aquífero cárstico Salitre em Cafarnaum e a realização de um mapeamento das condições hidrogeoquímicas locais do aquífero. Essas informações certamente serão muito úteis para o desenvolvimento de políticas públicas locais, aliado a construção de um possível Plano Municipal de Gestão dos Recursos Hídricos, para orientar os usos e controles da água subterrânea, bem como para impedir a contaminação dessas águas, através da instalação de uma rede de esgotos.

Frente ao exposto, recomenda-se:

1. O uso de métodos geofísicos para o mapeamento da carste em subsuperfície para adicionar o quarto parâmetro, o desenvolvimento da carste (K), utilizado para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos. A partir disso, usar a modificação do método usado nesse trabalho, o método COP+K de Andreo et al. (2009);
2. O uso de traçadores geoquímicos naturais (isótopos) e artificiais (corantes fluorescentes, sais e partículas), descritos por Goldscheider et al. (2008), para a validação do método de vulnerabilidade proposto;

3. A aplicação de metodologias apropriadas para ambientes cársticos, para a determinação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos que ocorrem no estado da Bahia, como na Bacia de Irecê, de forma a viabilizar programas de proteção para as áreas de maior vulnerabilidade e estratégias de monitoramento;
4. A aplicação de um método de vulnerabilidade específica para o nitrato;
5. A aplicação do método analítico ICP-MS (espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente), método mais sensível que consegue detectar concentrações mais baixas;
6. A adição para análises químicas de amostras de água subterrânea não filtrada, pois durante a filtração pode ocorrer retenção de particulados, principalmente de metais tóxicos;
7. A utilização de isótopos de hidrogênio e oxigênio, que pode indicar o tempo de residência da água no aquífero, e também isótopos de nitrogênio e enxofre para a identificação das fontes do nitrato e sulfato nas águas subterrâneas, respectivamente.

Em pesquisas futuras recomenda-se o estudo microbiótico das águas através da realização de coliformes totais e termotolerantes. Para os gestores públicos urge salientar a necessidade premente da ampliação da rede de esgotamento sanitário do município de Cafarnaum, com o propósito de atenuar o vetor de contaminação por nitrato.

REFERÊNCIAS

- ALKIMIM, F.F.; NEVES, B.B.B.; ALVES, J. A.C. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. *In: DOMINGUEZ, J.M.L.; MISI, A.(Eds.). O Cráton do São Francisco. Sociedade Brasileira de Geologia*, p.45-62, 1993.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-367, 1977.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Portal Hidroweb**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em 1 de janeiro de 2017.
- ANDREO, B; RAVBAR, N; VIAS, J. M. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. **Hydrogeology Journal**, n. 17, p. 749–758, 2009.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: APHA, 1995. 193 p.
- ARAUJO, I. G. D. **Caracterização petrográfica das sequências carbonáticas da sub-bacia de Una-Utinga e correlações com a sub-bacia de Irecê**. 2012. 121 p. Monografia (Bacharelado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia
- BAKALOWICZ, M. La zone d’infiltration des aquifères karstiques Méthodes d’étude. Structure et fonctionnement. **Hydrogéologie**, vol. 4, n. 3, p. 3-21, 1995.
- BOMFIM, L.F.C.; ROCHA, A.J.D.; PEDREIRA, A.J. **Projeto Bacia de Irecê: Relatório Final**. Salvador. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 1985.
- BRANNER, J. C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. **Geological Society of America**, n. 22, p. 187-206, 1911.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 396, de 03 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em 10 de julho de 2017.
- _____. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914/2011, de 12 de dezembro de 2011 **isso vai ou não em negrito? Estou sem as normas aqui. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disponível em: <http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Portaria_MS_2914-11.pdf>. Acesso em 10 julho de 2017.
- CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Omega S.A., 1983. 2v. 2359 p.
- DALY, D.; DASSARGUES; A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, N.; POPESCU, C. Y ZWAHLEN, F. Main concepts of the European Approach for (karst)

groundwater vulnerability assessment and mapping. **Hydrogeology Journal**, v. 10 n. 2, p. 340-345, 2002.

DOMINGUEZ, J. M. L. As Coberturas do Cráton do São Francisco: Uma Abordagem do Ponto de Vista da Análise de Bacia. In: SIMPÓSIO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993 Salvador. **Anais...**, p. 173-159, 1993.

DOMINGUEZ, J. M. L. As Coberturas Plataformais do Proterozóico Médio e Superior. In: BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L., **Geologia da Bahia**. 1.ed. Salvador. 1ª Parte. cap.V, p.105-125, 1996.

FAURE, G.; **Principles of Isotope Geology**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.

FEITOSA, F.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2008. 812 p.

FIGUEIREDO, F. T. **Fácies sedimentares e proveniência da Formação Bebedouro, Neoproterozóico (BA)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FORD, D.; WILLIAMS, P.D. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Chichester: Wiley, 2007, 562 p.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; GOMES D.; D' ELIA M.; PARIS, M. **Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies**. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Ed. brasileira: SERVIMAR, São Paulo, 2002. 114 p.

GIBBS, R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. **Science**, v. 170, n. 3962, p. 1088–1090, 1970.

GOLDSCHIEDER, N.; MEIMAN, J.; PRONK, M.; SMART, C. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. **International Journal of Speleology**, n. 37, v. 1, p. 27-40, 2008.

GONÇALVES, M. V. P. **Flúor nas águas subterrâneas do Aquífero Bambuí no sudoeste da Bahia (Brasil)**. 2014. 193p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia.

GORGEN, J. **O uso da sonda Horiba, U-52G, como instrumento para análise da qualidade da água – estudo de caso Arroio Estrela, Vale do Taquari/RS**. 2010. 73p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul.

GUERRA, A. M. **Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê – Bahia**. 1986. 132p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GUIMARÃES, J. T. **A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação**. 1996. 155p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia.

HANDA, B. K. Geochemistry and genesis of fluoride-containing ground waters in India. **Ground Water**, v. 13, n. 3, p. 275-280, 1975.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados do Censo Demográfico 2010**. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/ba/cafarnaum/panorama>>. Acesso em 17 ago. 2017.

INDA, H. A. V.; BARBOSA, J. F. **Texto explicativo para o mapa geológico do estado da Bahia ao milionésimo**. Salvador: CPRM, 1978. 137 p.

IVÁN, V.; MÁDL-SZÖNYI, J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, p. 76-112, 2017.

JAKÓBCZYK-KARPIERZA, S.; SITEKA, S.; JAKOBSEN, R.; KOWALCZYKA, A. Geochemical and isotopic study to determine sources and processes affecting nitrate and sulphate in groundwater influenced by intensive human activity - carbonate aquifer Gliwice (southern Poland). **Applied Geochemistry**. v. 17, p. 168-181, 2017.

JIN, X.; WANG, S.; PANG, Y.; WU, F. C. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. **Environmental Pollution**, v. 138, n. 2, p. 288-295, 2006.

KAISER, H. F. **The Application of Electronic Computers to Factor Analysis**. Educational and Psychological Measurement. Thousand Oaks, vol. 20, p. 141-151, 1960.

KUMAR, S. K.; LOGESHKUMARAN, A.; MAGESH, N. S.; GODSON, P. S.; CHANDRASEKAR, N. Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. **Applied Water Science**, v. 5, n.4, p. 335-342, 2015.

LAGAS, P.; LOCH, J. P. G.; BORN, C. M. The behavior of barium in a landfill and the underlying soil. **Water, Air, Soil Pollution**, v. 22, p. 121-129, 1984.

LIMA, A. **Composição e origem das águas minerais naturais: exemplo de Caldas da Saúde**. Lisboa: Edições Almedina, 2010.

MACEDO, M. H. F.; BONHOME, M. G. Contribuição à cronoestratigrafia das Formações Caboclo, Bebedouro e Salitre da Chapada Diamantina (Ba), pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 14, n. 3, p. 153-163, 1984.

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M. J. M. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, n. 15 v. 2, p. 29-40, 2011.

MENDES, B., OLIVEIRA, J.F.S. **Qualidade da água para consumo humano**. Lisboa: Lidel, Edições Técnicas Ltda., 2004. 626 p.

MISI, A.; SOUTO, P. Controle estratigráfico das mineralizações de Chumbo, Zinco, Flúor e Bário no Grupo Bambuí – Parte Leste da Chapada de Irecê (Bahia). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, p. 30-45, 1975.

MISI, A.; SILVA, M.G. **Chapada Diamantina Oriental - Bahia: geologia e depósitos.** Salvador: SGM, 194 p., 1996. (Série de Roteiros Geológicos).

MISI, A. O Grupo Bambuí no estado da Bahia. In: INDA, H. A. V. (Ed.) **Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: textos básicos.** Salvador: Secretaria das Minas e Energia, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, v. 1, p.119- 154, 1979.

MISI, A. A sedimentação carbonática do Proterozóico Superior no Cráton do São Francisco: Evolução diagenética e estratigrafia isotópica. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, 1993, Salvador. **Anais.** Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia p. 192-194, 1993.

MOBUS, G. **Qualifraf.** Programa para análise da qualidade de água. FUNCEME. <http://www.funcceme.br/DEHID/index.html>. 2003. Acesso em 17 de junho de 2017.

MUDRY, J. **Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés.** 1987. 378p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - University of Franche-Comté, Besançon, France.

NAGARAJU, A.; THEJASWI, A.; SREEDHAR, Y. Assessment of Groundwater Quality of Udayagiri area, Nellore District, Andhra Pradesh, South India Using Multivariate Statistical Techniques. **Earth Sciences Research Journal**, v. 20, n. 4, 2016.

NEGRÃO, F. I. **Caracterização Hidrogeoquímica e Vulnerabilidade do Sistema Hidrogeológico Cárstico da Região de Irecê, Bahia.** 1987. 86 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEVES, B. B. de B.; CORDANI, U. G.; TORQUATO, J. R. Evolução geocronológica do Precambriano do estado da Bahia. In: INDA, H. A. V., DUARTE, F. (Ed) **Geologia e recursos minerais do estado da Bahia: textos básicos.** v. 3, p.1-101, 1980.

NGUYEN, T. T.; KAWAMURA, A.; TONG, T. N.; NAKAGAWA, N.; AMAGUCHI, H.; GILBUENA, R. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality during dry and rainy seasons for the two main aquifers in Hanoi, Vietnam. **Environmental Earth Sciences**, v. 7, n. 8, p. 4287-4303, 2015.

NOSSA, T. C. B.. **Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP.** 2011. 226p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia.

OENEMA, O.; VAN-LIERE, L.; SCHOUMANS, O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. **Journal of Hydrology**. v. 304, n. 1-4, p. 289–301, 2005.

PEDREIRA, A. J. **O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica.** 1994. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- PEDREIRA, A. J.; ROCHA, A. J. D.; COSTA, I. V. G.; MORAIS FILHO, J. C. **Projeto Bacia de Irecê-II: relatório final**. Salvador: CPRM, 1987.
- PERRIN, J.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at the Milandre test site, Swiss Jura. **Hydrogeology Journal**. v. 11, n. 6, p. 673–686, 2003.
- PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. **Transactions American Geophysical Union: Washington**, v. 25, p. 914-923, 1944.
- QIAN, J.; WANG, L.; ZHAN, H.; CHEN, Z. Urban land-use effects on groundwater phosphate distribution in a shallow aquifer, Nanfei River basin, China. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 7, p. 1431-1442, 2011.
- RAFIQUE, T.; NASEEM, S.; USMANI, T. H.; BASHIR, E.; KHAN, F. A.; BHANGER, M. I. Geochemical Factors Controlling the Occurrence of High Fluoride Groundwater in the Nagar Parkar Area, Sindh, Pakistan. **Journal of Hazardous Materials**. v. 171, n. 1–3, p. 424-430, 2009.
- RAO, S. N. High-fluoride Groundwater. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 176, p. 637–645, 2011.
- SAMPAIO, A. R. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Jacobina – Folha SC 24-y-C, Estado da Bahia**. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.
- SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: Feitosa A. C.; Manoel Filho, J. (Eds.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2008. p. 81–108.
- SANTOS, R. A. **Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do município de Iraquara, Bahia**. 2011. 144 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia.
- SANTOS, R. A. **Hidrogeoquímica dos domínios cársticos de Irecê, Bahia - Brasil**. 2017. 97 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2017.
- SCHMIDT, S.; GEYER, T.; MAREI, A.; GUTTMAN, J.; SAUTER, M. Quantification of long-term wastewater impacts on karst groundwater resources in a semi-arid environment by chloride mass balance methods. **Journal of Hydrology**. v. 502, p. 177-190, 2013
- SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Estatística dos municípios baianos**. Salvador. v. 20, 382 p., 2011
- SOUZA, S. L., BRITO, P. C. R., SILVA, R. W. S. **Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia**. Salvador: CBPM, 1993. 24 p. (Série Arquivos Abertos, 2).

STEUBER, A. M.; CRISS, R. E. Origin and transport of dissolved chemicals in a karst watershed, southwestern Illinois. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 267–290, 2005.

USSL (UNITED STATES SALINITY LABORATORY). **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali soils**. U.S.D.A. Handbook. n. 60, 1954.

VENKATRAMANAN, S; CHUNG, S. Y.; RAMKUMAR, T.; GNANACHANDRASAMY, G.; VASUDEVAN, S.; LEE, S.Y. Application of GIS and hydrogeochemistry of groundwater pollution status of Nagapattinam district of Tamil Nadu, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 8, p. 4429-4424, 2015.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. **Hidrogeology Journal**, v. 14, n. 6, p. 912-925, 2006.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: H. Heise, 1994, 131 p.

WANG, Y.; GUO, Q.; SU, C.; MA, T. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, Shentou, northern China. **Journal of Hydrology**, v. 328, n. 3-4, p. 592-603, 2006.

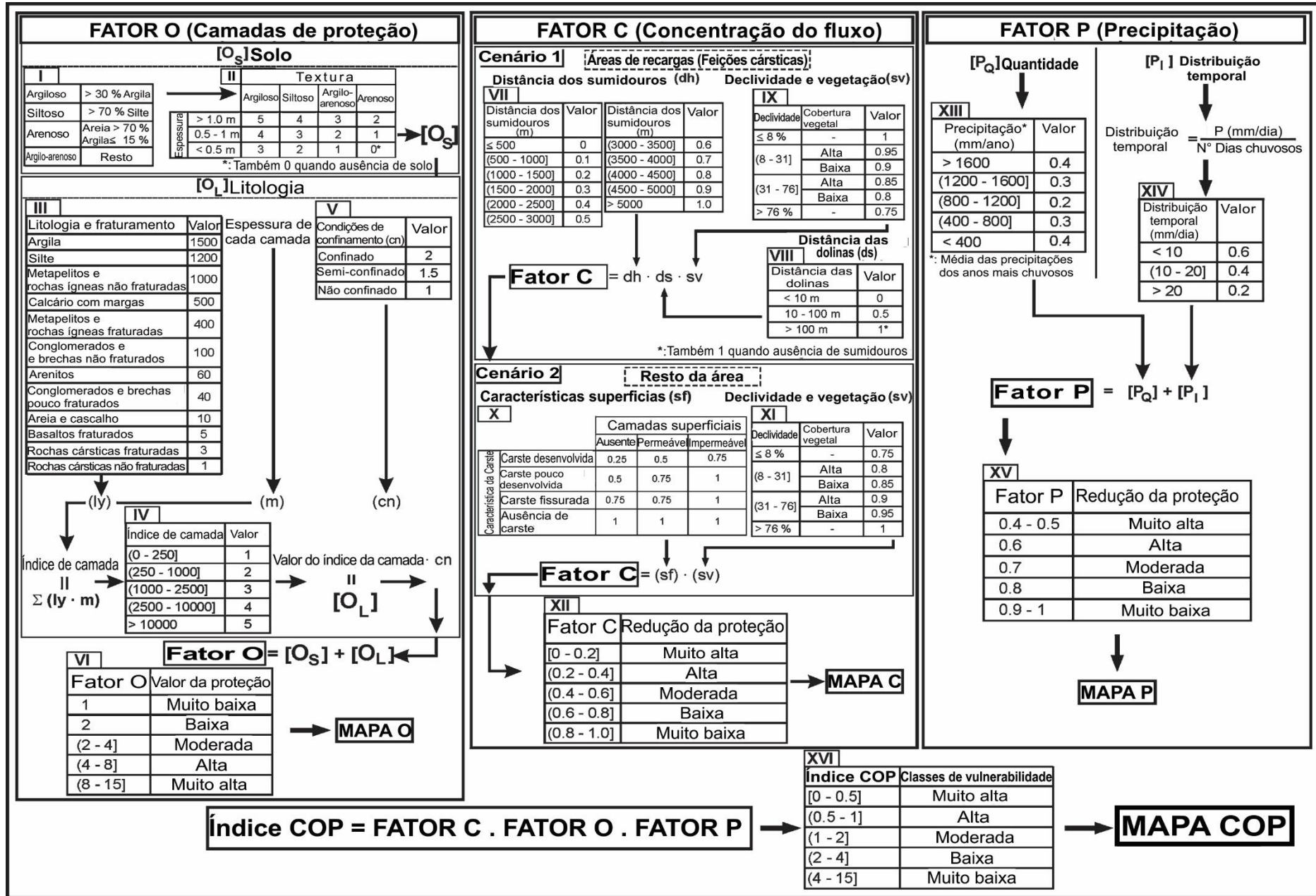
WHO. **Guidelines for Drinking-water Quality**. 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2011.

ZWAHLEN, F. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**: Informe Final de la Acción COST 620, eur. 20912. Luxemburgo: European Commission, Directorate General for Research, 2004. 297 p.

APÊNDICES

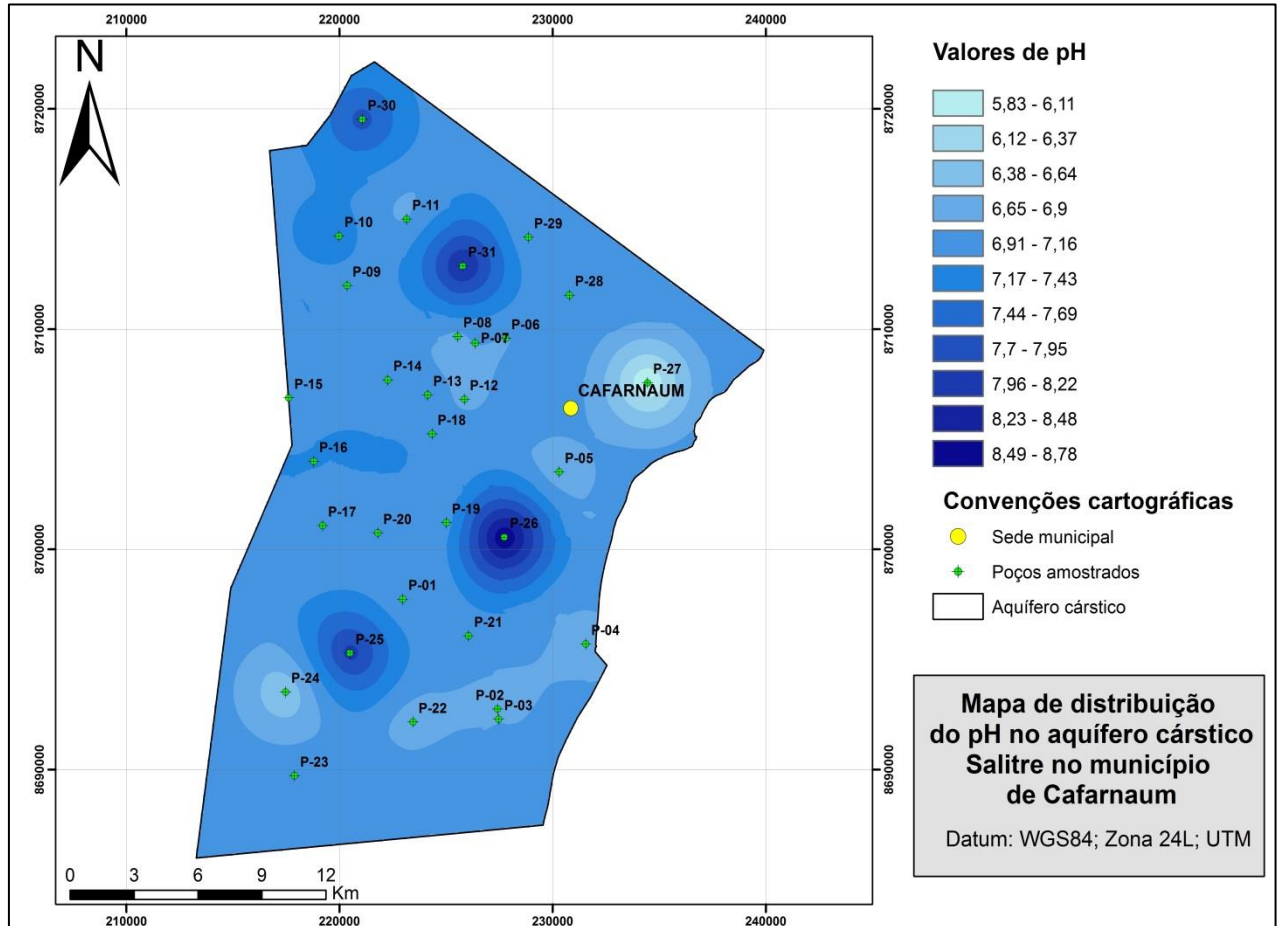
APÊNDICE A – Valores utilizados para os parâmetros do método COP

Apêndice A1 - Diagrama do método COP, mostrando a diferenciação dos fatores C, O e P



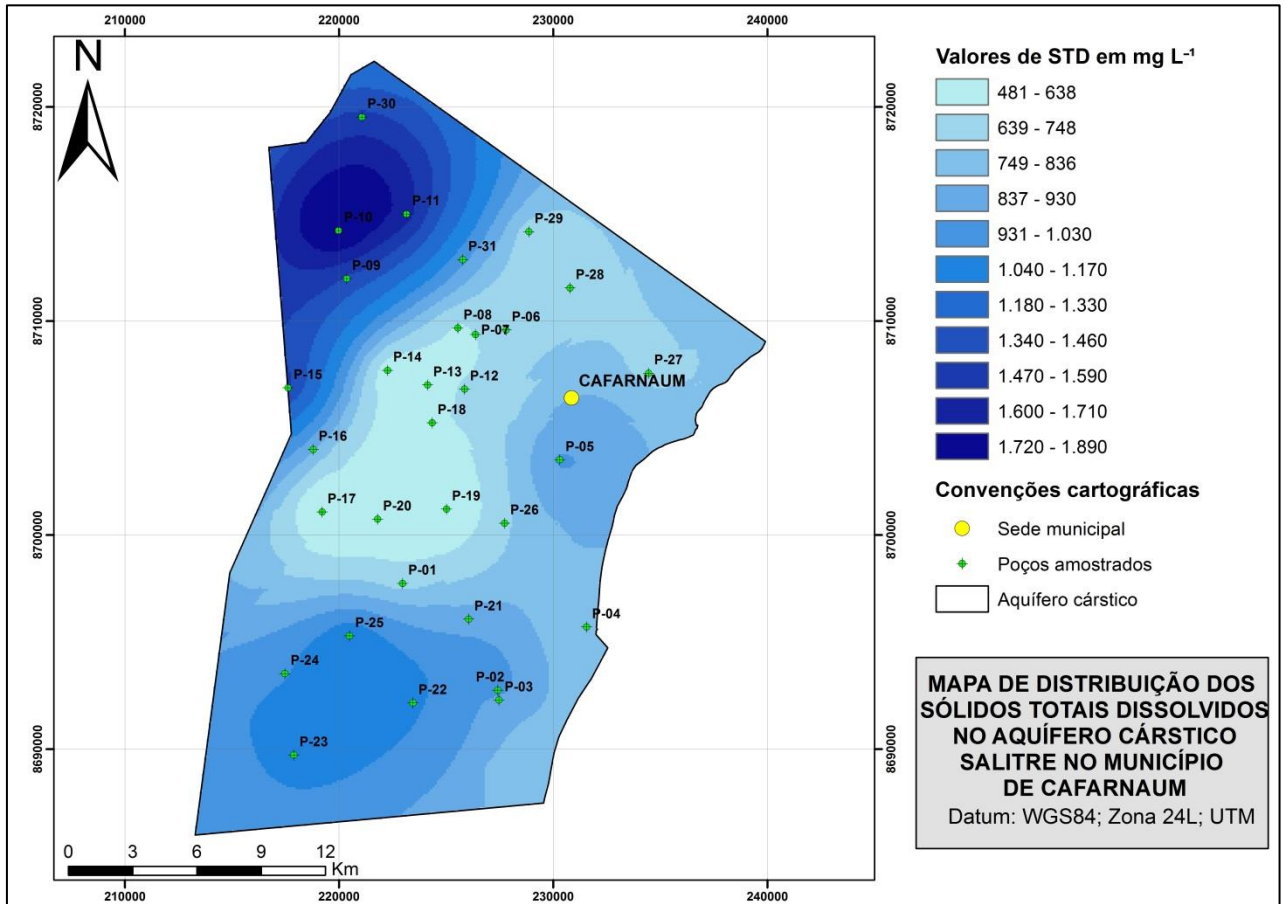
APÊNDICE B – Mapas de distribuição dos parâmetros hidroquímicos

Apêndice B1 - Mapa de distribuição dos valores de pH nas água subterrâneas de Cafarnaum



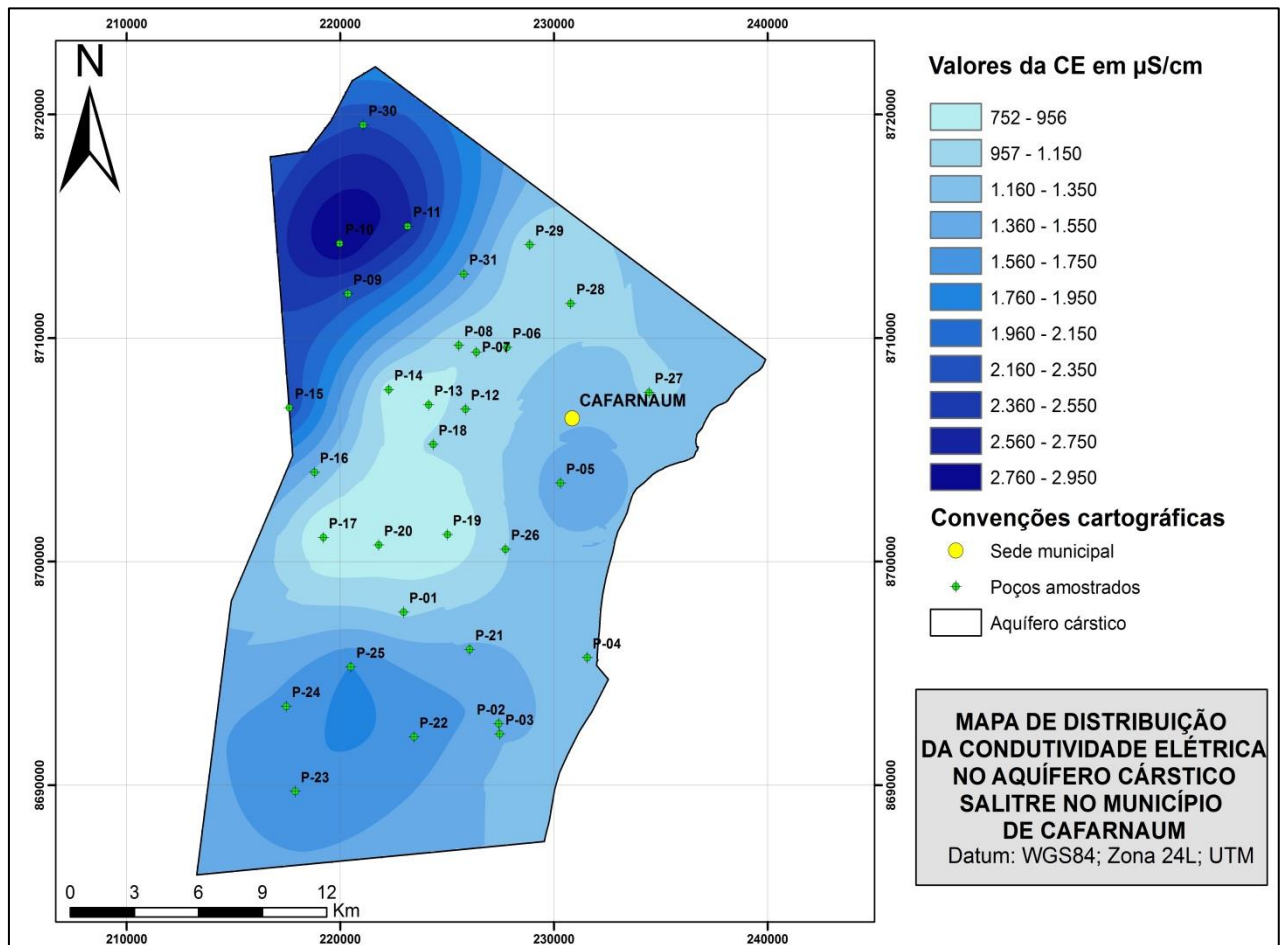
Elaboração: O autor

Apêndice B2 - Mapa de distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



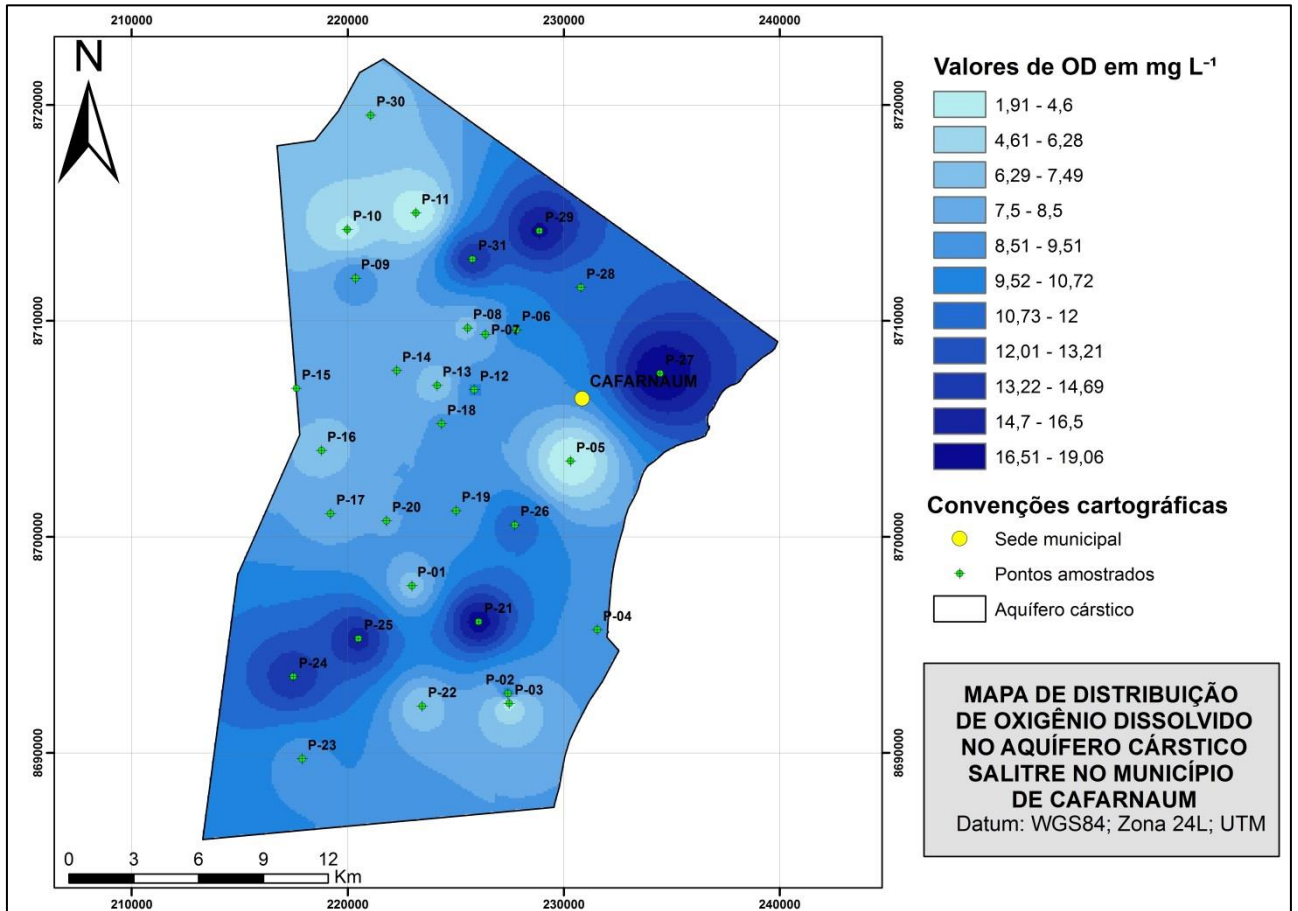
Elaboração: O autor

Apêndice B3 - Mapa de distribuição dos valores de CE nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



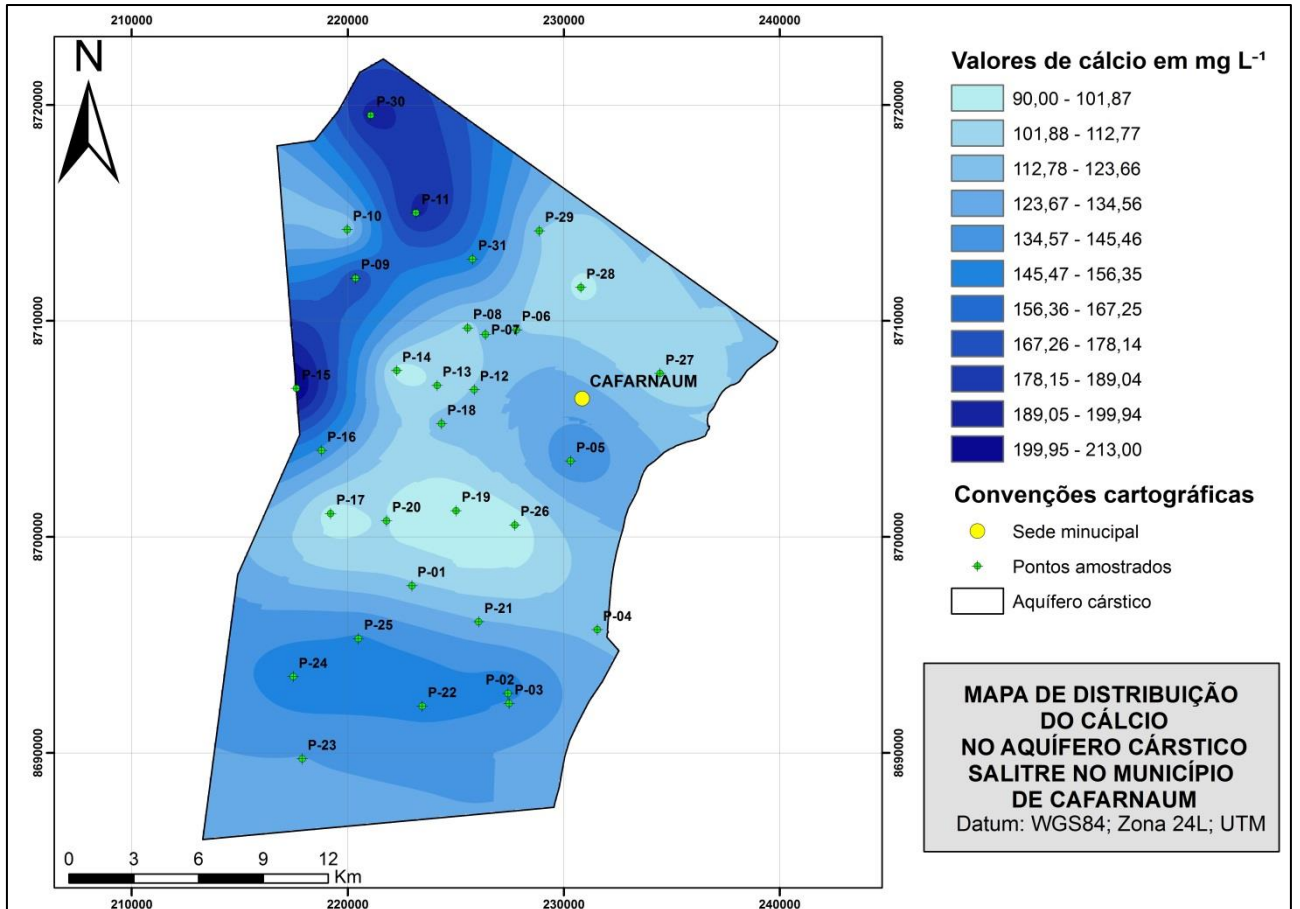
Elaboração: O autor

Apêndice B4 - Mapa de distribuição dos valores do OD nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum

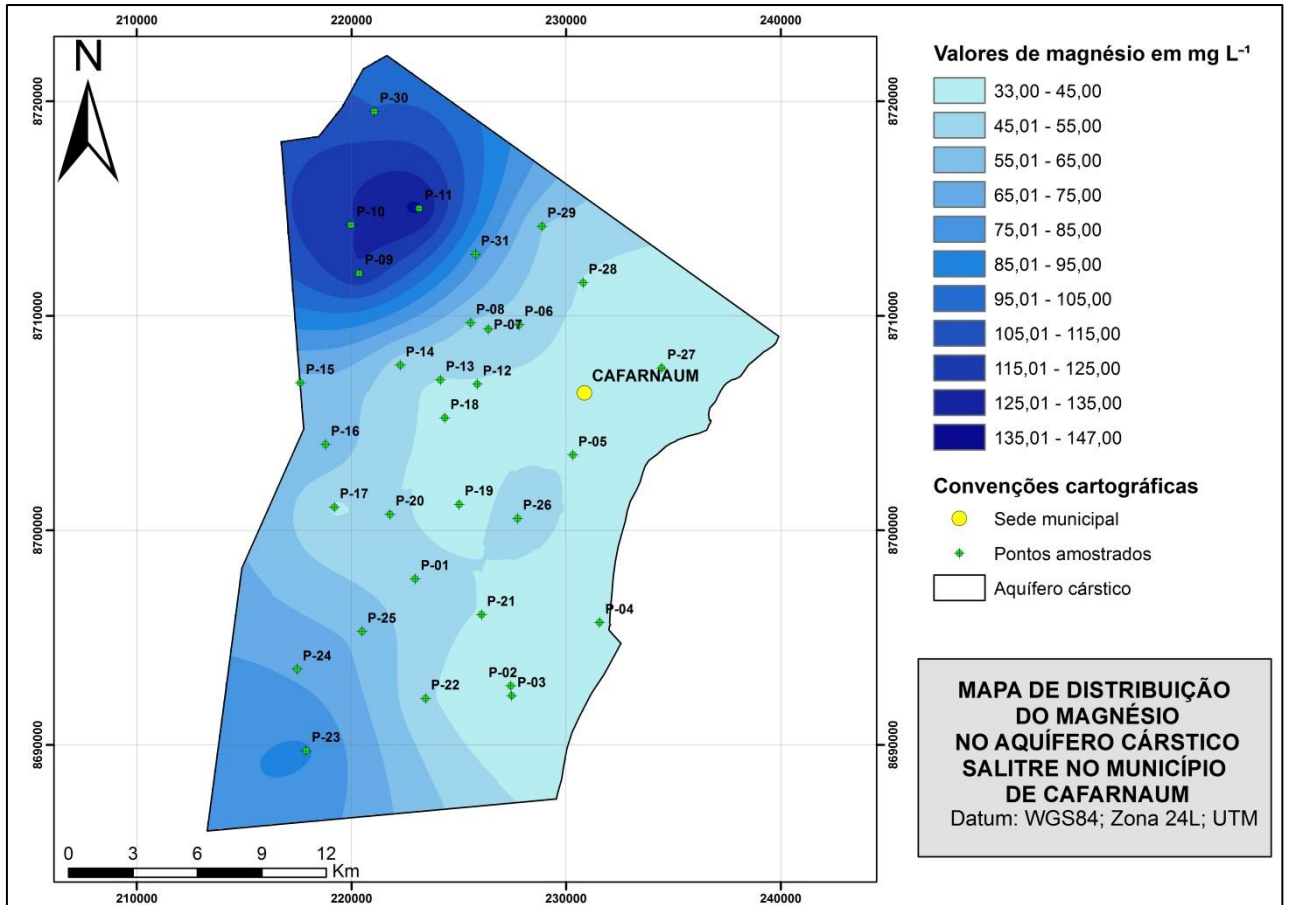


Elaboração: O autor

Apêndice B5 - Mapa de distribuição dos valores de cálcio nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum

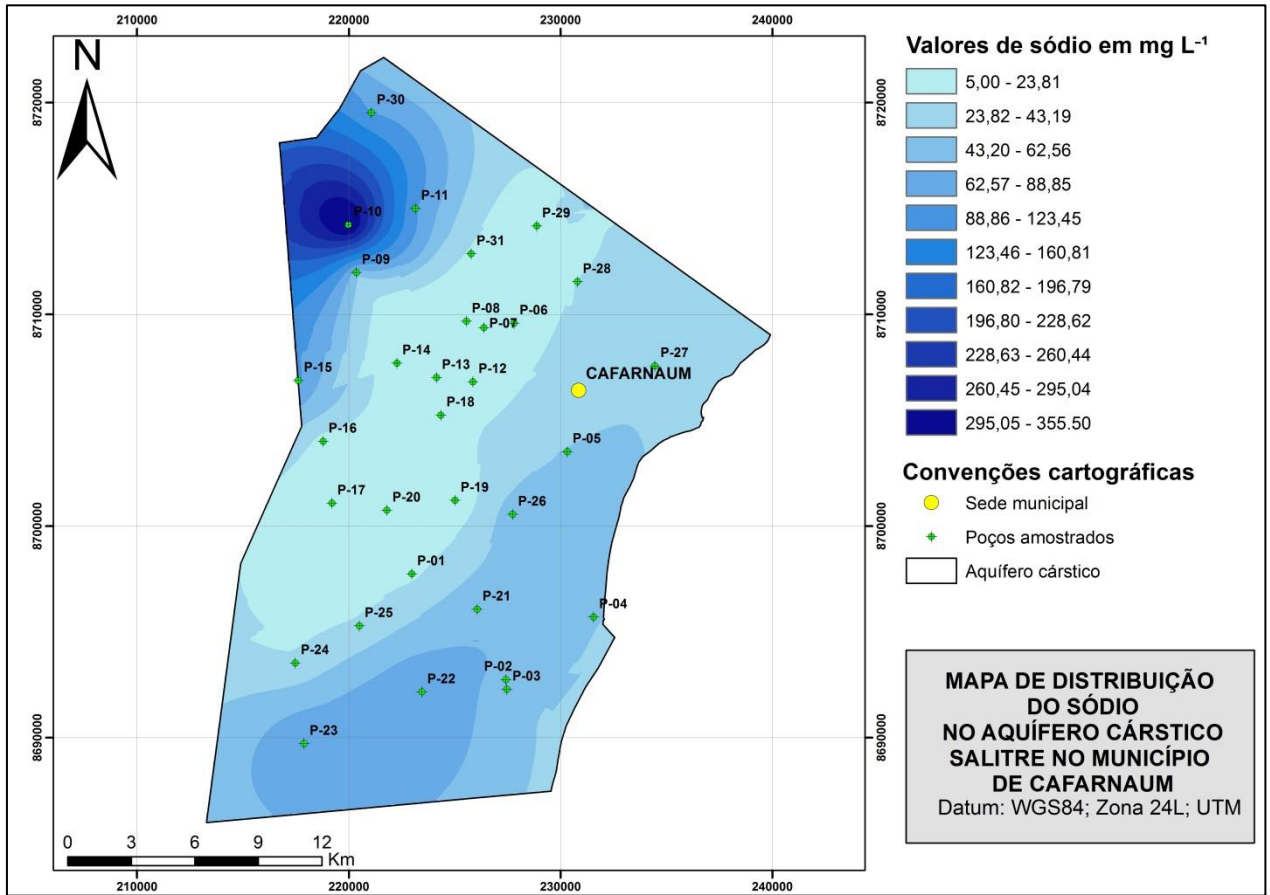


Apêndice B6 - Mapa de distribuição dos valores de magnésio nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



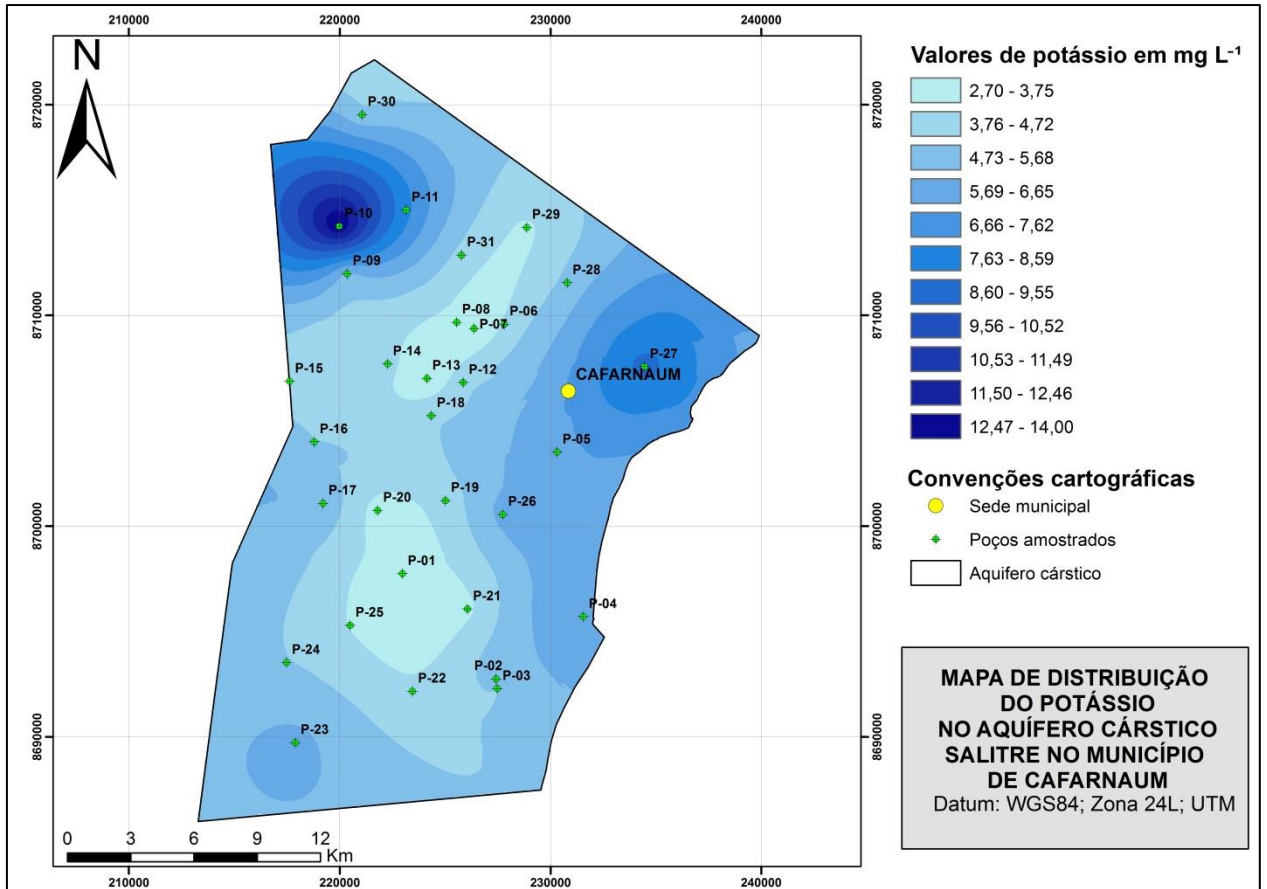
Elaboração: O autor

Apêndice B7 - Mapa de distribuição dos valores de sódio nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



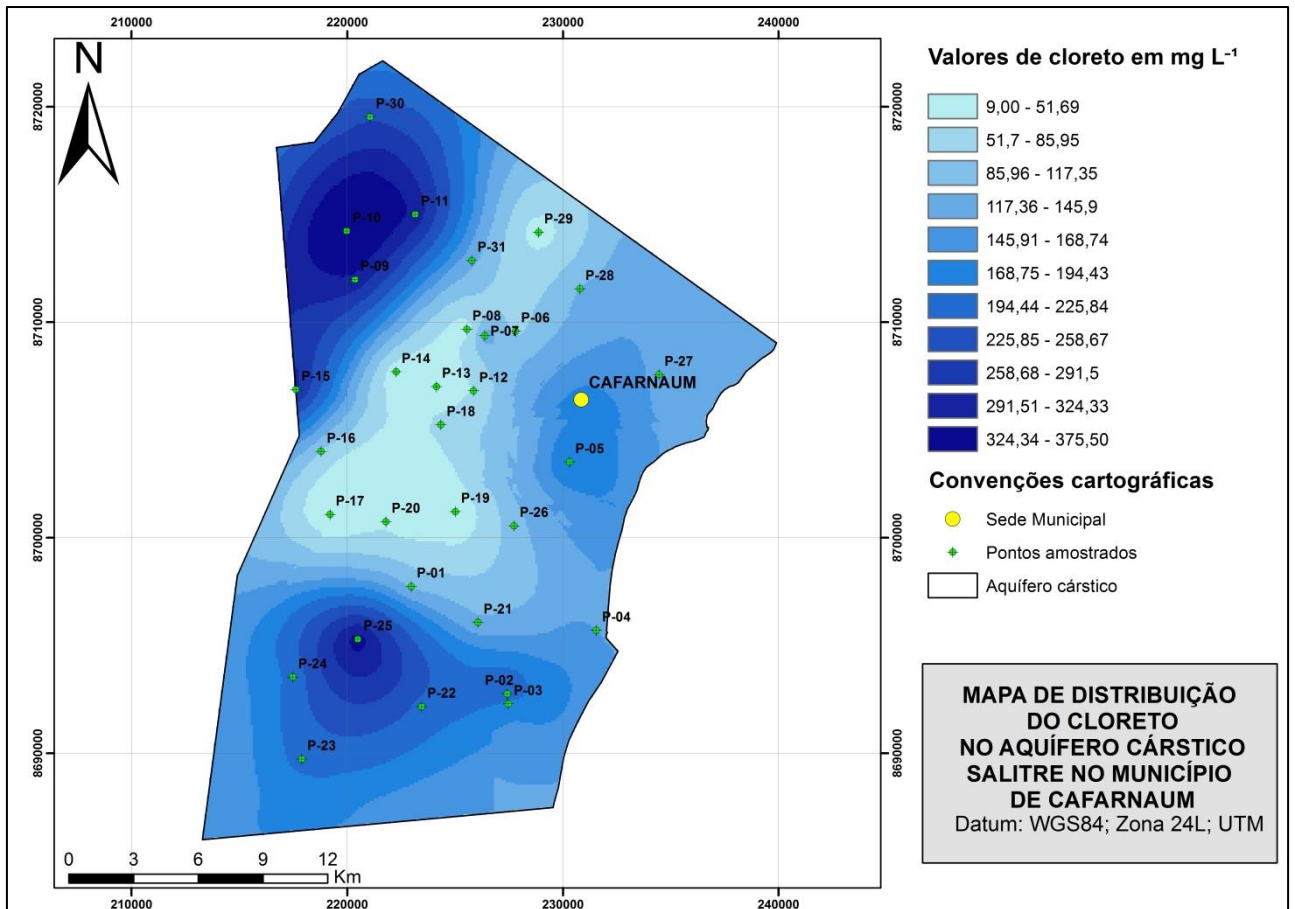
Elaboração: O autor

Apêndice B8 - Mapa de distribuição dos valores de potássio nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



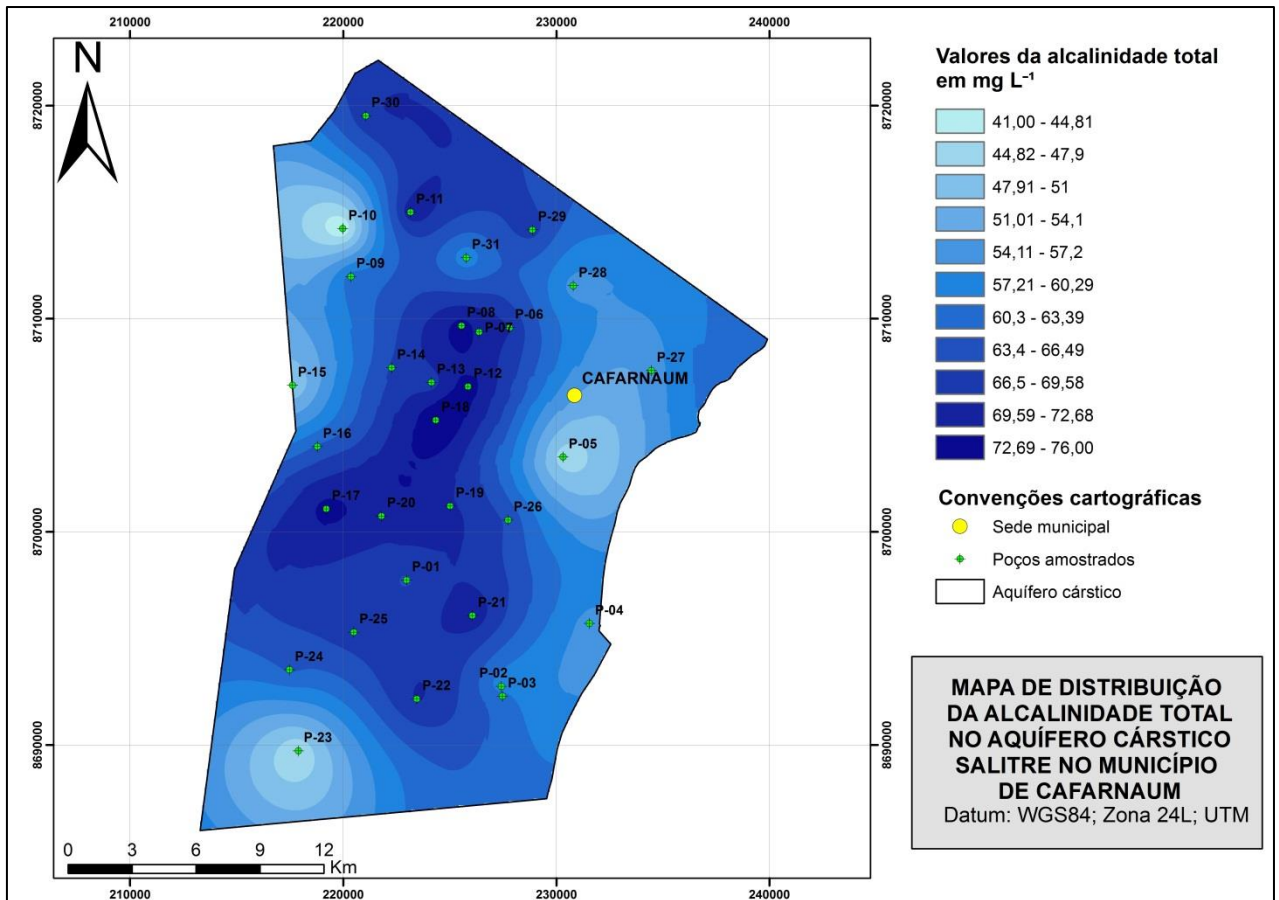
Elaboração: O autor

Apêndice B9 - Mapa de distribuição dos valores de cloreto nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



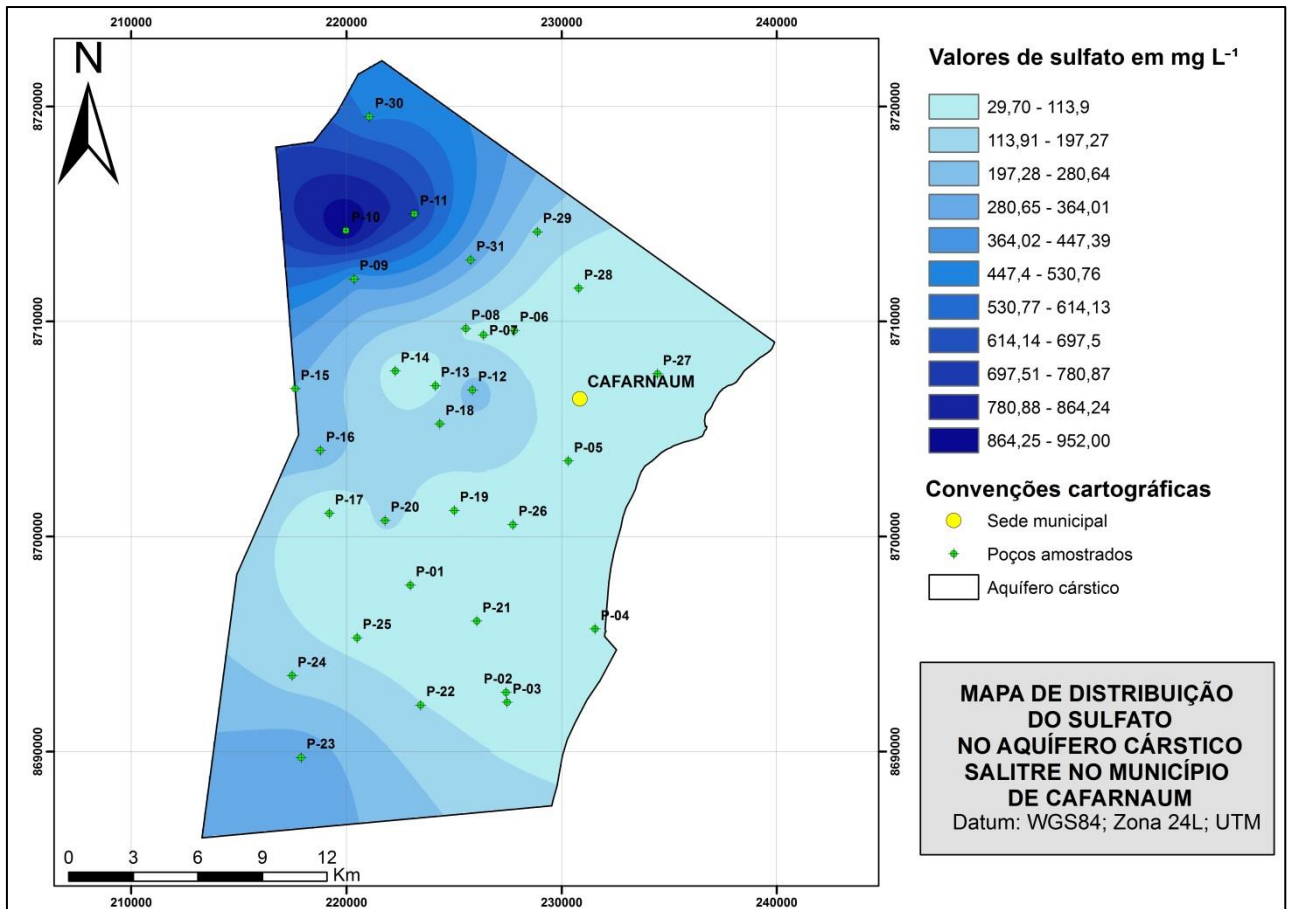
Elaboração: O autor

Apêndice B10 - Mapa de distribuição dos valores da alcalinidade total nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaüm



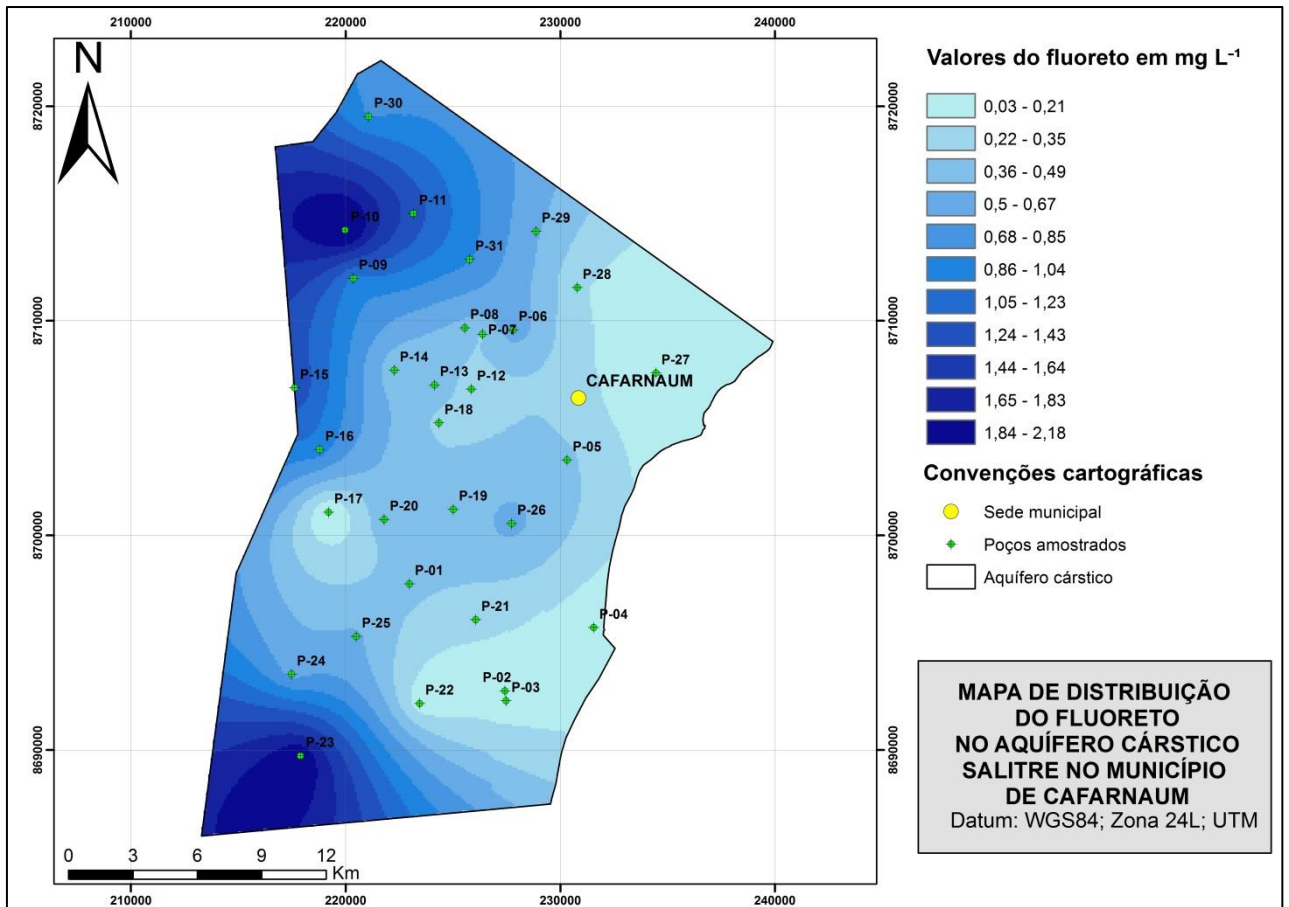
Elaboração: O autor

Apêndice B11 - Mapa de distribuição dos valores do sulfato nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



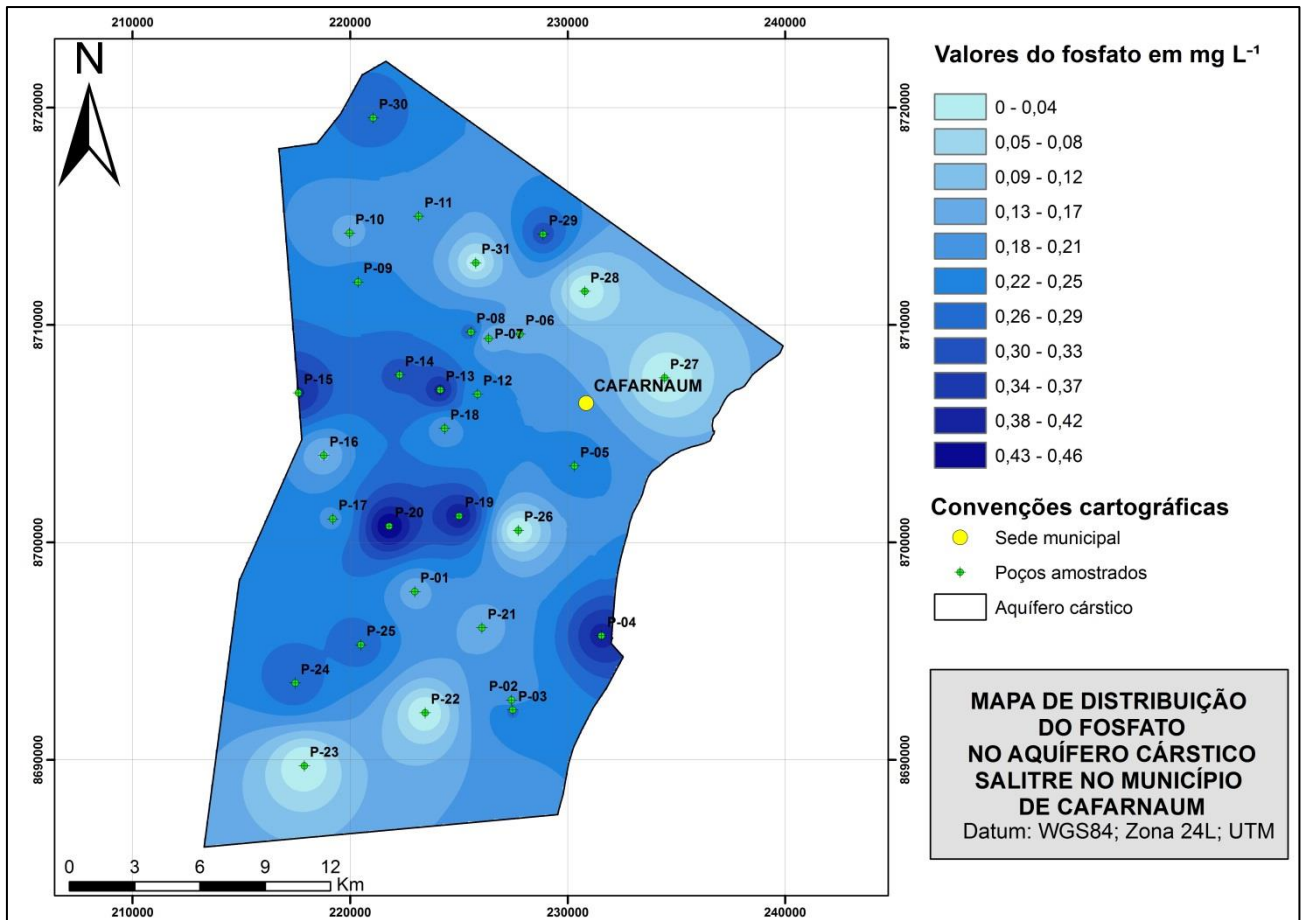
Elaboração: O autor

Apêndice B12 - Mapa de distribuição dos valores de fluoreto nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



Elaboração: O autor

Apêndice B13 - Mapa de distribuição dos valores do fosfato nas águas subterrâneas do aquífero Salitre em Cafarnaum



Elaboração: O autor

Modelo de ficha catalográfica fornecido pelo Sistema Universitário de Bibliotecas da UFBA para ser confeccionada pelo autor

Gasser, Rodolfo Santos
Vulnerabilidade e hidroquímica do aquífero cárstico Salitre
no município de Cafarnaum, Bahia / Rodolfo Santos Gasser. --
Salvador, 2017.
97 f. : il

Orientador: Manoel Jerônimo Moreira Cruz.
Coorientador: Manuel Vitor Portugal Gonçalves.
Dissertação (Mestrado - Geoquímica do Petróleo e Ambiental) --
Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia,
2017.

1. Vulnerabilidade intrínseca. 2. Hidroquímica. 3.
Metodologia COP. 4. Aquífero cárstico. I. Cruz, Manoel Jerônimo
Moreira. II. Gonçalves, Manuel Vitor Portugal. III. Título.