

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

WILMER EMILIO GARCÍA MORENO

**AVALIAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA, GEOFÍSICA E GEOLÓGICA DO AQUÍFERO GUARANI  
NA REGIÃO CENTRAL E OCIDENTAL NO RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre  
2020

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



**AVALIAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA, GEOFÍSICA E GEOLÓGICA DO  
AQUÍFERO GUARANI NA REGIÃO CENTRAL E OCIDENTAL NO RIO  
GRANDE DO SUL**

**WILMER EMILIO GARCÍA MORENO**  
ENGENHEIRO GEOFÍSICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Março, 2020**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE

**AVALIAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA, GEOFÍSICA E GEOLÓGICA DO  
AQUÍFERO GUARANI NA REGIÃO CENTRAL E OCIDENTAL NO RIO  
GRANDE DO SUL**

**WILMER EMILIO GARCÍA MORENO**

ENGENHEIRO GEOFÍSICO

ORIENTADOR: PROF. BRENICE ANINA DEDAVID

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

*Trabalho vinculado ao Projeto "Mapeamento em Subsuperfície do Aquífero Guarani"*

**Porto Alegre  
Março, 2020**

## Ficha Catalográfica

G216a    García Moreno, Wilmer Emilio

Avaliação hidrogeoquímica, geofísica e geológica do Aquífero Guarani na região central e ocidental no Rio Grande do Sul / Wilmer Emilio García Moreno . – 2020.

161.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientadora: Profa. Dra. Berenice Anina Dedavid.

1. Aquífero Guarani. 2. Água subterrânea. 3. Sísmica de Refração. 4. Prospecção Geométrica e Sísmica de Refração. 5. Diagrama de Piper. I. Dedavid, Berenice Anina. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



## **AVALIAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA, GEOFÍSICA E GEOLÓGICA DO AQUIFERO GUARANI NA REGIÃO CENTRAL E OCIDENTAL NO RIO GRANDE DO SUL**

**CANDIDATO: WILMER EMILIO GARCÍA MORENO**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

**DRA. BERENICE A. DEDAVID - ORIENTADORA**

### **BANCA EXAMINADORA**

  
**DR. EDUARDO GUIMARÃES BARBOZA - IGEO - UFRGS**  
**DRA. HELDIANE SOUZA DOS SANTOS - LAB. QUÍMICA ANALÍTICA AMBIENTAL DA  
ESCOLA POLITÉCNICA - PROJETO AMAPO/PETROBRAS**  
**DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - PGETEMA - PUCRS**  
**DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - PGETEMA - PUCRS**

## DEDICATÓRIA

Para ti, pai, tu que foste essa pessoa quem acreditou sempre em mim. Sempre estiveste ali até as últimas palavras. Pai, escrevo-te por meio deste trabalho com lágrimas nos olhos, com ganas de dar-te um abraço enorme e que saibas quanto te amo e que ainda sei que estás presente aqui, no meu lado, no meu coração, na minha mente. Pai, não só te dedico esta dissertação, te dedico a pessoa em quem me tornei, em quem me formei, quem sou agora e ainda te lembro dizendo-me quão orgulhoso estavas e eras por mim. Se tu me visses nestes momentos perceberias que formaste a um homem. Aqui estou, teu primeiro filho engenheiro o primeiro que será mestre também e seguramente doutor. Pai, lembro-te, lembro nossa última ligação, lembro quando me disseram que já não eras parte de este mundo, lembro sim, e malvado câncer, mas pai, não me arrependo de nada, eu te aproveitei em vida e não podia ter melhor pai-avô que tu... Simplesmente foste meu maior motivo, és ainda a razão de ser quem sou e sempre terás aqui esse molde que fizeste ser um homem e pessoa de bem. Amo-te, pai.

Também estas palavras têm que ser dedicadas à minha família, dois anos já sem vê-los, dois anos desde que deixei-os, desde que os abracei, os beijei, os senti... sim o tempo voa, mas não sou aquele guri que deixaram naquele aeroporto, naquela porta. Agradeço-lhes pelo apoio, por serem o melhor destino que tive ao nascer, família, este trabalho é para vocês, não há mais que dizer. Inclusive, até para esse pequenino que é meu sobrinho e ainda não conheço, mas que às vezes fico só olhando o meu celular para ver essa fofura de gurizinho que desde a distância me faz feliz, faz-me sentir esse amor verdadeiro até de quase ser pai.

Isto é para vocês, minha razão de vida, amo-os!!

## AGRADECIMENTOS

É complicado o fato de escrever os agradecimentos, por isso inicio dizendo que o fato de mencionar de primeiro não tira importância os próximos, portanto quero dizer que agradeço:

À PUCRS, por existir, por ser feita, porque sem ela nem a possibilidade de candidatura de mestrado poderia haver existido.

Depois da PUCRS, agradeço à CAPES pela sua bolsa parcial que me permitiu fazer este mestrado, dando-me a oportunidade.

Aos meus orientadores, sim dois. Primeiramente ao professor Cássio Stein Moura, ele quem foi a pessoa que me aconselhou para fazer a candidatura do mestrado, disse-me que poderia melhor e foi minha guia ao longo da minha dissertação até sua saída da universidade. Logo, a professora Berenice Dedavid, que me recebeu como seu orientando com os braços abertos, além de ter sido minha banca de anteprojeto outorgando-me conselhos maravilhosos, excelsa professora de materiais metálicos e jamais duvidei em não a querer como minha orientadora depois do professor Cássio. O único nome que passou pela minha mente foi o dela.

Agradeço aos esplêndidos professores que tive neste mestrado, os quais me ensinaram uma área nova e preciosa como é o mundo dos materiais. Eu como engenheiro geofísico jamais tive esta aproximação com esta área, não obstante, graças à dedicação e amor dos professores que tive, estou decidido em continuar nesta rama, aprendendo ainda mais, agradeço-vos.

Estou agradecido à Julio Gall Pires, Gabriela Borges Soares e a Daniela Sotelo os quais fizeram aquisição dos dados.

Também agradeço aos amigos que este mestrado me deu, Andressa, Gabriela, Litiele, Luana e Danielli, Paulo e Abel.

Faço menção para os professores Rogério e Jairo, incentivadores para fazermos artigos, hoje posso dizer, professores, os artigos feitos (um com cada um de vocês) foram aceitos.

Eis aqui onde também devo agradecer a minha família, embora sempre me perguntem quando vou terminar desde o primeiro semestre, agradeço-lhes.

Osmari Aponte, tu, tu que tens sido meu grande apoio dia a dia, essa amizade incondicional, sem fronteiras, de amor puro e sincero, tu que estás igualmente orgulhosa de mim como eu de ti. Tu que me levantas o ânimo muitas vezes e que tens feito isso ao longo deste processo, agradeço-te demais.

Cindhy, gordita, muito obrigado mesmo por estares presentes nestes últimos momentos desta dissertação, és maravilhosa e esta amizade já tem seus quantos anos e continuará assim. Adoro-te!

Agradeço ao meu trabalho porque aceitaram a condição que eu coloquei em terminar meu mestrado para trabalhar com eles.

À minha universidade, essa que sempre será minha, sim minha USB (Universidad Simón Bolívar), a melhor, o primeiro amor acadêmico, quem me formou como engenheiro e quem iniciou este processo científico.

Se em caso esqueci de alguém, dedico este último parágrafo no qual te agradeço, tu que estás lendo isto, que se fazes isso é porque também mereces um agradeço-te.

Obrigado a todos.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>6</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>7</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>20</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>21</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>22</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Objetivos específicos.....</b>	<b>25</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Sistema Aquífero Guarani (SAG).....</b>	<b>26</b>
3.1.1 Santa Cruz do Sul .....	28
3.1.2 Candelária.....	31
3.1.3 Quarta Colônia .....	33
3.1.4 Alegrete.....	37
<b>3.2 Aquíferos.....</b>	<b>38</b>
3.2.1 Aquífero não-confinado .....	40
3.2.2 Aquífero confinado .....	40
3.2.3 Zona de recarga .....	41
3.2.4 Área de descarga .....	41
<b>3.3 Hidroquímica.....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Interação rocha-água .....	43
3.3.2 Diagrama de Piper .....	46
3.3.3 Efeito de elementos químicos na saúde.....	48
<b>3.4 Métodos geofísicos aplicados na hidrologia .....</b>	<b>50</b>
3.4.1 Sísmica de Refração .....	50
3.4.2 Velocidade das ondas sísmicas .....	57
3.4.3 Métodos elétricos .....	58

<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>69</b>
<b>4.1 Hidrogeoquímica</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2 Geofísica</b> .....	<b>74</b>
4.2.1 Sísmica de Refração .....	75
4.2.2 Método geoeletrico .....	78
<b>4.3 Caracterização geológica</b> .....	<b>80</b>
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>86</b>
<b>5.1 Santa Cruz do Sul</b> .....	<b>86</b>
5.1.1 Hidrogeoquímica .....	87
5.1.2 Métodos geofísicos .....	93
5.1.3 Modelagem geológica .....	97
<b>5.2 Quarta Colônia</b> .....	<b>100</b>
5.2.1 Hidrogeoquímica .....	101
5.2.2 Métodos geofísicos .....	107
5.2.3 Modelagem geológica .....	113
<b>5.3 Candelária</b> .....	<b>116</b>
5.3.1 Hidrogeoquímica .....	117
5.3.2 Métodos geofísicos .....	125
<b>5.4 Alegrete</b> .....	<b>131</b>
5.4.1 Hidrogeoquímica .....	131
5.4.2 Métodos geofísicos .....	137
5.4.3 Modelagem Geológica.....	144
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>147</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>149</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Localização do SAG. Modificado de (Flores Machado, 2006).....	26
Figura 3.2: Compartimentos do SAG no RS. Tomado de Flores Machado (2005)....	27
Figura 3.3: Unidades Hidroestratigráficas. Modificado de Flores Machado (2005) ...	27
Figura 3.4: Relação entre as unidades hidroestratigráficas e os compartimentos. Modificado de Flores Machado (2005) .....	28
Figura 3.5: Localização regional do município de Santa Cruz do Sul. Modificado de Da-Rosa (2005).....	29
Figura 3.6: Localização do município de Santa Cruz do Sul. Modificado de Pinheiro & Nummer (2012) .....	29
Figura 3.7: Arcabouço litoestratigráfico. Tomado de Noronha (2010). .....	31
Figura 3.8: Localização do município de Candelária. Tomado de Silva, Wollmann, & Hoppe (2017) .....	32
Figura 3.9: Formações do município de Candelária. Tomado de Prefeitura de Candelária (2011).....	33
Figura 3.10: Localização dos municípios estudados na região da Quarta Colônia. Modificado de Ziemann (2016).....	34
Figura 3.11: Perfil colunar com as unidades litoestratigráficas e bioestratigráficas na Quarta Colônia. Tomado de Zerfass (2007).....	36
Figura 3.12: Localização de Alegrete e sua geologia regional. Modificado de Martins, Wildner, & Hartmann, (2011).....	37
Figura 3.13: Estratigrafia em Alegrete. Tomado de Martins, Wildner, & Hartmann, (2011).....	38
Figura 3.14: Morfologia de um aquífero. Tomado de <a href="https://pontobiologia.com.br/possivel-vender-privatizar-aquifero/">https://pontobiologia.com.br/possivel-vender-privatizar-aquifero/</a> .....	40
Figura 3.15: Zonas de recarga e descarga de um aquífero. Tomado de <a href="http://files.professoralexeinowatzki.webnode.com.br/200000142-9b5179c4b5/aquifero.JPG">http://files.professoralexeinowatzki.webnode.com.br/200000142-9b5179c4b5/aquifero.JPG</a> .....	42

Figura 3.16: Demonstração do Diagrama de Piper e os tipos de água. Modificado de Piper (1944).....	47
Figura 3.17: Relação entre o Diagrama de Piper e a geologia. Modificado de Piper (1944).....	47
Figura 3.18: Representação das ondas no método sísmico. Modificado de García (2019).....	51
Figura 3.19: Representação da Lei de Snell. Modificado de García (2019) .....	53
Figura 3.20: Representação da primeira onda refratada. Modificado de Neves et al. (2014).....	54
Figura 3.21: Representação da segunda onda refratada. Modificado de Neves et al. (2014).....	55
Figura 3.22: Representação da terceira refração. Modificado de Neves et al. (2014) .....	56
Figura 3.23: Representação de estratos inclinados. Modificado de García (2019) ...	57
Figura 3.24: Cilindro condutor. Modificado de Orellana (1982) .....	60
Figura 3.25: Fluxo de corrente no subsolo mediante um único eléctrodo. Modificado de Orellana (1982) .....	61
Figura 3.26: Arranjo genérico de eletrodos no solo. Modificado de Orellana (1982) .	62
Figura 3.27: Fração da corrente que flui em profundidade dependendo da separação dos eletrodos. Modificado de Reynolds (2011) .....	63
Figura 3.28: Arranjo dipolo-dipolo. Modificado de Orellana (1982) .....	64
Figura 3.29: Arranjo Wenner. Modificado de Orellana (1982) .....	65
Figura 3.30: Arranjo Schlumberger. Modificado de Orellana (1982) .....	66
Figura 4.1: Localização da área de estudo nos quatro municípios, tendo em cor amarela a localização das linhas das sondagens geofísicas e em cor vermelha, os poços para as análises químicas (imagens tomadas por Google Earth).....	69
Figura 4.2: Exemplificação da picagem no segundo disparo de uma linha (as setas indicam o eixo do tempo e <i>offset</i> ).....	75

Figura 4.3: Configuração dos tempos de chegadas para cada disparo (as setas indicam o eixo do tempo e <i>offset</i> ).....	76
Figura 4.4: Modelo de três camadas para o disparo central (as setas indicam o eixo do tempo e <i>offset</i> ). .....	77
Figura 4.5: Exemplificação da linha QC1 depois da inversão e interpretação.....	77
Figura 4.6: Pontos discordantes (círculos vermelhos) a cada profundidade antes do processamento.....	78
Figura 4.7: Discretização espacial dos pontos a serem invertidos (a seta indica o eixo de distância e as cores correspondem às resistividades em cada bloco). .....	79
Figura 4.8: Modelos gerados, tendo acima o modelo de resistividade aparente e embaixo a correspondente inversão. ....	79
Figura 4.9: Exemplificação da linha CD1 como modelo final de inversão de resistividades.....	80
Figura 5.1: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) em Santa Cruz do Sul (imagem de satélite base por meio de Google Earth).....	86
Figura 5.2: Condutividade elétrica em Santa Cruz do Sul.....	87
Figura 5.3: Dureza da água em Santa Cruz do sul .....	87
Figura 5.4: Oxigênio dissolvido em Santa Cruz do Sul .....	88
Figura 5.5: pH da água em Santa Cruz do Sul.....	88
Figura 5.6: Potencial de redução em Santa Cruz do Sul.....	88
Figura 5.7: Salinidade da água em Santa Cruz do Sul.....	88
Figura 5.8: Concentração de cloreto em Santa Cruz do Sul .....	89
Figura 5.9: Concentração de fluoretos em Santa Cruz do Sul .....	89
Figura 5.10: Concentração de fosfato em Santa Cruz do Sul .....	89
Figura 5.11: Concentração de nitrato em Santa Cruz do Sul .....	89
Figura 5.12: Concentração de sulfato em Santa Cruz do Sul.....	90
Figura 5.13: Concentração de cálcio em Santa Cruz do Sul.....	91

Figura 5.14: Concentração de magnésio em Santa Cruz do Sul.....	91
Figura 5.15: Concentração de potássio em Santa Cruz do Sul.....	91
Figura 5.16: Concentração de sódio em Santa Cruz do Sul.....	91
Figura 5.17: Concentração de alumínio em Santa Cruz do Sul.....	92
Figura 5.18: Concentração de bário em Santa Cruz do Sul .....	92
Figura 5.19: Concentração de chumbo em Santa Cruz do Sul .....	92
Figura 5.20: Concentração de cobre em Santa Cruz do Sul .....	92
Figura 5.21: Concentração de cromo em Santa Cruz do Sul .....	93
Figura 5.22: Concentração de ferro em Santa Cruz do Sul.....	93
Figura 5.23: Linha SC1 (inversão da sísmica de refração).....	94
Figura 5.24: Linha SC1 (inversão da sondagem geoeletrica).....	94
Figura 5.25: Linha SC2 (inversão da sísmica de refração).....	95
Figura 5.26: Linha SC2 (inversão da sondagem geoeletrica).....	95
Figura 5.27: Linha SC3 (inversão da sísmica de refração).....	96
Figura 5.28: Linha SC3 (inversão da sondagem geoeletrica).....	97
Figura 5.29: Formação Serra Geral em Santa Cruz do Sul.....	98
Figura 5.30: Formação Santa Maria em Santa Cruz do Sul.....	98
Figura 5.31: Formação Rosário do Sul em Santa Cruz do Sul.....	99
Figura 5.32: Nível estático em Santa Cruz do Sul. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos .....	99
Figura 5.33: Modelagem 3D das Formações geológicas em Santa Cruz do Sul ....	100
Figura 5.34: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) na Quarta Colônia (imagem de satélite base por meio de Google Earth).....	100
Figura 5.35: Alcalinidade da água na Região da Quarta Colônia.....	101
Figura 5.36: Condutividade elétrica na Região da Quarta Colônia.....	101
Figura 5.37: Dureza da água na Região da Quarta Colônia.....	102

Figura 5.38: Concentração de oxigênio dissolvido na Região da Quarta Colônia...	102
Figura 5.39: pH da água na Região da Quarta Colônia.....	102
Figura 5.40: Salinidade da água na Região da Quarta Colônia .....	102
Figura 5.41: Concentração de cloreto na Região da Quarta Colônia .....	103
Figura 5.42: Concentração de fluoreto na Região da Quarta Colônia.....	103
Figura 5.43: Concentração de fosfato na Região da Quarta Colônia .....	103
Figura 5.44: Concentração de nitrato na Região da Quarta Colônia.....	103
Figura 5.45: Concentração de sulfato na Região da Quarta Colônia .....	104
Figura 5.46: Concentração de amônia na Região da Quarta Colônia.....	105
Figura 5.47: Concentração de cálcio na Região da Quarta Colônia.....	105
Figura 5.48: Concentração de magnésio na Região da Quarta Colônia .....	105
Figura 5.49: Concentração de potássio na Região da Quarta Colônia .....	105
Figura 5.50: Concentração de sódio na Região da Quarta Colônia .....	105
Figura 5.51: Concentração de alumínio na Região da Quarta Colônia .....	106
Figura 5.52: Concentração de bário na Região da Quarta Colônia.....	106
Figura 5.53: Concentração de chumbo na Região da Quarta Colônia .....	107
Figura 5.54: Concentração de cobre na Região da Quarta Colônia.....	107
Figura 5.55: Concentração de cromo na Região da Quarta Colônia.....	107
Figura 5.56: Concentração de ferro na Região da Quarta Colônia .....	107
Figura 5.57: Linha QC1 (inversão da sísmica de refração) .....	108
Figura 5.58: Linha QC1 (inversão da sondagem geelétrica) .....	108
Figura 5.59: Linha QC2 (inversão da sísmica de refração) .....	109
Figura 5.60: Linha QC2 (inversão da sondagem geelétrica) .....	109
Figura 5.61: Linha QC3 (inversão da sísmica de refração) .....	110
Figura 5.62: Linha QC3 (inversão da sondagem geelétrica) .....	110
Figura 5.63: Linha QC4 (inversão da sísmica de refração) .....	111

Figura 5.64: Linha QC4 (inversão da sondagem geolétrica) .....	112
Figura 5.65: Linha QC5 (inversão da sísmica de refração) .....	112
Figura 5.66: Linha QC5 (inversão da sondagem geolétrica) .....	113
Figura 5.67: Formação Serra Geral na Região da Quarta Colônia .....	114
Figura 5.68: Formação Botucatu na Região da Quarta Colônia.....	114
Figura 5.69: Formação Rosário do Sul na Região da Quarta Colônia .....	115
Figura 5.70: Nível estático na região da Quarta Colônia. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos .....	115
Figura 5.71: Modelagem 3D das formações na Região da Quarta Colônia .....	116
Figura 5.72: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) no município de Candelária (imagem de satélite base por meio de Google Earth) .....	116
Figura 5.73: Alcalinidade da água no município de Candelária.....	117
Figura 5.74: Condutividade elétrica no município de Candelária .....	117
Figura 5.75: Dureza da água no município de Candelária .....	118
Figura 5.76: Oxigênio dissolvido no município de Candelária .....	118
Figura 5.77: pH da água no município de Candelária .....	118
Figura 5.78: Concentração de bromo no município de Candelária .....	119
Figura 5.79: Concentração de cloreto no município de Candelária.....	119
Figura 5.80: Concentração de fluoreto no município de Candelária.....	119
Figura 5.81: Concentração de fosfato no município de Candelária.....	119
Figura 5.82: Concentração de nitrato no município de Candelária.....	120
Figura 5.83: Concentração de sulfato no município de Candelária .....	120
Figura 5.84: Concentração de cálcio no município de Candelária .....	121
Figura 5.85: Concentração de magnésio no município de Candelária .....	121
Figura 5.86: Concentração de potássio no município de Candelária .....	121
Figura 5.87: Concentração de sódio no município de Candelária .....	121

Figura 5.88: Concentração de alumínio no município de Candelária .....	122
Figura 5.89: Concentração de arsênio no município de Candelária .....	122
Figura 5.90: Concentração de bário no município de Candelária.....	123
Figura 5.91: Concentração de cádmio no município de Candelária .....	123
Figura 5.92: Concentração de cromo no município de Candelária.....	123
Figura 5.93: Concentração de ferro no município de Candelária .....	123
Figura 5.94: Concentração de manganês no município de Candelária .....	124
Figura 5.95: Concentração de selênio no município de Candelária .....	124
Figura 5.96: Concentração de zinco no município de Candelária .....	124
Figura 5.97: Diagrama de Piper no município de Candelária .....	125
Figura 5.98: Linha CD1 (inversão da sísmica de refração) .....	126
Figura 5.99: Linha CD1 (inversão da sondagem geolétrica) .....	126
Figura 5.100: Linha CD2 (inversão da sísmica de refração) .....	127
Figura 5.101: Linha CD2 (inversão da sondagem geolétrica) .....	127
Figura 5.102: Linha CD3 (inversão da sísmica de refração) .....	128
Figura 5.103: Linha CD3 (inversão da sondagem geolétrica) .....	128
Figura 5.104: Linha CD4 (inversão da sísmica de refração) .....	129
Figura 5.105: Linha CD4 (inversão da sondagem geolétrica) .....	129
Figura 5.106: Linha CD5 (inversão da sísmica de refração) .....	130
Figura 5.107: Linha CD5 (inversão da sondagem geolétrica) .....	130
Figura 5.108: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) no município de Alegrete .....	131
Figura 5.109: Alcalinidade da água em Alegrete.....	132
Figura 5.110: Condutividade elétrica em Alegrete.....	132
Figura 5.111: Dureza da água em Alegrete.....	132
Figura 5.112: pH da água em Alegrete.....	132

Figura 5.113: Concentração de bromo em Alegrete.....	133
Figura 5.114: Concentração de cloreto em Alegrete .....	133
Figura 5.115: Concentração de fluoreto em Alegrete.....	133
Figura 5.116: Concentração de fosfato em Alegrete .....	133
Figura 5.117: Concentração de nitrato em Alegrete.....	133
Figura 5.118: Concentração de sulfato em Alegrete .....	133
Figura 5.119: Concentração de cálcio em Alegrete.....	134
Figura 5.120: Concentração de magnésio em Alegrete .....	134
Figura 5.121: Concentração de potássio em Alegrete .....	134
Figura 5.122: Concentração de sódio em Alegrete .....	134
Figura 5.123: Concentração de alumínio em Alegrete .....	135
Figura 5.124: Concentração de arsênio em Alegrete .....	135
Figura 5.125: Concentração de bário em Alegrete.....	135
Figura 5.126: Concentração de cádmio em Alegrete .....	135
Figura 5.127: Concentração de chumbo em Alegrete .....	135
Figura 5.128: Concentração de cobre em Alegrete.....	135
Figura 5.129: Concentração de cromo em Alegrete.....	136
Figura 5.130: Concentração de ferro em Alegrete .....	136
Figura 5.131: Concentração de manganês em Alegrete .....	136
Figura 5.132: Concentração de selênio em Alegrete .....	136
Figura 5.133: Concentração de zinco em Alegrete .....	136
Figura 5.134: Diagrama de Piper em Alegrete .....	137
Figura 5.135: Linha AL1 (inversão da sísmica de refração) .....	138
Figura 5.136: Linha AL1 (inversão da sondagem geoeletrica) .....	138
Figura 5.137: Linha AL2 (inversão da sísmica de refração) .....	139
Figura 5.138: Linha AL2 (inversão da sondagem geoeletrica) .....	139

Figura 5.139: Linha AL3 (inversão da sísmica de refração) .....	140
Figura 5.140: Linha AL3 (inversão da sondagem geolétrica) .....	141
Figura 5.141: Linha AL4 (inversão da sísmica de refração) .....	141
Figura 5.142: Linha AL4 (inversão da sondagem geolétrica) .....	141
Figura 5.143: Linha AL5 (inversão da sísmica de refração) .....	142
Figura 5.144: Linha AL5 (inversão da sondagem geolétrica) .....	142
Figura 5.145: Linha AL6 (inversão da sísmica de refração) .....	143
Figura 5.146: Linha AL6 (inversão da sondagem geolétrica) .....	144
Figura 5.147: Formação Serra Geral no município de Alegrete .....	144
Figura 5.148: Formação Botucatu no município de Alegrete.....	145
Figura 5.149: Nível estático no município de Alegrete. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos .....	145
Figura 5.150: Modelagem 3D das formações no município de Alegrete .....	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Resistência à meteorização das rochas .....	43
Tabela 3.2: Resistência à meteorização dos minerais .....	44
Tabela 3.3: Reações químicas de interesse dos minerais mais comuns presentes nos aquíferos .....	44
Tabela 3.4: Velocidade da onda P em diferentes materiais (modificada de Gall Pires (2019)).....	58
Tabela 3.5: Classificação de diferentes materiais geológicos com sua resistividade (modificada de Govoni Sotelo 2019)) .....	67
Tabela 4.1: Tabela resumo dos diferentes mapas de contornos realizados para os diferentes parâmetros químicos .....	70
Tabela 4.2: Valores limites de concentração.....	72
Tabela 4.3: Poços usados para calibração das sondagens geofísicas. ....	74
Tabela 4.4: Coordenada das áreas estudadas.....	80
Tabela 4.5: Poços usados no município de Alegrete .....	81
Tabela 4.6: Poços usados na Região da Quarta Colônia.....	83
Tabela 4.7: Poços usados no município de Santa Cruz do Sul.....	84

## RESUMO

GARCÍA MORENO, Wilmer Emilio. **Avaliação Hidrogeoquímica, Geofísica e Geológica do Aquífero Guarani na Região Central e Ocidental no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 2018. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O Estado do Rio Grande do Sul possui uma grande parte do Aquífero Guarani, existindo, desta forma, uma área de recarga que se localiza na sua região central e ocidental. Este trabalho foca em alguns municípios localizados nessa região: Santa Cruz do Sul, a Região da Quarta Colônia, Candelária e Alegrete. Atualmente, não há um plano de recursos hídricos no Estado e, por tal motivo, procurando realizar um inventário hidrográfico mediante características hidrogeoquímicas, geofísicas e geológicas da região de recarga do Aquífero. Reuniu-se dados adquiridos em campo que incluem análises químicas das águas em diferentes poços e sondagens geofísicas em sísmica de refração e métodos geoeletricos. Além disso, utilizou-se informações geológicas do banco de dados público do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Assim, foi possível realizar o mapeamento dos diferentes parâmetros químicos, o que inclui o diagrama de Piper nos municípios de Candelária e Alegrete. Os dados obtidos com os métodos de sísmica de refração e dados geométricos foram analisados com base nos dados geológico de poços do SIAGAS, estes últimos mapeados segundo diferentes formações e níveis estáticos. Os resultados dos mapeamentos mostram que o município de Candelária é o mais afetado do ponto de vista químico. A relação entre a geoquímica, através dos diagramas de Piper, com a geologia inferida pelos métodos geofísicos, fornece as potencialidades do local estudado como possível reservatório de água para uso humano, agropastoril ou industrial. A correlação desses dados forneceu uma ampla visão da região de recarga do aquífero.

Palavras-Chave: Aquífero Guarani, Água subterrânea; Sísmica de Refração. Prospecção Geoeletrica e Refração; Diagrama de Piper.

## **ABSTRACT**

**GARCÍA MORENO, Wilmer Emilio. Hydrogeochemical, Geophysical and Geological Evaluation of the Guarani Aquifer in the Central and Western Region in Rio Grande do Sul.** Porto Alegre. 2018. Master Dissertation. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The State of Rio Grande do Sul has a large part of the Guarani Aquifer, having a recharge area that is in its central and western region. This work focuses on some municipalities located in that region, namely: Santa Cruz do Sul, the Region of Quarta Colônia, Candelária and Alegrete. Currently, there is no water resources plan in the State, and, for this reason, the aim is to evaluate the hydrogeochemical, geophysical and geological characteristics of the Aquifer recharge region. Gathered data acquired in the field, which include chemical analysis of water in different wells and geophysical surveys in refraction seismic and geoelectrical methods. In addition, geological information was taken from the public database of the Groundwater Information System (SIAGAS). Therefore, it was possible to carry out the mapping of the different chemical parameters, which includes the Piper diagram in the municipalities of Candelária and Alegrete. The data obtained by geophysical methods (refractive seismic and geoelectrical survey) were analyzed based on the geological data of wells of SIAGAS, modeling different formations and static levels, such as in 2D and 3D. The results of hydrogeochemical mapping show that the municipality of Candelária is the most affected. The relationship between geochemistry and the inferred geology by geophysical methods, provides the potential of the studied site as a possible reservoir of water for human, agropastoral or industrial use. The correlation of these data provided a broad view of the aquifer recharge region.

**Keywords:** Guarani Aquifer; Hydrogeochemical analysis; Piper's diagram; Geoelectric method; Refraction Seismic

## 1 INTRODUÇÃO

A água é mais que uma fórmula química (H<sub>2</sub>O), ela traduz-se em vida, de tal modo que é indiscutível sua importância, sendo indispensável no dia à dia, tendo repercussão direta na economia, indústria energética (usinas hidroelétricas), indústria de transformação, agropecuária e para o meio ambiente (Gleick, et al., 2004). Por tais razões, a água está no centro do desenvolvimento sustentável, sendo o recurso hídrico e a gama de serviços que eles oferecem um pilar que sustenta a redução da pobreza, o crescimento econômico e a preservação ambiental (UNESCO, 2015).

Há poucos panoramas positivos que garantam quanto à disponibilidade de água, visto que sua demanda está fortemente ligada ao aumento da população mundial. Projeta-se que no futuro a atividade industrial e o consumo doméstico necessitarão mais água que a agricultura e a pecuária, principalmente em países (ou regiões) em desenvolvimento ou com economias emergentes, como o Brasil (UNESCO, 2018). Por outro lado, existem dois pontos críticos na provável escassez da água, são eles: a alteração do ciclo da água devido ao aquecimento global e a problemática da poluição nos rios e aquíferos (UNESCO, 2017). De fato, as avaliações internacionais e nacionais indicam que os sistemas de água doce do planeta são os mais vulneráveis frente ao aquecimento global, apresentando riscos para todos os setores da sociedade (Gleick, et al., 2014). Devido ao antes mencionado, torna-se urgente buscar recursos hídricos potáveis para o abastecimento humano, além de garantir a sustentabilidade e a manutenção dos poços novos e se tenha plano de sustentabilidade que possa garantir a manutenção dos recursos hídricos.

Tendo isso em consideração, é necessário conhecer o potencial hídrico e manter através de um planejamento de manejo que garanta potabilidade e sustentabilidade dos poços existentes e de outras reservas hídricas. No Estado do Rio Grande do Sul, segundo a Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão no Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul (2019), o Valor Adicionado Bruto da Agropecuária do Estado contribuiu com 12,1% do uso total nacional de água potável,

estando em primeiro lugar no país. Somado a isso, no ano 2015, o Estado apresentou a maior área de irrigação no país (Agência Nacional de Águas, Atlas Irrigação - Uso d'água na Agricultura Irrigada, 2017) e mais de 50% dos municípios brasileiros usam exclusivamente águas subterrâneas (Agência Nacional de Águas, Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água, 2010). Por outro lado, o volume útil armazenado nos reservatórios nas regiões hidrográficas que se localizam no RS diminuíram entre 31 de dezembro de 2016 e 31 de dezembro de 2017, passando de 82,29% para 78,75% na região Atlântico Sul e de 63,01% para 45,11% na região do Uruguai (Agência Nacional de Águas, Conjuntura Brasil 2018 - Recursos Hídricos, 2018) e, ainda, cerca de 5% dos reservatórios existentes requerem uma nova fonte manancial e 32% deles precisam ampliação do sistema atual de abastecimento (Agência Nacional de Águas, Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água - Vol. 2, 2010). Por último e mais importante, é que o RS ainda não possui seu Plano Estadual de Recursos Hídricos (Agência Nacional de Águas, Conjuntura Brasil 2018 - Recursos Hídricos, 2018).

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), um dos maiores depósitos renováveis de água subterrânea, ocupa aproximadamente 55% (tanto em áreas onde aflora como naquelas onde está confinado) da superfície do Rio Grande do Sul mostrando-se como uma possível solução para o futuro do abastecimento de água no estado (desde que for adequadamente usado (RIMAS, 2012).

Devido à grande abrangência do SAG no estado, além para prevenção nas épocas de estiagem, este trabalho se focalizou em analisar apenas uma parte dos municípios que compõe a região do aquífero, especificamente os municípios de Santa Cruz do Sul, Alegrete e Candelária, além dos municípios da Região da Quarta Colônia (Agudo, Faxinal do Soturno, Nova Palma e Dona Francisca). Neste trabalho apresenta-se o exame criterioso dos dados obtidos com as análises de hidrogeoquímica, geofísica e do SIAGAS, para contribuir com o plano hidrográfico do Estado do Rio Grande do Sul, e, assim, dar subsídios para garantir a utilização consciente e a sustentabilidade do SAG.

## **2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo das zonas de recargas e regiões de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul por meio de uma caracterização hidrogeoquímica, geofísica e geológica, procurando realizar um inventário hidrográfico que possa ser utilizado nos momentos de estiagem, tendo como base estudos prévios nas regiões mencionadas.

### **2.1 Objetivos específicos**

Tem-se como objetivos específicos a geração de diferentes mapas de contornos que mostrem as concentrações de parâmetros químicos, tais como: ânions, cátions, concentrações de metais e físico-químicos e dar a possível origem deles. Ademais, gerar um diagrama de Piper nos municípios de Candelária e Alegrete e correlacioná-los com a geologia local.

Desde o ponto de vista geofísico, tem-se a criação de perfis 2D tanto para linhas de sísmica de refração como para o método geoeletrico e compará-los com a litologia dos poços próximos. Ademais, um dos objetivos refere-se ao modelamento 2D e 3D das formações estudadas e do nível estático do SAG nas áreas pesquisadas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Sistema Aquífero Guarani (SAG)

O Sistema Aquífero Guarani pode ser traduzido como uma importante reserva no abastecimento de água, devido à sua imensidão, ocupando no Brasil uma área total de 890.899 km<sup>2</sup>, ocupando aproximadamente 50% do Estado do Rio Grande do Sul (157.600 km<sup>2</sup>), situando-se na Bacia do Paraná (de Oliveira & Vieira, 2010) (Figura 3.1).

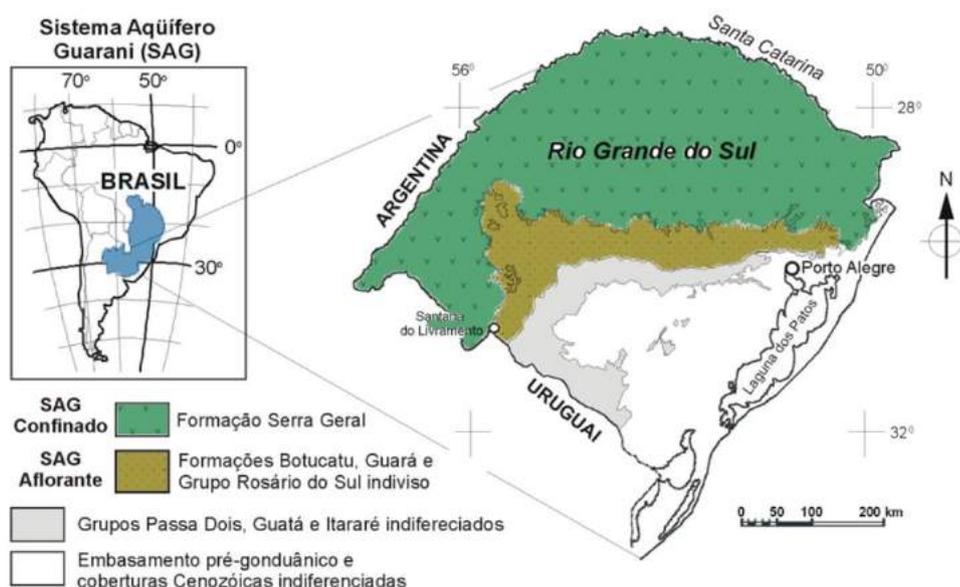


Figura 3.1: Localização do SAG. Modificado de (Flores Machado, 2006)

Por outro lado, esse aquífero foi dividido por meio dos seus compartimentos estruturais (Flores Machado, 2005 e 2006), assim como pelas unidades hidroestratigráficas existentes (Flores Machado, 2005). Embora no Estado do Rio Grande do Sul o SAG esteja dividido em quatro compartimentos (Oeste, Leste, Norte – Alto Uruguai e Central – Missões) (Figura 3.2), destaca-se que as áreas estudadas estão localizadas somente nos compartimentos Oeste (no caso de Alegrete) e Central – Missões (Correspondentes para a região da Quarta Colônia e os municípios de Candelária e Santa Cruz do Sul). Além, as unidades hidroestratigráficas correspondentes aos municípios se encontram na Figura 3.3, sendo essas unidades

correlacionadas com os compartimentos, obtendo o que pode observar-se na Figura 3.4, por este motivo, cada região possui características geológicas específicas, mesmo compartilhando algumas formações, sendo explicadas a continuação.

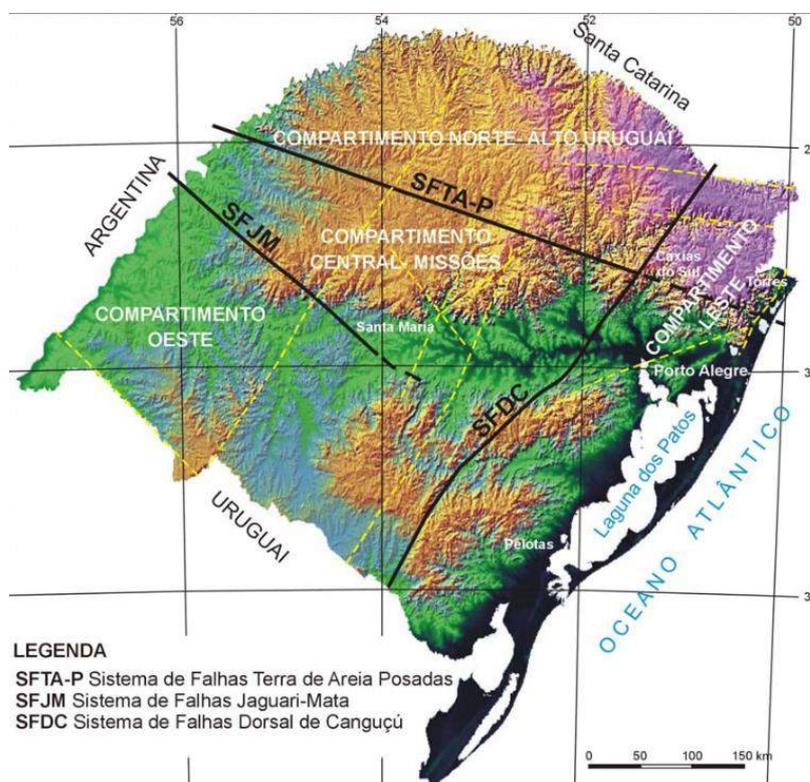


Figura 3.2: Compartimentos do SAG no RS. Tomado de Flores Machado (2005)

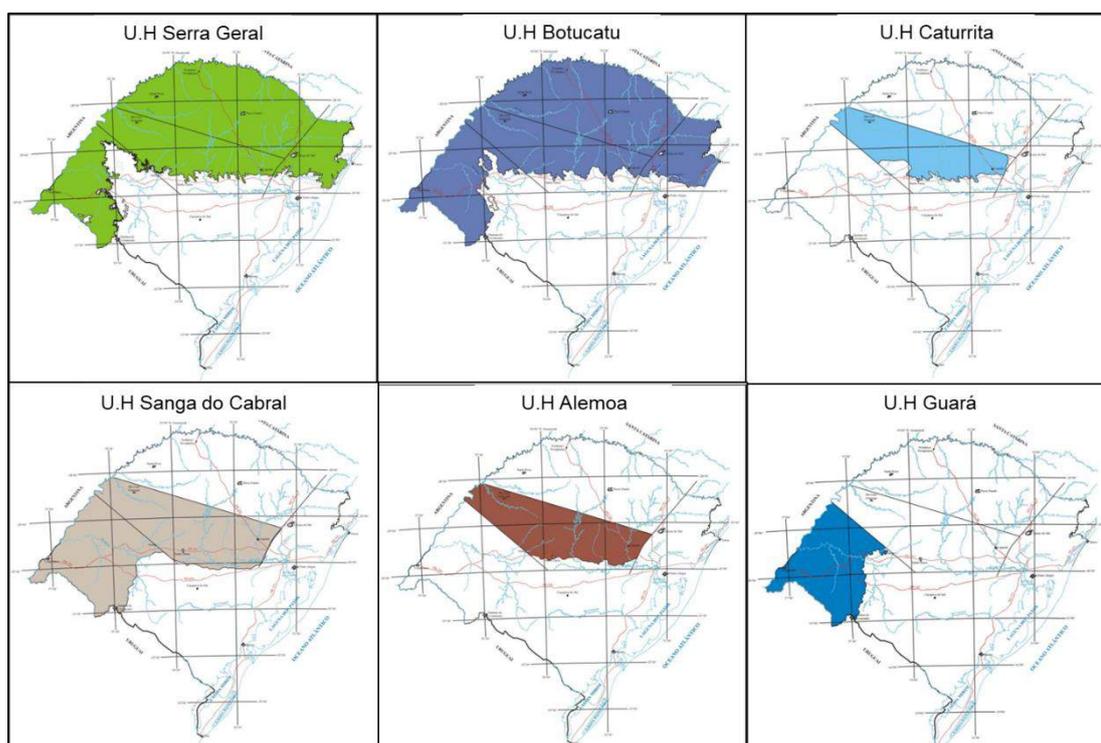


Figura 3.3: Unidades Hidroestratigráficas. Modificado de Flores Machado (2005)

ERA	PERÍODO	Compartimento Oeste		Compartimento Central-Missões		Compartimento Leste		Compartimento Norte - Alto Uruguai	
		Unidade hidroestratigr.	Sistema aquífero	Unidade hidroestratigr.	Sistema aquífero	Unidade hidroestratigr.	Sistema aquífero	Unidade hidroestratigr.	Sistema aquífero
MESOZOICO	Cretáceo	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral
		Botucatu	SISTEMA AQUIFERO GUARANI	Botucatu	SISTEMA AQUIFERO GUARANI	Botucatu (1)	SISTEMA AQUIFERO GUARANI	Botucatu	SISTEMA AQUIFERO GUARANI
	Jurássico	Guará							
	Triássico					Arenito Mata			
						Caturrita			
						Alemoa			
				Passo das Tropas 1					
		Passo das Tropas 2							
		Sanga do Cabral	Sanga do Cabral						
PALEOZOICO	Permiano	Pirambóia	Pirambóia	Pirambóia					
		Rio do Rasto	Rio do Rasto	Rio do Rasto	Rio do Rasto				

(1) - Na porção norte deste compartimento allora apenas a unidade hidroestratigráfica Botucatu

Figura 3.4: Relação entre as unidades hidroestratigráficas e os compartimentos. Modificado de Flores Machado (2005)

### 3.1.1 Santa Cruz do Sul

O município de Santa Cruz do Sul localiza-se a aproximadamente 155 km de Porto Alegre (Capital do RS), nas coordenadas 29°43'59" de latitude sul e 52°24'52" de longitude oeste. Esse município se insere na bacia hidrográfica do Rio Jacuí, no sudeste da Bacia do Paraná (Noronha, 2012), especificamente na Depressão Central Gaúcha que constitui-se por rochas sedimentares e derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, como mostra a Figura 3.5.

Por outro lado, existem nessa região quatro regiões aflorantes principais do SAG : Formação Serra Geral, Botucatu, Caturrita, Santa Maria e Rosário do Sul, sendo de idades juro-cretáceas, triássicas e mesozóicas, respectivamente (Martínez & Silva, 2004). As formações ilustradas nas Figura 3.5 e Figura 3.6 são descritas a seguir.

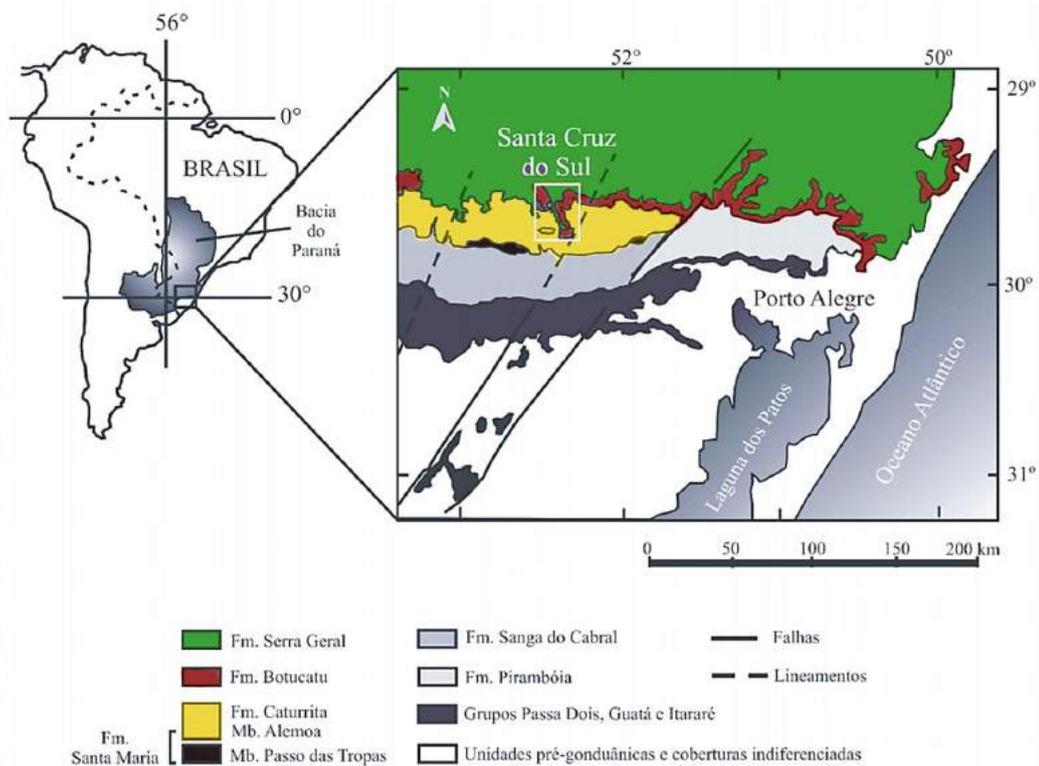


Figura 3.5: Localização regional do município de Santa Cruz do Sul. Modificado de Da-Rosa (2005)

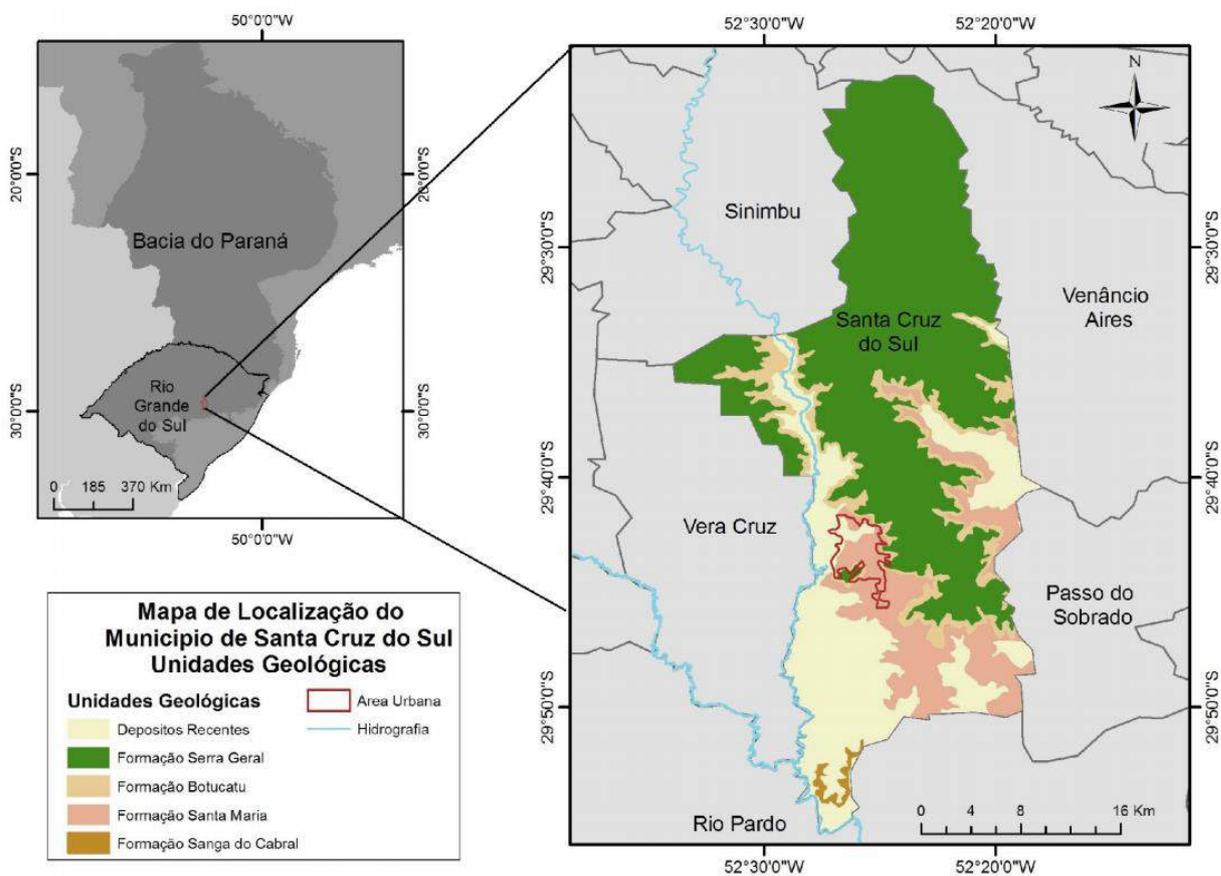


Figura 3.6: Localização do município de Santa Cruz do Sul. Modificado de Pinheiro & Nummer (2012)

Primeiramente está a Formação Rosário do Sul, a qual no Estado do Rio Grande do Sul, normalmente se chama Formação Sanga do Cabral, estando constituída por arenitos finos, que se apresenta como um aquífero livre ou confinado e indica um paleoambiente flúvio-deltaico (Martínez & Silva, 2004).

Por outro lado, a Formação Santa Maria que aflora somente no Estado do Rio Grande do Sul ao longo de uma faixa de 250 km (direção Leste-Oeste), constitui-se litoestratigraficamente por dois membros de características arenosas, além de possuir um basal composto por areias de granulometria grossa a média, característico de um paleoambiente fluvial, pertencente ao Triássico Médio Superior. Esses dois membros da formação são Passo das Tropas (membro inferior) o qual é predominantemente siliciclástico (Martínez & Silva, 2004) (Noronha, 2009) e Alemoa (membro superior) que está conformado por siltitos argilosos, de cor avermelhada, minerais de argilas que pertencem ao grupo das montmorilonitas, tendo, por essa razão, baixa permeabilidade (Pinheiro & Nummer, 2012)

Por sua vez a Formação Caturrita datada por Rubert & Schultz (2004) apresenta idade noriana, pertencente ao Triássico Superior, tendo como base o registro fossilífero. Esta formação constitui-se de camadas de arenitos finos a conglomerados, bem selecionados, como uma associação de fácies aluviais (Noronha, Mapeamento geológico-geotécnico da área urbana de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil, visando a avaliação da suscetibilidade à deflagração de movimento de massa, 2010), formando o aquífero com maior capacidade de acumular água da região, com uma porosidade média que varia entre 14% e 30% (Martínez & Silva, 2004).

Em referência à Formação Botucatu, Noronha (2010) menciona os estudos feitos por Northfleet, Medeiros (1969) que a posicionam como Juro-Cretácea, assim como Faccini, Giardin, & Machado (2003) os quais relataram que os litotipos correspondem a uma associação de fácies de sistemas eólicos médios, conformados por arenitos finos a médios quartzosos com presença de feldspatos.

Logo, a Formação Serra Geral destaca-se por três derrames basálticos heterogêneos e pouco desenvolvidos (Pinheiro & Andréa Valli Nummer, 2012), sendo esse volume de magmático, consequência do vulcanismo que acompanhava a separação de Gondwana ao longo do Cretáceo Inferior (Noronha, 2010). Tudo isso

faz com que se forme um aquífero fissural, formado por fraturas, as quais podem estar conectadas entre si (ou não) (Martínez & Silva, 2004).

Em resumo, todas estas unidades litoestratigráficas podem ser vistas na Figura 3.7.

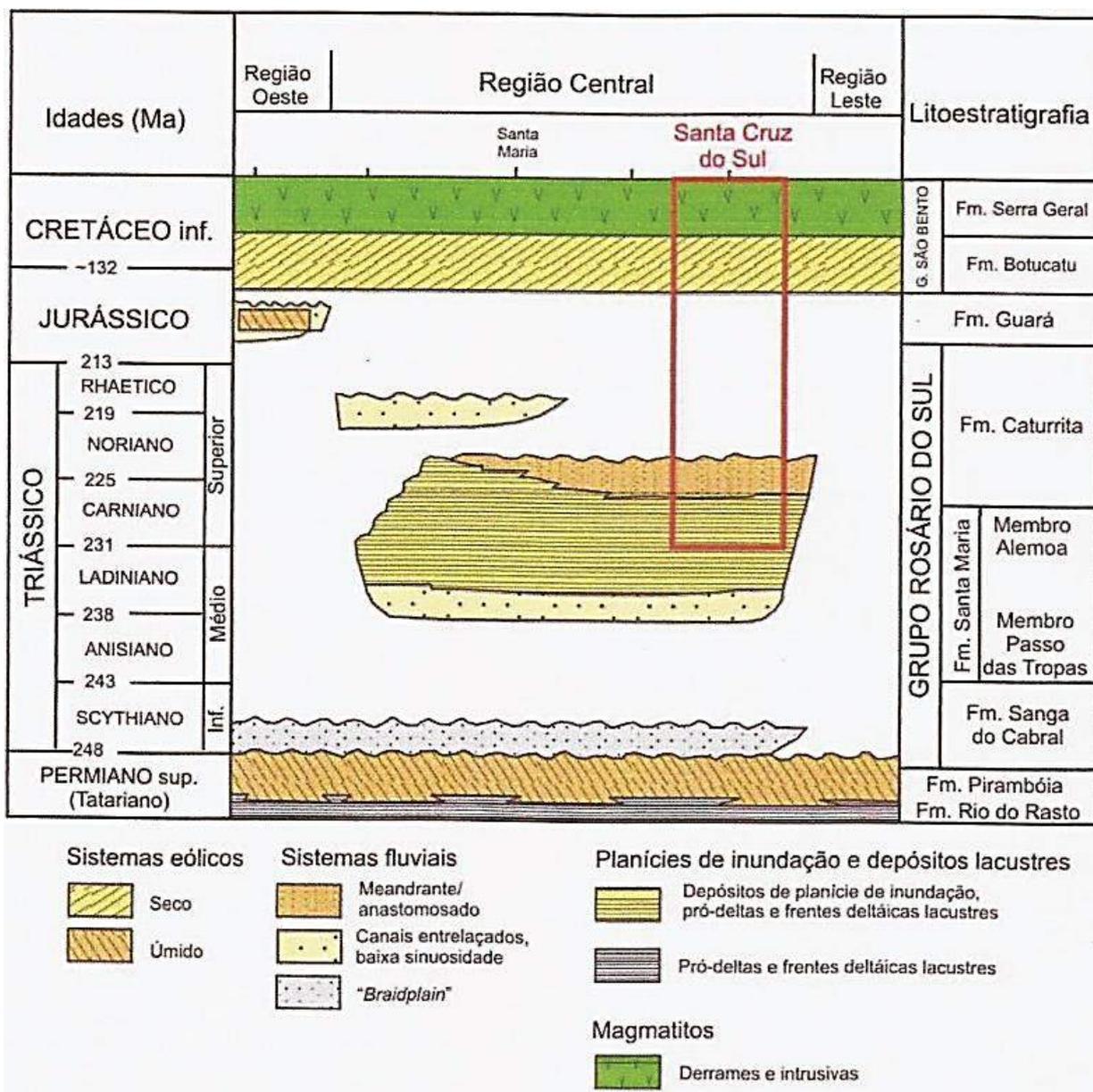


Figura 3.7: Arcabouço litoestratigráfico. Tomado de Noronha (2010).

### 3.1.2 Candelária

O município de Candelária localiza-se a uma latitude de 29°40'09" sul e a uma longitude 52°47'20" oeste, possuindo uma área de 940,11 km<sup>2</sup>, com uma distância aproximada de 182 km de Porto Alegre, encontrando-se entre dois compartimentos geológicos: a Depressão Periférica Sul-rio-grandense e o Rebordo do Planalto e

Chapadas, todos eles pertencentes à Bacia do Paraná. Por outro lado, esse município possui duas bacias hidrográficas, as quais são: Rio Pardo (ocupa 52,94% do município) e Baixo Jacuí (47,06%) (Silva, Wollmann, & Hoppe, 2017).

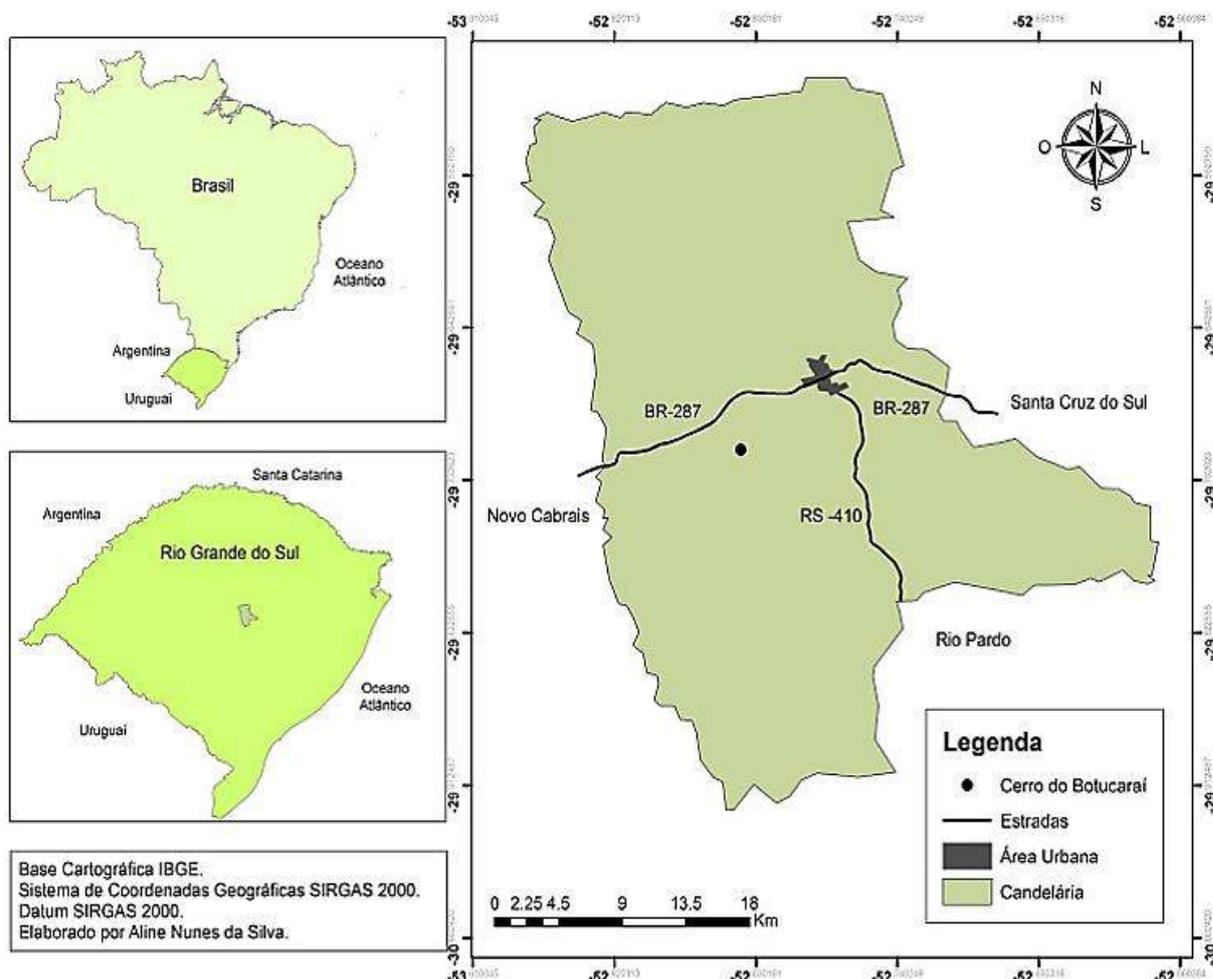


Figura 3.8: Localização do município de Candelária. Tomado de Silva, Wollmann, & Hoppe (2017)

Por outro lado, a Prefeitura de Candelária no ano de 2011, num relatório sobre um plano municipal de saneamento, menciona que foram identificadas seis fácies sedimentares, que podem ser observadas na Figura 3.9.

1. Pelitos lacustres: correspondentes ao Membro Alemoa da Formação Santa Maria, conformados por argilitos/siltitos avermelhados.
2. Turbidítica: observam-se camadas de arenitos com grãos finos de cor avermelhada, com estratificações quase paralelas.
3. Lobos de suspensão: igualmente se apresentam arenitos finos com uma cor avermelhada, porém, existe intercalações de pelitos.
4. Fluvial: apresentam-se arenitos róseos/esbranquiçados, possuindo estratificações cruzadas, além de intraclastos de argilito.

5. Fluxo de lama: o tipo de rocha é diamicito que possui uma matriz de argilito, apresentando-se também seixos de pelito ou arenitos dispersos.

6. Dunas eólicas: caracteriza-se por arenitos finos a médios, com uma cor rósea esbranquiçada.

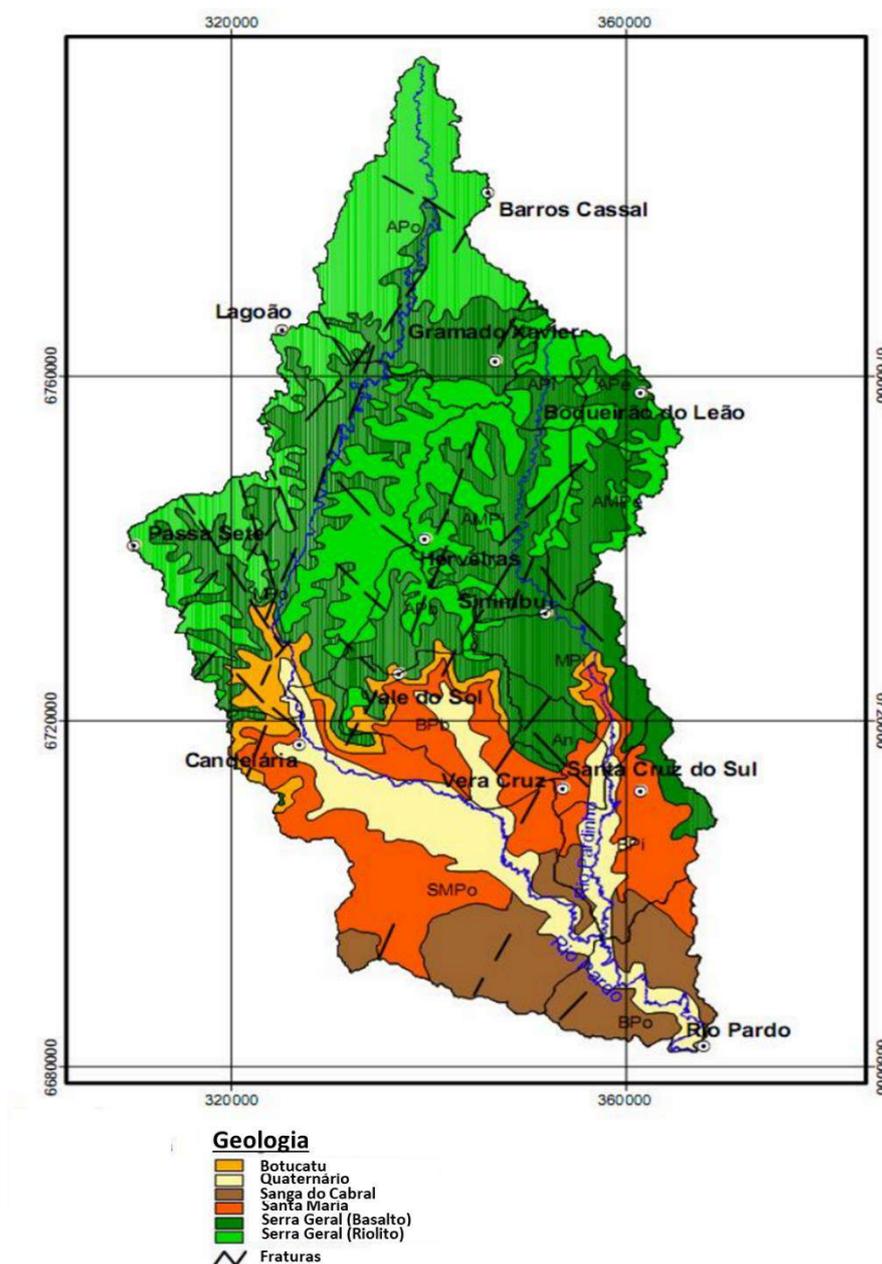


Figura 3.9: Formações do município de Candelária. Tomado de Prefeitura de Candelária (2011)

### 3.1.3 Quarta Colônia

Esta região localiza-se na Mesorregião Centro-Oriental do Estado do Rio Grande do Sul, tendo uma distância média dos municípios até Porto Alegre de 255 km (Figura 3.10). Suas unidades litoestratigráficas da região compõem seu registro

sedimentar na bacia do Chaco-Paraná, sendo ela uma das grandes bacias intracratônicas de idade Fanerozóica na América do Sul (Godoy, Binotto, Silva, & Zerfass, 2010).

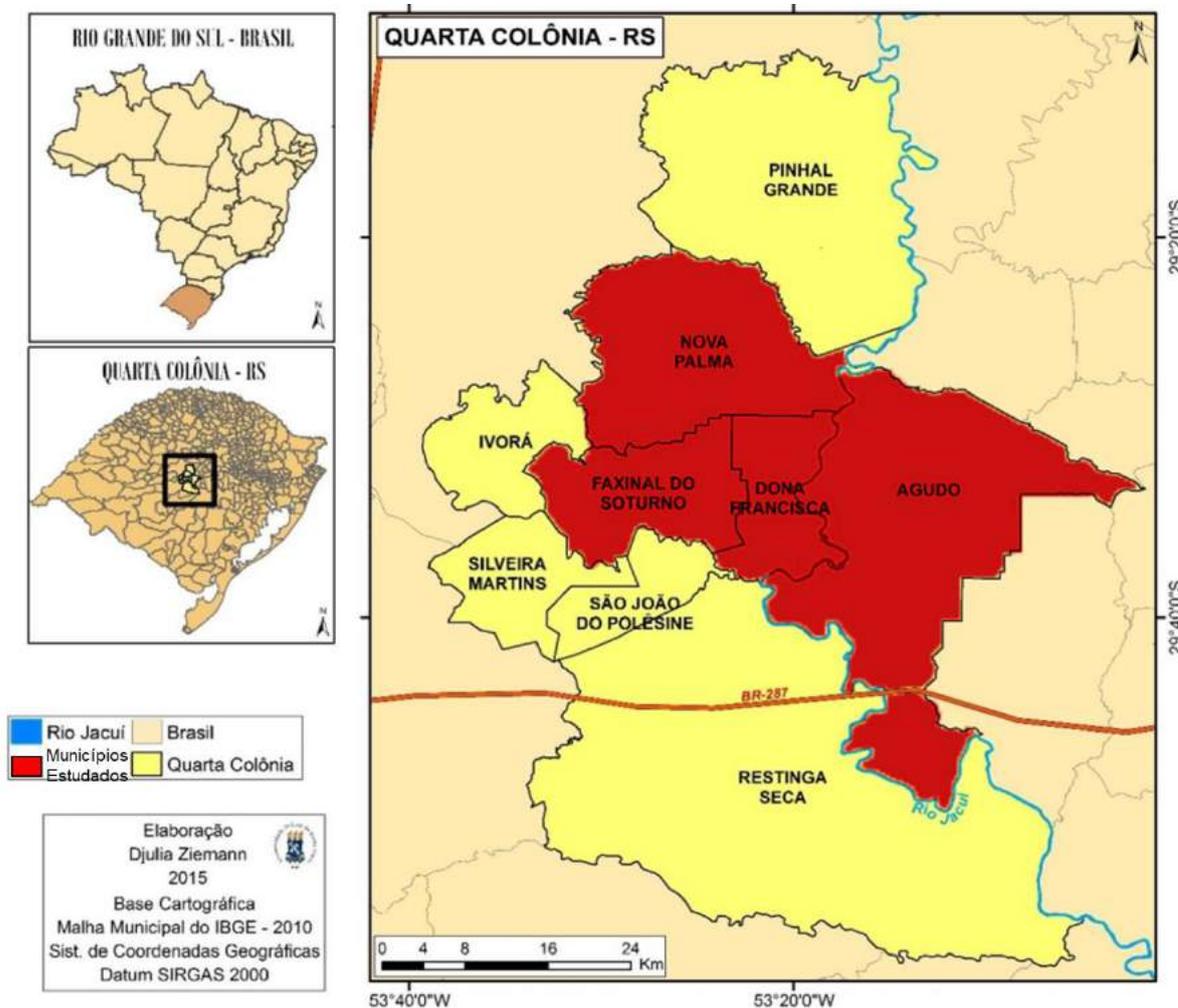


Figura 3.10: Localização dos municípios estudados na região da Quarta Colônia. Modificado de Ziemann (2016)

Os municípios da região da Quarta Colônia inserem-se na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, possuindo um grande potencial hidrológico. Por outro lado, devido às variações altimétricas, as drenagens possuem alta energia, sendo grandes escultoras da paisagem. Além disso, essas drenagens aumentam sua densidade espacial devido ao fato que as rochas de baixa permeabilidade (vulcânicas) possibilitam as formações de canais (Schirmer, 2015).

Em adição, seguindo os trabalhos de Zerfass (2007) e Ziemann (2016) a geologia local pertence ao intervalo conformado entre Triássico Inferior – Cretáceo Inferior (Figura 3.11), tendo:

A Formação Sanga do Cabral, corresponde à um sistema de depósitos fluviais holocênicos, composta principalmente por arenitos finos e conglomeráticos com interclastos lutíticos, apresentando cor que varia entre rosa e laranja. Enquanto a Formação Santa Maria, divide-se em três tipos de fácies, arenitos e conglomerados intercalados, lutitos e por último, arenitos e conglomerados intercalados.

Enquanto a Formação Caturrita, é uma das formações integrantes do Grupo Rosário do Sul, a qual consiste em intercalações de arenitos conglomeráticos com laminação cruzada e siltitos arenosos, tendo origem em sistemas fluviais, apresentando um contato erosivo com a Formação Santa Maria.

Por outro lado, a Formação Guará se assenta por meio de uma desconformidade sobre a Formação Caturrita e apresenta nela quatro fácies principais, sendo: (1) arenitos finos a grossos com uma cor creme, típico de quartzofeldspáticos; (2) arenitos finos, igualmente quartzofeldspáticos com uma laminação acanalada; (3) semelhantes à segunda fácies, com arenitos finos, quartzofeldspáticos, com laminação horizontal; (4) lutitos vermelhos lenticulares maciços e laminados.

Depois encontra-se a Formação Botucatu, posicionada no Juro-Cretáceo, interpreta-se esta formação como depósitos de dunas eólicas onde se encontram arenitos finos a médios, quartzosos de cor rosa, seguida pela Formação Serra Geral, sendo a mais típicas do Estado de Rio Grande do Sul, conformada por rochas vulcânicas do Cretáceo Inferior.

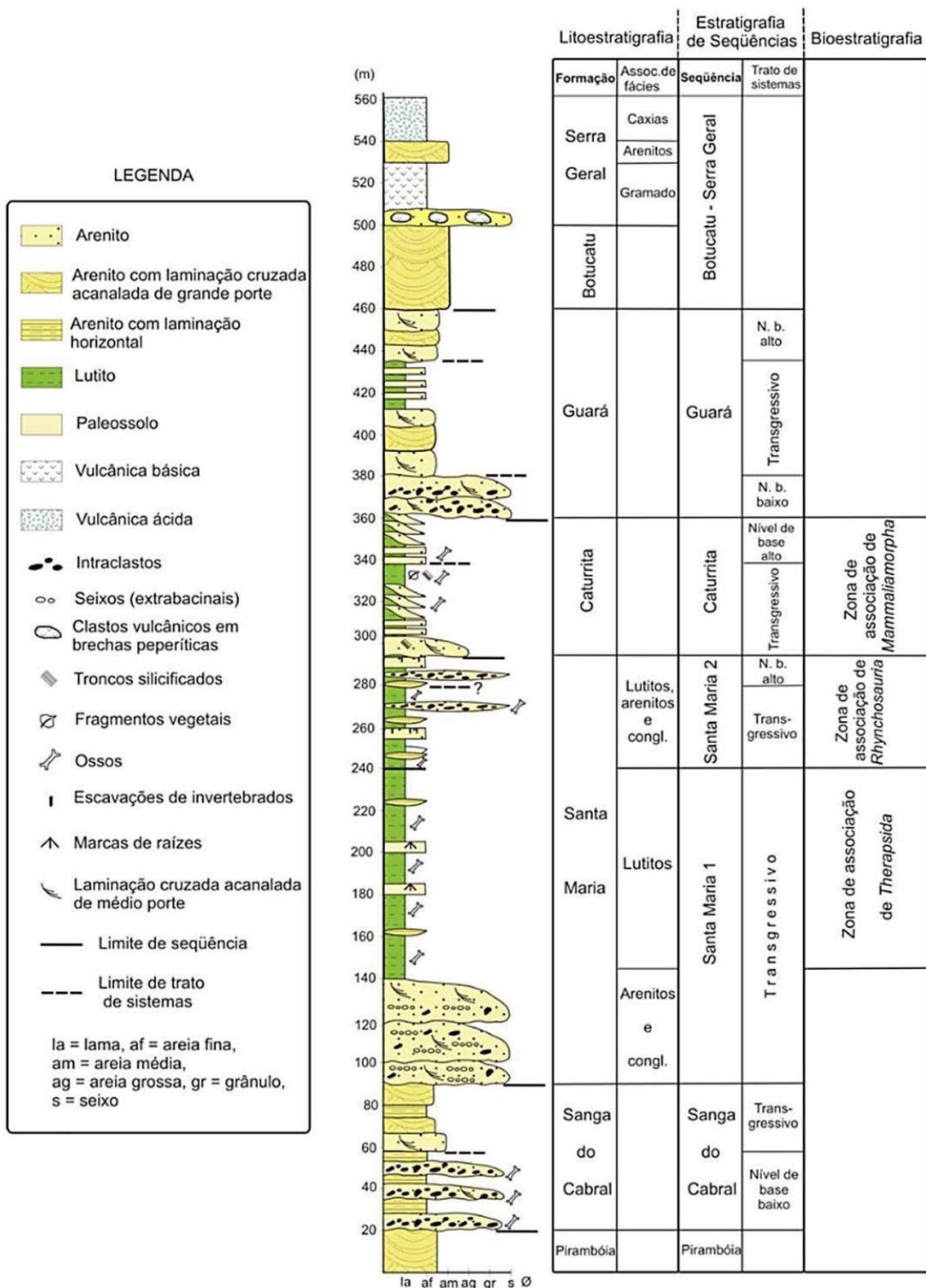


Figura 3.11: Perfil colunar com as unidades litoestratigráficas e bioestratigráficas na Quarta Colônia. Tomado de Zeffass (2007)

### 3.1.4 Alegrete

Alegrete é um município que se localiza no oeste do Estado de Rio Grande do Sul, a aproximadamente 506 km da capital, Porto Alegre. A maior parte do município baseia-se sobre uma província basáltica, tendo como grande parte das rochas encontradas aquelas formadas por derrames originados por vulcanismo fissural, os quais aconteceram na Bacia do Paraná na Era Mesozoica, formando atualmente a Formação Serra Geral (Alves, 2008) (Figura 3.12).

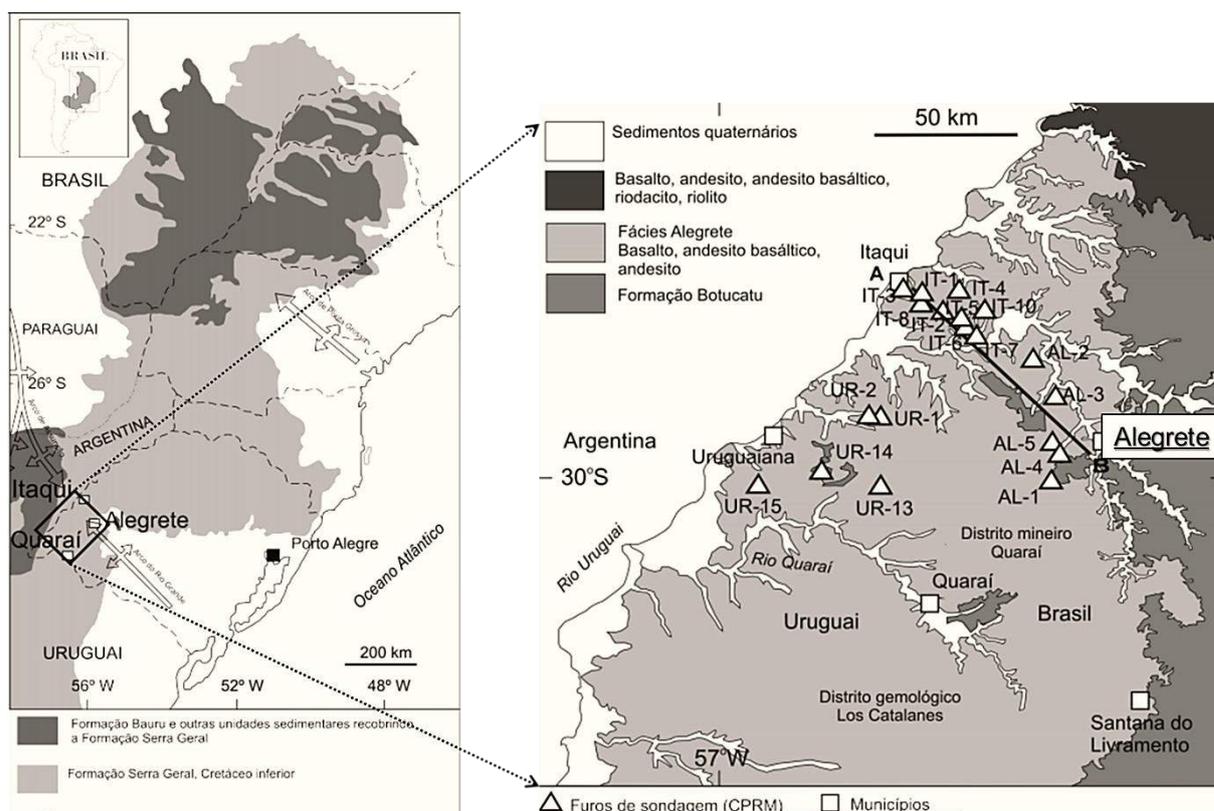


Figura 3.12: Localização de Alegrete e sua geologia regional. Modificado de Martins, Wildner, & Hartmann, (2011)

O magmatismo de natureza fissural que deu origem a essas rochas está relacionado com a ruptura de Gondwana o qual traduz-se na abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior (Zalán et al., 1987). Por outro lado, Martins, Wildner, & Hartmann (2011) lograram identificar nesta formação seis derrames vulcânicos (Figura 3.13).

Além do vulcanismo, podem ser identificados arenitos eólicos pertencentes à Formação Botucatu (de Paula & Robaina, 2003), assim como os arenitos finos e conglomeráticos da formação Guará e os arenitos/siltitos da Formação Sanga do

Cabral, destacando-se que foi interpretado o Aquífero Guarani na formação Guará, como pode observar-se na Figura 3.13 (de Paula, 2006).

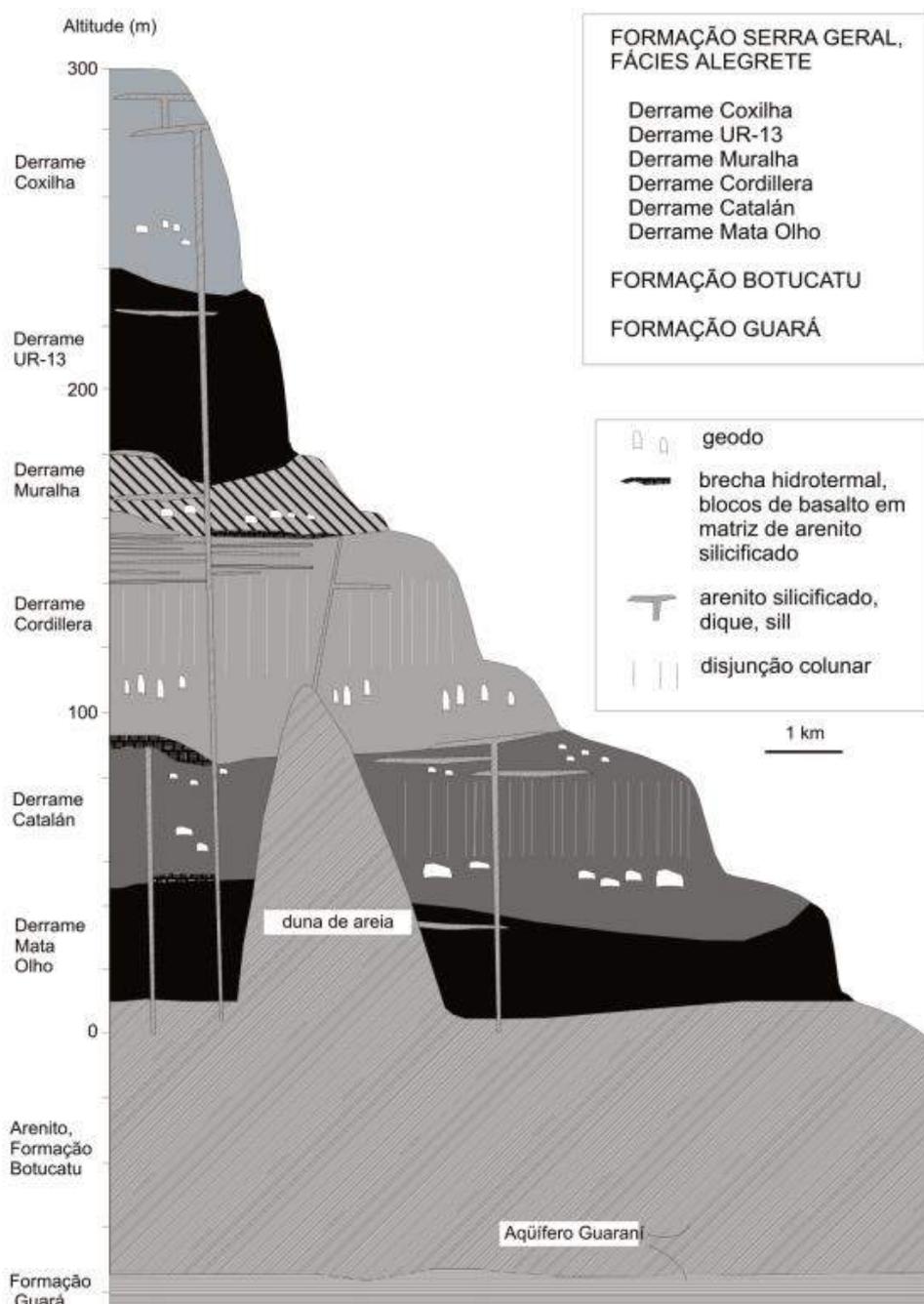


Figura 3.13: Estratigrafia em Alegrete. Tomado de Martins, Wildner, & Hartimann, (2011)

### 3.2 Aquíferos

A ocorrência de águas subterrâneas dentro da crosta terrestre e a emergência de nascentes na superfície do solo são determinadas pela litologia dos materiais geológicos, estrutura geológica regional, geomorfologia e pela disponibilidade das fontes de recarga. A infiltração da chuva no nível freático e o fluxo de água subterrânea

em um aquífero em direção a uma área de descarga são regidos por leis físicas que descrevem mudanças na energia do lençol freático (Hiscock & Bense, 2014).

Nessa ordem de ideias entra o conceito de aquífero o qual define-se como aquele material geológico que pode acumular e fornecer água em quantidade suficiente para ser economicamente rentável (Leap, 1999). Portanto, para ser considerado aquífero, o material geológico deve possuir suficientes espaços para serem preenchidos (porosidade) e esses espaços devem estar interconectados para transmitirem a água (permeabilidade) até seu uso potencial (Sterrett, 2007).

As águas subterrâneas podem ser encontradas em espaços de poros de rochas sedimentares não consolidadas e consolidadas, em juntas e fissuras de rochas duras, em zonas de falhas e em cavernas cársticas (carbonatos). Aquíferos com reservatório de água armazenados em espaços porosos são chamados de aquíferos porosos (Kirsch, 2009).

Os termos aquífero e aquífero são relativos de zonas ou camadas de água na subsuperfície. Os aquíferos são as camadas com maior condutividade hidráulica ( $K$ ), e as camadas de confinamento (aquítardos) são as camadas com menor condutividade hidráulica. O termo aquífero é usado para descrever uma formação de menor permeabilidade que pode transmitir quantidades de água que são significativas em termos de fluxo do nível freático regional, mas do qual podem ser obtidas fontes insignificantes de água subterrânea.

Quando comparada a uma argila marinha com  $K = 10^{-9} \text{ cm/s}$  com uma camada de sedimentos glaciais com  $K = 10^{-4} \text{ cm/s}$  pode ser considerada um aquífero. Em outro local, uma lavoura de plantio direto pode ser considerada uma camada de confinamento quando comparado a uma camada de areia e cascalho com  $K = 10^{-2} \text{ cm/s}$  (Fitts, 2013). Exemplos de aquíferos incluem sedimentos fluviais e glaciais e argilas arenosas, rochas sedimentares com poucas fraturas e rochas cristalinas fraturadas.

Já um aquíclode é uma unidade geológica saturada de baixa permeabilidade que é incapaz de transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos comuns e pode atuar como uma barreira ao fluxo regional de água subterrânea. As rochas de aquíclode incluem argilas, folhelhos e rochas metamórficas (Hiscock & Bense, 2014).

Aquíferos diferem em seu grau de confinamento e sua relação com o lençol freático regional. Tem havido alguma variação na terminologia usada para tipos de aquíferos. As principais categorias de aquíferos em uso corrente são não confinados e confinados (Maliva, 2016) (Figura 3.14).

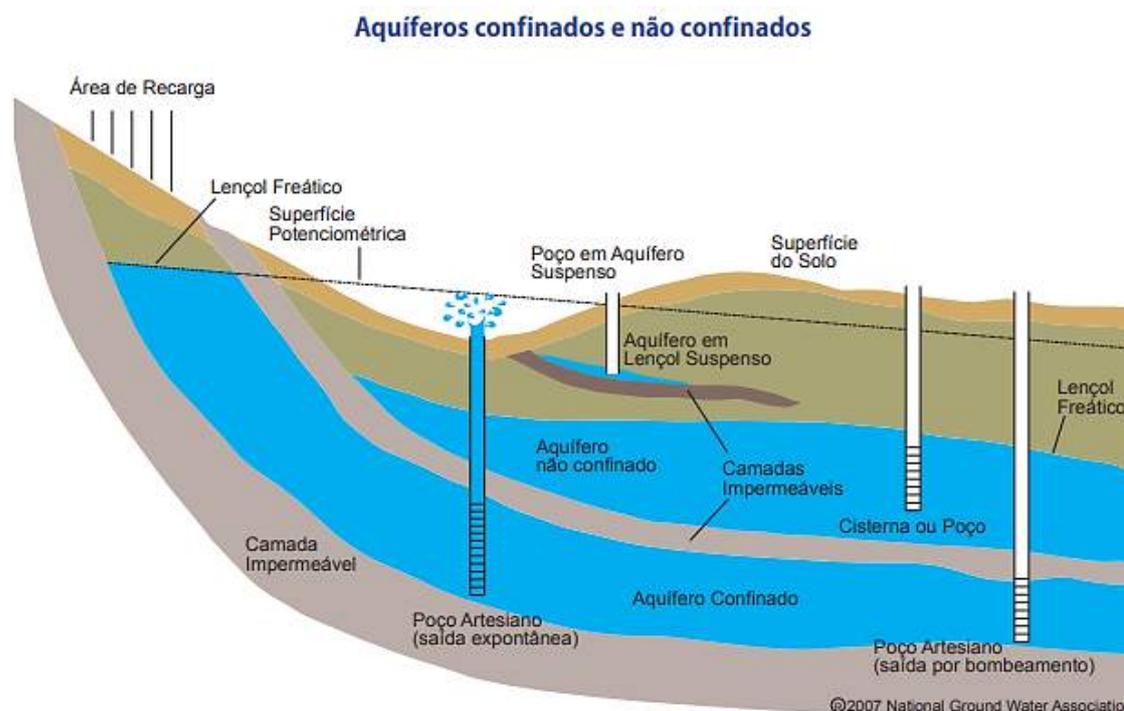


Figura 3.14: Morfolgia de um aquífero. Tomado de <https://pontobiologia.com.br/possivel-vender-privatizar-aquifero/>

### 3.2.1 Aquífero não-confinado

Um aquífero não-confinado é aquele em que o lençol freático ocorre dentro da camada do aquífero. Os aquíferos não-confinados, que também são chamados de aquíferos de lençol freático, são caracterizados por ter seu limite superior o lençol freático. O nível freático é tecnicamente definido como a superfície de um corpo de água subterrânea que está à pressão atmosférica. Este é o nível no qual a água fica em poços que penetram no corpo d'água. As águas subterrâneas que são produzidas a partir de aquíferos não confinados, em grande medida, ocorrem pela drenagem (desidratação) da água dos poros (Maliva, 2016).

### 3.2.2 Aquífero confinado

Em um aquífero confinado, toda a espessura da camada do aquífero é saturada e há uma camada de confinamento acima. O nível de água em um poço sem bombeamento, nesses aquíferos, se eleva acima de seu topo. Uma superfície

imaginária chamada superfície potenciométrica é definida pelos topos em poços num aquífero confinado. Em vista plana, a superfície potenciométrica seria um mapa de contorno que mostra a distribuição horizontal dos topos do aquífero (Fitts, 2013).

Os aquíferos confinados, por definição, são limitados acima e abaixo por unidades de confinamento, essencialmente impermeáveis. A superfície potenciométrica desses aquíferos ocorre acima do topo do aquífero. Aquíferos confinados também são chamados de aquíferos “artesianos”. A água que é produzida a partir desses aquíferos, deve-se à expansão da água e à compressão do aquífero. A superfície potenciométrica em um aquífero confinado durante o bombeamento decresce continuamente em função do uso do aquífero e não alcança uma condição de equilíbrio. Tipicamente, os estratos de confinamento' não são completamente impermeáveis. Além disso, alguma água pode ser produzida a partir de estratos confinantes (Maliva, 2016).

### **3.2.3 Zona de recarga**

A maioria das águas subterrâneas se origina como recarga em áreas de terra firme, sendo esta água infiltrada proveniente da precipitação da chuva na superfície do solo (Fitts, 2013). Por outro lado, é necessária informação sobre a precipitação e evaporação para estimar a recarga do aquífero.

Normalmente, a fonte de recarga do aquífero é a água da superfície da precipitação (Figura 3.15) e, em menor grau, a irrigação ou os poços de recarga artificialmente construídos. A taxa de recarga real é controlada por vários fatores: (1) a quantidade de precipitação não perdida para o escoamento superficial, (2) a umidade inicial do solo ou a taxa de saturação do solo, (3) a elevação da superfície de recarga relativa à área de descarga, (4) a condutividade hidráulica horizontal do aquífero a ser recarregado e seu gradiente hidráulico, que determina a taxa na qual a água recarregada será levada a cabo da área de recarga, (5) a condutividade hidráulica vertical do solo sendo recarregado, e (6) a presença de alterações feitas pelo homem na subsuperfície (Leap, 1999).

### **3.2.4 Área de descarga**

A água subterrânea é descarregada da zona saturada de volta à superfície do solo em áreas de baixa altitude, geralmente em nascentes ou no fundo das águas superficiais. Uma nascente é um lugar onde a água subterrânea é descarregada na

superfície do solo. Em uma nascente, o lençol freático intercepta a superfície do solo. As nascentes geralmente ocorrem perto da base de um declive. Muitas estão localizadas onde as fraturas ou a base de um aquífero cruzam a pendente (Fitts, 2013) (Figura 3.15).

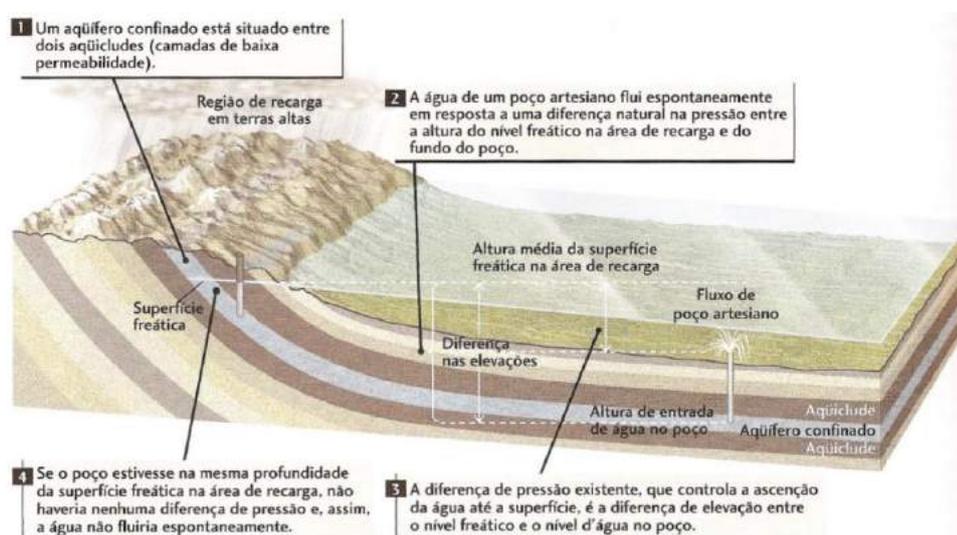


Figura 3.15: Zonas de recarga e descarga de um aquífero. Tomado de <http://files.professoralexeinowatzki.webnode.com.br/200000142-9b5179c4b5/aquifero.JPG>

### 3.3 Hidroquímica

A água subterrânea desempenha um papel importante no abastecimento da água e na ecologia, sobre tudo em regiões áridas e semiáridas. Além disso, a qualidade das águas subterrâneas, importante para sustentar a vida é controlada por fatores naturais e antropogênicos, como a estrutura geológica, a composição da precipitação, o processo geoquímico, a interação entre os lençóis freáticos e os aquíferos, assim como devido às atividades humanas. A interação desses fatores resulta em vários tipos de água, dependendo de diferentes processos hidrogeoquímicos que a água subterrânea sofre no espaço e ao longo do tempo (Narany, et al., 2014).

Nos últimos anos, grande ênfase foi dada nas considerações da qualidade da água, por efeito do consumo da vida humana, urbanização crescente, industrialização sem medidas adequadas de eliminação de resíduos, atividades agrícolas, etc Devido ao crescente consumo, o ambiente das águas subterrâneas está sendo poluído cada vez mais e em consequência, com o passar do tempo, os vastos reservatórios subterrâneos de água doce, que há algumas décadas estavam relativamente limpos, poderão estar gradativamente poluídos (Akram et al., 2011).

A química das águas subterrâneas é em grande parte uma função da composição mineral das rochas, havendo especial ênfase na interação rocha-água. Além dessa interação, a evaporação, a concentração e a diluição devido à precipitação também podem alterar a composição química das águas subterrâneas. Porém, a interação rocha-água é o principal processo, pois as fases sólidas (matéria inorgânica e orgânica) são as principais fontes dos constituintes dissolvidos nas águas. Por outro lado, durante o movimento das águas subterrâneas ao longo de seu trajeto, desde a recarga até as áreas de descarga, ocorrem várias reações químicas com fases sólidas. Essas reações químicas variam espacial e temporalmente, dependendo da natureza química da água inicial, das formações geológicas e do tempo de residência. Assim, as concentrações resultantes dos principais íons da água subterrânea podem ser usadas para identificar a intensidade da interação rocha-água e reações químicas (Lakshmanan & Kannan, 2007).

### 3.3.1 Interação rocha-água

Diferentes processos químicos, ocorrem durante a interação rocha-água, sendo eles: oxidação e redução, dissolução ou precipitação e processos de troca iônica. Os diferentes tipos de rochas são amplamente conhecidos (ígneas, metamórficas e sedimentares) e seus minerais podem dissolver-se total ou parcialmente em água de acordo com a resistência ao intemperismo químico ou à meteorização (Lakshmanan & Kannan, 2007) (Tabela 3.1 e Tabela 3.2).

Tabela 3.1: Resistência à meteorização das rochas

Rocha	Minerais dominantes	Resistência à meteorização
Arenito	Quartzo e feldspato	Alta
Siltito	Quartzo, feldspato e argilas	Alta
Xisto	Quartzo e argilas	Alta
Ardósia	Quartzo, biotita e moscovita	Alta
Filito	Quartzo, feldspato, biotita, moscovita, anfíbolito	Alta
Gneiss	Quartzo, feldspato, plagioclásio, biotita e anfíbolito	Alta
Granito	Quartzo e feldspato	Alta
Basalto	Olivina e piroxênio	Alta
Mármore	Calcita	Moderada
Calcário	Calcita	Baixa
Sal-gema	Halita	Baixa
Gesso rochoso	Gesso	Baixo

Tabela 3.2: Resistência à meteorização dos minerais

Mineral	Fórmula química	Resistência	Processo Químico
Quartzo	$SiO_2$	Muito alta	Dissolução
Argilas	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Muito alta	hidrólise
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Alta	hidrólise
Feldspato	$KAlSi_3O_8$	Moderadamente alta	hidrólise
Piroxênio	$(Ca, Mg, Mn, Na, Li)(Al, Mg, Fe, Mn)(Si, Al)_2O_6$	Moderada	Oxidação e hidrólise
Plagioclásio	$NaAlSi_3O_8; CaAl_2Si_2O_8$	Moderada	hidrólise
Hornblenda	$Ca_2(Mg, Fe, Al)_5(Al, Si)_8O_{22}(OH)_2$	Moderada	Oxidação e hidrólise
Biotita	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)_2$	Moderada	Oxidação e hidrólise
Olivina	$(Fe, Mg)SiO_4$	Moderadamente baixa	Oxidação e hidrólise
Pirita	$FeS_2$	Baixa	Dissolução e oxidação
Calcita	$CaCO_2$	Baixa	Dissolução
Dolomita	$CaMg(CO_2)_2$	Baixa	Dissolução
Halita	$NaCl$	Muito baixa	Dissolução
Gesso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Muito baixa	Dissolução

A dissolução dos minerais na água é governada pela termodinâmica. A dissolução ocorre quando a solução é insaturada em relação às suas componentes tais como rochas e solos. Desde que os componentes sólidos estejam presentes em quantidade suficiente e não haja barreira cinética, esse processo pode levar a um equilíbrio termodinâmico. Por outro lado, o processo inverso da dissolução é a precipitação, isto é, a formação de uma fase sólida a partir dos componentes dissolvidos de uma solução supersaturada. Além disso, o intemperismo dos minerais pode ser entendido como uma dissolução contínua. Esse processo pode ser muito complicado, levando a equilíbrios multifásicos, nos quais mais de uma fase sólida, solução e fase gasosa podem estar presentes (Nagy & Konya, 2009) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Reações químicas de interesse dos minerais mais comuns presentes nos aquíferos

Mineral	Reação química
Albita	$2NaAlSi_3O_8 + 9H_2O + 2H^+ \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4H_4SiO_4 + 2Na^+$
Anfibólio	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 14CO_2 + 22H_2O \rightarrow 2Ca^{2+} + 5Mg^{2+} + 14HCO_3^- + 8Si(OH)_4$
Anidrita	$CaSO_4 \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-}$
Anortita	$CaAl_2Si_2O_8 + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+} + 2HCO_3^-$

Biotita	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)_2 + H^+$ $\rightarrow (Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2(Mg, Fe)_3(OH)_6 + SiO_2 + K^+$
Calcita	$CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$
Diópsido	$CaMgSi_2O_6 + 3CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + Mg^{2+} + 2HCO_3^- + 2SiO_2$
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2 \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$
Feldspato	$KAlSi_3O_8 + H_2O \rightarrow HAlSi_3O_8 + K^+ + OH^-$
Fluorita	$CaF_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2F^-$
Gesso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$
Gibbsita	$Al_2O_3 \cdot 2H_2O + H_2O \rightarrow 2Al^{3+} + 6OH^-$
Halita	$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$
Hornblenda	$Ca_2(Mg, Fe, Al)_5(Al, Si)_8O_{22}(OH)_2 + (H^+, Mg^{2+}, K^+)$ $\rightarrow K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)_2 + (Na^+, Ca^{2+})$
Illite	$K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{1.8}Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2 + 8H^+ + 2H_2O$ $\rightarrow 0.25Mg^{2+} + 0.6K^+ + 2.3Al^{3+} + 3.5H_4SiO_4$
Magnetita	$Fe_3O_4 + 4H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2Fe(OH)_4^-$
Montmorilonita	$Na_{0.33}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2 + 6H^+$ $\rightarrow 0.33Mg^{2+} + 0.33Na^+ + 1.67Al^{3+} + 2H_2O + 4H_4SiO_4$
Moscovita	$2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 3H_2O + 2H^+ \rightarrow 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+$
Olivina	$(Fe, Mg)SiO_4 + 2CO_2 + 2H_2O \rightarrow Mg^{2+} + Fe^{2+} + 2HCO_3^- + 2OH^- + SiO_2$
Ortoclásio	$2KAlSi_3O_8 + 11H_2O \rightarrow Si_2O_5Al_2(OH)_4 + Si(OH)_4 + 2K^+ + 2OH^-$
Pirita	$FeS_2 + 2H^+ + H_{2(aq)} \rightarrow Fe^{2+} + 2H_2S$
Piroxênio	$CaMg(Si_2O_6) + 4CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^- + 2Si(OH)_4$
Quartzo	$SiO_2 + 2H_2O \rightarrow H_4SiO_4$
Silvite	$KCl \rightarrow K^+ + Cl^-$

A seguir, apresentam-se vários tipos de água contendo a presença de íons dissolvidos devido à interação rocha-água.

### 3.3.1.1 Principais reações químicas em águas subterrâneas

Quando se fala sobre água subterrânea há que tomar em consideração o entorno no qual a água se encontra confinada. Portanto, diferentes reações podem acontecer. A seguir, descrevem-se as principais reações que podem ocorrer, conforme relacionado por Somaratne e Frizenschaf (2013):

- *Na-Cl ou Na-Ca-Cl*

Na ausência de evaporitos, água contendo Na-Cl ou Na-Ca-Cl, ocorre devido ao enriquecimento dos íons Na e Cl, por evaporação.

- *Na-Mg-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub>/Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl*

A presença de Na-Mg-Ca ou Na-Ca-Mg indica que a dissolução dolomítica está ocorrendo em uma área de captação.

- *Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl/Ca-Na-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl*

Este é o caso típico de água encontrada em aquíferos de calcários. O tipo de água Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl representa água recentemente recarregada com abundância de CO<sub>2</sub> dissolvido, indicando a ocorrência da dissolução da calcita.

- *Na-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub>/Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl*

Os tipos de água Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl representam uma água do tipo Ca-HCO<sub>3</sub> afetada pela mistura com águas contendo Na-Cl ou que passou por processos de troca catiônica.

### **3.3.2 Diagrama de Piper**

O diagrama de Piper expressa uma combinação de cátions e ânions formada por dois triângulos, em que um deles representa os ânions (Cl, SO<sub>4</sub> e HCO<sub>3</sub> + CO<sub>3</sub>) e o outro os cátions (Mg, Ca e Na+K). A translação da soma dos valores de concentração de íons dos triângulos inferiores para o rombo principal superior fornece a classificação do tipo de água analisada dada pelos rombos menores (Figura 3.16) (Hounslow, 1995).

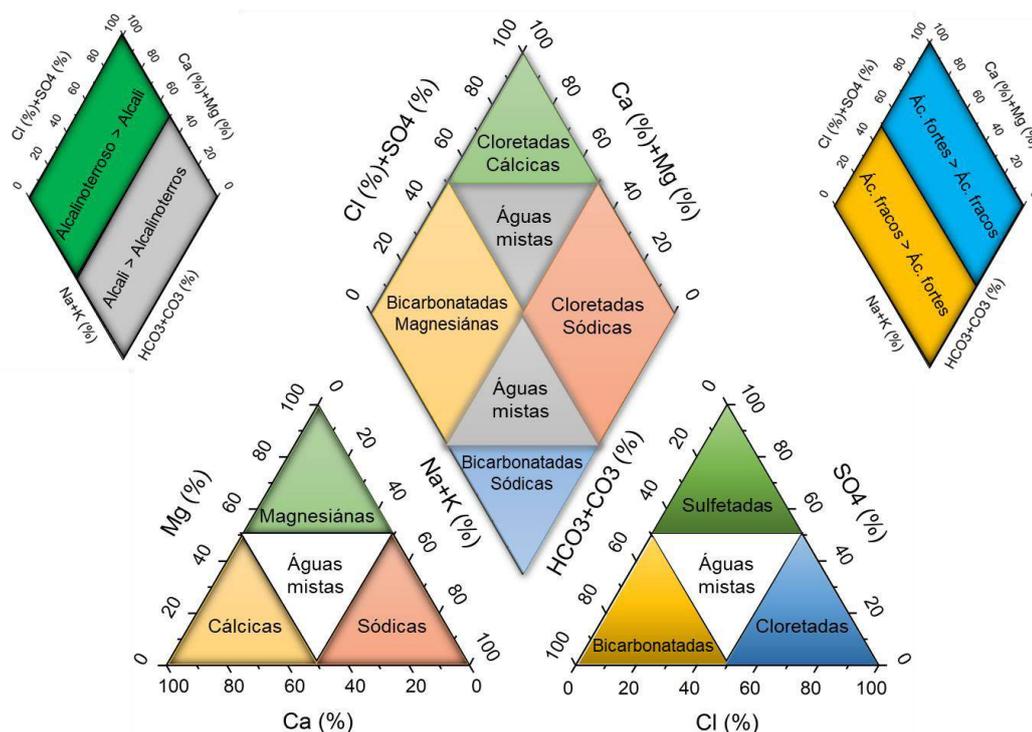


Figura 3.16: Demonstração do Diagrama de Piper e os tipos de água. Modificado de Piper (1944)

Por outro lado, Hounslow (1995) menciona que, para os aquíferos, os lugares onde se posicionam os pontos trazem informações sobre a relação que a água possa ter com a geologia, tal como se mostra na Figura 3.17 onde cada número relaciona a concentração dos íons com o tipo de rocha.

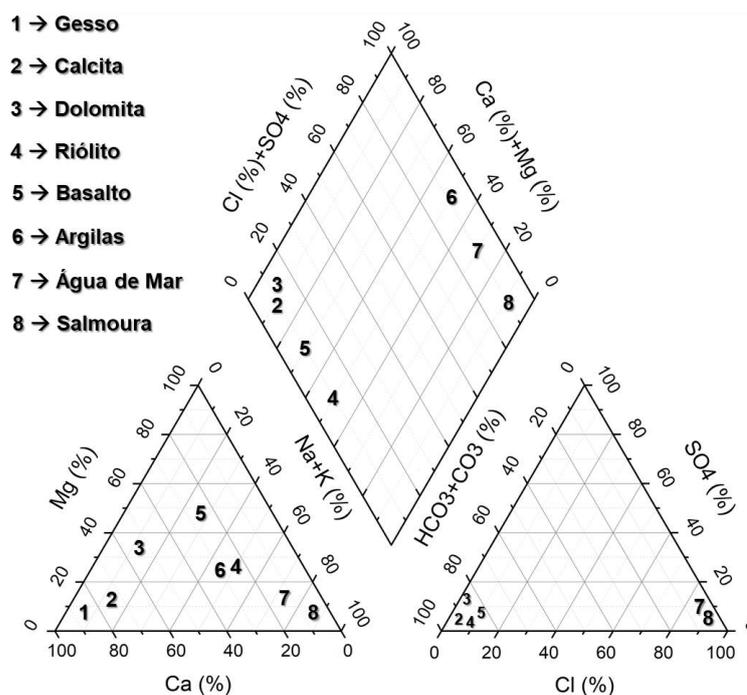


Figura 3.17: Relação entre o Diagrama de Piper e a geologia. Modificado de Piper (1944)

### **3.3.3 Efeito de elementos químicos na saúde**

Os reservatórios de água não estão isentos de poluição por agentes externos ou por dissolução, oxidação ou hidrólise dos minerais. Portanto precisa-se conhecer os efeitos que podem ter na saúde os diferentes elementos químicos na água e esta seja consumida, sendo tais efeitos apresentados a seguir:

#### **3.3.3.1 Alumínio (Al)**

A toxicidade do alumínio é um grande problema em pessoas com doença renal. A intolerância ao alumínio também causa dermatite de contato e distúrbios digestivos. Além disso, novas evidências sugerem que o alumínio pode se ligar a receptores de estrogênio, causando aumento da expressão gênica em células de câncer de mama *in vitro* (Chen & Thouas, 2017).

#### **3.3.3.2 Arsênio (As)**

Entre os sintomas da ingestão de arsênio, entram fraqueza, perda de apetite, perda de peso e anemia, além dos sintomas gastro-intestinais, sendo os mais comuns a cólica abdominal, náusea e diarreia crônica (Rodrigues & Malafaia, 2008)

#### **3.3.3.3 Bário**

Em altas concentrações, o bário causa vasoconstrição por sua estimulação direta do músculo arterial, peristaltismo como resultado da estimulação violenta de músculos lisos e convulsões e paralisia após a estimulação do sistema nervoso central. Dependendo da dose e da solubilidade do sal de bário, a morte pode ocorrer em poucas horas ou alguns dias (World Health Organization, 2004)

#### **3.3.3.4 Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)**

O cálcio e o magnésio podem ser considerados como elementos com efeitos similares na contribuição para a dureza da água (Akram et al., 2011).

O cálcio na água potável tem sido associado a doenças cardiovasculares, certos defeitos no sistema nervoso, mortalidade pré-natal e vários tipos de câncer. Altas concentrações de Ca na água podem levar à formação de escamas sólidas em tubulações, incrustação de utensílios de cozinha e aumento do consumo de sabão (Akram et al, 2011).

O cálcio apresenta alguns problemas clínicos graves, sendo os cálculos renais o efeito colateral mais comum e a calcificação tecidual local, por vezes, em torno de tecidos mortos ou moribundos. O envenenamento agudo por cálcio é raro, embora o consumo excessivo de suplementos de carbonato de cálcio possa causar insuficiência renal.

Os sintomas de sobrecarga de magnésio incluem diarreia, respiração difícil e depressão do sistema nervoso central, causando fraqueza muscular, letargia, sonolência e hiperexcitabilidade (Chen & Thouas, 2017).

#### 3.3.3.5 Cloretos (Cl)

Concentrações elevadas de cloretos na água potável têm riscos significativos para a saúde. O cloreto também foi relatado como associado ao câncer colorretal e de bexiga em vários estudos epidemiológicos. Também causa corrosão em encanamentos hidráulicos (Akram et al., 2011).

#### 3.3.3.6 Ferro (Fe)

O ferro apresenta toxicidade quando está presente em concentrações em torno de 20 mg/kg e torna-se letal acima de 60mg/kg. O Fe reage com peróxidos e causa danos ao fígado, acidose metabólica, coagulopatia e até coma (Chen & Thouas, 2017).

#### 3.3.3.7 Manganês (Mn)

Em humanos, foi relatado que a exposição excessiva ao Mn induz o manganismo, que é um distúrbio neurológico semelhante à doença de Parkinson (Chen & Thouas, 2017).

#### 3.3.3.8 Potássio (K)

Este elemento, quando presente em doses elevadas na água consumida pode aumentar a pressão arterial, levando à hipertensão em algumas pessoas (Akram et al., 2011).

#### 3.3.3.9 Selênio (Se)

Os sintomas em pessoas com altos níveis de selênio urinário incluem distúrbios gastrointestinais, descoloração da pele e dentes cariados. Crianças que vivem em área selenífera exibem mais alterações patológicas nas unhas, perda de cabelo e

dermatite. A alta ingestão de selênio está associada a várias doenças específicas e ao potencial de efeitos adversos. O potencial para efeitos bioquímicos que podem afetar a incidência de doenças tais como o câncer e as doenças cardiovasculares permanece incerto, tanto para baixas como para altas ingestões (World Health Organization, 2011)

#### 3.3.3.10 *Sódio (Na)*

Níveis elevados de sódio na água potável podem causar problemas de saúde humana como, por exemplo, hipertensão. Da mesma forma, o cloreto de sódio (NaCl) em alta concentração pode causar vômito, torção muscular, rigidez etc. (Akram et al., 2011).

#### 3.3.3.11 *Sulfatos (SO<sub>x</sub>)*

Altos níveis de sulfato na água potável causam distúrbios gastrointestinais em seres humanos e corrosão em tubulações (Akram et al., 2011).

### **3.4 Métodos geofísicos aplicados na hidrologia**

As técnicas geofísicas de superfície têm sido amplamente utilizadas nos campos de exploração petrolífera, mineração e na engenharia. As investigações hidrológicas usaram técnicas geofísicas de superfície no passado, mas apenas num grau limitado. Avanços recentes em equipamentos eletrônicos e programas de interpretação computacional e o desenvolvimento de novas técnicas tornam a geofísica de superfície uma ferramenta eficaz para os hidrologistas. Essas técnicas devem ser consideradas no processo de planejamento do projeto e usadas quando apropriado. Tratadas como uma ferramenta, semelhante a testes de bombeamento, modelagem de simulação, perfuração de teste, mapas geológicos, técnicas geofísicas de furos e assim por diante, essas técnicas podem ser usadas para ajudar a resolver problemas hidrológicos (Haeni, 1986b). Por outro lado, para utilizar a técnica de forma eficaz, os hidrologistas devem entender seus princípios, limitações, vantagens, equipamentos, procedimentos de campo e de interpretação, assim como seus usos potenciais (Haeni, 1986a).

#### **3.4.1 Sísmica de Refração**

O método de refração sísmica baseia-se na medida do tempo de deslocamento das ondas mecânicas refratadas criticamente nas interfaces entre as camadas de

diferentes propriedades físicas, devido ao contraste entre impedâncias acústicas ( $I = \rho V$ ; onde  $\rho$  é a densidade do meio e  $V$  a velocidade da camada). A energia sísmica é gerada por um impacto controlado na superfície (ou a uma certa profundidade), se propaga na forma de onda elástica através do subsolo interagindo com as diferentes camadas, de modo que uma parte da energia seja refletida e permaneça no mesmo meio que a energia incidente, e o resto seja transmitido para o outro meio com uma forte mudança de direção de propagação devido ao efeito de refração. Dessa interação, a sismica de refração considera apenas refrações com ângulo crítico (raio de cor roxo na Figura 3.18), uma vez que são as únicas ondas refratadas que atingem a superfície e podem ser captadas pelos receptores (Bendezu, 2011).

Quando as ondas sísmicas penetram no subsolo, parte de sua energia atinge camadas geológicas abaixo da superfície e depois é refratada de volta à superfície. Por tal razão, os métodos de refração frequentemente são usados para calcular a profundidade dessas camadas junto com a velocidade de propagação da onda dentro das camadas. Assim, os métodos de refração são úteis para fornecer uma avaliação da geometria de estratificação bruta, bem como o estado da camada, com base nas velocidades sísmicas, desde que a velocidade sísmica aumente monotonamente com a profundidade (Steeple, 2005).

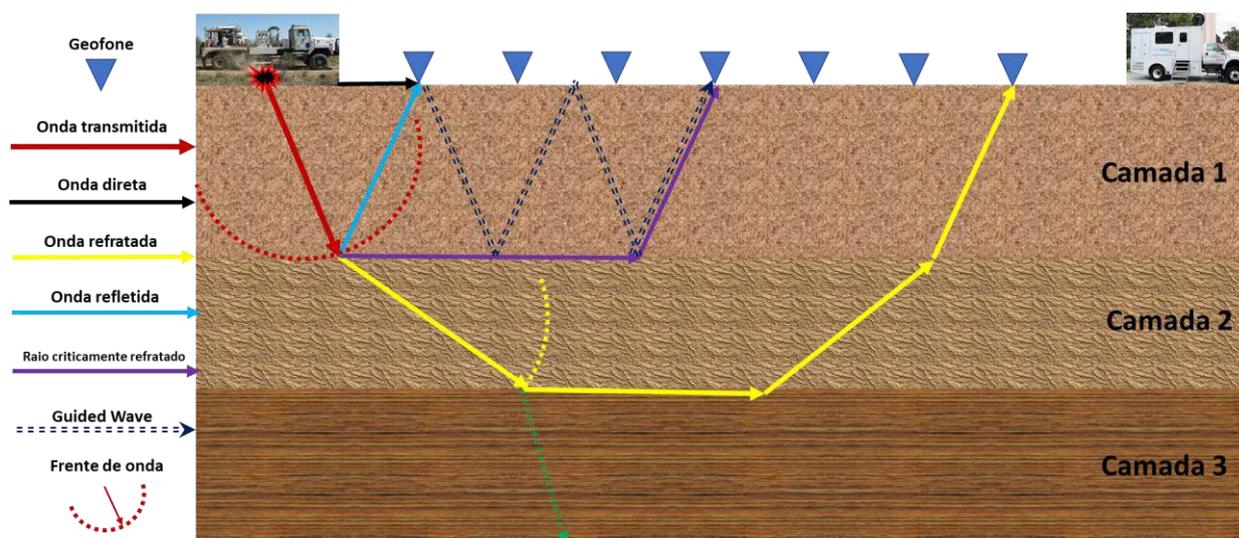


Figura 3.18: Representação das ondas no método sísmico. Modificado de García (2019)

#### 3.4.1.1 Propagação das ondas sísmicas

A propagação de uma onda sísmica no subsolo segue o comportamento estabelecido pelo Princípio de Huygens, citado por Fagin (1991), que afirma o

seguinte: cada ponto de uma frente de onda inicial pode ser considerado como uma fonte de ondas secundárias que se estendem em todas as direções com a mesma velocidade, frequência e comprimento de onda que a frente de onda de onde provêm.

As refrações são observadas nos sismogramas das ondas P (primárias) ou S (secundárias) (as chamadas primeiras quebras ou *first break*, como são conhecidas). Podem ser consideradas como a realização mais óbvia do princípio de Fermat, que diz que uma onda sempre escolhe o caminho mais rápido para propagar-se de um ponto para outro. Normalmente, as primeiras chegadas da onda podem ser identificadas facilmente no sismograma, de modo que formam uma base robusta de interpretação (Rabbel, 2009).

Quando uma onda encontra uma mudança nas propriedades elásticas do meio, uma fração da energia da onda é refletida e outra fração é refratada. As relações geométricas entre os ângulos de reflexão e refração ( $\theta$  e  $\gamma$ ) deste princípio podem ser representadas pela equação de Willebrord Snell (García Moreno, 2017) (Figura 3.19). Para o caso de uma onda primária incidente com velocidade  $v_{p1}$  e transmitida com uma velocidade  $v_{p2}$ , bem como uma onda secundária incidente com velocidade  $v_{s1}$  e transmitida com uma velocidade  $v_{s2}$ , ela é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\sin\theta_1}{V_{p1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{p2}} = \frac{\sin\gamma_1}{V_{s1}} = \frac{\sin\gamma_2}{V_{s2}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

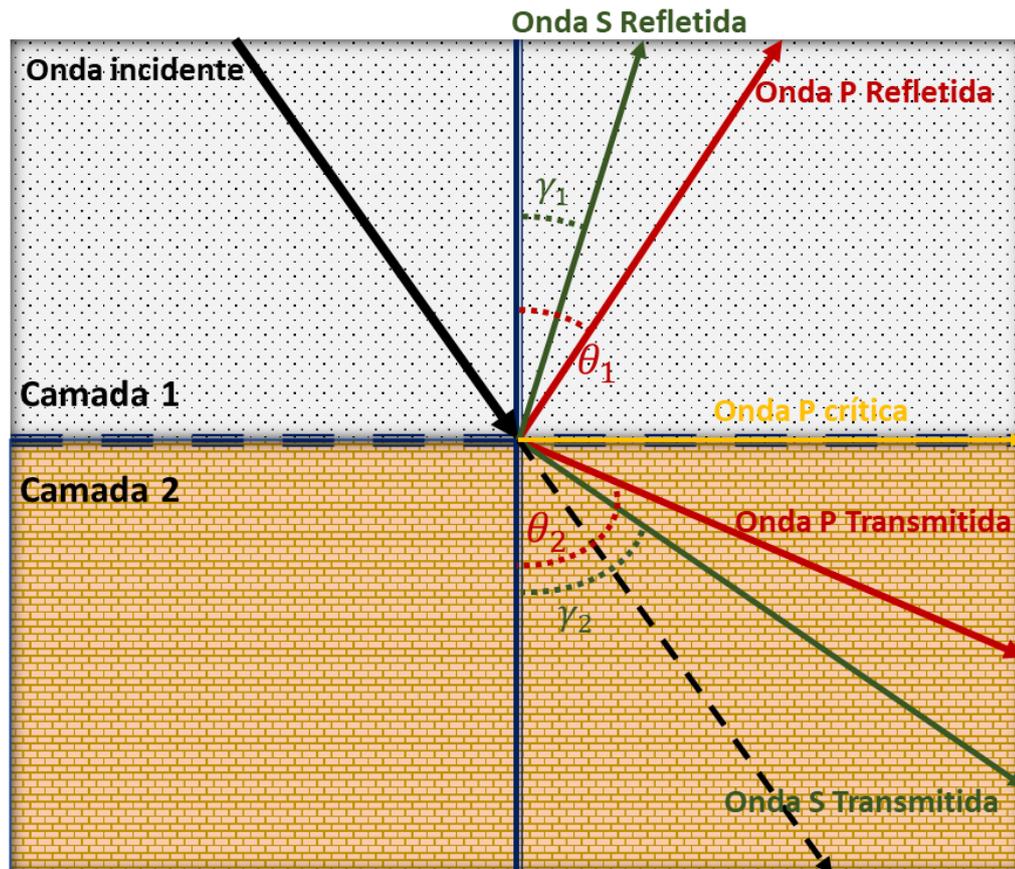


Figura 3.19: Representação da Lei de Snell. Modificado de García (2019)

Por outro lado, as ondas mecânicas, obedecem à equação de ondas, a qual descreve como um distúrbio unidimensional  $y(x, t)$  que se propaga como uma onda com uma velocidade  $v$  ao longo do eixo  $x$ . A equação geral das ondas é expressa conforme indicado na seguinte equação (válida para 1D):

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad \text{Eq. 3.2}$$

#### 3.4.1.2 Relação Tempo-Velocidade-Distância

As ondas sísmicas são transmitidas e propagadas como foi apresentado na Figura 3.18, acontecendo uma refração total quando a onda incide na superfície com um ângulo crítico, propagando-se paralelamente no topo da interface entre duas camadas (Figura 3.19). Para que haja reflexão interna total é necessário que a velocidade aumente com a profundidade. As respostas devido ao trânsito das ondas no subsolo são registradas nos geofones por meio das primeiras chegadas de sinais. Assim, é possível obter um modelo nas espessuras das camadas, obtendo o tempo

de trânsito duplo para cada chegada (Figura 3.20 até Figura 3.22) (desde a Eq. 3.3 até a Eq. 3.8).

Na figura Figura 3.20 tem-se o caso de uma camada de espessura  $h_1 = z_1$  com uma velocidade  $v_1 = V_1$  sobre um segundo meio que possui uma velocidade  $v_2 = V_2$ . Nesse caso se teria o tempo da onda direta  $t_0$  (onda que se transmite na superfície) o tempo entre a interface das primeiras duas camadas  $t_1$ .

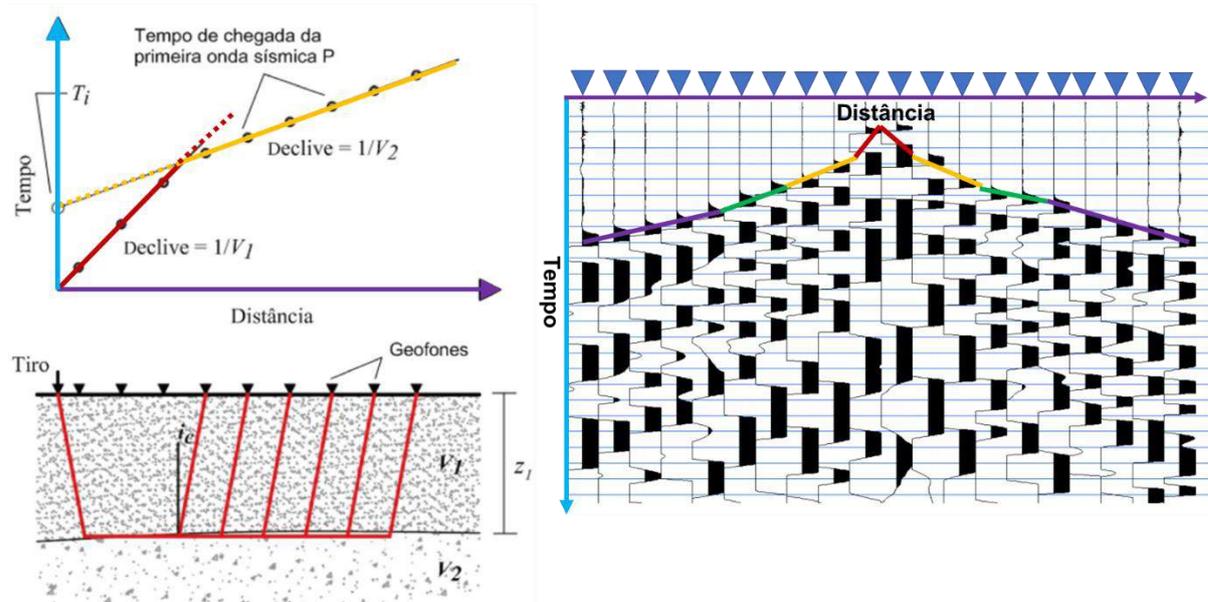


Figura 3.20: Representação da primeira onda refratada. Modificado de Neves et al. (2014)

$$t_0 = \frac{x}{v_1}$$

Eq. 3.3: Onda direta

$$t_1 = \frac{x}{v_2} + 2h_1 \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}}$$

Eq. 3.4: Primeira onda refratada

Quando se está em presença de uma terceira camada, existirá um tempo de chegada para a onda refratada ( $t_2$ ), a qual se transmitirá na interface da segunda e terceira camada. Nesse caso, já entrarão em consideração novos parâmetros, tais como a espessura da segunda camada ( $h_2$ ) e a velocidade da terceira ( $v_3^2$ ) obtendo a Eq. 3.5 representada graficamente na Figura 3.21, onde pode observar-se num diagrama tempo-distância as diferentes ondas, sendo de cor vermelha a onda direta, amarela aquela viajante entre a interface da camada 1 e 2, e de cor verde aquela entre a interface 2 e 3.

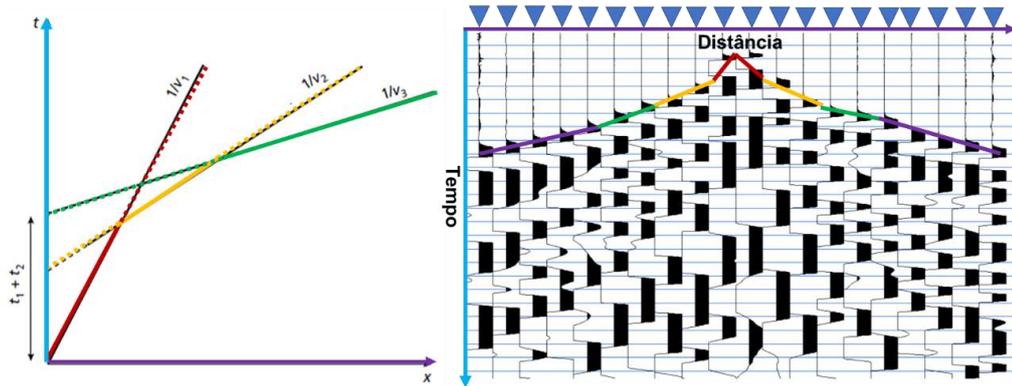


Figura 3.21: Representação da segunda onda refratada. Modificado de Neves et al. (2014)

$$t_2 = \frac{x}{v_3} + 2h_1 \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_3^2}} + 2h_2 \sqrt{\frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_3^2}} \quad \text{Eq. 3.5: Segunda onda refratada}$$

De forma análoga aos dois casos apresentados anteriormente, incluindo uma quarta camada, obter-se-ia a Eq. 3.6, representada na Figura 3.22, que além de mostrar os tempos de viagem, pode-se observar nela as primeiras chegadas correspondentes às ondas refratadas em cada camada, tendo que  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  se referem aos pontos onde existem os ângulos críticos  $i_{c1}$ ,  $i_{c2}$  e  $i_{c3}$ , enquanto  $h$  define a espessura de cada camada.

Ademais, assim como menciona-se para a Lei de Snell, quando uma onda muda de meio, existe um ângulo  $\theta_i$  crítico de transmissão da onda no segundo meio. Assim, quando a onda se propaga ao longo do ângulo crítico pode-se relacionar a velocidade de propagação de cada camada com o ângulo formado entre a interface das camadas e a direção da frente de ondas (Eq. 3.7). Por outro lado, obtém-se uma relação entre o tempo de qualquer camada com o ângulo formado entre a interface e a onda (Eq. 3.8).

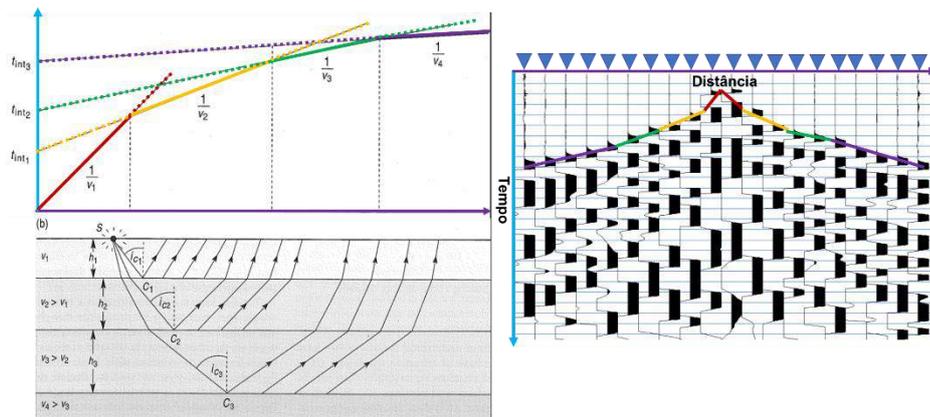


Figura 3.22: Representação da terceira refração. Modificado de Neves et al. (2014)

$$t_3 = \frac{x}{v_4} + 2h_1 \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_4^2}} + 2h_2 \sqrt{\frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_4^2}} + 2h_3 \sqrt{\frac{1}{v_3^2} - \frac{1}{v_4^2}}$$

Eq. 3.6: Terceira onda direta

$$2h_i \sqrt{\frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{v_n^2}} = \frac{2h_i \cos(\theta_i)}{v_i}$$

Eq. 3.7: Relação velocidade ângulo crítico

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2h_i \cos(\theta_i)}{v_i}$$

Eq. 3.8: Relação genérica do tempo de viagem da onda

### 3.4.1.3 Estratos inclinados

Em alguns casos, quando se observam as curvas  $\overline{AB}$  (viagem da onda desde o ponto A até B) e  $\overline{BA}$  (viagem da onda desde o ponto B até A), elas podem apresentar tempos de viagem iguais, mas trajetórias diferentes. Quando isso ocorre, pode tratar-se da ocorrência de estratos inclinados como representado na Figura 3.23, no qual se apresentam dois estratos de velocidades diferentes, tendo que a viagem  $\overline{AB}$  demoraria mais do que a  $\overline{BA}$ , devido que a onda demoraria mais em ir desde o ponto A até a interface em comparação de B até a interface, mostrando esses tempo no gráfico da Figura 3.23, onde o termo ascendente (asc) se refere à viagem feita pela onda desde A até B e descendente (des), vice-versa, enquanto t define o tempo e m a inclinação da reta do tempo de viagem.

Mediante trigonometria, podem deduzir-se as equações para o tempo de viagem e as velocidades registradas. Eis aqui quando princípio da reciprocidade se aplica ao princípio de Fermat, indicando que o tempo de propagação de uma onda desde um ponto A até outro ponto B deveria ser o mesmo que se o trânsito dela fosse

desde B até A. Além disso, se as velocidades das ondas refratadas descendentes e ascendentes variarem no máximo de 10%, uma média entre elas seria uma boa aproximação para obter a velocidade do estrato (Estrada, Prospecção Geofísica, 2008)

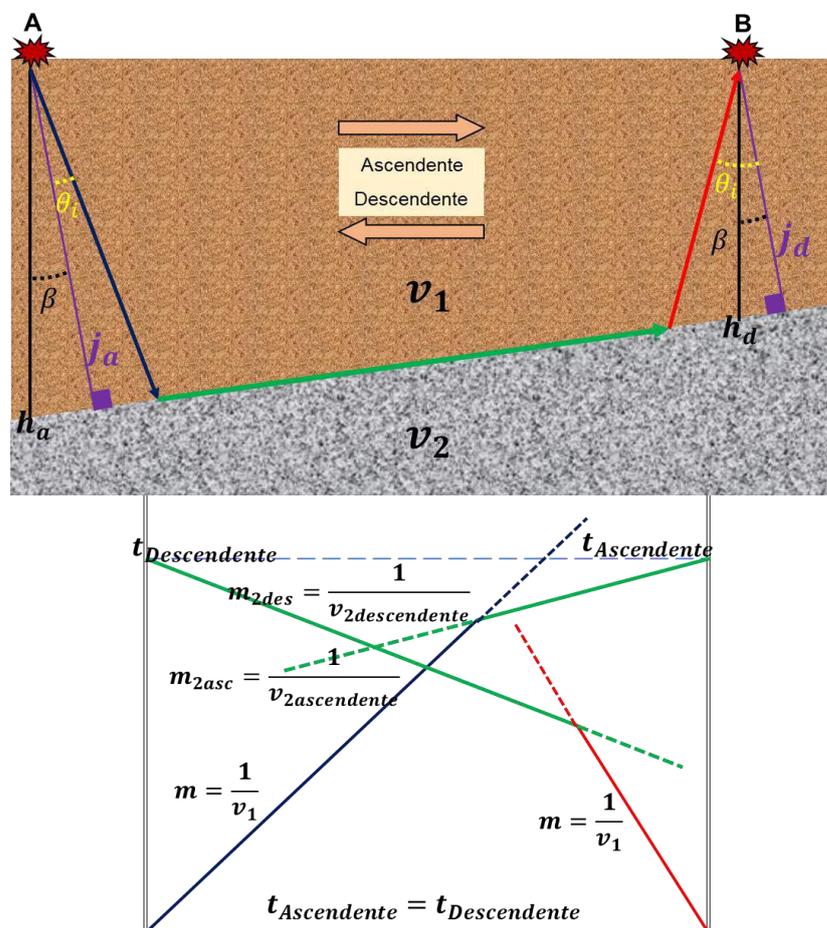


Figura 3.23: Representação de estratos inclinados. Modificado de García (2019)

### 3.4.2 Velocidade das ondas sísmicas

Um dos fatores mais importante para se classificar os meios estudados pelo método da sísmica de refração é a velocidade. Ela é obtida no processamento dos dados e varia de acordo com o meio no qual as ondas se propagam. Além disso, também dentro dos meios de propagação, existe uma variação das velocidades devido à variação da densidade das rochas. A Tabela 3.4: Velocidade da onda P em diferentes materiais apresenta os intervalos de valores de velocidade de propagação das ondas primárias  $V_p$  em diferentes tipos de rochas. A determinação da velocidade de propagação da onda sísmica a partir do sismograma e a comparação com a tabela fornece uma indicação do tipo de rocha presente na região estudada.

Tabela 3.4: Velocidade da onda P em diferentes materiais (modificada de Gall Pires (2019))

<b>Material</b>	<b><math>v_p</math> (m/s)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Água	1450-1530	1000
Aluvião	1800-2200	1800-2400
Anidrita	3500-5500	2900-3000
Areia (saturada de água)	1500-2000	1900-2100
Areia (seca)	400-1200	1500-1700
Areia (terra amarela)	200-2000	1900
Arenito	1400-4500	2100-2400
Argila	1000-2500	2000-2400
Basalto	5500-6500	2700-3100
Calcário	3500-6000	2400-2700
Carvão	2200-2700	1300-1800
Dolomita	2500-6500	2500-2900
Estuário de lama	300-1800	1200
Gabro	6400-7000	2850-3120
Gelo	3400	900
Gesso	2000-3500	1800-2300
Gnaisse	3500-7600	2610-2990
Granito	4500-6000	2500-2700
Limonita (dura)	2800-7000	3600-4000
Limonita (suave)	1700-4200	3600-4000
Mármore	3780-7000	2600-2750
Peridotita	7800-8400	3100-3400
Sal	4000-5500	2100-2300
Sedimentos não consolidados	100-500	2200-3000
Xisto	2000-4100	2400-2800

### **3.4.3 Métodos elétricos**

Os métodos de prospecção elétrica de superfície têm sido usados, há muito tempo, para resolver uma grande quantidade de problemas na investigação de águas subterrâneas. A aplicação desses métodos baseia-se na medição da resistividade elétrica do subsolo (Goldman, 1988). Esses métodos medem campos de potencial elétrico, tanto naturais (existentes na crosta terrestre) como artificiais, usando variações das propriedades elétricas (resistividade, condutividade, atividade eletroquímica ou constante dielétrica), tanto das rochas (minerais) como da água que preenche os poros das rochas. Os métodos elétricos são utilizados como métodos de

reconhecimento e detalhamento, na investigação de águas subterrâneas. Os mapas de isorresistividade obtidos a partir deles, permitem definir os limites do aquífero, o nível de água neles, a presença de água salgada e permite o mapeamento de unidades litológicas (López Ávalos et al, 2008).

A vulnerabilidade dos aquíferos está intimamente relacionada com a heterogeneidade da argila formadora da rocha reservatório. O teor de argila da formação define a resistividade da formação elétrica, de modo que as formações argilosas, menos permeáveis, apresentam baixas resistividades e formações arenosas mais permeáveis, apresentam altas resistividades. O método geoeletrico é capaz de mapear formações com resistividades baixas e altas e, portanto, é uma ferramenta valiosa para estudos de vulnerabilidade de aquíferos (Møller et al, 2006).

#### *3.4.3.1 Fluxo de corrente elétrica no subsolo*

A descrição geológica na qual o método geoeletrico se baseia consiste em interpretar os diferentes materiais do subsolo a partir das variações da resistividade durante a passagem da corrente elétrica. Dependendo da corrente gerada e aplicada no solo ou de fontes existentes, há duas categorias de métodos: os de correntes artificiais e os de correntes naturais. Por sua vez, dependendo do tipo de corrente que circula no solo, os métodos são subdivididos em DC e AC (Estrada, 2013). O fluxo de corrente elétrica através de rochas ou sedimentos pode ser descrito pela Lei de Ohm que estabelece que a queda de potencial  $\Delta V$  entre 2 pontos através dos quais flui uma corrente elétrica de intensidade  $I$ , é proporcional à corrente e também à resistência  $R$  que o meio oferece para a passagem de corrente (Auge, 2008).

A resistividade de um material é definida na segunda lei de Ohm, na qual se utiliza um fio (com diâmetro muito menor em relação com o comprimento) para determinar sua resistividade própria ( $\rho$ ) (Figura 3.24) (Eq. 3.9). A unidade da resistividade é ohm-metro. A segunda lei de Ohm (Eq. 3.10) estabelece que existe um gradiente de potencial através do comprimento do fio (Eq. 3.11)

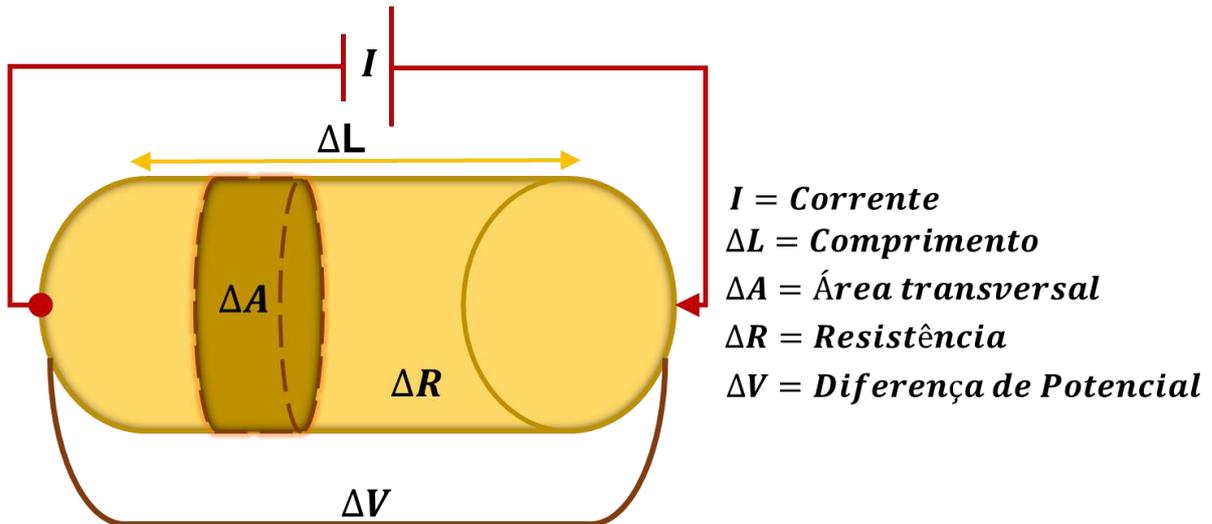


Figura 3.24: Cilindro condutor. Modificado de Orellana (1982)

$$\rho = \frac{\Delta R \Delta A}{\Delta L} \rightarrow \Delta R = \frac{\rho \Delta L}{\Delta A}$$

Eq. 3.9: Resistividade de um material

$$\Delta V = I \Delta R$$

Eq. 3.10: Lei de Ohm

$$\frac{\Delta V}{\Delta L} = \frac{\rho I}{\Delta A} = \rho i$$

Eq. 3.11: Gradiente de potencial através do volume

Na equação 3.11, define-se a densidade de corrente  $i$  como a corrente que flui através de uma seção reta de um condutor. Nesse caso,  $i$  tende a ser homogênea no espaço. Entretanto, quando corrente elétrica é introduzida no solo por um eletrodo, como mostrado na Figura 3.26,  $i$  tende a diminuir à medida que se distancia radialmente do ponto de injeção. Neste caso, a área por onde flui a corrente é uma semiesfera de raio  $r$  e, portanto, a densidade de corrente decresce com o quadrado da distância, conforme a Equação 3.12. De forma similar, surge um gradiente de potencial, representado pela Equação 3.13. Considerando-se um meio homogêneo, pode-se realizar a integração do gradiente de potencial desde uma distância  $r$  do ponto de injeção da corrente até uma distância muito grande, suposto infinito. Assim, chega-se à equação 3.14 que fornece o potencial medido em qualquer ponto do meio em relação ao ponto de injeção de corrente. As curvas concêntricas de mesmo raio  $r$  apresentam o mesmo potencial elétrico e são chamadas equipotenciais.

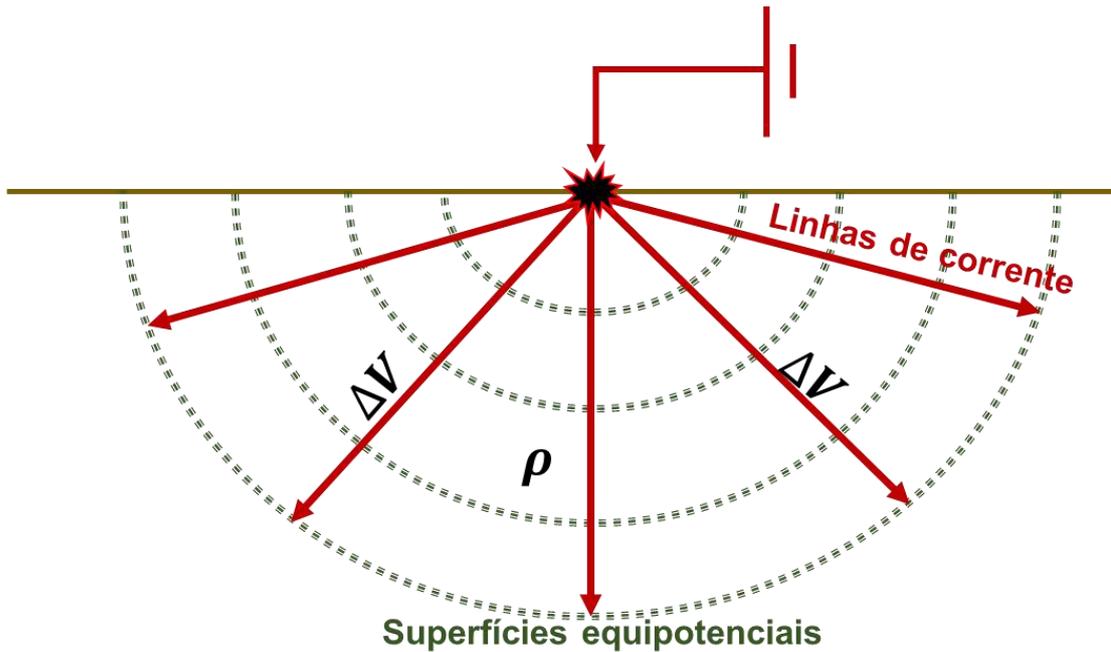


Figura 3.25: Fluxo de corrente no subsolo mediante um único eléctrodo. Modificado de Orellana (1982)

$$i = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Eq. 3.12: Densidade de corrente

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \rho \frac{I}{2\pi r^2}$$

Eq. 3.13: Gradiente de potencial associado a I

$$V_r = \int_r^\infty \Delta V \int_r^\infty \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr = \rho \frac{I}{2\pi r}$$

Eq. 3.14: Potencial à distância r

Para medir o potencial em outros pontos, acrescentam-se mais três eletrodos: um de corrente chamado B (destaca-se que se precisa dos eletrodos A e B para que a corrente possa fluir) e dois de potencial (C e D) (Figura 3.26), entre os quais será medida uma diferença de potencial  $\Delta V$  (Eq. 3.15).

Para considerar a diferença de potencial entre os eletrodos C e D, toma-se em consideração a distância que os separa dos eletrodos de corrente A e B, e conforme a Eq. 3.14, tem-se um  $r_A$  (distância AC) e  $r_B$  (distância DB) nos limites de integração, obtendo finalmente a Eq. 3.16 e usando esse resultado em conformidade com a Eq. 3.15 obtém-se a Eq. 3.17, tendo também  $R_A$  (distância AD) e  $r_B$  (distância DB).

Finalmente desenvolvendo o resultado da Eq. 3.17, tem-se  $\rho$  que corresponde à resistividade aparente do material (Eq. 3.18). Ademais, usando  $k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)\left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B}\right)}$  simplifica-se a equação anterior, tendo uma mais genérica (Eq. 3.19).

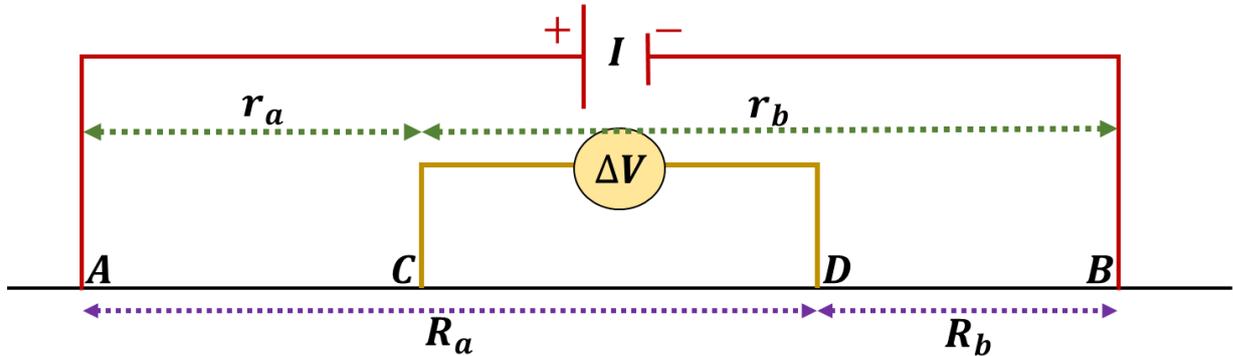


Figura 3.26: Arranjo genérico de eletrodos no solo. Modificado de Orellana (1982)

$$\Delta V = V_C - V_D$$

Eq. 3.15: Diferença de potencial

$$\begin{cases} V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \\ V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \end{cases}$$

Eq. 3.16: Os potenciais nos eletrodos C e D

$$V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]$$

Eq. 3.17: Diferença de potencial entre os eletrodos C e D

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]}$$

Eq. 3.18: Resistividade

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k$$

Eq. 3.19: Resistividade aparente genérica

### 3.4.3.2 Profundidade de investigação

A profundidade em que cada medida de resistividade está localizada é objeto de alguma ambiguidade, dado que não depende somente da disposição dos eletrodos (por exemplo, maior espaçamento corresponde a profundidade maior), senão também da própria resistividade do terreno. No caso de solos homogêneos a profundidade de investigação aumenta com a separação dos eletrodos de corrente, havendo uma relação direta entre a porcentagem de corrente que flui para uma profundidade  $Z$  em função da separação  $L$  dos eletrodos (Kearey et al, 2002).

A Figura 3.27 Mostra a relação entre a quantidade de corrente  $I_z$  que chega a uma profundidade  $Z$  em comparação com a corrente  $I$  injetada em superfície, a qual depende da separação  $L$  dos eletrodos. Assim tem-se que aproximadamente o máximo de corrente que atinge uma profundidade  $Z$  é 80% do valor inicial e, para consegui-lo, deve-se ter uma separação de eletrodos 6 vezes maior do que profundidade a ser atingida.

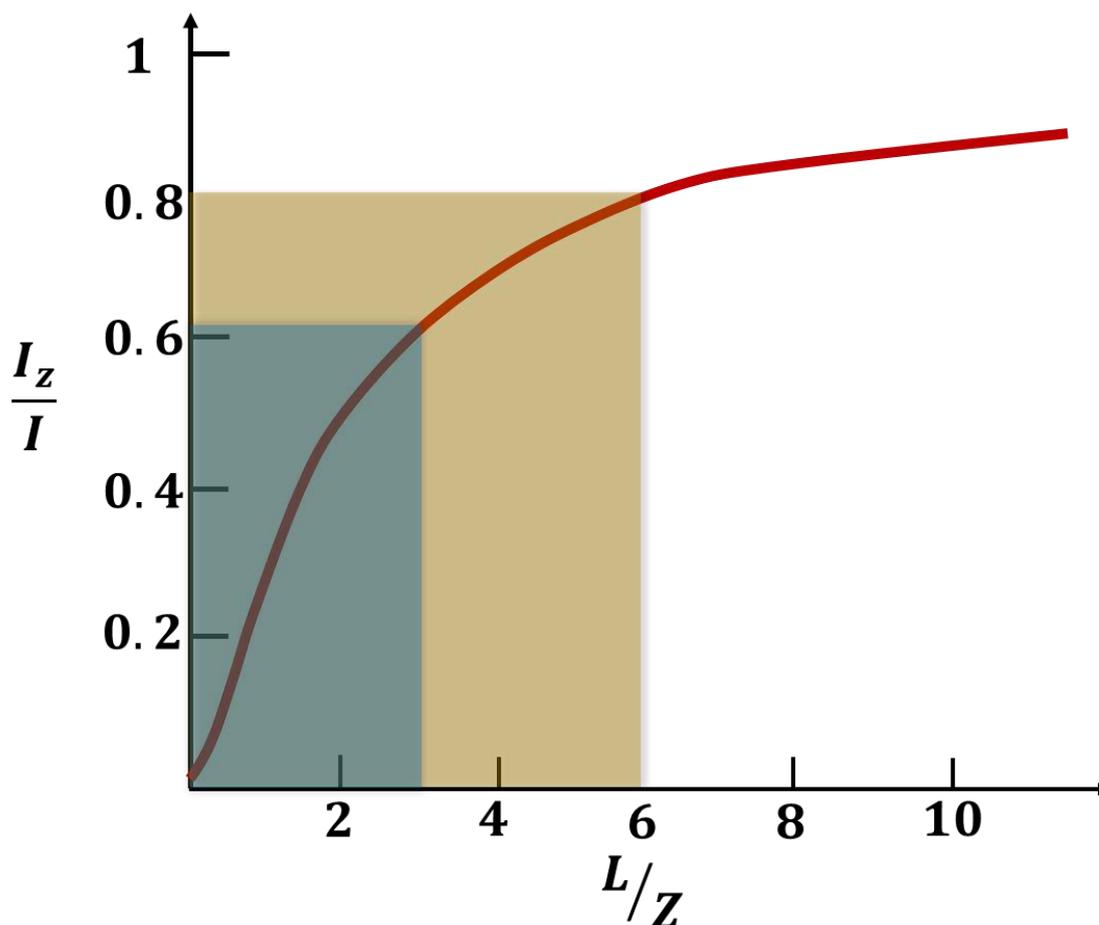


Figura 3.27: Fração da corrente que flui em profundidade dependendo da separação dos eletrodos. Modificado de Reynolds (2011)

### 3.4.3.3 Arranjos geoeletricos

Os métodos geoeletricos permitem determinar a profundidade da rocha base, a litologia e a estratigrafia, a localização de falhas e fraturas, a detecção de cavidades, a possível presença de águas subterrâneas e de contaminações e escoamentos de fluidos. Existem muitas configurações de eletrodos, cada uma com vantagens e desvantagens (Daza Hernández, 2012). A seguir, descrevem-se os arranjos de eletrodos mais comuns.

### 3.4.3.3.1 Arranjo Dipolo-Dipolo

O arranjo dipolo-dipolo consiste em usar dois eletrodos de corrente, dois eletrodos de potencial e a unidade resistiva, que são as camadas em subsuperfície. Esse tipo de arranjo consiste em posicionar os eletrodos de injeção de corrente (A e B) fixos e separados dos eletrodos de medida de potencial elétrico (M e N), que são deslocados ao longo de uma linha reta. A distância entre A e B permanece constante, assim como entre M e N; a distância entre os pares de eletrodos será chamado de  $na$ , no qual  $n$  é um número inteiro e  $a$  é uma distância pré-determinada (García et al, 2011) (Figura 3.28 e Eq. 3.20) e para esse arranjo define-se o fator geométrico  $k$ . Destaca-se que os pontos medidos em profundidade, seriam aquelas interseções das linhas equipotenciais, representados pela estrela azul e vermelha na Figura 3.28.

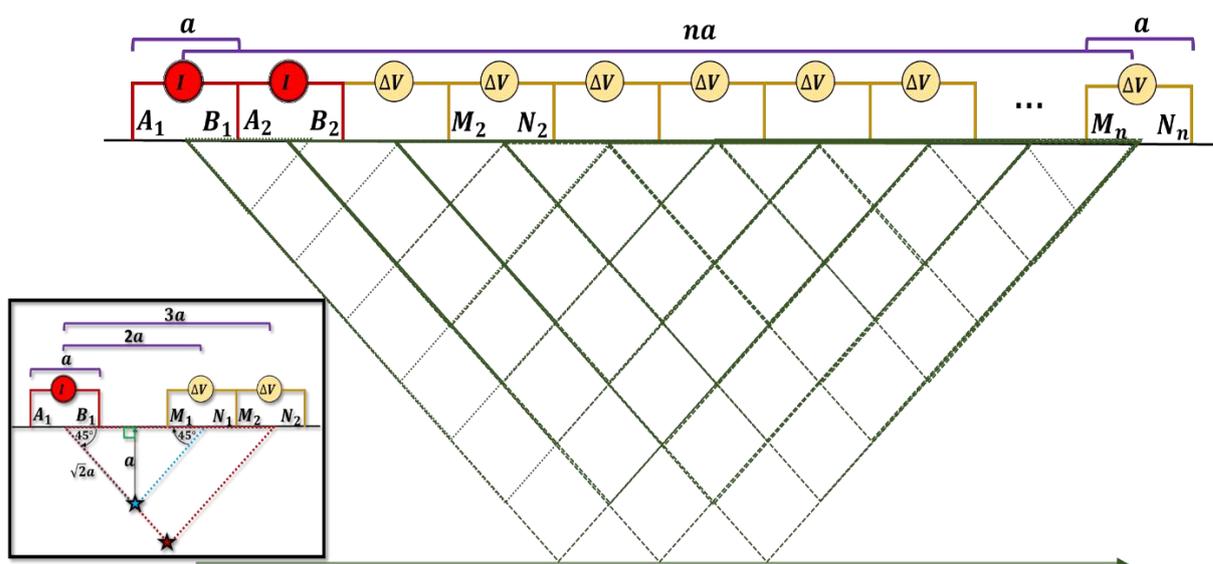


Figura 3.28: Arranjo dipolo-dipolo. Modificado de Orellana (1982)

$$k = 2a\pi n(n + 1)(n + 2)$$

Eq. 3.20: Fator geométrico para o arranjo Dipolo-Dipolo

### 3.4.3.3.2 Arranjo Wenner

O arranjo Wenner muda o tipo de separação que existe entre seus eletrodos AB, BM e MN, já que essa distância varia de acordo com um fator  $a$  mantendo-o constante ao longo da medição, como se apresenta na Figura 3.29. Por outro lado, ter-se-á que usar, nesse método, quatro eletrodos, dois de potenciais e dois de corrente, dois pares de cabos, água com sal (para melhorar o contato dos eletrodos com o solo) e a unidade resistiva para a injeção de corrente e a recepção de dados de resistividade aparente do local de exploração.

Uma desvantagem do arranjo Wenner é que, no momento de realizar a aquisição, todos os eletrodos precisam ser modificados para cada medição, portanto, leva-se mais tempo para aplicar esse método em campo (García et al, 2011). No caso do fator geométrico, este é múltiplo da abertura dos eletrodos de potencial, podendo ser  $a$ ,  $2a$ ,  $3a$  e assim sucessivamente (Eq. 3.21)

$$k = 2a\pi$$

Eq. 3.21: Fator geométrico para o arranjo Wenner

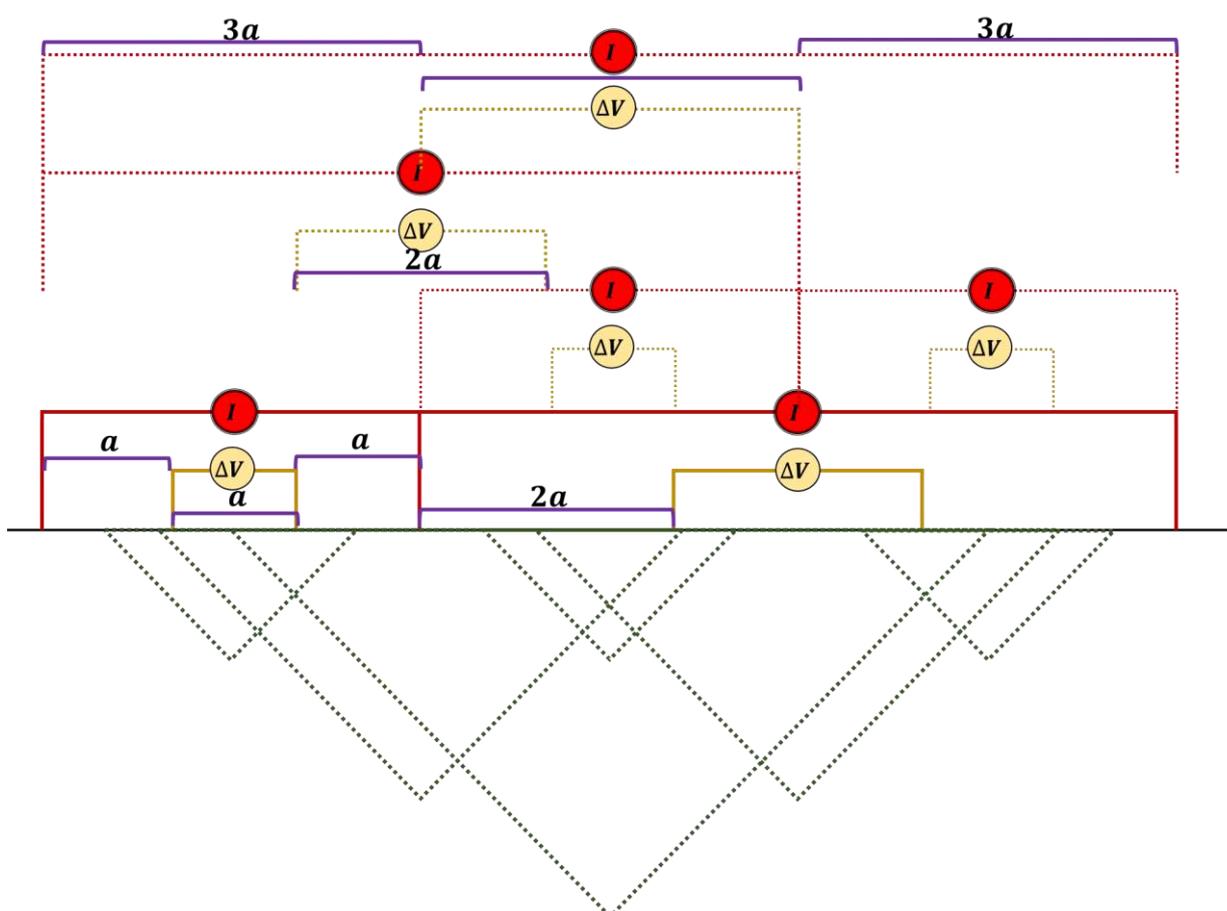


Figura 3.29: Arranjo Wenner. Modificado de Orellana (1982)

#### 3.4.3.3.3 Arranjo Schlumberger

No arranjo Schlumberger, apenas os eletrodos de corrente AB são movidos simetricamente e para fora em relação a uma origem, deixando os eletrodos M e N no centro do arranjo (Daza Hernández, 2012). Além disso, deve-se atender à relação  $AB > 5MN$  como mostrado na Figura 3.30 (Alvarez Manilla Aceves, 2003). Esse arranjo não é aplicável em terrenos com inclinação excessiva, ou em terrenos próximos a

torres ou usinas elétricas, pois podem induzir uma grande margem de erro na área de estudo. A maior vantagem desse método é que, quando a corrente é injetada no subsolo, há mais informações sobre as variações verticais das camadas subterrâneas em termos das resistividades aparentes que podem ocorrer nas camadas geológicas. O fato geométrico nesse arranjo se apresenta na Eq. 3.22 (García et al, 2011).

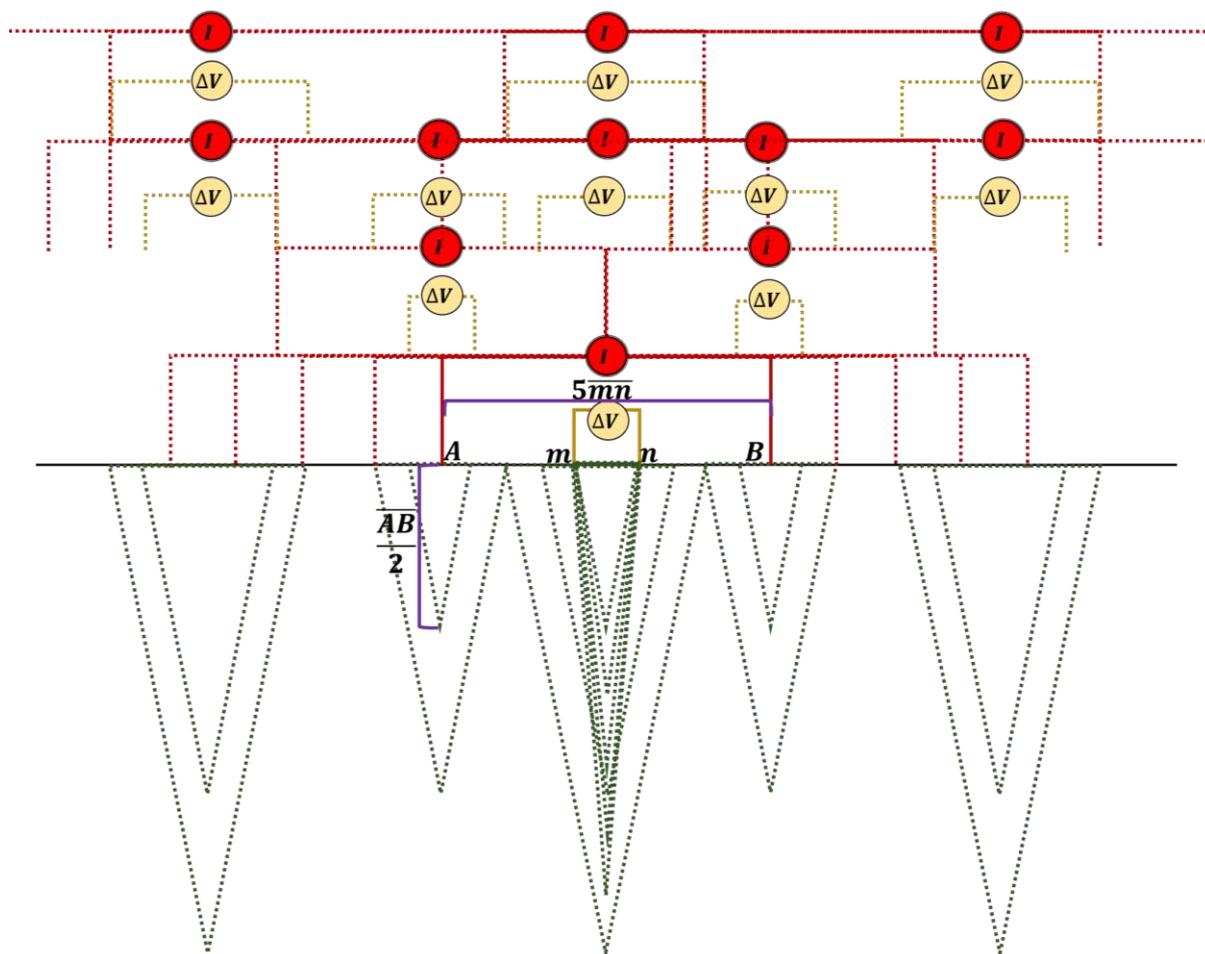


Figura 3.30: Arranjo Schlumberger. Modificado de Orellana (1982)

$$k = a\pi n(n + 1)$$

Eq. 3.22: Factor geométrico para o arranjo Schlumberger

#### 3.4.3.4 Propriedades elétricas das rochas

A resistividade dos materiais geológicos apresenta uma larga faixa de valores desde  $1,6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  para prata nativa até  $10^{16} \Omega\text{m}$  para enxofre puro. Rochas ígneas tendem a ter maiores resistividades, dentre as quais, podemos citar silicatos, fosfatos, carbonatos, nitratos e sulfatos; as rochas sedimentares tendem a ser mais condutivas, em grande parte devido ao alto conteúdo de fluidos nos poros, além de ter metais,

sulfitos, arsenites e alguns óxidos; rochas metamórficas têm resistividades intermediárias, devido ao conteúdo de óxidos e minérios (Telford et al, 1990).

A idade de uma rocha também é uma consideração importante no que tange a sua resistividade: uma rocha vulcânica quaternária pode ter uma resistividade na faixa de 10 a 200  $\Omega\text{m}$ , enquanto a resistividade de uma rocha equivalente, mas pré-cambriana, pode ser uma ordem de grandeza maior. Essa é uma consequência devida ao fato de que a rocha mais antiga esteve muito mais tempo exposta ao preenchimento secundário de interstícios por mineralização e compactação, diminuindo a sua porosidade e a permeabilidade. As águas subterrâneas salinas podem ter uma resistividade tão baixa quanto 0,05  $\Omega\text{m}$  e algumas águas subterrâneas e glaciais podem ter resistividades superiores a 1.000  $\Omega\text{m}$ . Alguns minerais como pirita, galena e magnetita são geralmente maus condutores em forma massiva, mas seus cristais individuais têm altas condutividades. Hematita e esfalerita, quando puras, são isolantes, mas quando combinadas com impurezas podem ser constituintes dominantes e os seus valores da resistividade diminuem. Já argila bem formada e quase sem areia, tem um valor na faixa de 1 a 10  $\Omega\text{m}$  (Reynolds, 2011).

Tabela 3.5: Classificação de diferentes materiais geológicos com sua resistividade (modificada de Govoni Sotelo 2019))

<b>Material</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
Aluvião e areia	10 - 800
Areia argilosa	30 - 215
Areia e cascalho	30 - 225
Arenito	1 - $7.4 \times 10^8$
Argila (muito seco)	50 - 150
Argilas	1 - 100
Argilas consolidadas	20 - 2000
Basalto	10 - $1.3 \times 10^7$
Calcários	50 - 107
Cascalho (saturado)	100
Cascalho (seco)	1400
Cinza	4
Coque	0.2 - 8
Conglomerados	$2 \times 10^3$ - $10^4$
Diorito	$10^4$ - $10^5$
Dolomita	350 - $5 \times 10^3$

---

Escoamento de chuva	20 - 100
Escoamento de terra	10 - 50
Gabro	$10^3 - 10^6$
Geleira de gelo (polar)	$5 \times 10^4 - 3 \times 10^5$
Geleira gelada (temperada)	$2 \times 10^6 - 1.2 \times 10^8$
Giz	50 - 150
Granito	$300 - 1.3 \times 10^6$
Granito (intemperizado)	30 - 500
Laterita	800 - 1500
Lignito	9 - 200
Margas	3 - 70
Mármore	$100 - 2.5 \times 10^8$
Moreia	$10 - 5 \times 10^3$
<i>Permafrost</i>	$10^3 - 10^4$
Quartzo	$300 - 10^6$
Quaternário / areias recentes	50 - 100
Reservatório de hidrocarbonetos	25 - 27.5
Sal gema	$30 - 10^{13}$
Solo (20% de argila)	33
Solo (40% de argila)	8
Solo arenoso seco	80 - 1050
Solo laterítico	120 - 750
Solo superficial	250 - 1700
Xisto (grafite)	10 - 100
Xistos (calcários)	$20 - 10^4$

---

## 4 METODOLOGIA

A investigação deste trabalho se baseia principalmente em dados provenientes da geoquímica da água (ou hidrogeoquímica) e da geofísica, tendo a maior importância o processamento e a interpretação dos resultados. Para auxiliar essa tarefa, foram utilizados dados geológicos de poços provenientes do SIAGAS. Outros pesquisadores estudaram anteriormente quatro áreas, quais sejam: Alegrete, Santa Cruz do Sul, Candelária e parte da região de Quarta Colônia (Figura 4.1). Borges Soares (2019) atuou como pesquisadora química, Gall Pires (2019) obteve os dados de sísmica de refração e Govoni Sotelo (2019) realizou a aquisição dos dados geoeletricos. Posteriormente, no presente texto, busca-se encontrar correlações entre essas informações de variados tipos e em grande quantidade.

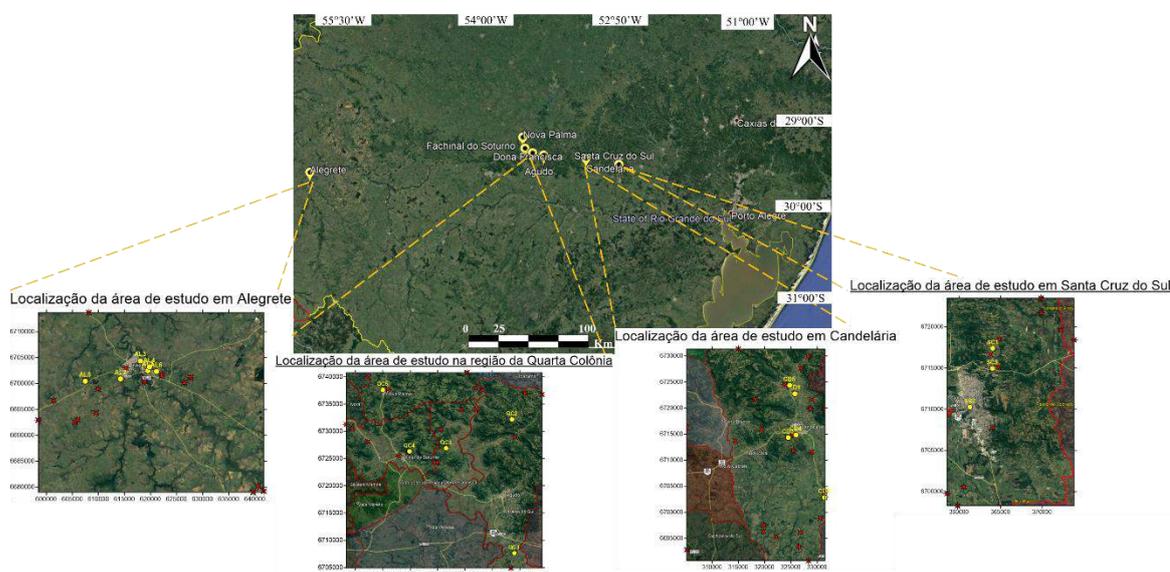


Figura 4.1: Localização da área de estudo nos quatro municípios, tendo em cor amarela a localização das linhas das sondagens geofísicas e em cor vermelha, os poços para as análises químicas (imagens tomadas por Google Earth)

### 4.1 Hidrogeoquímica

Com os dados hidrogeoquímicos, foram confeccionados diferentes mapas de contorno (usando o método *kriging*) de diversos valores de grandezas químicas, os quais foram obtidos nas áreas de estudo representadas na Figura 4.1 por Borges

Soares (2019). Utilizando valores medidos e interpolação numérica modelaram-se espacialmente (tomando como imagem de satélite base Google Earth) no programa *Surfer 16* valores tais como pH, salinidade, concentrações de diferentes cátions, ânions e metais livres encontrados nos 81 diferentes poços obtendo, desta maneira, 93 mapas de contorno no total (21 em Santa Cruz do Sul, 22 na região de Quarta Colônia, 24 no município de Candelária e 26 poços em Alegrete), conforme indicado na Tabela 4.1, enquanto a Tabela 4.2. apresenta os valores limites ou recomendados para o consumo humano em cada uma das substâncias analisadas. Ademais, realizaram-se dois diagramas de Piper nos municípios de Candelária e Alegrete.

Tabela 4.1: Tabela resumo dos diferentes mapas de contornos realizados para os diferentes parâmetros químicos

Mapa	Sta. Cruz do Sul	4 <sup>ta</sup> Colônia	Candelária	Alegrete
<b>Parâmetros físico-químicos</b>				
Alcalinidade	✗	✓	✓	✓
Condutividade	✓	✓	✓	✓
Dureza	✓	✓	✓	✓
Oxigênio dissolvido	✓	✓	✓	✗
pH	✓	✓	✓	✓
Potencial de redução	✓	✗	✗	✗
Salinidade	✓	✓	✗	✗
<b>Ânions</b>				
Bromo ( $Br^-$ )	✗	✗	✓	✓
Cloreto ( $Cl^-$ )	✓	✓	✓	✓
Fluoreto ( $F^-$ )	✓	✓	✓	✓

Fosfato ( $PO_4^{-3}$ )	✓	✓	✓	✓
Nitrato ( $NO_3^-$ )	✓	✓	✓	✓
Sulfato ( $SO_4^-$ )	✓	✓	✓	✓
<b>Cátions</b>				
Amônia ( $NH_3^+$ )	✗	✓	✗	✗
Cálcio ( $Ca^+$ )	✓	✓	✓	✓
Magnésio ( $Mg^{2+}$ )	✓	✓	✓	✓
Potássio ( $K^+$ )	✓	✓	✓	✓
Sódio ( $Na^+$ )	✓	✓	✓	✓
<b>Metais</b>				
Alumínio ( $Al$ )	✓	✓	✓	✓
Arsênio ( $As$ )	✗	✗	✓	✗
Bário ( $Ba$ )	✓	✓	✓	✓
Cádmio ( $Cd$ )	✗	✗	✓	✓
Chumbo ( $Pb$ )	✓	✓	✗	✓
Cobre ( $Cu$ )	✓	✓	✗	✓
Cromo ( $Cr$ )	✓	✓	✓	✓
Ferro ( $Fe$ )	✗	✗	✓	✓
Manganês ( $Mn$ )	✗	✗	✓	✓
Selênio ( $Se$ )	✗	✗	✓	✓
Zinco ( $Zn$ )	✗	✗	✓	✓

---

Tabela 4.2: Valores limites de concentração

Parâmetro	Valor máximo permitido $\left(\frac{mg}{l} = 1ppm = 1000\frac{\mu g}{l}\right)$	Referência
Alcalinidade	200	ENRESS (2018)
Alumínio ( <i>Al</i> )	0,2	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Amônia ( <i>NH<sub>3</sub><sup>+</sup></i> )	1,5	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Arsênio ( <i>As</i> )	0,01	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Bário ( <i>Ba</i> )	0,7	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Bromo ( <i>Br</i> )	0,5	Organização Mundial da Saúde (2018)
Cádmio ( <i>Cd</i> )	0,001	Governo de Canadá (2019)
Cálcio ( <i>Ca<sup>+</sup></i> )	100	ENRESS (2018)
Chumbo ( <i>Pb</i> )	0,1	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Cloreto ( <i>Cl<sup>-</sup></i> )	250	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Cobre ( <i>Cu</i> )	2	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Cromo ( <i>Cr</i> )	0,5	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008

---

Dureza	500	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Ferro ( <i>Fe</i> )	0.3	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Fluoreto ( $F^-$ )	1,5	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Fosfato ( $PO_4^{-3}$ )	0,45	Pinheiro et al (2012)
Magnésio ( $Mg^{2+}$ )	30	ENRESS (2018)
Manganês ( <i>Mn</i> )	0,1	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Nitrato ( $NO_3^-$ )	10	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Oxigênio dissolvido	6	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Potássio ( $K^+$ )	10	FAO (2005)
Salinidade	50	ANA, Resolução CONAMA nº 274 (2000)
Selênio ( <i>Se</i> )	0,01	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Sódio ( $Na^+$ )	200	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Sulfato ( $SO_4^-$ )	250	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008
Zinco ( <i>Zn</i> )	5	ANA, Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008

---

Nos casos de água alcalina, que contém cálcio e magnésio, tomou-se como referência a normativa imposta pelo Ente Regulador de Serviços Sanitários de Argentina devido à não existência de regulamentação brasileira para concentração desses elementos. O valor da alcalinidade, pode chegar a 500 ppm sem apresentar nenhum problema. Em geral, raramente as águas superam esse valor, mas se for incrementado, poderia haver um sabor desagradável (Pereira, et al., 2010). Para o fosfato não existe um valor limite, mas define-se para o fósforo o valor de 0,15 ppm, que se transforma em  $PO_4$ , com a concentração dada por  $PO_4 = 3,006P$  (Pinheiro et al., 2012). Ainda, o valor de pH poder variar entre 6 e 9 de acordo com os valores permitidos pela Resolução do CONAMA 357/05.

## 4.2 Geofísica

Neste trabalho utilizaram-se dados de sísmica de refração e métodos elétricos. Estas duas técnicas tiveram seus dados adquiridos de maneira concomitante e nos mesmos locais, sendo, assim, perfeitamente comparáveis entre si. Desse modo, foram processadas um total de 19 linhas para cada tipo de sondagem, divididas em: três em Santa Cruz do Sul, cinco no município de Candelária e mais cinco na região da Quarta Colônia e, por último, seis no município de Alegrete. Além disso, foram selecionados poços que estivessem perto das linhas (preferencialmente, à menos de 150 m, para evitar possíveis variações geológicas), para propiciar uma comparação entre o perfil do poço com os dados geofísicos. Os perfis dos poços foram obtidos do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e estão reunidos (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Poços usados para calibração das sondagens geofísicas.

Região	Linha	Identificação do poço	Distância poço-linha (m)
Santa Cruz do Sul	SC1	4300023674	3
	SC2	4300023609	2
Quarta Colônia	QC1	4300021299	8
	QC3	4300007744	145

	QC4	4300023461	15
Candelária	CD1	4300006306	47
	CD4	4300006327	32
	AL1	4300026139	3
Alegrete	AL2	4300021214	7

#### 4.2.1 Sísmica de Refração

Os dados foram recebidos em estado bruto (aquisição feita por Gall Píres (2019)), tendo três medidas por cada disparo, isto quer dizer, 3 arquivos .DAT por cada *shotpoint*. A sequência metodológica utilizada foi:

- Para conseguir processar todos os dados, foram revisados um por um dos arquivos e escolhido o melhor dos três disparos.
- Cada linha consistia em cinco disparos dos quais o primeiro e o quinto (último) eram disparos de afastamento (*offset*).
- O processamento dos dados fez-se por meio do programa *WinSeis 10*
- O primeiro passo foi a picagem (seleção das primeiras chegadas), observando-se na Figura 4.2, representadas com linhas horizontais azuis no sismograma, mostrando o instante em que o primeiro sinal foi recebido pelo geofone, para um único afastamento (*offset*).

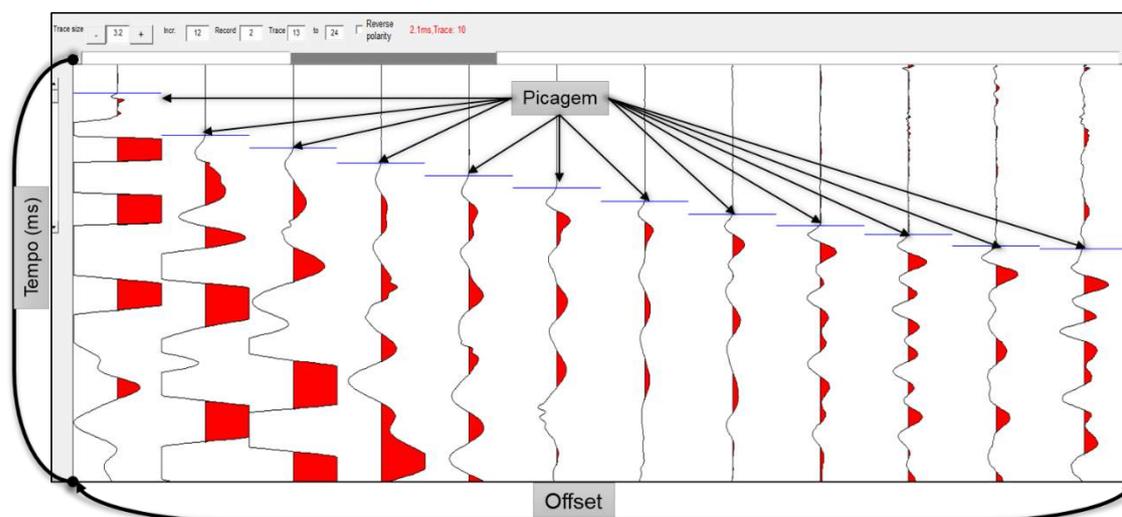


Figura 4.2: Exemplificação da picagem no segundo disparo de uma linha (as setas indicam o eixo do tempo e *offset*).

- A seguir, constrói-se um diagrama de tempos de chegada da seguinte maneira: No eixo horizontal são posicionados cada um dos 12 geofones utilizados na aquisição. Verticalmente, acima de cada geofone, coloca-se os cinco tempos de chegada para cada um dos geofones. Ligando-se os pontos, tem-se as curvas de tempos de chegada. Observa-se na Figura 4.3 que, quanto mais afastado o geofone estiver do ponto de impacto, maior será o tempo de trânsito.

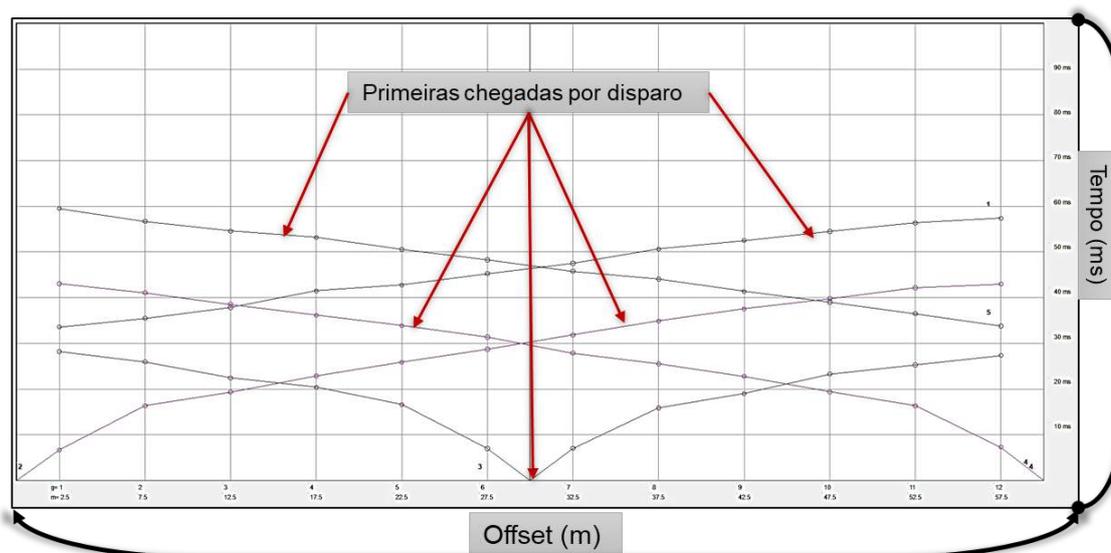


Figura 4.3: Configuração dos tempos de chegadas para cada disparo (as setas indicam o eixo do tempo e *offset*).

- O passo seguinte refere-se à marcação das quebras das retas para cada um dos disparos (2º, 3º, 4º) que identificam as alterações na velocidade de propagação de onda. Aqui se escolhe o número de camadas que se assume para o modelo geológico sob estudo. Esse número é escolhido pelo intérprete e depende do comprimento da linha e do número de receptores que foram utilizados. Na Figura 4.4 observa-se as retas de inclinação  $m_1$  e  $m_2$  (dadas em s/m) as quais dependem da velocidade das camadas 1 e 2. Por outro lado, na tabela que se observa na figura, o *software* (*WinSeis 10*) mostra os parâmetros calculados referentes à velocidade ( $v_1$  e  $v_2$ ) das camadas e espessura correspondente.

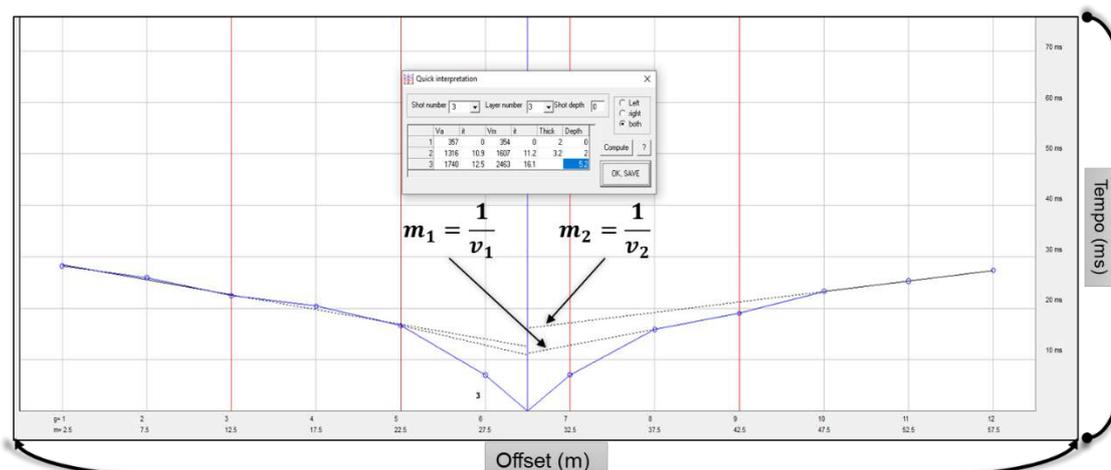


Figura 4.4: Modelo de três camadas para o disparo central (as setas indicam o eixo do tempo e *offset*).

- Quando selecionadas e marcadas as velocidades das camadas, procede-se ao cálculo do tempo de interseção e gera-se o modelo geológico que seja consistente com o número de camadas selecionadas. Nesse caso, gerou-se uma inversão em um arquivo .DAT com o modelo obtido e, posteriormente, foi exportado ao programa *Surfer 13* para geração do modelo e utilização de uma gradação das cores. Além de gerar um modelo mais estilizado, foram colocados os dados dos poços nas linhas correspondentes. Também, foi acrescentada a orientação geográfica das linhas. A comparação das velocidades obtidas dos sismogramas com os valores apresentados na Tabela 3.4 permitiu a identificação das possíveis rochas formadoras da subsuperfície sob estudo.

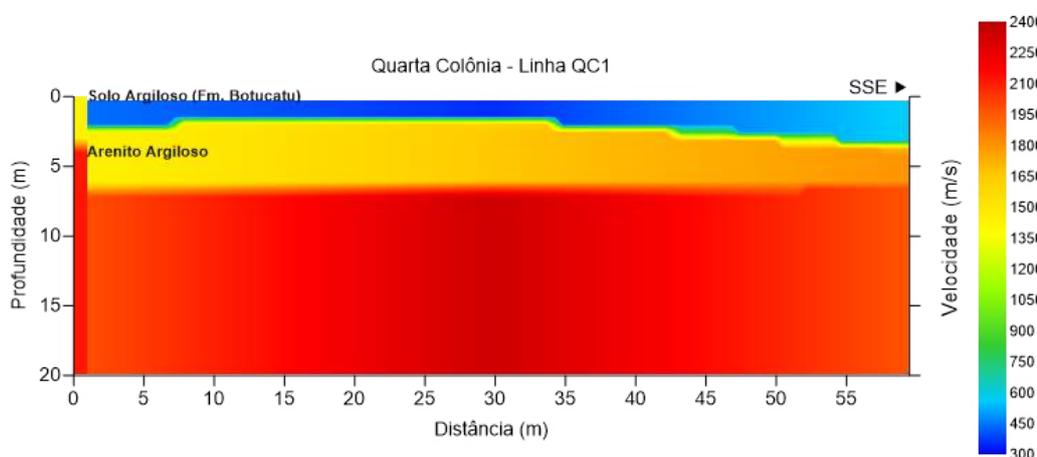


Figura 4.5: Exemplificação da linha QC1 depois da inversão e interpretação.

### 4.2.2 Método geométrico

Como já foi mencionado acima, essas linhas em que foram feitas as medidas elétricas estavam localizadas nos mesmos lugares onde foram adquiridos os dados de sísmica de refração (aquisição geométrica feita por Govoni Stelo (2019)). Destaca-se que a metodologia de aquisição foi feita mediante arranjos do tipo dipolo-dipolo, o qual tem consequência direta no posterior processamento:

- Receberam-se os dados obtidos de campo, nos quais cada medição foi feita 3 vezes, obtendo assim valores de potencial, corrente e resistividades aparentes médias.
- Depois de calcular a resistividade aparente, estes resultados foram importados num arquivo .DAT no programa de processamento e inversão (*Res2DIV*).
- O primeiro passo antes do processamento foi a eliminação de pontos anômalos, os quais não eram concordantes com a tendência lateral das medições à cada profundidade conforme exemplificação na Figura 4.6.

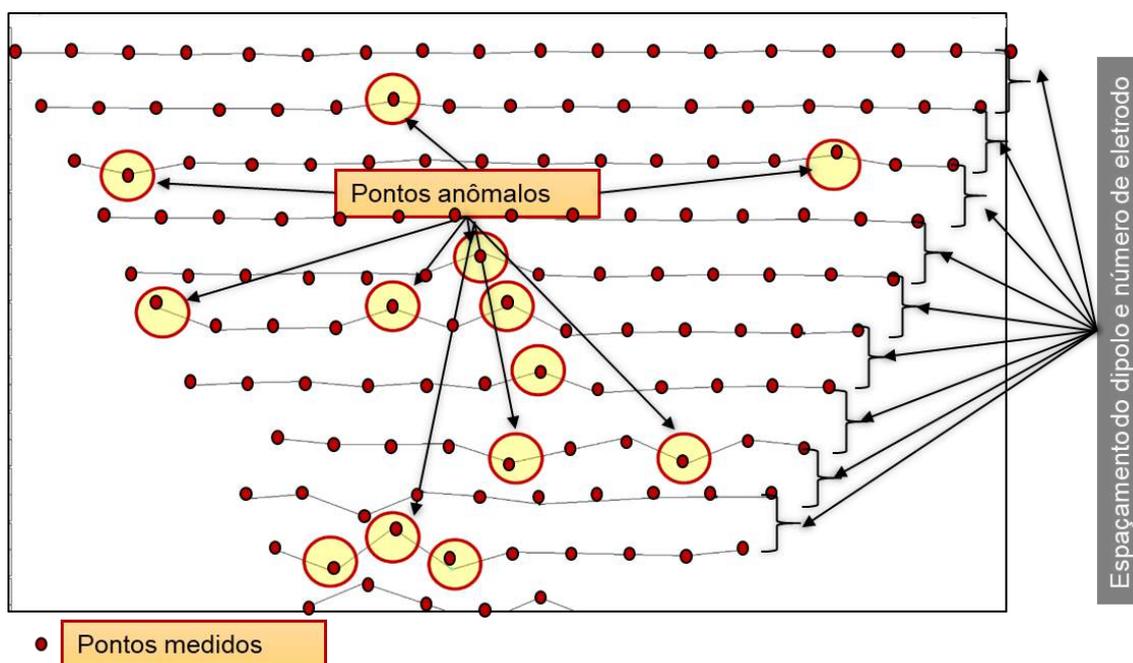


Figura 4.6: Pontos discordantes (círculos vermelhos) a cada profundidade antes do processamento.

- Depois, especificam-se os parâmetros de discretização para a inversão. Eles estão relacionados com a espessura das camadas a processar e são proporcionais à separação dos eletrodos (Figura 4.7).

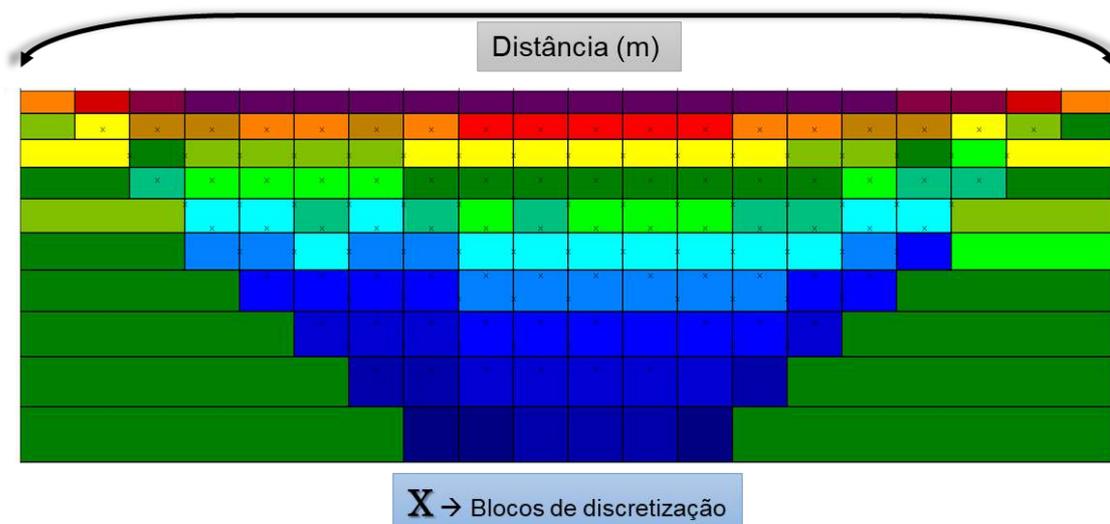


Figura 4.7: Discretização espacial dos pontos a serem invertidos (a seta indica o eixo de distância e as cores correspondem às resistividades em cada bloco).

- O programa *Res2Div* itera o processo de inversão até conseguir o melhor modelo, levando em consideração as reduções nos erros em cada iteração. Ou seja, quando a variação na diminuição do erro entre iterações atinge um valor pequeno (por exemplo: menor que 1%), então o programa para, gerando um modelo de resistividade aparente e uma inversão, conforme exemplificado Figura 4.8.

Com o modelo de resistividade aparente, obtém-se um primeiro modelo calculado que, não obstante, está influenciado pela resistividade de camadas superiores. Por outro lado, o modelo de inversão é o resultado final, indicando uma aproximação da resistividade real das camadas.

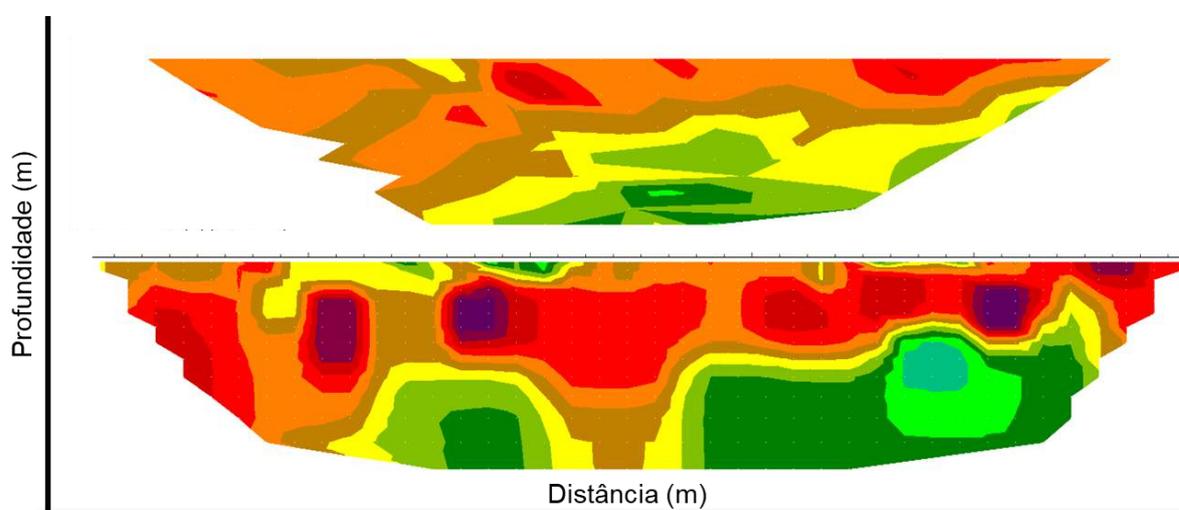


Figura 4.8: Modelos gerados, tendo acima o modelo de resistividade aparente e embaixo a correspondente inversão.

- Depois, assim como foi feito com a sísmica, com fim de estilizar o resultado e de colocar os dados geológicos dos poços próximos as linhas, bem como sua orientação, a inversão foi transformada de um arquivo no formato .INV (este formato indica inversão, contendo o resultado final de resistividade) para .DAT, obtendo um modelo final, conforme exemplificado na Figura 4.9.

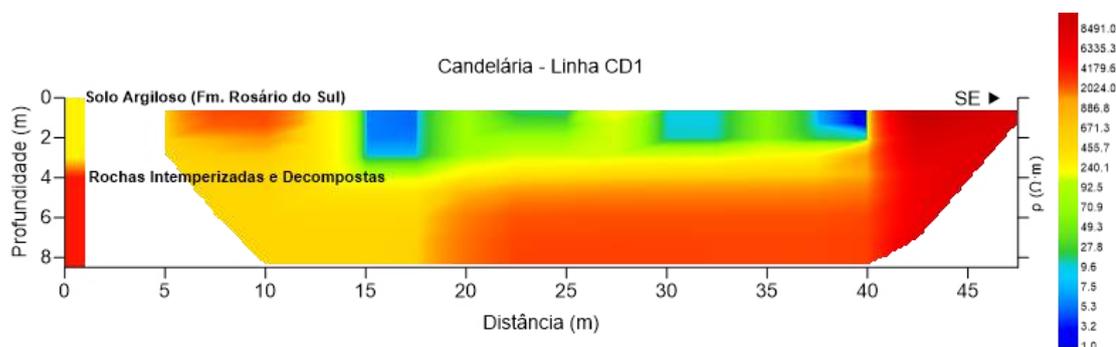


Figura 4.9: Exemplificação da linha CD1 como modelo final de inversão de resistividades.

### 4.3 Caracterização geológica

A caracterização geológica foi feita nas regiões de estudo, delimitadas pelas coordenadas das regiões onde foram feitas as análises hidrogeoquímicas, conforme mostrado na Tabela 4.4. Nos registros de poços do SIAGAS, procuraram-se poços que tivessem dados de topos de formações geológicas e que estiveram cotados e, assim, pudessem ser utilizados na modelagem das diferentes formações encontradas. Além disso, foram tomados os topos do nível estático dos poços (quando essa informação estivesse disponível), podendo-se diferenciar e notar onde os aquíferos poderiam localizar-se em profundidade, conforme mostrado na Tabela 4.5,

Tabela 4.6 e Tabela 4.7. Destaca-se que essa metodologia não se aplicou no município de Candelária, devido à falta de informação dos poços localizados no município.

Tabela 4.4: Coordenada das áreas estudadas

Região	X (m)		Y (m)		Fuso	X			y		
	UTM	UTM	UTM	UTM		°	'	"	°	'	"
Alegrete	598470	6713694	J21	-55	58	44,47	-29	41	12,91		
	641701	6679009		-55	32	7,64	-30	0	14,25		
Candelária	305169	6731312	J22	-53	0	36,96	-29	31	15,14		
	331473	6690715		-52	44	43,07	-29	53	26,77		
Quarta	253331	6740767	J22	-53	32	33,40	-29	25	35,38		
Colônia	289075	6704893		-53	10	52,89	-29	45	23,12		
Santa Cruz	358569	6723462	J22	-52	27	37,73	-29	35	55,89		
	373838	6698293		-52	18	20,80	-29	49	39,00		

Tabela 4.5: Poços usados no município de Alegrete

Poço	X (m)	Y (m)	Cota Serra Geral (m)	Cota Botucatu (m)	Cota Nivel Estático (m)
4300000138	601697	6696282	140	32	107
4300000173	598944	6699888	155	80	119
4300000552	599500	6688750	160	69	95,2
4300000807	609965	6707091	134	-37	101,2
4300001255	610153	6700665	135	91	113,87
4300001257	611050	6701000	130	86	115,88
4300001339	618797	6703960	94	-20	92,1
4300001340	616341	6703810	95	-10	86,19
4300001342	618832	6704035	93	-23	71,04
4300001343	615853	6702557	102	-81	73,32
4300001344	616075	6703800	104	10	-
4300001345	615924	6703851	99	-	73,69
4300001346	616969	6705570	75	-89	69,19
4300001347	616044	6703798	102	-8	61,76
4300001348	616044	6703786	102	-	57,09
4300001349	620044	6703202	108	-40	93,6
4300001350	614348	6702679	103	39	89,48
4300001351	616475	6703980	100	-8	-
4300001352	617464	6704767	87	-33	76,42
4300001353	615567	6704150	85	3	-
4300001354	615560	6704111	83	5	73,26
4300001355	621483	6702435	103	-21	88,44
4300001356	614607	6701088	105	45	84,65
4300001357	618953	6702426	111	17	88,55
4300001603	610004	6712827	101	-	-
4300001607	598972	6711237	141	-	121
4300001638	615026	6701792	103	15	83,71
4300001639	614995	6701541	95	-	86,15
4300001640	618887	6704023	89	-60	64,77
4300001641	605872	6699321	120	-	107
4300001648	600576	6692444	148	-	128
4300001649	602255	6694214	153	-	133
4300001653	606942	6693369	160	-	115
4300001654	615353	6705345	92	-17	79,75
4300001655	616307	6703855	95	-8	86,8
4300001656	617375	6704194	75	-38	74,77
4300001657	616165	6702924	103	53	83,8
4300001658	615040	6701792	102	15	92,96
4300001659	621335	6701934	89	-5	70
4300001662	637511	6702978	120	-	105
4300001663	639995	6704055	160	-	108
4300001664	634868	6699777	154	-	121
4300001667	622378	6684590	110	-	96,5

4300001668	626417	6700277	145	-	144
4300001669	633601	6688247	-	110	96,5
4300001670	630238	6696446	118	-	100
4300002192	608751	6708588	85	59	80,41
4300002363	631909	6706124	140	102	122
4300002364	631746	6705941	150	-	-
4300007948	601041	6689279	-	188	159
4300007949	605973	6692703	-	200	186
4300007950	609460	6691300	184	-	166
4300007954	619860	6696296	-	133	114
4300007955	619432	6690928	122	15	84
4300007958	621622	6702095	33	-72	21
4300007964	611722	6703176	121	52	108,7
4300007965	612638	6702571	111	67	102,9
4300007966	612355	6701287	117	44	103,5
4300007968	614301	6701776	117	33	105
4300007969	614741	6702496	117	72	88
4300007970	616002	6702365	123	-	115,7
4300007974	626228	6709516	98	-	95,4
4300007982	626511	6700153	154	48	141,6
4300007991	613106	6711893	106	58	91
4300007995	604841	6712774	151	-	137,2
4300007996	602338	6711434	147	-	114
4300009283	617388	6705968	84	-122	64,86
4300009284	616440	6703992	89	-19	55,3
4300009356	620049	6703205	107	-45	86,53
4300009357	620836	6702537	104	-26	86,52
4300009358	615318	6705349	92	-21	83,1
4300009359	620841	6702545	100	-30	87,5
4300009360	617477	6706094	80	-	69,56
4300009362	616064	6703775	131	-	95
4300012472	614626	6702313	120	18	91
4300021034	615184	6701783	-	99	79,71
4300021069	618735	6703918	-	83	65,5
4300021070	615868	6702499	-	113	87
4300021071	620867	6702508	-	110	91,7
4300021074	618824	6703984	83	-30	61,29
4300021075	620729	6701768	116	61	96,28
4300021076	618984	6702401	113	15	90,81
4300021077	615265	6701783	-	96	76,94
4300021104	618832	6703925	96	-18	71,77
4300021214	614353	6700855	143	-	109,56
4300021292	622077	6701029	111	87	90
4300022494	621401	6701292	111	1	81,65
4300024854	616807	6705162	97	-11	-
4300025927	623144	6700529	119	94	89,95
4300026139	619447	6702484	104	-28	75,8
4300026714	611022	6702633	124	32	-
4300027427	615860	6702500	115	36	-

---

Tabela 4.6: Poços usados na Região da Quarta Colônia

Poço	X (m)	Y (m)	Cota Serra Geral (m)	Cota Botucatu (m)	Cota Rosário Do Sul (m)	Cota Nível Estático (m)
4300000769	255200	6730300	-	85	-	81,0
4300002703	260600	6737505	-	82	-	84,7
4300002704	260180	6737525	-	78	-	81,1
4300002705	261060	6737150	95	65	-	92,7
4300002706	261430	6737600	105	56	-	103,6
4300002707	260880	6737950	108	69	-	99,1
4300006557	279839	6718485	-	-	41	-
4300006558	286088	6721494	124	118	106	-
4300006559	283769	6719827	-	-	103	85,5
4300006560	283302	6713123	-	-	80	51,8
4300006561	282530	6712708	-	-	72	68,0
4300006564	284298	6710857	-	-	69	47,0
4300006567	288258	6724931	296	258	-	-
4300006569	279490	6732348	372	192	-	308,0
4300006570	277864	6732367	344	134	-	302,0
4300006572	286011	6737051	-	-	-	186,5
4300006575	279395	6722747	68	68	-	50,8
4300007631	282470	6719131	-	-	146	116,7
4300007675	260623	6737552	-	-	105	103,7
4300007676	260268	6737531	-	-	102	101,1
4300007677	261068	6737697	115	85	-	109,1
4300007678	261435	6737696	132	83	-	127,3
4300007684	262001	6741475	334	-	-	-
4300007703	257519	6735548	308	188	-	288,0
4300007727	278834	6738280	93	-	76	72,3
4300007743	270249	6723738	-	-	137	41,2
4300007744	271594	6727024	-	-	93	50,7
4300007745	276967	6734041	-	-	46	-
4300007748	272335	6728194	-	-	72	-
4300007749	274353	6725647	-	-	83	43,7
4300007751	262538	6726105	-	-	98	76,6
4300007752	264754	6726151	-	-	93	63,7
4300007754	267447	6723588	67	-	-	48,0
4300007759	264740	6726116	-	-	104	101,1

4300007763	254466	6730478	88	-	-	53,3
4300007764	258251	6723440	63	-	-	-
4300022388	266755	6738112	458	-	-	387,1
4300025011	278200	6739700	87	49	-	52,0
4300025015	278100	6739800	85	46	-	46,0

Tabela 4.7: Poços usados no município de Santa Cruz do Sul

Poço	X (m)	Y (m)	Cota Serra Geral (m)	Cota Santa Maria (m)	Cota Rosário Do Sul (m)	Cota Nível Estático (m)
4300000865	362563	6707934	-	-	60	23,0
4300000866	362725	6706654	-	-	64	19,3
4300000867	363295	6706571	-	-	58	25,9
4300002864	362488	6707881	-	-	55	22,8
4300002865	362744	6708558	-	-	50	5,6
4300002866	360170	6712575	-	-	38	28,7
4300002867	361794	6713193	-	-	45	22,5
4300002868	360321	6714138	-	-	62	33,7
4300002869	360170	6710325	-	-	50	6,9
4300006339	363644	6704505	-	75	-	-
4300006340	362239	6707155	-	59	-	-
4300006341	362186	6707265	-	59	-	-
4300006342	362872	6707141	-	82	-	-
4300006343	361825	6708728	-	59	-	-
4300006344	361806	6708709	-	145	-	-
4300007506	361764	6706825	-	54	-	4,5
4300007508	363121	6704542	-	76	-	53,5
4300007514	364058	6715986	188	-	-	179,3
4300007515	364759	6715122	169	87	-	167,5
4300007521	368462	6700218	-	61	-	-
4300007524	361769	6708144	-	52	-	-
4300007540	364847	6718495	210	-	-	152,9
4300007551	365280	6702767	-	90	-	42,5
4300007629	362181	6709741	-	-	56	23,9
4300012483	362250	6707100	-	-	60	47,7
4300020979	359833	6711288	-	33	-	0,3
4300022379	360175	6712006	-	34	-	15,5
4300024814	360183	6707781	-	-	-	6,7
4300025135	363432	6724314	-	-	80	-
4300025580	360977	6701563	-	93	-	73,1
4300025858	364352	6699963	-	-	69	40,6
4300025876	365108	6715109	-	-	-	138,9
4300025878	360402	6706584	-	-	63	7,6
4300026056	362610	6704970	-	-	41	-
4300026779	369000	6707100	251	131	-	-

4300026831	364467	6716508	184	-	78	178,7
4300026963	364709	6715091	184	-	102	182,5
4300026992	373453	6703477	69	-13	-	-
4300027125	366953	6703458	-	-	-	-2,8
4300027506	362194	6708174	0	55	-	30,0
4300027512	362193	6708174	0	60	-	18,1
4300027608	367237	6699999	0	85	-	-
4300027609	362258	6714951	195	-	-	170,2
4300027644	361192	6713141	0	42	-	12,2

---

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Santa Cruz do Sul

Na região de Santa Cruz do Sul foram feitas três sondagens elétricas mais três varreduras sísmicas de refração. Um total de 21 parâmetros químicos foram analisados. A localização dos poços está apresentada na Figura 5.1.

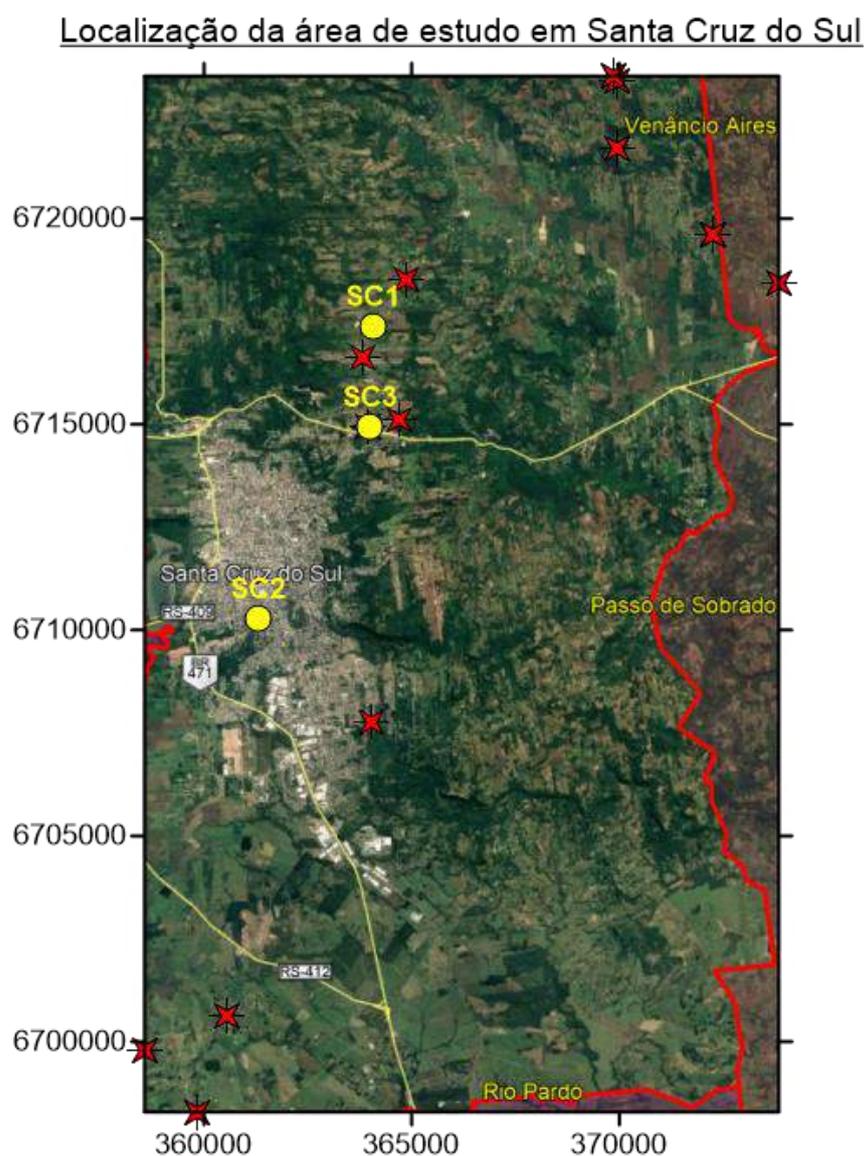


Figura 5.1: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) em Santa Cruz do Sul (imagem de satélite base por meio de Google Earth)

## 5.1.1 Hidrogeoquímica

### 5.1.1.1 Parâmetros físico-químicos

Estudaram-se um total de seis parâmetros físico-químicos, cujos valores são mostrados desde a Figura 5.2 até a Figura 5.7. Observa-se como os parâmetros correspondentes ao pH e ao oxigênio dissolvido, mostraram valores superiores aos permitidos. Portanto, analisando o caso do pH, pode-se pensar que tal alteração esteja relacionada com a condutividade elétrica no mesmo ponto. Por outro lado, no parâmetro de salinidade, o poço que apresentou maior valor, corresponde ao mesmo poço que teve alto pH e condutividade elétrica, dando a entender que estes valores estejam correlacionados.

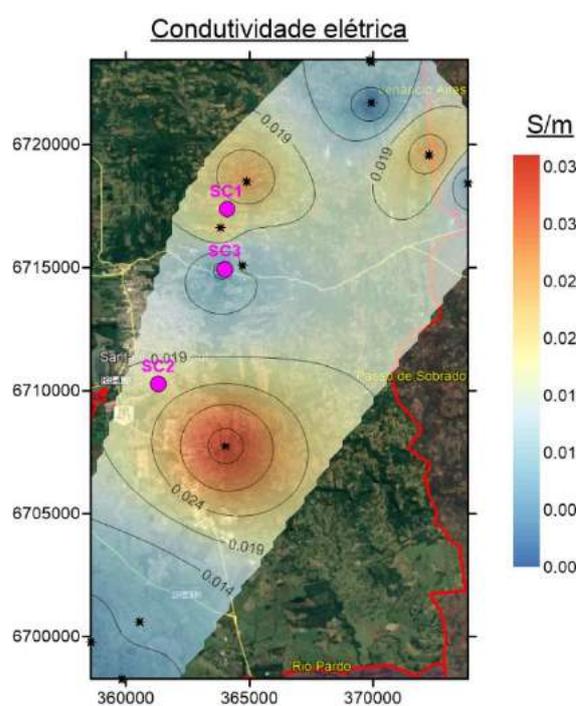


Figura 5.2: Condutividade elétrica em Santa Cruz do Sul

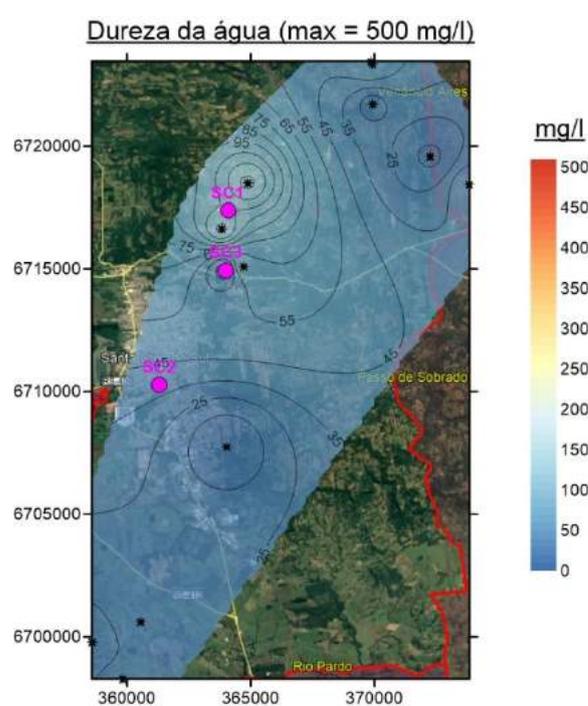


Figura 5.3: Dureza da água em Santa Cruz do Sul

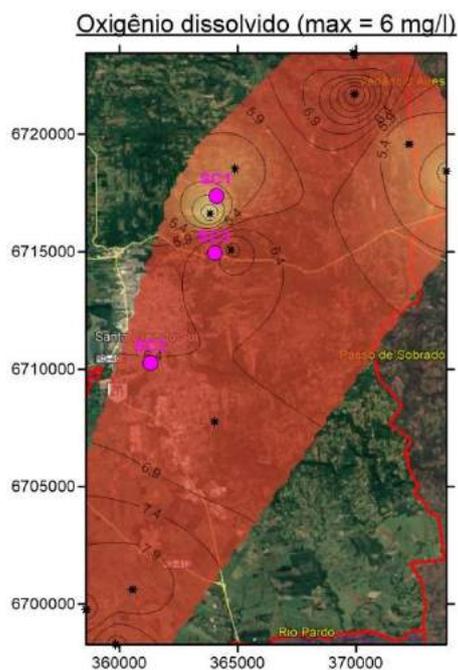


Figura 5.4: Oxigênio dissolvido em Santa Cruz do Sul

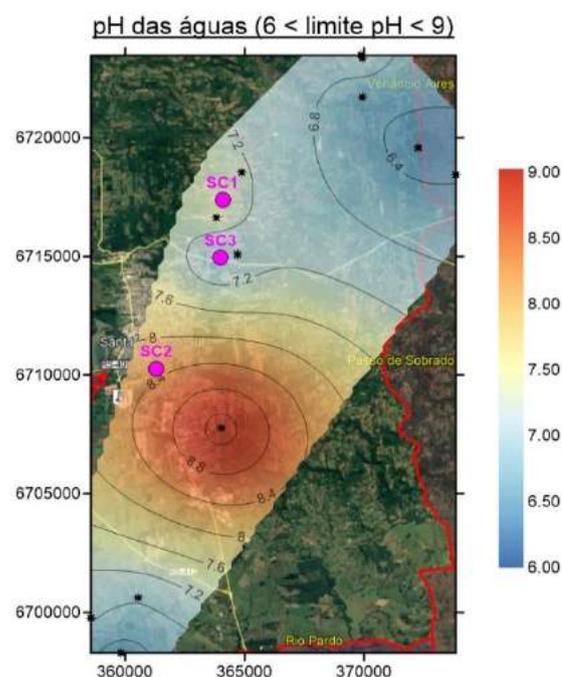


Figura 5.5: pH da água em Santa Cruz do Sul

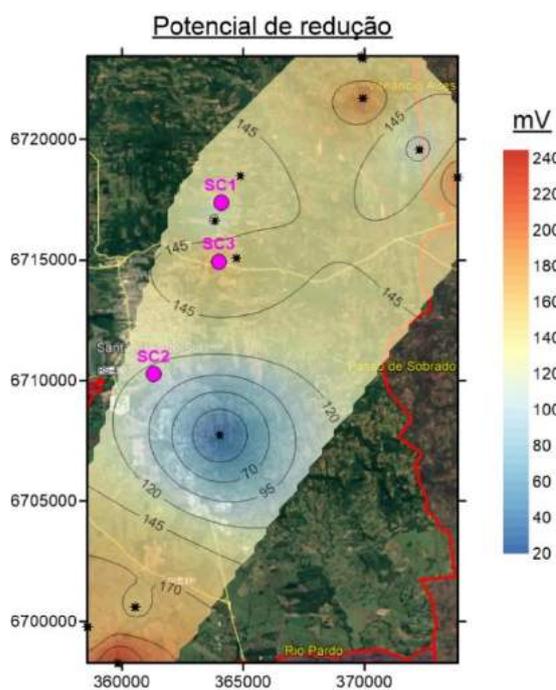


Figura 5.6: Potencial de redução em Santa Cruz do Sul

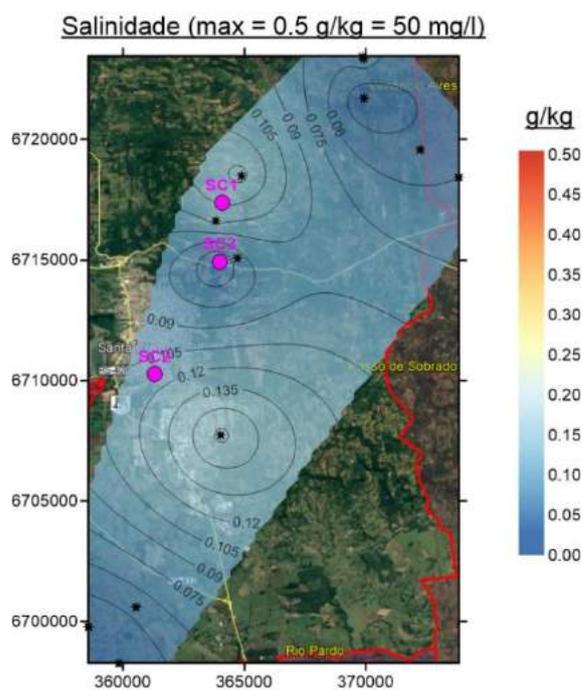


Figura 5.7: Salinidade da água em Santa Cruz do Sul

### 5.1.1.2 Ânions

No caso dos ânions, 5 parâmetros foram modelados conforme mostrados nos mapas das Figura 5.8 à Figura 5.12. Observou-se uma alteração na concentração de fluoretos excedendo o limite permitido. Portanto, tomando como referência à Ribeiro

et al. (2009), menciona que a ocorrência de fluoretos está relacionada à processos ígneos ou magmáticos, portanto, observando o perfil do poço localizado na linha SC1 (a linha mais perto do local com alta concentração de fluoreto), nota-se que a litologia predominante corresponde a basaltos, repercutindo na concentração de fluoretos.

Concentração de cloreto (max = 250 mg/l)

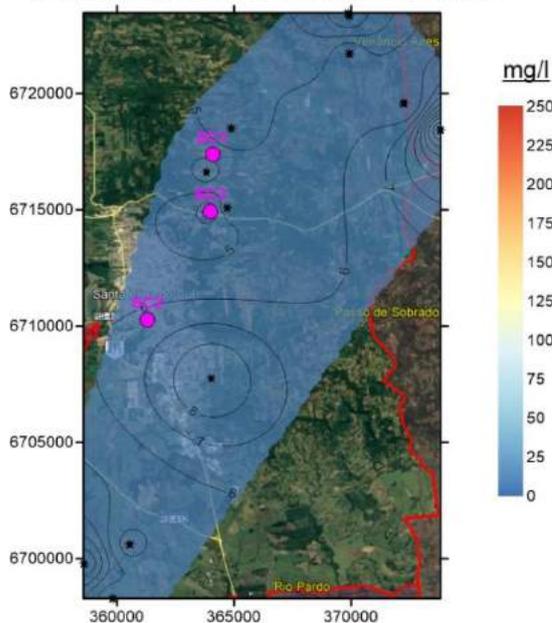


Figura 5.8: Concentração de cloreto em Santa Cruz do Sul

Concentração de fluoreto (max = 1.5 mg/l)

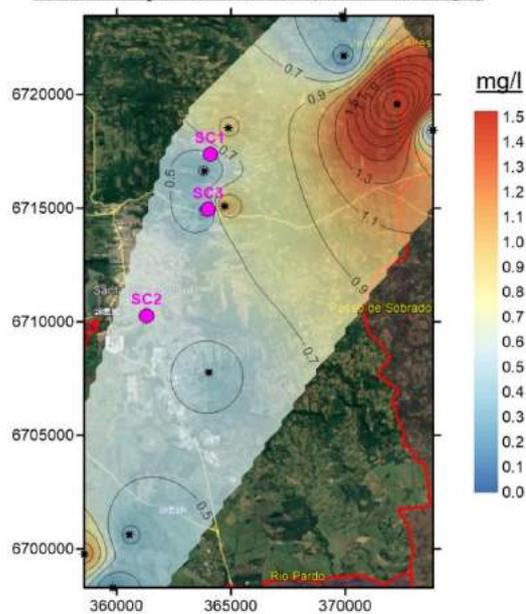


Figura 5.9: Concentração de fluoretos em Santa Cruz do Sul

Concentração de fosfato (max = 0.45 mg/l)

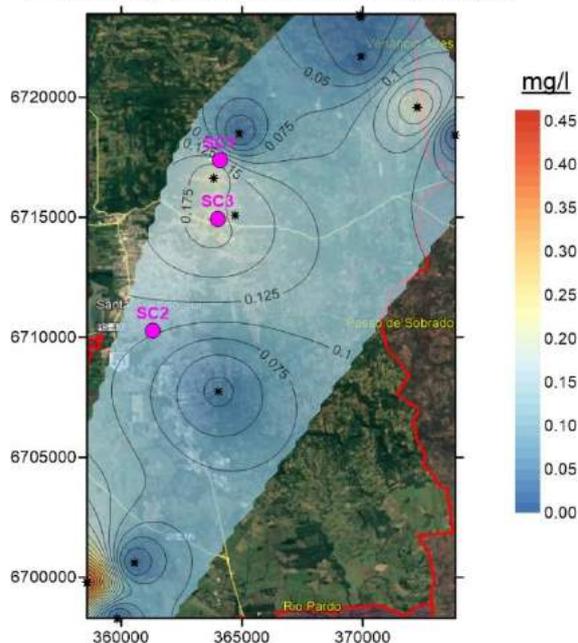


Figura 5.10: Concentração de fosfato em Santa Cruz do Sul

Concentração de nitrato (max = 10 mg/l)

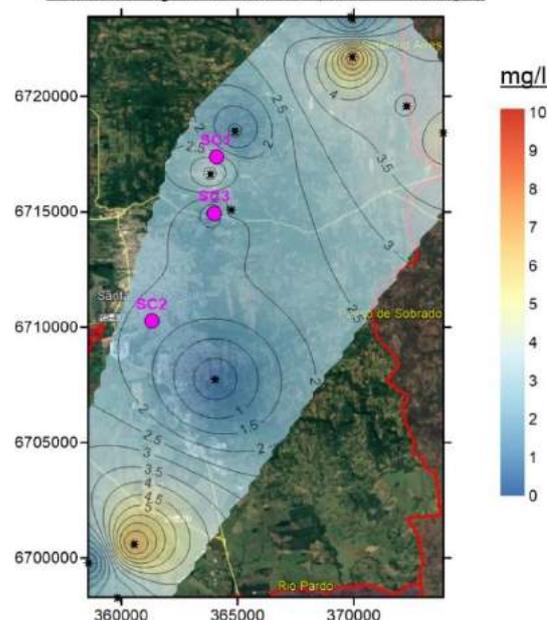


Figura 5.11: Concentração de nitrato em Santa Cruz do Sul

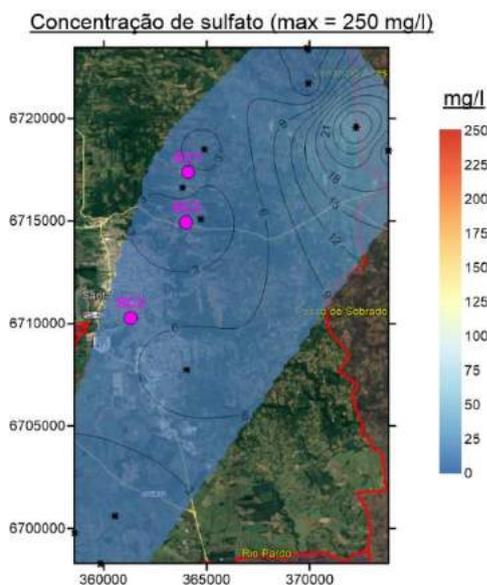


Figura 5.12: Concentração de sulfato em Santa Cruz do Sul

### 5.1.1.3 Cátions

Os cátions estudados apresentaram valores dentro dos limites permitidos. Suas concentrações são mostradas nos mapas das Figura 5.13 à Figura 5.16. Nota-se que o poço que possui maior concentração de sódio é o mesmo que teve valores de pH fora do limite e os maiores valores de salinidade e condutividade elétrica. Considerando o antes mencionado, segundo Magalhães (2006) a condutividade elétrica está ligada a quantidade de íons dissolvidos na água, portanto, poder-se-ia supor que a concentração de sódio seria a principal causa deste elevado pH, repercutindo na salinidade da água, já que o sódio precipita como sal.

Tomando em consideração o perfil do poço da linha SC2, percebe-se uma litologia argilosa, deste modo supõe-se que os minerais argilosos, como por exemplo, montmorilonita, possam causar tal alteração na concentração de sódio e posterior aumento de pH e salinidade.

Concentração de cálcio (max = 100 mg/l)

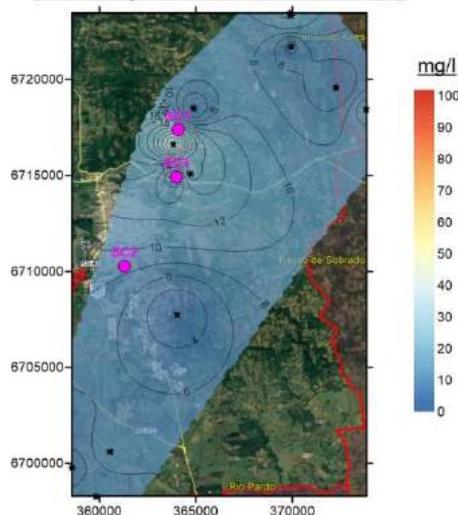


Figura 5.13: Concentração de cálcio em Santa Cruz do Sul

Concentração de magnésio (max = 30 mg/l)

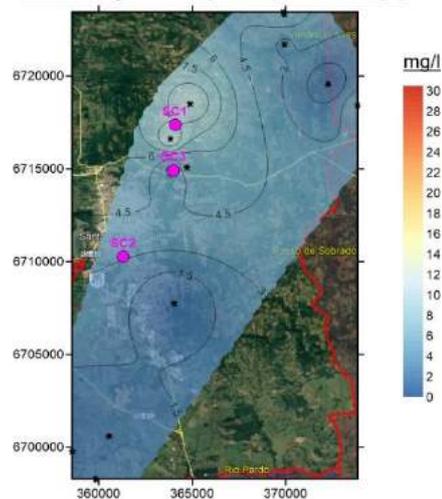


Figura 5.14: Concentração de magnésio em Santa Cruz do Sul

Concentração de potássio (max = 10 mg/l)

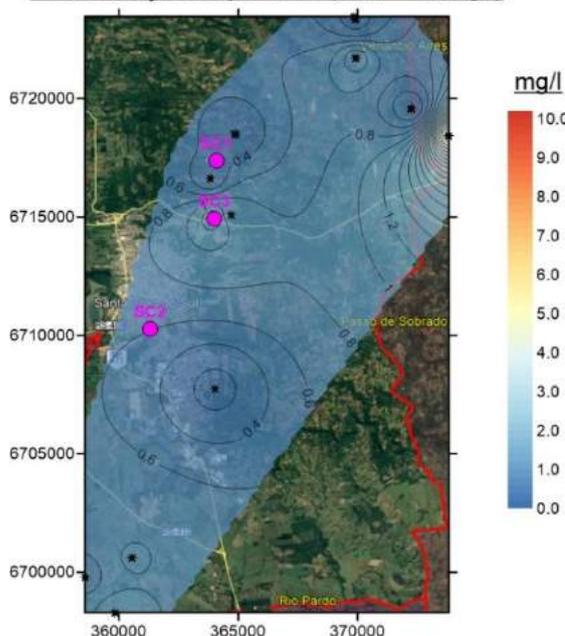


Figura 5.15: Concentração de potássio em Santa Cruz do Sul

Concentração de sódio (max = 200 mg/l)

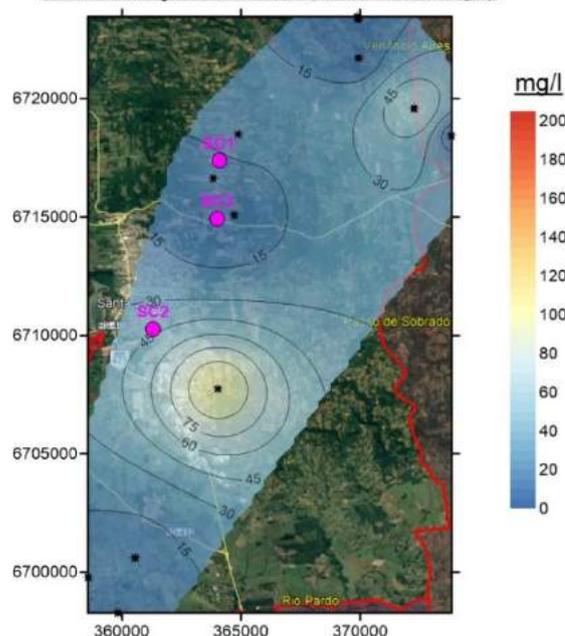


Figura 5.16: Concentração de sódio em Santa Cruz do Sul

#### 5.1.1.4 Metais

Seis concentrações de diferentes metais foram analisadas. Os mapas de suas concentrações estão mostrados nas Figura 5.17 à Figura 5.22. Observando-se que a concentração de chumbo foi elevada em quase todos os poços estudados. Savazzi (2009) menciona que a concentração deste metal em aquíferos não é muito comum, que elevadas concentrações correspondem a descargas de efluentes de indústrias mecânicas e de metalurgia, deste modo, observando o município de Santa Cruz do

Sul, existem diferentes indústrias desta índole, as quais podem ser as principais responsáveis da contaminação.

Concentração de alumínio (max = 200  $\mu\text{g/l}$ )

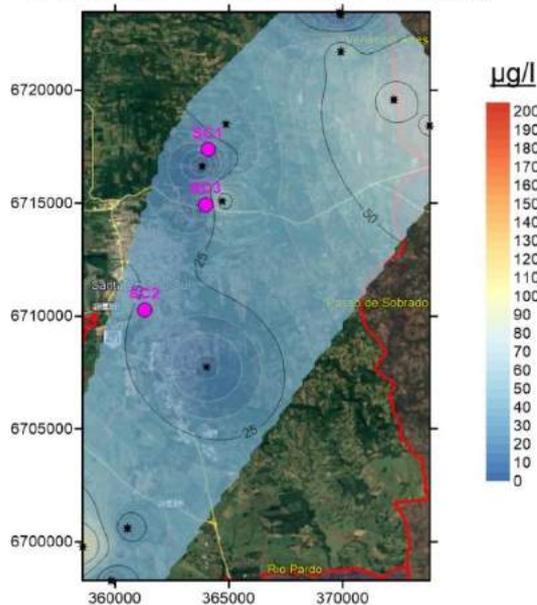


Figura 5.17: Concentração de alumínio em Santa Cruz do Sul

Concentração de bário (max = 0.7 mg/l)

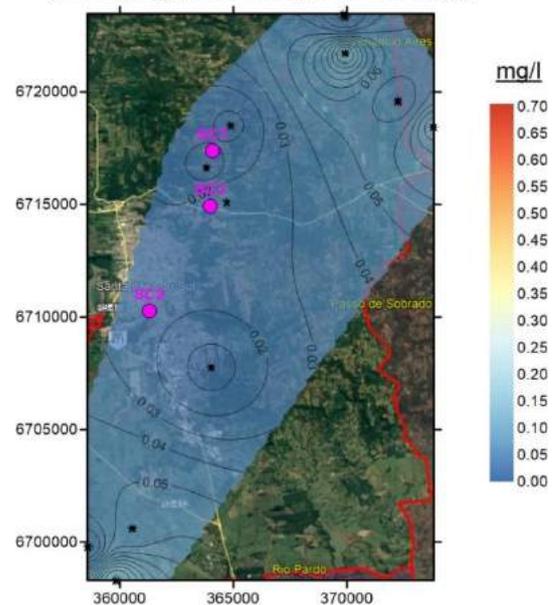


Figura 5.18: Concentração de bário em Santa Cruz do Sul

Concentração de chumbo (max = 10  $\mu\text{g/l}$ )

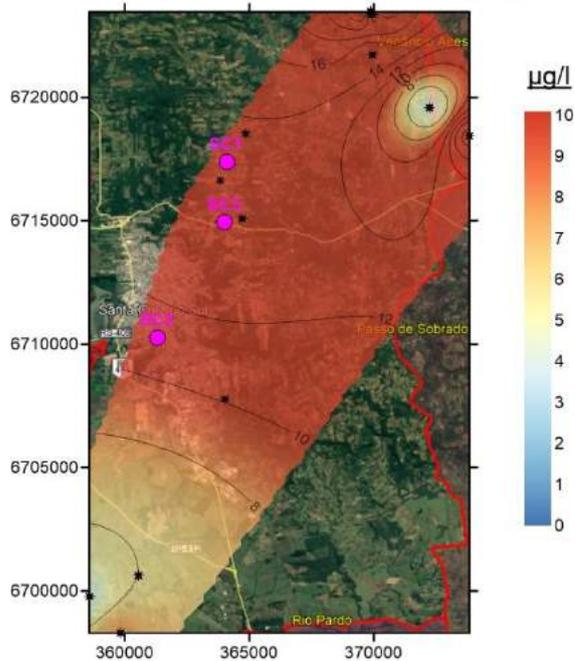


Figura 5.19: Concentração de chumbo em Santa Cruz do Sul

Concentração de cobre (max = 2  $\mu\text{g/l}$ )

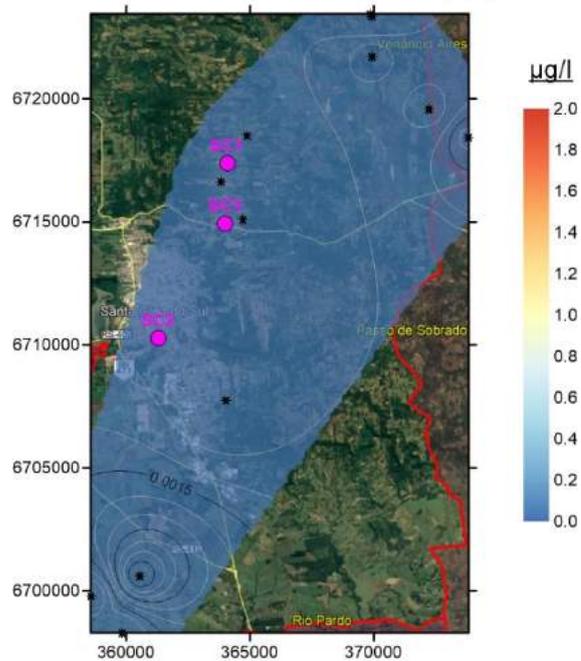


Figura 5.20: Concentração de cobre em Santa Cruz do Sul

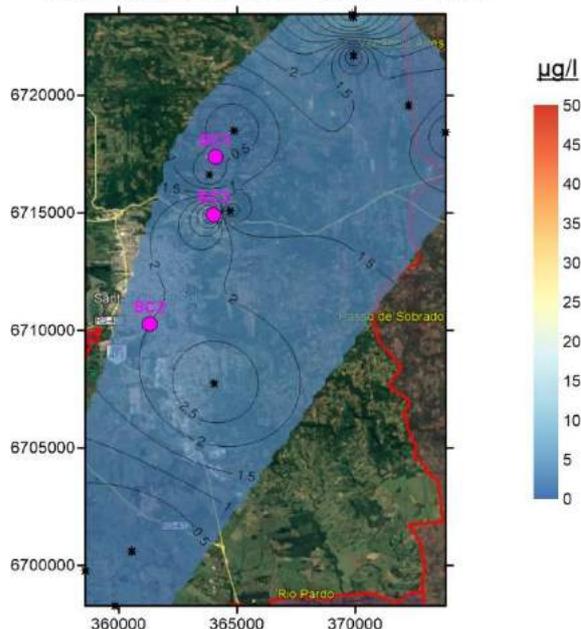
Concentração de cromo (max = 50  $\mu\text{g/l}$ )

Figura 5.21: Concentração de cromo em Santa Cruz do Sul

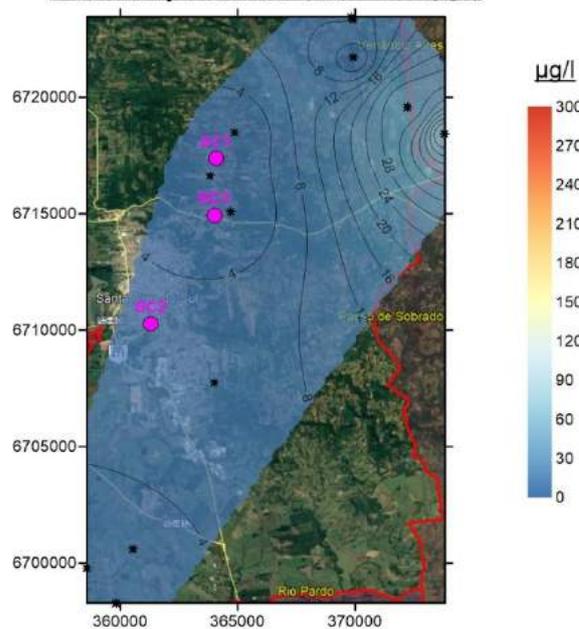
Concentração de ferro (max = 300  $\mu\text{g/l}$ )

Figura 5.22: Concentração de ferro em Santa Cruz do Sul

### 5.1.2 Métodos geofísicos

Foram adquiridas três linhas de sísmica de refração no município de Santa Cruz do Sul. Para cada uma delas foi feito um modelo de três camadas. Para duas delas havia poços nas proximidades (SC1 e SC2) o que permitiu a calibração das inversões sísmicas e elétricas, que foram adquiridas nos mesmos locais. A seguir, apresenta-se para cada linha, primeiro a sondagem de sísmica de refração e depois a sondagem geoeletrica.

#### 5.1.2.1 Linha SC1

Na linha SC1, cuja inversão está mostrada na Figura 5.23, os dados geológicos apresentam a existência de duas litologias, a primeira camada de solo argiloso, e uma segunda de basalto. No modelo usado nos dados sísmicos obteve-se uma primeira camada com uma velocidade baixa, de uns 500-750 m/s. A comparação das velocidades sísmicas observadas com os valores apresentados na Tabela 3.4 permitiu interpretar a primeira camada como sendo formada por solo argiloso não consolidado. Depois, a segunda camada, com velocidades de 2.000-2.500 m/s já poderia ser considerado como argilas consolidadas. Na terceira camada ocorre uma mudança para alta velocidade, podendo representar basalto, que possui velocidade na faixa de 4.500-5.000 m/s.

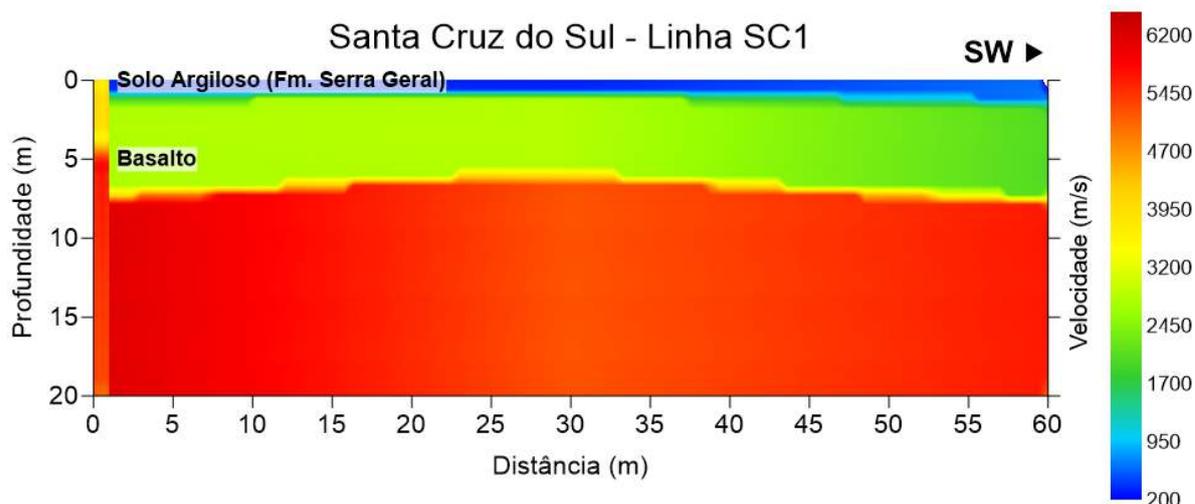


Figura 5.23: Linha SC1 (inversão da sísmica de refração)

Na sondagem geolétrica da linha SC1, obteve-se duas camadas bem diferenciadas conforme pode ser observado na inversão da Figura 5.24. A camada superior correspondendo a solo argiloso com uma resistividade média de  $40 \Omega\text{m}$  até os 5 m aproximadamente. Abaixo, estimou-se que haja uma camada de basalto, pois seu valor de resistividade, acima de  $300 \Omega\text{m}$ , coincide com o valor fornecido pela Tabela 3.5. Por outro lado, ambas camadas obtidas na modelagem, coincidem perfeitamente com o perfil do poço adjacente.

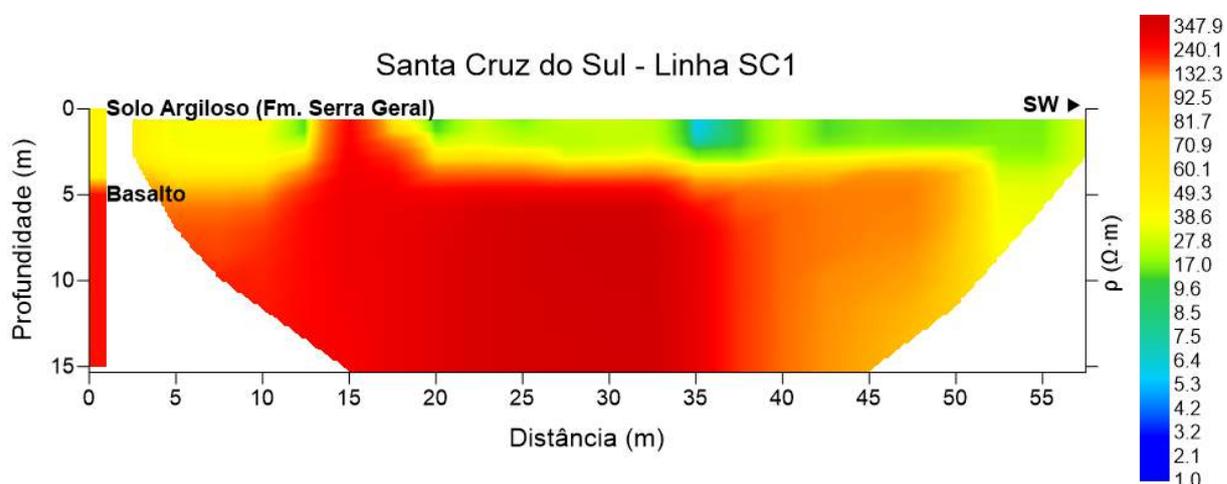


Figura 5.24: Linha SC1 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.1.2.2 Linha SC2

Os dados geológicos de poços indicam que a subsuperfície da linha SC2 é composta de argilas, primeiro de um solo argiloso e, abaixo, argilito. A inversão dos dados sísmicos dessa linha está representada na Figura 5.25, que indica uma primeira camada de 350-500 m/s que seria correspondente a um solo argiloso não

consolidado. Na segunda camada, inicia a consolidação do solo, aumentando a velocidade até 800-1.300 m/s. Na terceira camada, a velocidade ultrapassa o valor de 2.500m/s, indicando a presença de argilito, encaixando-se com o perfil do poço.

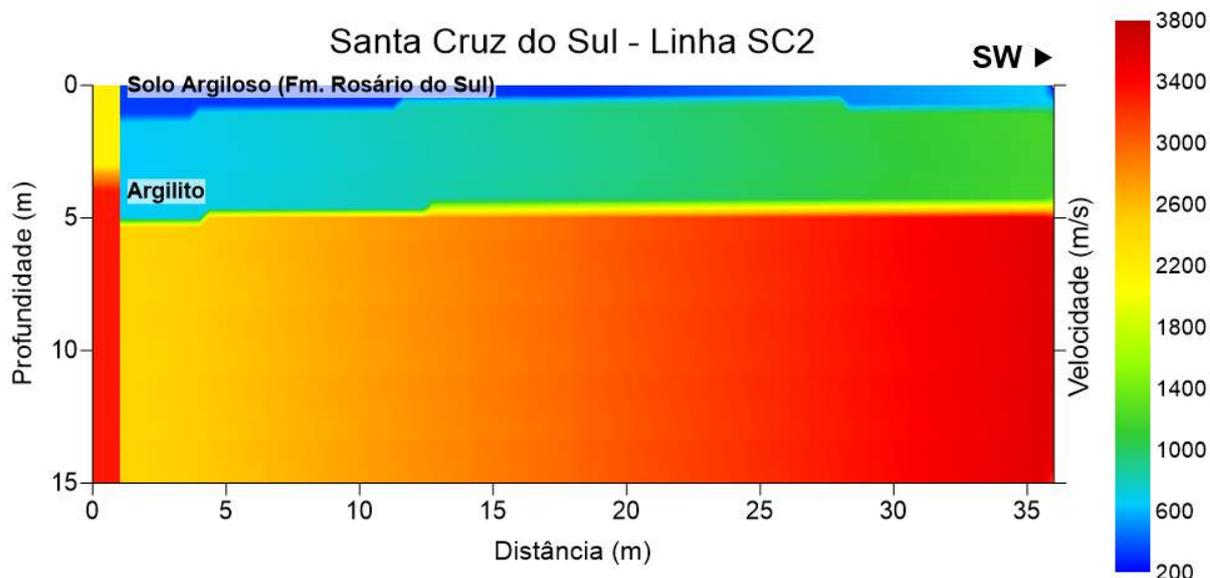


Figura 5.25: Linha SC2 (inversão da sismica de refração)

Na linha SC2, o perfil geológico indica uma primeira camada de solo argiloso, como aconteceu na SC1. A inversão dos dados da sondagem geolétrica, mostrada na Figura 5.26, apresentou valores de resistividade de aproximadamente 50  $\Omega\cdot m$ . Na segunda camada os valores diminuíram para 5  $\Omega\cdot m$ , dando a supor que poderia haver existência de água subterrânea nessa camada. Porém, se caso houvesse, haveria dificuldade da sua extração, pois as argilas são pouco permeáveis. Ademais, estes valores coincidem com o esperado, visto que esta linha foi realizada na Formação Rosário do Sul, de característica sedimentar.

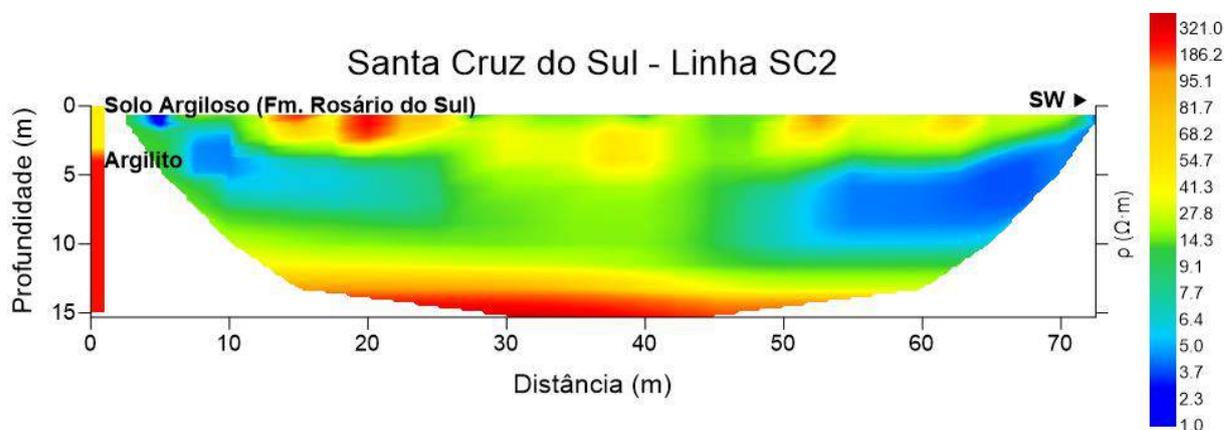


Figura 5.26: Linha SC2 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.1.2.3 Linha SC3

Na linha SC3, foram observadas velocidades sísmicas menores em relação às duas anteriores, conforme mostrado na Figura 5.27. O modelo geológico construído a partir dos dados sísmicos contém três camadas. Então, pelas velocidades mostradas no modelo, pode-se supor que a primeira camada seja composta de sedimentos não consolidados, os quais vão se consolidando na segunda camada, que aparenta ser um meio arenoso. A terceira camada apresenta uma característica areno-argilosa.

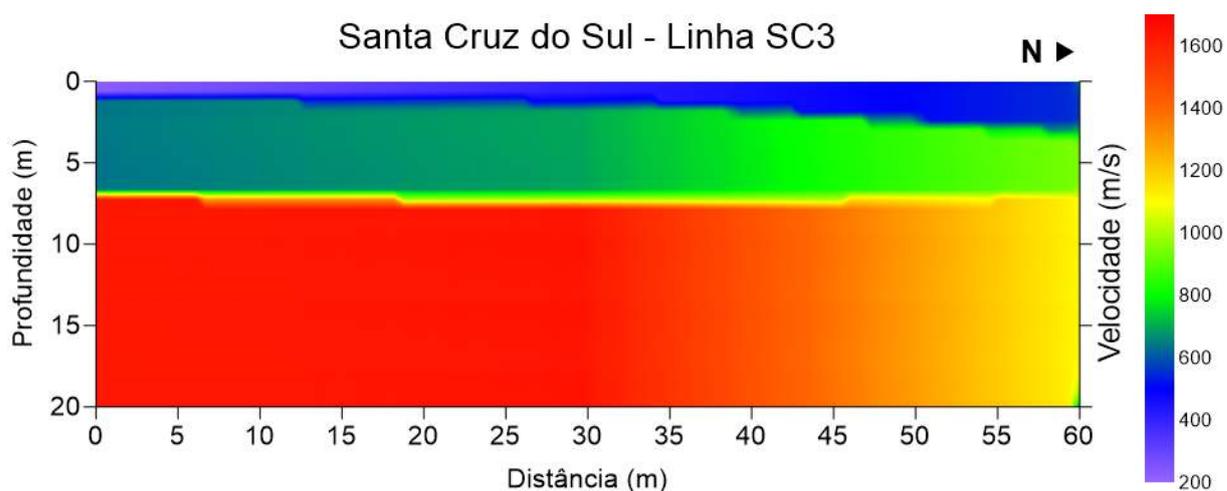


Figura 5.27: Linha SC3 (inversão da sísmica de refração)

A sondagem geolétrica da Linha SC3, mostrada na Figura 5.28, apresenta um solo superficial molhado, saturado de água devido às baixas resistividades que apresenta, em torno de 0,1 a 3,5  $\Omega\text{m}$ . Já, na segunda camada, existe um aumento brusco na resistividade, que varia do extremo sul ao extremo norte da linha. Provavelmente, isso deva ser um efeito de borda proveniente do processo de inversão. Portanto, para evitar a influência desses feitos de borda, tomou-se como referência um valor de resistividade encontrado na região entre 30 e 40 m ao longo do comprimento da linha. Nessa faixa, a resistividade situou-se entre 500-800  $\Omega\text{m}$ , o qual poderia ser resultado (como na sísmica de refração) de um meio areno-argiloso.

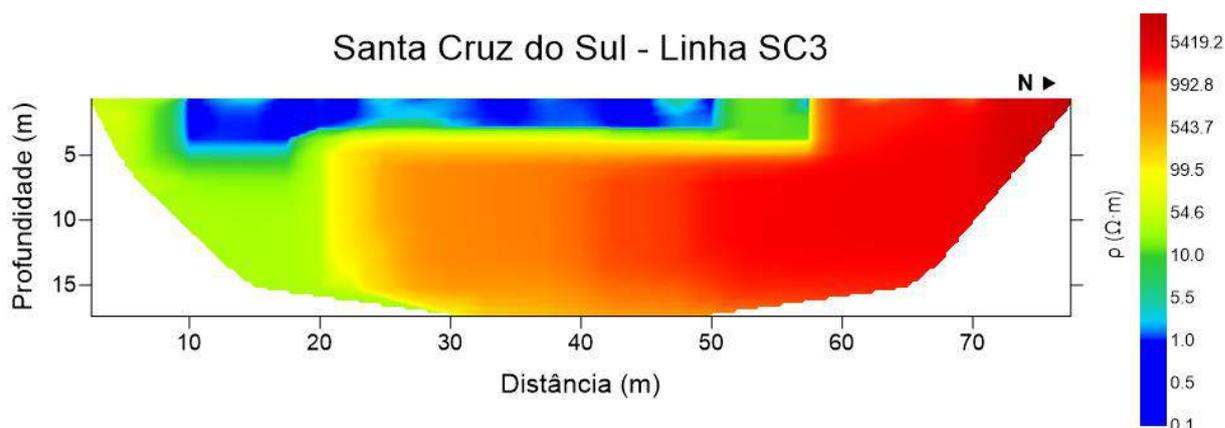


Figura 5.28: Linha SC3 (inversão da sondagem geoeétrica)

### 5.1.3 Modelagem geológica

No município de Santa Cruz do Sul, foi modelada a distribuição espacial das três formações existentes, por meio de dados de poços. O mapa de superfície da Formação Serra Geral é apresentado na Figura 5.29, assim como as Formações Santa Maria e Rosário do Sul são mostradas na Figura 5.30 e na Figura 5.31, respectivamente. Essa última formação é a que menor área ocupa na região investigada, aparecendo em menor medida nos dados de poços. Já, a Formação Serra Geral é a que apresenta maior variação em cotas.

Na Figura 5.33, apresenta-se uma representação tridimensional das Figuras 5.29 a 5.32 para observar o nível estático dos reservatórios. Ela indica uma migração na direção SSW. Além disso, nota-se na representação tridimensional da Figura 5.33, que o lugar de maior cota do nível estático se localiza embaixo da Formação Serra Geral. Na Formação Santa Maria, o nível estático se encontra com uma cota mais baixa. Finalmente, a partir destas modelagens, percebe-se como o aquífero não só se encontra numa formação senão que varia, podendo-se concentrar tanto na formação Serra Geral como Rosário do Sul. Por último, destaca-se que não foram consideradas as prováveis falhas existentes na região.



### Formação Rosário do Sul - Santa Cruz do Sul

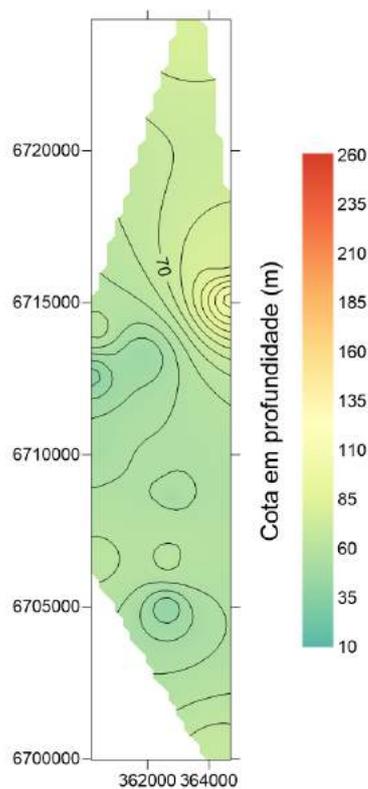


Figura 5.31: Formação Rosário do Sul em Santa Cruz do Sul

### Nível Estático - Santa Cruz do Sul

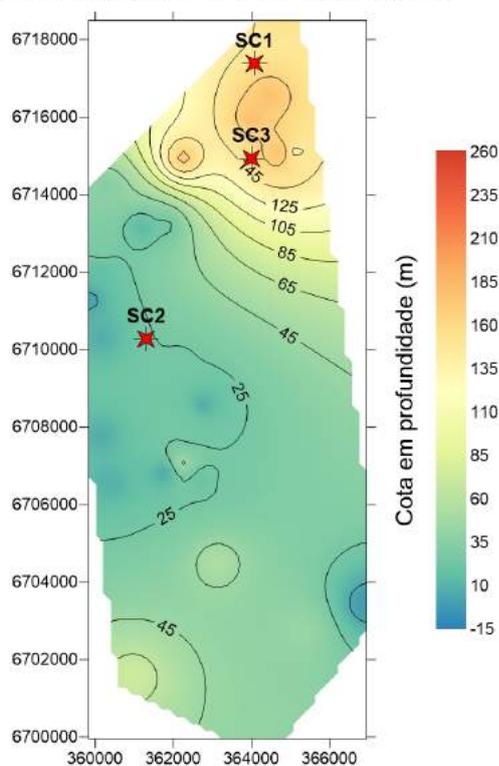


Figura 5.32: Nível estático em Santa Cruz do Sul. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos

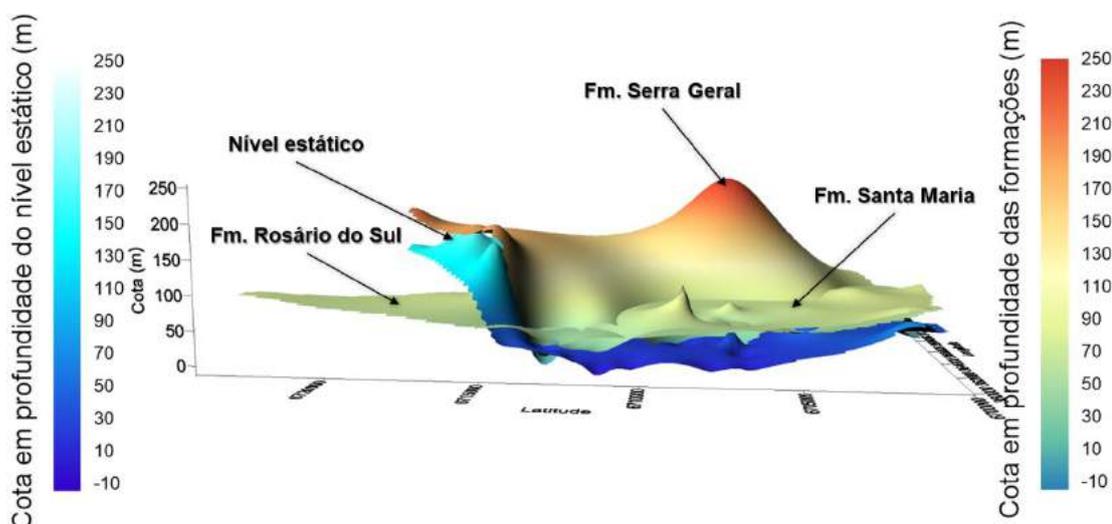


Figura 5.33: Modelagem 3D das Formações geológicas em Santa Cruz do Sul

## 5.2 Quarta Colônia

Na Região da Quarta Colônia, os estudos foram feitos em quatro municípios (Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno e Nova Palma), totalizando 22 mapas de parâmetros químicos, assim como cinco sondagens elétricas e mais cinco varreduras sísmicas de refração. Duas das dessas aquisições geofísicas foram feitas município de Agudo e uma em cada um dos outros municípios mencionados, conforme pode-se observar na Figura 5.34.

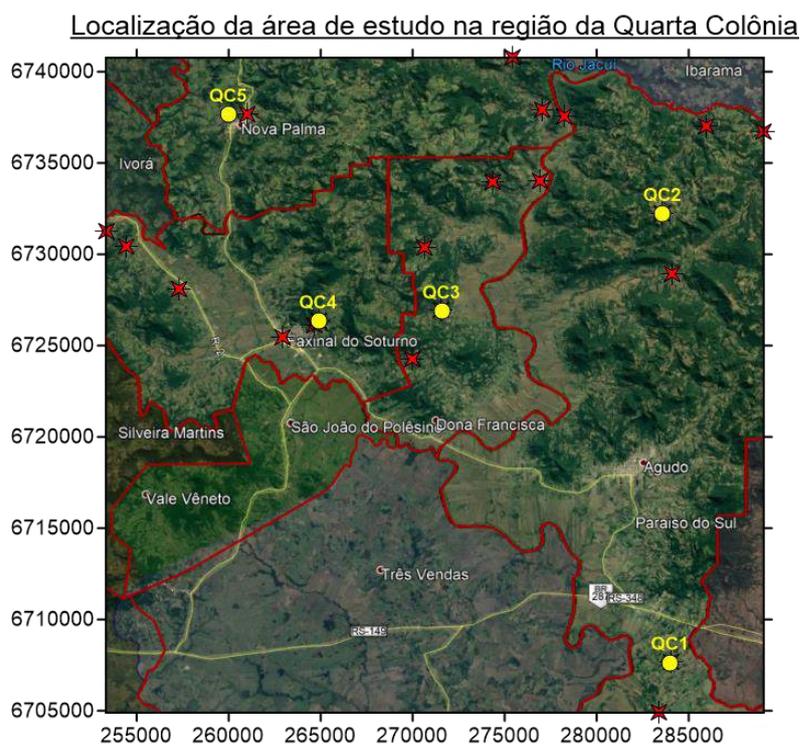


Figura 5.34: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) na Quarta Colônia (imagem de satélite base por meio de Google Earth)

## 5.2.1 Hidrogeoquímica

### 5.2.1.1 Parâmetros físico-químicos

Os mapas dos parâmetros físico-químicos obtidos na Região da Quarta Colônia estão representados na Figura 5.35 à Figura 5.40. Vários poços apresentaram valores acima do limite, conforme discutido adiante. A alcalinidade da água na região encontra-se acima do limite, tendo só dois poços com valores inferiores a 200mg/l. Por outro lado, o poço localizado na linha QC1 teve um excesso de oxigênio dissolvido. Ademais, houve dois poços com valores altos na salinidade, o que refletiu em sua alta condutividade elétrica.

Segundo Roadcap et al. (2005), a água subterrânea extremamente alcalina pode ser encontrada sob muitas siderúrgicas fechadas e lixões, devido que a escória despejada é principalmente escória de ferro, subproduto da produção de ferro-gusa a partir de material de minério, e escória de aço, subproduto da produção de aço a partir de ferro-gusa. A escória de ferro é formada no alto-forno a partir do calcário ou dolomita adicionado ao minério de ferro fundido para remover a sílica e outras impurezas, enquanto a escória de aço geralmente é composta de grandes quantidades de metal misturado com minerais de silicato de cálcio, o que ocasionaria a alta alcalinidades e se supõe este motivo devido que existe também uma concentração extrema de chumbo na região.

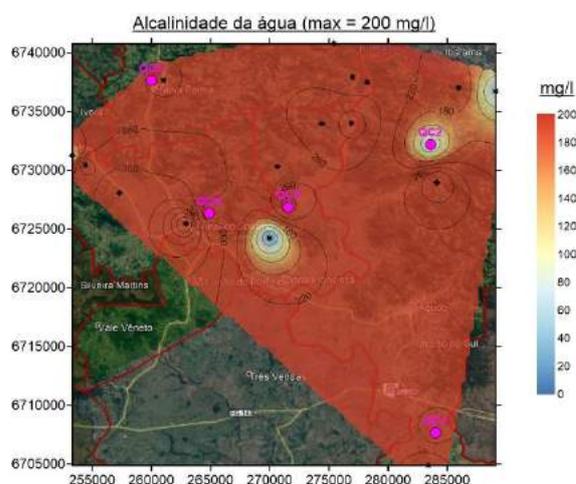


Figura 5.35: Alcalinidade da água na Região da Quarta Colônia

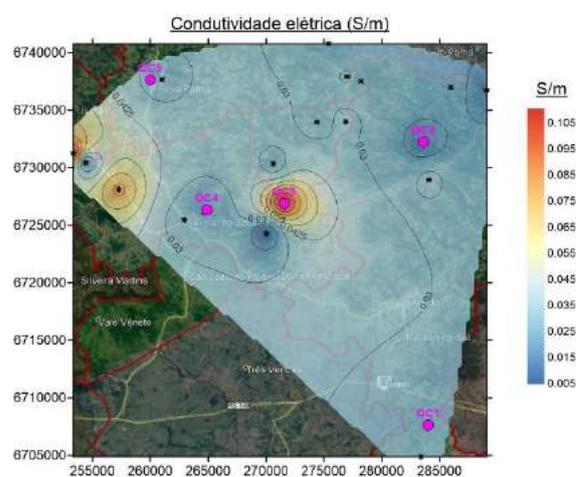


Figura 5.36: Condutividade elétrica na Região da Quarta Colônia

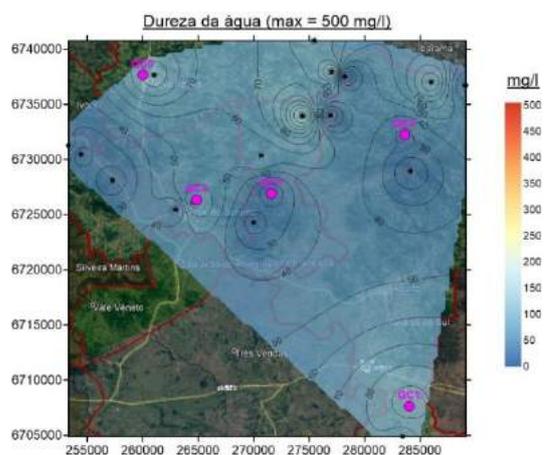


Figura 5.37: Dureza da água na Região da Quarta Colônia

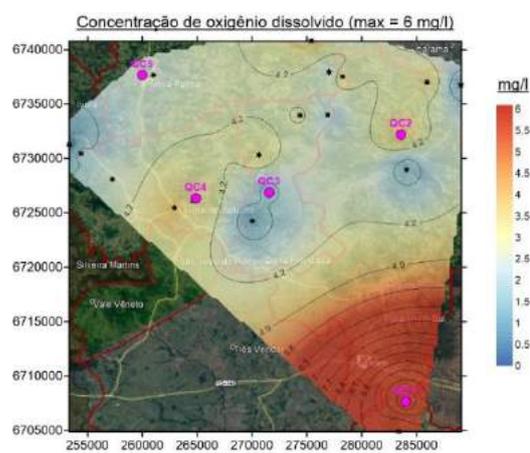


Figura 5.38: Concentração de oxigênio dissolvido na Região da Quarta Colônia

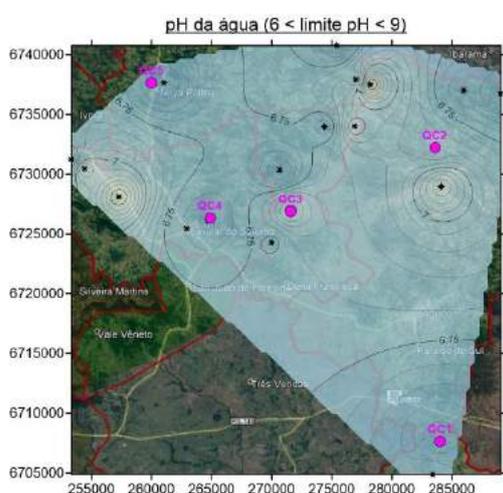


Figura 5.39: pH da água na Região da Quarta Colônia

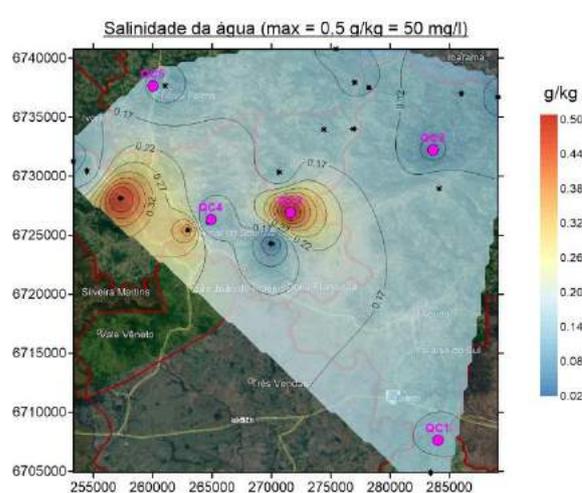


Figura 5.40: Salinidade da água na Região da Quarta Colônia

### 5.2.1.2 Ânions

As Figura 5.41 à Figura 5.45 mostram mapas de concentração para os cinco ânions estudados amostrados na região da Quarta Colônia. Observa-se que existe um excesso na concentração de fluoretos nos mesmos poços que apresentaram valores de salinidade acima do permitido. Além disso, esses poços são os que possuem maiores concentrações de sulfatos.

Borges Soares (2019) menciona que a alta concentração de fluoretos e fosfatos deve-se à processos naturais como a dissolução da rocha, por outro lado, no caso de fosfatos, a decomposição de matéria orgânica pode produzir este tipo de comportamento.

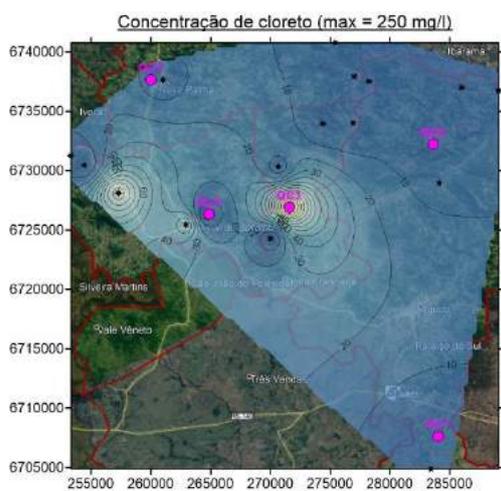


Figura 5.41: Concentração de cloreto na Região da Quarta Colônia

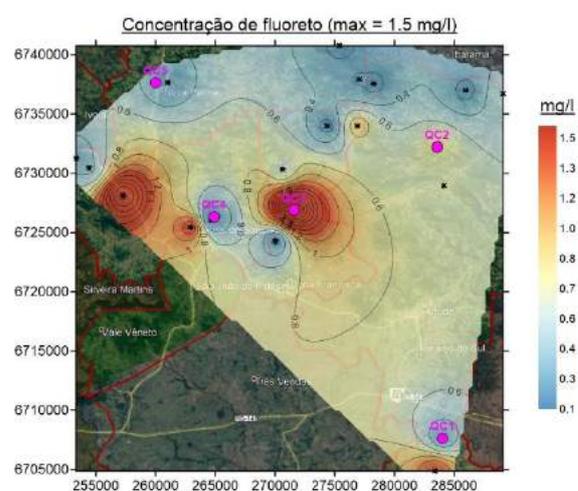


Figura 5.42: Concentração de fluoreto na Região da Quarta Colônia

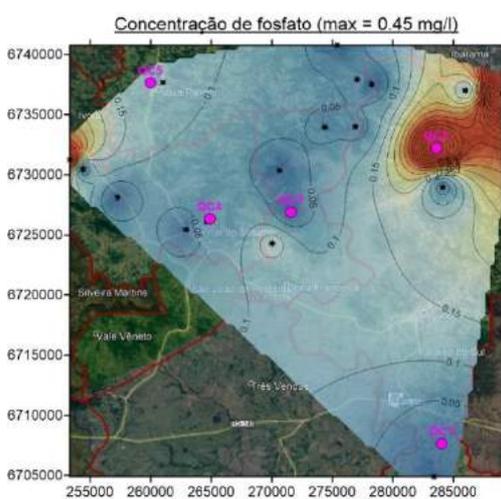


Figura 5.43: Concentração de fosfato na Região da Quarta Colônia

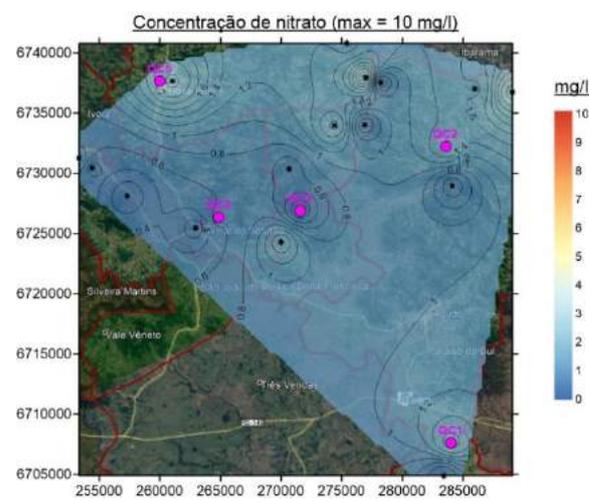


Figura 5.44: Concentração de nitrato na Região da Quarta Colônia

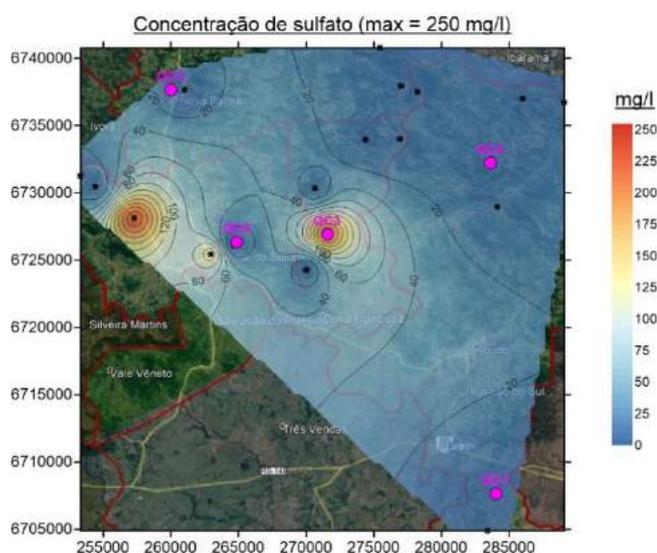


Figura 5.45: Concentração de sulfato na Região da Quarta Colônia

### 5.2.1.3 Cátions

A Figura 5.46 à Figura 5.50 mostram os mapas de concentração dos cátions amostrados na Região da Quarta Colônia. Alguns destes valores se encontram acima do valor máximo permitido.

Observaram-se poços com concentrações de amônia superiores ao limite. O primeiro (perto das linhas QC2) apresentou um valor aproximado a 1,8 mg/l, enquanto outro poço (no extremo noroeste) apresentou um valor igual ao dobro do limite, tendo uma concentração aproximada de 3 mg/l. Além disso, a concentração de fosfato nesses mesmos poços apresentou-se acima do valor máximo permitido e Borges Soares (2019) menciona que a concentração de amônia está também ligada à decomposição da matéria orgânica, portanto, pode-se supor que esta seja a razão pela qual haja uma anomalia de fluoretos e de amônia.

Em adição, observou-se que a concentração de sódio se apresentou acima do valor máximo permitido nos poços onde houve maior salinidade e alta concentração de fluoretos, indicando uma correlação entre ambos parâmetros, supondo que a origem provável seja a dissolução de rochas.

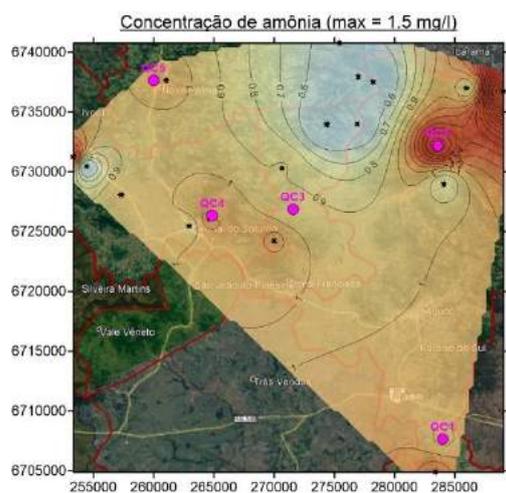


Figura 5.46: Concentração de amônia na Região da Quarta Colônia

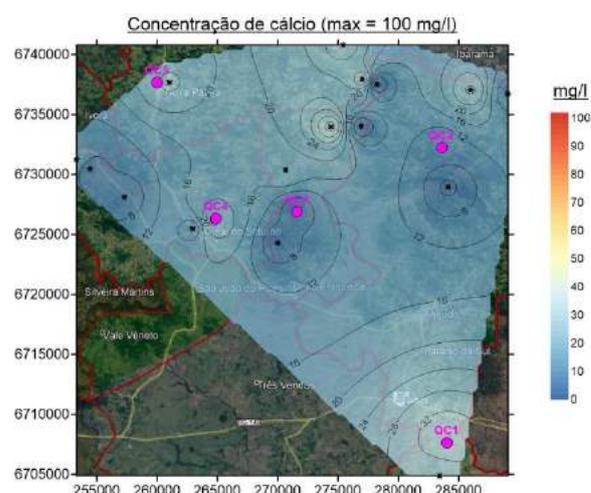


Figura 5.47: Concentração de cálcio na Região da Quarta Colônia

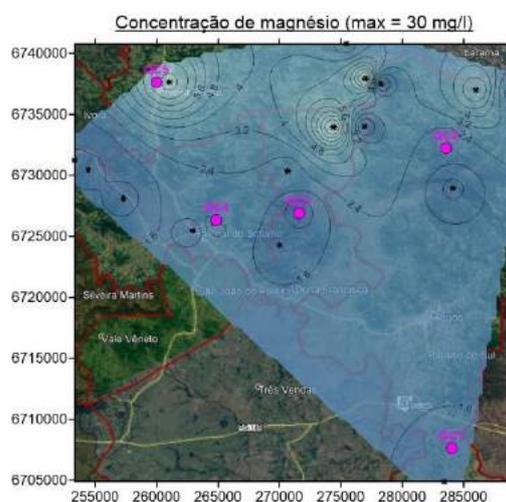


Figura 5.48: Concentração de magnésio na Região da Quarta Colônia

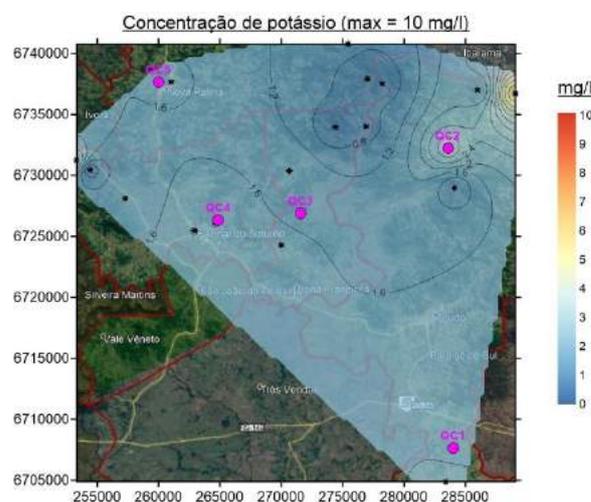


Figura 5.49: Concentração de potássio na Região da Quarta Colônia

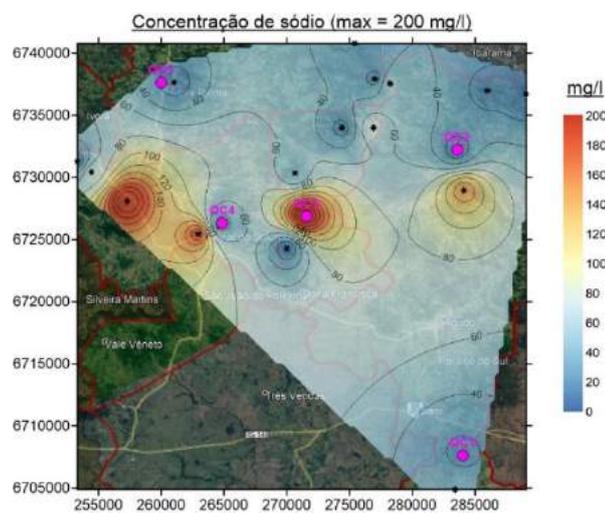


Figura 5.50: Concentração de sódio na Região da Quarta Colônia

### 5.2.1.4 Metais

A Figura 5.51 à Figura 5.56 apresentam mapas de concentração dos metais amostrados nos poços da região da Quarta Colônia. Dentre os metais estudados, o parâmetro que esteve em quase todos os poços acima do limite foi chumbo, o qual pode ter contaminado toda a região. Além disso, dois poços tiveram contrações excessivas de cobre. A agência de controle de poluição de Minnesota (Minnesota Pollution Control Agency, 1999) menciona que a principal fonte desse metal são rochas. As concentrações nas águas subterrâneas geralmente ficam bem abaixo da quantidade que potencialmente poderia ocorrer (com base na solubilidade). Conseqüentemente, existem muitas fontes antropogênicas industriais, as quais incluem ligas, tintas, pigmentos, galvanoplastia, baterias, peças automotivas, revestimentos e fiação elétrica. O cobre também é usado em inseticidas ou fungicidas. Todos esses metais, tais como chumbo, cobre, cádmio e cromo, estão presentes em resíduos industriais e lodo de esgoto, por tanto, a alta concentração de cobre pode ter relação com a origem excessiva do chumbo. Porém, estes estudos foram preliminares e para assegurar a provável poluição, precisam-se de mais estudos nas regiões críticas.

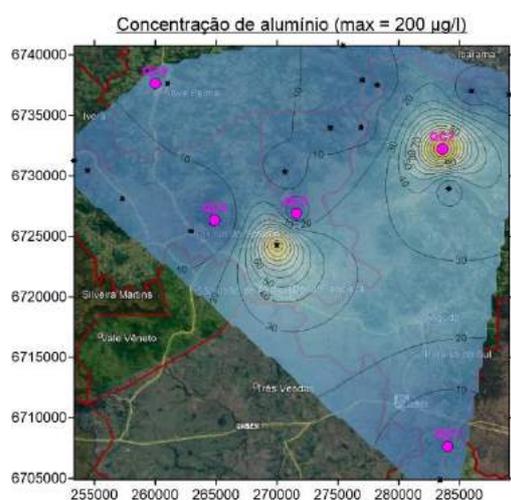


Figura 5.51: Concentração de alumínio na Região da Quarta Colônia

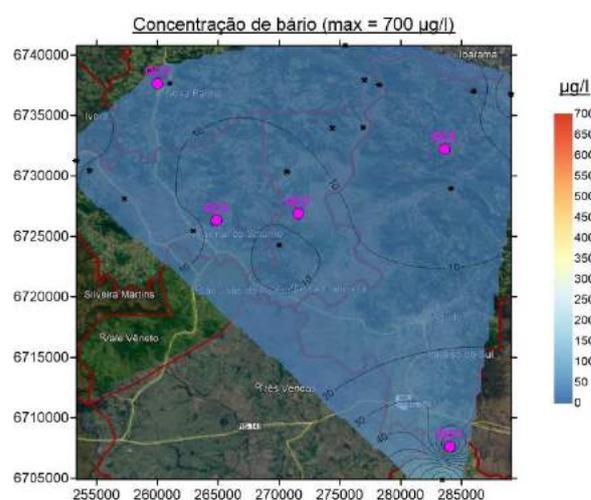


Figura 5.52: Concentração de bário na Região da Quarta Colônia

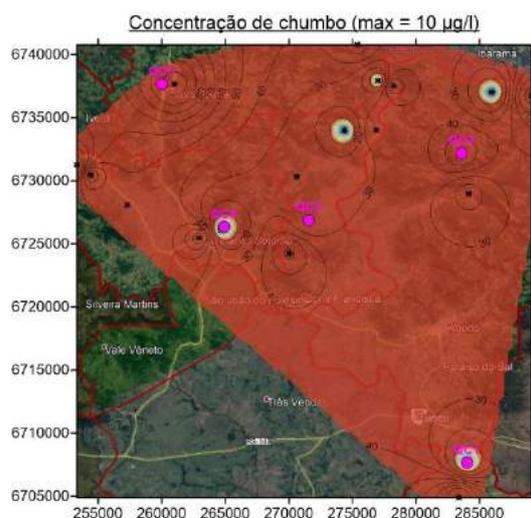


Figura 5.53: Concentração de chumbo na Região da Quarta Colônia

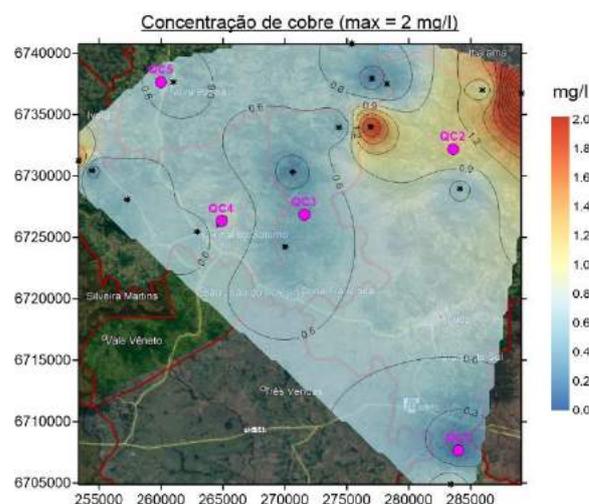


Figura 5.54: Concentração de cobre na Região da Quarta Colônia

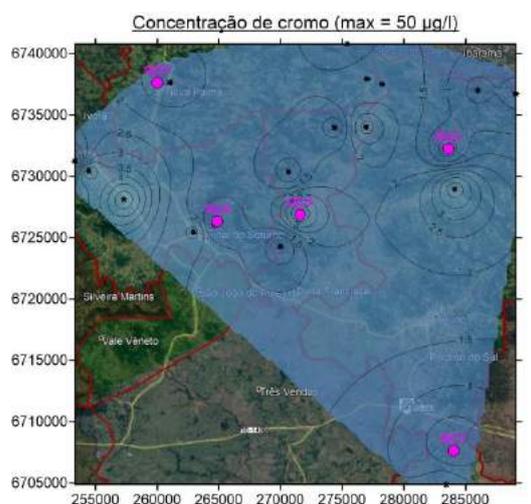


Figura 5.55: Concentração de cromo na Região da Quarta Colônia

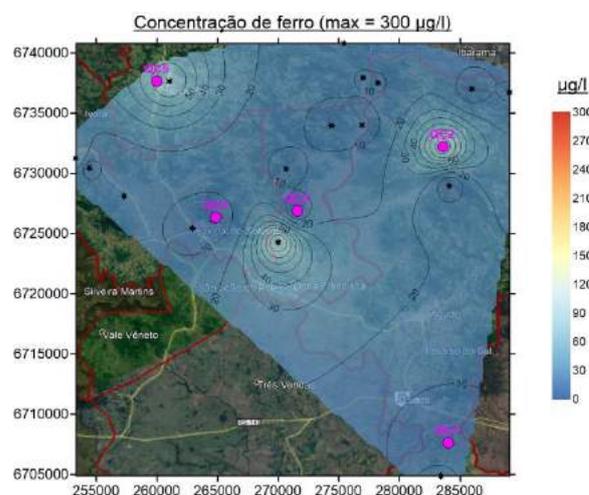


Figura 5.56: Concentração de ferro na Região da Quarta Colônia

## 5.2.2 Métodos geofísicos

Na Região da Quarta Colônia, foram levantadas um total de 5 linhas sísmicas de refração, as quais foram processadas e interpretadas para a obtenção da provável litologia existente. Metodologia similar foi aplicada para o método geolétrico nas correspondentes aquisições.

### 5.2.2.1 Linha QC1

O perfil geológico na região da primeira linha, chamada de QC1, indica a presença de camadas argilosas. A Figura 5.57 apresenta a inversão dos dados sísmicos cujo modelo geológico foi obtido com três camadas. O modelo indica que a primeira camada é não consolidada e sofreu intemperismo, apresentando uma

velocidade média de 450 m/s. Nos próximos metros da camada, ocorre arenito argiloso com velocidade de 1.650 m/s e aos 8 m de profundidade, existe uma maior compactação, a qual faz com que a velocidade desse arenito argiloso seja maior do que 2.100 m/s.

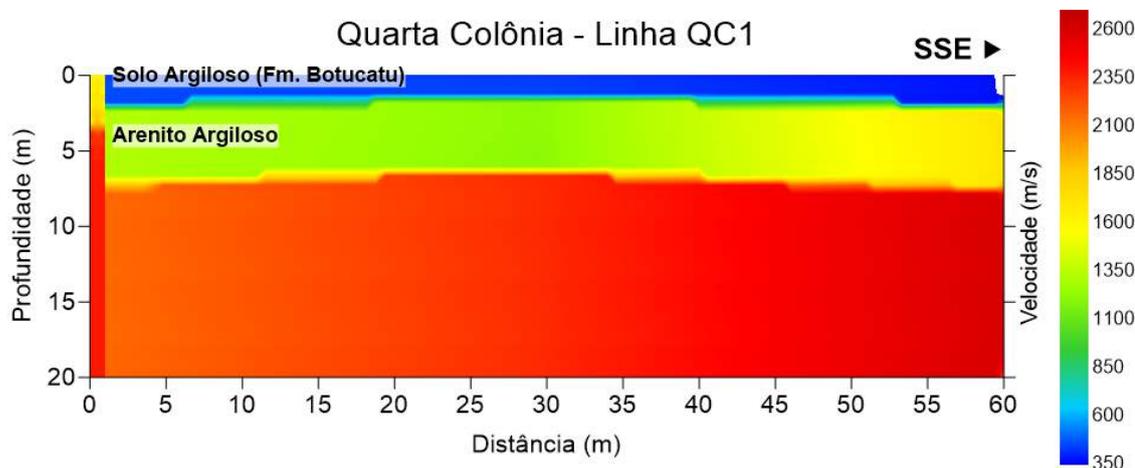


Figura 5.57: Linha QC1 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados elétricos da linha QC1 é mostrada na Figura 5.58. Ela indica claramente as duas camadas descritas nos perfis geológicos de poços: a primeira com alta resistividade, indicando um solo argiloso bem seco, enquanto na segunda, percebe-se claramente uma baixa resistividade, podendo supor-se que tal valor se deva ao fato de o arenito argiloso apresentar água nos seus poros (rocha porosa e permeável), estando desta forma, saturado. Não obstante, segundo a hidrogeoquímica, este provável reservatório poderia ter sido contaminado por chumbo, além de uma excessiva concentração de oxigênio dissolvido, com uma alta alcalinidade e presença de amônia, mas, precisar-se-ia mais estudos químicos na área para afirmar tal suposição..

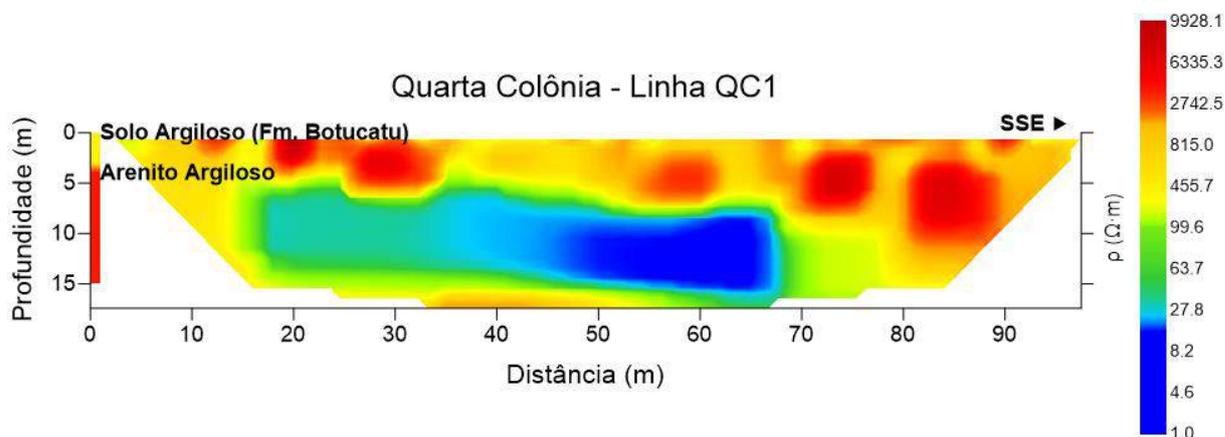


Figura 5.58: Linha QC1 (inversão da sondagem geoeletrica)

### 5.2.2.2 Linha QC2

A inversão dos dados sísmicos da linha QC2 é mostrada na Figura 5.59. Ela indica uma primeira camada com intemperismo e não consolidada. A seguir, existe uma segunda camada de alta velocidade, de 3.800 m/s, e uma terceira camada com velocidade de mais de 5.200 m/s. Entende-se que se trata de uma litologia basáltica desde a segunda camada tomando como referência a Tabela 3.4. Porém, o basalto da segunda camada pode estar mais alterado do que na terceira camada, havendo, assim, uma diferença de velocidades entre as duas camadas.

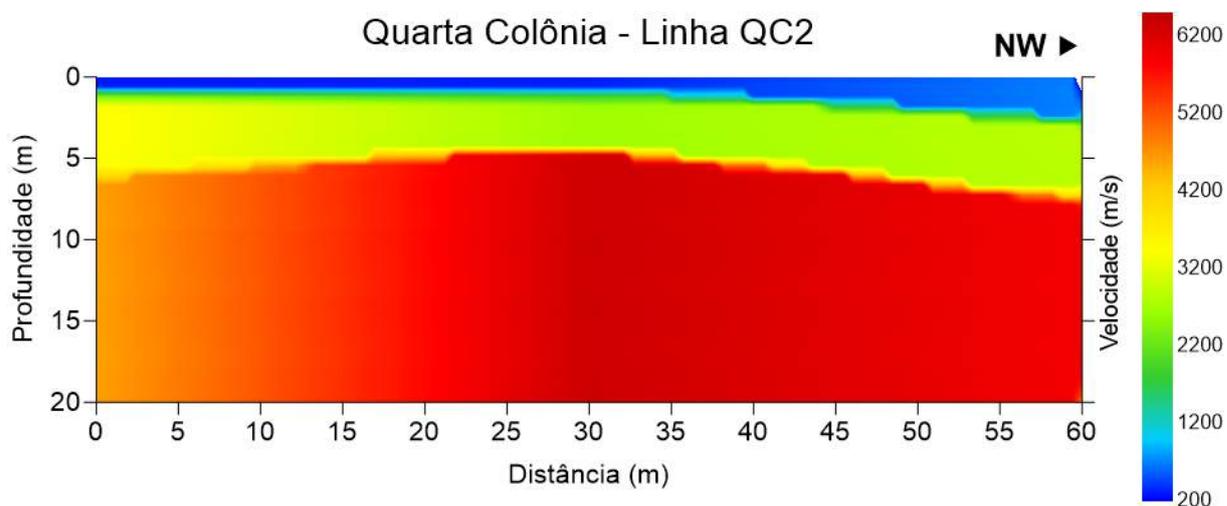


Figura 5.59: Linha QC2 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados geoeletricos da linha QC2 é mostrada na Figura 5.60. Ela mostra altos valores de resistividade desde a primeira camada até as maiores profundidades. Portanto, comparando com a sísmica de refração, tem-se um resultado consistente que sugere a presença de basalto ao longo do perfil.

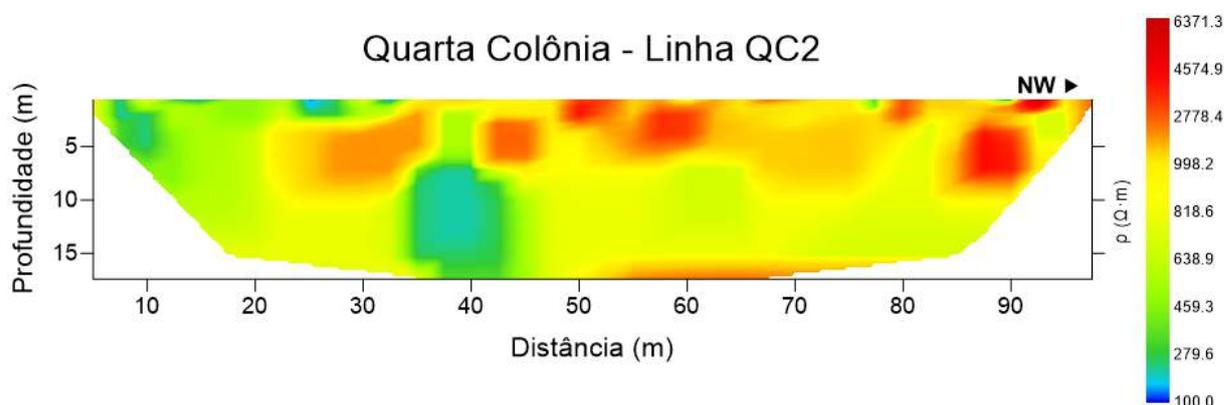


Figura 5.60: Linha QC2 (inversão da sondagem geoeletrica)

### 5.2.2.3 Linha QC3

O perfil geológico da linha QC3 indica a existência de duas camadas, conforme mostrado na coluna à esquerda da Figura 5.61. Por meio do modelo de inversão dos dados sísmicos obteve-se três camadas: a primeira, que foi alterada pelo intemperismo, mas igualmente areno-argiloso; a segunda com uma velocidade de 1.400-1.500 m/s e a terceira camada, provavelmente composta de folhelhos, com velocidades acima de 3.500 m/s, encaixando-se com o perfil geológico.

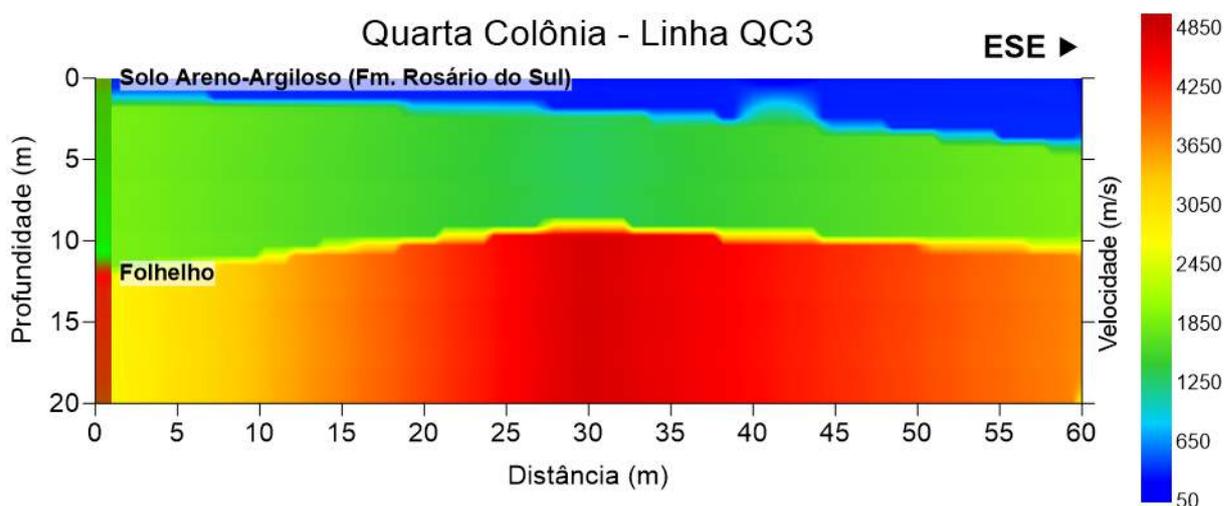


Figura 5.61: Linha QC3 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados geoeletricos da linha QC3 é mostrada na Figura 5.62. Ela indica a existência de altos valores de resistividade no perfil todo, quase sem discriminação de camadas. Contudo, o início dos folhelhos poderia ser considerado como o topo da camada verde na Figura 5.62, com resistividade de 18  $\Omega\cdot m$ , que se encontra cerca de 13 m de profundidade no comprimento de 60 m.

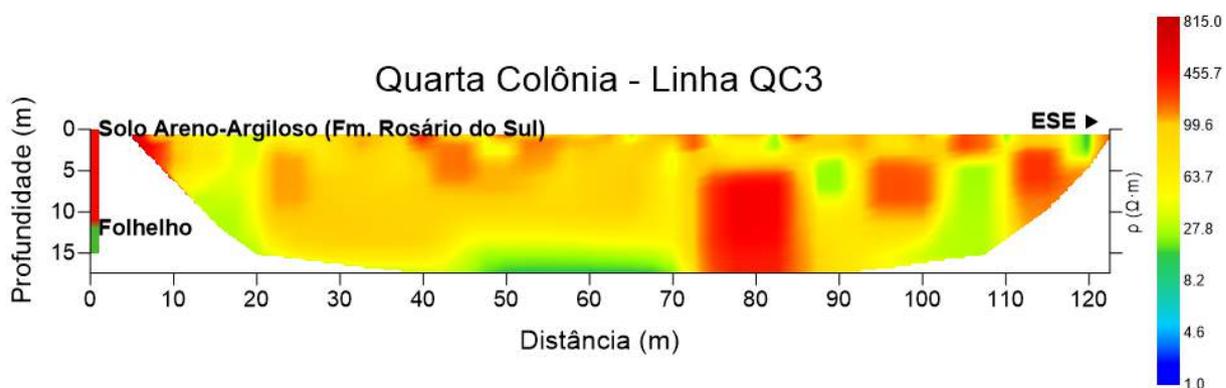


Figura 5.62: Linha QC3 (inversão da sondagem geoeletrica)

### 5.2.2.4 Linha QC4

O perfil geológico da linha QC4 é mostrado na coluna à esquerda da Figura 5.63. Ele indica a presença de cinco litologias diferentes, num intervalo de profundidade pequeno. Porém, devido a problemas de resolução vertical (separação de geofones e frequência) só consegue-se fazer uma modelagem de 3 camadas, que, muito provavelmente, apresenta informação de duas litologias misturadas em alguma camada. Em conclusão, analisando a linha, a primeira camada deve tratar-se de um solo areno-argiloso não consolidado; depois, uma camada areno-argilosa com arenito muito fino a uma velocidade de 1.300 m/s, e, na terceira camada, existe uma formação de arenito médio, provavelmente influenciado por seixos rolados, tendo uma velocidade de até 2.400 m/s. Porém, a camada de arenito fino existente no perfil do poço, não foi observada na inversão sísmica.

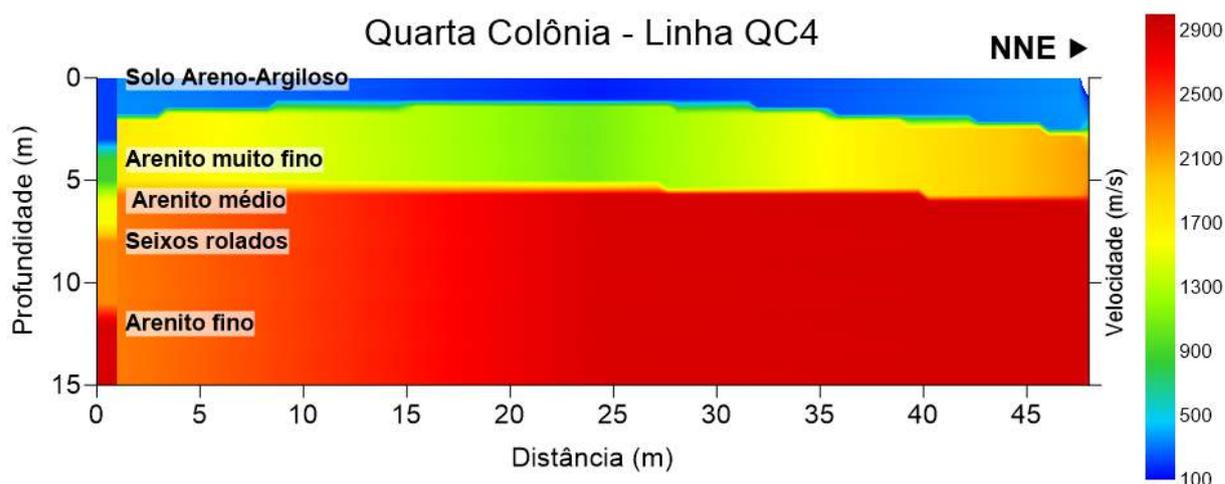


Figura 5.63: Linha QC4 (inversão da sísmica de refração)

A sondagem elétrica da linha SC4, mostrada na Figura 5.64, possui mais informações a serem interpretadas devido à existência de diferentes litologias. Interpretamos a primeira camada como sendo de solo areno-argiloso, com resistividade maior do que 800  $\Omega\text{m}$ . Abaixo dela, a resistividade passa para cerca de 90  $\Omega\text{m}$ , correspondendo provavelmente a arenito muito fino. A seguir, há uma queda de resistividade para menos de 2  $\Omega\text{m}$ , dando a entender que existe uma saturação de água nos seixos rolados, os quais apresentam características geológicas ótimas como reservatórios de água. Na base desse possível acúmulo de água poderia encontrar-se o topo do arenito fino o qual atuaria como camada selante pois, devido ao seu menor tamanho de partícula. Embora quase toda a região pareça estar poluída por

chumbo, a concentração nesta linha se encontra dentro dos limites. Por outro lado, só a concentração de fluoretos poderia ocasionar problemas neste possível reservatório.

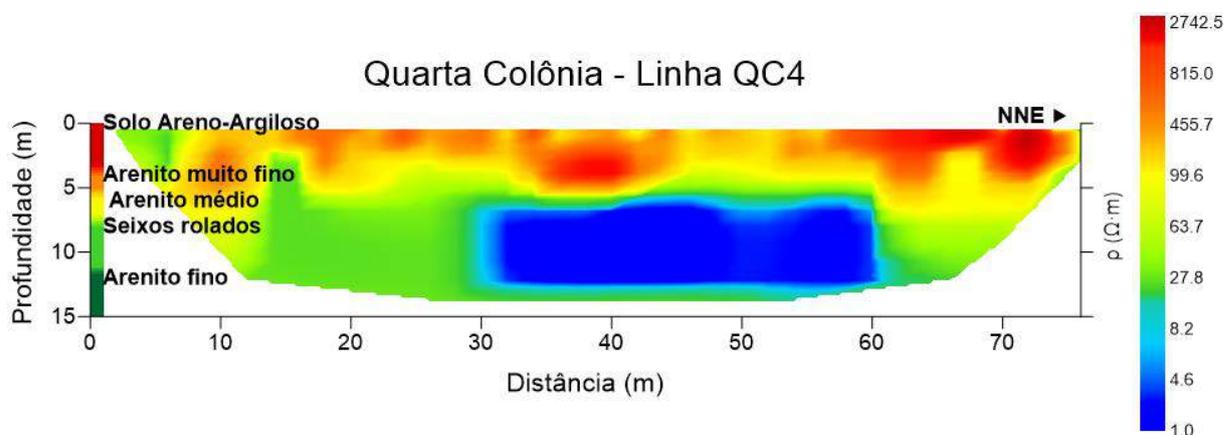


Figura 5.64: Linha QC4 (inversão da sondagem geoeletrica)

#### 5.2.2.5 Linha QC5

A inversão da sísmica de refração da linha QC5 é mostrada na Figura 5.65. Nela, pode-se observar uma primeira camada não consolidada com maior espessura que as outras quatro camadas da região. A segunda camada, com velocidade de 2.300 m/s poderia ser arenito, o qual se encontraria mais compactado na terceira camada do modelo, com uma velocidade maior do que 3.000 m/s

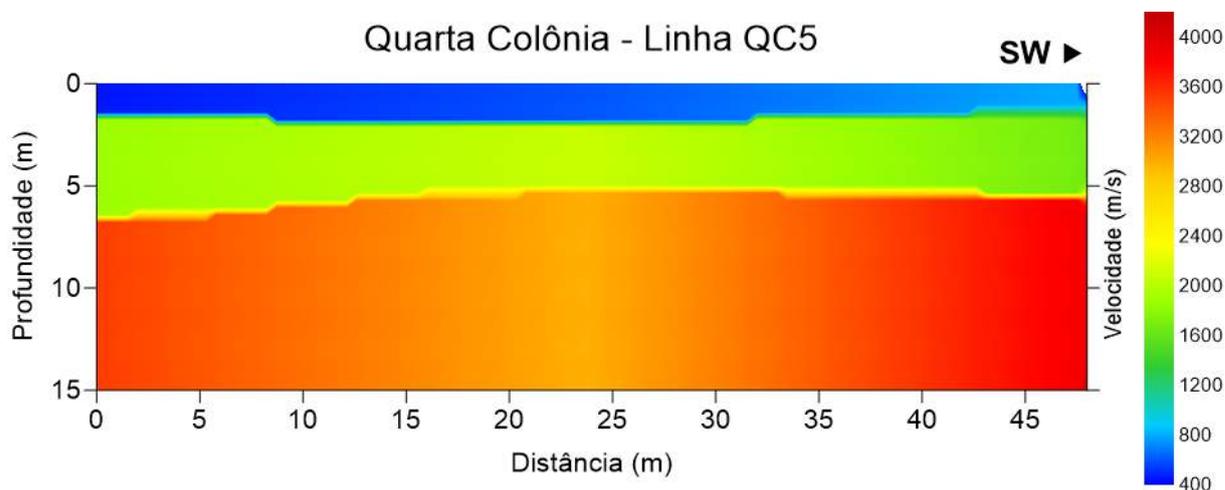


Figura 5.65: Linha QC5 (inversão da sísmica de refração)

A inversão da sondagem elétrica da linha QC5 é apresentada na Figura 5.66. Observa-se presença de duas camadas perfeitamente diferenciadas: a primeira correspondente a uma resistividade de 30 Ωm, a qual passa rapidamente a mais de 1600 Ωm, havendo, assim, a possibilidade de tratar-se de uma primeira camada areno-argilosa seguida de um arenito, assim como foi descrito na sísmica de refração.

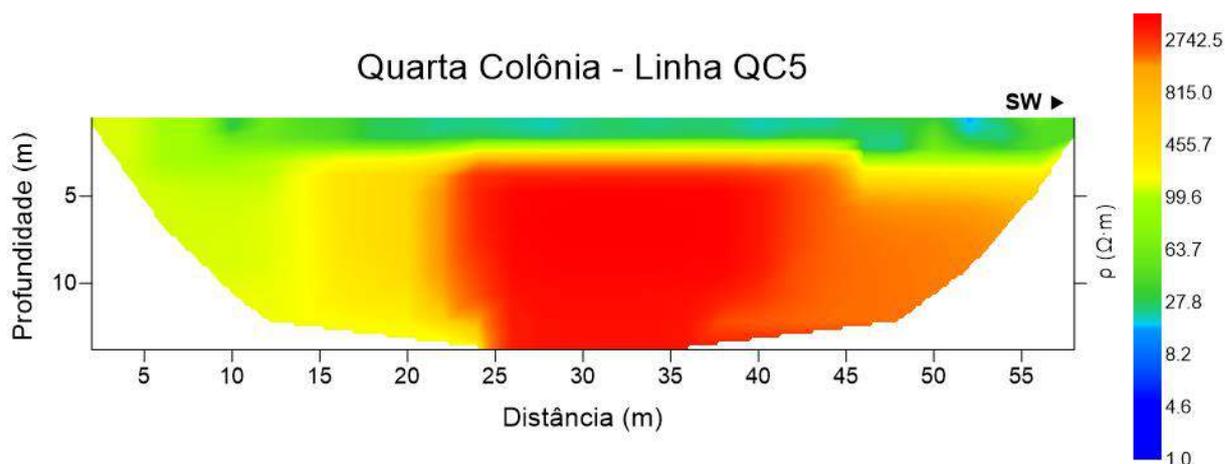


Figura 5.66: Linha QC5 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.2.3 Modelagem geológica

Na região da Quarta Colônia fez-se a modelagem geológica de três formações Serra Geral, Botucatu e Rosário do Sul. As Figura 5.67, Figura 5.68 e Figura 5.69 apresentam as curvas de níveis das três formações listadas acima, respectivamente. A modelagem do nível estático do aquífero de água é mostrada na Figura 5.70. Observa-se que a Formação Serra Geral é a que possui maior diferença de elevação, além de estar quase sempre por cima das outras formações e possuir grande parte dos reservatórios. A representação tridimensional dessa modelagem encontra-se na Figura 5.71, onde se observa claramente o nível estático entre a Formação Serra Geral e Botucatu por um lado e por outro, com a Formação Rosário do Sul, tendo assim aquíferos fraturados (no caso de Serra Geral) e porosos (no caso da Formação Rosário do Sul).

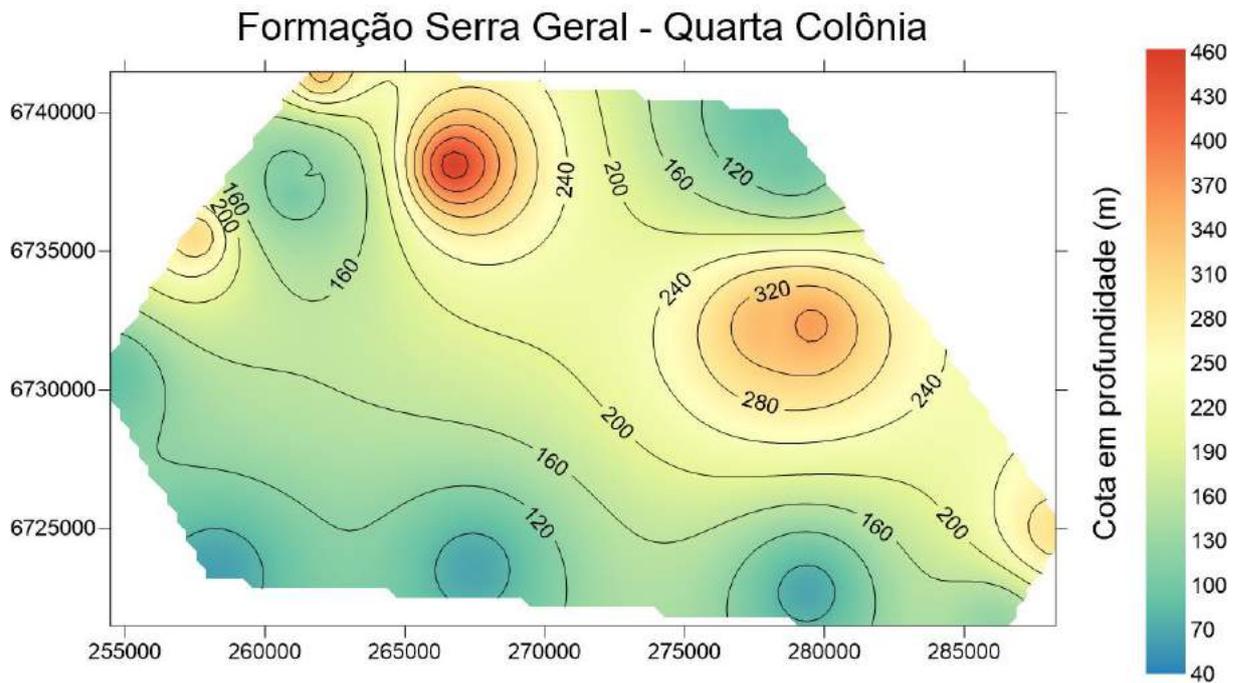


Figura 5.67: Formação Serra Geral na Região da Quarta Colônia

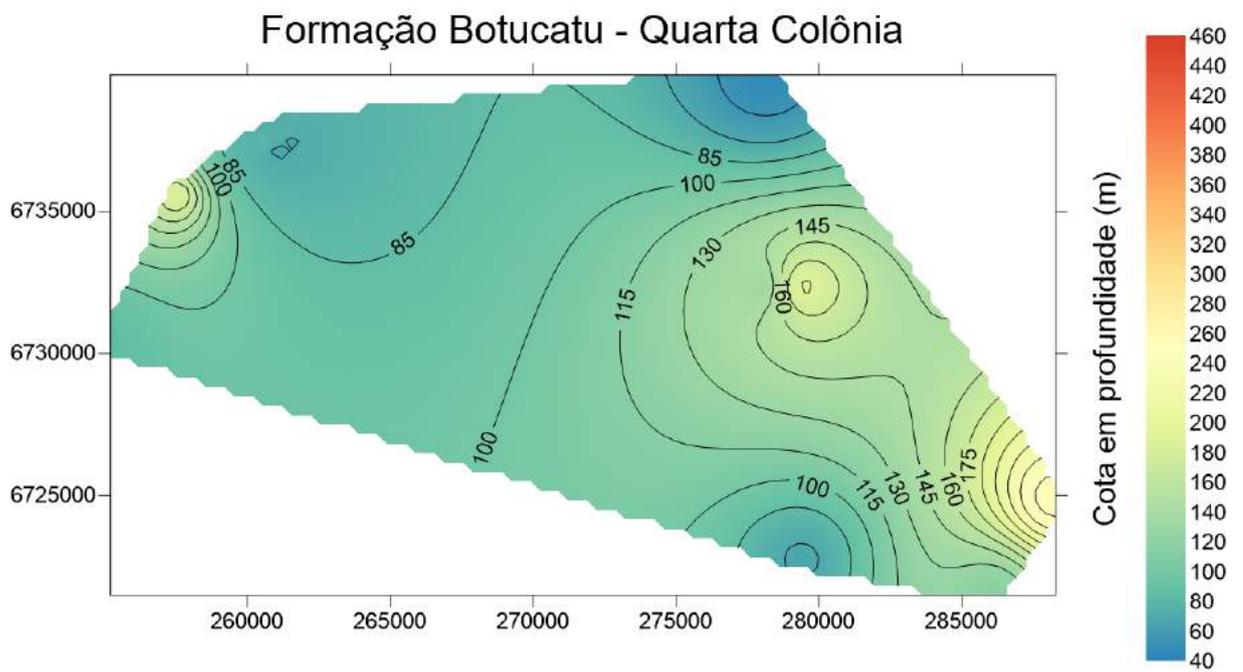


Figura 5.68: Formação Botucatu na Região da Quarta Colônia

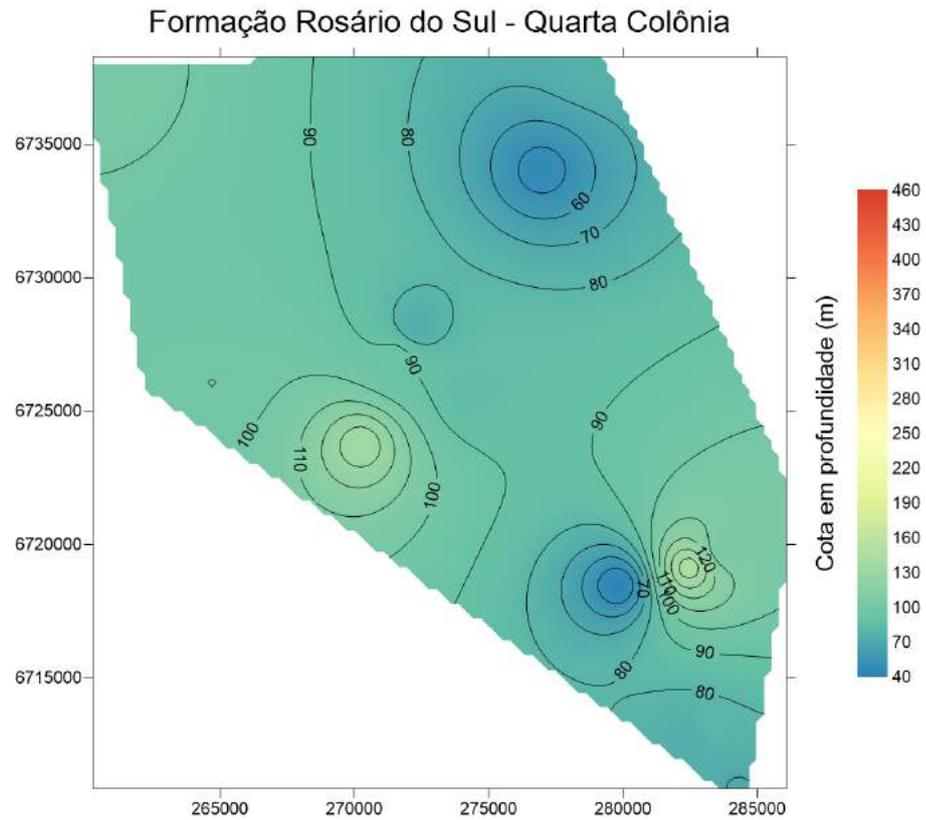


Figura 5.69: Formação Rosário do Sul na Região da Quarta Colônia

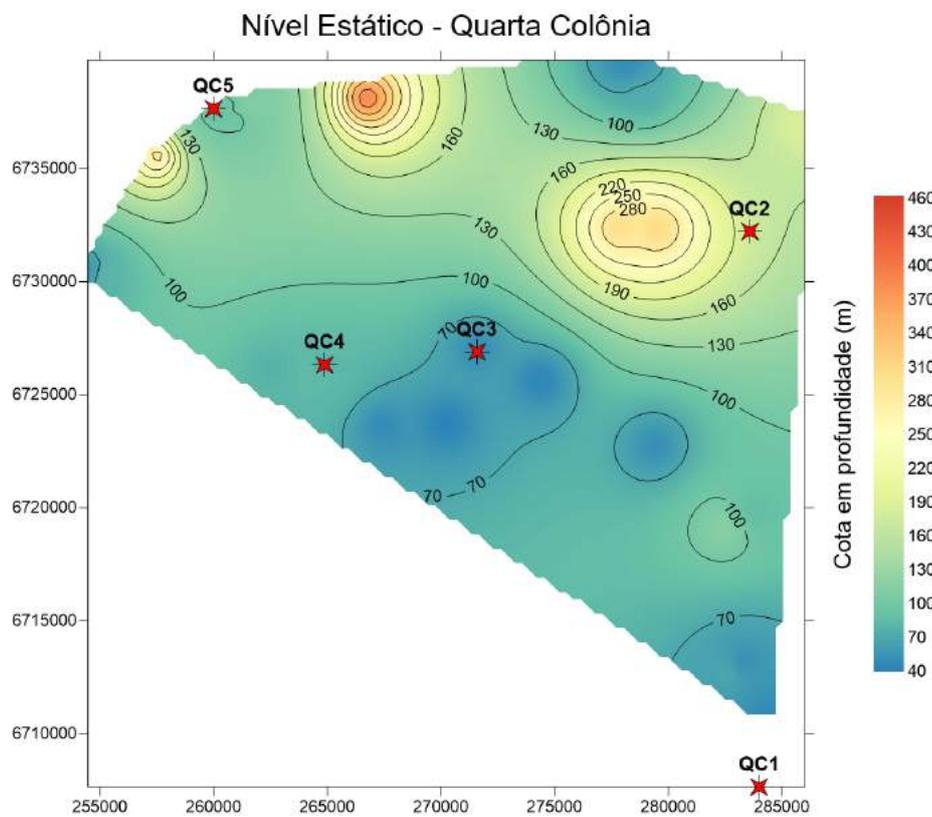


Figura 5.70: Nível estático na região da Quarta Colônia. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos

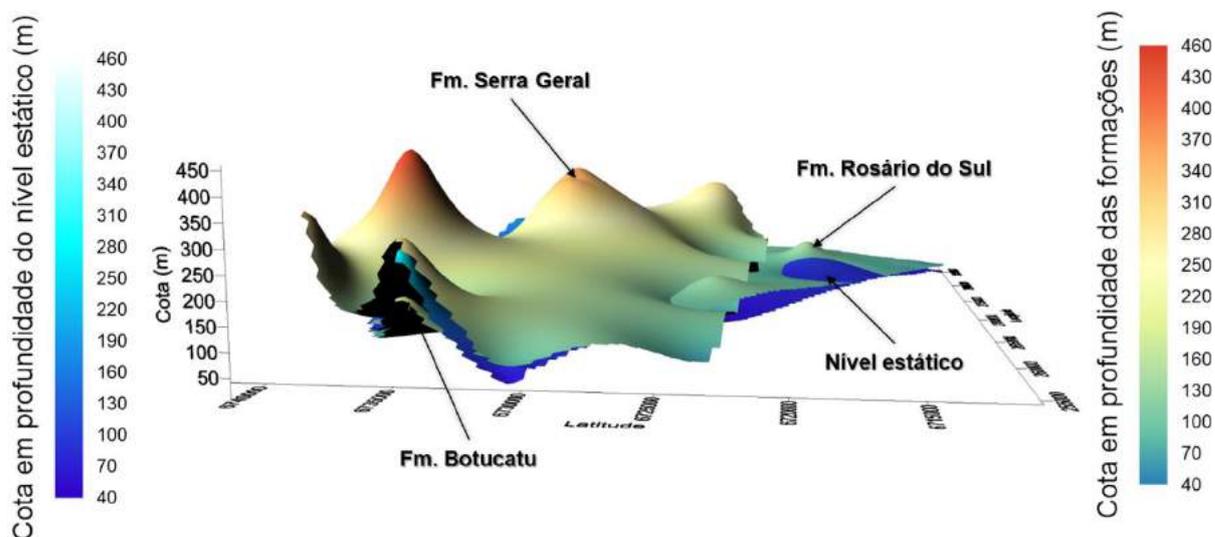


Figura 5.71: Modelagem 3D das formações na Região da Quarta Colônia

### 5.3 Candelária

O município de Candelária teve um total de dez sondagens (5 elétricas e 5 de sísmica de refração) e um total de 22 parâmetros químicos analisados nos poços, conforme mostrado na Figura 5.72.

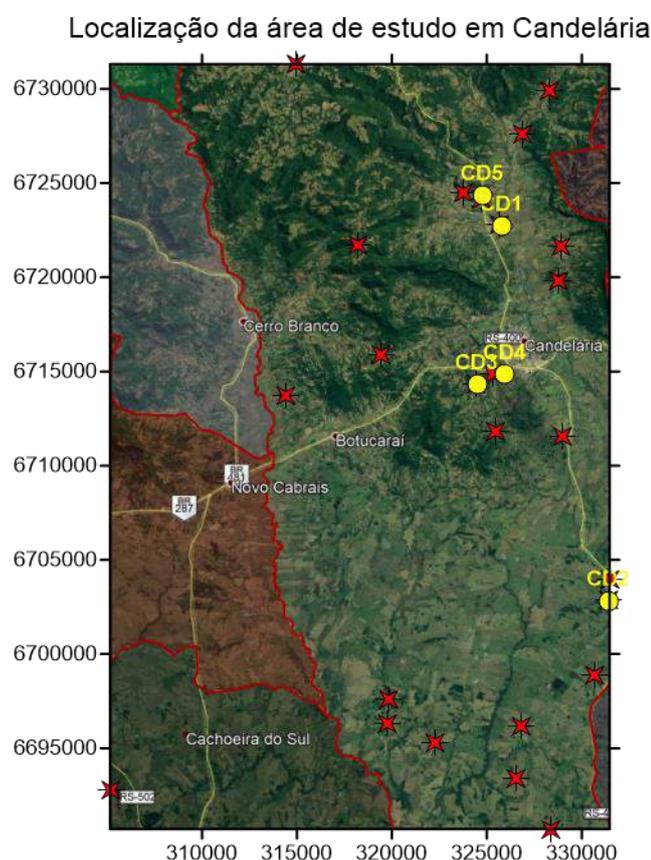


Figura 5.72: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) no município de Candelária (imagem de satélite base por meio de Google Earth)

### 5.3.1 Hidrogeoquímica

#### 5.3.1.1 Parâmetros físico-químicos

A Figura 5.73 à Figura 5.77, apresentam-se os mapas dos cinco parâmetros físico-químicos dos poços amostrados na região de Candelária. Como resultado, as águas apresentam uma alta alcalinidade chegando a ter valores maiores que o dobro do recomendável. Por outro lado, assim como notou-se na Quarta Colônia, os poços com maiores concentrações de alumínio (Figura 5.88) tiveram uma alcalinidade baixa.

Percebe-se que o primeiro poço localizado na direção nordeste da linha CD5 apresentou uma dureza de água excessiva, maior que três vezes o valor limite. Então, buscando as causas e relações dessa anomalia, observa-se a clara ligação que há com as concentrações de cálcio (Figura 5.84), magnésio (Figura 5.85), potássio (Figura 5.86) e sódio (Figura 5.87) as quais têm um papel principal na dureza da água. Além disso, houve uma concentração acima do limite no parâmetro oxigênio dissolvido em quase todos os poços.

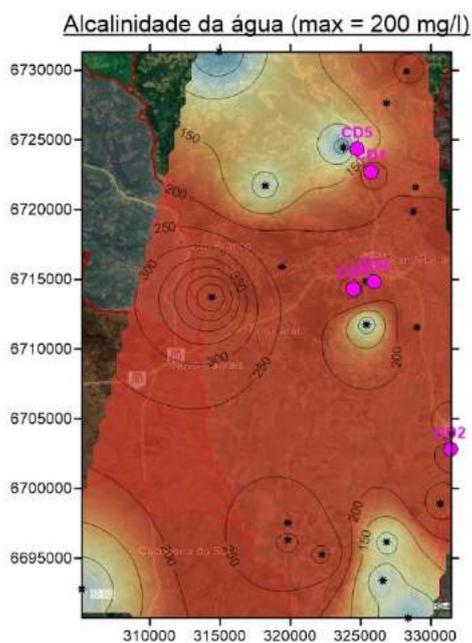


Figura 5.73: Alcalinidade da água no município de Candelária

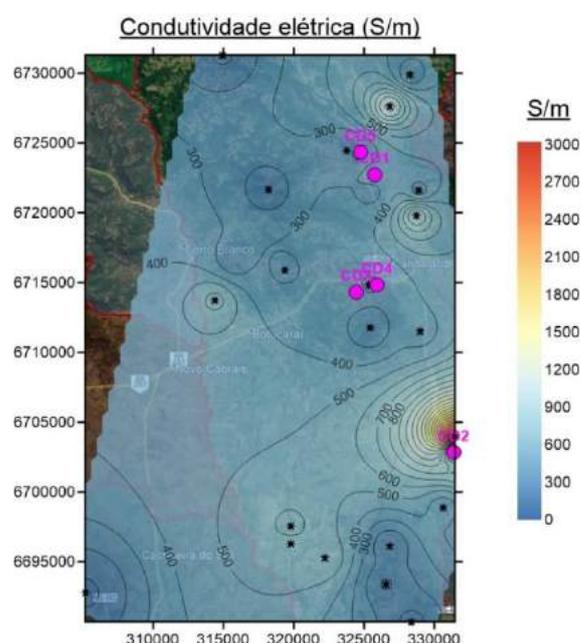


Figura 5.74: Condutividade elétrica no município de Candelária

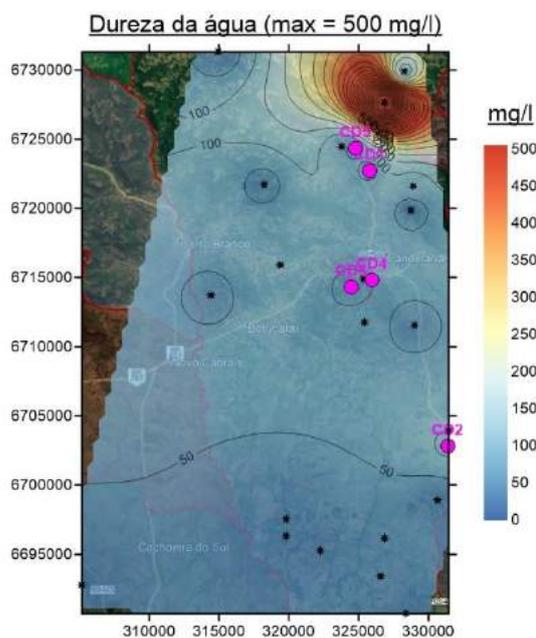


Figura 5.75: Dureza da água no município de Candelária

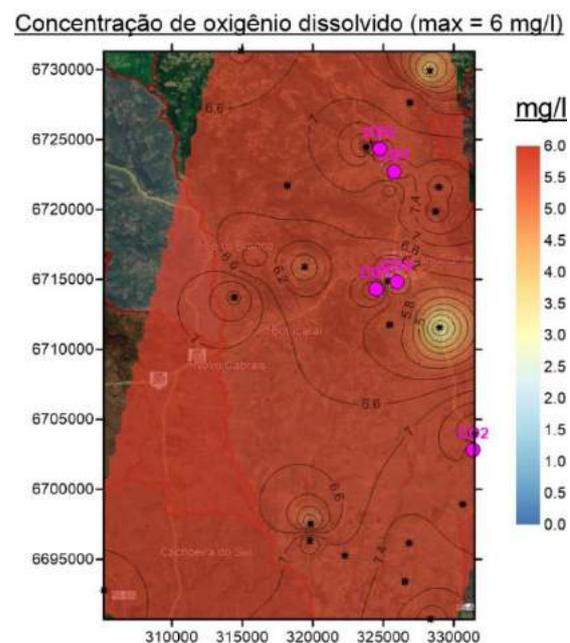


Figura 5.76: Oxigênio dissolvido no município de Candelária

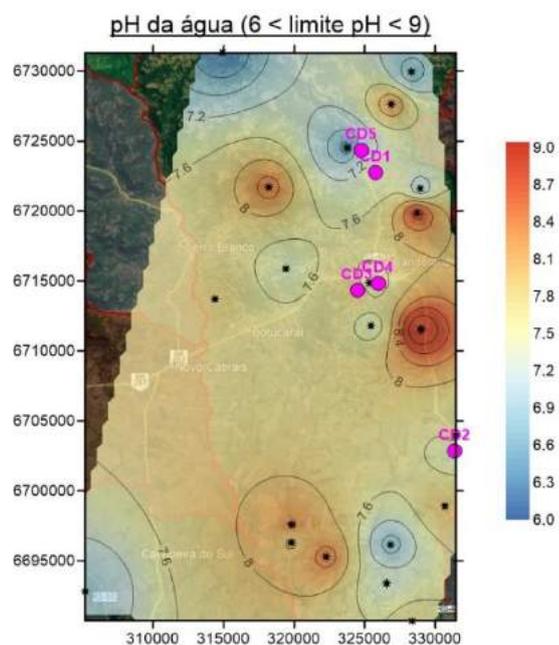


Figura 5.77: pH da água no município de Candelária

### 5.3.1.2 Ânions

As Figura 5.79 à Figura 5.83 apresentam os mapas de concentração dos cinco tipos de ânions investigados na região de Candelária. Observa-se que o poço localizado na linha CD2 apresentou valores de cloreto maiores que o dobro do permitido, assim como concentrações acima do limite de fluoreto e bem perto do limite

para fosfatos. Por outro lado, os poços que tiveram alto valor de fluoretos, foram os que maiores concentrações de sulfato tiveram.

Enquanto à provável origem do bromo, o Portal de Tratamento de Água (2008) menciona que a origem pode dever-se ao uso como bactericida em soluções aquosas, além de descargas industriais as quais podem contribuir na presença de bromo em águas naturais

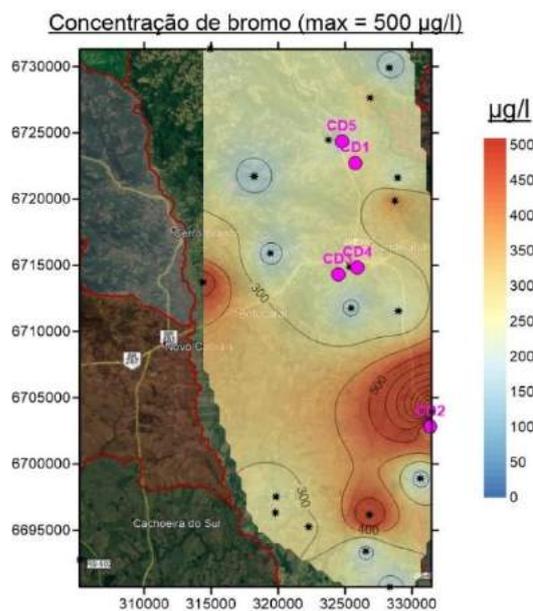


Figura 5.78: Concentração de bromo no município de Candelária

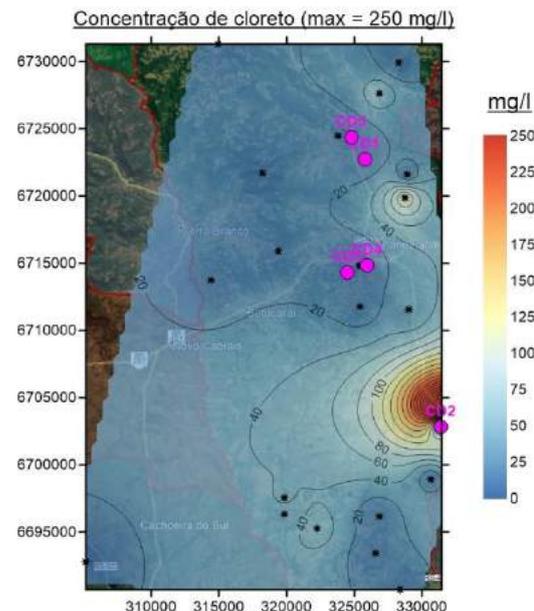


Figura 5.79: Concentração de cloreto no município de Candelária

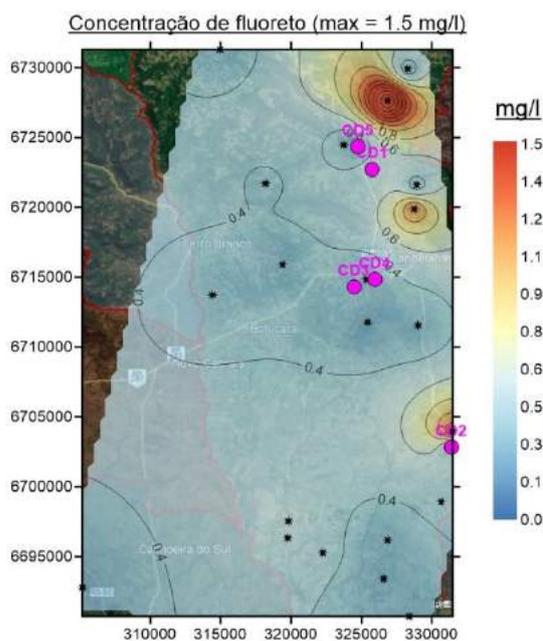


Figura 5.80: Concentração de fluoreto no município de Candelária

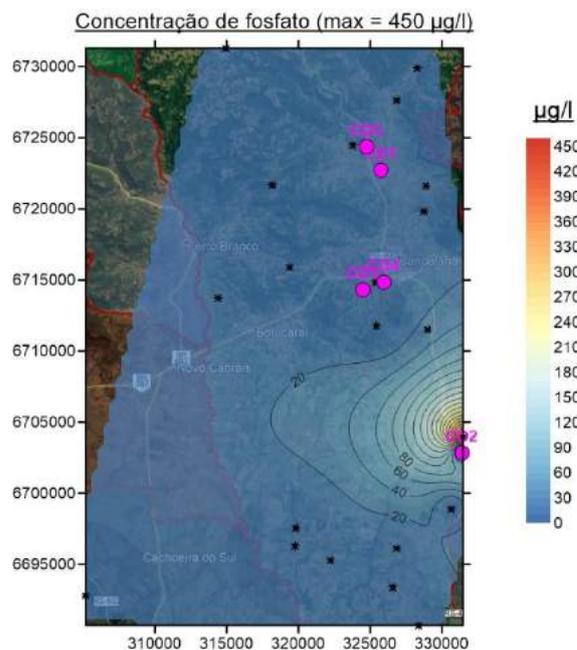


Figura 5.81: Concentração de fosfato no município de Candelária

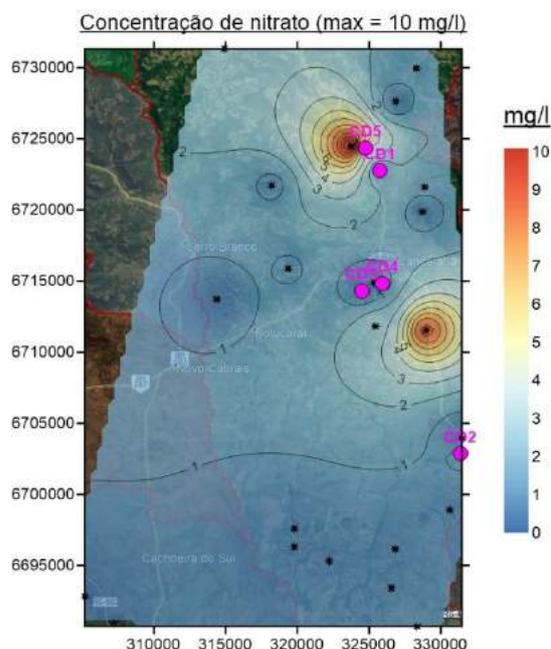


Figura 5.82: Concentração de nitrato no município de Candelária

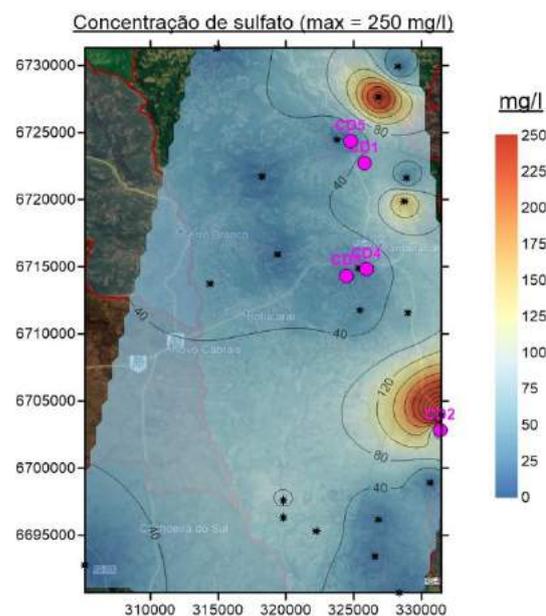


Figura 5.83: Concentração de sulfato no município de Candelária

### 5.3.1.3 Cátions

As Figura 5.84 à Figura 5.87 apresentam os mapas de concentração dos cátions investigados na região de Candelária. Todos os parâmetros de cátions estudados apresentaram pelo menos um poço com concentração acima do limite. Não obstante, chama a atenção que o poço com maior dureza (Figura 5.75) foi também o de maior concentração de cálcio, magnésio, potássio e sódio. Além disso, o poço perto da linha CD2 tem alta concentrações de bromo, potássio e sódio, os quais são formadores de sais e, portanto, repercutem no aumento da condutividade elétrica. Note-se que esse poço foi o que maior condutividade apresentou.

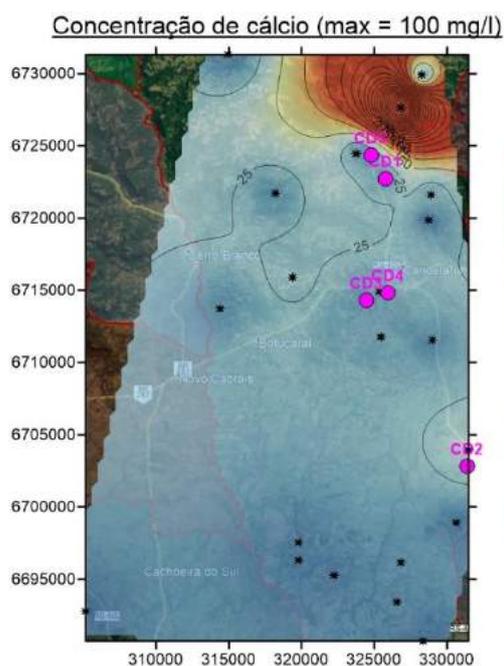


Figura 5.84: Concentração de cálcio no município de Candelária

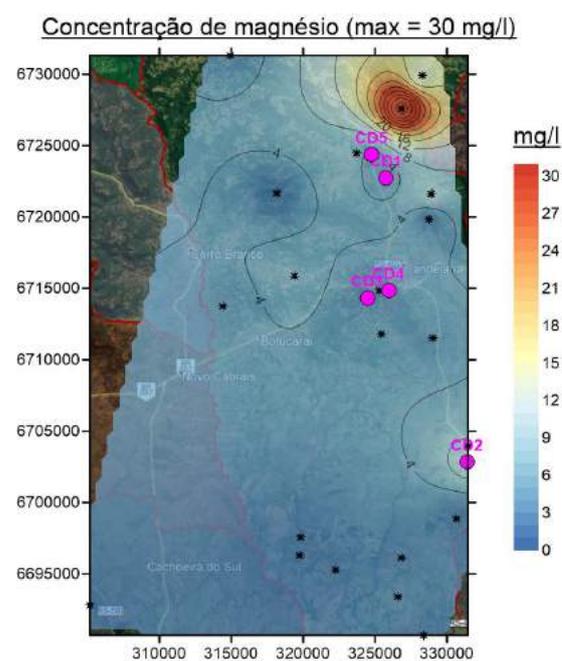


Figura 5.85: Concentração de magnésio no município de Candelária

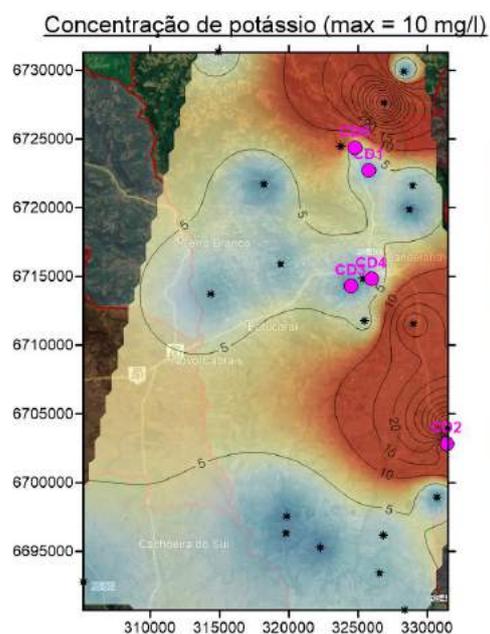


Figura 5.86: Concentração de potássio no município de Candelária

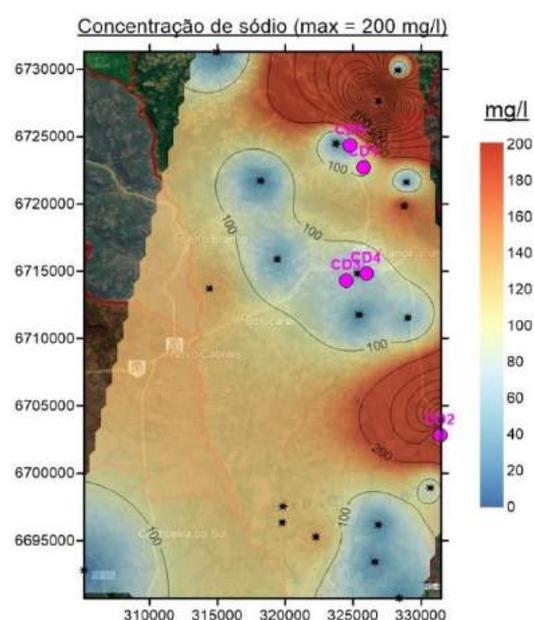


Figura 5.87: Concentração de sódio no município de Candelária

#### 5.3.1.4 Metais

Os mapas da Figura 5.90: Concentração de bário no município de Candelária à Figura 5.96 apresentam os mapas de concentração de metais amostrados nos poços da região de Candelária. Dentre os nove metais foram analisados, observou-se

que a concentração de arsênio foi elevada em todos os poços, menos em dois que possuíram valores abaixo do limite. Por outro lado, as concentrações de ferro e selênio abarcaram valores excessivos em quase toda a área modelada.

Gastmans et al. (2010) mencionam que a concentração de arsênio pode ser devido à uma intensa atividade magmática, característica principal de quase toda a região estudada. Por outro lado, Junior et al. (2008) mencionaram que umas das razões para uma alta concentração de selênio, deve-se à existência de pirita, mineral comum no RS e que está composto principalmente por  $\text{FeS}_2$  como fórmula química, podendo ser esta a razão da alta concentração de ferro também.

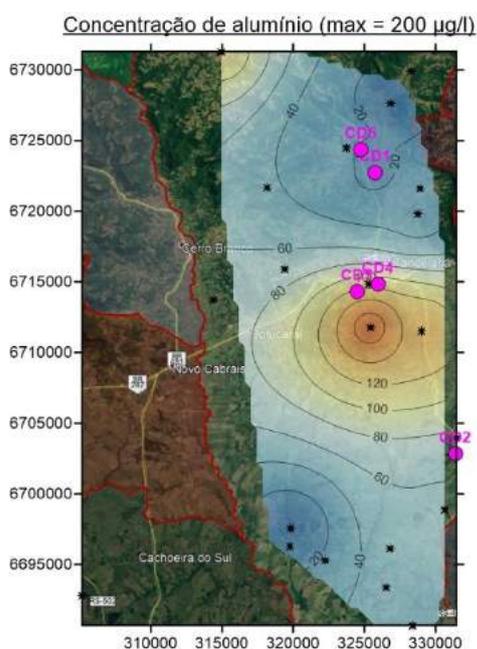


Figura 5.88: Concentração de alumínio no município de Candelária

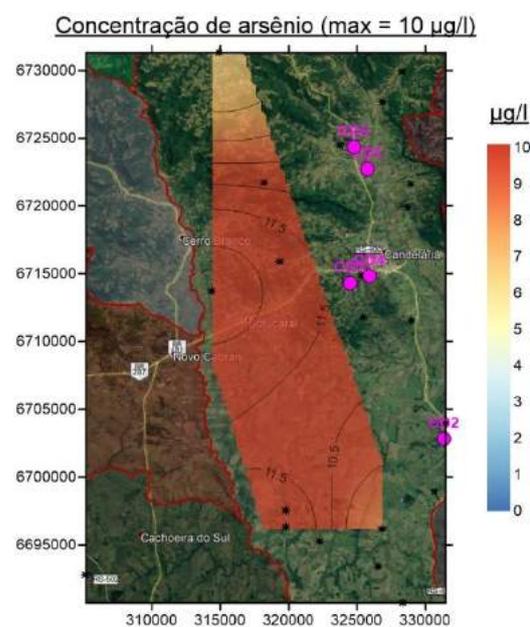


Figura 5.89: Concentração de arsênio no município de Candelária

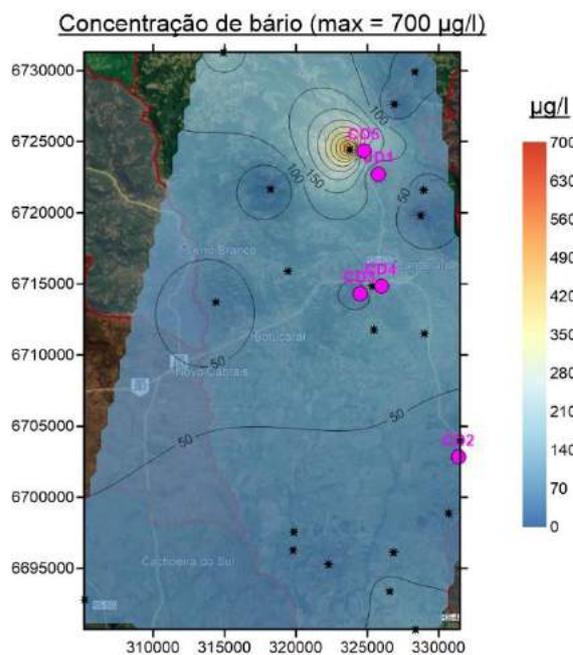


Figura 5.90: Concentração de bário no município de Candelária

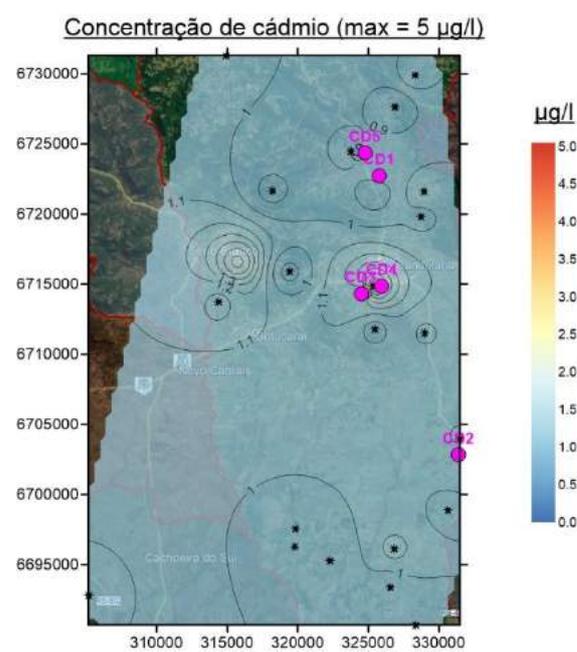


Figura 5.91: Concentração de cádmio no município de Candelária

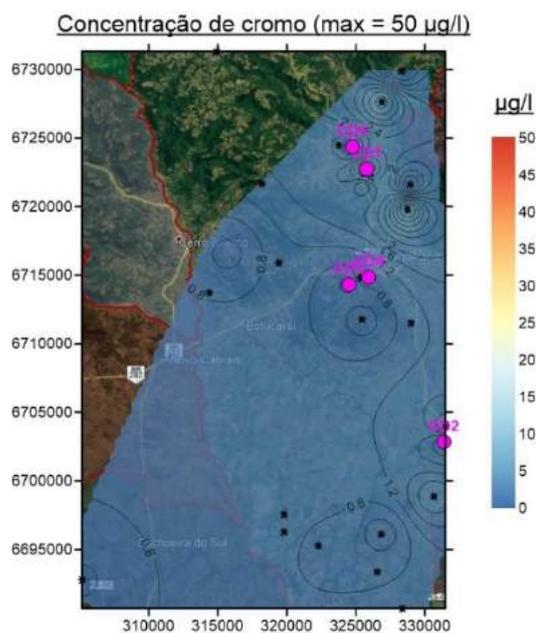


Figura 5.92: Concentração de cromo no município de Candelária

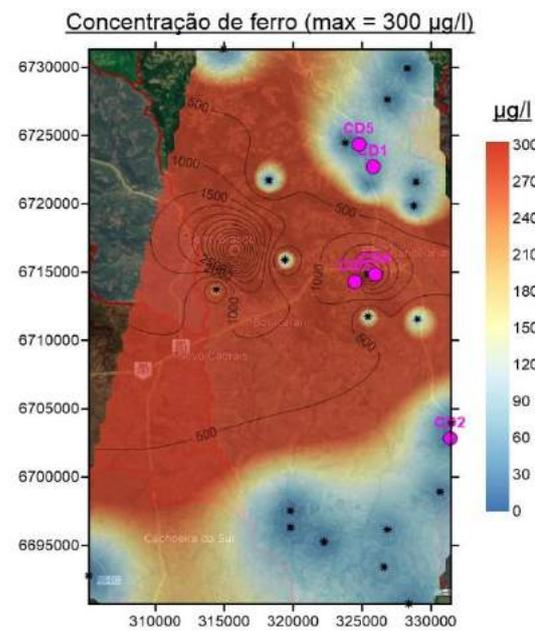


Figura 5.93: Concentração de ferro no município de Candelária

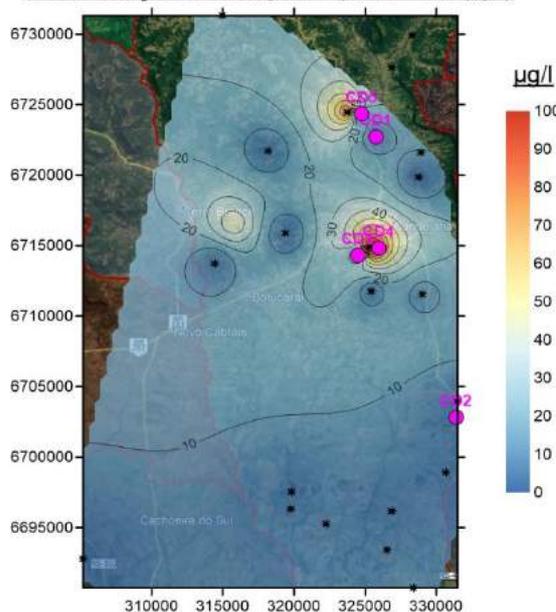
Concentração de manganês (max = 100  $\mu\text{g/l}$ )

Figura 5.94: Concentração de manganês no município de Candelária

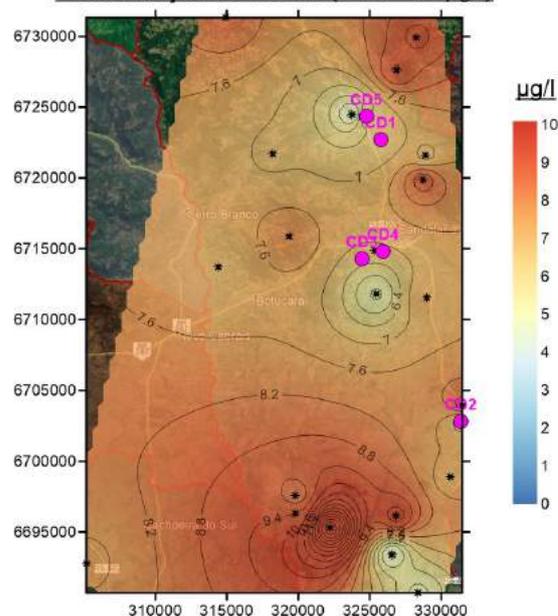
Concentração de selênio (max = 10  $\mu\text{g/l}$ )

Figura 5.95: Concentração de selênio no município de Candelária

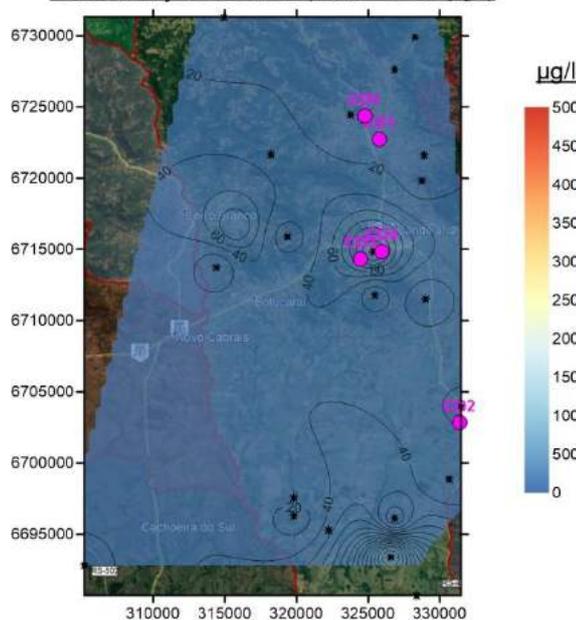
Concentração de zinco (max = 5000  $\mu\text{g/l}$ )

Figura 5.96: Concentração de zinco no município de Candelária

### 5.3.1.5 Diagrama de Piper

A partir dos dados dos diferentes parâmetros químicos, procedeu-se à construção do diagrama de Piper para as águas da região de Candelária, mostrado na Figura 5.97. Observando-se três classes de águas: bicarbonatadas magnesianas, sódicas e cloretadas sódicas. As águas cloretadas apresentam alta concentração de bicarbonatos, tendo como origem concentrações altas de sódio e cálcio (como foi

mostrado nos mapas de concentrações destes parâmetros). Existe uma possível relação das águas com a geologia, pois elas têm como origem as formações contendo basalto. Além disso, acredita-se que, devido à alta concentração de íons de sódio haja um aumento na salinidade, existindo uma relação com a alta alcalinidade e o alto valor de pH, sendo consideradas águas alcalinas ou básicas, numa geologia basáltica a qual faz mais sentido (devido ao local de estudo), que uma geologia formada por calcitas e dolomitas.

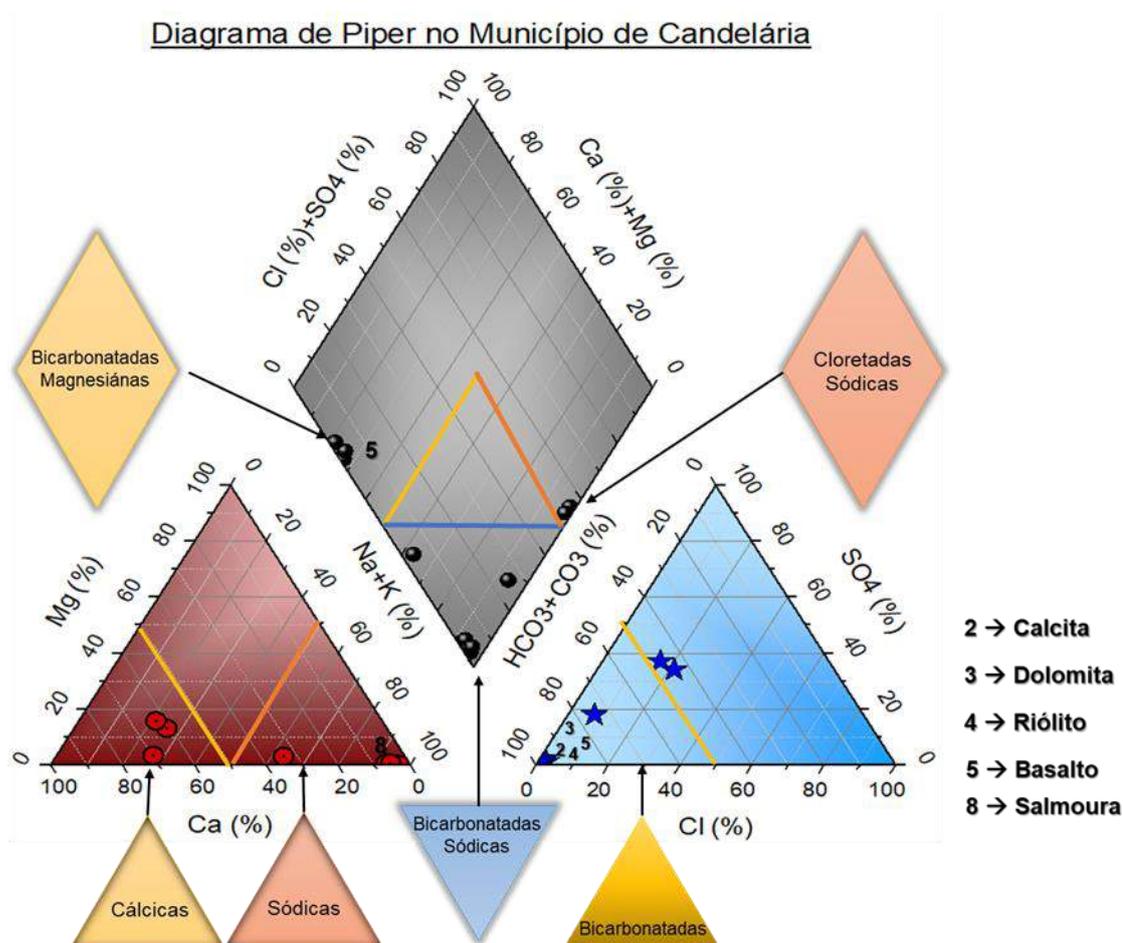


Figura 5.97: Diagrama de Piper no município de Candelária

### 5.3.2 Métodos geofísicos

No município de Candelária, foram adquiridas cinco linhas sísmicas de refração, propiciando a modelagem em três camadas, sendo a primeira delas correspondente a camada que sofreu intemperismo. Nessa região, só a linha CD2 apresentou uma primeira camada não tão superficial. Junto às linhas sísmicas foram feitos levantamentos geolétricos, que serão discutidos em conjunto a seguir.

### 5.3.2.1 Linha CD1

A inversão sísmica da linha CD1 é mostrada na Figura 5.98. Tendo uma primeira camada do modelo, corresponde a um solo argiloso com uma espessura de aproximadamente 2 m. Abaixo dela, na camada seguinte, a velocidade aumenta até cerca de 1.500 m/s, correspondendo a rochas intemperizadas. A terceira camada é provavelmente composta de arenito fino, que possui uma velocidade acima de 2.400 m/s.

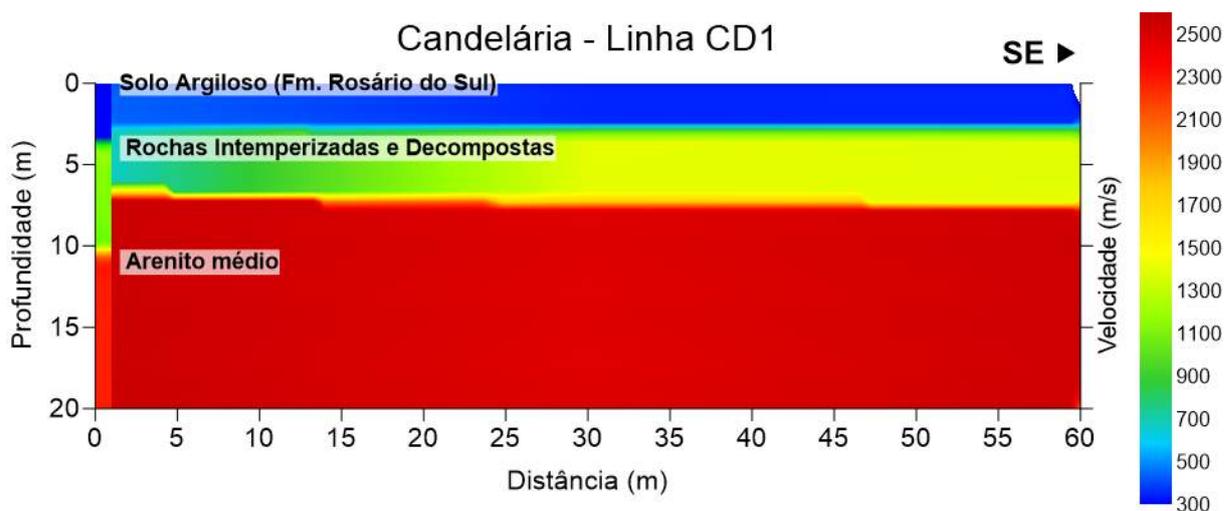


Figura 5.98: Linha CD1 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados do levantamento geoeétrico da linha CD1 é mostrada na Figura 5.99. Ela indica a presença de duas camadas correspondentes em profundidade às duas camadas presentes no perfil geológico de poço. Pensa-se que a razão da baixa resistividade superficial se deva à existência de argilas superficiais ou que provavelmente o solo estivesse úmido no momento da aquisição dos dados elétricos.

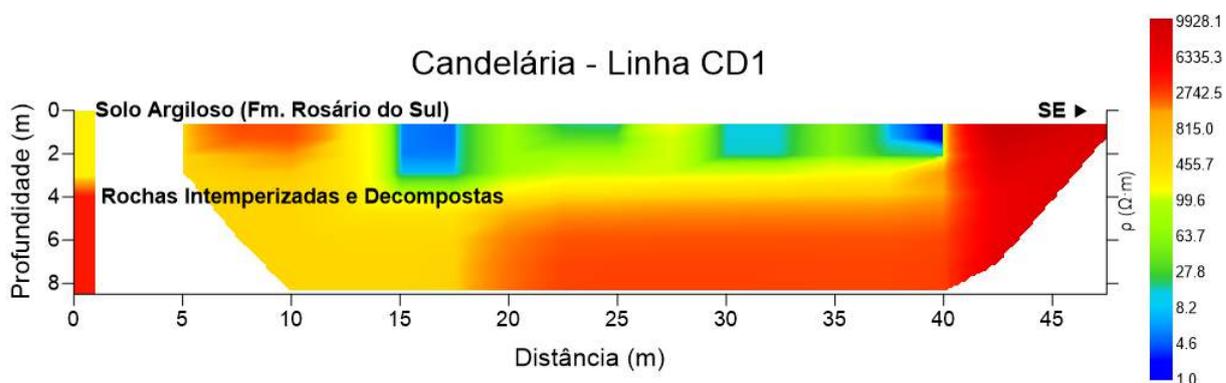


Figura 5.99: Linha CD1 (inversão da sondagem geoeétrica)

### 5.3.2.2 Linha CD2

A inversão dos dados sísmicos da linha CD2 é mostrada na Figura 5.100. Ela indica a existência de camadas que parecem ter um comportamento similar (em questão de velocidades) à linha CD1, com uma primeira camada de cerca de 3,5 m de baixa velocidade (350 m/s) que muda para uma segunda camada com 1.300 m/s, podendo ser de sedimentos areno-argilosos. Ocorre a presença de uma terceira camada com velocidades acima de 2.000 m/s, possivelmente de sedimentos mais compactados, inferindo-se que possa ser arenito.

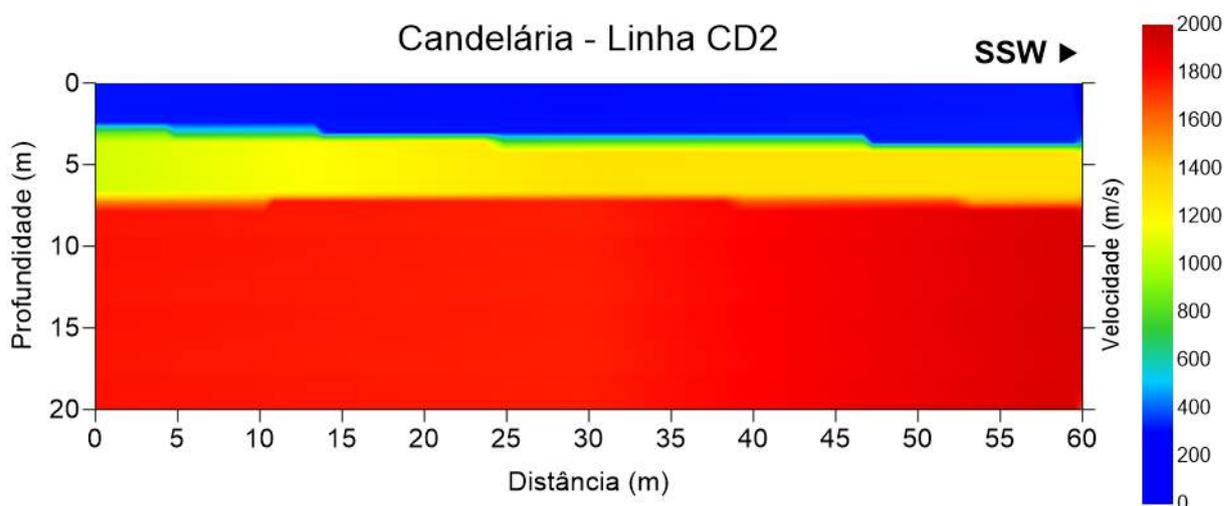


Figura 5.100: Linha CD2 (inversão da sísmica de refração)

A sondagem geolétrica da CD2, mostrada na Figura 5.101, apresentou resultados semelhantes aos da sísmica de refração. Observa-se uma primeira camada resistiva de rochas que provavelmente estejam alteradas e uma segunda camada menos resistiva, que podem ser devidas a litologias argilosas ou úmidas.

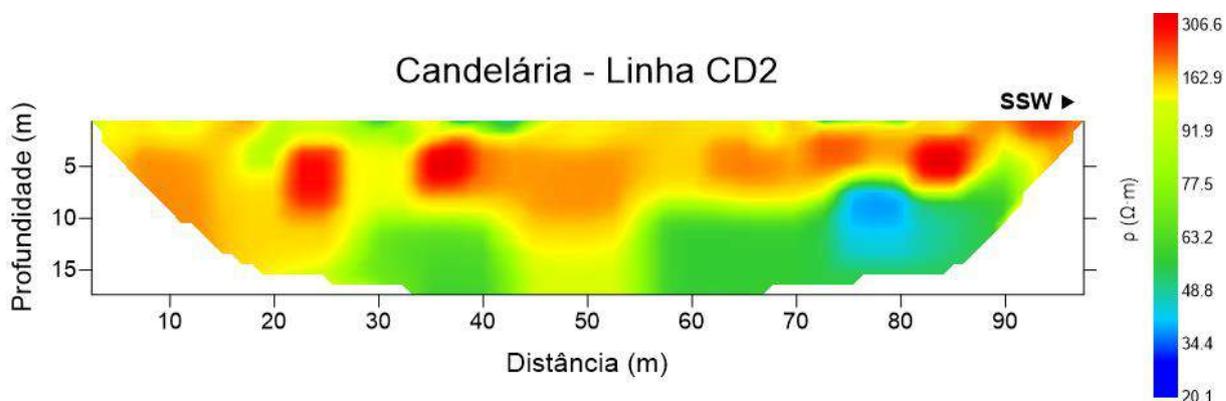


Figura 5.101: Linha CD2 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.3.2.3 Linha CD3

De forma similar ao observado nas linhas CD2 e CD1, a linha CD3, cuja inversão da sísmica de refração é mostrada na Figura 5.102, apresenta um comportamento com 1 m de primeira camada, passando a uma segunda camada com uma velocidade que chega aos 700 m/s, o qual levaria a entender que se trata de uma rocha igualmente intemperizada e alterada. Abaixo delas, a terceira camada apresenta velocidades acima de 2.100 m/s, o que indica a possibilidade de ser um arenito ou arenito-argiloso.

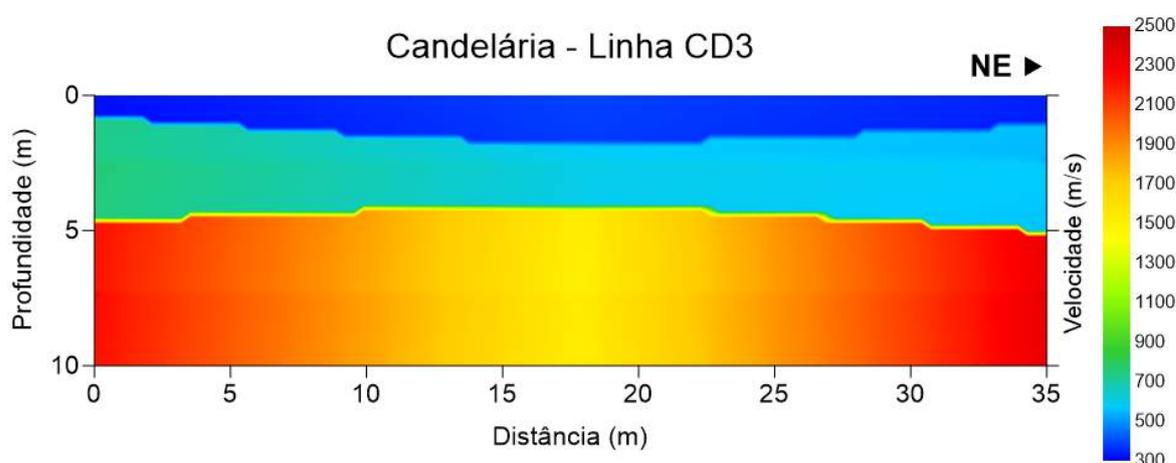


Figura 5.102: Linha CD3 (inversão da sísmica de refração)

A linha CD3 apresentou o mesmo comportamento que a CD2 quando analisada pelo método geolétrico, conforme pode ser observado na inversão da Figura 5.103. Possivelmente, isso seja devido à presença de litologias argilosas na área de investigação.

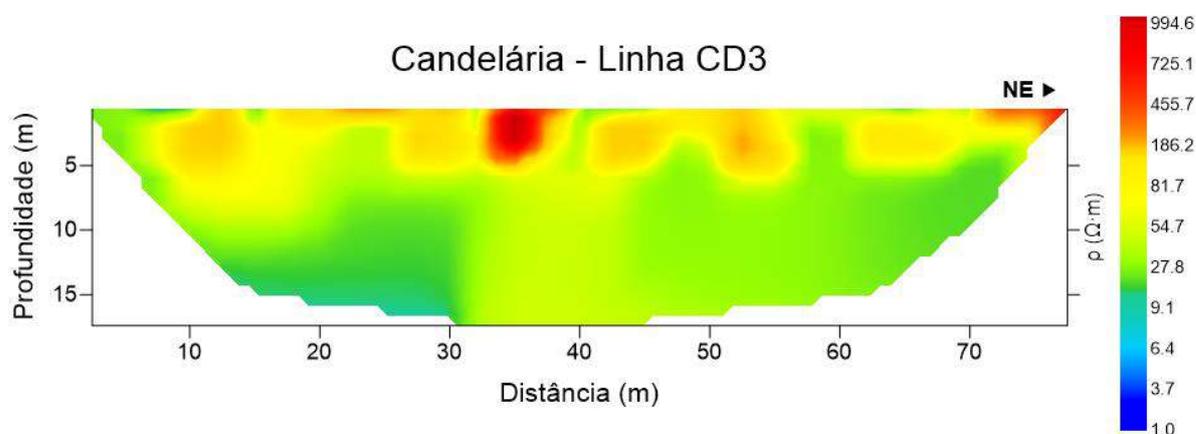


Figura 5.103: Linha CD3 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.3.2.4 Linha CD4

A inversão dos dados sísmicos da linha CD4 é mostrada na Figura 5.104. A inversão dos dados sísmicos da linha CD4 é mostrada na Figura 5.104. Ela apresentou, em concordância com as informações do perfil geológico dos poços, uma primeira camada de poucos centímetros de areia siltosa. Abaixo dela, observamos uma segunda camada que, muito provavelmente, corresponda ao arenito siltoso e uma terceira camada de siltito, a qual tem velocidade acima de 700 m/s até cerca de 1.800 m/s, que poderia ser devida à presença de arenito.

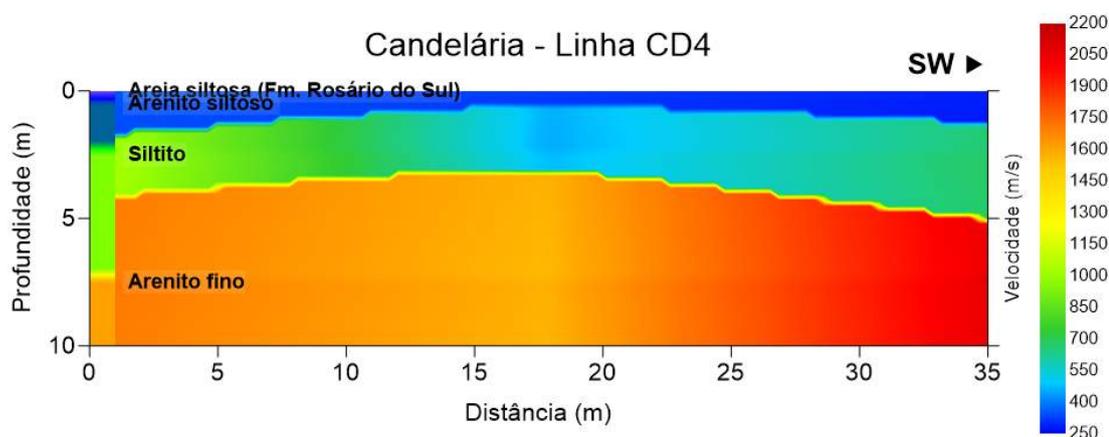


Figura 5.104: Linha CD4 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados geoeletricos da linha CD4 é mostrada na Figura 5.105. Ela apresentou um comportamento resistivo nas camadas superiores de siltitos. Mas, aos 7 m de profundidade, a resistividade diminui para 8  $\Omega\text{m}$ , sugerindo que o arenito fino atue como um reservatório de água que possui um selo estratigráfico superior com siltito e um inferior com argilito. Não obstante, este provável reservatório esteja poluído por ferro (como observado nas concentrações), porém, a localização da linha CD4 é a que menores concentrações de poluentes apresentaram.

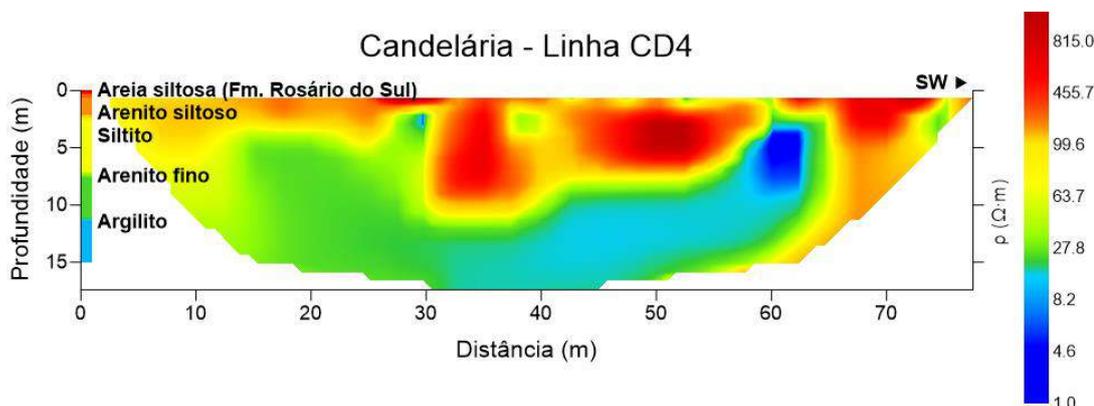


Figura 5.105: Linha CD4 (inversão da sondagem geoeletrica)

### 5.3.2.5 Linha CD5

A inversão dos dados sísmicos da linha CD5, mostrada na Figura 5.106, indica baixa velocidade nas três camadas. A primeira corresponde a sedimentos não consolidados; a segunda, com uma velocidade em torno de 1.000 m/s, poderia ser uma camada de argilas a qual vai compactando-se até a terceira camada, quando a velocidade aumenta para 2.000 m/s. A terceira camada poderia ser perfeitamente um arenito argiloso pouco compactado ou argila mais compactada que na segunda camada.

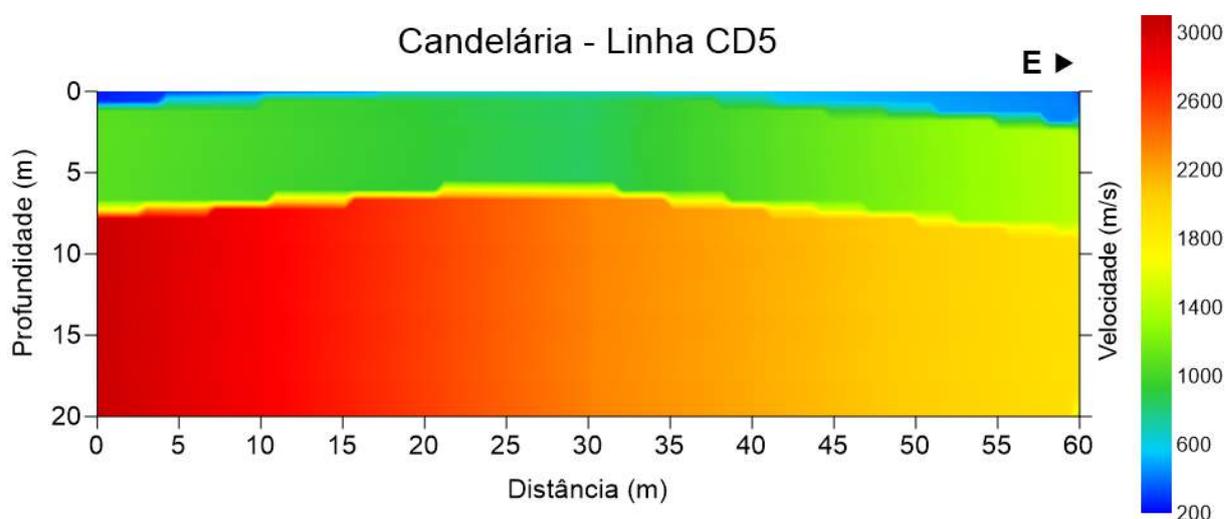


Figura 5.106: Linha CD5 (inversão da sísmica de refração)

A inversão dos dados geoeletricos da linha CD5, mostrada na Figura 5.107, apresentou resistividades que são consistentes com os resultados litológicos interpretados na sísmica de refração, dando a entender que se tem sedimentos argilosos ao longo do perfil e que vão se tornando mais compactos em profundidade, aumentando também a resistividade observada.

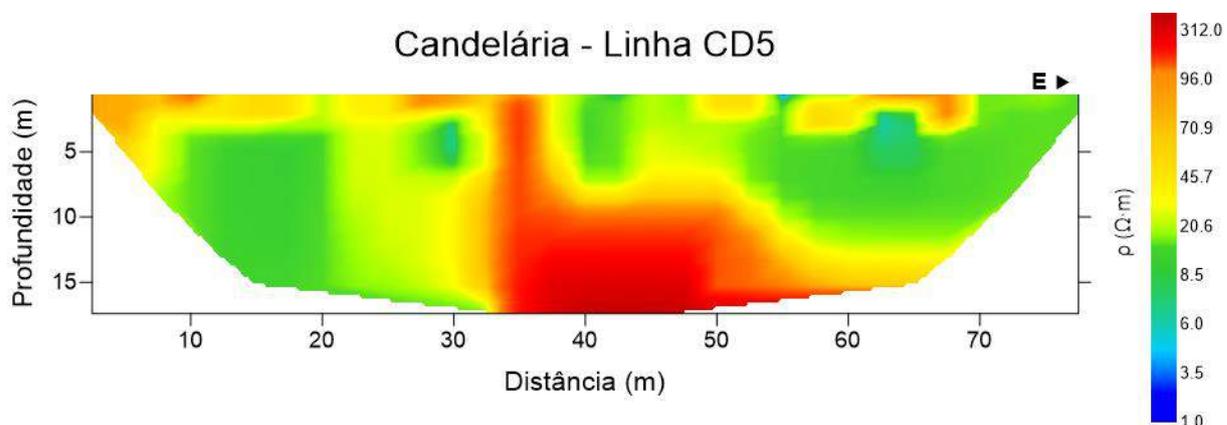


Figura 5.107: Linha CD5 (inversão da sondagem geoeletrica)

## 5.4 Alegrete

O município de Alegrete foi a região onde mais sondagens foram feitas: seis de cada método (elétrico e sísmica de refração), além de ter 25 parâmetros químicos analisados e teve um diagrama de Piper construído. Essa região foi a que abrangeu a maior área de estudo. A localização dos poços e áreas sondadas são mostradas na Figura 5.108.

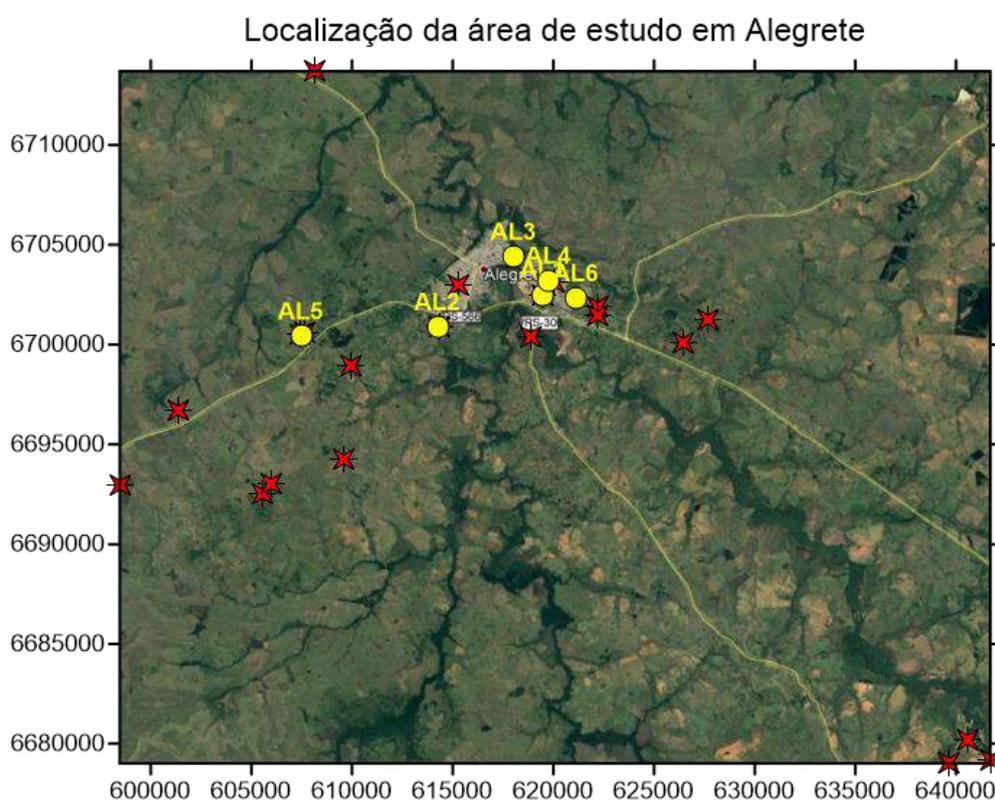


Figura 5.108: Localização dos poços analisados (estrelas vermelhas) e as sondagens (pontos amarelos) no município de Alegrete

### 5.4.1 Hidrogeoquímica

#### 5.4.1.1 Parâmetros físico-químicos

Na região de Alegrete foram coletadas amostras de água de poços e analisados quatro parâmetros físico-químicos. Os mapas de seus valores estão mostrados nas Figura 5.109 à Figura 5.112. Nota-se que não houve excesso nos parâmetros, sendo só a alcalinidade o parâmetro que esteve mais perto do limite.

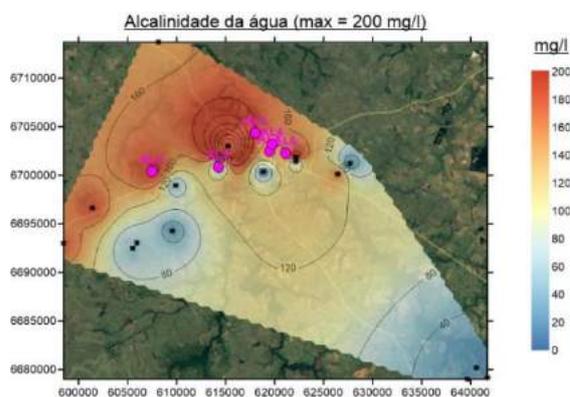


Figura 5.109: Alcalinidade da água em Alegrete

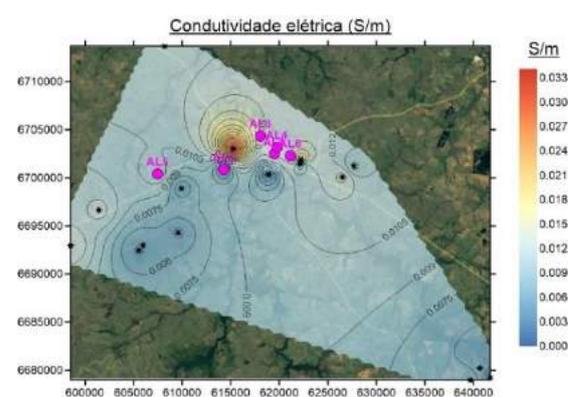


Figura 5.110: Condutividade elétrica em Alegrete

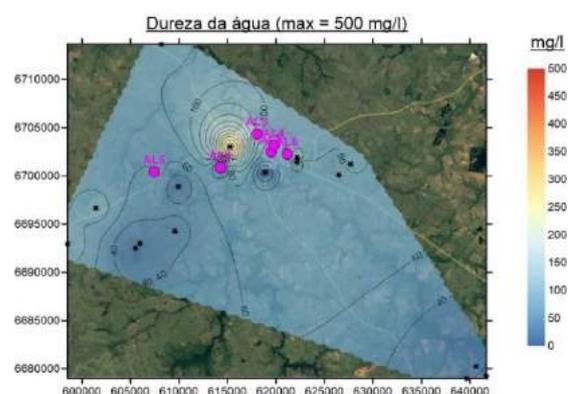


Figura 5.111: Dureza da água em Alegrete

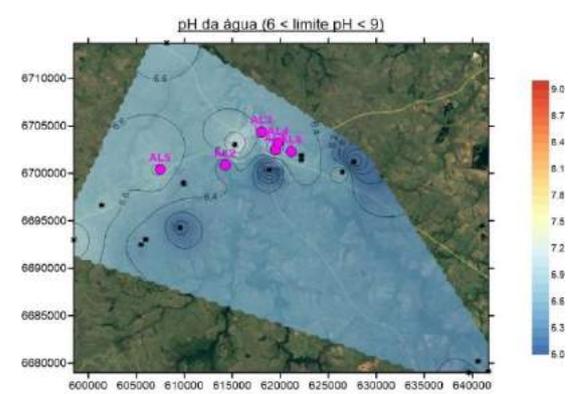


Figura 5.112: pH da água em Alegrete

#### 5.4.1.2 Ânions

Os mapas de concentração dos ânions amostrados encontram-se nas Figura 5.113 à Figura 5.118. Observa-se que a concentração de fosfato está acima do limite permitido em quase todos os poços estudados, podendo ser de origem geológico, como por exemplo em minerais de apatita, os quais possuem íons de cálcio, ajudando também ao incremento da concentração deles. Enquanto concentrações elevadas de nitrato foram encontradas em dois poços.

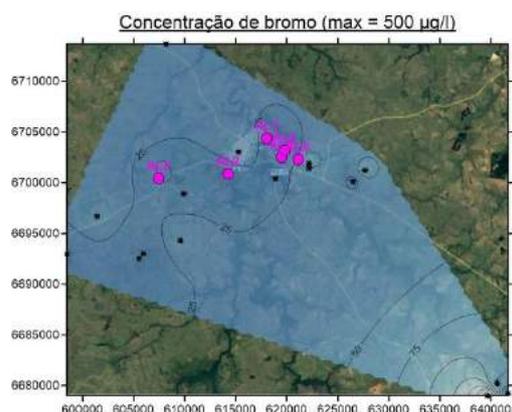


Figura 5.113: Concentração de bromo em Alegrete

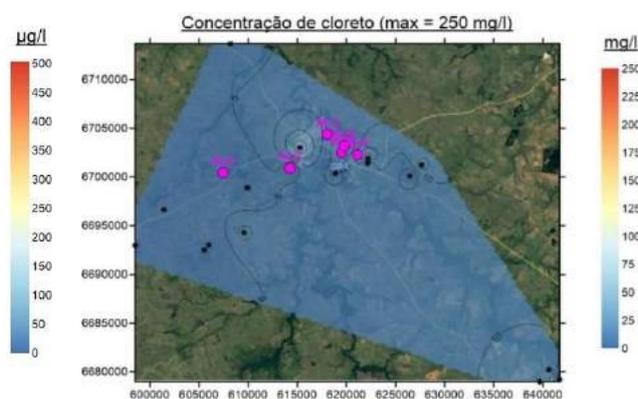


Figura 5.114: Concentração de cloreto em Alegrete

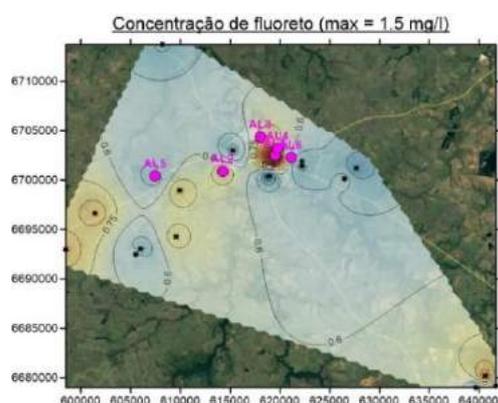


Figura 5.115: Concentração de fluoreto em Alegrete

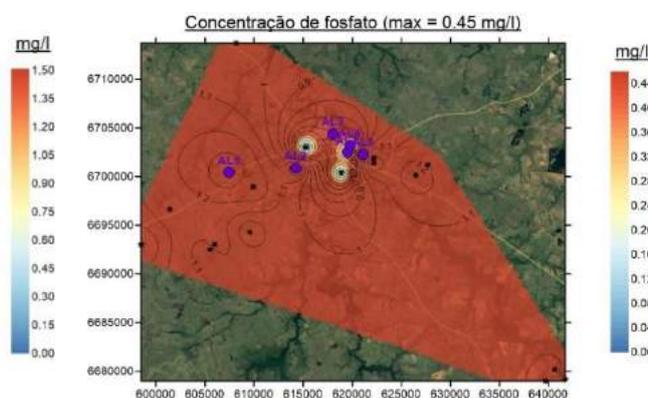


Figura 5.116: Concentração de fosfato em Alegrete

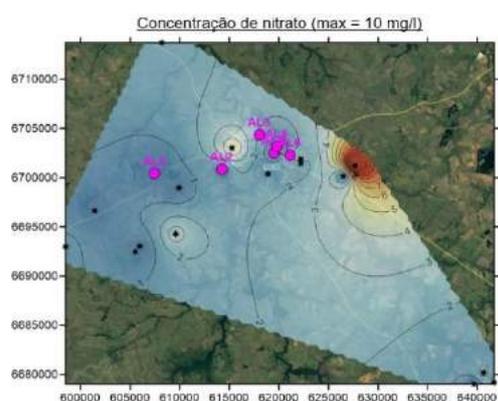


Figura 5.117: Concentração de nitrato em Alegrete

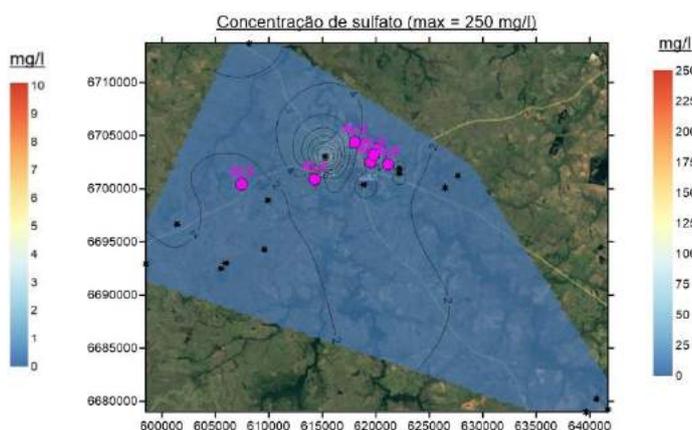


Figura 5.118: Concentração de sulfato em Alegrete

#### 5.4.1.3 Cátions

Os mapas de concentração de cátions na região de Alegrete estão apresentados na Figura 5.119 à Figura 5.122. Percebe-se que todos eles se apresentaram sempre dentro dos limites permitidos. Não obstante, nota-se que o poço

com maiores concentrações de cálcio e magnésio, também foi o que maior dureza possui, devido à relação que existe entre eles.

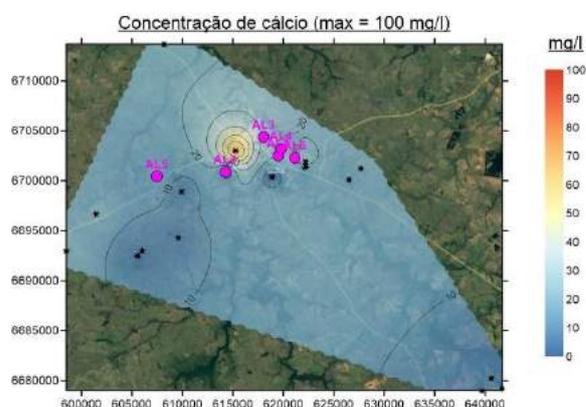


Figura 5.119: Concentração de cálcio em Alegrete

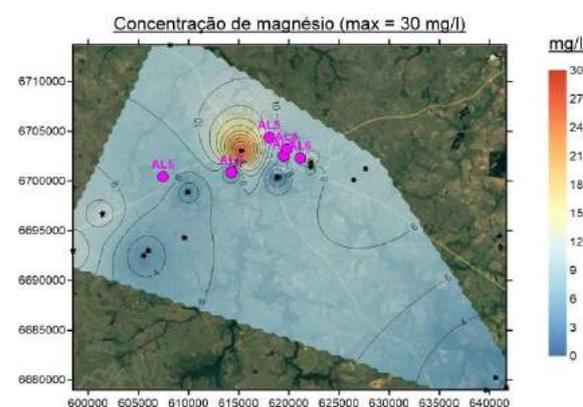


Figura 5.120: Concentração de magnésio em Alegrete

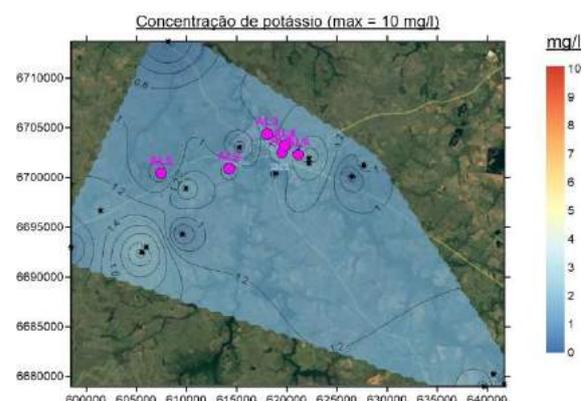


Figura 5.121: Concentração de potássio em Alegrete

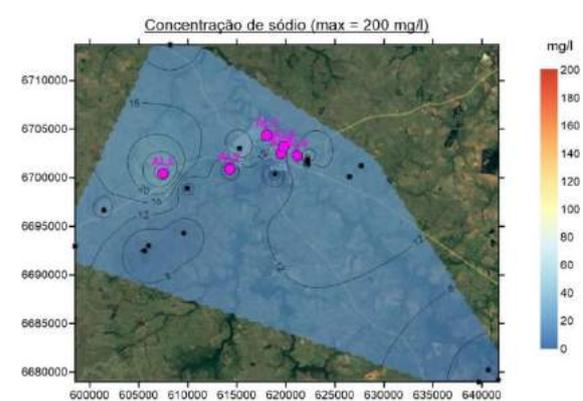


Figura 5.122: Concentração de sódio em Alegrete

#### 5.4.1.4 Metais

Na região de Alegrete, um total de dez metais foram quantificados nas amostras de água de poço. Suas concentrações são mostradas nas Figura 5.123 à Figura 5.133. Observa-se altas concentrações de cádmio, chumbo e cromo, em todos os poços, o que pode ter repercussão na saúde se for ingerida essa água sem tratamento prévio. Além disso, um poço possui valores acima do limite nas concentrações de cobre.

Alves et al. (2004) mencionam que altas concentrações de cádmio e chumbo são ocasionadas por indústrias que trabalham com combustíveis fósseis, pigmentos, baterias, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes. Ademais o Portal de Tratamento de Água (2008) e a agência de controle de poluição de Minnesota

(Minnesota Pollution Control Agency, 1999) mencionam a mesma origem nos casos de chumbo e cromo.

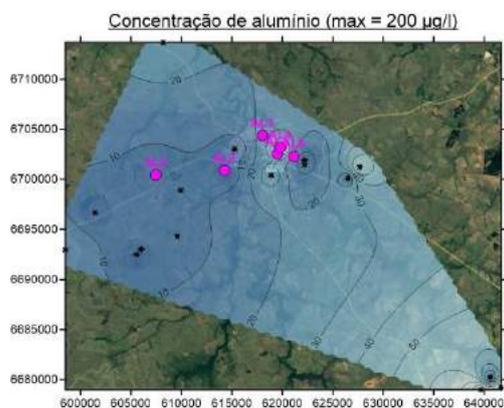


Figura 5.123: Concentração de alumínio em Alegrete

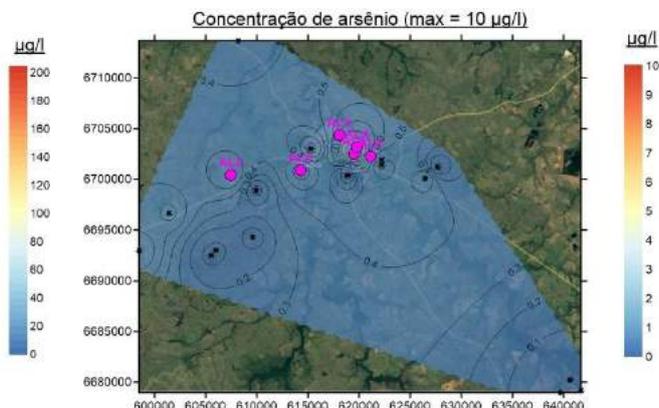


Figura 5.124: Concentração de arsênio em Alegrete

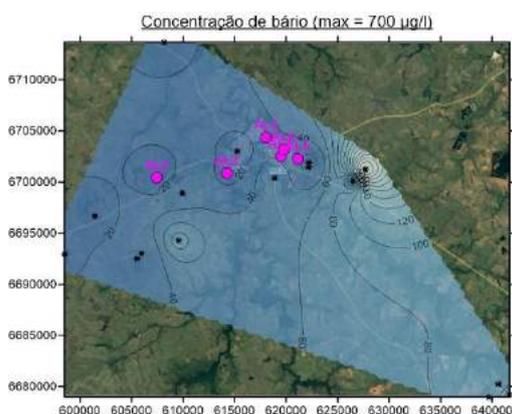


Figura 5.125: Concentração de bário em Alegrete

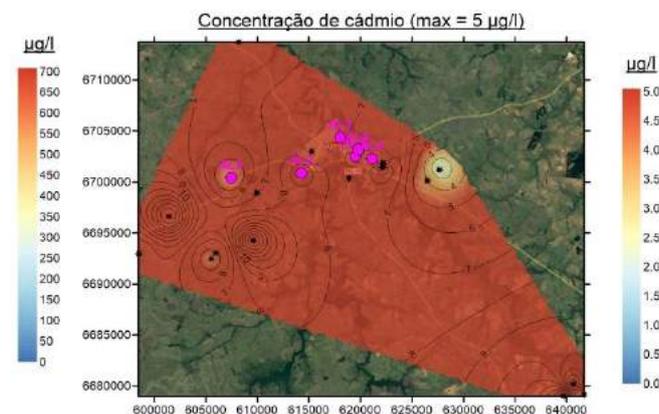


Figura 5.126: Concentração de cádmio em Alegrete

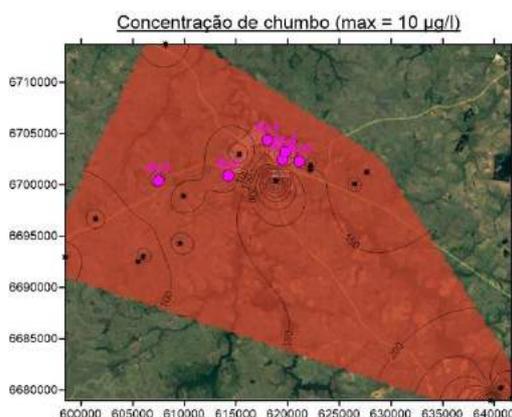


Figura 5.127: Concentração de chumbo em Alegrete

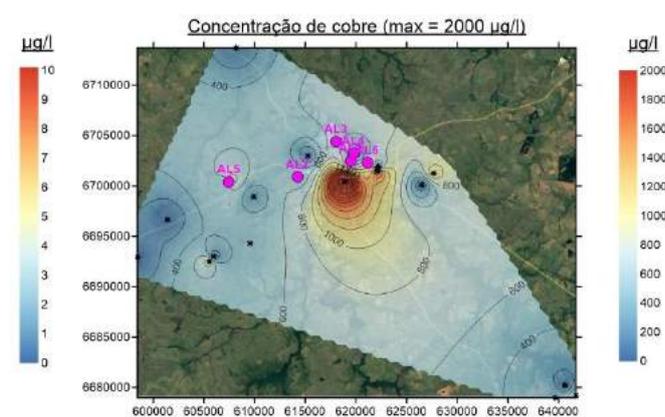


Figura 5.128: Concentração de cobre em Alegrete

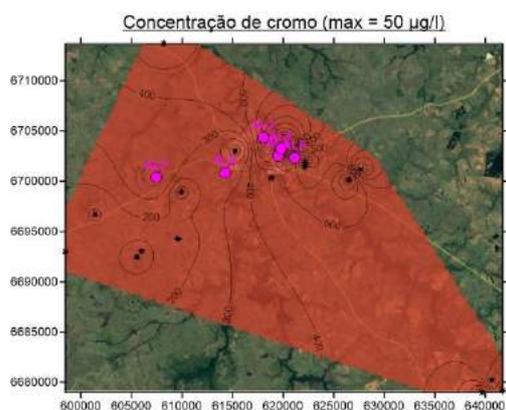


Figura 5.129: Concentração de cromo em Alegrete

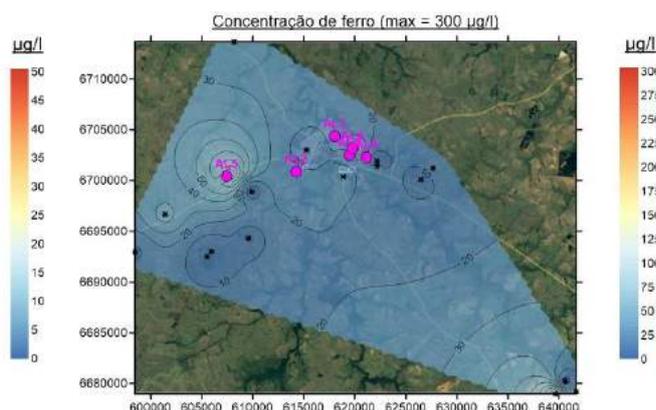


Figura 5.130: Concentração de ferro em Alegrete

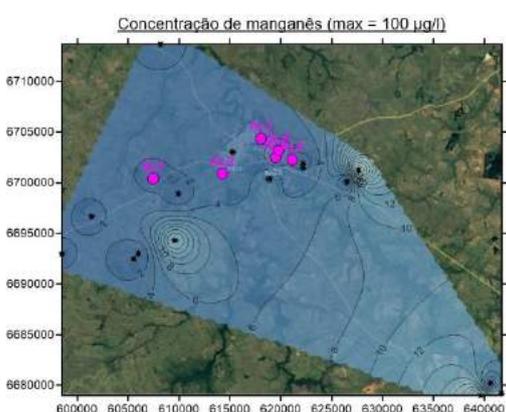


Figura 5.131: Concentração de manganês em Alegrete

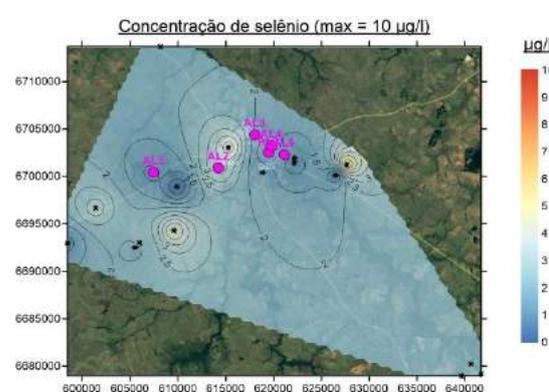


Figura 5.132: Concentração de selênio em Alegrete

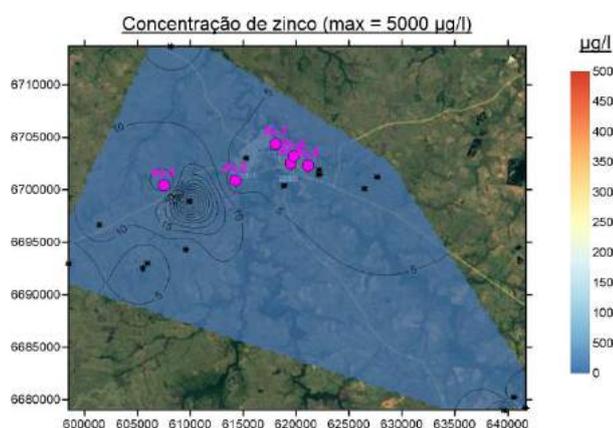


Figura 5.133: Concentração de zinco em Alegrete

#### 5.4.1.5 Diagrama de Piper

Com os dados físico-químicos dos poços da região de Alegrete, foi construído um diagrama de Piper para qualificar suas águas. Observando-se que, em geral, as águas são carbonatadas divididas entre magnesianas e sódicas, havendo só dois pontos sem especificação, no rombo superior, devido ao fato de tratar-se de águas

mistas. Acredita-se que essas águas provenham de estruturas geológicas de origem magmática, provavelmente de origem basáltica, e que, devido a essa atividade magmática, poderia haver a possibilidade de ter-se riólito, o qual é uma rocha félsica que poderia haver outorgado os íons de cálcio, portanto este resultado justificaria a alta concentração de cálcio, dureza, alcalinidade e magnésio e uma das regiões, tendo seu origem como uma causa geológica.

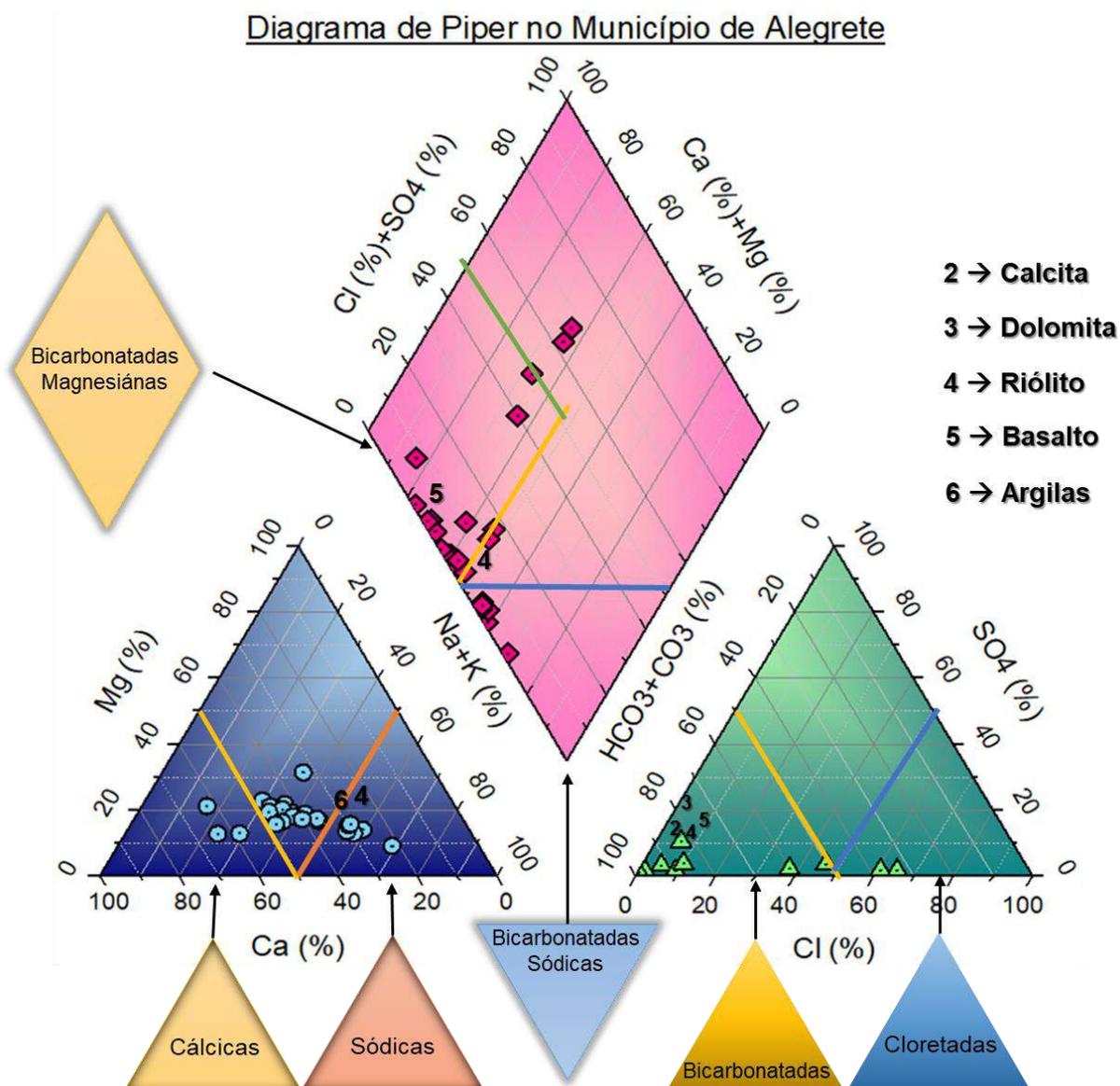


Figura 5.134: Diagrama de Piper em Alegrete

#### 5.4.2 Métodos geofísicos

A região de Alegrete foi a mais estudada do ponto de vista geofísico: foram realizados seis levantamentos sísmicos de refração e seis sondagens elétricas.

### 5.4.2.1 Linha AL1

A Figura 5.135 apresenta a inversão dos dados sísmicos da linha AL1. Ela indicou a presença de uma camada superficial muito fina. Já na segunda camada, foi encontrado basalto com velocidades acima de 3.800 m/s aumentando em profundidade, chegando rapidamente a mais de 7.500 m/s na terceira camada do modelo.

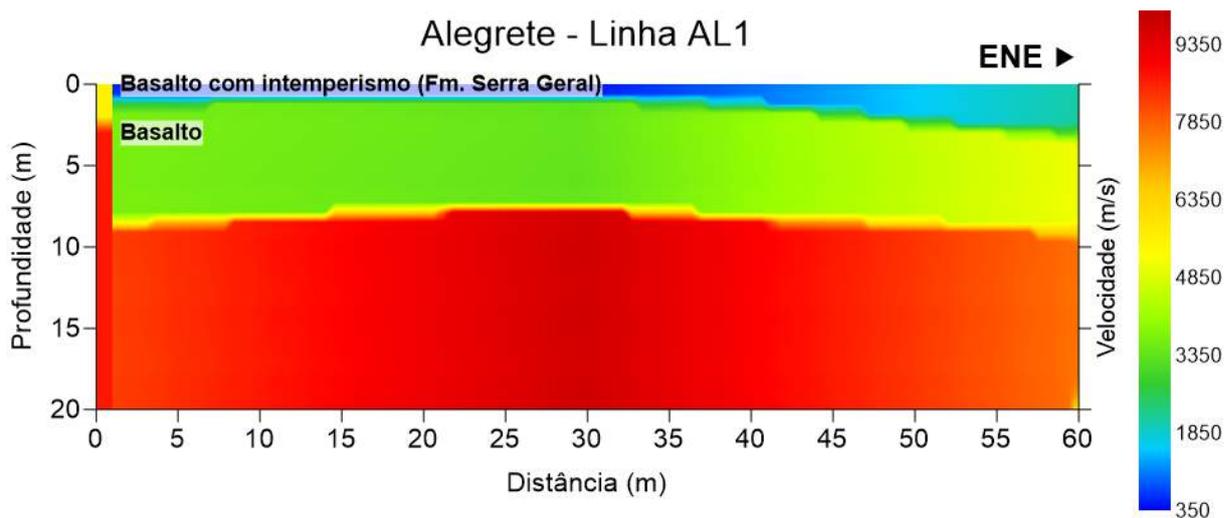


Figura 5.135: Linha AL1 (inversão da sísmica de refração)

O levantamento geolétrico da linha AL1 é mostrado na Figura 5.136. O levantamento geolétrico da linha AL1 é mostrado na Figura 5.136. Ele mostrou altos valores de resistividades, correspondentes ao basalto, nas maiores profundidades. A baixa resistividade na superfície pode dever-se a um terreno molhado ou úmido no momento da aquisição.

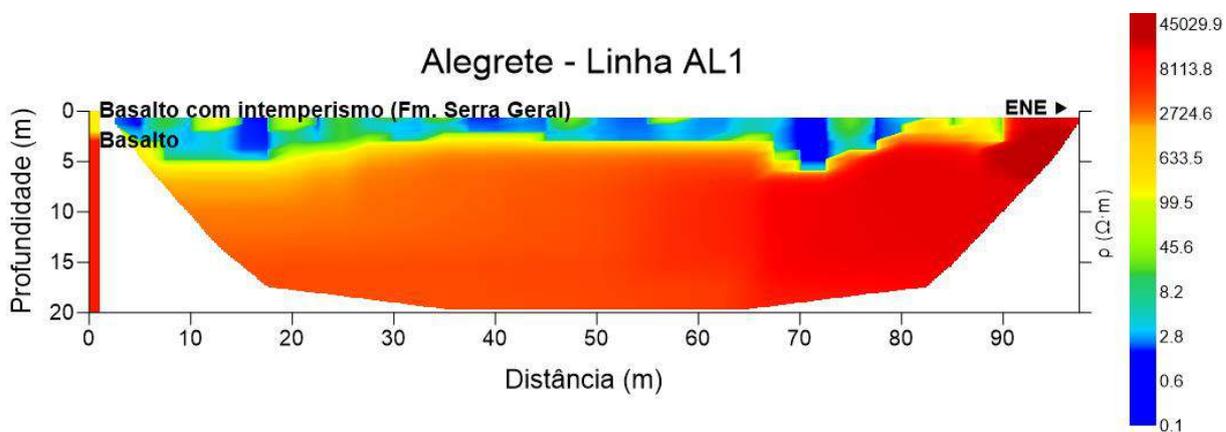


Figura 5.136: Linha AL1 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.4.2.2 Linha AL2

A inversão sísmica da linha AL2 está mostrada na Figura 5.137. Ela apresentou sísmica uma primeira camada, também como na linha AL1 de poucos centímetros, com solo areno-argiloso, seguido por rochas intemperizadas com velocidades de 1.800 m/s, aproximadamente. A terceira camada, mais profunda, provavelmente corresponde a arenito médio, pois apresenta uma velocidade aproximada de 3.000-3.400 m/s.

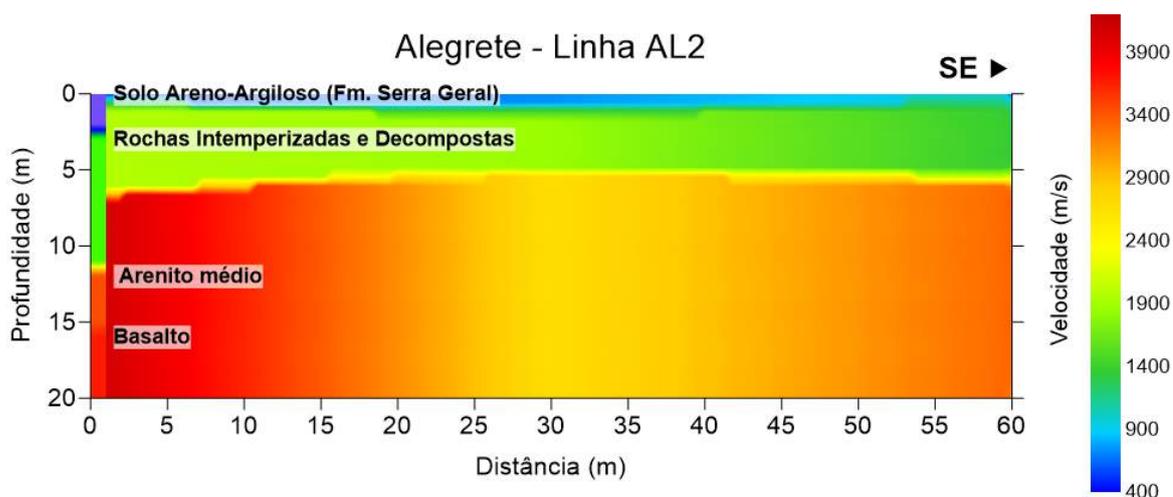


Figura 5.137: Linha AL2 (inversão da sísmica de refração)

A inversão da sondagem geolétrica da linha AL2 encontra-se mostrada na Figura 5.138. Nota-se uma primeira camada de solo areno-argiloso com resistividade de 30  $\Omega\text{m}$ , sobreposta a uma segunda camada de rochas intemperizadas com resistividade em torno de 90  $\Omega\text{m}$  e aumentando para 200  $\Omega\text{m}$ , correspondente ao arenito médio. Isso indica que o basalto esteja em uma profundidade maior nessa região.

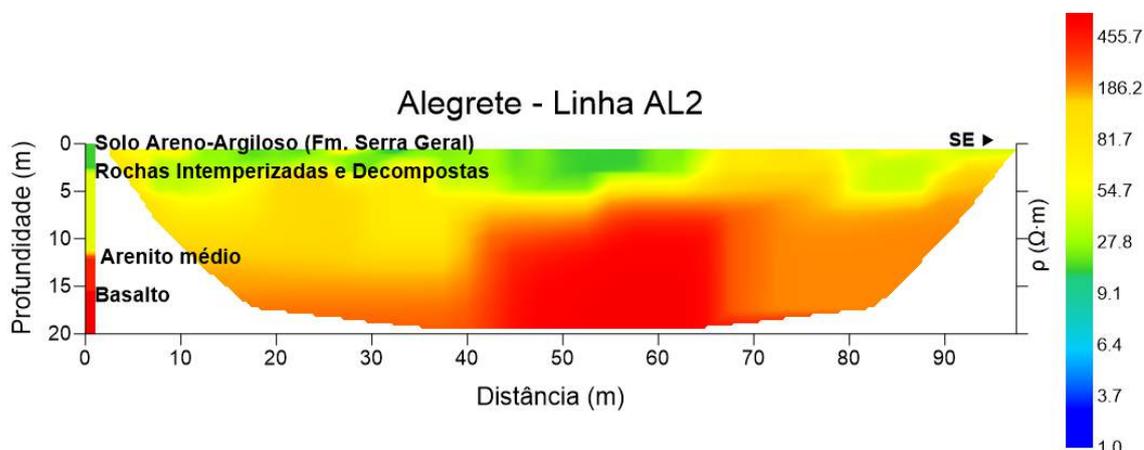


Figura 5.138: Linha AL2 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.4.2.3 Linhas AL3 e AL4

As linhas AL3 e AL4 apresentaram um comportamento similar entre si, como pode ser visto nas suas inversões sísmicas mostradas nas Figura 5.139 e Figura 5.141, respectivamente. Observa-se no levantamento sísmico uma camada superior com velocidade de 400 m/s que pode ser rocha intemperizada não consolidada e superficial. A seguir, passa-se a uma segunda camada com uma velocidade aproximada de 3.300 m/s, aumentando para mais de 5.000 m/s na terceira camada. Pensa-se, assim, que a segunda camada é o início de uma litologia basáltica que sofreu intemperismo, sendo menos alterada com o aumento da profundidade.

De forma similar à sísmica de refração, o levantamento geoeétrico das linhas AL3 e AL4 mostrou um comportamento similar, como pode ser visto nas suas inversões mostradas nas Figura 5.140 e Figura 5.142, respectivamente. Suas resistividades aumentam com a profundidade, chegando a ter valores acima de 280  $\Omega$ m, nas regiões mais profundas. Isso pode corresponder a um basalto que tenha sido levemente alterado e, assim, não possua um valor de resistividade excessivo.

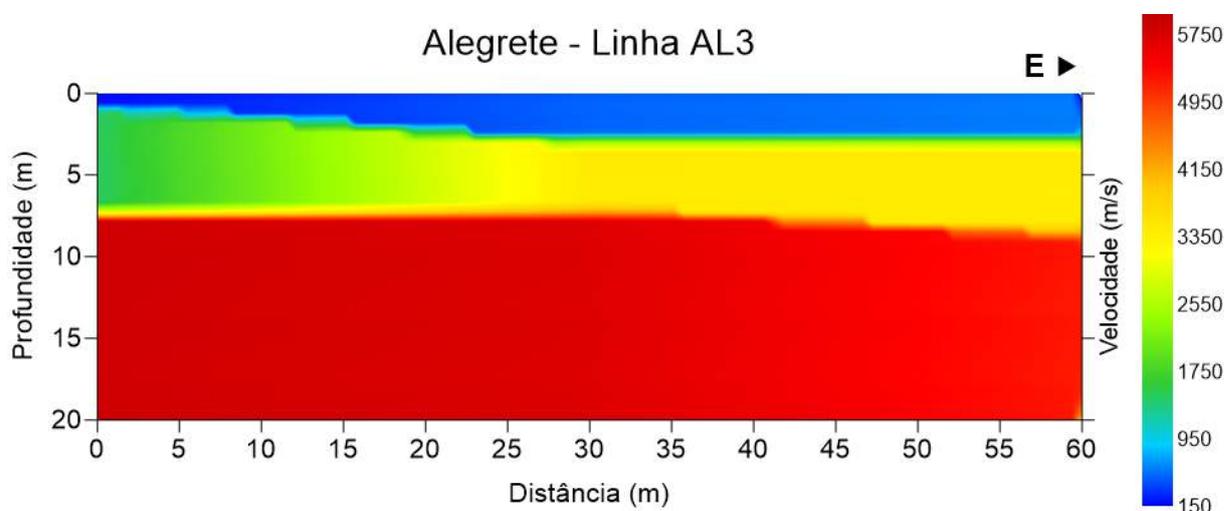


Figura 5.139: Linha AL3 (inversão da sísmica de refração)

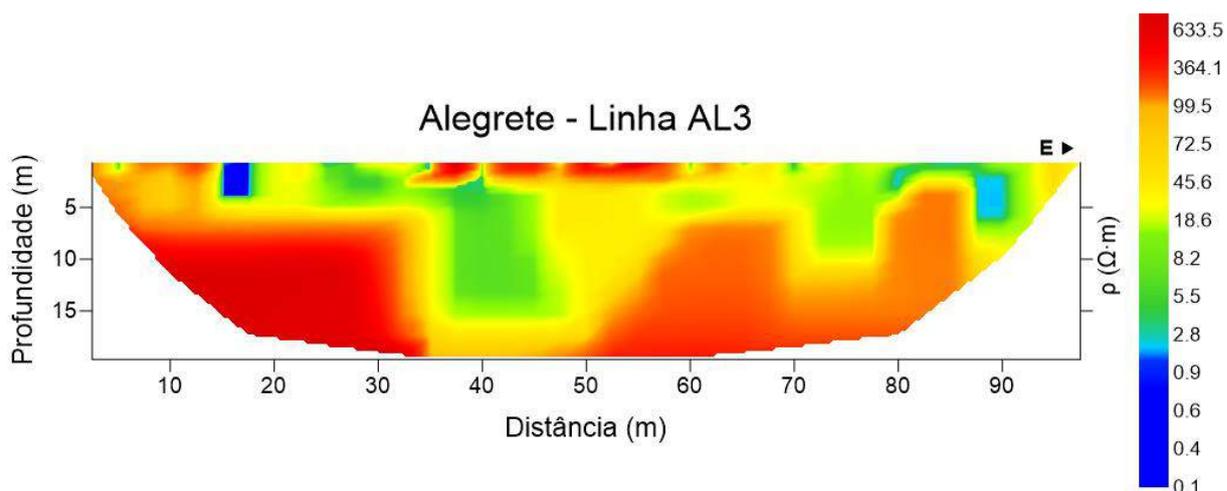


Figura 5.140: Linha AL3 (inversão da sondagem geolétrica)

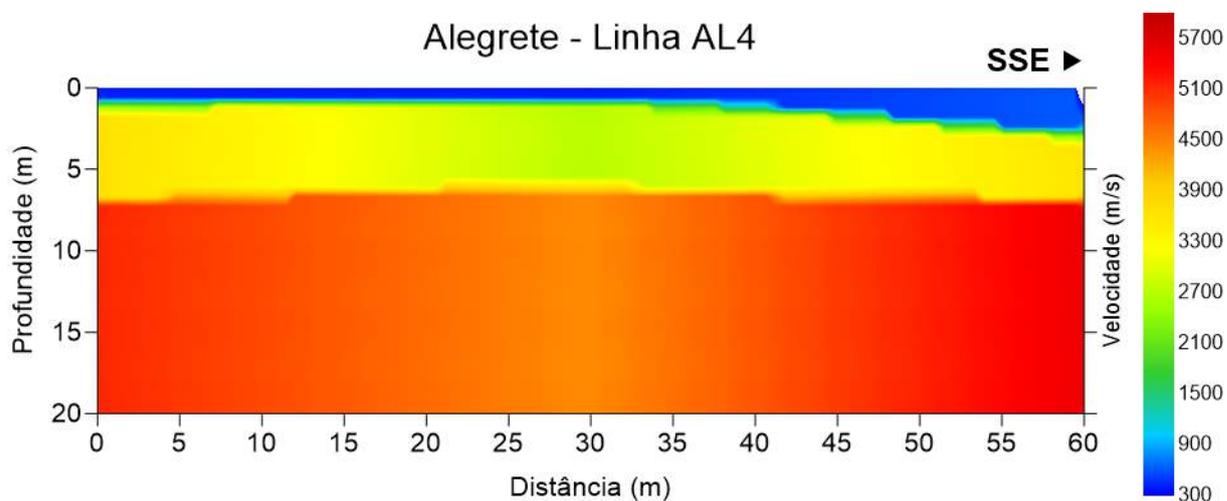


Figura 5.141: Linha AL4 (inversão da sísmica de refração)

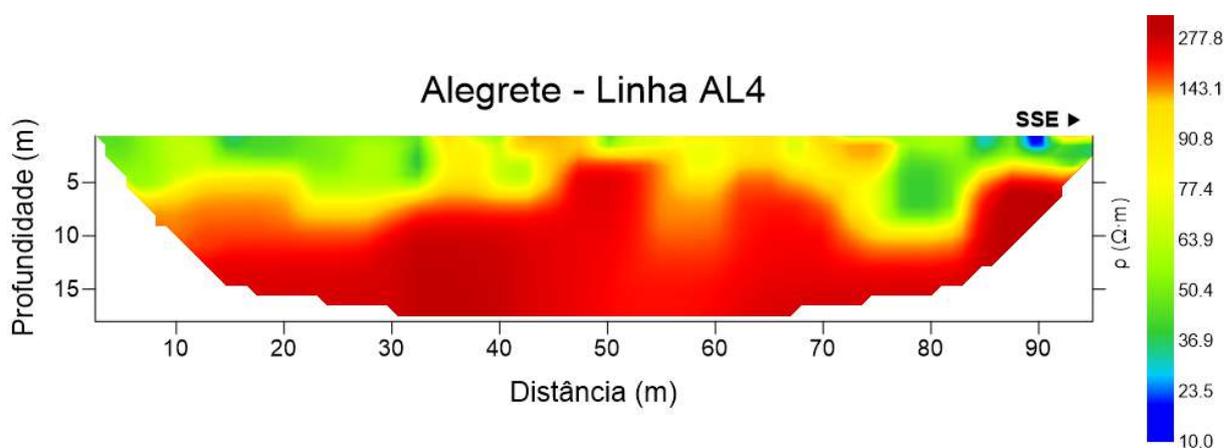


Figura 5.142: Linha AL4 (inversão da sondagem geolétrica)

#### 5.4.2.4 Linha AL5

A inversão do levantamento sísmico da linha AL5 é mostrada na Figura 5.143. Nota-se uma menor velocidade em relação às linhas anteriores, levando a supor que houve uma mudança de litologia, de basaltos para rocha sedimentar. A primeira camada apresenta baixa velocidade, em torno de 300 m/s, passando à velocidade de 1.200 m/s na segunda camada. Isso sugere a existência de sedimentos areno-argilosos, que se compactam na terceira camada, composta de arenito-argiloso.

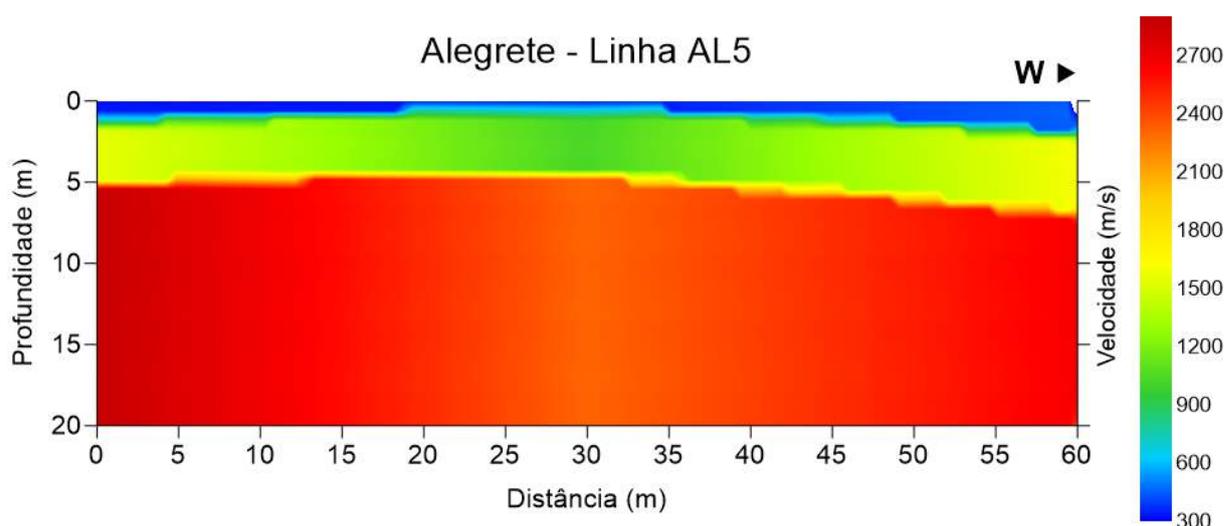


Figura 5.143: Linha AL5 (inversão da sísmica de refração)

A inversão do levantamento de resistividade da linha AL5 encontra-se na Figura 5.144. Ela mostra que se trata de uma litologia sedimentar, de forma similar ao interpretado no levantamento de sísmica de refração. Os valores de resistividade em média apresentam 190  $\Omega\text{m}$  para regiões mais profundas, enquanto na superfície atingem valores mais baixos, de aproximadamente 10  $\Omega\text{m}$ .

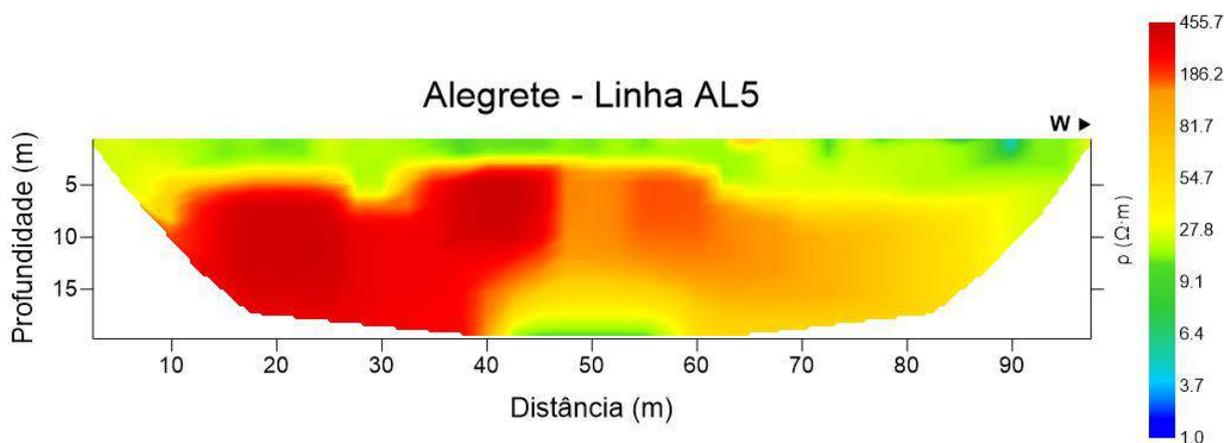


Figura 5.144: Linha AL5 (inversão da sondagem geolétrica)

#### 5.4.2.5 Linha AL6

A inversão do levantamento sísmico da linha AL6 encontra-se na Figura 5.145. Ela apresentou uma primeira camada de apenas poucos centímetros, com velocidade de 800 m/s. A segunda camada apresentou uma velocidade maior, de 2.900 m/s, aumentando até mais de 5.000 m/s na terceira camada. Isso indica que a litologia existente próxima à superfície é basalto que vai mudando desde um basalto intemperizado, a um alterado e outro completamente virgem em profundidades maiores.

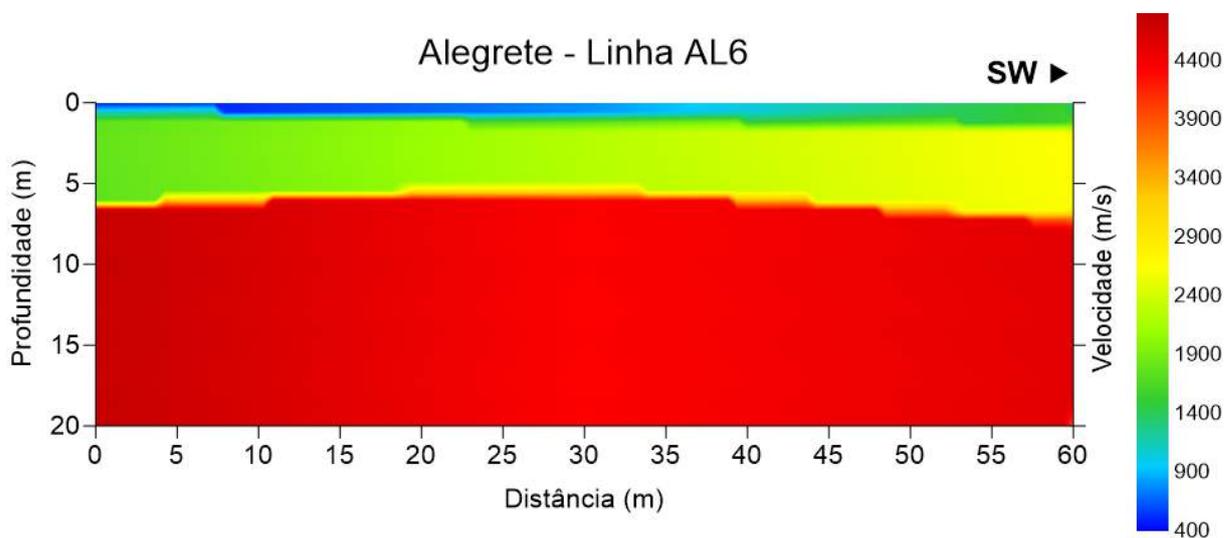


Figura 5.145: Linha AL6 (inversão da sísmica de refração)

A inversão da sondagem geométrica da linha AL6 é apresentada na Figura 5.146. Vê-se que a resistividade não parece ser extremadamente alta. De fato, parece mostrar uma queda em profundidade, da ordem de 40-70  $\Omega\text{m}$ , em torno de 10 metros, de SW para SE, ou seja, na parte inferior direita da imagem. Isso pode dever-se à existência de fratura no basalto, permitindo a entrada de água, diminuindo a resistividade da rocha. Comparando o resultado do levantamento elétrico com o sísmico, nota-se que existe coerência na indicação da existência de basalto na região.

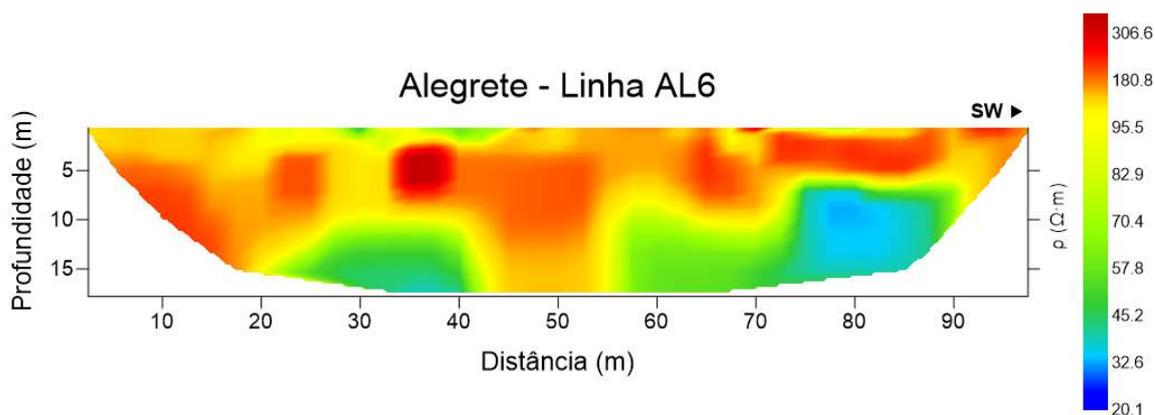


Figura 5.146: Linha AL6 (inversão da sondagem geolétrica)

### 5.4.3 Modelagem Geológica

No município de Alegrete fez-se a modelagem geológica com duas formações: Formação Serra Geral e Formação Botucatu. Seus mapas em curvas de níveis são mostrados nas Figura 5.147 e Figura 5.148, respectivamente. Na Figura 5.149 mostra-se a modelagem para o nível estático, o qual se encaixa entre as duas formações. A junção dos modelos bidimensionais permitiu a construção de um modelo tridimensional da região de Alegrete, que pode ser visto na Figura 5.150. Nota-se claramente na modelagem 3D que a formação Serra Geral se localiza (quase sempre) em cima das outras e possui a maior parte dos aquíferos, dando a supor que provavelmente a maioria dos aquíferos nesta região sejam de tipo fissural devido à geologia basáltica.

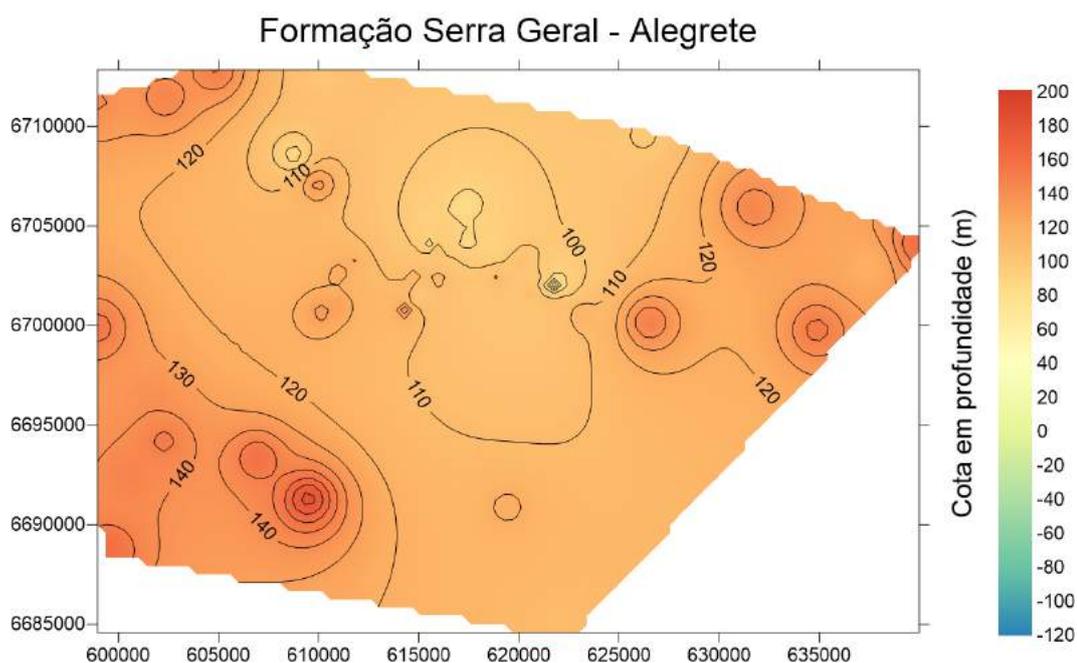


Figura 5.147: Formação Serra Geral no município de Alegrete

### Formação Botucatu - Alegrete

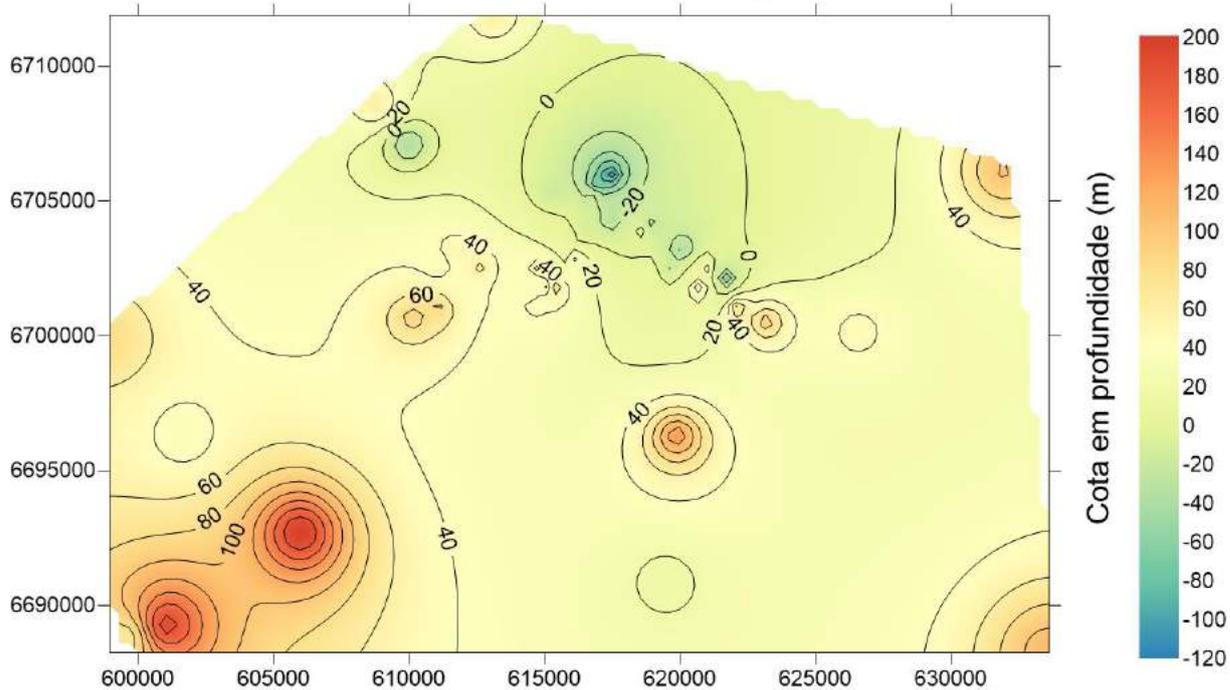


Figura 5.148: Formação Botucatu no município de Alegrete

### Nível estático - Alegrete

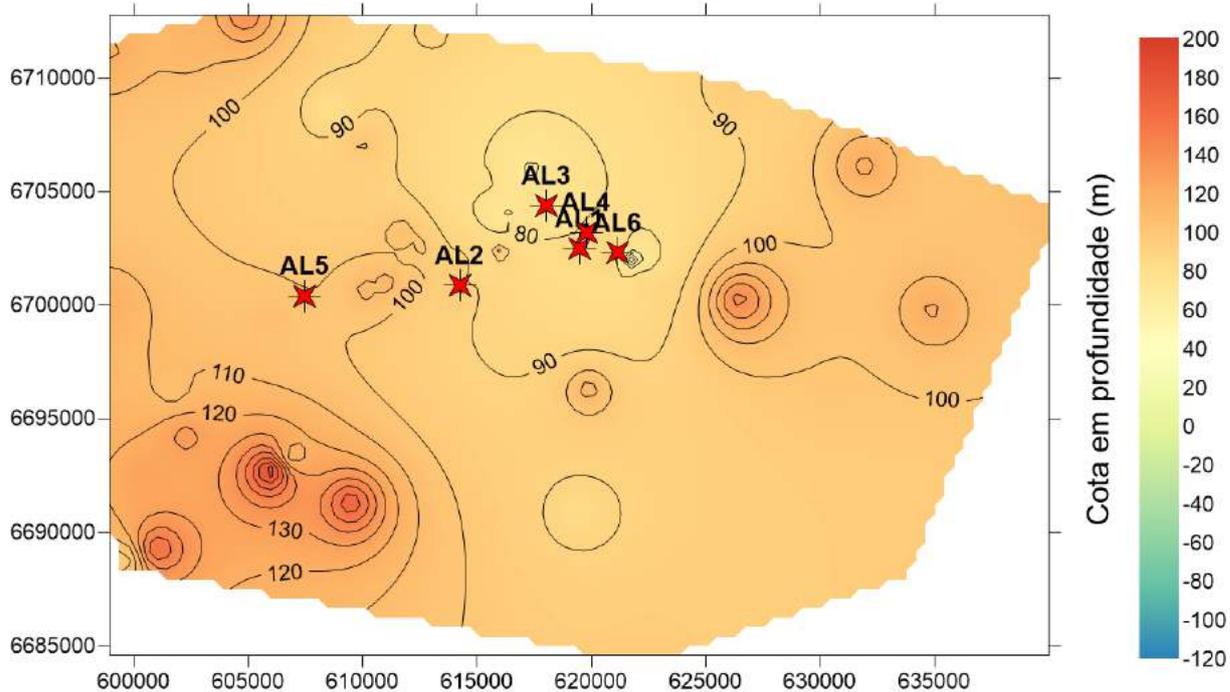


Figura 5.149: Nível estático no município de Alegrete. As estrelas vermelhas representam os pontos onde foram feitos os levantamentos geofísicos

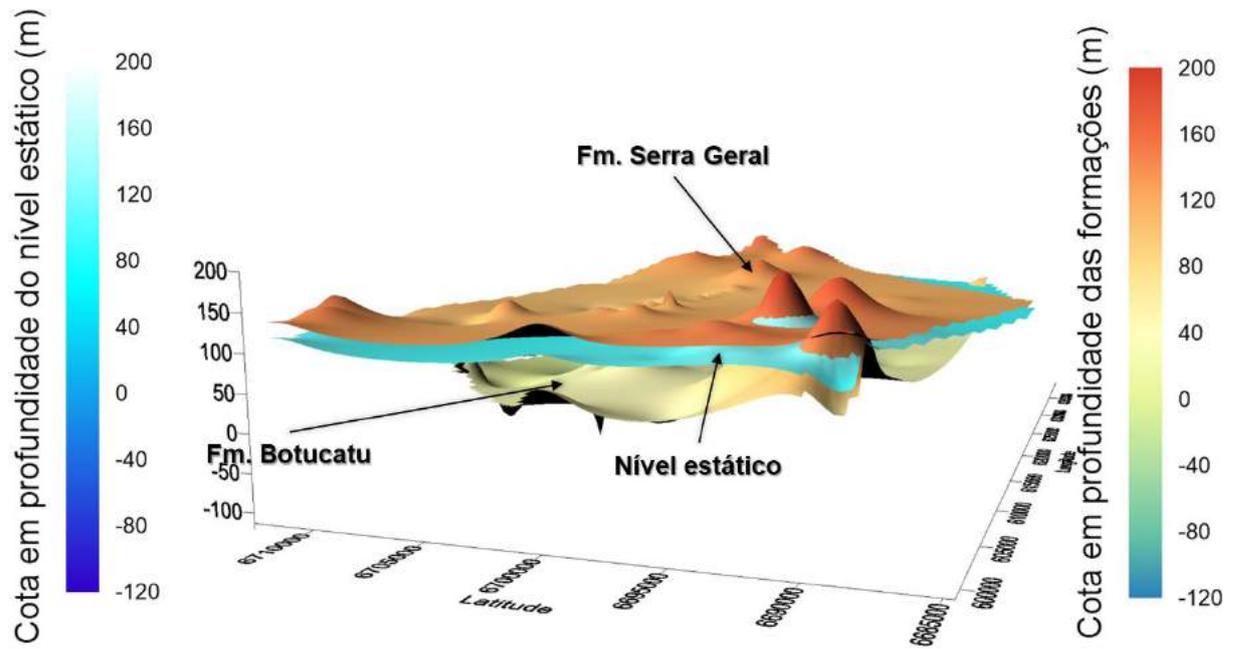


Figura 5.150: Modelagem 3D das formações no município de Alegrete

## 6 CONCLUSÕES

Após apresentados todos os resultados, conclui-se que foi possível integrar todos os dados existentes, conseguindo caracterizar cada uma das regiões mediante os diferentes estudos (hidrogeoquímicos, geofísicos e geológicos), obtendo uma visão geral da qualidade da água, possíveis litologias presentes, assim como prováveis prospectos de aquíferos e como estes se encontram distribuídos entre as diferentes formações, funcionando como primeiro passo para um geo-inventário hídrico nas regiões mencionadas e base para um plano estadual de recursos hídricos.

Fizeram-se um total de 93 mapas de contorno referentes aos parâmetros hidrogeoquímicos, observando, desta forma, a variação espacial das diferentes concentrações analisadas. Estas análises mostraram que a região com menos parâmetros alterados foi Santa Cruz do Sul, seguida de Alegrete, Quarta Colônia e, sendo o pior, o Município de Candelária.

Entre os parâmetros hidrogeoquímicos alterados, concluiu-se que a origem deles na água sejam as mencionadas a continuação, não obstante, recomenda-se mais estudos, já que os estudos feitos foram preliminares e os poços foram artesanais, por tanto, propensos a poluição.

- Cálcio e magnésio: Tem a ver com origem geológico, especificamente em aquíferos com rochas vulcânicas, como basaltos e riólitos. Portanto, uma alta concentração destes parâmetros, repercute diretamente na dureza da água, assim como na alcalinidade.
- Sódio e potássio: Muito provavelmente a origem deles seja por dissolução mineral, tendo como consequência direta o aumento na condutividade elétrica, assim como do pH e salinidade, já que estes parâmetros podem precipitar em sais.
- Cromo, cádmio, chumbo, cobre e ferro: Pensou-se que estes parâmetros nas águas sejam de origem antropogênico, ocasionados por industrias, como a metalúrgica.

- Fluoretos, fosfatos e sulfatos: Estes parâmetros muito provavelmente tenham uma origem geológica.

Foram confeccionados dois diagramas de Piper, nos municípios de Candelária e Alegrete, conseguindo obter uma relação entre as concentrações químicas e as prováveis litologias existentes nestes municípios, obtendo principalmente, reservatórios de origem vulcânico.

Com a sísmica de refração foi possível obter um modelo de três camadas, sempre obtendo a primeira camada de solo intemperizado e as próximas duas camadas rochosas. Por outro lado, com a sondagem geoeletrica obteve-se prováveis localidades que pudessem ser aquíferos sendo elas as linhas: SC2, QC1, QC4, CD4 e talvez a linha AL6. Não obstante, em caso de houver água nestes possíveis reservatórios, ela deve ser tratada para eliminar os possíveis poluentes que nela se encontrem.

Em adição ao acima exposto, graças aos dados de poços, foram modelados em mapas 2D e 3D diferentes formações, além do nível estático dos aquíferos existentes. Destaca-se que a formação que sempre esteve presente foi Serra Geral. A formação Rosário do Sul esteve presente em Santa Cruz do Sul e Quarta Colônia, assim como outra formação que se repetiu em duas regiões foi a Botucatu, aparecendo em Alegrete e Quarta Colônia. Por último, modelou-se a formação Santa Maria em Santa Cruz do Sul, concluindo que a formação com maior área de recarga é Serra Geral, pode haver uma grande quantidade de aquíferos do tipo fissural.

Por último, pode-se correlacionar a geoquímica, geofísica e geologia. Usando da geofísica é possível identificar as camadas no subsolo e localização de prospectos de reservatórios, os quais mediante uma análise química se percebe a potabilidade dessa água, além da provável origem geológica que tenha (usando o Diagrama de Piper), podendo modelar-se também o nível estático do aquífero através das cotas em profundidades das formações e nível estático.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.Hanjra, M., & Qureshi, M. E. (2010). Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, 35(5). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.05.006>

Agência Nacional de Águas. (2010). **Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água**. Brasília. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019, de <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>

Agência Nacional de Águas. (2010). **Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água** - Vol. 2. Brasília. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019, Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/atlas/Atlas\\_ANA\\_Vol\\_02\\_Regiao\\_sul.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/atlas/Atlas_ANA_Vol_02_Regiao_sul.pdf)

Agência Nacional de Águas. (2017). **Atlas Irrigação - Uso d'Água na Agricultura Irrigada**. Brasília. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019, Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrrigacao-UsodaÁguanaAgricaulturalIrrigada.pdf>

Agência Nacional de Águas. (2018). **Conjuntura Brasil 2018 - Recursos Hídricos**. Brasília. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019, disponível em [http://www.snirh.gov.br/porta1/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe\\_conjuntura\\_2018.pdf](http://www.snirh.gov.br/porta1/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe_conjuntura_2018.pdf)

Akram, W., Tariq, J., & Ahmad, M. (2011). **Major ion chemistry and quality assessment of groundwater in Haripur area**. Islamabad: Pakistan Institute of Nuclear Science and Technology. Acesso em: 14 de abril de 2019, Disponível em: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/019/44019675.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/019/44019675.pdf?r=1&r=1)

Alvarez Manilla Aceves, A. (2003). **Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil**. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Acesso em: 19 de abril de 2019, Disponível em: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>

Alves, F. d. (2008). **Estudos fitogeográficos na Bacia Hidrográfica do Arroio Lajeado Grande - Oeste do RS. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria**.

Acesso em: 2 de março de 2019, disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9284/FABIANODASILVAALVES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANA. (2000). Resolução CONAMA nº 274. Acesso em: 21 de abril de 2019, Disponível:

[http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/Resolu%C3%A7%C3%A3o\\_Conama\\_274\\_Balneabilidade.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/Resolu%C3%A7%C3%A3o_Conama_274_Balneabilidade.pdf)

ANA. (2008). Resolução CONAMA n396, de 3 de abril de 2008. Qualidade da água. ANA. Acesso em: 21 de abril de 2019, Disponível em:

<http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>

Auge, M. (2008). **Métodos Geoelectricos para la Prospección de Agua Subterránea**. Universidad de Buenos Aires. Acesso em: 21 de abril de 2019,

2019, Disponível em: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGeoelec.pdf>

Bendezu, J. A. (2011). **Acondicionamiento de datos sísmicos de reflexión y estudio de amplitud versus distancia (AVO) para la detección de gas en la Fm. Verdun, área Esperanza, Cuenca Sechura, Costa Afuera**.

Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Acesso em: 17 de abril de 2019, Disponível em: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9608/1/curi\\_ba.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9608/1/curi_ba.pdf)

Borges Soares, G. (2019). **Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas de áreas rurais na depressão central gaúcha associada ao uso de grafeno para remoção de herbicidas de águas contaminadas**.

Brassington, R. (2007). **Field Hydrogeology**, Third Edition. John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470057032

Chen, Q., & Thouas, G. A. (2017). Metallic implant biomaterials (Vol. 87). **Materials Science and Engineering: R: Reports**. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>

Daza Hernández, F. (2012, Novembro 30). **Métodos geolétricos aplicados a la exploración de águas subterráneas y termales**. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Acesso em: 18 de abril de 2019, Disponível em: [http://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2012/09/felipe\\_daza\\_tesis.pdf](http://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2012/09/felipe_daza_tesis.pdf)

de Oliveira, L. A., & Vieira, A. S. (2010). **Estado da Arte do Sistema Aquífero Guarani - SAG**. Caminhos de Geografia, 11. Acesso em: 3 de março de 2019, Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16288>

de Paula, P. M. (2006). **Mapeamento de Unidades Litomorfológicas em Bacias Hidrográficas com Processos de Arenização, Alegrete - RS**. Porto Alegre: UFRGS. Acesso em: 2 de março de 2019, disponível em <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7785/000556909.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

de Paula, P. M., & Robaina, L. E. (2003). Mapeamento de Unidades Geológicas-Geomorfológicas da Bacia do Arroio Lajeado Grande - RS. **Geociências**, 22(2).

ENRESS. (2018). Ley 11.220 - Anexo A. Acesso em: 21 de abril de 2019, Disponível em: <http://www.enress.gov.ar/wp-content/uploads/2018/01/LEY-11.220-ANEXO-A.pdf>

Estrada, L. A. (2008). **Prospección Geofísica. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán**. Acesso em: 18 de abril de 2019, Disponível em: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Sismica-para-Geologos.pdf>

Estrada, L. A. (2013). **Prospección Geolétrica. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán**. Acesso em: 18 de abril de 2019, Disponível em: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Prospeccion-Geoelectrica-para-Geologos.pdf>

Faccini, U., Giardin, A., & Machado. (2003). **Heterogeneidades litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Em P. Paim, U. Faccini, & R. Netto. Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudos de casos.

Fagin, S. (1991). Seismic Modelling of Geologic Structures: Applications to Exploration Problems. Tulsa: **Society of Exploration Geophysicists**.

FAO. (2005, Maio 3). Reglamento para la Calidad del Agua Potable. Gaceta Número 84. Acesso em: 21 de abril de 2019, Disponível em: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos73577.pdf>

Fitts, C. R. (2013). Hydrology and Geology. Em **Groundwater Science** (pp. 123-186). doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384705-8.00005-4>

Flores Machado, J. L. (2005). **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**.

Flores Machado, J. L. (2006). Caracterização dos Compartimentos Estruturais do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. **XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Acesso em: 3 de março de 2019, Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22209/14559>

Flores Machado, J. L. (2007). Sistema Aquífero Guarani e Seu Uso em Irrigação no Rio Grande do Sul e Sudoeste de Santa Catarina. **XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. Gramado. Acesso em: 21 de fevereiro de 2019, Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22161/14517>

Fundação de Economia e Estatística. (2017). Atlas FEE. Acesso em: Fevereiro 20, 2019, Disponível em: <http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/situacao-hidrica/>

García Moreno, W. E. (2017). **Corrección de tiempos de viaje generados por cambios de facies en el campo Penobscot, Canadá**. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Acesso em: 21 de abril de 2019 Disponível em: <http://159.90.210.77/sites/default/files/Pre/Wilmer%20Garcia.pdf>

García, J., López, N., & Muñoz, J. (2011, Abril). **Aplicación de la Prospección Geofísica Utilizando el Método Schlumberger para la Exploración del Agua Subterránea en Canton los Magueyes, Colonia Santa Lucia, Municipio de Ahuachapán**. Universidad de El Salvador. Acesso em: 18 de abril de 2019, Disponível em: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/458/1/10136842.pdf>

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H. K., Marmisolle, J., & Oleaga, A. (2010). Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do corredor termal do rio Uruguai (Argentina - Brasil - Uruguai). **Geociências**.

Gleick, P. H., Ajami, N., Christian-Smith, J., Cooley, H., Donnelly, K., Fulton, J., Srinivasan, V. (2014). **The World's Water Volume 8 - The Biennial Report on Freshwater Resources**. doi:10.5822/978-1-61091-483-3

Gleick, P. H., Nicholas L. Cain, D. H., Henges-Jeck, C., Hunt, C., Kiparsky, M., Moench, M., . . . Wolff, G. H. (2004). **The World's Water, 2004-2005: The Biennial Report on Freshwater Resources**.

Governo de Canadá. (2019). **Cadmium in Drinking Water**. Ottawa: Governo de Canadá. Acesso em: Novembro 11, 2019. Disponível em: [https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/images/programs/consultation-cadmium-drinking-water/Cadmium\\_in\\_Drinking\\_Water\\_01-29-2019\\_ENG.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/images/programs/consultation-cadmium-drinking-water/Cadmium_in_Drinking_Water_01-29-2019_ENG.pdf)

Godoy, M. M., Binotto, R. B., Silva, R. C., & Zerfass, H. (2010). **Geoparque Quarta Colônia - Proposta**. Acesso em: 2 de março de 2019, Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/17170/quartacolonia.pdf?sequence=1>

Goldman, M. (1988). **Métodos de Prospección Eléctrica en el Control de la Intrusión Marina**. Granada, Espanha: IGME. Acesso em: 2 de março de 2019. Disponível em: [http://águas.igme.es/igme/publica/pdfTiac/3\\_metodos.pdf](http://águas.igme.es/igme/publica/pdfTiac/3_metodos.pdf)

Govoni Sotelo, D. (2019). **Utilização do métodos geolétrico da resistividade no estudo de reservatórios de água subterrânea na região central do estado do Rio Grande do Sul**.

Haeni, F. (1986). Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in New England. **Geophysics**, 51(2). doi: <https://doi.org/10.1190/1.1442083>

Haeni, F. (1986). Application of seismic-refraction techniques to hydrologic studies. **U.S. Geological Survey**. doi:10.3133/ofr84746

Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014). **Hydrogeology: Principles and Practice**. **Wiley-Blackwell**.

Hounslow, A. (1995). **Water Quality Data: Analysis and Interpretation**. Boca Raton: CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203734117>

Junior, A. G., Dantas, E. S., Cotrim, M. E., & Pires, M. A. (2008). Selênio em águas subterrâneas da Região Noroeste do Estado de São Paulo. **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). **An Introduction to Geophysical Exploration**, 3rd Edition. Wiley-Blackwell. Acesso em: 19 de abril de 2019, Disponível em: [http://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/AN\\_INTRODUCTION\\_TO\\_GEOPHYSICAL\\_EXPLORATION\\_brooks\\_0\\_0.pdf](http://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/AN_INTRODUCTION_TO_GEOPHYSICAL_EXPLORATION_brooks_0_0.pdf)

Kirsch, R. (2009). **Aquifer structures – pore aquifers**. In R. Kirsch (Ed.), **Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kuhn, I. A., Troian, G., Kirchheim, R. E., & Barbosa, G. L. (2018). Variações Isotópicas e Comportamento Freático nos Poços RIMAS Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. **XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Campinas. Acesso em: 21 de fevereiro de 2019, Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/20516/1/kuhn%20et%20al\\_cabas2018.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/20516/1/kuhn%20et%20al_cabas2018.pdf)

Lakshmanan, E., & Kannan, R. (2007). Chapter 11 Rock–water interaction and its control on chemical composition of groundwater. Em **D. Sarkar, R. Datta, & R. Hannigan (Eds.), Developments in Environmental Science** (Vol. 5, pp. 229-243). doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)05011-5](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(07)05011-5)

Leap, D. I. (1999). Geological Occurrence of Groundwater. Em J. W. Delleur (Ed.), **Handbook of Groundwater Engineering**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Liu, J., J., A., Zehnder, B., & Yang, H. (2009, May 28). **Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water**. *Water Resources Research*, 45. doi:<https://doi.org/10.1029/2007WR006051>

López Ávalos, J., Mejía Carrillos, J., & Vega, N. (2008). **Aplicación del Método de Refracción Sísmica para la Determinación de Velocidades de Onda P**. El Salvador: Universidad de El Salvador. Acesso em: 18 de abril de 2019, Disponível em: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4379/1/Aplicaci%C3%B3n%20del%20m%C3%A9todo%20de%20refracci%C3%B3n%20sismica%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20velocidades%20de%20ondas%20%20P.pdf>

Magalhães, V. S. (2006). **Hidroquímica e qualidade das águas superficiais e subterrâneas em áreas sob influência de lavras pegmatíticas nas Bacias dos Córregos Água Santa e Palmeiras, Município de Coronel Murta (MG)**. Belo Horizonte: UFMG.

Maliva, R. G. (2016). Aquifer Characterization and Properties. In R. G. Maliva, **Aquifer Characterization Techniques Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series No. 4**. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-32137-0

Martínez, M. M., & Silva, J. L. (2004). Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas no Município de Santa Cruz do Sul, RS/Brasil. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Cuiabá. Acesso em: 26 de fevereiro de 2019, Disponível em: [http://jararaca.ufsm.br/websites/labhidro/download/cuiaba\\_silverio.pdf](http://jararaca.ufsm.br/websites/labhidro/download/cuiaba_silverio.pdf)

Martins, L. C., Wildner, W., & Hartimann, L. A. (2011). Estratigrafia dos derrames da Província Vulcânica Paraná na região oeste do Rio Grande do Sul, Brasil, com base em sondagem, perfilagem gamaespectrométrica e geologia de campo. **Pesquisas em Geociências**, 38(1). doi: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.23833>

Metrohm. (2019). **Bromide in water in accordance with ASTM D1246**. Acesso em: Novembro 11, 2019. Disponível em: <https://www.metrohm.com/en/applications/AN-I-014?fromProductFinder=true>

Minnesota Pollution Control Agency. (1999). Copper, Chromium, Nickel and Zinc in **Minnesota's Ground Water**. Acesso em 25 de Janeiro de 2020, disponível em <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/copper7.pdf>

Møller, I., Sørensen, K., & Auken, E. (2006). **Geoelectrical Methods. Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut)**. Acesso em: 18 de abril de 2019. Disponível em: [https://www.liag-hannover.de/fileadmin/user\\_upload/dokumente/Grundwassersysteme/BURVAL/buch/077-088.pdf](https://www.liag-hannover.de/fileadmin/user_upload/dokumente/Grundwassersysteme/BURVAL/buch/077-088.pdf)

Nagy, N. M., & Konya, J. (2009). **Interfacial Chemistry of Rocks and Soils**. Boca Raton: CRC Press.

Narany, T. S., Ramli, M. F., Aris, A. Z., Sulaiman, W. N., Juahir, H., & Fakharian, K. (2014). **Identification of the Hydrogeochemical Processes in Groundwater Using Classic Integrated Geochemical Methods and Geostatistical Techniques, in Amol-Babol Plain, Iran**. The Scientific World Journal. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/419058>

Neves, S., Borges, J. F., Caldeira, B., Moita, P., Pedro, J., & Boaventura, R. (2014). Aspectos sobre os métodos de refração sísmica. **Geo-Novas**.

Noronha, F. d. (2010). **Mapeamento geológico-geotécnico da área urbana de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil, visando a avaliação da suscetibilidade à deflagração de movimento de massa**. Porto Alegre. Acesso em: 26 de fevereiro de 2019, Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/1166/diss\\_fabio\\_noronha.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/1166/diss_fabio_noronha.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Noronha, F. d., Bressani, L. A., & Mizusaki, A. M. (2009). Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Santa Cruz do Sul (RS, Brasil). *GeoRS* 2009.

Noronha, F. d., Mizusaki, A. M., & Bressani, L. A. (2012). O mapeamento geológico-geomorfológico como uma ferramenta para obtenção de informações geotécnicas preliminares: estudo de caso na área urbana de Santa Cruz do Sul

(RS, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, 39(2), 127-145.  
doi:<https://doi.org/10.22456/1807-9806.35908>

Northfleet, A., Medeiros, R., & H, M. (1969). **Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná**. Boletim Técnico da Petrobras, 12(3).

Orellana, E. (1982). **Prospección Geoeléctrica en corriente continua**. Biblioteca técnica Philips.

Organização Mundial da Saúde. (2018). **Bromine as a drinking-water disinfectant**. Disponível em:  
[https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/bromine-02032018.pdf?ua=1](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/bromine-02032018.pdf?ua=1)

Pereira, S. d., Costa, A. d., Cardoso, E. d., Corrêa, M. d., Alves, D. T., Miranda, R. G., & Oliveira, G. R. (2010). Condições de potabilidade da água consumida pela população de Abaetetuba-Pará. **Revista de estudos ambientais**, 12(1).  
doi:<http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2010v12n1p50-62>

Pinheiro, A., Kaufmann, V., Schneiders, D., de Oliveira, D. A., & Albano, R. M. (2012). Concentrações e cargas de nitrato e fosfato na Bacia do Ribeirão Concórdia, Lontras, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 17(1), 86-93. Acesso em: 21 de abril de 2019, Disponível em:  
<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n1/v17n01a12.pdf>

Pinheiro, R. J., & Andréa Valli Nummer, L. A. (2012). Análise da instabilidade de uma encosta localizada na área urbana em Santa Cruz do Sul, RS. **Geociências UNESP**, 31(2). Acesso em: 26 de fevereiro de 2019, Disponível em:  
<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7250>

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Earth and space science news and analysis**. doi:  
<https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>

Pires Gall, J. (2019). **Desenvolvimento de um método para determinar o grau de vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos livres usando sísmica de refração**. Porto Alegre, Brasil.

Portal de Tratamento de Água. (2008). Parâmetros Analíticos. Acesso em 25 de Janeiro de 2020, disponível em <<https://www.tratamentodeágua.com.br/artigo/parametros-analiticos/>>

Prefeitura de Candelária. (2011). Plano Municipal de Saneamento Básico de Candelária/RS. Candelária. Acesso em: 27 de fevereiro de 2019, disponível em [http://www.candelaria.rs.gov.br/cliente/leis/m3rrelatorio\\_01\\_pmsb.pdf](http://www.candelaria.rs.gov.br/cliente/leis/m3rrelatorio_01_pmsb.pdf)

Rabbal, W. (2009). Seismic methods. In R. Kirsch (Ed.), **Groundwater Geophysics - A Tool for Hydrogeology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-88405-7

Reynolds, J. M. (2011). **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Willey-Blackwell.

Ribeiro Santiago, M., & Silvério da Silva, J. L. (2009). Flúor em águas subterrâneas: Um problema social. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande.

RIMAS. (2012). **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul. Bacia Sedimentar do Paraná**. Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Acesso em: 21 de fevereiro de 2019, disponível em [http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF\\_RIMAS/VOLUME16\\_Sistema\\_Aquifero\\_Guarani\\_RS.pdf](http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF_RIMAS/VOLUME16_Sistema_Aquifero_Guarani_RS.pdf)

Rodrigues, A. S., & Malafaia, G. (2008). Efeitos da exposição ao arsênio na saúde humana. **Revista Saúde.Com** , 4(2). Acesso em: Disponível em: <http://periodicos2.uesb.br/index.php/rsc/article/view/133/103>

Rosegrant, M. W., & Ringler, C. (2000, 9 de Março). Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. **Water Policy**, 1(6). doi: [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(99)00018-5)

Rubert, R. R., & Schultz, C. L. (2004). Um novo horizonte de correlação para o triássico superior do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, 31(1). Acesso em: 26 de fevereiro de 2019, Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/22616/000442818.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Savazzi, E. A. (2009). **Determinação da presença de Bário, Chumbo e Crômio em amostras de água subterrânea coletadas no Aquífero Bauru**. São Paulo: USP. doi:10.11606/D.60.2009.tde-04062009-164102

Schirmer, G. J. (2015). **Zoneamento Geoambiental da Quarta Colônia-RS. Santa Maria**. Acesso em: 2 de março de 2019, Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppggeo/images/Zoneamento%20Geoambiental%20da%20Quarta%20Col%C3%B4nia.pdf>

Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão. (2019, Fevereiro 15). **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Acesso em: 26 de fevereiro de 2019, Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/vab-da-agropecuaria>

Silva, A. N., Wollmann, C. A., & Hoppe, I. L. (2017). Perfil Topoclimático do Cerro do Botucaraí, em Candelária/RS, de abril e maio de 2016. **Ciência e Natura**, 39, 9-26. doi:10.5902/2179460X26916

Somaratne, N., & Frizenschaf, J. (2013). Geological Control upon Groundwater Flow and Major Ion Chemistry with Influence on Basin Management in a Coastal Aquifer, South Australia. **Journal of Water Resource and Protection**, 5, 1170-1177. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.512124>

Steeple, D. W. (2005). Shallow Seismic Methods. In Y. Rubin, & S. S. Hubbard (Eds.), **Hydrogeophysics** (pp. 215-251). Springer Netherlands. doi:10.1007/1-4020-3102-5

Sterrett, R. (2007). **Groundwater and wells**. Smyth Co Inc.

Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). **Applied Geophysics**. Nueva York: Cambridge University Press.

UNESCO. (2015). **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019, Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823/PDF/231823eng.pdf.multi>

UNESCO. (2017). **The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater The Untapped Resource**. Acesso em: 19 de fevereiro de

2019, disponível em <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153/PDF/247153eng.pdf>.multi

UNESCO. (2018). **The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water**. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019, disponível em <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>

World Health Organization. (2004). **Barium in Drinking-water**. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019, Disponível em: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/barium.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/barium.pdf)

World Health Organization. (2011). **Selenium in Drinking-water**. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019, Disponível em: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/selenium.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/selenium.pdf)

Zalán, P., Wolff, S., Conceição, J., Astolfi, M., Vieira, I., Appi, V., & Zanotto, O. (1987). Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. **Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 1**. Curitiba. Acesso em: 2 de março de 2019, disponível em [https://www.researchgate.net/publication/288353057\\_Tectonica\\_e\\_sedimentacao\\_da\\_Bacia\\_do\\_Parana](https://www.researchgate.net/publication/288353057_Tectonica_e_sedimentacao_da_Bacia_do_Parana)

Zerfass, H. (2007). **Geologia da Folha de Agudo - SH.22-V-C-V** . Serviço Geológico do Brasil, Brasília. Acesso em: 2 de março de 2019, Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10287/1/Agudo.pdf>

Ziemann, D. R. (2016). **Estratégias de Geoconservação para a Proposta do Geoparque Quarta Colônia - RS**. Santa Maria: Universidade de Santa Maria. Acesso em: 2 de março de 2019, Disponível em: [http://www.geoparques-sbg.org.br/disserta%C3%A7%C3%B5es/Ziemann%202016%20-%20Geoconserva%C3%A7%C3%A3o%20na%20Quarta%20Col%C3%B4nia.p](http://www.geoparques-sbg.org.br/disserta%C3%A7%C3%B5es/Ziemann%202016%20-%20Geoconserva%C3%A7%C3%A3o%20na%20Quarta%20Col%C3%B4nia.pdf)  
df



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)