



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**VANESSA ARAÚJO SOARES**

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA AVALIAR O POTENCIAL  
HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE**

**CRATEÚS**  
**2022**

VANESSA ARAÚJO SOARES

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA AVALIAR O POTENCIAL  
HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia de Minas da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
de Minas.

Orientador: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.  
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Diones  
Oliveira Silva.

CRATEÚS

2022

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

---

S657u Soares, Vanessa Araújo.  
Uso do Sensoriamento Remoto para avaliar o potencial hidrogeológico do município de Crateús-CE /  
Vanessa Araújo Soares. – 2022.  
95 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2022.  
Orientação: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Água Subterrânea. 3. Perfuração de Poços. I. Título.

CDD 622

---

VANESSA ARAÚJO SOARES

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA AVALIAR O POTENCIAL  
HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia de Minas da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
de Minas.

Aprovada em: 25/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª. Dra. Debora Nogueira Lopes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Anderson de Medeiros Souza  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

A Deus.

Aos meus pais, Jovilina e Valter, por todo amor, preocupação, dedicação e incentivo em todos os momentos da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo. Toda honra e glória a ti.

A minha mãe, Jovilina, por ser sempre meu maior exemplo de força, perseverança, determinação e superação para vencer todas as batalhas impostas pela vida, e que tanto me incentivou nessa caminhada. Ao meu pai, Valter, que mesmo sempre tão calado, a todo momento luta para fazer nossos sonhos se tonarem reais, que nunca deixou de acreditar e dizer que tudo daria certo, por ter sempre me apoiado. Não há nada mais sublime na vida do que ter pessoas em que se possa confiar plenamente, que nos inspire e nos fortaleça. A vocês dois, muito obrigado pelo apoio, confiança e amor incondicional.

As minhas irmãs, Cassia Rebeca e Camila, por todo companheirismo e amor, por nunca me deixarem fraquejar e por cuidarem tão bem de mim. Ao meu pequeno, Luís Arthur, por ser a alegria dos nossos dias.

A mina avó, pelo incentivo, amor incondicional, e por tanto acreditar em mim.

Aquele que esteve sempre ao meu lado de alguma forma, que sempre me apoiou e incentivou, e mesmo nos meus piores dias fez questão de demonstrar o quanto se importava comigo, mostrando o quanto é um ser humano incrível, André Rui. Obrigada por todo respeito e dedicação prestados ao longo dos anos em que fomos um. “[...] é que tem coisas... que parecem que foram feitas para dividir com você.”

A todos os meus professores de graduação, pela excelência da qualidade técnica de cada um, em especial a professora Tiany Guedes Cota, por todos os conselhos, pela ajuda e amizade ao longo do curso. És exemplo para mim.

Ao meu orientador, Rafael Chagas Silva, pela dedicação, atenção e transparência na sua orientação e no compartilhamento de seus conhecimentos. Agradeço também ao meu coorientador, Francisco Diones Oliveira Silva, por ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus companheiros de graduação, em especial, Isadora Edina e Paulo Gildário, por se fazerem tão presentes nos últimos anos, por dividirem comigo as alegrias, tristezas e dores da graduação.

Aos demais amigos que fiz neste curso, pelas alegrias e conhecimento compartilhados, por tornarem os dias mais leves.

Aos amigos que sempre confiaram e acreditaram em mim, que tanta paciência tiveram comigo, compreendendo a minha ausência ao longo desse tempo, em especial: Amando Morais, Ana Alves, Itainara Gomes e Jefferson Macedo. São daqueles amigos que a vida entrega sem dar chance de recusa.

Agradeço a cada membro que compõe a Universidade Federal do Ceará – *campus* Crateús, pessoas estas que demonstraram sempre comprometimento com a qualidade e excelência de ensino.

Então agradeço a todos que contribuíram direto e indiretamente na minha formação.  
Muito obrigada!

Se vai tentar, siga em frente.

Senão, nem comece!

Isso pode significar perder namoradas, esposas,  
família, trabalho...e talvez a cabeça.

Pode significar ficar sem comer por dias.

Pode significar congelar em um parque,

[..]

Pode significar caçoadas, desolação...

A desolação é o presente.

O resto é uma prova de sua paciência,  
do quanto realmente quis fazer.

E farei, apesar do menosprezo.

E será melhor que qualquer coisa que possa  
imaginar.

Se vai tentar, vá em frente.

(Charles Bukowski)

## RESUMO

No município de Crateús a reduzida disponibilidade de água superficial aliada à baixa e irregular pluviosidade, características das regiões semiáridas nordestinas, explica a grande dependência de água subterrânea na região, mesmo sendo essa, em grande parte, uma opção frágil, em consequência do baixo potencial hidrogeológico apresentado pelas rochas cristalinas predominantes no município. Diante disso, se faz necessário a busca por alternativas que auxiliem no reconhecimento de áreas com potencial para exploração desse recurso. Isto posto, o objetivo do trabalho foi de identificar áreas propícias a ocorrência de águas subterrâneas através da aplicação de sensoriamento remoto e análise de campo. Para tanto, foi elaborado um banco de dados georreferenciados, mediante arquivos do IBGE, relativos à geologia e hidrografia do município de Crateús; dados da CPRM, referentes aos poços cadastrados no SIAGAS; imagens SRTM e MDE dos repositórios digitais da USGS e ASF. Os dados obtidos foram processados em ambiente SIG com uso do *software* QGIS para elaboração de mapas temáticos. Os mapas de localização dos poços, permitiram selecionar duas áreas de maior potencial para realização de estudos mais detalhados nos distritos de Poti (Poço A) e Tucuns (Poço B), nas comunidades de Feijão e Santa Luzia, respectivamente. Os mapas de interpolação da vazão específica dos poços, elaborado a partir da ferramenta de interpolação IDW, possibilitaram identificar, dentro das áreas selecionadas, zonas com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea. Por último, os mapas de delimitação das sub-bacias, permitiram analisar os segmentos de fluxo nas áreas, bem como as possíveis zonas de recarga dos aquíferos. Os trabalhos de campo compreenderam a realização de atividades exploratórias para melhor conhecimento das áreas selecionadas. Foram coletados dados referentes ao nível freático dos poços, bem como a identificação de rochas e estruturas geológicas nas proximidades dos poços A e B. À vista disso, verificou-se que as áreas onde estão alocados os poços A e B, apresentaram significativa favorabilidade para ocorrência de água subterrânea, o que confere a estas áreas uma maior probabilidade de sucesso na perfuração de novos poços.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto. Água subterrânea. Perfuração de poços.

## ABSTRACT

In the municipality of Crateús, the reduced availability of surface water combined with the low and irregular rainfall, characteristics of the northeastern semi-arid regions, explains the great dependence on groundwater in the region, even though this is, to a large extent, a fragile option, as a result of the low potential hydrogeological structure presented by the predominant crystalline rocks in the municipality. Therefore, it is necessary to search for alternatives that help in the recognition of areas with potential for exploitation of this resource. That said, the objective of the work was to identify areas conducive to the occurrence of groundwater through the application of remote sensing and field analysis. To this end, a georeferenced database was created, using IBGE files, relating to the geology and hydrography of the municipality of Crateús; CPRM data, referring to the wells registered in SIAGAS; SRTM and MDE images from the USGS and ASF digital repositories. The data obtained were processed in a GIS environment using the QGIS software to prepare thematic maps. The well location maps allowed us to select two areas with the greatest potential for carrying out more detailed studies in the districts of Poti (Well A) and Tucuns (Well B), in the communities of Feijão and Santa Luzia, respectively. The interpolation maps of the specific flow of the wells, elaborated from the IDW interpolation tool, made it possible to identify, within the selected areas, areas with greater probability of occurrence of groundwater. Finally, the sub-basin delimitation maps made it possible to analyze the flow segments in the areas, as well as the possible aquifer recharge zones. Fieldwork included carrying out exploratory activities to better understand the selected areas. Data were collected regarding the water table of the wells, as well as the identification of rocks and geological structures in the vicinity of wells A and B. occurrence of groundwater, which gives these areas a greater probability of successful drilling of new wells.

**Keywords:** Remote Sensing. Subterranean water. Well Drilling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Localização do Município de Crateús – CE .....	21
Figura 2 – Precipitação pluviométrica anual do Município de Crateús – CE .....	23
Figura 3 – Climatologia média mensal do Município de Crateús– CE (1981 - 2010) .....	23
Figura 4 – Evapotranspiração potencial mensal do Município de Crateús – CE .....	24
Figura 5 – Mapa das Classes de solos do Município de Crateús – CE .....	26
Figura 6 – Mapa Hidrológico do Município de Crateús – CE .....	30
Figura 7 – Mapa Geológico simplificado do Município de Crateús – CE .....	36
Figura 8 – Sistema de representação do ciclo hidrológico .....	38
Figura 9 – Principais regiões do Espectro Eletromagnético .....	49
Figura 10 – Modelos básicos e modificados de padrões de drenagens .....	55
Figura 11 – Fluxograma metodológico .....	57
Figura 12 – Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos do Município de Crateús – CE .....	65
Figura 13 – Mapa de Delimitação da rede de drenagem do município de Crateús – CE ....	67
Figura 14 – Mapa de Localização dos poços selecionados para estudo .....	69
Figura 15 – Lineamentos extraídos a partir do relevo sombreado (hillshade) de imagem MDE .....	71
Figura 16 – Mapa de Interpolação da vazão específica - Área A (Distrito de Poti) .....	73
Figura 17 – Mapa de Interpolação da vazão específica - Área B (Distrito de Tucuns) .....	74
Figura 18 – Mapa de Delimitação da Sub-bacia - Área A (Distrito de Poti) .....	76
Figura 19 – Mapa de Delimitação da Sub-bacia - Área B (Distrito de Tucuns) .....	77
Figura 20 – Poço A – Localidade de Feijão .....	78
Figura 21 – Casa do sistema de dessalinização da comunidade de Feijão .....	79
Figura 22 – Dessalinizador na comunidade de Feijão .....	80

Figura 23 – Adjacência da área onde se encontra o Poço A .....	81
Figura 24 – Afloramento próximo à área onde se encontra o Poço A .....	82
Figura 25 – Detalhe do afloramento próximo ao local onde se encontra o Poço A .....	82
Figura 26 – Rocha aflorante tipo xisto .....	83
Figura 27 – Verificação do nível freático do Poço A .....	84
Figura 28 – Poço B – Localidade de Santa Luzia .....	85
Figura 29 – Entorno da área do Poço B .....	86
Figura 30 – Afloramento próximo à área do Poço B .....	87
Figura 31 – Verificação do nível freático do Poço B .....	88

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais regiões utilizadas para o sensoriamento da superfície da Terra ...	50
Quadro 2 – Informações dos poços selecionados .....	60
Quadro 3 – Dados gerais dos poços selecionados .....	61
Quadro 4 – Perfil Litológico do Poço A .....	80
Quadro 5 – Perfil Litológico do Poço B .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do teste de bombeamento - Poço A .....	83
Tabela 2 – Dados do teste de bombeamento - Poço B .....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GeoTIFF	<i>Georeferenced Tagged Image File Format</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MDE	Modelo Digital de Elevação
REM	Radiação Eletromagnética
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIAGAS	Sistema de Informações de Água Subterrâneas
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	19
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	19
2	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
2.1	<b>Localização</b> .....	20
2.2	<b>Clima</b> .....	22
2.3	<b>Solos</b> .....	24
2.4	<b>Vegetação</b> .....	27
2.5	<b>Relevo</b> .....	27
2.6	<b>Hidrologia</b> .....	28
2.7	<b>Hidrogeologia</b> .....	31
2.8	<b>Geologia</b> .....	33
2.8.1	<i>Contexto Geológico Regional</i> .....	33
3	<b>ÁGUA SUBTERRÂNEA</b> .....	37
3.1	<b>Ciclo Hidrológico</b> .....	37
3.1.1	<i>Processo de precipitação</i> .....	39
3.1.2	<i>Processo de evapotranspiração</i> .....	39
3.1.3	<i>Processo de interceptação</i> .....	40
3.1.4	<i>Processo de percolação e infiltração</i> .....	40
3.1.5	<i>Processo de escoamento superficial e subterrâneo</i> .....	40
3.2	<b>Bacias hidrográficas e balanço hídrico</b> .....	41
3.3	<b>Tipos de Aquíferos</b> .....	42
3.3.1	<i>Aquíferos porosos ou sedimentares</i> .....	42
3.3.2	<i>Aquíferos fraturados ou fissurais</i> .....	43
3.3.3	<i>Aquíferos cársticos</i> .....	43
3.3.4	<i>Aquíferos confinados</i> .....	44
3.3.5	<i>Aquíferos não confinados</i> .....	44
3.4	<b>Recarga de águas subterrâneas</b> .....	45
4	<b>SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	47
4.1	<b>Princípios do Sensoriamento Remoto</b> .....	47
4.2	<b>Espectros Eletromagnéticos</b> .....	48
4.3	<b>Sensores de imageamento utilizados no Sensoriamento Remoto</b> .....	51
4.4	<b>Tipos de resoluções das imagens de satélites</b> .....	51

4.4.1	<i>Resolução espacial</i> .....	52
4.4.2	<i>Resolução espectral</i> .....	52
4.4.3	<i>Resolução radiométrica</i> .....	53
4.4.4	<i>Resolução temporal</i> .....	53
4.5	<b>Uso do Sensoriamento Remoto no estudo de recursos hídricos</b> .....	54
4.5.1	<i>Interpretação de padrões de drenagens</i> .....	54
5	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	57
5.1	<b>Materiais</b> .....	58
5.1.1	<i>Equipamentos de campo</i> .....	58
5.2	<b>Métodos</b> .....	59
5.2.1	<i>Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos</i> .....	59
5.2.2	<i>Mapa da Rede de Drenagem</i> .....	59
5.2.3	<i>Mapas de potencialidade hídrica de águas subterrâneas</i> .....	60
5.2.3.1	Mapa de localização dos poços selecionados.....	60
5.2.3.2	Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais .....	61
5.2.3.3	Mapas de Interpolação da vazão específica.....	62
5.2.3.4	Mapas de Delimitação das Sub-bacias .....	62
5.2.4	<i>Trabalho de campo</i> .....	63
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	64
6.1.1	<i>Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos</i> .....	64
6.1.2	<i>Mapa da Rede de drenagem</i> .....	66
6.1.3	<i>Mapas de potencialidade hídrica de águas subterrâneas</i> .....	68
6.1.3.1	Mapa de Localização dos poços selecionados.....	68
6.1.3.2	Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais .....	70
6.1.3.3	Mapas de Interpolação da vazão específica.....	72
6.1.3.4	Mapas de Delimitação das Sub-bacias .....	75
6.1.4	<i>Trabalho de campo</i> .....	78
6.1.4.1	Poço A: Localidade de Feijão.....	78
6.1.4.2	Poço B: Localidade de Santa Luzia.....	84
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	90
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	92

## 1 INTRODUÇÃO

A maior parte do território que forma a região Nordeste do Brasil apresenta clima semiárido, que se caracteriza pela escassez de água. A definição de região semiárida resulta do entendimento prático da existência de uma área onde ocorrem grandes períodos de seca. De forma simplificada, o conceito de seca pode ser definido pela conjunção de diversos fatores, que vão desde a falta de precipitação, deficiência de umidade no solo, quebra de produção agropecuária, até impactos sociais e econômicos negativos em geral (VIEIRA; GONDIM FILHO, 2006).

A observação de índices pluviométricos anuais reduzidos, vegetação de caatinga, o embasamento cristalino e os solos geralmente rasos complementam a caracterização do Semiárido. Monte (2014) evidencia que o Ceará é o Estado do Nordeste que detém a maior extensão territorial no Semiárido, com cerca de 92% da sua área inserida no denominado polígono das secas.

Inserido neste contexto, o município de Crateús, pertencente a Mesorregião dos Sertões Cearenses, enfrenta muitas vezes problemas em consequência das condições semiáridas e em anos de estiagem, a população enfrenta a carência de água nos reservatórios superficiais. Uma alternativa como resposta para solucionar ou pelo menos amenizar essa problemática, seria o uso de água subterrânea, mesmo a região sendo coberta em boa parte por terrenos cristalinos. Segundo Feitosa (2011), embora reconhecido como um baixo potencial hidrogeológico, em função das baixas vazões e qualidade da água, os terrenos cristalinos vêm sendo explorados sistematicamente ao longo do tempo, constituindo, muitas vezes, a única fonte de suprimento hídrico para garantir a sobrevivência da população.

A exploração de água subterrânea pode ser realizada através da perfuração de poços que captam água dos aquíferos. Em geral, o sucesso na locação de um poço vai depender de diversos fatores, tais como as condições locais, o tipo e profundidade dos aquíferos, o tipo de litologia dos reservatórios, dentre outros. Nessas condições, é fundamental, a realização de estudos de reconhecimento de áreas com potencialidade hidrológica. É comum nessa análise a utilização de interpretação de produtos de sensores remotos (imagens de satélites, imagens de radar, etc.) (FEITOSA *et al.*, 2008).

Dessa forma, a utilização de técnicas de processamento digital de imagens com aplicação de sensoriamento remoto, pode contribuir para indicação de áreas favoráveis a ocorrência de água subterrânea, através da análise de estruturas geológicas, tipos de litologias,

bacias hidrográficas, rede de drenagens, e ainda dados de poços perfurados nessa região (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Este trabalho de pesquisa visa, portanto, colaborar com a comunidade científica atuante na área de hidrogeologia, fornecer dados para sociedade local, bem como para os órgãos responsáveis pela perfuração de poços no município, demonstrando assim, a aplicação de produtos de sensoriamento remoto na identificação de áreas mais promissoras a exploração de água subterrânea, ferramenta esta que vem demonstrando fundamental importância para estudos do potencial hidrogeológico de uma região.

### **1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o potencial hidrogeológico do município de Crateús por meio do processamento de imagens de satélites para identificar áreas com maior potencial de ocorrência de água subterrânea, de modo a gerar dados que possam auxiliar ao poder público e comunidade local na seleção de áreas propícias a perfuração de poços.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Compor um banco de dados com imagens de satélites;
- Elaborar mapas temáticos para examinar o potencial hidrogeológico do município de Crateús, sendo estes:
  - Mapa de localização dos poços selecionados;
  - Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais;
  - Mapas de Interpolação da vazão específica;
  - Mapas de Delimitação das Sub-bacias.
- Identificar zonas promissoras para ocorrência de água subterrânea;
- Realizar trabalhos de campo nas zonas demarcadas para identificar estruturas geológicas que podem contribuir para a ocorrência de água subterrânea.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Na evolução natural do ambiente, os muitos elementos que o integram exercem influências recíprocas, indicando que existe uma dinâmica sistemática entre esses elementos que se ajustam e se interagem de diversas formas, permitindo a formação de diferentes cenários, compreendidos de acordo com as formações vegetais, condições climáticas, pedológicas, geológicas, geomorfológicas e hidrográficas da área (PINHEIRO; PINHO, 2013).

Neste item serão descritas as principais características do município de Crateús, tais como a localização geográfica da região e os aspectos fisiográficos relacionados ao clima, solos, vegetação, geomorfologia, hidrografia, hidrogeologia e geologia do município.

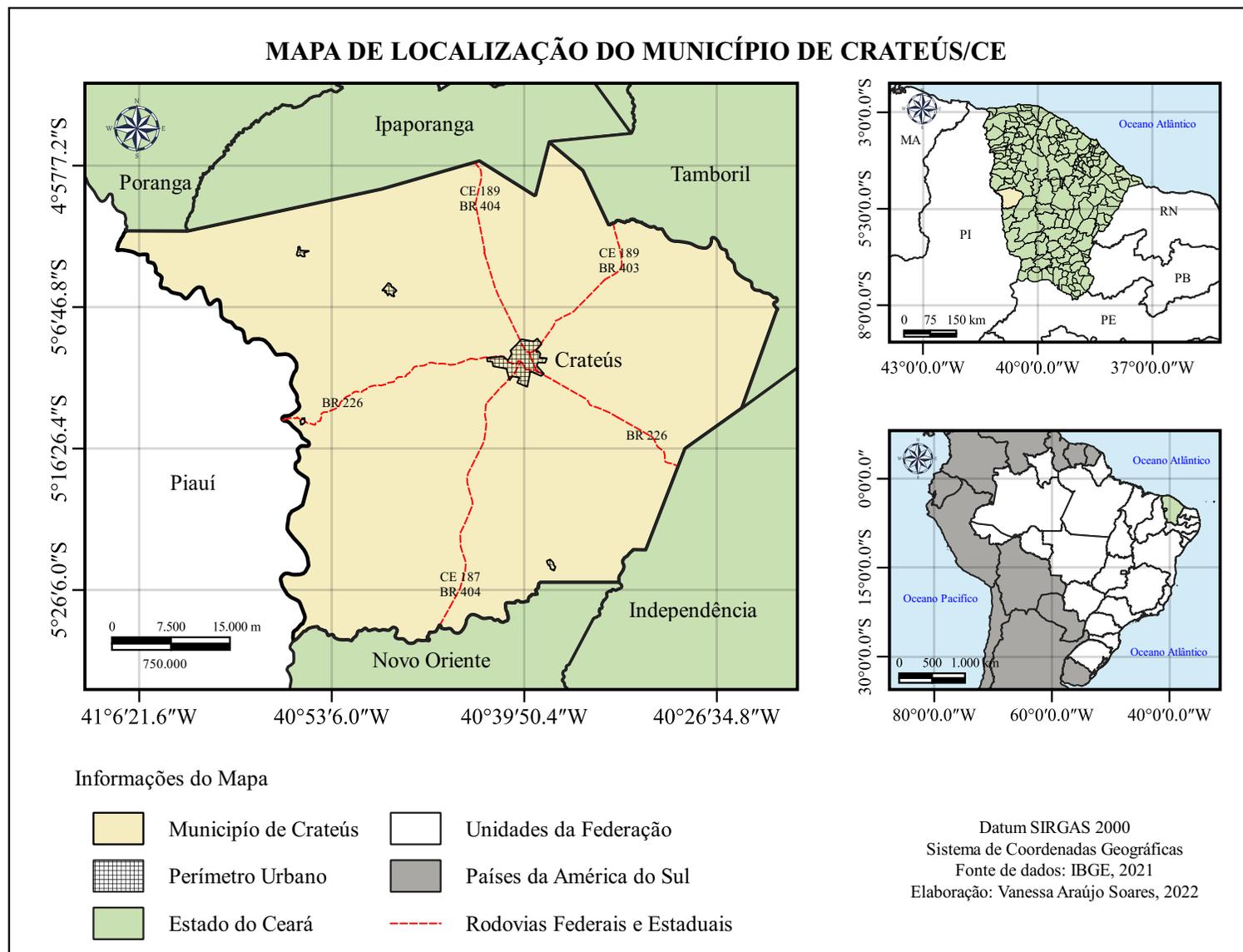
### 2.1 Localização

O município de Crateús está situado na região Nordeste do Brasil, inserido na porção centro-oeste do Estado do Ceará, incluído na macrorregião dos Sertões dos Inhamuns, mesorregião dos Sertões Cearenses e microrregião conhecida como Sertão de Crateús. A área está limitada pelos municípios de Independência, Tamboril, Novo Oriente, Ipaporanga, Poranga e com o Estado do Piauí, Figura 1 (CEARÁ, 2017).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), o município compreende uma área absoluta de 2.981,459 km<sup>2</sup>, correspondendo a 2,01% do território cearense. O município está localizado nas cartas topográficas Oiticica (Folha SB.24-V-C-II), Ipueiras (Folha SB.24-V-A-VI), Crateús (Folha SB.24-V-C-III) e Independência (Folha SB.24-V-D-I) (BRASIL, 1998).

O acesso a sede do município, por via rodoviária, partindo-se da capital do Estado, pode ser feito pela BR 020, deslocando-se 268 km até a localidade de Santa Cruz do Banabuiú (Cruzeta), desse ponto percorrendo mais 86 km à direita pela BR 226 onde se chega a cidade de Crateús, ou ainda, partindo-se de Fortaleza pela BR 020, percorrendo 118 km até a sede do município de Canindé, tomando-se a direita pela CE 257, percorrendo-a 106 km para alcançar a cidade de Santa Quitéria; neste ponto toma-se a CE 176 onde após 93 km se alcança o Distrito de Sucesso, atravessando os municípios de Catunda e Tamboril, e daí pela CE 187 percorrendo 36 km até a sede do município.

Figura 1 – Mapa de Localização do Município de Crateús – CE



Fonte: Autora, 2022.

## 2.2 Clima

A compreensão da dinâmica climática de uma região ou território é de fundamental importância, pois, influencia em características importantes, como as condições geomorfológicas, o regime da rede de drenagem, a gênese e o processo de desenvolvimento do solo e da cobertura vegetal (PINHEIRO; PINHO, 2013).

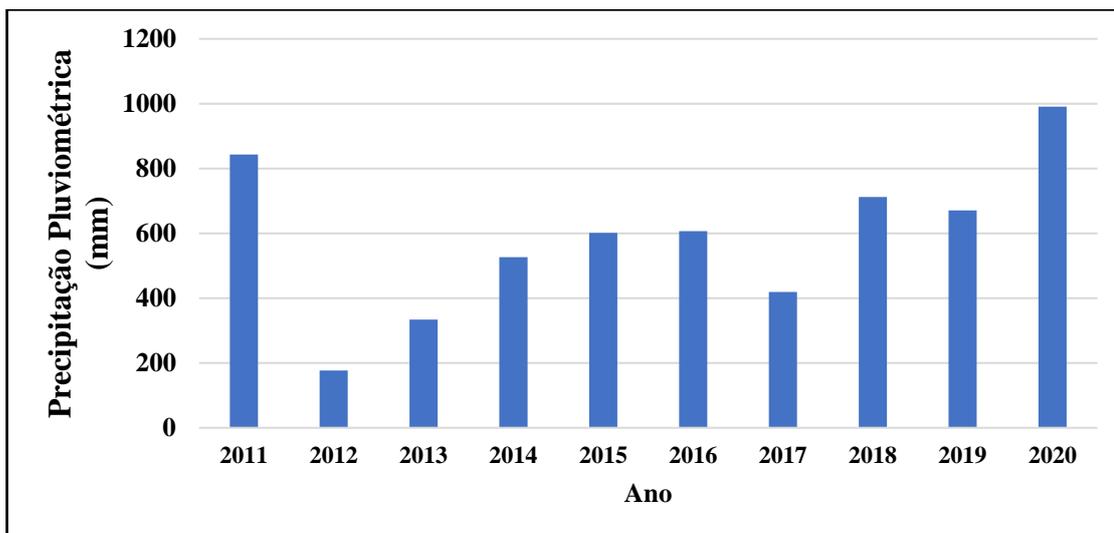
A região Nordeste do Brasil apresenta configurações climáticas a variar conforme a localização geográfica, sendo classificadas em: tropical, semiárida e equatorial. Nas regiões de clima Equatorial ou de clima Tropical a estação chuvosa, ou a estação seca, incide quase sempre na mesma época do ano. Nas latitudes baixas da região semiárida de clima tropical da região Nordeste pode, em determinado ano, não ocorrer uma estação chuvosa, porém quando este período se inicia normalmente acontece entre meados do verão e meados do outono, e o trimestre mais chuvoso quase sempre acontece entre os meses de fevereiro e abril (NIMER, 1989).

À vista disso, o Estado do Ceará, inserido na região do semiárido nordestino, caracteriza-se, predominantemente, pela presença de clima tropical quente semiárido, tipo climático que apresenta características como escassez e irregularidade pluviométricas associado a altas taxas de evapotranspiração. Do ponto de vista climático, o semiárido se caracteriza por médias térmicas elevadas, acima de 26 °C, e duas estações bem distintas: uma seca em que chove pouquíssimo, e uma úmida quando ocorrem precipitações irregulares que variam de um mínimo de 300 mm a um máximo de 800 mm. Em geral, o período chuvoso tem duração de três a cinco meses que se inicia, comumente, com maior intensidade entre os meses de fevereiro e abril (CEARÁ, 2009).

O município de Crateús, inserido na mesorregião dos Sertões Cearenses, apresenta período de chuvas entre os meses de janeiro a junho, registrando precipitações que podem ultrapassar 500 mm/mês. O restante do ano costuma não registrar precipitações, característica marcante do regime de chuvas do semiárido, e em específico do Estado do Ceará, onde as chuvas se apresentam concentradas e mal distribuídas (MONTE, 2014).

O gráfico da Figura 2 mostra a média histórica do índice de Precipitação Pluviométrica do município de Crateús, registrada pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) entre os anos de 2011 a 2020, onde é possível observar que na maior parte do período foram registradas precipitações menores que 600 mm, médias pluviométricas características do clima semiárido (CEARÁ, 2020).

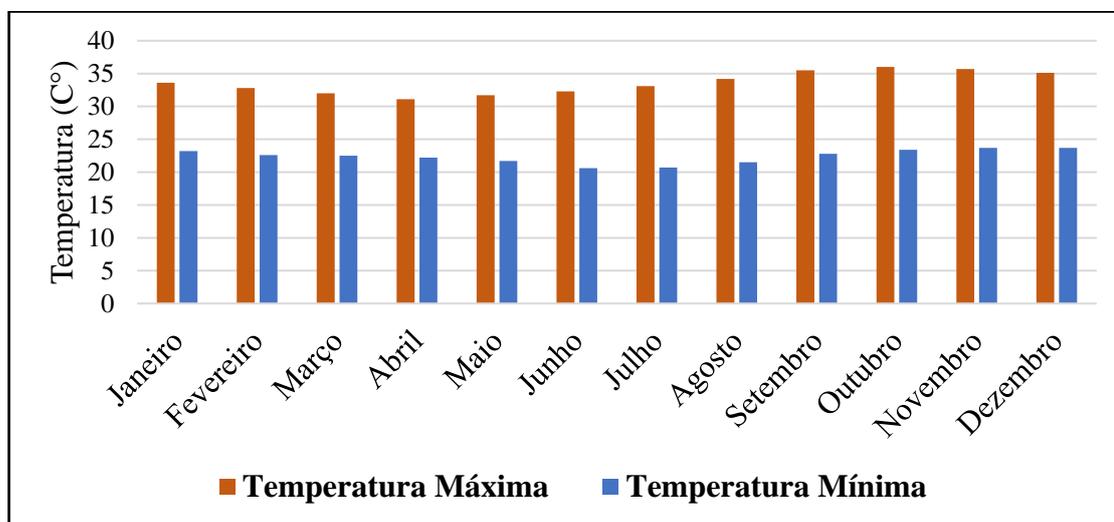
Figura 2 – Precipitação pluviométrica anual do Município de Crateús – CE



Fonte: Adaptado de FUNCEME, 2020.

Em conseqüências dessas características climáticas, o município de Crateús se enquadra no polígono das secas, cenário caracterizado por elevadas temperaturas anuais, baixo regime de chuvas e pela aridez do solo. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados entre os anos de 1981 a 2010 (Figura 3), os maiores valores de temperatura máxima média mensal, para a estação de Crateús ocorrem nos meses de setembro (35,50 °C), outubro (36,00 °C), novembro (35,70 °C) e dezembro (35,10 °C) e os menores valores de temperatura média mensal ocorrem nos meses de junho (20,60 °C) e julho (20,70 °C) (BRASIL, 201?).

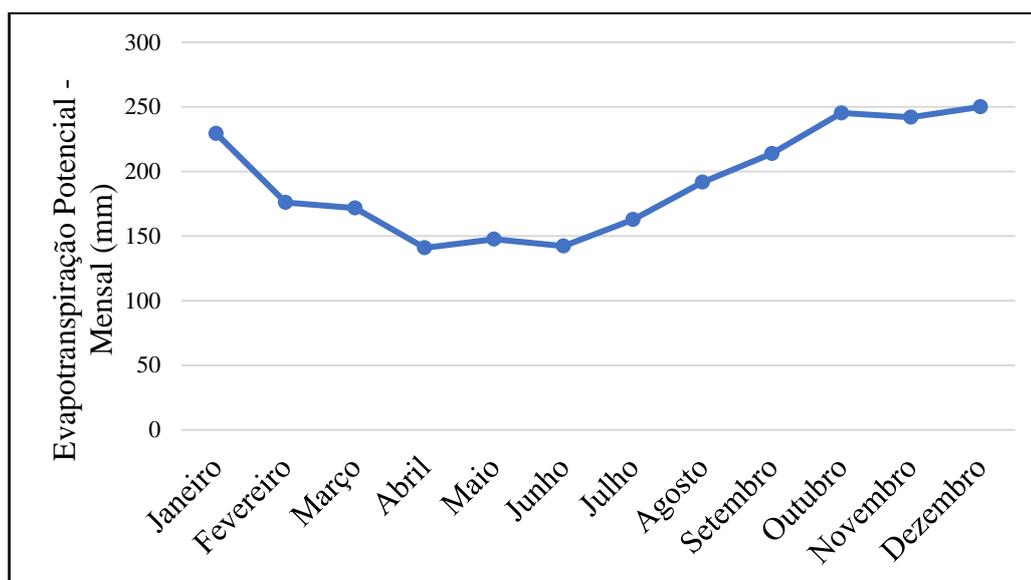
Figura 3 – Climatologia média mensal do Município de Crateús– CE (1981 - 2010)



Fonte: Adaptado de INMET, 201?.

Em vista disso, o município é caracterizado por elevada taxa de evapotranspiração, que ocorre de forma mais intensa nos meses de outubro, novembro e dezembro. A Figura 4 apresenta, graficamente, os valores da evapotranspiração potencial mensal para o município de Crateús entre os anos de 1981 a 2010, que registraram uma média de 192,8 mm/mês (BRASIL, 201?).

Figura 4 – Evapotranspiração potencial mensal do Município de Crateús – CE



Fonte: Adaptado de INMET, 201?.

### 2.3 Solos

As categorias de solos estão intimamente relacionadas com a ação simultânea e integrada do material de origem (rochas e sedimentos), do relevo da região, da ação do clima, dos organismos (matéria orgânica) e do tempo (TULLIO, 2019).

A região Nordeste do Brasil, em consequência da diversidade de climas, formações vegetais, tipos de rochas e conformações do relevo, apresenta grande variedade de ambientes e, conseqüentemente, de solos. Os solos mais comuns são definidos como Argissolos e Luvisolos, geralmente presentes nos topos das colinas rasas dos sertões e nas altas vertentes. Nas regiões de maiores declives ou de forte incidência das ações erosivas hídricas superficiais, predominam os Neossolos Litólicos e os afloramentos rochosos, enquanto nas baixas vertentes, há maior ocorrência de Planossolos e Vertissolos. Nas regiões típicas de vales, especialmente nas áreas de planícies fluviais, dominam os solos definidos como Neossolos Flúvicos (BRASIL, 2016).

Os Argissolos são solos que se apresentam de pouco profundos a profundos, bem drenados, com textura arenosa/argilosa ou média/argilosa, cascalhentos e com fertilidade natural média. São juntamente com os Latossolos, os solos mais expressivos do Brasil, verificados em praticamente todas as regiões. Os Luvisolos são pouco profundos, moderadamente bem drenados, com textura média/argilosa e exibem fertilidade natural alta, distribuem-se por boa parte do território brasileiro, com maior expressividade em regiões como o semiárido nordestino (SANTOS *et al.*, 2018).

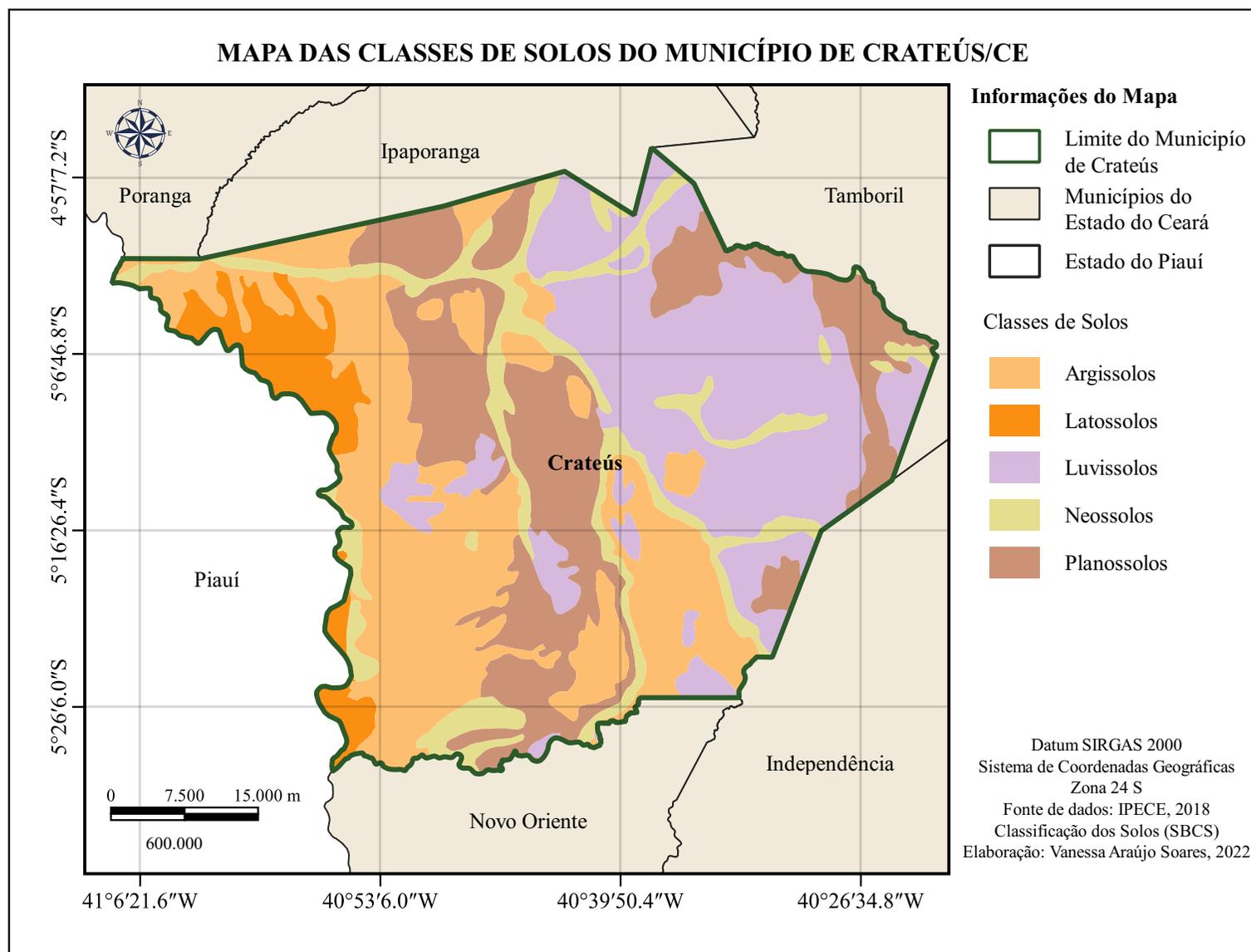
Neossolos Litólicos, são solos rasos, de textura arenosa, pedregosos e de fertilidade natural média, boa parte dos Neossolos ocorre em praticamente todas as regiões do Brasil, entretanto não constituem representatividade espacial expressiva, ocorrendo de forma dispersa em ambientes específicos (SANTOS *et al.*, 2018).

Os Planossolos são pouco profundos, mal drenados, apresentam textura arenosa/argilosa, média a baixa fertilidade natural e possuem problemas de salinização. Os solos classificados como Vertissolos são rasos, mal drenados, com textura argilosa e fertilidade natural alta, e os Neossolos Flúvicos são solos normalmente profundos, mal drenados, apresentando textura indiscriminada e fertilidade natural média a alta (SANTOS *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, segundo dados do IPCE (2017) e com base na nomenclatura estabelecida pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS), a região de Crateús apresenta cinco tipos predominantes de solo: Argissolos, Luvisolos, Latossolos, Neossolos e Planossolos.

Dadas as relações apontadas anteriormente, pode-se esperar que na maior parte do município a disposição destes solos ocorre em profundidades variáveis, desde forte a imperfeitamente drenados, com exceção dos Luvisolos que são naturalmente permeáveis variando de bem a imperfeitamente drenados (SANTOS *et al.*, 2018). A Figura 5 mostra a distribuição e as classes de solo que predominam no município de Crateús.

Figura 5 – Mapa das Classes de solos do Município de Crateús – CE



Fonte: Autora, 2022.

## 2.4 Vegetação

A maior parte do território do Nordeste Brasileiro é ocupado por vegetação árida, de fisionomia e florística variada, denominada “Caatinga”. A vegetação deste bioma estende-se na porção mais seca do Nordeste, correspondendo a área do semiárido brasileiro. Em geral, são formações vegetais xerófilas, lenhosas, decíduas, com muitas espécies espinhosas, compreendendo um estrato arbóreo esparso, outro arbóreo-arbustivo e/ou arbustivo, e um herbáceo estacional, conforme o período das chuvas (ARAÚJO FILHO, 2011).

Da mesma forma, as regiões do Estado cearense são compostas, principalmente, por vegetação do tipo Caatinga. De modo geral a cobertura vegetal do Estado é dividida em: Complexo Vegetacional da Zona Litorânea; Floresta Subperenifólia Tropical Plúvio-Nebular (Matas úmidas); Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (Matas secas); Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga arbórea); Caatinga Arbustiva Densa; Caatinga Arbustiva Aberta; Carrasco; Floresta Perenifólia Paludosa Marítima; Floresta Mista Dicótilo-Palmácea (Mata ciliar com carnaúba e dicotiledôneas); Floresta Subcaducifólia Tropical Xeromorfa (Cerradão) e Cerrado (CEARÁ, 2007).

Considerando esta classificação, o IPECE (2017) reconhece a vegetação do município de Crateús como Caatinga Arbustiva Aberta, Carrasco, Floresta Caducifólia Espinhosa (caatinga arbórea) e Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (mata seca), destacando-se a Floresta Caducifólia Espinhosa.

A Caatinga Arbustiva ocorre em áreas baixas e planas, com árvores menores de até 8 m de altura, e está relacionado a cactus (xique-xique, faxeiro) e bromélias (macambira e crotá). A vegetação do tipo Carrasco apresenta arbustos de caules finos, tortuosos e emaranhados, ocorrendo apenas a oeste do município, na Chapada da Ibiapaba. A Floresta Caducifólia Espinhosa é composta por florestas altas com árvores que chegam a 20 m de altura, sendo o principal tipo de vegetação presente na área. Já a Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial ocorre nas encostas e topos das serras e chapadas existentes na região (SENA, 2011).

## 2.5 Relevo

O relevo na região Nordeste do Brasil é marcado por duas formas predominantes, o Planalto da Borborema, localizado a leste, e a Bacia do Rio Parnaíba, a oeste, além de algumas elevações, como as chapadas e os planaltos. Existem dois tipos principais de fatores geomórficos na formação da região Nordeste: fatores estruturais, que formam a base dos

domínios estruturais geomórficos de grande escala do espaço geomórfico regional; e fatores climáticos, responsáveis pela diversificação da formação das plantas e processos de morfogênese que atuam em diferentes ambientes climáticos (IBGE, 1977).

Assim, o território cearense, caracterizado por relevos formados a partir de terrenos de origem cristalina e sedimentar, é circundado por três chapadas: a chapada da Ibiapaba, localizada entre os Estados do Ceará e Piauí; a chapada do Araripe que divide os Estados do Ceará, Paraíba e Pernambuco; e a chapada do Apodi, na fronteira com o Rio Grande do Norte (SENA, 2011).

Dentro desse contexto, o município de Crateús, porção do território cearense, apresenta como principais formas de relevo: Chapada da Ibiapaba, que representa uma superfície cimeira, em escala regional disposta sobre a borda oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba; Depressões Sertanejas, maciços antigos de origem cristalina, produto da superfície de aplainamento em atuação no Cenozóico; e Maciços Residuais, que representam um conjunto de maciços montanhosos sobrelevados determinado pelas superfícies de aplainamento que compõem a Depressão Sertaneja (CEARÁ, 2017).

## **2.6 Hidrologia**

A hidrologia da região Nordeste é definida pela existência marcante de rios intermitentes presentes na região semiárida. Entre estes, dois rios se destacam: o São Francisco e o Parnaíba. O rio São Francisco é considerado como um dos principais mananciais brasileiros, enquanto o Parnaíba, é um dos rios mais importante da região Nordeste, estes constituem os maiores rios nordestinos (BRASIL, 2012).

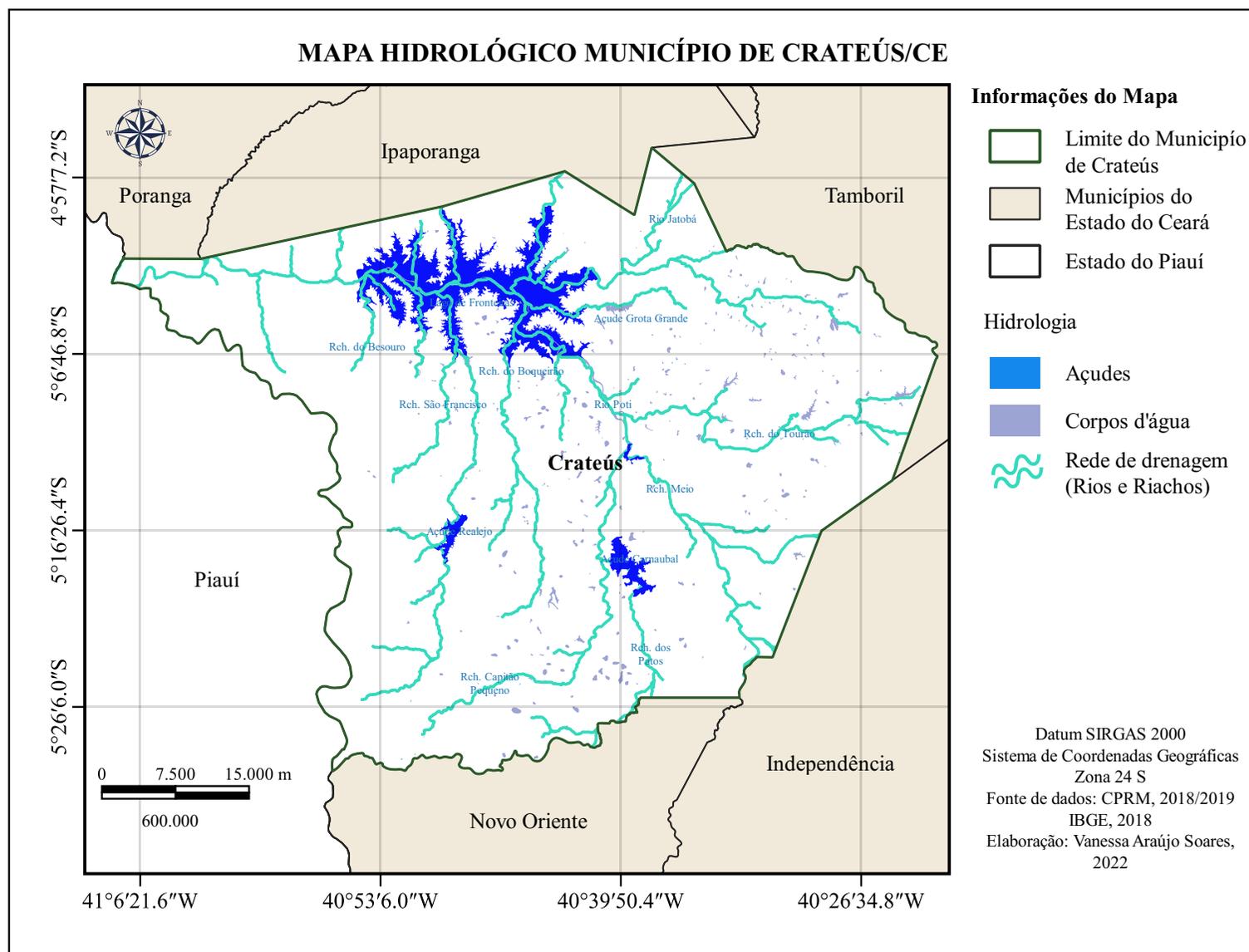
A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco abrange sete Unidades da Federação: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal, correspondendo a uma área de drenagem equivalente a 640 mil km<sup>2</sup>. Já a Bacia Hidrográfica do rio Parnaíba, que compreende uma área de 331 mil km<sup>2</sup>, encontra-se totalmente inserida no Nordeste brasileiro, abrangendo os Estados do Piauí, Maranhão e Ceará (BRASIL, 2012).

Assim, o Estado do Ceará, além da bacia hidrográfica do rio Parnaíba, é constituído, principalmente, por bacias hidrográficas formadas pelos Rios Acaraú, Banabuiú, Coreaú, Curu, Jaguaribe e Salgado, e mais alguns rios que formam as bacias metropolitana e litoral, como os Rios Ceará, Choró, Cocó e Aracatiaçu. No Estado, a Bacia Hidrográfica do Parnaíba é dividida pela Bacia dos Sertões de Crateús e pela Bacia da Serra da Ibiapaba (CEARÁ, 2011).

Dentre as bacias hidrográficas que formam os Sertões cearenses, destaca-se a sub-bacia do rio Poti, uma das mais importantes sub-bacias do rio Parnaíba, que se localiza em maior proporção no município de Crateús. O rio Poti nasce pela confluência dos riachos Santa Maria e Algodões sobre rochas cristalinas, pré-cambrianas, nas proximidades da cidade de Quiterianópolis, ao norte, num percurso em torno de 105 km, até a cidade de Crateús (IBGE, 1996).

Além do rio Poti, o município também apresenta como principais drenagens o rio Jatobá e os riachos do Meio, dos Patos, do Tourão, do Capitão Pequeno, do Boqueirão, do São Francisco, do Mato e do Besouro, Figura 6. Ainda, encontram-se no município importantes reservatórios de água superficial como o açude Realejo, o açude Carnaubal, o açude Grota Grande e a Barragem Lago de Fronteiras (BRASIL, 1998).

Figura 6 – Mapa Hidrológico do Município de Crateús – CE



Fonte: Autora, 2022.

## 2.7 Hidrogeologia

As condições de ocorrência, acumulação e circulação das águas subterrâneas estão relacionadas de modo direto com a litologia e as propriedades estruturais do arcabouço geológico. No Nordeste do Brasil, a ocorrência de águas subterrâneas varia muito devido à influência das características geológicas e das condições climáticas, tornando a distribuição espacial da região muito heterogênea (AGUIAR *et al.*, 2010). Assim sendo, pode distinguir-se três grandes tipos de aquíferos: fissural, poroso e cárstico, os quais possuem características hidrogeológicas distintas.

O domínio fissural ocupa a maior parte desta região (cerca de 55%) e reúne rochas ígneas e metamórficas que, geralmente apresentam uma fraca potencialidade hidrogeológica, devido às condições naturais de armazenamento (porosidade) e circulação do ambiente fissurado (permeabilidade). O domínio poroso encontra-se presente em várias ocorrências dispersas (bacias sedimentares e coberturas Colúvio-Elúvio-Alúvio) onde, geralmente, fornecem perspectivas mais promissoras para a exploração de águas subterrâneas e concentram os melhores aquíferos da região. Já o domínio cárstico que corresponde aos calcários, caracteriza-se por fenômenos de dissolução provocados pela água, onde os condutos aquíferos foram ampliados, gerando feições típicas como dolinas, cavernas e sumidouros (FEITOSA *et al.*, 2008).

Da área total do Nordeste, cerca de 720.000 km<sup>2</sup> são majoritariamente compreendidos por formações geológicas de rochas ígneas e metamórficas, genericamente chamadas cristalinas, que se desenvolvem de norte a sul em uma extensa área contida entre as bacias sedimentares do Parnaíba e do São Francisco. Os domínios de rochas cristalinas, que ocorrem, predominantemente, no clima semiárido, apresentam sistemas aquíferos do tipo fissural, de baixa produtividade, em consequência do baixo volume de fraturas presentes no maciço rochoso. As melhores condições de armazenamento de água estão reservadas aos aquíferos porosos das bacias sedimentares, devido às características de porosidade da rocha (volume de espaços vazios existentes na rocha, por onde a água irá circular), sendo assim, capazes de armazenar grandes volumes de água (AGUIAR *et al.*, 2010).

Dentro desse cenário, o Estado do Ceará, apresenta uma litologia predominante caracterizada por rochas cristalinas, onde o armazenamento de água é limitado, em razão da alta resistência à infiltração, ocorrendo principalmente por meio do preenchimento de regiões abertas e de fraturas. O Estado pertence a duas províncias hidrogeológicas: o Escudo Oriental e a Província Costeira, onde cerca de 70% da área é composta de embasamento cristalino,

representando 21% do total do cristalino nordestino (500.000 km<sup>2</sup>). O território cearense também possui bacias sedimentares como as de Iguatu, do Apodi, do Araripe e da Ibiapaba. Além dos aquíferos existentes nestas conformações, também são identificadas áreas de aluviões e sedimentos costeiros compostos por dunas, paleodunas e Formação Barreiras (DA SILVA; ARAUJO; SOUSA, 2007).

Dentre os municípios cearenses, Crateús está inserido na província hidrogeológica do Escudo Oriental, Subprovíncia Nordeste. Esta província também engloba a Subprovíncia Sudeste, constituída por rochas do embasamento cristalino, que consistem principalmente de gnaisses, migmatitos, xistos, quartzitos e granitos. À vista disso, os aquíferos formados por estas unidades litológicas estão restritas ao sistema de fraturas e falhas, apresentando, geralmente, baixo potencial hídrico explorável, contribuindo para ocorrência de aquíferos do tipo fissural (PESSOA; MENTE; LEAL, 1980).

No município de Crateús pode-se distinguir três domínios hidrogeológicos distintos: rochas cristalinas, sedimentos da Formação Serra Grande e depósitos aluvionares. As rochas cristalinas predominam na área e representam o sistema aquífero fissural. Os sedimentos da Formação Serra Grande representam, na região, o domínio de mais alto potencial do ponto de vista hidrogeológico, entretanto, na maior parte do município, a ocorrência desses sedimentos é muito restrita. Os depósitos aluvionares, caracterizados por sedimentos arenoargilosos recentes, ocorrem, principalmente, nas calhas dos principais rios e riachos que drenam a área, e apresentam, geralmente, uma boa alternativa como manancial, registrando significativo potencial do ponto de vista hidrogeológico (BRASIL, 1998).

Nos domínios hidrogeológicos cristalinos, às rochas não apresentam uma porosidade primária, ou seja, a água subterrânea não se move pelos poros ou vazios originais da rocha, sendo as zonas de fraturas, também denominadas porosidade secundária, os únicos condicionantes para ocorrência d'água subterrânea. Deste modo, os reservatórios formados por estas estruturas são considerados aleatórios, descontínuos e de pequena extensão (FEITOSA *et al.*, 2008).

O domínio Serra Grande é caracterizado geologicamente por rochas sedimentares com elevada silicificação, apresentando natureza fissural, ou seja, possuem capacidade para armazenar, recarregar e transmitir água subterrânea através de fraturas. A espessura das formações geológicas é anômala e muito variável, tanto em porções aflorantes como em subsuperfície, em função de movimentações tectônicas que ocorreram durante sua sedimentação, especialmente, na borda da bacia (FEITOSA *et al.*, 2008).

Os depósitos aluvionares, em consequência da mobilidade dos leitos dos rios e as constantes variações de velocidade de sedimentação das partículas sólidas, possuem características texturais muito variadas, ocasionando muita heterogeneidade nas distribuições das propriedades hidráulicas. Nesse depósito os aquíferos são, principalmente, do tipo livre, freáticos ou rasos (FEITOSA *et al.*, 2008).

## **2.8 Geologia**

Geologicamente, o Nordeste brasileiro compreende os terrenos cristalinos pré-cambrianos da Província Borborema, caracterizado por terrenos de diferentes litologias, separados por falhas com lineamentos de direção predominante NE-SW e E-W. A Província Borborema é composta por vários terrenos arqueanos e proterozóicos agrupando litologias metamórficas e ígneas. Sobre este substrato Pré-cambriano ocorrem diversas bacias sedimentares paleozóicas e cretáceas (SÁ, 2000).

Dentro desse contexto, o Estado do Ceará apresenta conjuntos litológicos de composição, idade e história evolutiva diferentes. As rochas mais antigas presentes no Estado datam do Arqueano, com predominância de rochas metamórficas. A área é caracterizada por terrenos arqueanos onde há formação de rochas meta-plutono-sedimentares (rochas metamórficas de origem sedimentar e magmática), por conjuntos litológicos formado por rochas metavulcanossedimentares (rochas metamórficas de origem sedimentar e vulcânica), por um extenso magmatismo da era neoproterozóica e por bacias sedimentares dos períodos Cambriano-Ordoviciano, Siluriano e do Jurássico-Cretácico, junto com coberturas sedimentares da era cenozóica (BRASIL, 2020).

### **2.8.1 Contexto Geológico Regional**

O município de Crateús, representado em sua maior parte pela Folha Crateús (SB.24-V-C-III), apresenta um contexto geológico regional referente ao Domínio Ceará Central, porção norte da Província Borborema. O Domínio Ceará Central é caracterizado por um embasamento Arqueano/Paleoproterozóico, supracrustais meso/neoproterozoica e intensa granitogênese neoproterozoica associada ao evento Pan-Africano/Brasiliano, responsável pela colagem ocidental do supercontinente Gondwana (COSTA, 2017).

Na Folha Crateús, a unidade mais antiga, provavelmente paleoproterozóica (?), refere-se ao Complexo Canindé do Ceará. Esta unidade é constituída por dois principais

domínios de rochas: um, predominantemente paraderivado, constituído de biotita-gnaisses e paramigmatitos, e outro, com predomínio de ortognaisses granodioríticos/tonalíticos. Tem como principais áreas de exposição suas porções leste e noroeste, caracterizados por: paragnaisse migmatítico; quartzito; e metacarbonatos (COSTA, 2017).

Na unidade Granitóide Santa Quitéria, os granitóides são predominantemente representados por quartzo-monzonitos, quartzo-sienitos e sienitos. Estes últimos são mais raros, e, em geral, dominam os termos quartzo-monzoníticos, geralmente com textura porfirítica. Encontram-se ainda corpos de metadiorito, que, em geral, são corpos bastante homogêneos ao longo de sua distribuição, apresentando granulação média a grossa, textura equigranular e coloração cinza. Uma característica marcante nestas rochas são os planos de foliação de baixo ângulo, com forte estiramento mineral (hornblenda e plagioclásio) (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Na Folha Crateús a Unidade Morro dos Torrões se prolonga da porção sul do mapa como uma faixa de direção NW-SE, com cerca 30 km de comprimento e cerca de 7 km de espessura. Os contatos desta unidade são em geral de natureza tectônica com as rochas adjacentes. Na maior parte de seus limites, a unidade está em contato com rochas graníticas-migmatíticas do Complexo Tamboril- Santa Quitéria. Na porção sudoeste, os metassedimentos do Grupo Novo Oriente estão justapostos sobre gnaisses cálcio-silicáticos da Unidade Morro dos Torrões, ambos com mergulhos de foliação (20-30°) para oeste/sudoeste (ARAÚJO *et al.*, 2014).

O Leucogranito Graciosa apresenta-se deformados, com coloração cinza-esbranquiçada (leucocrática), granulação fina a média, composto por quartzo, feldspatos (K-feldspato>plagioclásio), duas micas (moscovita e biotita), granada e silimanita. Estruturalmente, encontram-se alongados na direção N-S, com forma de gota, e foliação de alto ângulo desenvolvida, principalmente, nas bordas do corpo (COSTA, 2017).

A Unidade Granito Serra do Picote é caracterizada por pequenos corpos individualizados no extremo noroeste da folha, no município de Ibiapaba, onde a maior parte dos afloramentos ocorre nas proximidades da Serra do Picote, sendo inteiramente formada por este granito. Estes granitoides são intrusivos em rochas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, mas também ocorrem, em menor escala, intrusivos nos paragnaisse-migmatíticos do Complexo Canindé do Ceará (COSTA, 2017).

Na região leste da Folha Crateús, ocorre o denominado Gabro-dioritos Pedra-Preta formado de pequenos corpos (*stocks*) e diques. Os gabro-dioritos Pedra Preta não apresentam deformação e ocorrem truncando a foliação de gnaisses-migmatíticos do Complexo Canindé do Ceará (COSTA, 2017).

O Grupo Serra Grande, corresponde a rochas sedimentares da porção inferior da Bacia do Parnaíba, sendo constituído por três formações silurianas denominadas, da base para o topo, de Ipu, Tianguá e Jaicós. Estas formações estendem-se em subsuperfícies por toda a Bacia do Parnaíba, mas a sua área de afloramento é uma estreita faixa na borda leste da bacia. Nessa unidade, os arenitos da Formação Jaicós, afloram no topo da Serra Grande/Ibiapaba sendo responsáveis pelas feições de chapadas com terminações abruptas (relevo cuestiforme). Na Folha Crateús, as rochas sedimentares da Formação Jaicós, da Bacia do Parnaíba, consistem em arenitos cinza-esbranquiçados de granulação média, comumente com níveis de grânulos e localmente muito grossos, com arenitos conglomeráticos. Também são observadas estruturas típicas de canais fluviais com depósitos de seixos na base (GÓES *et al.*, 1990).

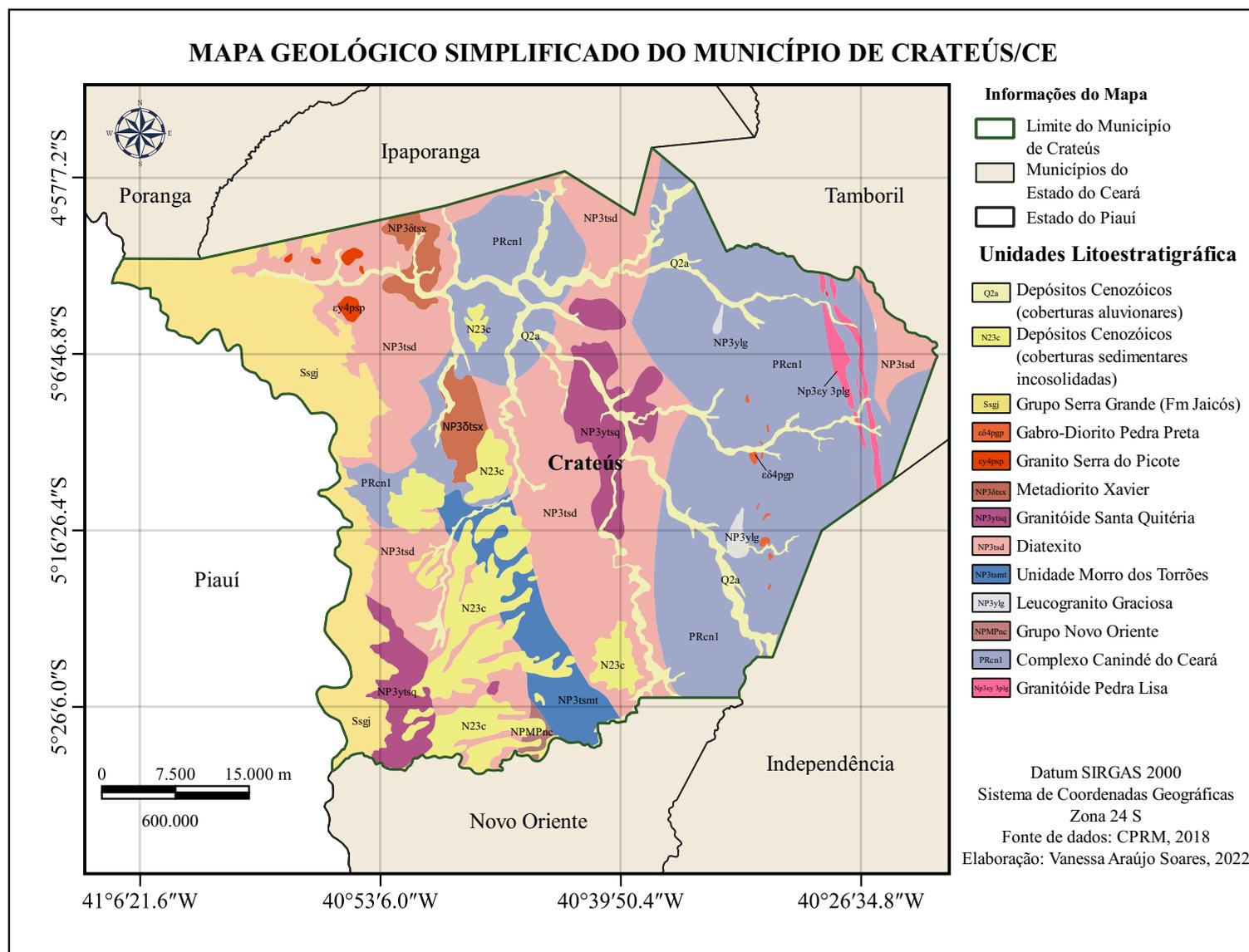
A Formação Caraúbas está posicionada tectonicamente sobre rochas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, é caracterizada na área a partir de poucos afloramentos (dois) de moscovita-biotita-xistos, de coloração marrom a prateada, localmente com intercalações de níveis de moscovita-quartzito. Esta unidade é representada por um domínio granito-migmatítico, com predomínio de migmatitos em estágio avançado de anatexia (diatexitos). Este domínio é bastante heterogêneo, com frequente presença de granitoides deformados ou não, com metatexitos ortoderivados (metatonalitos/ dioritos) e raramente migmatitos paraderivados (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Os depósitos colúvio-eluviais ocorrem próximos à escarpa da Serra Grande/Ibiapaba, na região centro-sul da Folha Crateús. Correspondem a coberturas de sedimentos inconsolidados, de granulometria fina a média, de composição arenosa e síltico-argilosa, dispostos sobre litologias do embasamento cristalino. Estas coberturas podem chegar até 10-20 m de espessura ocorrendo na forma de mesetas, com bordas suavemente inclinadas, dissecadas pela drenagem local (COSTA, 2017).

Os depósitos de aluvião presentes no município, são encontrados principalmente ao longo do rio Poti formados por afluentes de maior extensão (ex: riachos do Meio, Tourão, Pinheiro, dos Cavalos, do Jucá). São em geral bastante heterogêneos, variando entre cascalhos, areias e argilas. Depósitos de areia e cascalho estão geralmente localizados próximos ao leito da drenagem, enquanto depósitos de argila são localmente encontrados nas margens, representando “antigas” planícies de inundação (COSTA, 2017).

Na Figura 7 estão representadas as unidades que constituem a geologia do município de Crateús.

Figura 7 – Mapa Geológico simplificado do Município de Crateús - CE



Fonte: Autora, 2022.

### 3 ÁGUA SUBTERRÂNEA

O termo água subterrânea é normalmente reservado a água subsuperficial que se encontra abaixo do nível freático em solos e formações geológicas que estão totalmente saturadas (FREEZER; CHERRY 2017). Quase toda a água subterrânea existente na Terra é originada do ciclo hidrológico, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficial e subterraneamente ao oceano (FEITOSA *et al.*, 2008).

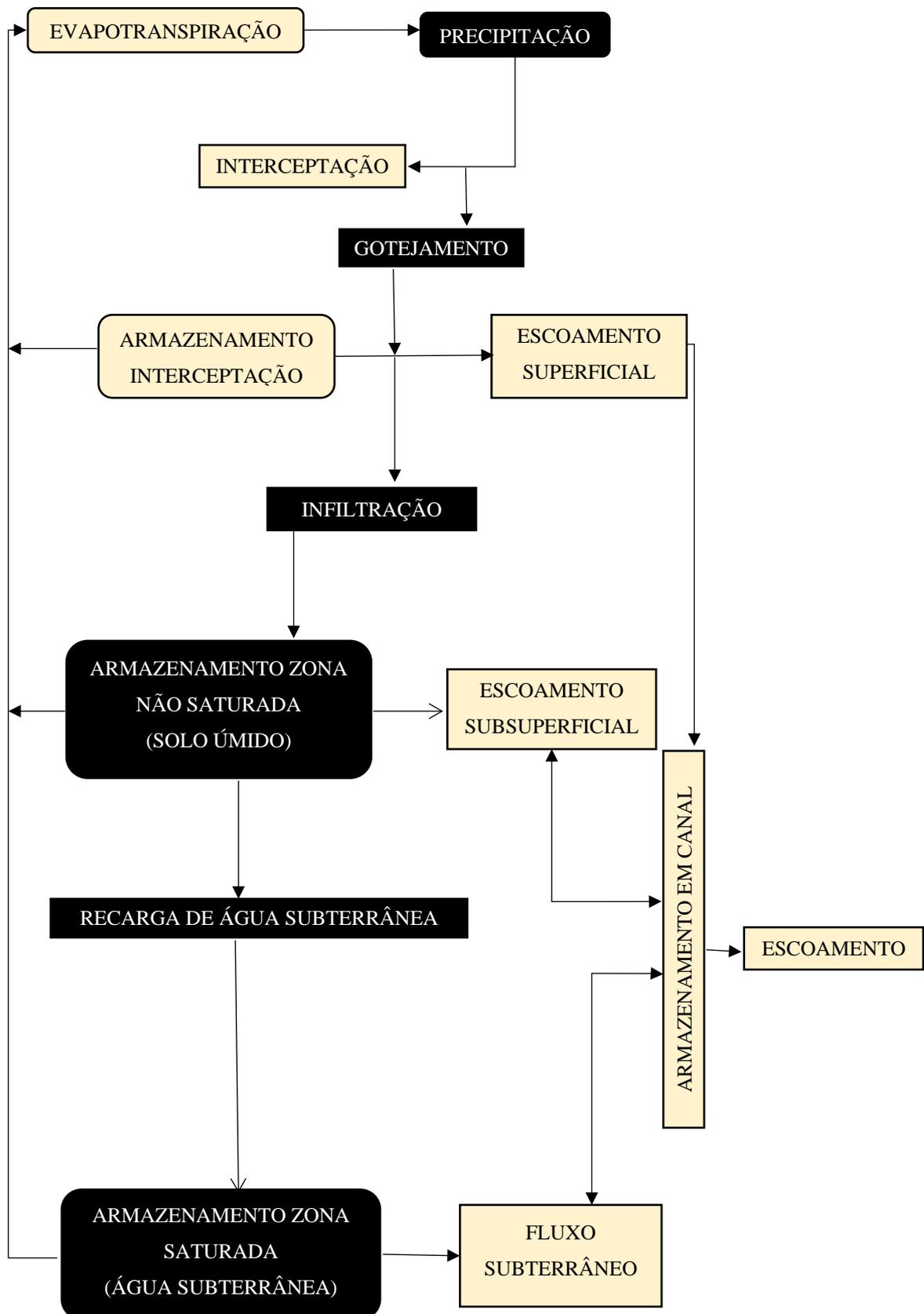
Neste item serão descritos os principais conceitos relacionados a água subterrânea, que inclui o ciclo hidrogeológico, bacias hidrográficas, tipos de aquíferos e recarga de água subterrânea.

#### 3.1 Ciclo Hidrológico

O conceito de ciclo hidrológico está ligado à infinita circulação de água entre o oceano, a atmosfera e à Terra. O ciclo hidrológico é conduzido, no solo e subsolo, pela atuação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade da cobertura vegetal e, na atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos), pelos elementos e fatores climáticos, tais como temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar e insolação, que são os responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera (FREEZER; CHERRY 2017).

Os principais processos que integram o ciclo da água são: precipitação, evaporação, transpiração, interceptação, infiltração, percolação, escoamento superficial e subterrâneo (FREEZER; CHERRY 2017). A Figura 8 mostra uma representação esquemática do ciclo hidrológico.

Figura 8 – Sistema de representação do ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Freezer; Cherry, 2017.

### **3.1.1 Processo de precipitação**

O processo de precipitação está associado a um dos componentes mais consideráveis do ciclo hidrológico, sendo o fenômeno encarregado pela recarga subterrânea ou subsuperficial, ao qual garante a disponibilidade de água que fica armazenada no solo. A precipitação ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, com umidade e núcleos de condensação, formam abundantemente gotas com tamanho e peso suficientes para que a gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

De acordo com Feitosa *et al.*, (2008), diversas condições são necessárias para que ocorra a precipitação: deve existir uma massa de ar à temperatura do ponto de orvalho; a massa do ar deve sofrer condensação, passando à forma líquida ou sólida; as gotas de água devem aglutinar-se para formar as gotas de chuva; as gotas de chuva devem ser de tamanho suficiente para que, ao deixarem as nuvens, não sejam totalmente evaporadas antes de atingir a superfície do solo.

Em regiões áridas e semiáridas, como é o caso da região em estudo, as precipitações são consideradas baixas, em consequência da marcante variabilidade interanual da pluviometria, associada aos baixos valores totais anuais pluviométricos sobre a região. A variabilidade interanual da pluviometria nesta região está relacionada a variações de padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre os oceanos tropicais, os quais afetam a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico (MOURA *et al.*, 2007).

### **3.1.2 Processo de evapotranspiração**

A evapotranspiração é a configuração pela qual a água da superfície do terreno passa para a atmosfera no estado de vapor. É uma ação importantíssima no Ciclo Hidrológico em termos globais. O processo de evapotranspiração envolve a evaporação da água de superfícies livres (rios, lagos, represas, oceano, etc.), dos solos e da vegetação úmida (que foi interceptada durante uma chuva) e a transpiração da vegetação (PORTO *et al.*, 1999).

A evapotranspiração é controlada por variáveis meteorológicas, como velocidade do vento, temperatura do ar, umidade atmosférica e outros dados climáticos. Em uma escala intermediária, a evapotranspiração assume papel fundamental no balanço hídrico de microbacias hidrográficas, juntamente com a precipitação. O balanço entre a água que entra na

microbacia pela chuva e que sai por evapotranspiração, resultará na vazão do sistema de drenagem (PORTO *et al.*, 1999).

### **3.1.3 Processo de interceptação**

Segundo Barreto (2006), parte da água proveniente da precipitação pode ser interceptada pela cobertura vegetal, antes de atingir a superfície do solo, e conseqüentemente pode interferir diretamente na quantidade de fluido que atinge a zona não-saturada do solo.

A cobertura vegetal pode influenciar consideravelmente nos volumes de água que atingirão a superfície do solo. A parcela inicial da precipitação é retida pela folhagem das árvores e da vegetação em geral, assim, quanto maior for a área de vegetação, maior será a interceptação da água durante a precipitação. O volume retido que não atinge a superfície do solo é evaporado assim que houver capacidade real de evaporação. Quando esse volume retido pela vegetação sofre o processo de evaporação, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através de outro processo que é a transpiração (PEREIRA, 2012).

### **3.1.4 Processo de percolação e infiltração**

Após o processo de precipitação, parte das águas que atinge a superfície do solo se infiltra e outra parte pode percolar no interior do subsolo, durante períodos variáveis, onde são influenciados por diferentes aspectos, entre eles: a permeabilidade do solo, a porosidade do subsolo, a cobertura vegetal, a inclinação do terreno e o tipo de chuva (PEREIRA, 2012).

Segundo Feitosa *et al.*, (2008) a água infiltrada no solo pode ser dividida em três partes. A primeira permanece na zona não saturada, ou seja, a zona onde os vazios do solo estão preenchidos em parte por água e ar, acima do nível freático. A segunda parte, chamada escoamento subsuperficial, determinada por um fluxo lateral, na zona não saturada, a pequenas profundidades, onde existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo e, nessas condições, consegue alcançar os leitos dos cursos d'água. Já a terceira parte pode percolar até o nível freático, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos.

### **3.1.5 Processo de escoamento superficial e subterrâneo**

O escoamento superficial é o processo do ciclo hidrológico do deslocamento das águas na superfície da Terra, isto é, representa o fluxo sobre a superfície do solo das bacias

hidrográficas e seus múltiplos canais. Além do escoamento superficial há outros dois tipos de escoamento: o subsuperficial definido como o fluxo que se dá logo abaixo da superfície, na altura das raízes da cobertura vegetal e; o subterrâneo que corresponde ao fluxo devido à contribuição do aquífero (região saturada do solo com água em movimento) aos canais superficiais (PORTO *et al.*, 1999).

O escoamento superficial tem origem, fundamentalmente, nas precipitações, porém estas também contribuem para o escoamento subsuperficial e subterrâneo. Verifica-se que o escoamento superficial começa algum tempo após o início da precipitação. O intervalo decorrido corresponde à ação da intercepção pelos vegetais e obstáculos, à saturação do solo, à acumulação nas depressões do terreno e à formação de uma lâmina d'água mínima, que aumenta sua espessura até atingir uma altura mínima, quando a água começa a escoar sobre o solo, iniciando assim o escoamento superficial (PORTO *et al.*, 1999).

### **3.2 Bacias hidrográficas e balanço hídrico**

A bacia hidrográfica é a região de captação natural dos fluxos de água produzidos a partir da precipitação, onde os escoamentos fluem para um único ponto de saída, chamado exutório. O conceito de uma bacia hidrográfica requer a definição de um curso d'água, de um ponto ou seção de referência ao longo deste curso d'água e de informações sobre o relevo da região. O relevo permite identificar os divisores d'água, definidos a partir das informações de altitudes do terreno. A água que infiltra no solo, pode ainda, seguir um fluxo de escoamento que depende das rochas presentes no subsolo, que quando impermeáveis, dão origem ao divisor de águas subterrâneas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Diferentes fatores influenciam na forma como a água da chuva interage com a bacia hidrográfica. Os elementos mais importantes estão ligados ao clima, aos solos, às rochas presentes no subsolo e à vegetação da área. Outros fatores podem ainda ser considerados, e estão relacionados ao movimento da água através da bacia, definidos como fatores morfométricos: relevo (inclui a área de drenagem), comprimento do curso de água principal e declividade (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Considerando as características descritas, o balanço hídrico é definido pela entrada e saída de água em uma bacia hidrográfica, onde a principal entrada de água é consequente da precipitação. Já a saída de água da bacia pode acontecer por evapotranspiração e por escoamento. Na prática, qualquer sistema hidrológico pode ser descrito por um balanço hídrico,

desde que considere as entradas e variações de armazenamento do fluido (FEITOSA *et al.*, 2008).

### **3.3 Tipos de Aquíferos**

Um aquífero pode ser definido como uma formação geológica permeável saturada que pode transmitir quantidades consideráveis de água sob gradientes hidráulicos comuns. Os aquíferos mais comuns estão presentes nos sedimentos e rochas, como areias não consolidadas e cascalhos, rochas sedimentares permeáveis como arenitos e calcários, e rochas vulcânicas e cristalinas fortemente fraturadas (FREEZER; CHERRY 2017).

Nesse sentido, os aquíferos podem ser classificados segundo a sua porosidade ou em função da pressão das águas nas suas superfícies confinantes. Considerando-se a porosidade, os aquíferos são classificados como porosos ou sedimentares, fraturados ou fissurais e aquíferos cársticos. Ainda, segundo a pressão da água, os aquíferos são classificados como confinados ou não confinados (livres), dependendo da presença ou da ausência do nível freático (FEITOSA *et al.*, 2008).

#### **3.3.1 Aquíferos porosos ou sedimentares**

Os aquíferos porosos ou sedimentares são aqueles formados por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos. Representam os aquíferos mais importantes por expressarem grande capacidade de armazenar água, e por ocorrerem em grandes áreas, principalmente em bacias sedimentares (FEITOSA *et al.*, 2008).

Do ponto de vista de aproveitamento hidrogeológico, a ocorrência de água subterrânea em sedimentos pouco consolidados apresenta muitas vantagens. São depósitos que se encontram na maioria das vezes em locais favoráveis à recarga, que pode ser realizada a partir de rios, riachos e lagoas ou mesmo por meio da infiltração direta das chuvas. Em geral, sedimentos pouco consolidados possuem alta capacidade de infiltração potencial, maior porosidade efetiva e maior permeabilidade do que as formações compactas. Dentre os depósitos sedimentares, os mais significativos são os aluviões, as dunas e alguns depósitos colúvies (TEXEIRA *et al.*, 2000).

No domínio dos sedimentos consolidados, as formações geológicas mais significativas para a ocorrência como aquíferos, são aquelas em que as rochas apresentam permeabilidade regular a boa. Em geral, as formações areníticas apresentam grande expressão

hidrogeológica visto que formam aquíferos que armazenam grandes quantidades de água potável (FEITOSA *et al.*, 2008).

Temos como exemplo deste tipo de aquífero, o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que representa a segunda maior fonte de água doce subterrânea do planeta e ocupa uma área de 1,2 milhões de km<sup>2</sup>, abrangendo quase toda a área das bacias sedimentares do Paraná e Chaco-Paraná, incluído na Formações Botucatu, Pirambóia, e estratos pertencentes ao Grupo Rosário do Sul (FILHO, *et al.*, 2003).

### **3.3.2 Aquíferos fraturados ou fissurais**

Os aquíferos fissurais, também chamados fraturados, são formados por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a circulação da água ocorre nas fraturas, fendas e falhas. São tipos de rochas que possuem porosidade praticamente nula, ou seja, os vazios intercristalinos condicionantes da porosidade são mínimos e não interconectados, por consequência a permeabilidade primária presente é extremamente pequena. Apesar disso, a ocorrência dessas fraturas, ocasionada por esforços exercido sobre o material rochoso, consegue formar uma porosidade secundária, responsável por armazenar água, e uma permeabilidade capaz de conduzi-la ao longo do maciço rochoso (TEXEIRA *et al.*, 2000).

Os aquíferos fissurais, de modo geral, caracterizam-se por possuir elevada heterogeneidade, sendo por isso totalmente descontínuo no espaço. O principal fator que condiciona a acumulação e circulação de água subterrânea nas zonas dos aquíferos é o grau de fraturamento da rocha, resultante da deformação tectônica rúptil, descompressão ou expansão térmica. Isto é, a capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação (FEITOSA *et al.*, 2008).

### **3.3.3 Aquíferos cársticos**

Nos aquíferos cársticos, formados por rochas calcáreas ou carbonáticas, as condições de circulação das águas subterrâneas ocorrem por meio das fraturas e outras discontinuidades resultantes da dissolução dos carbonatos pela água. O modo de ocorrência das infiltrações nesse tipo de aquífero deve-se à intensa variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração que é muito maior nos meios cársticos que em outros meios permeáveis (FEITOSA *et al.*, 2008).

As discontinuidades formadas nos aquíferos cársticos podem atingir grandes dimensões, criando rios e lagos subterrâneos. De modo geral, os terrenos cársticos são áreas com características hidrogeológicas específicas, com ocorrências de dolinas, condutos e cavernas, que permitem o armazenamento de significativas reservas de água (TEXEIRA *et al.*, 2000).

### **3.3.4 Aquíferos confinados**

Os aquíferos confinados são aqueles em que a água está submetida a uma pressão superior à atmosférica. Ocorrem em profundidade e em função das características das camadas limítrofes, podem ser definidos como confinados não drenantes e confinados drenantes (TEXEIRA *et al.*, 2000).

Os aquíferos confinados não drenantes, são formados por camadas limítrofes impermeáveis, sendo uma superior e outra inferior. Em um poço tubular aberto nesse tipo de aquífero, o nível da água subterrânea fica acima da base da camada confinante superior. Se isso acontece, o poço é chamado artesianos surgente ou jorrante e o aquífero é dito que está sob condições artesianas (FEITOSA *et al.*, 2008).

Aquíferos confinados drenantes são aqueles, onde, pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída dos fluxos pelo topo e/ou pela base através de drenagens ascendentes ou descendentes. As formações semipermeáveis oferecem uma resistência hidráulica relativamente alta à passagem do fluxo de água (FEITOSA *et al.*, 2008).

### **3.3.5 Aquíferos não confinados**

Também chamados freáticos ou livres, os aquíferos não confinados, encontram-se, geralmente, em profundidades pequenas, sendo quase sempre limitados pela própria superfície ou pelo limite de acumulação da água. São constituídos por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável, ou seja, a superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual interage livremente (TEXEIRA *et al.*, 2000).

Os aquíferos não confinados são caracterizados por possuir uma recarga direta, nesses o nível da água se modifica conforme a quantidade de chuva. São usualmente os aquíferos mais explorados em relação a programas de perfuração (FEITOSA *et al.*, 2008).

### 3.4 Recarga de águas subterrâneas

A recarga subterrânea pode ser definida, em termos gerais, como toda quantidade de água que atinge um sistema de aquífero, independentemente de sua origem (por entre uma zona de solo insaturado, camada confinante inferior ou superior, ou lateralmente de outro sistema). Em geral, a precipitação é a principal ação responsável pela recarga de água e a taxa de infiltração estará condicionada a parâmetros que variam no tempo e espaço (BARRETO, 2006).

Segundo Pereira (2012) a recarga de água subterrânea pode ocorrer naturalmente, por meio da precipitação ou infiltração em leitos de rios, canais e lagos, ou induzida por atividades antrópicas como irrigação e urbanização. São reconhecidos três tipos principais de zona de recarga:

- Zona de Recarga Direta: também referida como recarga difusa, a recarga direta é aquela onde as águas provenientes da chuva penetram de modo direto no aquífero, através das áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. É estimada pela quantidade de água adicionada ao reservatório subterrâneo, resultante da percolação vertical da precipitação por meio da zona não saturada, descontando-se os déficits de umidade do solo e da evapotranspiração.
- Zona de Recarga Indireta: é a quantidade de água que percola e atinge o lençol freático, originária de poças, em áreas de topografia baixa. É a infiltração que ocorre como efeito do escoamento superficial, a partir dos cursos d'água, por meio dos sedimentos de fundo de canais e lagos. Existem, portanto, dois grupos de recarga indireta, sendo um associado a cursos d'água superficiais e outro decorrente de concentrações de água em superfícies planas, onde inexistem corpos d'água bem definidos.
- Zona de Recarga localizada: é um processo pontual de recarga, em que a água se move em curtas distâncias, lateralmente, antes da infiltração.

Em condições naturais, a quantidade total de água precipitada que penetra no solo em direção aos aquíferos, livres ou confinados, depende principalmente dos seguintes fatores: topografia; altura, intensidade e duração da chuva; capacidade de retenção da água, umidade

antecedente e características hidráulicas do solo. Esses fatores podem ser agrupados em características relativas ao clima, geomorfologia e as características dos solos (BEAR, 2007).

Em relação ao clima, importam, especialmente, as características da precipitação: altura, intensidade e duração. A altura da precipitação é importante, porque para que a água infiltre, seu volume precisa ser maior que as perdas que ocorrem por interceptações, evapotranspiração e retenção. Além disso, as chuvas menos intensas e regularmente distribuídas temporalmente, promovem uma infiltração maior, pois a taxa de infiltração pode acompanhar a altura de precipitação gerada, enquanto chuvas intensas favorecem o escoamento superficial direto. A duração das chuvas também é importante, pois quando o solo está saturado, a taxa de infiltração da água é reduzida (SERAPHIM, 2018).

A geomorfologia influencia a recarga através da altitude relativa e declividade. O padrão do fluxo de movimento da água entre as zonas de recarga e descarga ocorre a partir da força da gravidade e pressão, normalmente de áreas mais altas para áreas mais baixas, formando bacias hidrográficas subterrâneas que acompanham o relevo do terreno. Dessa forma, os altos regionais são encarregados de produzir recargas dos aquíferos mais profundos, enquanto áreas baixas regionais, por recargas locais (SERAPHIM, 2018).

Dos aspectos relacionados ao solo, são importantes principalmente a capacidade de infiltração, umidade, profundidade e condutividade hidráulica. A umidade do solo anterior à precipitação influencia a infiltração da água que chega aos aquíferos devido à capacidade de campo do solo. A condutividade hidráulica do solo é o fator mais decisivo em relação às taxas de infiltração, pois expressa as características de movimentação da água no solo (BEAR, 2007).

Os solos mais porosos e permeáveis, em geral, com maior teor de areia, possuem altas taxas de infiltração, enquanto solos mais finos e de menor porosidade, geralmente com maior teor de argila, possuem menores taxas de infiltração. Ainda, a espessura do solo é outro importante fator, visto que consegue reter temporariamente uma maior quantidade de água precipitada que é posteriormente liberada para o aquífero subjacente (BEAR, 2007).

## 4 SENSORIAMENTO REMOTO

Entende-se por Sensoriamento Remoto a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados e equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com a finalidade de observar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e os elementos que o compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010).

As informações entre os objetos na superfície terrestre e os sensores a bordo dos satélites são transmitidas à velocidade da luz, através de Radiação Eletromagnética (REM). O Sol é a fonte fundamental da REM, que se propaga em todos os sentidos na forma de ondas eletromagnéticas. A disposição contínua da REM pode ser reproduzida, conforme o comprimento de onda e frequência, por meio do espectro eletromagnético, que envolve um conjunto conhecido de comprimentos de ondas (NOVO, 2010).

Este item visa, portanto, apresentar conceitos relacionados aos princípios do Sensoriamento Remoto, tratando das características relacionadas ao Espectro Eletromagnético, Sensores de imageamento, bem como o uso de Sensoriamento Remoto para aplicação de pesquisas hidrogeológicas, com o intuito de ressaltar a identificação e o entendimento de feições de interesse a exploração de água subterrânea.

### 4.1 Princípios do Sensoriamento Remoto

O termo Sensoriamento Remoto é restrito somente aos métodos que se utilizam da energia eletromagnética na detecção e medida dos alvos. Isto é permitido devido às interações entre a energia eletromagnética e os objetos. Em termos práticos, a concepção envolvida nesta definição, é que a radiação eletromagnética proveniente de um alvo vai conter informações sobre o mesmo, relativas às suas propriedades espaciais (tamanho, forma, estrutura e textura) e suas propriedades espectrais (reflectância, absorptância, transmitância e emitância) (FREITAS, 1998).

Para aquisição de dados por Sensoriamento Remoto é necessário o uso de energia, que pode ser proveniente tanto de uma fonte natural, como a luz do sol e o calor emitido pela superfície da Terra, quanto por uma fonte artificial. Dessa forma, a energia eletromagnética ao alcançar a superfície de um alvo vai interagir com a mesma através de troca de energia, que resultará em uma absorção, reflectância e/ou transmitância de parte desta energia incidente. No

entanto, como o sensor não está em contato físico direto com o alvo, este conseguirá registrar apenas a componente da radiação eletromagnética refletida, denominada radiância (FLORENZANO, 2007).

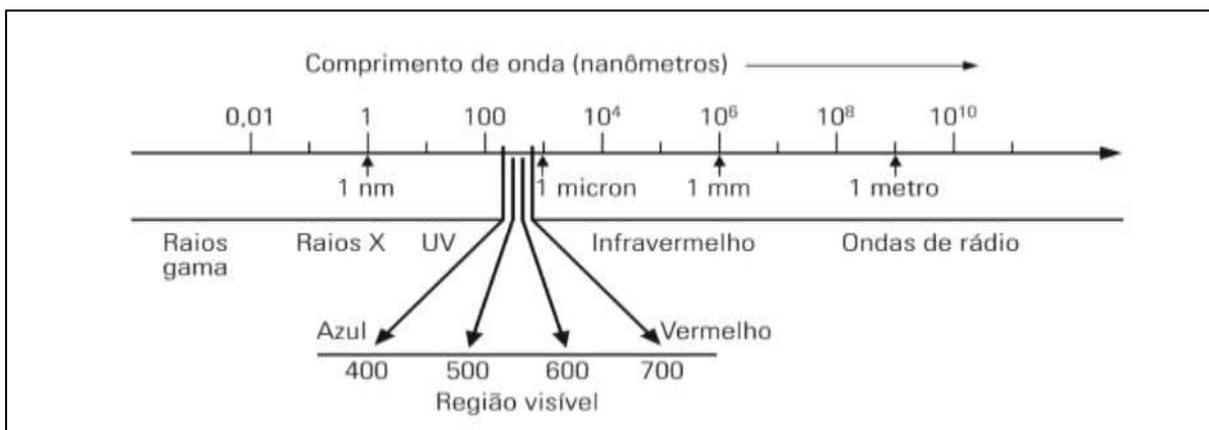
Nesse sentido, a principal função do processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto é fornecer ferramentas que facilitem a identificação e extração das informações contidas nas imagens para posterior explicação, de tal forma que o resultado desse processo é a produção de outras imagens que contenham informações específicas extraídas e realçadas a partir da imagem original (FREITAS, 1998).

## **4.2 Espectros Eletromagnéticos**

O espectro eletromagnético caracteriza a distribuição da radiação eletromagnética, por regiões, conforme o comprimento de onda e a frequência, abrangendo desde pequenos comprimentos de onda, como os raios cósmicos e os raios gama, de elevada frequência, até grandes comprimentos de onda, como as micro-ondas, de baixa frequência. Para o Sensoriamento Remoto terrestre, a região do espectro mais amplamente utilizada compreende a faixa que vai do início do visível ( $0,38 \mu\text{m}$ ) até as micro-ondas (100 cm) (NOVO, 2010).

No espectro eletromagnético, o espectro óptico da energia solar refletida pelos objetos da superfície terrestre pode apresentar-se de forma diferente a depender do seu comprimento de onda, as chamadas janelas atmosféricas, em: visível ( $0,45\text{-}0,76 \mu\text{m}$ ); infravermelho próximo ( $0,76\text{-}1,2 \mu\text{m}$ ); infravermelho de ondas curtas ( $1,2\text{-}3,0 \mu\text{m}$ ); infravermelho médio ( $3,0\text{-}5,0 \mu\text{m}$ ); infravermelho termal ( $5,0\text{-}1,0 \text{mm}$ ); e microondas ( $3,0\text{-}100 \text{cm}$ ) (NOVO, 2010). Na Figura 9 é mostrada uma ilustração do espectro eletromagnético e suas principais regiões.

Figura 9 – Principais regiões do Espectro Eletromagnético



Fonte: Novo, 2010.

A luz visível é a região com maior intensidade de fluxo radiante no espectro solar, onde estão as melhores janelas atmosféricas, que são muito transparentes e permitem a passagem de grande quantidade de radiação. Portanto, é amplamente utilizado em Sensoriamento Remoto. É a área responsável por interagir com os minerais e produzir suas cores e pigmentos na vegetação. O problema com essa faixa espectral é o alto grau de espalhamento da radiação solar incidente pelos gases atmosféricos, o que reduz o contraste de reflexão dos alvos terrestres. É chamada luz visível porque o olho humano é muito sensível a essa região espectral (MENESES; ALMEIDA, 2012).

No Infravermelho próximo à atmosfera no espectro solar é muito transparente, mas existem algumas bandas de absorção que bloqueiam todo o intervalo que pode ser continuamente utilizado por Sensoriamento Remoto. É o intervalo onde ocorrem significativas interações da radiação eletromagnética com os níveis de energia eletrônica dos átomos, gerando feições espectrais diagnósticas para identificar a natureza de diferentes tipos de rochas (NOVO; PONZONI, 2001).

O infravermelho de ondas curtas é a região espectral geológica. Nesta faixa espectral é possível observar as feições de absorção de diversos minerais de alteração hidrotermal. Também é a região onde os comprimentos de onda em 1,4  $\mu\text{m}$  e 1,9  $\mu\text{m}$  são totalmente absorvidos pelas moléculas de vapor d'água da atmosfera, impedindo a aplicação de Sensoriamento Remoto e, por consequência, de se identificar nos materiais terrestres a presença de água molecular nas suas estruturas (NOVO; PONZONI, 2001).

O Infravermelho médio é a região onde o Sol e a Terra não emitem quantidades suficientes de energia que possam ser detectadas pelos sensores. Dessa forma, apenas alvos com elevadas temperaturas, como vulcões e incêndios, podem ser detectados, pois, se

comportam como fontes próprias de emissão de radiação. É uma região espectral pouco usada no Sensoriamento Remoto (MENESES; ALMEIDA, 2012).

O infravermelho termal é conhecido como a região termal, devido à radiação emitida pelos objetos terrestres em consequência das suas temperaturas de superfícies. A melhor janela atmosférica nessa região espectral para imageamento orbital é o intervalo de 8,0  $\mu\text{m}$  a 14,0  $\mu\text{m}$ , porque acima de 30 km, a camada de ozônio absorve toda a radiação além de 14  $\mu\text{m}$  emitida pela Terra (MENESES; ALMEIDA, 2012).

As micro-ondas caracterizam a região de uso de sensores ativos (radar), que usam fontes artificiais para a geração da REM. Em consequência do tamanho do comprimento de onda, o radar tem a habilidade de operar mesmo em condições atmosféricas adversas, com coberturas de nuvens ou chuvas, e pode operar tanto de dia como à noite. É uma região importante no para o campo da geologia estrutural e mapeamento geológico, porque a interação das micro-ondas com as rochas é controlada pelas texturas de relevo (NOVO; PONZONI, 2001). O Quadro 1, mostra às principais regiões utilizadas para o sensoriamento da superfície da Terra.

Quadro 1 - Principais regiões utilizadas para o sensoriamento da superfície da Terra

Região	Nome do comprimento de onda	Comprimento de Onda
<b>Visível</b>	Violeta	0,38 - 0,45 $\mu\text{m}$
	Azul	0,45 - 0,49 $\mu\text{m}$
	Verde	0,49 - 0,56 $\mu\text{m}$
	Amarelo	0,56 - 0,59 $\mu\text{m}$
	Laranja	0,59 - 0,63 $\mu\text{m}$
	Vermelho	0,63 - 0,76 $\mu\text{m}$
<b>Infravermelha</b>	Infravermelho próximo	0,80 - 1,50 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de ondas curtas	1,50 - 3,00 $\mu\text{m}$
	Infravermelho médio	3,00 - 5,00 $\mu\text{m}$
	Infravermelho termal	5,00 - 15,00 $\mu\text{m}$
	Infravermelho distante	15,00 – 300 $\mu\text{m}$
<b>Micro - ondas</b>	Submilimétrica	0,01 – 0,10 cm
	Milímetro	0,10 – 1,00 cm
	Micro - ondas	1,0 – 100 cm

Fonte: Chen, 1985, apud NOVO, 2010.

### **4.3 Sensores de imageamento utilizados no Sensoriamento Remoto**

Sensores são os sistemas responsáveis pela transformação da energia proveniente dos objetos em um registro na forma de imagem ou gráfico que possibilita relacionar a distribuição da radiação, emitância ou retroespalhamento com suas propriedades físicas, químicas, biológicas ou geométricas. No processo de transformação e registro dessa energia, esta se encontra submetida a um conjunto de conversões radiométricas, geométricas e espaciais (NOVO, 2010).

Os sensores podem ser classificados em função da energia ou em função do tipo de produto que geram. Quanto à fonte de energia, os sensores podem ser classificados em sensores passivos e sensores ativos. Os sensores passivos, não possuem fonte própria de radiação, são aqueles que detectam a radiação solar refletida ou a emitida pelos objetos da superfície. Dependem, portanto, de uma fonte de radiação externa para poderem gerar informações sobre os alvos de interesse. Os sensores ativos são aqueles que produzem sua própria radiação eletromagnética, trabalhando em faixas restritas do espectro. Os principais exemplos de sensores passivos são os radares equipados em aeronaves e embarcações que geram e emitem micro-ondas para localizar-se na superfície terrestre (NOVO; PONZONI, 2001).

Quanto ao tipo de produto, os sensores são classificados em não imageadores, aqueles que não geram imagem da superfície sensoriada, e imageadores no qual é possível obter uma imagem da superfície observada. Além desta classificação, os sensores são divididos, em relação ao espectro eletromagnético, nos que compreendem a faixa óptica e a faixa de micro-ondas (NOVO; PONZONI, 2001).

### **4.4 Tipos de resoluções das imagens de satélites**

Entende-se por resolução de imagens a capacidade que o sensor possui de diferenciar objetos em função do tamanho em que se apresentam. Quanto mais estreita for a faixa espectral da qual o sensor capta as informações, maior será a possibilidade de registrar variações de energia refletida pelo objeto. Dessa maneira, pode-se considerar também que quanto maior o número de bandas de um sensor, maior será sua resolução espectral (FLORENZANO, 2007).

O reconhecimento de um objeto nas imagens de Sensoriamento Remoto é definido, não apenas pela resolução espacial, mas também por quatro diferentes formas de medição: pela área do campo de visada do sensor; pelo comprimento de ondas das bandas; pelos valores

numéricos da radiância do alvo; e pela data em que a imagem foi registrada. Essas quatro formas de medidas fazem referência a definição de resolução, respectivamente denominadas resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal (MENESES; ALMEIDA, 2012).

#### **4.4.1 *Resolução espacial***

A resolução espacial configura em qualquer representação de sensor a dimensão individual do objeto imageado no terreno. É um importante parâmetro do sensor, pois determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Por definição, um objeto apenas pode ser detectado, quando o tamanho deste é, no mínimo, igual ou maior do que o tamanho do elemento de resolução no terreno, isto é, da resolução espacial (NOVO; PONZONI, 2001).

A determinação da resolução espacial de um sensor, implica em uma investigação da relação do grau de autocorrelação da organização espacial dos objetos no terreno. Em terrenos naturais os objetos apresentam uma alta correlação espacial, manifestando pouca variabilidade ao longo de uma superfície, não exigindo, para a sua identificação, altas resoluções espaciais. Já para uma área com alta variedade de tipos de objetos, a condição é a aplicação de um sensor com resolução espacial de poucos metros, para que os elementos sejam assim representados (MENESES; ALMEIDA, 2012).

#### **4.4.2 *Resolução espectral***

A resolução espectral é entendida como sendo a capacidade do sensor atuar em diferentes e estreitas bandas espectrais. Em Sensoriamento Remoto, a obtenção simultânea de imagens em múltiplas bandas espectrais é uma das propriedades mais significativas dos sensores imageadores. A resolução espectral compreende ao menos três parâmetros de medida, relacionadas a quantidade de bandas que o sensor possui, a largura em comprimento de onda das bandas e as posições em que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético espacial (NOVO; PONZONI, 2001).

Em geral, um sensor apresenta maior resolução espectral quando retrata um maior número de bandas, situadas nas diferentes regiões espectrais, e larguras estreitas de comprimentos de onda. Isso acontece em consequência das diferenças relativas de reflectância entre os materiais da superfície da terra, que permitem diferenciar um material do outro, em certos comprimentos de onda. Em relação à largura da banda, esta precisa ser dimensionada de

conforme as larguras das feições de absorção exibidas pelos espectros de reflectância de cada elemento. As feições de absorção que identificam a composição dos tipos de rochas, solos, vegetação e água são, normalmente, da ordem de 10 a 20 nanômetros. Sensores com bandas muito largas, além de 20 nanômetros, tendem a não conseguir distinguir um objeto do outro em resultado de sua composição (MENESES; ALMEIDA, 2012).

#### **4.4.3 Resolução radiométrica**

Resolução radiométrica refere-se à capacidade que o sensor apresenta em discriminar a intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos. Determina o intervalo de valores, associados aos níveis de cinza, em que é possível sua aplicação para reproduzir uma imagem digital. Quanto maior for a capacidade do detector para avaliar as diferenças de intensidades dos níveis de radiância, maior será a resolução radiométrica (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A medida da resolução radiométrica também é denominada de quantização. De forma prática, a quantização do sinal é medida pelo intervalo de número de valores digitais usados para expressar os valores de radiância medidos pelo detector. A quantização é usualmente representada em números de dígitos binários (*bits*). De modo geral, quanto maior é a quantização, maior será a qualidade visual da imagem (NOVO; PONZONI, 2001).

#### **4.4.4 Resolução temporal**

Resolução temporal, é definida como sendo a frequência de imageamento do sensor sobre uma região específica para captar imagens periódicas de um determinado espaço. Isso acontece quando os satélites de sensoriamento remoto atuam em uma órbita Heliossíncrona, sendo um caso particular de uma órbita semipolar. O plano de órbita segue um arranjo fixo e ortogonal no sentido de rotação da Terra, dessa forma, o satélite move-se sobre o mesmo ponto da superfície da Terra em um mesmo intervalo de tempo (NOVO; PONZONI, 2001).

Na resolução temporal os sensores orbitam com uma inclinação em relação ao equador de 97° a 98°, uma altitude nominal aproximada de 550 a 900 km e com tempo de viagem para completar uma órbita de cerca de 90 minutos. Em um espaço de tempo de 24 horas, cerca de 14 órbitas se completam (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Tendo em vista que os sensores a bordo dos satélites conseguem imagear somente uma faixa da Terra com algumas dezenas ou centenas de quilômetros de largura, as 14 órbitas

imageadas no período de um dia ficam afastadas entre si de milhares de quilômetros por consequência das velocidades relativas de órbita do satélite, e da rotação da Terra no sentido de oeste para leste. Assim, a cada 24 horas, a localização da órbita segue na direção oeste. Esse princípio se aplica para qualquer tipo de satélite, o que irá alterar é a resolução temporal do imageamento, já que cada sensor imageia faixas no terreno em larguras diferentes (MENESES; ALMEIDA, 2012).

#### **4.5 Uso do Sensoriamento Remoto no estudo de recursos hídricos**

A utilização de métodos de Sensoriamento Remoto para localização de áreas mais propícias à exploração e recarga de água subterrânea tem se destacado como uma ferramenta bastante promissora para este fim. Essa metodologia consiste na geração de mapas temáticos interpretados e integrados para compor um mapa final, em que representará a localização de áreas mais favoráveis à prospecção e recarga de água subterrânea, principalmente quando aplicado a meios fissurais de regiões cristalinas. A integração dos mapas temáticos para a obtenção do mapa final é realizada em sequência, onde cada etapa de integração fornece informações possíveis de serem utilizadas para identificação destas áreas (FEITOSA *et al.*, 2008).

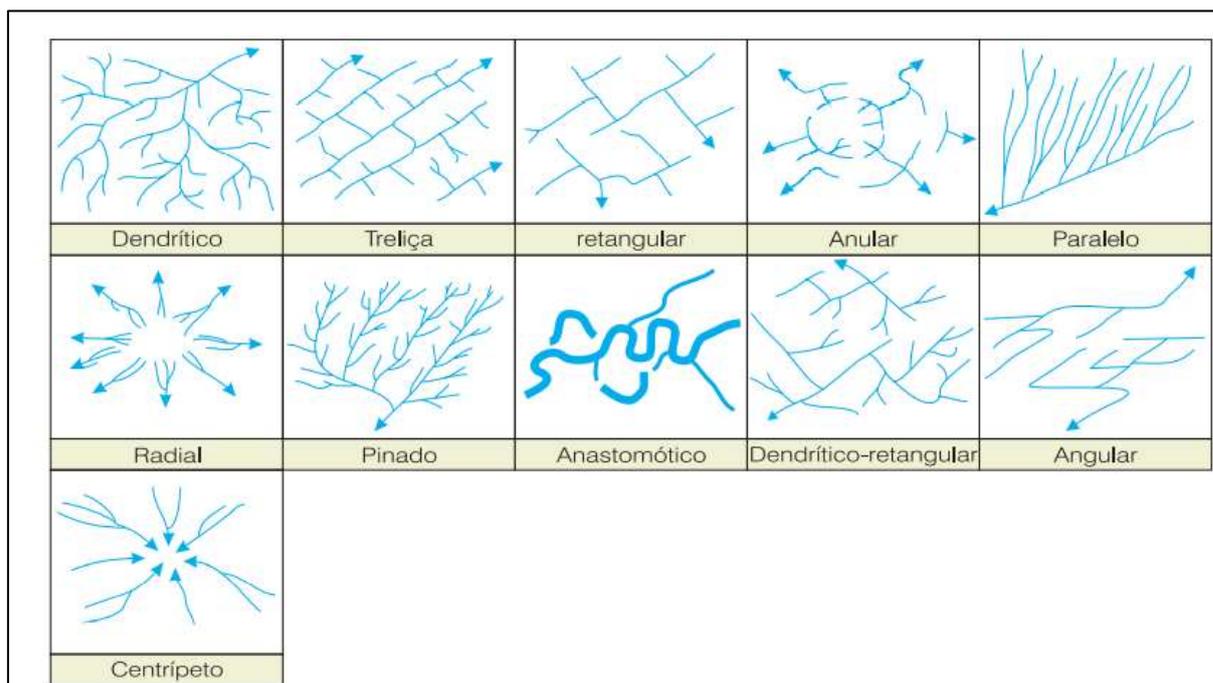
##### **4.5.1 Interpretação de padrões de drenagens**

A interpretação da rede de drenagem de uma determinada área de pesquisa, pode ser classificada como uma das mais importantes feições que devem ser analisadas, quando da investigação de imagens de satélites para pesquisas hidrogeológicas, dado que além de depender da distribuição das chuvas, das características naturais do terreno, vegetação e textura do solo, a drenagem superficial é estreitamente afetada pela litologia e características estruturais da área (ALMEIDA; FERREIRA, 2016).

A densidade da rede de drenagem permite a obtenção de informações referente à capacidade de infiltração da água no terreno, visto que está relacionada diretamente com as características físicas do material. Em rochas do embasamento cristalino, por exemplo, as drenagens, são em geral, controladas por estruturas geológicas, e por consequência se apresentam como importantes ferramentas para reconhecimento de áreas com potencial para exploração de água subterrânea (FEITOSA *et al.*, 2008).

Os modelos de redes de drenagem podem ser classificados em básicos e modificados. Os modelos básicos considerados são do tipo dendrítico, treliça, retangular, anular paralelo e radial; e os modelos modificados, do tipo pinado, anastomótico, dendrítico-retangular, angular e centrípeto, conforme apresentado na Figura 10 (FEITOSA *et al.*, 2008).

Figura 10 – Modelos básicos e modificados de padrões de drenagens



Fonte: Ricce & Petril, 1965 apud FEITOSA *et al.*, 2008.

No modelo básico, o tipo dendrítico indica a presença de rochas sedimentares com comportamento horizontal e em geral com inexistência de fraturas ou dobramentos, sem zonas de menor resistência à erosão, ou ainda, rochas ígneas, metamórficas ou depósitos inconsolidados; o modelo treliça sugere materiais de resistências variadas, aflorando paralelamente entre si; no tipo retangular não existe um paralelismo perfeito entre os cursos de água, sendo estes ainda menos alongados em relação aos que surgem no modelo treliça; o modelo anular sugere áreas onde no estágio inicial da erosão se formam cursos de água com padrões radiais, que em seguida, em consequência do processo erosivo, se desenvolvem afluentes subsequentes de forma circular; o tipo paralelo indica a existência de declives unidirecionais extensos, constituídos por extratos resistentes uniformemente inclinados; e o modelo radial sugere regiões com domos estruturais ou vulcões (FEITOSA *et al.*, 2008).

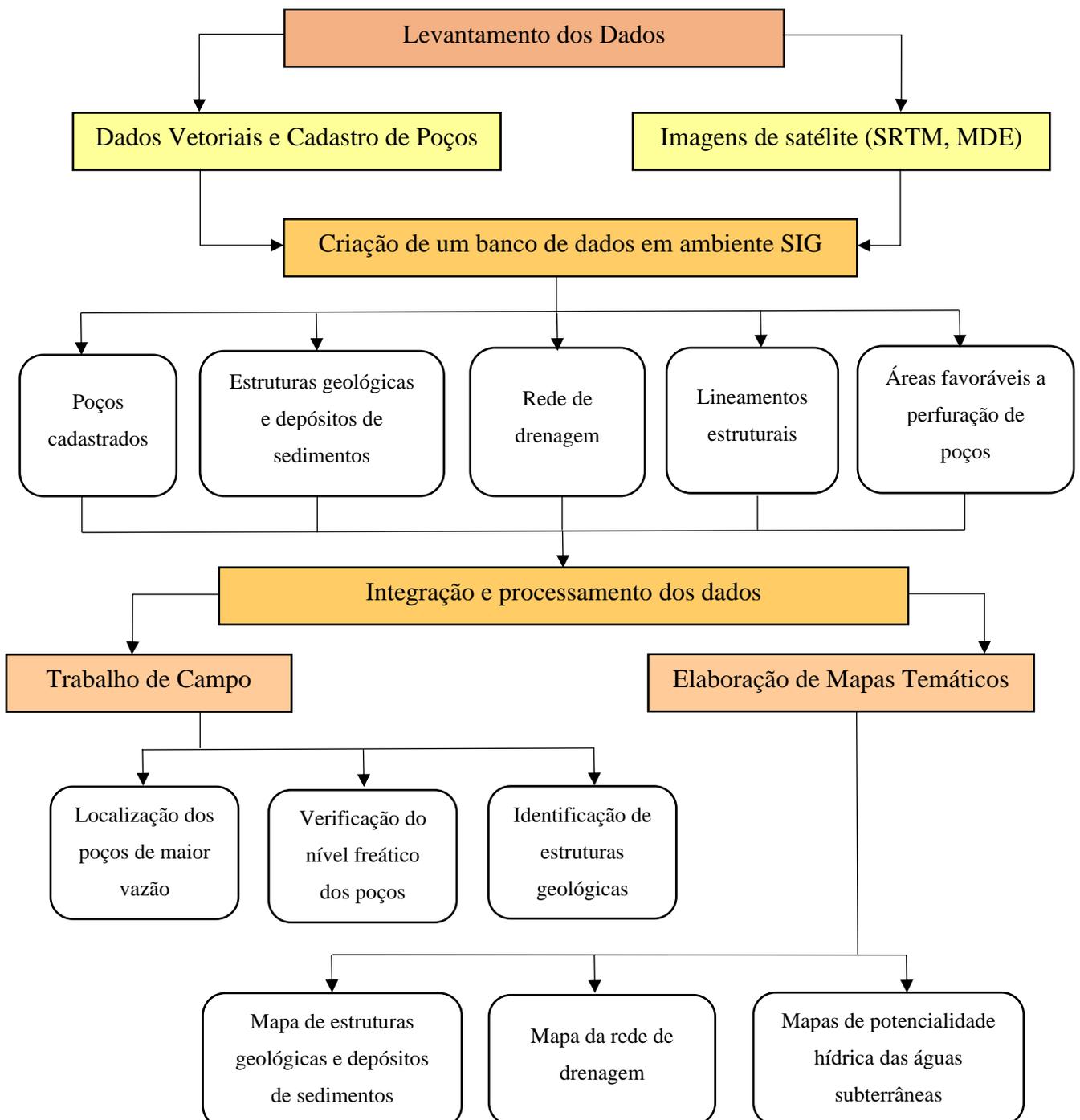
Quanto aos modelos modificados, no tipo pinado, os cursos de água mais extensos são de origem conseqüente e controlados pelo declive topográfico regional, representando uma

modificação do tipo dendrítico; o modelo anastomótico representa outra modificação do tipo dendrítico, é característico de áreas de planície aluviais e deltas; o padrão dendrítico-retangular indica áreas com rochas homogêneas cortadas por conjuntos de fraturas intercruzadas com malhas relativamente grandes. O modelo dendrítico está relacionado aos corpos de rochas isolados por fraturas, já o modelo retangular refere-se aos planos de menor resistência; o modelo angular é uma modificação do modelo retangular e demonstra a presença de estruturas com ângulos não retos; e o modelo centrípeto apresenta a variação do padrão radial e é específico de áreas com declives internos de crateras, como no caso de bacias estruturais (FEITOSA *et al.*, 2008).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados e a metodologia aplicada para obtenção dos resultados deste trabalho. As etapas seguidas para realização da pesquisa estão representadas no fluxograma metodológico, Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma metodológico



## 5.1 Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Carta Geológica da folha Crateús (SB.24-V-C-III) no formato vetorial (*shapefile*), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE na escala 1:100.000, representados pelo Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum WGS-84, que contém informações sobre afloramentos, estruturas geológicas, hidrografia, litologias, planimetria e recursos minerais do município;
- Dados digitais SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no formato GeoTIFF (*Georeferenced Tagged Image File Format*), representados pelo Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum WGS-84, resolução espacial de 30 metros, que contém informações geográficas, fornecidos pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), disponível na página da *web Earth Explorer*;
- Dados digitais MDE (Modelo Digital de Elevação) no formato GeoTIFF geocodificada com correção radiométrica e de terreno, resolução espacial de 12,5 metros, do radar ALOS PALSAR (L1.1) com passagem referente a janeiro de 2011, fornecidos pelo Instituto Geofísico da Universidade do Alasca Fairbanks, disponível na página da *web ASF (Alaska Satellite Facility)*;
- Dados de poços tubulares, obtidos junto a CPRM, através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), o qual fornece informações referentes aos aspectos geológicos e hidrogeológicos da área onde estes estão alocados;
- *Software QGIS da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)*, versão 3.16.11 (*Hannover*), para o processamento de imagens.

### 5.1.1 Equipamentos de campo

Na etapa de campo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Bússola geológica, tipo Bruton: utilizada para medir as atitudes das estruturas geológicas;
- GPS Garmin, modelo 64S: utilizado para localizar os poços que foram escolhidos para a pesquisa e marcar os pontos de coleta de dados;

- Medidor Elétrico de Nível D'Água, linha HS, com medida milimétrica: utilizado para medir o nível estático dos poços;
- Martelo geológico da marca Eastwing: utilizado para coletar amostras de rochas e estimar a resistência das rochas identificadas em campo;
- Lupa de Bolso: utilizada para identificar minerais;
- Mapa (Folha Crateús): utilizado para localizar as áreas de pesquisa.

## **5.2 Métodos**

A partir do levantamento dos dados e da etapa de campo foram elaborados mapas temáticos visando identificar áreas com potencialidade hídrica de águas subterrâneas no município de Crateús.

### **5.2.1 Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos**

Para o desenvolvimento do Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos foram realizados procedimentos de processamento digital de dados vetoriais (*shapefile*) em ambiente SIG da Carta Geológica da Folha Crateús SB.24-V-C-III, Escala 1:100.000.

A elaboração deste mapa teve por objetivo gerar um conhecimento básico sobre as unidades geológicas e depósitos de sedimentos que formam o município de Crateús e assim construir uma correlação preliminar dessas unidades e depósitos para identificar áreas com predomínio para ocorrência de água subterrânea.

### **5.2.2 Mapa da Rede de Drenagem**

Para a elaboração do Mapa da Rede de drenagem foram utilizadas técnicas de processamento a partir da composição de dados digitais SRTM, no formato GeoTIFF com resolução espacial de 30x30 metros, utilizando-se a ferramenta *r.watershed*, executados a partir da integração do SIG GRASS 7.8.5.

A aplicação dessa ferramenta teve por objetivo realizar a extração da rede de drenagem, necessária para a interpretação dos padrões de drenagens e para análise das disposições dos fluxos de água no município.

### 5.2.3 Mapas de potencialidade hídrica de águas subterrâneas

Os mapas elaborados para a interpretação e identificação das áreas com potencialidade hídrica de água subterrânea, consideraram as aplicações de diferentes ferramentas integradas no *software* QGis.

#### 5.2.3.1 Mapa de localização dos poços selecionados

O Mapa de Localização dos poços selecionados foi desenvolvido a partir da base de dados do SIAGAS (CPRM) sobreposto as camadas de depósitos aluvionares e colúvio-eluviais do município de Crateús.

Foram identificados 777 poços perfurados no município, os quais possuem vazões específicas que variam 0,002 a 8,77 m<sup>3</sup>/h/m. Desse total foram selecionados os 15 poços que apresentaram maior vazão específica. A partir dessa seleção optou-se por realizar estudos mais detalhados em duas regiões, diante os poços que revelaram maior expressividade de capacidade específica. O Quadro 2, mostra informações referentes aos 15 poços selecionados na região, com destaque para os poços de maior vazão específica.

Quadro 2 – Informações dos poços selecionados

LOCALIDADE	LOCALIZAÇÃO		DATA DE PERFURAÇÃO	VAZÃO ESPECÍFICA
	LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)		
<b>Feijão</b>	<b>5°03'34.40"</b>	<b>40°46'14.18"</b>	<b>23/11/1998</b>	<b>8,77</b>
<b>Santa Luzia</b>	<b>5°12'13.38"</b>	<b>40°50'36.2"</b>	<b>11/11/1998</b>	<b>6,55</b>
São João	5°03'59.58"	40°31'38.59"	20/04/1976	5,50
Pocinho	5°09'01.75"	40°24'58.66"	01/01/2014	3,08
Queimadas	5°13'52.37"	40°53'17.40"	12/11/1998	3,03
Assentamento Santa Rosa / MST	5°21'41.48"	40°50'27.25"	01/09/2016	2,68
Pastos Bons III	5°07'20.31"	40°37'03.43"	01/01/1980	2,66
Pulga de Leite	5°20'49.05"	40°46'22.19"	01/01/1980	2,57
Lagoa	5°12'58.58"	40°52'07.21"	26/05/2017	1,84
Curralinho	5°07'18.83"	40°48'15.16"	01/01/1981	1,47
Várzea Redonda	5°06'19.24"	40°49'23.01"	22/10/1982	1,40
Ipojuca	5°08'13.02"	40°45'26.16"	14/08/1982	1,21
Tapuio	5°13'48.05"	40°48'51.66"	01/01/1980	1,16
Ibiapaba	5°02'50.02"	40°55'26.14"	01/01/1964	1,09
Quirino	5°06'04.05"	40°45'01.40"	25/10/1999	1,00

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

Como observado no Quadro 2, estes poços estão localizados nos distritos de Poti (Área A) e Tucuns (Área B), nas comunidades de Feijão e Santa Luzia, respectivamente.

Em complemento a definição das áreas selecionadas para estudo mais detalhado, foram observados os dados construtivos dos poços, profundidade, e os valores definidos nos testes de bombeamento: Nível Dinâmico (ND) e Nível Estático (NE), Quadro 3.

Quadro 3 – Dados gerais dos poços selecionados

LOCALIDADE	DADOS CONSTRUTIVOS		TESTE DE BOMBEAMENTO	
	Profundidade (m)	Nível Dinâmico (ND)	Nível Estático (NE)	
<b>Feijão</b>	<b>42,00</b>	<b>8,30</b>	<b>8,00</b>	
<b>Santa Luzia</b>	<b>53,00</b>	<b>7,10</b>	<b>6,00</b>	
São João	50,00	16,30	13,30	
Pocinho	81,00	17,00	14,40	
Queimadas	58,00	20,50	18,00	
Assentamento Santa Rosa / MST	42,00	13,50	5,30	
Pastos Bons III	42,00	19,00	17,00	
Pulga de Leite	60,00	12,20	8,35	
Lagoa	54,00	21,80	9,50	
Curralinho	68,00	18,24	11,90	
Várzea Redonda	30,00	10,00	5,00	
Ipojuca	50,00	15,00	8,40	
Tapuio	50,00	15,88	8,90	
Ibiapaba	60,00	16,00	5,00	
Quirino	78,00	47,00	8,00	

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

A projeção desses dados teve por objetivo identificar e delimitar áreas para estudos sequentes mais aprofundados.

### 5.2.3.2 Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais

Para a produção do Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais foram utilizadas imagens MDE do satélite Alos Palsar (L1.1), tratadas por técnicas de processamento de imagem em ambiente SIG. Foram utilizadas ainda na composição do Mapa, as estruturas definidas pela CPRM, em escala 1:100.000.

Para a análise da área foi aplicado a ferramenta de relevo sombreado (*hillshade*). Esta ferramenta cria uma imagem sombreada usando luz e sombra para proporcionar uma aparência

mais tridimensional do terreno. A iluminação varia conforme a aplicação de ângulos de elevação da fonte de luz a partir do horizonte, que apresentam uma variação de 0 a 90° (ângulo vertical), e azimutes de iluminação, que variam de 0 a 360° (ângulo horizontal).

Dessa forma, foi estabelecido um ângulo de elevação de 45°, e um ângulo de 315° para o azimute de iluminação. Também foi aplicado a camada um nível de exagero vertical de 4 metros.

O processamento e integração desses dados teve por objetivo identificar e demarcar lineamentos que ocorrem nas áreas delimitadas para estudo, de forma a estabelecer uma relação desses lineamentos com a potencialidade hídrica da região e a capacidade produtiva dos poços.

#### 5.2.3.3 Mapas de Interpolação da vazão específica

Os mapas de Interpolação da vazão específica foram produzidos segundo dados digitais SRTM com aplicação da ferramenta de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*). No método IDW os pontos são ponderados durante a interpolação de acordo como a influência de um ponto relativo a outro, e declina com a distância a partir de um ponto desconhecido.

Para a Área A, foi utilizada uma interpolação linear entre cinco pontos, representados pelos poços mais próximos ao poço de maior vazão, uma média 7 km entre cada poço. A interpolação dos dados resultou em uma área de aproximadamente 68 km<sup>2</sup>.

Já na Área B, a interpolação foi executada considerando quatro pontos, partindo do mesmo princípio da interpolação da Área A. Os poços dessa região estão distantes em média 4 km um do outro, perfazendo uma área aproximada de 25 km<sup>2</sup>.

A interpolação desses dados teve por objetivo utilizar valores de vazão específica conhecidos para estimar valores locais desconhecidos. Dessa forma, o produto gerado possibilitou a identificação de zonas com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea.

#### 5.2.3.4 Mapas de Delimitação das Sub-bacias

Para a produção dos mapas de Delimitação das Sub-bacias foram utilizados dados digitais SRTM com aplicação das ferramentas *r.watershed*, para extrair as drenagens a partir de um recorte da área, e *r.water.outlet* para delimitar as bacias hidrográficas a partir das coordenadas do ponto de exutório.

O processamento desses dados teve por objetivo analisar os segmentos de fluxo na área, a extensão das microbacias onde se encontram os poços selecionados, bem como as possíveis zonas de recarga dos aquíferos.

#### **5.2.4 *Trabalho de campo***

Esta etapa da pesquisa consistiu na realização de atividades exploratórias de campo para localizar os dois poços de maior vazão específica apresentados no Quadro 2. Além disso foram realizadas coletas de dados referentes ao nível freático dos poços, identificação de rochas e estruturas geológicas.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados do trabalho e a discussão pertinente aos tópicos desenvolvidos durante todas as fases da pesquisa, considerando-se as metodologias e técnicas aplicadas.

### 6.1.1 *Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos*

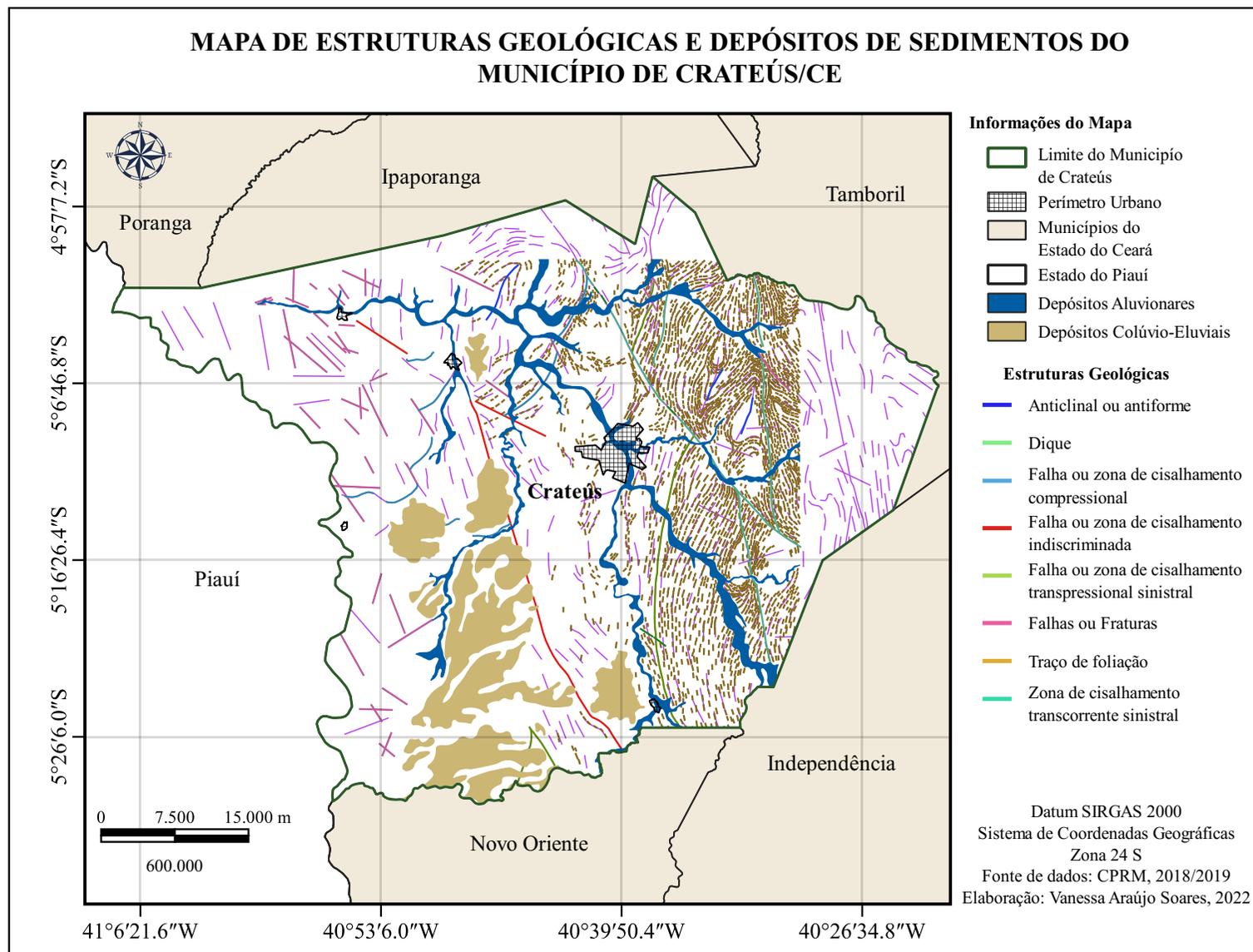
O mapa da Figura 12 mostra a disposição das estruturas geológicas e a distribuição dos depósitos aluvionares e coluvionares presentes no município de Crateús. Verifica-se na Figura 12 que as principais estruturas geológicas identificadas pelos trabalhos de avaliação da CPRM são falhas, dobras e foliações, que estão distribuídas ao longo do território do município.

O posicionamento dos depósitos aluvionares limita-se a bacia hidrográfica do rio Poti e atravessam o município entre o distrito de Santo Antônio a sudeste, cortando a cidade de Crateús e seguindo no sentido noroeste em direção ao Estado do Piauí. Os depósitos colúvio-eluviais concentram-se na porção sudoeste do município, entre os distritos de Tucuns e Santo Antônio.

Considerando que a região é formada quase que inteiramente por rochas do embasamento cristalino (rochas ígneas e metamórficas), a condição de ocorrência de água subterrânea nessa região está condicionada a aquíferos do tipo fissural, em que a circulação da água ocorre através de fraturas, fendas e falhas.

Nos depósitos aluvionares e coluvionares que surgem na margem dos rios e riachos que drenam o município, a ocorrência de água subterrânea está ligada a formação de aquíferos do tipo sedimentares, em que a circulação da água ocorre nos poros formados entre os grãos das rochas (sedimentos arenosos). De modo geral, esse tipo de depósito contribui para percolação de água subterrânea, apresentando uma importância significativa do ponto de vista hidrogeológico, visto que os aquíferos formados nessas regiões podem armazenar grandes volume de água devido a suas características sedimentares (porosidade e permeabilidade), além de ocorrerem em áreas extensas.

Figura 12 – Mapa de Estruturas geológicas e depósitos de sedimentos do Município de Crateús - CE



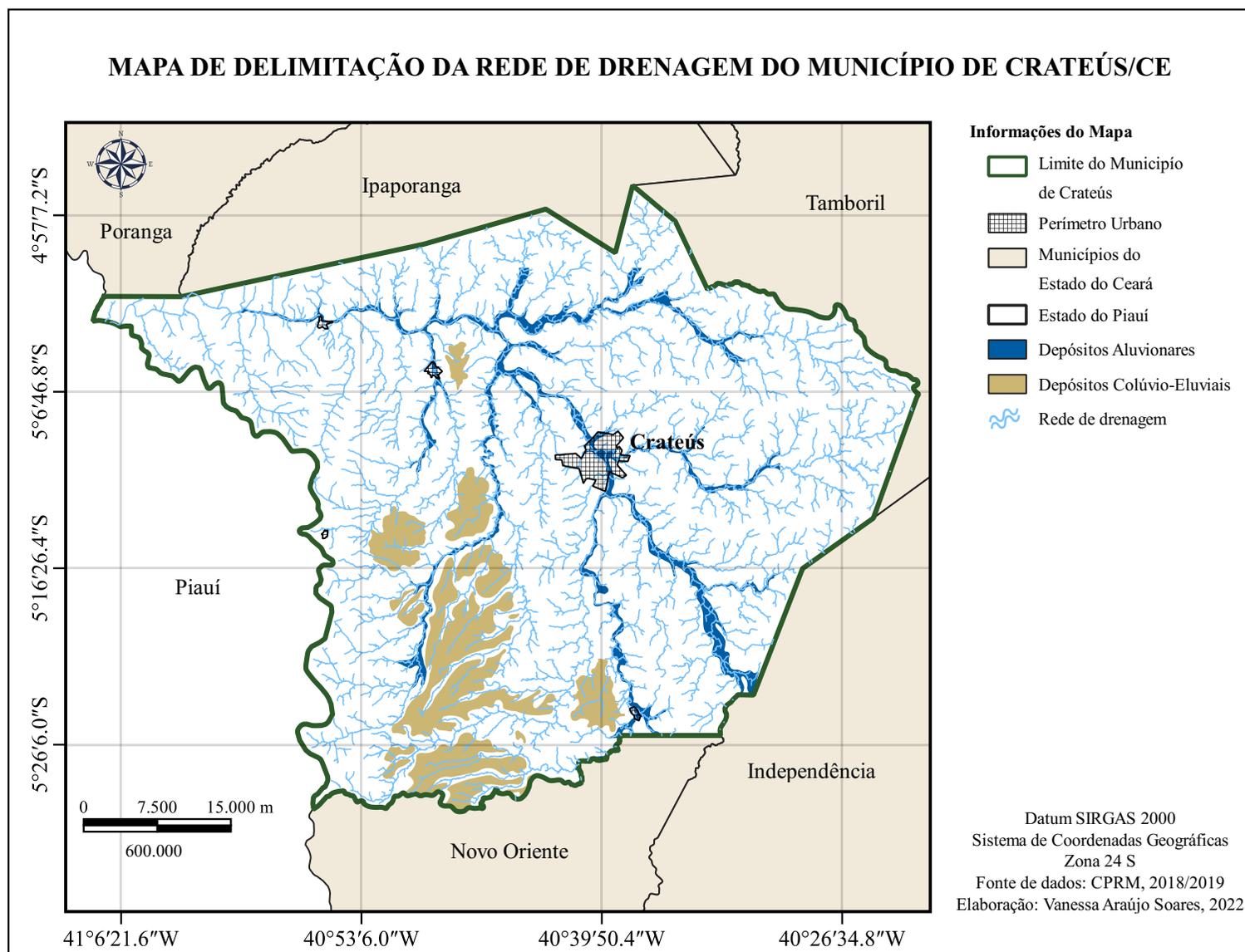
Fonte: Autora, 2022.

### **6.1.2 Mapa da Rede de drenagem**

A partir do Mapa da Rede de drenagem do município de Crateús (Figura 13) foi possível identificar a existência de padrões na maioria dos cursos de água, sendo o padrão dendrítico o dominante. Esse modelo de drenagem sugere a presença de rochas ígneas e metamórficas (embasamento cristalino) ou, ainda, depósitos inconsolidados, contexto este, que ocorre no município, como observado no mapa da Figura 13.

De acordo com FEITOSA *et al.*, 2008, o padrão dendrítico pode ser interpretado, do ponto de vista hidrogeológico, como favorável a ocorrência de água subterrânea, visto que os segmentos de drenagem podem refletir a existência de regiões de menor fraqueza, o que pode corresponder a zonas de descontinuidades geológicas favoráveis a infiltração de água no subsolo, característica que contribui para formação de aquíferos.

Figura 13 – Mapa de Delimitação da rede de drenagem do município de Crateús – CE



Fonte: Autora, 2022.

### **6.1.3 Mapas de potencialidade hídrica de águas subterrâneas**

Para a seleção das áreas com maior potencial para a ocorrência de água subterrânea foram elaborados diferentes mapas temáticos, com o propósito de obter a maior quantidade possível de informações que corroborem para um resultado mais assertivo quando na indicação dessas áreas.

#### **6.1.3.1 Mapa de Localização dos poços selecionados**

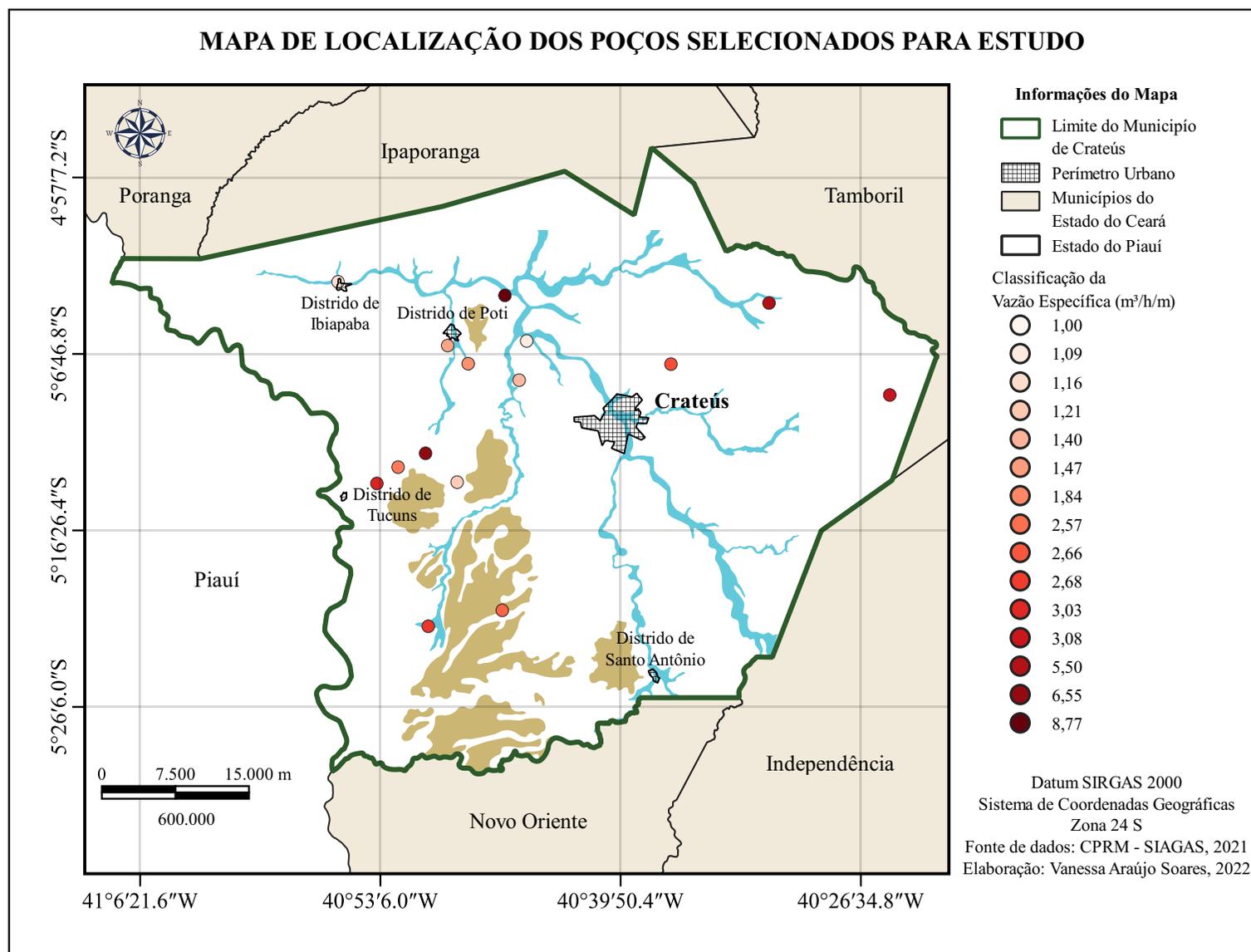
Com base no banco de dados do SIAGAS (Quadro 2), foi elaborado o mapa dos poços selecionados para estudo, Figura 14. Dos poços selecionados, apenas 20% possuem vazão específica superior a 5,00 m<sup>3</sup>/h/m, 40% estão entre 5,00 e 2,00 m<sup>3</sup>/h/m e os demais possuem vazão específica inferior a 2,00 m<sup>3</sup>/h/m.

As profundidades dos poços selecionados variaram entre 30 e 81 metros (Quadro 3), sendo mais comuns poços com profundidades em torno de 50 metros. Os poços selecionados para estudo são em sua maioria, profundos, sendo que estes estão localizados no domínio Cristalino. De modo geral, a permeabilidade média das rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) decresce com a profundidade. Associando esta informação aos dados de vazão específica, o que pode argumentar-se é que os poços são perfurados até alcançar vazões satisfatórias.

Os dados do Quadro 3, mostram que o nível estático de 67% dos poços possui profundidade inferior a 9 metros e os 33% restantes entre 9 e 18 metros. O nível dinâmico apresenta valores muito variados, atingindo profundidades acima de 40 m, com predomínio para profundidades acima de 10 m. Quando distribuído na área, apresenta valores próximos ao nível estático. Considerando que o nível dinâmico é medido no equilíbrio, quando a vazão de bombeamento se iguala à capacidade de recarga do aquífero, isso pode justificar os valores do nível estático que se localizam no domínio cristalino, onde, a transmissividade, bem como a permeabilidade são menores que nos terrenos sedimentares.

Considerando estas informações, as áreas que se mostraram mais propícias a ocorrência de água subterrânea, objeto de estudo mais detalhado, estão localizadas nos distritos de Tucuns e Poti.

Figura 14 – Mapa de Localização dos poços selecionados para estudo



Fonte: Autora, 2022.

### 6.1.3.2 Mapa de Identificação e extração de lineamentos estruturais

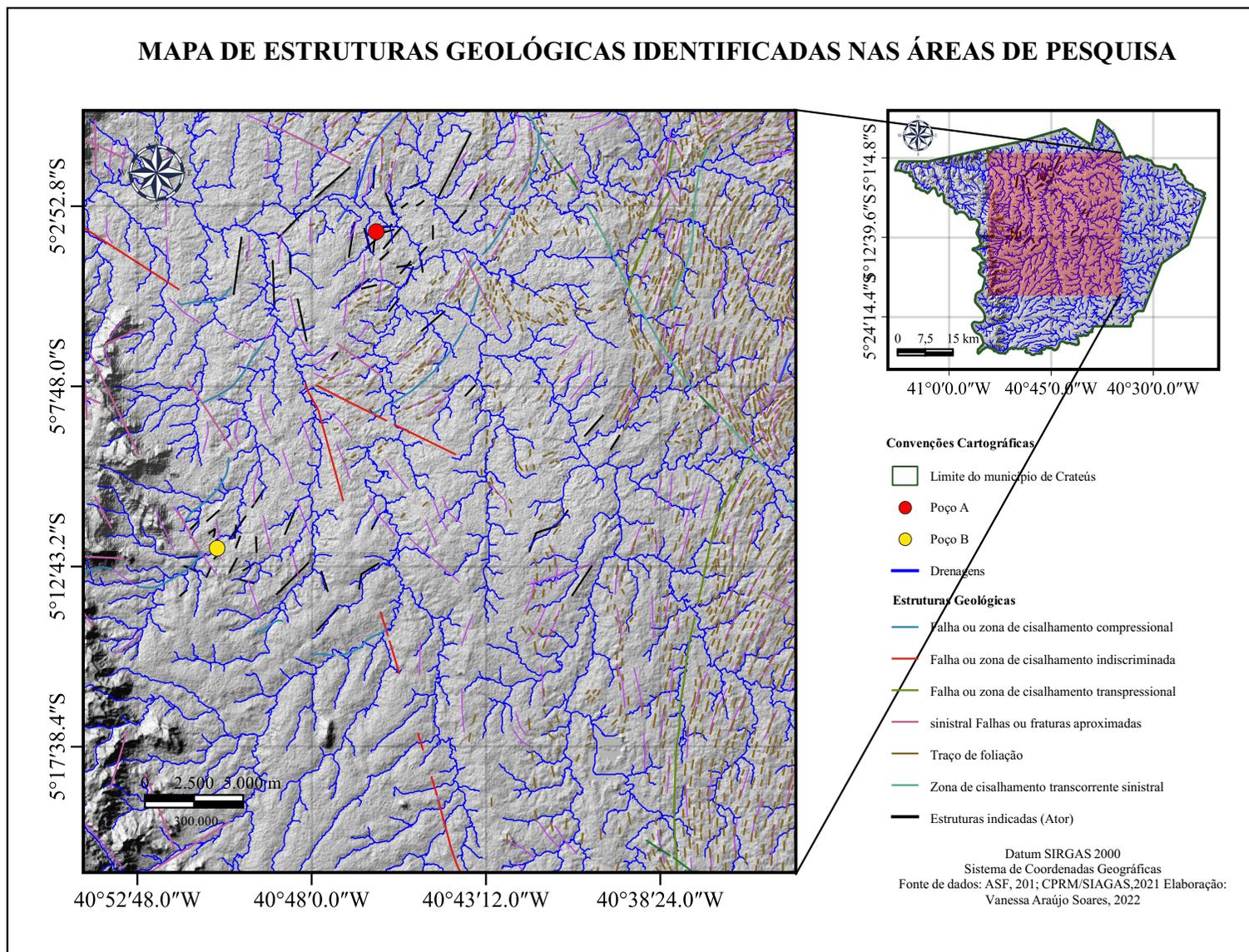
As fraturas geológicas, os lineamentos estruturais e as redes de drenagens, são dentre outros, fatores determinantes para obtenção de poços produtivos. Partindo desta premissa, foi elaborado o mapa de identificação e extração de lineamentos estruturais (Figura 15). Verifica-se no mapa a localização dos poços selecionados para estudo, conforme o Quadro 2, sobrepostos aos lineamentos extraídos a partir relevo sombreado de imagem MDE e também sobre a geologia estrutural marcada pela CPRM.

A interpretação do Mapa gerado permitiu uma melhor visualização das estruturas geológicas existentes ao longo das drenagens presentes nas áreas de interesse. As estruturas demarcadas pela CPRM que se localizam próximas aos poços em estudo, são consideradas lineamentos estruturais, falhas ou fraturas. Essas feições podem conferir a região um bom potencial hidrológico, visto que essas propriedades aumentam a porosidade e a permeabilidade da rocha, conseqüentemente, permitindo a circulação e acúmulo de água.

As estruturas identificadas com o processamento do MDE do Alos Palsar na Figura 15, ocorrem, predominantemente, no sentido NE-SO, variando de NO-SE a N-S. No entanto, estes lineamentos não foram comprovados em campo, observando-se apenas as foliações de alguns afloramentos encontrados.

O que se pode inferir é que as altas vazões específicas apresentadas, podem ter correlação com as foliações, falhas e fraturas das rochas próximas aos poços. Segundo FEITOSA *et al.*, 2008, a configuração estrutura-hidrografia desempenha o mais importante papel na problemática de águas no cristalino, pois as associações das zonas de fraturamento com a drenagem superficial, propicia as condições necessárias a infiltração e acumulação de água nas fissuras do maciço rochoso.

Figura 15 - Lineamentos extraídos a partir do relevo sombreado (hillshade) de imagem MDE



Fonte: Autora, 2022.

### 6.1.3.3 Mapas de Interpolação da vazão específica

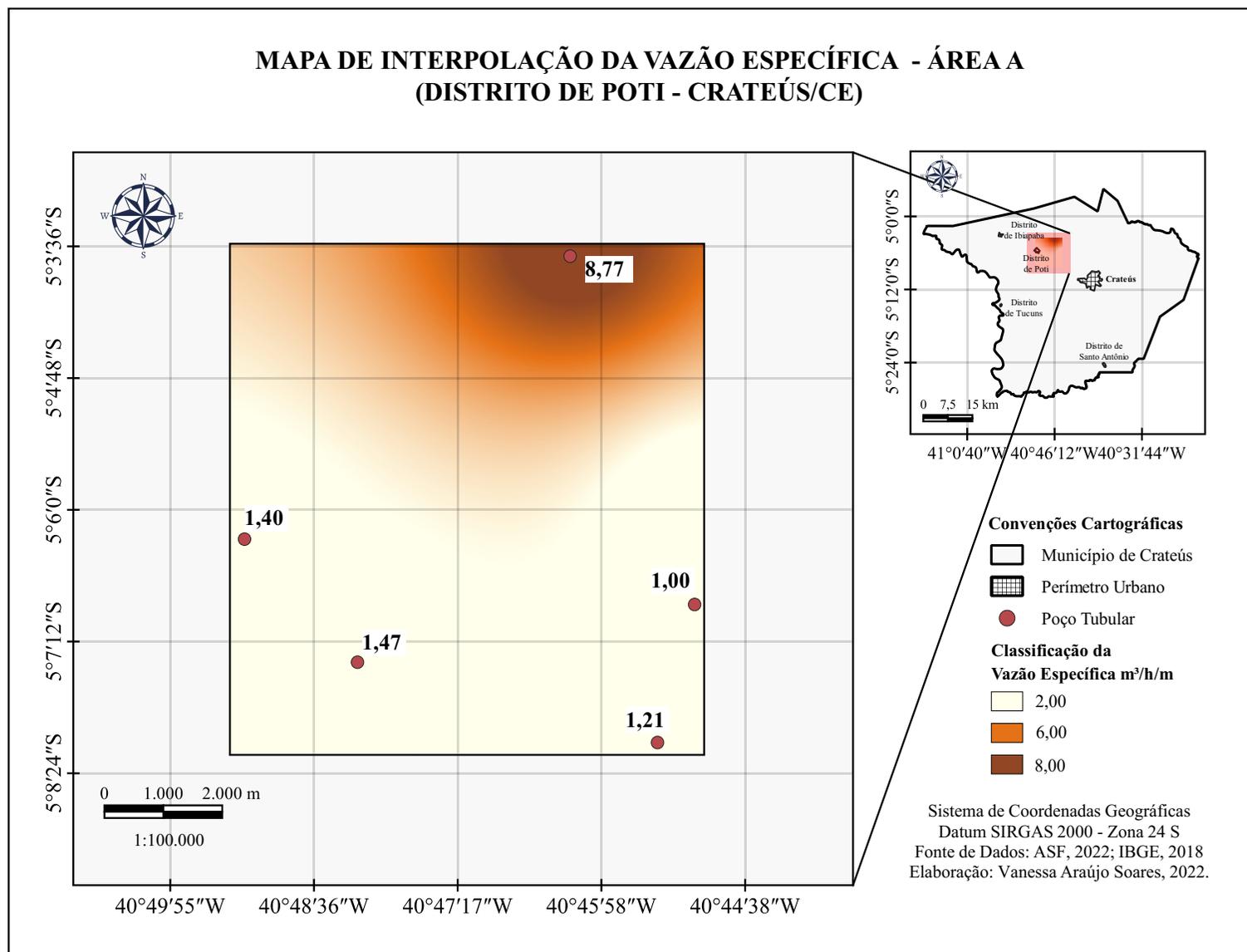
Definidas as áreas para detalhamento, elaborou-se os mapas de interpolação da vazão específica dos poços Figuras 16 e 17. A interpolação dos dados, permitiu verificar a representatividade das vazões nas áreas delimitadas, sendo possível observar onde estão localizados os menores e os maiores valores de vazões.

O Mapa de Interpolação da vazão específica para a Área A (Figura 16) apresenta uma distribuição dispersa, onde o valor de maior representatividade de vazão específica é 8,77 m<sup>3</sup>/h/m sendo os demais valores abaixo de 1,5 m<sup>3</sup>/h/m. Essa variação no volume das vazões corrobora para uma maior expressividade do poço com maior vazão, indicando uma tendência de disponibilidade de exploração de água subterrânea no setor Nordeste da região. No entanto, não se pode afirmar que poços perfurados nessa área apresentem o mesmo valor, ou valores próximos a este, mas o que se pode inferir é que, esta área é mais propícia, na região, a perfuração de poços.

O Mapa de Interpolação da vazão específica para a Área B (Figura 17) indica uma distribuição menos dispersa em comparação a área anterior, apresentando valores expressivos de vazão específica, destacando-se as vazões de 6,55 m<sup>3</sup>/h/m e 3,028 m<sup>3</sup>/h/m. Esses valores de maior volume sugerem áreas mais amplas de favorabilidade para ocorrência de água subterrânea na região delimitada. No caso dessa região, há uma tendência de disponibilidade de exploração nos setores Nordeste e Sudeste, devido exatamente a proximidade com os poços de maior vazão.

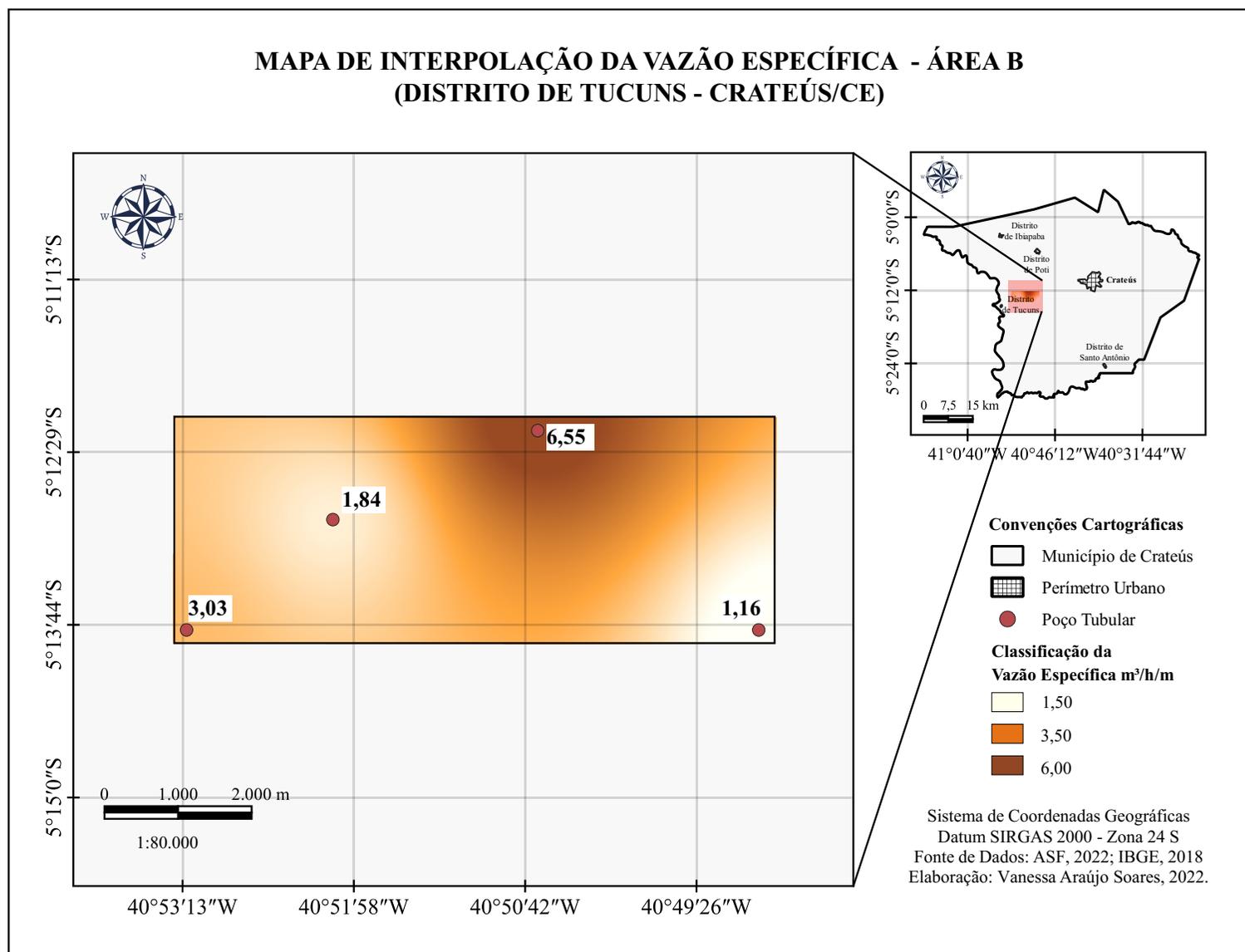
Como os dados interpolados apresentaram valores variáveis, não se deve afirmar que toda área interpolada constitui representatividade expressiva para exploração de água subterrânea, sendo necessário a realização de estudos mais detalhados da subsuperfície por meio de técnicas de geofísica, como o GPR (*Ground Penetrating Radar*) e a eletrorresistividade.

Figura 16 - Mapa de interpolação da vazão específica - Área A (Distrito de Poti)



Fonte: Autora, 2022.

Figura 17 - Mapa de interpolação da vazão específica - Área B (Distrito de Tucuns)



Fonte: Autora, 2022.

#### 6.1.3.4 Mapas de Delimitação das Sub-bacias

Em complemento as informações obtidas com a composição dos mapas de interpolação, foi elaborado mapas de delimitação das sub-bacias hidrográficas para os poços de maior vazão específica.

O mapa da Figura 18, representa a microbacia do poço localizado na Área A. É possível observar no mapa que o exutório da microbacia é representado por um único fluxo de drenagem, ordenado por um caminho curto que alimenta a zona de recarga do aquífero. A área que representa a sub-bacia possui pouca declividade, condição que contribui para intensificar a capacidade de infiltração da água no solo o que resultou em uma maior vazão específica do poço A.

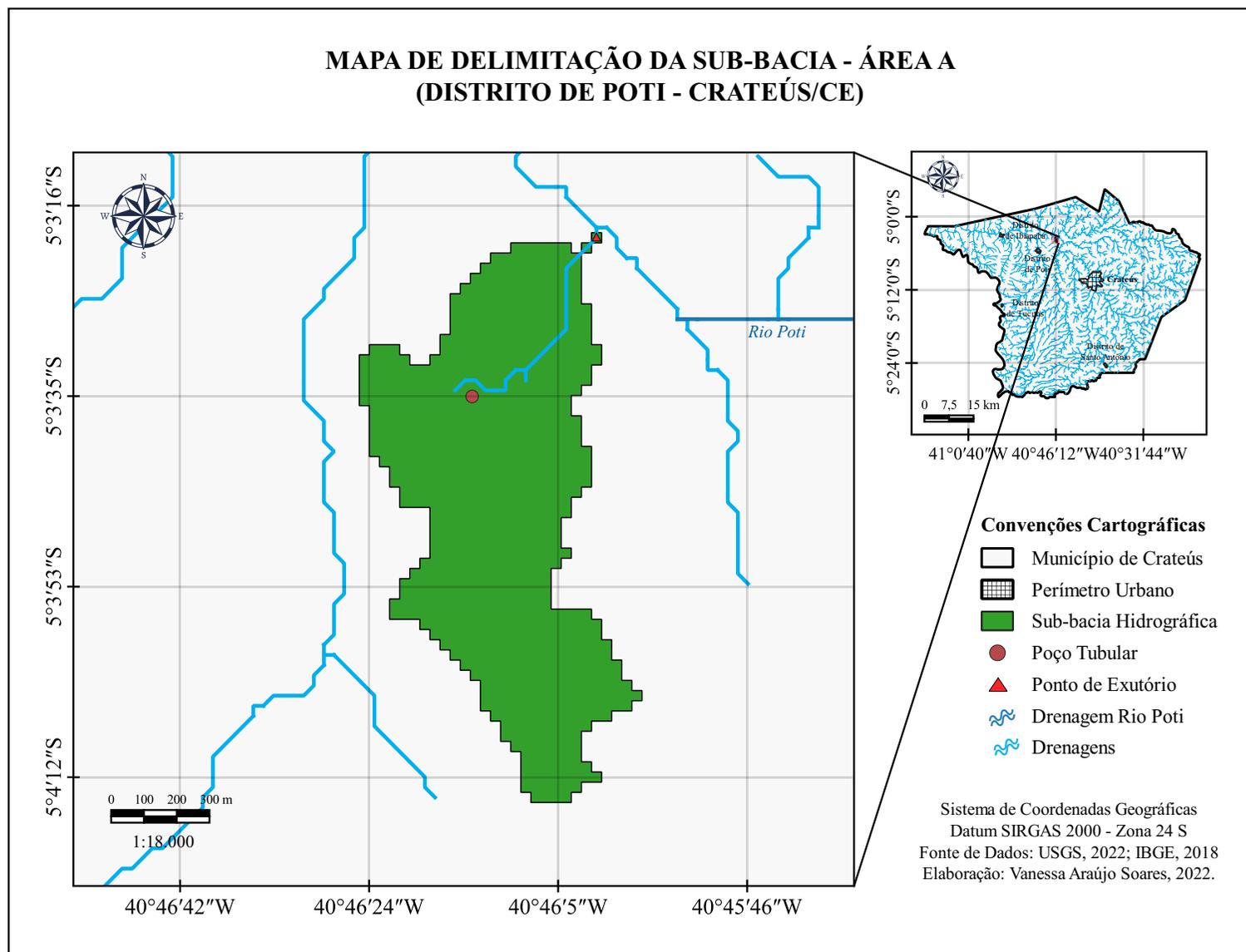
A área da sub-bacia da Figura 18 mede cerca de 0,8 km<sup>2</sup> e em virtude das características topográficas, sugere-se que essa região é muito favorável para a ocorrência de água subterrânea, o que pode ser justificado pelo fato de que o poço perfurado nessa área se encontra confinado na microbacia, a qual apresenta um fluxo de drenagem relativamente pequeno e uma boa vazão. Assim, parte da zona de recarga do aquífero está concentrada nessa região, favorecendo desta forma a potencialidade hídrica do local. Outro fator considerável é a formação da microbacia próxima à zona de drenagem do rio Poti, o que favorece ainda mais a ocorrência de água subterrânea.

A sub-bacia delimitada para a Área B (Figura 19), é expressivamente maior, ocupa uma área de 47,62 km<sup>2</sup>. Observa-se que os poços confinados nessa sub-bacia estão próximos aos fluxos de drenagem, como toda água contida na bacia tende a convergir para estas drenagens, sugere-se que está é uma área de grande potencialidade para exploração de água subterrânea.

Considerando que a sub-bacia representada na Figura 19 apresenta uma significativa área de captação de água, um intenso fluxo de drenagens e que os poços locados nessa área são reconhecidos por apresentarem uma boa capacidade específica, é perceptível que há um potencial hídrico maior próximo aos cursos de água.

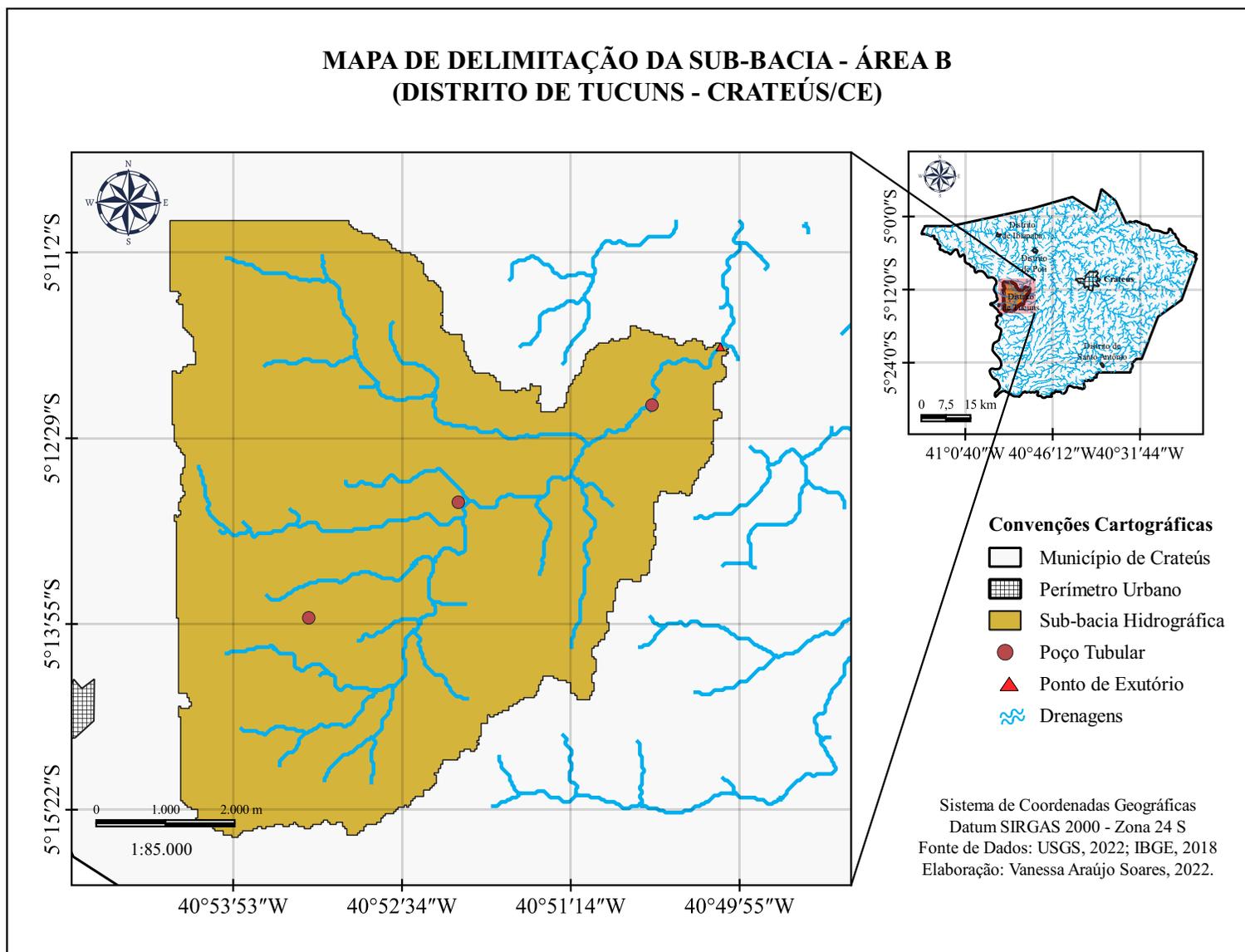
Com base no conhecimento prévio das características das Áreas A e B, pode-se sugerir que o critério mais importante para se determinar um local para perfuração de poços é dentro, ou o mais próximo possível dos fluxos de drenagem, evidente que a potencialidade do poço vai depender de outros parâmetros e até mesmo de estudos mais precisos, como geofísica (GPR e eletrorresistividade), mas de fato, se os poços forem perfurados próximos às linhas de drenagem a probabilidade de sucesso da potencialidade hídrica do poço aumenta consideravelmente.

Figura 18 – Mapa de Delimitação da Sub-bacia - Área A (Distrito de Poti)



Fonte: Autora, 2022.

Figura 19 – Mapa de Delimitação da Sub-bacia - Área B (Distrito de Tucuns)



Fonte: Autora, 2022.

### **6.1.4 Trabalho de campo**

A atividade exploratória de campo foi realizada em novembro de 2021, ocorrendo no decorrer de um dia. Na ocasião foi possível verificar as características das Áreas A e B, bem como realizar coletas de dados referentes ao nível freático dos poços, identificação de rochas e estruturas geológicas.

#### **6.1.4.1 Poço A: Localidade de Feijão**

O Poço A está localizado no Distrito de Poti, localidade de Feijão, distante aproximadamente 24 km da sede do município de Crateús, porção noroeste do município. O poço foi construído pela PHD - GEOTECNICA E CONST. LTDA em novembro de 1998, possui profundidade útil de 42 m, e vazão específica de 8,77 m<sup>3</sup>/h/m. O formato é tubular com bomba submersa, e tem no seu uso o abastecimento múltiplo (Figura 20) (CEARÁ, 2021).

Figura 20 – Poço A – Localidade de Feijão



Fonte: Autora, 2021.

Trata-se de um aquífero fissural, inserido na Sub-bacia do rio Parnaíba. O poço encontra-se em um terreno plano, pouco acidentado, em um ambiente colúvio- aluvionar e localiza-se cerca de 450 m da drenagem do rio Poti. A proximidade com o rio, a topografia plana e a espessa camada de sedimentos, são fatores que corroboraram para um elevado potencial de recarga do aquífero que abastece o poço. Em consulta realizada a moradores do entorno, foi relatado que o poço sempre supriu a demanda por água na região.

Todavia a água captada pelo poço é imprópria para consumo humano, chamada água salobra, em consequência da alta concentração de sais, utilizada somente para fins domésticos, dessedentação animal e agricultura. No referido poço, foi utilizado por muito tempo um dessalinizador (Figuras 21 e 22), com o intuito de reduzir a salinidade da água e torná-la potável, porém nos últimos anos substituiu-se esse equipamento pelo Programa de Abastecimento de Água Potável no Semiárido Nordestino, Operação Carro-Pipa, do Exército Brasileiro que abastece as comunidades locais com água própria para consumo humano.

Figura 21 – Casa do sistema de dessalinização da comunidade de Feijão



Fonte: Autora, 2021.

Figura 22 – Dessalinizador na comunidade de Feijão



Fonte: Autora, 2021.

A descrição litológica do poço apresentada no banco de dados da CPRM, é composta por rocha cristalina (não identificada) e rocha sã de composição granítica (Quadro 4). Observou-se que a área não expõe muitas rochas aflorantes, sendo principalmente caracterizada por camadas espessas de sedimentos, com predominante ocorrência de depósitos colúvios-elúvios (Figura 23).

Quadro 4 – Perfil Litológico do Poço A

<b>Dados Litológicos</b>			
<b>De (m)</b>	<b>Até (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>Descrição Litológica</b>
0	8	Rocha Cristalina não identificada	Rocha alterada
8	42	Granito	Rocha sã de composição granítica.

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

Figura 23 – Adjacência da área onde se encontra o Poço A



Fonte: Autora, 2021.

Ainda assim, foi identificado um afloramento a uma distância aproximada de 250 metros do local do poço, localizado pelas coordenadas geográficas  $5^{\circ} 3'29.12''S$  e  $40^{\circ}46'4.18''W$  (Figuras 24 e 25). Trata-se de uma rocha, tipo xisto alterado, bem fraturada (Figura 26), o que pode contribuir para a recarga do aquífero em questão, visto que as condições de fraqueza da rocha favorecem o fraturamento da mesma e com isso pode ocorrer maior infiltração, circulação e armazenamento de água.

Figura 24 – Afloramento próximo à área onde se encontra o Poço A



Fonte: Autora, 2021.

Figura 25 – Detalhe do afloramento próximo ao local onde se encontra o Poço A



Fonte: Autora, 2021.

Figura 26 – Rocha aflorante tipo xisto



Fonte: Autora, 2021.

Em função da falta de equipamentos não foi possível verificar a vazão do poço, dado que também não consta no relatório do SIAGAS, sendo averiguado somente o Nível Estático do mesmo (Figura 27). Embora o poço esteja em operação a mais de 20 anos, o nível estático, verificado em campo, ainda é o mesmo de quando o poço foi perfurado, 8 metros (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados do teste de bombeamento - Poço A

<b>Teste de Bombeamento Poço A1- SIAGAS (CPRM)</b>	
Data do Teste	20/11/1998
Profundidade	42,00 m
Nível Dinâmico (ND)	8,30 m
Nível Estático (NE)	8,00 m

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

Figura 27 – Verificação do nível freático do Poço A



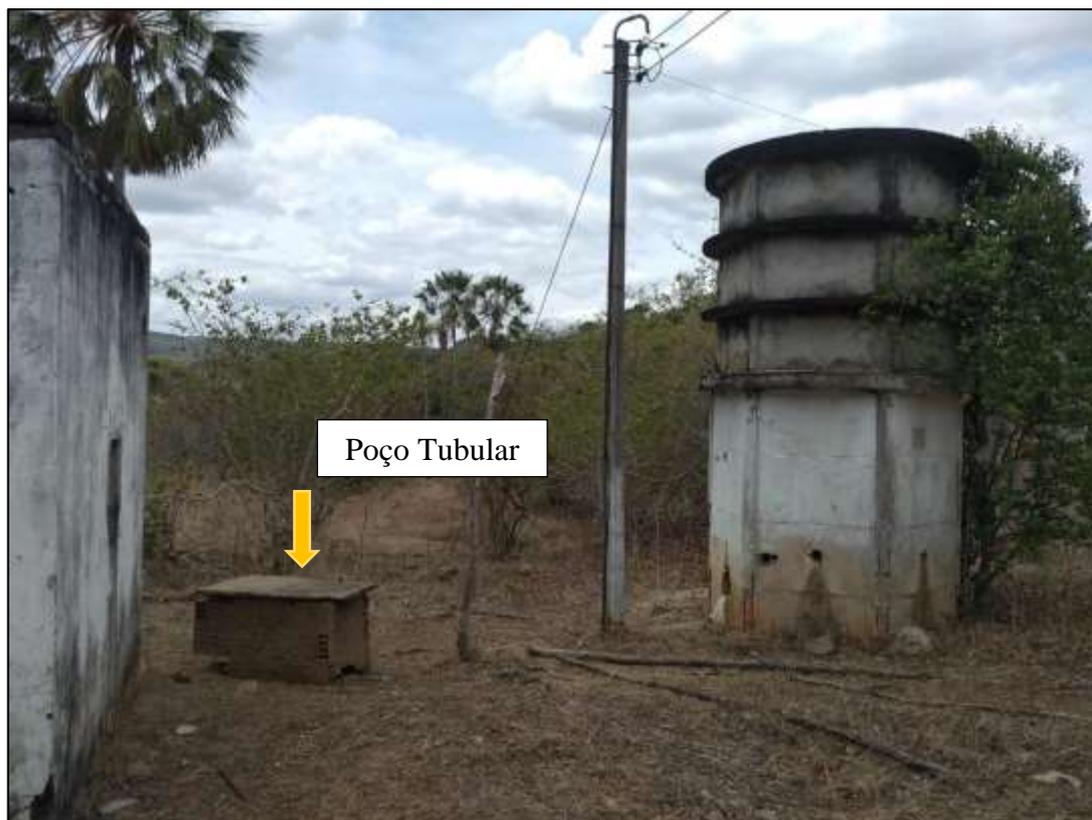
Fonte: Autora, 2021.

Considerando todas as informações levantadas e as características litológicas da região, pode-se inferir ser uma área com elevado potencial para perfuração de poços.

#### *6.1.4.2 Poço B: Localidade de Santa Luzia*

O poço B está localizada no Distrito de Tucuns, localidade de Santa Luzia, distante aproximadamente 22 km da sede do município de Crateús, porção sudeste do município. Assim como o Poço A, foi construído pela PHD - GEOTECNICA E CONST. LTDA em novembro de 1998, possui profundidade útil de 53 m, e vazão específica de 6,55 m<sup>3</sup>/h/m e vazão após estabilização de 7,2 m<sup>3</sup>/h. O formato do poço é tubular com bomba submersa, e também tem no seu uso o abastecimento múltiplo, Figura 28 (CEARÁ, 2021).

Figura 28 – Poço B – Localidade de Santa Luzia



Fonte: Autora, 2021.

O aquífero da área também é do tipo fissural, igualmente inserido na Sub-bacia do rio Parnaíba. O poço encontra-se em um terreno que apresenta uma topografia alta e zonas colúvio-elúvio (Figura 29). Assim como no Poço A, este se encontra próximo à drenagem do rio que atravessa a comunidade, em uma distância aproximada de 80 metros. A água também possui características salinas sendo utilizada para dessedentação animal e agricultura.

Figura 29 – Entorno da área do Poço B



Fonte: Autora, 2021.

Segundo a descrição da CPRM, a litologia do poço, é composta por rocha cristalina (não identificada) e rocha sã de composição granítica (Quadro 5). Observou-se na área rochas aflorantes e um relevo acidentado, representado pela Serra dos Tucuns.

Quadro 5 – Perfil Litológico do Poço B

<b>Dados Litológicos</b>			
<b>De (m)</b>	<b>Até (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>Descrição Litológica</b>
0	8	Rocha Cristalina não identificada	Rocha alterada
8	53	Granito	Rocha sã de composição granítica.

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

Foi identificado um afloramento a uma distância aproximada de 30 m do local do poço, localizado pelas coordenadas geográficas 5°12'13.83"S e 40°50'35.90"W. Trata-se de uma rocha metamórfica (mármore), que se encontra densamente fraturada (Figura 30). Tais

fraturas podem além de armazenar água, facilitar a dissolução da rocha, ampliando a formação do aquífero e contribuir para sua recarga. Além disso, o mármore, em geral, atua como uma unidade selante para a formação de aquíferos, sendo uma boa indicação de áreas propícias a perfuração de poços.

Figura 30 – Afloramento próximo à área do Poço B



Fonte: Autora, 2021.

Da mesma maneira que no poço anterior, não foi possível verificar a vazão em razão da ausência de equipamentos adequados, dados que também não consta no relatório do perfil construtivo do poço disponibilizado no site da CPRM (SIAGAS). Dessa forma, verificou-se apenas o nível freático do mesmo (Figura 31). Igualmente ao Poço A, é um poço que opera a mais de 20 anos, contudo ainda apresenta o mesmo nível estático indicado pela CPRM, 6,0 metros (Tabela 2), o que pode ser justificado pelas características litológicas da área.

Tabela 2 – Dados do teste de bombeamento - Poço B

<b>Teste de Bombeamento Poço A1- SIAGAS (CPRM)</b>	
Data do Teste	17/11/1998
Profundidade	53,00 m
Nível Dinâmico (ND)	7,10 m
Nível Estático (NE)	6,00 m

Fonte: CPRM/SIAGAS, 2021.

Figura 31 – Verificação do nível freático do Poço B



Fonte: Autora, 2021.

Com base nessas informações pode-se inferir ser uma área que também apresenta condições propícias para perfuração de poços, considerando que o poço em questão permanece em funcionamento há muito tempo e segundo informações dos moradores, ainda apresenta uma boa vazão. A área também é propícia a perfuração de poços em função da proximidade da vazão do rio e por ser uma região com presença de depósitos colúvios-elúvios. O perfil do afloramento também pode ser colocado como fator positivo para indicar o potencial hidrogeológico do local, dado que rochas como o mármore propiciam a ocorrência de aquíferos com um sistema de elevada heterogeneidade e anisotropia, apresentando porosidade e permeabilidade secundária, contribuindo para a formação de aquíferos com melhores vazões.

## 7 CONCLUSÃO

O mapa de estruturas geológicas e depósitos de sedimentos, que mostraram a disposição das estruturas geológicas e a distribuição dos depósitos aluvionares e colúvio-eluviais presentes no município, sugeriram que as áreas com maior potencialidade hídrica subterrânea estão localizadas próximas ou contidas nesses depósitos, visto que suas características, porosidade e permeabilidade, contribuem para percolação de água subterrânea.

Com base no mapa da rede de drenagem, foi possível a interpretação, dos padrões de drenagem que ocorrem no município, o qual possibilitou identificar a ocorrência predominante do padrão de drenagem do tipo dendrítico. Esse modelo pode indicar regiões de que apresentam zonas de descontinuidades geológicas, fator que favorece a ocorrência de aquíferos.

O mapa de localização dos poços selecionados possibilitou identificar a posição geográfica dos poços perfurados no município. Dessa forma, considerando os valores de vazão específica foi conhecida as áreas onde estão situados os dois poços que apresentaram maior capacidade específica. Estas áreas estão situadas nos distritos de Poti e Tucuns, nas comunidades de Feijão e Santa Luzia, respectivamente.

O mapa de identificação e extração de lineamentos permitiu verificar as estruturas geológicas presentes nas áreas de interesse, no entanto, os lineamentos marcados a partir do relevo sombreado de imagem MDE, não foram identificados em campo. Em vista disso o que se pode inferir é que as elevadas vazões específicas apresentadas pelos poços nessas áreas, podem ter correlação com as foliações, falhas e fraturas das rochas próximas.

Os mapas de interpolação dos poços de maior vazão específica possibilitaram a identificação de regiões com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea. Entretanto, não se pode afirmar que toda a área interpolada apresenta potencial para exploração, uma vez que os dados interpolados são variáveis, sendo necessário a realização de estudos mais detalhados da subsuperfície através de técnicas de geofísica, como o GPR (*Ground Penetrating Radar*) e a eletrorresistividade.

Com os mapas de delimitação das sub-bacias foi possível analisar os segmentos de fluxo na área, a extensão das sub-bacias onde se encontram os poços selecionados, bem como as possíveis zonas de recarga dos aquíferos. Baseado nessa análise, sugere-se que a perfuração dos poços seja realizada o mais próximo possível das linhas de drenagem, o que poderá aumentar a probabilidade de sucesso da potencialidade hídrica do poço.

Os trabalhos de campo permitiram localizar os poços A e B de maior vazão específica, previamente, demarcados para detalhe. O poço A, localizado em um terreno plano, sobre uma camada de sedimentos do tipo colúvio- aluvionar no distrito de Tucuns foi perfurado há mais de 23 anos e registrou o mesmo nível freático da época em que foi perfurado, 8 metros. O poço B, também perfurado há mais de 23 anos localiza-se em um terreno inclinado no distrito de Santa Luzia e registrou o mesmo nível freático da época em que foi perfurado, 6 metros. As rochas identificadas nas localidades dos poços A e B foram xisto alterado e mármore, respectivamente.

Considerando as características das áreas em estudo, pode-se concluir serem áreas que apresentam elevado potencial hidrogeológico para a perfuração de novos poços.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Robério Boto de; VERÍSSIMO, Liano Silva; OLIVEIRA, Leanize Teixeira; GALVÃO, Manoel Júlio da T. G.; FEITOSA, Fernando A. C. **Pesquisa hidrogeológica em bacias sedimentares no Nordeste Brasileiro**. In: Anais, XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços., 2010, São Paulo. p. 1-19.
- ALMEIDA, Fabiano Costa de.; FERREIRA, Daniel Assumpção Costa. **Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicado a Recursos Hídricos**. ANA, 2016.
- ARAUJO FILHO, J. C. de. **Relação solo e paisagem no Bioma Caatinga**. Recife: EMBRAPA, 2011.
- ARAUJO. Carlos Eduardo de.; Cordani Umberto G.; Weinberg R.F.; Basei M.A.S.; Armstrong R., Sato K. 2014. **Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites**. Lithos 202-203 :167-189
- ASF. *Alaska Satellite Facility*. Conjunto de dados Alos Palsar. Instituto Geofísico da Universidade do Alasca Fairbanks, 2015. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/>. Acesso em: 01 outubro. 2021.
- BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BRASIL. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. **A questão da Água no Nordeste**. Brasília: CGEE, 2012. 436p.
- BRASIL. Centro De Gestão e Estudos Estratégicos. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília: CGEE, 2016. 252p.
- BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, 201?. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Geração de Imagens**. Coordenação geral de observação da Terra. INPE, 2017.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geológico e de recurso minerais do estado do Ceará**. CPRM, 2020.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Crateús**. Fortaleza: CPRM, 1998.
- CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Calendário de Chuvas**. Fortaleza: FUNCEME, 2020. Disponível em: <http://funceme.br/app-calendario/postos>. Acesso em: 03 jun. 2021.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em Números**. Fortaleza: IPECE, 2011. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br>. Acesso em: 20 jun. 2021.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Caracterização Territorial**. Fortaleza: IPECE, 2007. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br>. Acesso em: 10 jun. 2021.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **A influência do clima no desempenho da economia cearense**. Fortaleza: IPECE, 2009. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br>. Acesso em: 06 jun. 2021.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil básico municipal: Crateús**. Fortaleza: IPECE, 2017. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/perfil-municipal-2017/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos, Coordenadoria de Gestão dos Recursos Hídricos. **Outorga e Licença de Obras Hídricas; Manual de procedimentos**. Fortaleza, 2008.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre, 2013. 332p.

COSTA, Felipe Grandjean da. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Crateús - SB.24-V-C-III**: estado do Ceará e Piauí. Escala 1:100.000. Fortaleza: CPRM, 2017.

CPRM. Base de dados de poços. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. SIAGAS, 2021. Disponível em: <https://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 20 jun. 2021.

DA SILVA, F. J. A.; ARAUJO, A. L. de.; SOUSA, R. O. de. **Águas Subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade**. Revista Tecnologia. Fortaleza, v. 28, n 2, p.136-159, dez, 2007.

GÓES, A.M.O.; SOUZA, J.M.P.; TEIXEIRA, L.B. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. **Boletim Geociências Petrobras**, v. 4, p. 55-64, 1990.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA Solos, 2018.

FEITOSA, Fernando. A. C.; FILHO, João Manuel.; FEITOSA, Edilton Carneiro.; DEMETRIO; J. Geilson. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. 812p.

FEITOSA, Fernando. A. C. Aspectos sobre água subterrânea em terrenos cristalinos de região semiárida brasileira. *In: Anais do II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*. 2011.

FILHO, E. F. R.; HINDI, E. C.; ROSTIROLLA, S. P.; FERREIRA, F. J. F.; BITTENCOURT, A. V. L. **Sistema aquífero guarani – considerações preliminares sobre a influência do arco de ponta grossa no fluxo das águas subterrâneas**. UFPR, 2003.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação ao sensoriamento remoto**. Oficina de Textos: São Paulo, 101p. 2007.

FREEZE, Allan. R; CHERRY, John A. **Água Subterrânea**. São Paulo, 2017. 698p.

FREITAS, Marcos Alexandre de. **Avaliação do potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de sensoriamento remoto**. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**.

Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/crateus.html>. Acesso em: 01 jun. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geografia do Brasil**. Vol. 2. Rio de Janeiro, 1977. 468p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Macrozoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio Parnaíba/primeira divisão de geociências do Nordeste**. In: RIVAS, M. P. (coordenadora). Rio de Janeiro: IBGE, 1996.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

MENESES, Paulo Roberto.; ALMEIDA, Tati de. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, 2012.

MONTE, A. M. de S. **A planície fluvial do rio Poti nos municípios de Novo Oriente e Crateús – CE: os barramentos e suas repercussões socioambientais**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2014.

MOURA, S. B. de M.; GALVINCIO, J. D.; BRITO, L. T. de L.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. **Clima e Água de Chuva no semiárido**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgar Blucher: 2010.

NOVO, E. M. L.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. São Paulo: São José dos Campos, 2001.

PEREIRA, Jaildo Santos. **A problemática dos recursos hídricos em algumas bacias hidrográficas brasileiras**. 1999. 26 f. Monografia (Doutorado em Engenharia de recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

PEREIRA, Lidiane Cândido. **Uso e conservação de nascentes em assentamentos rurais**. 2012. 187 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

PESSOA, M. D.; MENTE, A.; LEAL, O. **Províncias hidrogeológicas adotadas para o mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000**. Recife: CPRM, 1980.

PINHEIRO, Antônio Flavio Costa.; PINHO, Emmanuel Arruda. **Mapeamento geológico e as águas subterrâneas em São João do Jaguaribe – Ceará**. 2013. 37 f. Proposta de Projeto para Relatório de Graduação – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2013.

PORTO, Rubem La Laina; FILHO, Kamel Zahed; MARCELLINE; Silvana Susko. **Escoamento Superficial**. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SÁ, Emanuel Ferraz Jardim de. **Faturamento no embasamento cristalino do Nordeste do Brasil**: cronologia da formação frágil, reativação neotectônica e implicações hidrogeológicas. In: 1ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater. 2000. p.1-14.

SENA, Liana Mara Mendes de. **Conheça e Conserve a caatinga - O bioma caatinga**. Fortaleza. Vol. 1. 54p. 2011.

SERAPHIM, A. P. A. C. C. **Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas à urbanização**: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Lago Paranoá – DF. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. Brasília, 2018.

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; FAIRCHILD, Thomas R.; TAIOLI, Fabio. **Decifrando a Terra**. [S.l: s.n.], 2000.

TULLIO, Leonardo. **Formação, classificação e cartografia dos solos**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.

VIEIRA, V.P.P.B.; GONDIM FILHO, J.G.C. Água doce no Semiárido. In: REBOUÇAS, A. DA C. *et al.* (org.). **Águas doces no Brasil**. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

USGS. Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). **Conjunto de dados SRTM**. Disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 outubro. 2021.