

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

JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DETERMINAR O GRAU DE
VULNERABILIDADE LOCAL DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS LIVRES USANDO SÍSMICA
DE REFRAÇÃO**

Porto Alegre
2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DETERMINAR O GRAU
DE VULNERABILIDADE LOCAL DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS
LIVRES USANDO SÍSMICA DE REFRAÇÃO**

JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

LICENCIADO EM FÍSICA

BACHAREL EM FÍSICA MÉDICA

MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Março, 2019

Ficha Catalográfica

P667d Pires, Júlio César Gall

Desenvolvimento de um Método para Determinar o Grau de Vulnerabilidade Local de Aquíferos Subterrâneos Livres usando Sísmica de Refração / Júlio César Gall Pires . – 2019.

170.

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

Orientador: Prof. Dr. Jorge Hugo Silvestrini.

Co-orientador: Prof. Dr. Cássio Stein Moura.

1. Vulnerabilidade. 2. Sísmica de Refração. I. Silvestrini, Jorge Hugo. II. Moura, Cássio Stein. III. Título.

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

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Desenvolvimento de um Método para Determinar o Grau de Vulnerabilidade Local de Aquíferos Subterrâneos Livres Usando Sísmica de Refração.

CANDIDATO: JÚLIO CÉSAR GALL PIRES

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR 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.



DR. JORGE HUGO SILVESTRINI - ORIENTADOR



DR. CÁSSIO STEIN MOURA - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DRA. MARIA LUIZA CORREIA DA CÂMARA ROSA - IGEO - UFRGS



DR. GUILHERME ARAUJO PIMENTEL - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PUCRS



DR. FELIPE DALLA VECCHIA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 505 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais José Carlos e Jussara, ao meu irmão Marco Aurélio e ao meu amor, Cláudia, por todo apoio, quando precisei; por toda compressão na minha ausência em momentos importantes; e por toda dedicação e empenho para me auxiliar.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador de doutorado, Prof. Dr. Jorge Hugo Silvestrini, pelas orientações oferecidas e pela disposição em me atender, quando precisei esclarecer dúvidas.

Ao meu co-orientador de doutorado, Prof. Dr. Cássio Stein Moura, pelas orientações oferecidas, pelo incentivo sempre presente na produção de artigos, no auxílio durante as saídas de campo e pela conquista do projeto apoiado pela CAPES, que possibilitou esse trabalho de pesquisa.

Ao Geólogo Adolpho pelas inúmeras conversas e auxílio nas saídas de campo.

A todos os bolsistas que passaram pela sismica, e que de algum jeito contribuíram com as atividades desenvolvidas. Em especial ao bolsista Tales, que além de auxiliar nas saídas de campo também contribuiu com os mapas.

Ao IPR pelas amizades realizadas e pela estrutura, que proporcionou uma interação interdisciplinar única e muito enriquecedora para pesquisa.

Finalmente, a todos que de alguma forma contribuíram com a realização desta pesquisa...

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.091736/2014-01”

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

Dedicatória	6
Agradecimentos.....	7
SUMÁRIO.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABELAS.....	14
ÍNDICE DE QUADROS	15
Lista de Símbolos	16
RESUMO.....	17
ABSTRACT	18
CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO	19
CAPÍTULO 2 : OBJETIVOS	23
2.1 Objetivos Gerais	23
2.2 Objetivos Específicos	23
CAPÍTULO 3 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. Aquíferos	24
3.1.1. Características físicas de um aquífero	25
3.1.2. Regiões de um aquífero.....	27
3.1.3. Sistema Aquífero Guarani.....	29
3.1.4. Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande Sul.....	31
3.2. Vulnerabilidade intrínseca de aquíferos subterrâneos	35
3.2.1. Métodos de quantificação da Vulnerabilidade em Aquíferos	38
3.2.1.1. Método DRASTIC.....	39
3.2.1.2. Método GOD	39
3.2.1.3. Método SEEPAGE	40
3.2.1.4. Método AVI.....	40
3.2.1.5. Método EPIK	41
3.2.1.6. Método SINTACS	42
3.2.1.7. Método DAT	42
3.2.1.8. Método SAI.....	43

3.2.1.9. Método SORETO	43
3.2.1.10. Método MAIA.....	44
3.3. Algumas considerações sobre o Rio Grande do Sul.....	44
3.3.1. Considerações Gerais.....	45
3.3.2. Formações geológicas	50
3.3.2.1. Depósitos Aluvionares.....	50
3.3.2.2. Formação Serra Geral.....	50
3.3.2.3. Formação Botucatu	51
3.3.2.4. Formação Guará	52
3.3.2.5. Formação Caturrita.....	52
3.3.2.6. Formação Santa Maria	53
3.3.2.7. Formação Sanga do Cabral.....	53
3.4. Sismologia	54
3.4.1. Ondas sísmicas	54
3.4.2. Propagação das ondas sísmicas	54
3.4.3. Receptores de onda sísmica.....	58
3.4.4. Velocidades típicas das ondas sísmicas primárias.....	58
CAPÍTULO 4 : MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1. Região de estudo	60
4.2 Topografia e posicionamento.....	65
4.3. Descrição geológica dos poços	67
4.4. Princípios de aquisição sísmica	68
4.4.1. Principais trajetórias sísmicas.....	70
4.4.2. O Sismograma.....	71
4.4.3. Sismógrafo.....	73
4.4.3.1. Metodologia de aquisição de dados para o levantamento sísmico de refração	74
4.5. Descrição do método de quantificação da vulnerabilidade GOD.....	78
4.6. Descrição do novo método de quantificação de vulnerabilidade proposto	80
CAPÍTULO 5 : RESULTADOS	86
5.1. Validação dos levantamentos sísmicos realizados.....	86
5.2. Levantamentos sísmicos realizados.....	89

5.2.1. Levantamentos sísmicos no município de Santa Cruz do Sul	89
5.2.2. Levantamentos sísmicos no município de Candelária.....	91
5.2.3. Levantamentos sísmicos na Região da Quarta Colônia.....	93
5.2.4. Levantamentos sísmicos no município de Alegrete.....	95
5.3. Análise dos cortes geológicos obtidos com os registros sísmicos	97
5.4. Determinação do grau de vulnerabilidade	101
5.4.1. Resultados do grau de vulnerabilidade usando método GOD.....	102
5.4.2. Resultados do grau de vulnerabilidade usando o novo método VSR	103
5.4.3. Comparação entre o grau de vulnerabilidade obtido pelos métodos VSR e GOD	106
CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	109
6.1. Conclusões	109
6.2. Propostas Futuras.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
ANEXO I.....	123
Ondas Profundas.....	123
ANEXO II.....	126
Método usado no processamento de dados	126
ANEXO III.....	135
Perfis dos poços locais estudados.....	135
ANEXO IV	152
Application of refraction seismic in the vulnerability of underground aquifers.	152
Different Approaches on the Investigation of Ground Water	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação do ciclo das águas e das formações de armazenamento subterrâneas. Adaptado de [19].	25
Figura 3.2: Representação de aquíferos formados por diferentes tipos litológicos: I) aquífero granular, II) aquífero fissural e III) aquífero cárstico [21].	26
Figura 3.3: Representação da configuração de um aquífero apresentando a zona saturada e a zona confinada, bem como o nível freático e a rocha confinadora (aquicluda). Fonte: o autor.	28
Figura 3.4: Ilustração do SAG indicando as zonas de afloramento e recarga e as zonas de confinamento, bem como a ilustração das grandes formações regionais que provocam a compartimentação do SAG [20,24].	30
Figura 3.5: Mapa hidrográfico do Rio Grande do Sul apresentando as três bacias hidrográficas [30].	33
Figura 3.6: Mapa do sistema de três falhas do Rio Grande do Sul denominados: Dorsal de Canguçu (SFDC), Jaguari-Mata (SFJM) e Terra de Areia-Posadas (SFTA-P), bem como os quatro principais compartimentos denominados: Oeste, Central-Missões, Norte-Alto Uruguai e Leste [31].	34
Figura 3.7: Mapa ilustrando a compartimentação e a produtividade do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul [33].	35
Figura 3.8: Mapa ilustrando os municípios de Santa Cruz do Sul, de Candelária, alguns da Quarta Colônia e de Alegrete [41].	45
Figura 3.9: Imagem de satélite mostrando o município de Santa Cruz do Sul e as posições dos levantamentos sísmicos [41].	46
Figura 3.10: Imagem de satélite mostrando o município de Candelária e as posições dos levantamentos sísmicos [41].	47
Figura 3.11: Imagem de satélite mostrando os municípios da Quarta Colônia e as posições dos levantamentos sísmicos [41].	48
Figura 3.12: Imagem de satélite mostrando o município de Alegrete e as posições dos levantamentos sísmicos [41].	49
Figura 3.13: Representação de uma frente de onda e sua possível representação em raio de onda. Adaptado de [58].	55
Figura 3.14: Representação das trajetórias dos raios de onda direto, refletido e refratados para um modelo geológico de duas camadas, modificado de [61].	57
Figura 4.1: Mapa ilustrando as formações geológicas do município de Santa Cruz do Sul [41].	61

Figura 4.2: Mapa ilustrando as formações geológicas do município de Candelária [41].....	62
Figura 4.3: Mapa ilustrando as formações geológicas de alguns municípios da Quarta Colônia [41].	63
Figura 4.4: Mapa ilustrando as formações geológicas do Alegrete [41].	64
Figura 4.5: Imagem de uma estação total Topcon gts 213. Fonte: o autor.....	65
Figura 4.6: Ilustração da disposição da linha sísmica mostrando os pontos de disparo. Adaptado de [65].	69
Figura 4.7: Representação da geometria dos eventos sísmicos para o caso do modelo de duas camadas planas e horizontais com $V_1 < V_2$: a) modelo geométrico e raio direto; b) raios diretos, refletidos e refratados; c) raios diretos e refratados criticamente. Os números de 1 a 12 representam os receptores sísmicos. Adaptado de [66].....	71
Figura 4.8: Ilustração de um sismograma sendo gerado. Adaptado de [65].....	72
Figura 4.9: Representação das ondas aéreas, rolagem, direta, refletida e refratada criticamente. Adaptado de [58].	72
Figura 4.10: Partes componentes do sismógrafo multicanal. a) Extensão do disparador, b) RAS-24, c) bateria de 12 V, d) disparador e) cabo serial, f) 12 geofones, g) cabo de conexão dos geofones de 120 m, h) marreta de 8 kg e i) placa de alumínio.	73
Figura 4.11: Ilustração da ficha de parâmetros utilizados durante de aquisição sísmica.....	75
Figura 4.12: a) Ilustração de uma linha sísmica de aquisição com os pontos de disparo; b) Ilustração dos sismogramas dos respectivos pontos de disparo. Figura do autor.....	76
Figura 4.13: Ilustração da escala de cor utilizada para padronização dos levantamentos sísmicos. Fonte: Figura do autor.....	77
Figura 4.14: Esquema apresentando os parâmetros utilizados para o cálculo de vulnerabilidade , usando o método de quantificação GOD [70].....	79
Figura 5.1: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Santa Cruz do Sul.	87
Figura 5.2: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Candelária.....	87
Figura 5.3: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local na região da Quarta Colônia.	88
Figura 5.4: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Alegrete.	89
Figura 5.5: Levantamentos sísmicos realizados no município de Santa Cruz do Sul.	90
Figura 5.6: Levantamentos sísmicos realizados no município de Candelária.....	92
Figura 5.7: Levantamento sísmico realizados na região da Quarta Colônia.....	94
Figura 5.8: Levantamentos sísmicos realizados no município de Alegrete.....	96

Figura 5.9: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Santa Cruz do Sul.....	98
Figura 5.10: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Candelária.	99
Figura 5.11: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados na Quarta Colônia.....	100
Figura 5.12: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Alegrete.	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Tabela de valores de velocidades para onda primária e densidade [58], [61]....	59
Tabela 4.1: Quadro das posições das linhas sísmicas e das distâncias entre poços e linhas.	66
Tabela 4.2: Índices de ponderação da velocidade da onda P utilizados para o cálculo de VSR.	83
Tabela 5.1: Resultados da aplicação do método GOD nos poços locais existentes nos levantamentos sísmicos.....	102
Tabela 5.2: Resultados do coeficiente de correlação de Pearson obtidos.....	103
Tabela 5.3: Apresentação dos resultados obtidos com o método VSR para uma posição do levantamento sísmico.	104
Tabela 5.4: Apresentação dos resultados obtidos com o método VSR para sete posições do levantamento sísmico.	105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1: Índices de ponderação do nível freático utilizados para o cálculo de VSR.	81
Quadro 4.2: Índices de ponderação da espessura do solo utilizados para o cálculo de VSR.	82
Quadro 4.3: Índices de ponderação da declividade utilizados para o cálculo de VSR.....	83
Quadro 4.4: Coeficientes associados aos parâmetros utilizados para o cálculo de VSR.	84
Quadro 4.5: Grau de vulnerabilidade de acordo com os valores de índice obtidos por VSR.	84

LISTA DE SÍMBOLOS

DRASTIC	Acrônimo em inglês de profundidade, recarga, aquífero, solo, topografia, impacto e condutividade.	-
GOD	Acrônimo em inglês de grau de confinamento, ocorrência litológica e profundidade.	-
VSR	Acrônimo de vulnerabilidade, sísmica e refração.	-
SAG	Sistema Aquífero Guarani	-
SFDC	Sistema de Falha Dorsal de Canguçu	-
SFJM	Sistema de Falha Jaguari-Mata	-
SFTA-P	Sistema de Falha Terra de Areia-Posadas	-
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais	-
Ondas P	Ondas primárias ou compressionais	-
Ondas S	Ondas secundárias	-
Ondas R	Ondas Rayleigh	-
Ondas L	Ondas Love	-
-	Metro	m
-	Quilômetro quadrado	km ²
-	Graus Celsius	°C
-	percentual, porcentagem	%
-	Capacidade específica	m ³ /h/m
-	Vazão	m ³ /h
T_0	Tempo de contagem inicial	ms
T_i	Tempo de interceptação	ms
T_{AB}	Tempo decorrido do ponto A até o ponto B	ms
λ	Comprimento de onda	m
V_n	Velocidade de propagação da onda no meio n	m/s
f	Frequência da onda sísmica	Hz
$i_{\text{incidência}}$	Ângulo da incidência	rad
$i_{\text{refletido}}$	Ângulo de reflexão	rad
$i_{\text{refratado}}$	Ângulo de refração	rad
i_c	Ângulo crítico	rad
x	Distância do ponto A até o ponto C	m
L	Distância do ponto A até o ponto B	m
z	Profundidade da camada	m
b	Distância entre os geofones	m
a	Distância entre os disparos	m
ρ_n	Densidade da camada n	kg/m ³
δ_{tC}	Tempo de atraso no geofone em uma posição intermediária C	ms
δ_{tA}	Tempo de atraso, da trajetória de A até C passando por D-E	ms
δ_{tB}	Tempo de atraso, da trajetória de B até C passando por F-G	ms

RESUMO

PIRES, Júlio César Gall. **Desenvolvimento de um método para determinar o grau de vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos livres usando sísmica de refração**. Porto Alegre. 2019. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Um levantamento sísmico de refração multicanal consiste em uma técnica geofísica de quantificação indireta, cujos princípios são baseados na detecção de propriedades acústicas das ondas sísmicas produzidas localmente. O presente estudo busca apresentar um método para estimar o grau de vulnerabilidade intrínseco de aquíferos livres, a partir das propriedades físicas das estruturas geológicas determinadas pelo uso de ondas sísmicas. A técnica utilizada apresenta como principais vantagens: a ausência de impactos ambientais durante as aquisições, baixo custo e agilidade na apresentação dos resultados. Além disso, também fornece dados com potencial para elaboração de estudos da variabilidade longitudinal da vulnerabilidade com uma grande resolução. Os levantamentos sísmicos mostram às características acústicas do ambiente geológico, em especial, a velocidade de propagação da onda longitudinal, permitindo estimar o tipo de rocha, que constitui a subsuperfície. A determinação das profundidades dos estratos é feita com base no conhecimento das velocidades e dos tempos de trânsito da onda nas camadas geológicas. O método aqui proposto foi testado numa região que abrange os municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária, Alegrete e, ainda, alguns da região da Quarta Colônia no Estado do Rio Grande do Sul. Essa região é intensamente explorada pela agricultura de diversos cultivos e pela pecuária, além de constituir também uma das diversas áreas de recarga e de afloramento do Sistema Aquífero Guarani - SAG. O interesse de avaliar o grau de vulnerabilidade das formações aquíferas decorre fundamentalmente da necessidade de fornecer às autoridades competentes um instrumento, que seja útil no planejamento e nas tomadas de decisões voltadas à preservação dos reservatórios subterrâneos. O método desenvolvido permitiu estimar a variabilidade local da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos livres a partir de características geológicas.

Palavras-Chaves: sísmica de refração, água subterrânea, vulnerabilidade.

ABSTRACT

PIRES, Júlio César Gall. **Development of a method to determine the local degree vulnerability of free underground aquifers using seismic refraction.** Porto Alegre. 2019. PhD Thesis. Post-Graduate Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

A multichannel refraction seismic survey is a geophysical technique of indirect quantification, whose principles are based on the detection of acoustic properties of locally produced seismic waves. The present study seeks to present a method to estimate the degree of intrinsic vulnerability of free aquifers based on the physical properties of geological structures using seismic waves. The used technique presents as main advantages: the absence of environmental impacts during acquisitions, low cost and agility in the presentation of the results. In addition, it also provides data with potential to elaborate large resolution studies of the vulnerability longitudinal variation. Seismic surveys show the acoustic characteristics of the geological environment, such as the propagation velocity of the longitudinal wave, allowing the estimation of the rock type which constitutes the subsurface. The determination of the depths of the strata is based upon knowledge of the wave speeds and transit times in the geological layers. The proposed method was applied as case studies in the municipalities of Santa Cruz do Sul, Candelaria, Alegrete and some of others in the Quarta Colônia in the state of Rio Grande do Sul. This region is exploited by agriculture of various crops and livestock, in addition, it constitutes one of the various recharge areas of and outcropping of the Guarani Aquifer System-SAG. The interest in assessing the degree of vulnerability of aquaculture formations stems fundamentally on the need to provide the competent authorities with an instrument that is useful in planning and making decisions aimed at preserving underground water reservoirs. The developed method allowed to estimate the local variability of vulnerability based on geological characteristics.

Keywords: refraction seismic, groundwater, vulnerability.

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para vida na Terra e, por isso, torna-se fundamental à necessidade de sua preservação. Embora seja um recurso natural abundante o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial e agrícola vem incrementando sua utilização [1]. Essa situação gera um aumento na demanda por água potável e, paralelamente, cria um aumento do risco de contaminação de água superficial e de subsuperfície devido ao aumento da possibilidade de contaminação antrópica [2,3].

Estimar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos é uma tarefa de grande importância, que pode revelar áreas mais suscetíveis à poluição. A contaminação dos aquíferos tem se tornado um dos problemas mais preocupantes nas questões de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, visto que são considerados reservatórios estratégicos para a humanidade. As regiões que possuem maior relevância econômica e ambiental para a sociedade são as mais suscetíveis ao problema [4].

O uso excessivo dos recursos hídricos subterrâneos, a ocupação irregular do solo e o descumprimento de normas legais põem em risco a qualidade natural das águas subterrâneas. Eventuais poluentes lançados na superfície podem encontrar meio mais favoráveis à sua percolação e acabar atingindo os aquíferos [5,6]. Assim, a vulnerabilidade é entendida, nesse contexto, como a suscetibilidade dos aquíferos serem afetados por cargas contaminantes usadas pelo homem, que é devida à acessibilidade de os contaminantes transporem a zona não saturada do solo [7].

Conforme descrito por Maia & Cruz (2011), a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é decorrente das propriedades físico-químicas inerentes do meio aquífero, que expressa a suscetibilidade hidrogeológica da água ser afetada por contaminantes [8].

A médio ou a longo prazo, todos os aquíferos são vulneráveis à contaminantes, que apresentam características persistentes ou móveis e são usados em atividades agrícolas, como é o caso de pesticidas em áreas rurais ou o caso de cemitérios, ambos representando uma contaminação difusa. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada. O mesmo, porém, não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero [9].

Para contornar esse problema são adotadas, em várias partes do mundo, medidas preventivas, pois, uma vez contaminado, é extremamente difícil e onerosa a recuperação do aquífero [4,10].

O interesse de avaliar o grau de vulnerabilidade das diversas formações aquíferas decorre fundamentalmente da necessidade de fornecer às autoridades competentes um instrumento, que seja útil nas tomadas de decisões ao nível de planejamento e ordenamento do território [11]. Tal ferramenta tem a função de proteger os recursos hídricos ainda preservados ou passíveis de uso. Sua recuperação após a ocorrência de contaminação é um problema a parte. O monitoramento da vulnerabilidade é essencial para a adequada exploração de aquíferos, e normalmente, é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação de água subterrânea e proteção de sua qualidade [5,12].

Existem vários métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos e suas eficácias dependem diretamente da qualidade dos dados necessários para definição dos parâmetros envolvidos. Um dos métodos largamente utilizados é o DRASTIC [13], que fornece um índice relativo de potencial à contaminação de águas subterrâneas e o valor de cada parâmetro depende de sua importância relativa, em função de características intrínsecas da própria hidrogeologia da região em estudo. O nome DRASTIC vem do acrônimo, (D) de profundidade do lençol freático, (R) de recarga do aquífero, (A) de tipo de aquífero, (S) de tipo de solos, (T) de topografia, (I) de impacto da zona não saturada e (C) de condutividade hidráulica. Contudo, devido à presença de sete parâmetros no modelo, ele exige uma grande abundância de dados-base na região de estudo. Isso acaba inviabilizando o uso do método por falta de informação.

Outro método, que tem se mostrado uma alternativa à ausência de informações preliminares devido à simplificação dos parâmetros é denominado GOD, que significa

(G) *Groundwater hydraulic confinement*, (O) *Overlaying strata*, (D) *Depth to groundwater table*, ou seja, grau de confinamento hidráulico (condição do aquífero), ocorrência do substrato litológico (características litológicas) e distância do nível da água, ou teto do aquífero, à superfície. Porém, o método depende de boa distribuição espacial dos dados, além da necessidade de existência de perfis de poços descritos geologicamente [5,14].

De maneira geral, os métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos definem uma escala por grau de suscetibilidade. Essa escala, estabelecida previamente, se dá em razão da localização de dados dos perfis geológicos de poços interpolados matematicamente [9,11,13]. Outros métodos serão apresentados na seção 3.2.1.

O presente trabalho tem como objetivo principal de desenvolver um método para quantificar o grau da vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos. Para isso, foi utilizada a sísmica de refração para aquisição de dados geológicos. A grande vantagem da utilização da sísmica como ferramenta para análise da vulnerabilidade é a possibilidade de estimar sua variabilidade longitudinal sem a necessidade de uma interpolação matemática, diferente dos métodos tradicionais, o que confere a este estudo um caráter singular.

A técnica sísmica possibilita registrar um mapeamento apresentando, como contraste, a impedância acústica do meio de propagação, através de ondas artificiais produzidas localmente [15]. Sua principal contribuição é a aquisição de um perfil estratigráfico local, que mostra a profundidade dos diferentes estratos e a velocidade e propagação da onda no material, permitindo sugerir sua estrutura geológica. Além disso, apresenta como ponto forte a diminuição da subjetividade na obtenção dos parâmetros necessários para a determinação dos acamamentos, uma vez que usa a própria aquisição sísmica para obtê-los. Também permite que se tenha informação de qualquer ponto da região de estudo, bastando, para isso, a aquisição do mapeamento sísmico de refração do local. Dentro deste contexto, a utilização desta técnica pode fornecer resultados, que auxiliam na identificação da fragilidade do meio geológico.

A aplicação do método proposto ocorreu entre o rebordo da Serra Geral e a Depressão Central do Rio Grande do Sul, nos municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária, Alegrete e alguns municípios da Quarta Colônia. A área de estudo foi

escolhida devido ao fato da região ser intensamente explorada pela agricultura de diversos cultivos e pela pecuária. Outro ponto de notável importância, nessas regiões, são as zonas de recarga e de afloramento do Sistema Aquífero Guarani - SAG. Elas constituem as principais ligações à superfície com as estruturas com potencial armazenamento subterrâneo de água.

A região em questão também possibilitou realizar uma avaliação da sensibilidade do método aplicado, bem como o grau de corroboração dos mapeamentos sísmicos com os perfis estratigráficos dos poços existentes. Para tanto, alguns pontos de levantamento sísmico foram realizados em regiões mais elevadas, enquanto outros foram realizados em regiões mais baixas com uma previsível diferença nas estruturas geológicas.

Com intuito de comparar o método proposto, os resultados foram confrontados com os índices de vulnerabilidade conseguidos após aplicação do método GOD, nos mesmos locais de aquisição.

No que tange à organização, o presente trabalho está organizado em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentada a introdução do tema de estudo, bem como, sua importância e a motivação para a sua realização. No Capítulo 2 são abordados os principais objetivos desta pesquisa. A fundamentação teórica relevante para o bom entendimento do tema é considerada no Capítulo 3. O Capítulo 4 compreende o método experimental aplicado nesta pesquisa. Os resultados e discussão são alocados no Capítulo 5 e, por fim no Capítulo 6 é realizada a conclusão do estudo, ao mesmo tempo em que são propostas as perspectivas futuras.

CAPÍTULO 2 : OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um método para quantificar o grau de vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos, a partir da aquisição de dados geológicos gerados por sísmica de refração.

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar uma sistemática de aquisição de dados por sísmica de refração.
- Gerar um perfil sísmico, que permita visualizar camadas litológicas.
- Correlacionar as características geológicas observadas nos registros sísmica com a descrição geológica de poços.
- Atribuir parâmetros que possibilitem o desenvolvimento de um método que determine a vulnerabilidade utilizando a sísmica de refração.
- Desenvolver e aplicar o método de quantificação da vulnerabilidade desenvolvido.
- Determinar o grau de vulnerabilidade intrínseca local e a variabilidade longitudinal nos levantamentos sísmicos realizados.
- Determinar o índice de vulnerabilidade local utilizando o método de GOD.
- Comparar os resultados de vulnerabilidade obtidos com o método desenvolvido e o método GOD.

CAPÍTULO 3 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aquíferos

Derivado do latim, a palavra aquífero significa “carregar água”. Aquíferos são unidades geológicas de sedimentos ou de rochas porosas e permeáveis, as quais armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea, que pode ser explorada[16,17].

A água subterrânea provém da infiltração das precipitações e da alimentação direta de rios e lagos devido à força da gravidade. Após a infiltração, a água que não fica retida no solo atinge regiões de formações geológicas, que favorecem o seu armazenamento e também sua movimentação. A Figura 3.1 apresenta uma representação do ciclo da água, que é explicado brevemente a seguir [16,18].

O ciclo hidrológico na superfície terrestre é impulsionado pela energia radiante, pelo vento e, também pela força da gravidade terrestre. Tudo começa na evaporação, que é o conjunto de fenômenos físicos, provocados devido à radiação solar e, que condicionam a transformação da água na forma líquida ou sólida para vapor. Esse processo é também auxiliado pela transpiração das plantas e animais. A etapa seguinte é a precipitação, que se trata do processo inverso à evapotranspiração, ou seja, é o retorno da água retida na atmosfera, na forma de chuva, de neve e de granizo. Na sequência, ocorre a infiltração, ou seja, o processo pelo qual a água penetra nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através de vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte. Nesse caso, a infiltração cessa e começa a acumular-se formando em alguns casos reservatórios subterrâneos. A água armazenada, por sua vez, sofrerá escoamentos subterrâneos, que produzirá afloramentos de água, dando início ao ciclo [18].

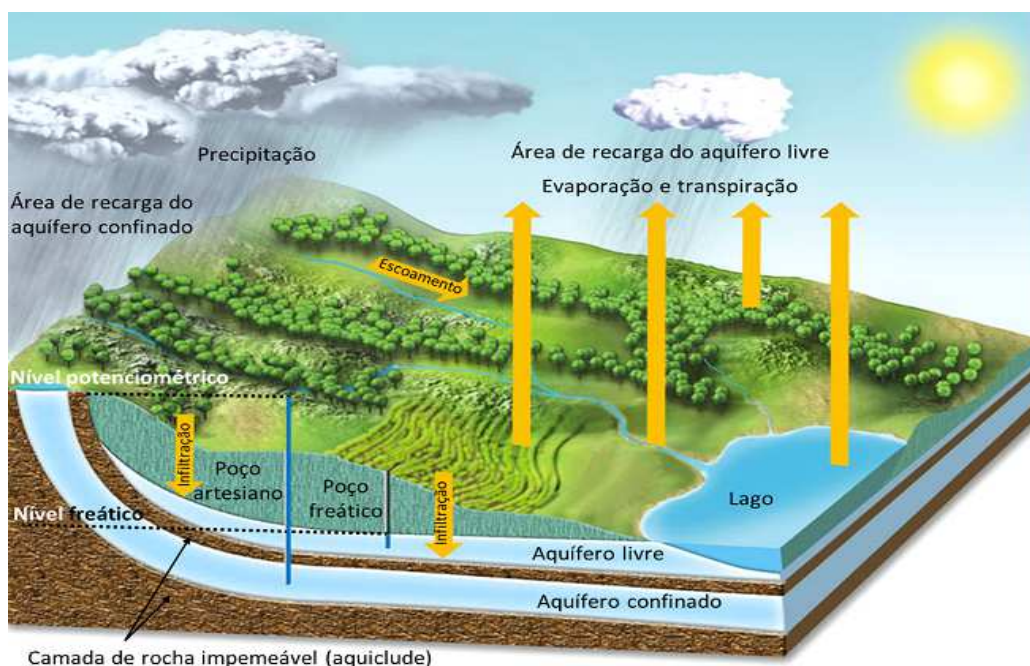


Figura 3.1: Representação do ciclo das águas e das formações de armazenamento subterrâneas. Adaptado de [19].

3.1.1. Características físicas de um aquífero

O volume de água existente em uma formação geológica com possibilidade de gerar um aquífero está relacionado diretamente com os espaços vazios existentes entre a matéria sólida que o constitui. Essas formações podem ser constituídas por rochas porosas, fissuradas ou cársticas. As formações porosas são constituídas por rochas sedimentares detríticas, que podem ou não estar consolidadas. Nelas, é possível encontrar grandes armazenamentos de água, conforme ilustra a Figura 3.2 I). A Figura 3.2 II), mostra que as formações fissuradas são constituídas por rochas cristalinas, as quais não possuem poros entre os grãos dos minerais, mas possuem fraturas onde a água pode ser armazenada. Na Figura 3.2 III), é ilustrado que as formações cársticas formam aquíferos onde a água acumula-se em cavernas originadas pela dissolução de calcário e de dolomitos. A infiltração das águas pluviais ao longo de fendas ou aberturas causa a dissolução desses minerais e provoca vazios no interior da rocha. Com o aumento da circulação subterrânea nessas regiões ocorre uma intensificação desse processo [20].

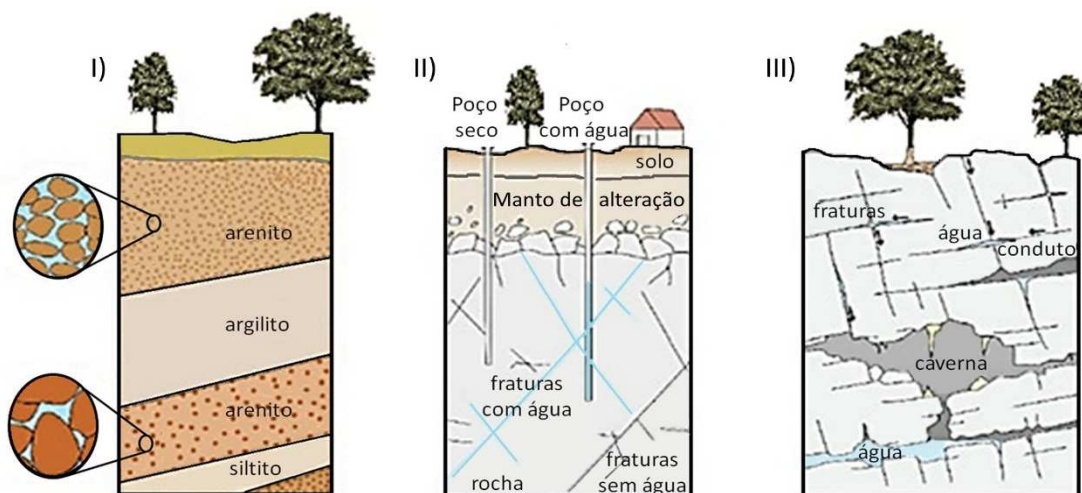


Figura 3.2 : Representação de aquíferos formados por diferentes tipos litológicos: I) aquífero granular, II) aquífero fissural e III) aquífero cárstico [21].

A porosidade é um parâmetro que quantifica o percentual do volume total da formação rochosa, o qual é ocupado por espaços intersticiais, normalmente, contendo fluidos. Esses espaços podem ser preenchidos por água ou partículas carregadas durante o processo de percolação. Em outras palavras, a porosidade traduz a capacidade da formação geológica em armazenar água. Ela depende do tamanho e da forma dos grãos, assim como do grau de compactação da formação geológica. Logo, quanto menos compacta for a rocha maior será o espaço intersticial entre os grãos [22].

Além da porosidade, existe outro parâmetro importante, que se relaciona com a movimentação da água no depósito: a permeabilidade. Esse parâmetro avalia a capacidade de movimentação da água em uma estrutura. A velocidade do deslocamento de água está relacionada com as dimensões dos poros e com a maneira como se estabelece a comunicação entre eles. Assim, percolação é conhecida como o processo de movimentação da água entre as camadas do solo através das conexões entre os poros. Nesse processo, a água é filtrada naturalmente e pode dissolver substâncias com as quais entra em contato [23].

Terrenos muito porosos podem ser muito permeáveis, caso seus poros sejam grandes e bem interconectados, como em areias limpas, ou podem ser quase impermeáveis, se apesar de ter muitos poros, eles forem pequenos e/ou encontrarem-

se semifechados, como nas rochas ígneas e metamórficas. As formações de baixa porosidade, de modo geral, tendem a ser pouco permeáveis, já que as conexões entre os poros são mais escassas [16].

Nesse contexto, considerando os parâmetros discutidos, é possível estabelecer que formações geológicas com alta porosidade e alta permeabilidade formam bons aquíferos. Além disso, o potencial de captação hídrica também depende desses dois parâmetros de estrutura geológica da rocha.

3.1.2. Regiões de um aquífero

Para facilitar a leitura faz-se necessário trazer algumas definições básicas importantes descritas a seguir.

Um aquífero pode ser livre ou confinado. O aquífero livre trata-se de uma formação geológica, que permite a circulação da água armazenada entre várias camadas, inclusive tendo contato com a superfície. Esse tipo de aquífero pode ser superficial ou subsuperficial, o que facilita a sua exploração e os torna mais vulneráveis a contaminação [24]. Em um aquífero livre, o nível superior que a água atinge é conhecido por nível freático ou hidrostático. Ele pode ser definido como a profundidade a partir da qual encontra-se água e corresponde ao nível atingido pela água nos poços. Seu nível varia entre regiões e ao longo do ano.

A região que se localiza abaixo da superfície topográfica e acima do nível freático chama-se zona de aeração, pois os espaços vazios entre as partículas estão preenchidos por água e gás. Nessa região, as plantas utilizam parte da água, que é absorvida por suas raízes e a devolvem, para a atmosfera, pela transpiração. A água, que infiltrou contribui para o aumento das reservas de água no subsolo [20].

A zona de saturação fica abaixo do nível hidrostático e apresenta na sua base uma camada impermeável. Assim, todos os espaços acima dela são preenchidos por água, daí a origem do seu nome. Essa camada é constituída por diferentes níveis ou camadas litológicas [20].

Os maiores volumes de água, que atingem as zonas de saturação provêm de regiões planas e bem arborizadas. Esses volumes de água, ao entrarem em circulação subterrânea, contribuem para um aumento da quantidade de água armazenada.

Locais com essas características são chamados áreas de recarga. Uma região permeável onde a água subterrânea armazenada encontra novamente a superfície é conhecida como zona de descarga ou afloramento [16].

O aquífero confinado, também chamado de cativo, é uma formação geológica onde a água acumulada está limitada no topo e na base por materiais geológicos impermeáveis. Um volume de água subterrâneo nessas condições apresenta-se em regime de confinamento. O termo aquiclude é usado para definir unidades geológicas, que, embora estejam saturadas, não são capazes de transmitir um volume de água significativo. Assim, entre dois aquicludes é possível encontrar aquíferos confinados. A recarga deste tipo de aquíferos é feita lateralmente, como mostrado na Figura 3.3.

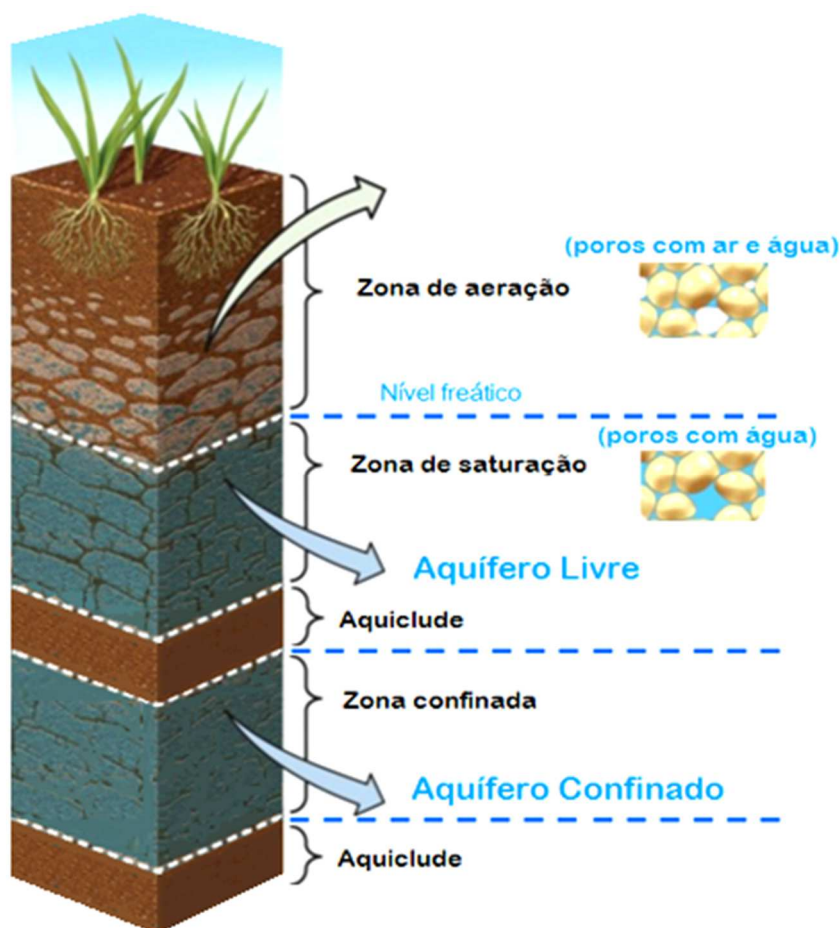


Figura 3.3: Representação da configuração de um aquífero apresentando a zona saturada e a zona confinada, bem como o nível freático e a rocha confinadora (aquiclude). Fonte: o autor.

A captação de água subterrânea de um aquífero cativo, levando-se em conta que a água está sob pressão superior à pressão atmosférica, subirá até o nível hidrostático. Uma captação nestas condições recebe o nome de captação artesiana. Quando a água extravasa naturalmente, sem necessidade de um sistema de bombeamento, até o nível topográfico é denominada captação artesiana jorrante. Na captação de água subterrânea de um aquífero livre, chamada de captação freática, o nível de água atinge o nível freático [24].

3.1.3. Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) situa-se dentro das bacias geológicas do Paraná e Chaco-Paranaense. O termo refere-se ao conjunto de rochas areníticas saturadas com água, que ocorrem subjacentes ao conjunto de rochas, que constitui a Formação Serra Geral. Sua espessura varia de 200 m a 800 m e distribui-se numa área de aproximadamente um milhão de km², abrangendo quatro países: Uruguai, Argentina, Paraguai e Brasil, conforme ilustra o mapa da Figura 3.4. No Brasil, cerca de setecentos mil km² ficam distribuídos nos seguintes estados: Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, São Paulo, Paraná, Goiás, Minas Gerais, Santa Catarina e Mato Grosso. O aquífero ocupa uma área de aproximadamente, 87.000 km² no Paraguai, 228.000 km² na Argentina e 36.000 km² no Uruguai [25].

Em quase toda a sua extensão, esse sistema aquífero encontra-se abaixo de rochas basálticas de origem vulcânica, as quais têm espessuras, que variam de alguns metros até mais de 1.000 m em sua espessura máxima.

O SAG tem grande importância para o abastecimento hídrico do setor agropastoril, industrial e urbano. O papel desse reservatório também é importantíssimo para manutenção dos ecossistemas [20].

As principais zonas de afloramento do aquífero são localizadas em áreas que têm espessuras inferiores a 400 m. Os rios Paraná, Paranapanema, Iraí, Piquiri, Iguaçu e Uruguai são exemplos de afloramento do aquífero. As principais fontes de águas termais naturais, com temperaturas de até 43 °C estão localizadas nessas regiões [20].

A Figura 3.4 apresenta a localização das formações geológicas presentes no SAG.

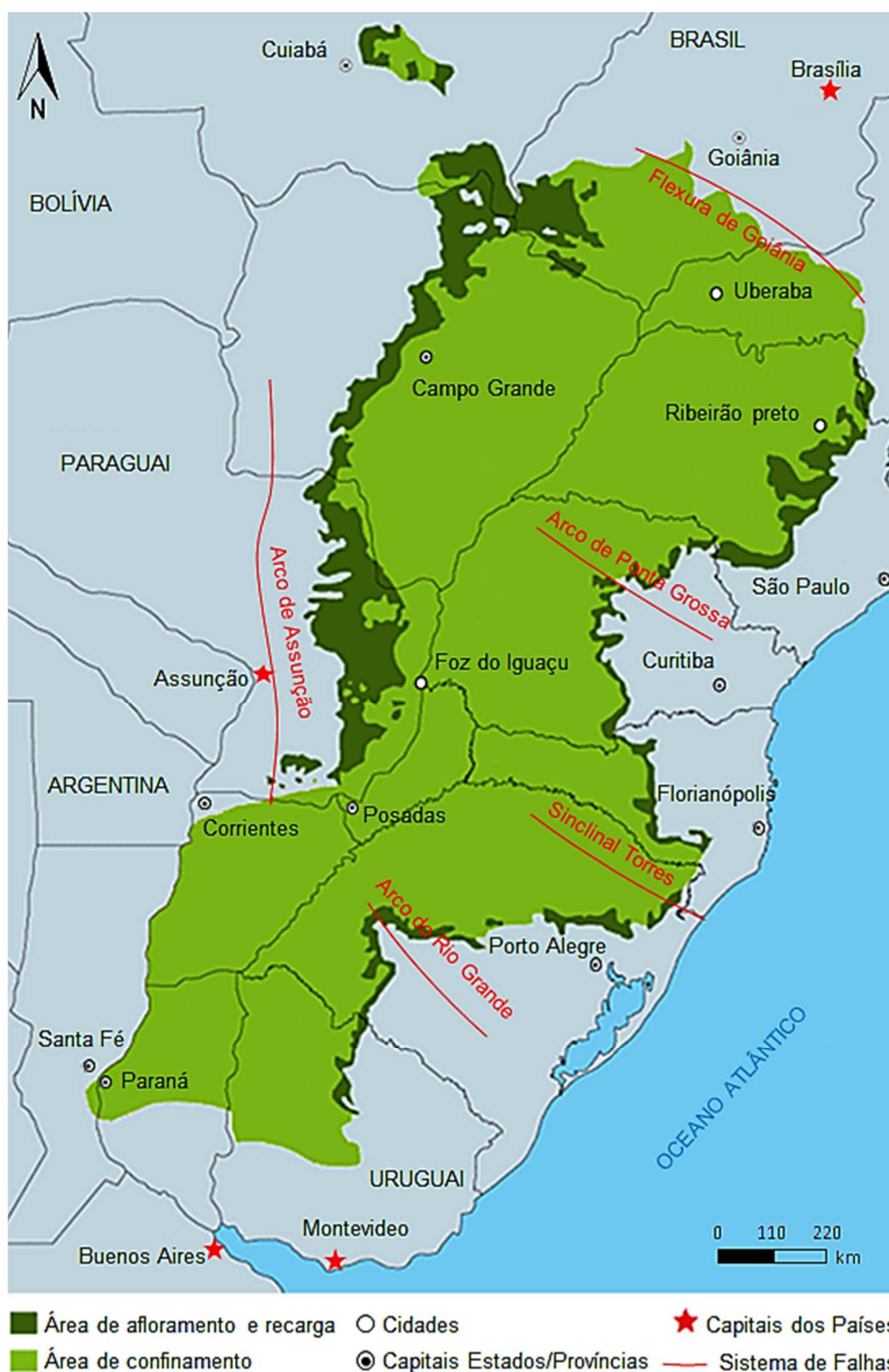


Figura 3.4: Ilustração do SAG indicando as zonas de afloramento e recarga e as zonas de confinamento, bem como a Ilustração das grandes formações regionais que provocam a compartimentação do SAG [20,24].

A configuração, na qual o aquífero é disposto em determinada região é crucial para se estimar sua capacidade de vazão. Ao contrário do que se poderia esperar, o aquífero não se distribui de forma homogênea em toda a sua extensão de ocorrência. Isso porque, existem diversas falhas geológicas nas rochas básicas e intermediárias, causando uma compartimentação dos reservatórios do aquífero. Por isso, é conveniente chamá-lo de Sistema Aquífero Guarani, ou SAG [20,26].

A compartimentação do SAG fica mais evidente principalmente nas áreas onde existem grandes estruturas regionais, em função da presença de características tectônicas e de várias intrusões de rochas básicas e intermediárias. São exemplos dessas estruturas: o Arco do Rio Grande, o Arco de Ponta Grossa, a Flexura de Goiânia, a Sinclinal Torres e o Arco de Assunção [27].

Essas estruturas presentes na área de ocorrência do aquífero relacionam-se diretamente com seus domínios hidrodinâmicos, cujos parâmetros são controlados principalmente por características faciológicas, espessura, profundidade dos pacotes sedimentares e, também da posição em relação às áreas de recarga e de confinamento [28]. Dessa maneira, o Arco de Ponta Grossa divide o aquífero em dois domínios potenciométricos e o Arco de Rio Grande, juntamente, com o Arco de Assunção são responsáveis pela redução da espessura dos arenitos no subsolo e por uma grande mudança regional na direção do fluxo subterrâneo do SAG [29].

Em virtude dos problemas de deficiência hídrica enfrentados nos períodos de grandes estiagens o conhecimento a respeito das condições de fragilidade do SAG é estrategicamente importante, uma vez que interferem na produção agrícola, industrial e no consumo humano.

Portanto, um mapeamento sísmico mais detalhado de algumas localidades de domínio agrícola pode auxiliar no estudo da vulnerabilidade de aquíferos mais rasos, os quais servem de depósitos temporários de água para o fornecimento local, além de contribuir com o abastecimento de alguns aquíferos mais profundos.

3.1.4. Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande Sul

O Rio Grande do Sul é um dos estados com a maior disponibilidade de águas superficiais do Brasil [25]. Seu território é drenado por três bacias hidrográficas: a do

Uruguai, a do Guaíba e a Litorânea. Juntas, elas formam uma densa malha hidrográfica. A bacia do Uruguai, a qual faz parte da bacia do Rio da Prata, cobre 57 % da área total do Estado; a bacia do Guaíba 30 % e a bacia Litorânea 13 % do total.

A bacia do Uruguai está vinculada principalmente às atividades agrícolas, pecuárias e agroindustriais. A bacia do Guaíba é a mais densamente povoada do Estado. Apresenta grande concentração industrial e urbana, além de inúmeras atividades, incluindo a agricultura e a pecuária. Na bacia Litorânea o uso do solo está, predominantemente, vinculado às atividades agropecuárias e industriais. A Figura 3.5 apresenta a divisão do Estado em suas três bacias [30].

Mesmo com esse panorama hídrico, as águas subterrâneas vêm adquirindo importante destaque devido a inúmeros fatores, tais como: a escassez das águas superficiais, poluição das nascentes e custo elevado para o tratamento do curso d'água. Como foi discutido na seção anterior, parte do subsolo gaúcho possui reservatórios subterrâneos de água. No entanto, o Sistema Aquífero Guarani no Rio grande do Sul deve ter sua potencialidade conhecida [31], o que exige um amplo estudo de áreas específicas para se estimar o volume e a qualidade da água disponível e onde captá-la nas épocas de seca sem provocar danos ambientais [20,32].

No Brasil, ainda não temos o devido conhecimento dos mecanismos que regem os aquíferos, suas variações espaciais e temporais de qualidade e quantidade, sua interação com rios e lagos superficiais ou com eventos climáticos [32]. Assim, é necessário um planejamento para monitorar os problemas existentes nos períodos de escassez de água visando a preservação da vida e da produção econômica local.

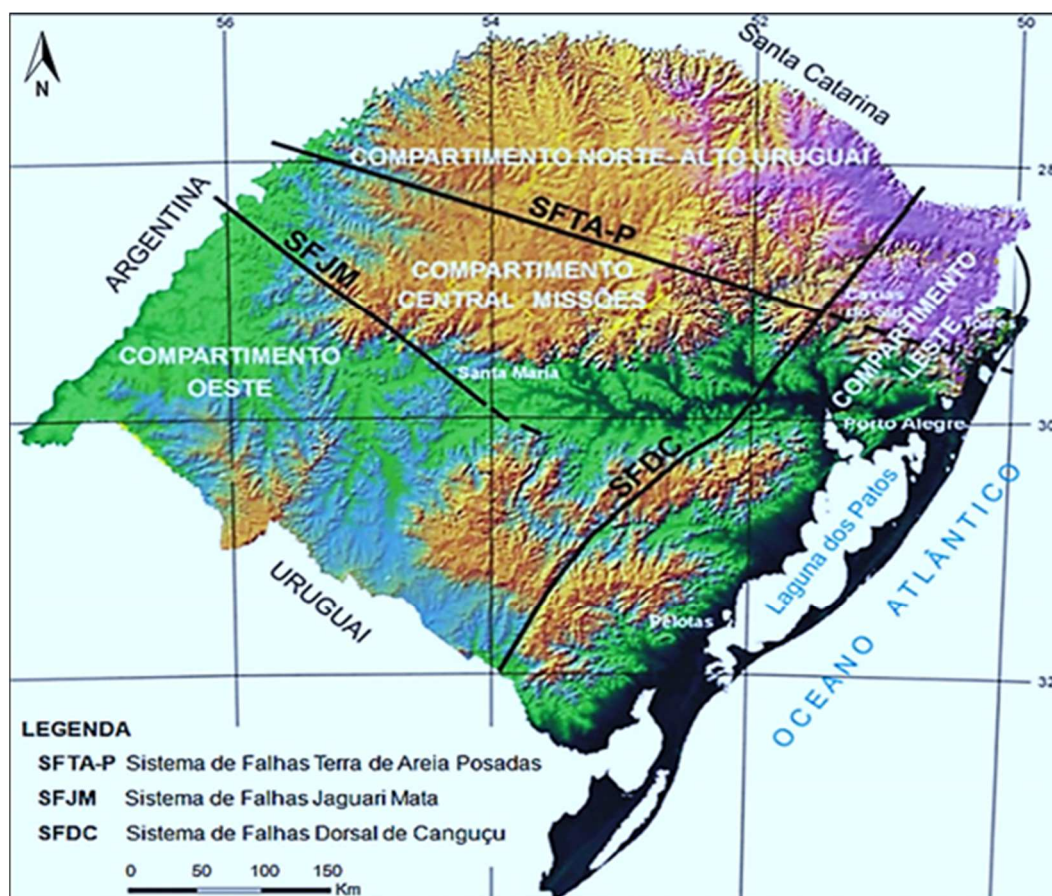


Figura 3.6: Mapa do sistema de três falhas do Rio Grande do Sul denominados: Dorsal de Canguçu (SFDC), Jaguarí-Mata (SFJM) e Terra de Areia-Posadas (SFTA-P), bem como os quatro principais compartimentos denominados: Oeste, Central-Missões, Norte-Alto Uruguaí e Leste [31].

Estudos já mostraram que cada compartimento estrutural apresenta características muito particulares, quanto às condições geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas tanto na parte confinada como na parte livre. O que levou a resultados de potencialidades muito diferentes entre os blocos [31,32].

Segundo o projeto da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, executado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2012, o SAG no Rio Grande do Sul [34] apresenta comportamento variado e bem diferente dos demais Estados. Do ponto de vista hidrológico, na região oeste do Estado entre as cidades de Alegrete, Santana do Livramento, Uruguaiana e Itaqui, o aquífero apresenta as melhores características hidráulicas, com captação de água em torno de 500 m³/h. Ao norte, na porção confinada pelos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, a parte que está sob influência do Domo de Lages (SC),

permite a exploração de poços com vazão de até 200 m³/h, porém, no restante da área é desfavorável, pois o nível freático é muito profundo. Ao Sul, os aquíferos têm na maior parte seu potencial limitado ou inexistente. A Figura 3.7 apresenta as regiões mencionadas e a produtividade de seus reservatórios [33].

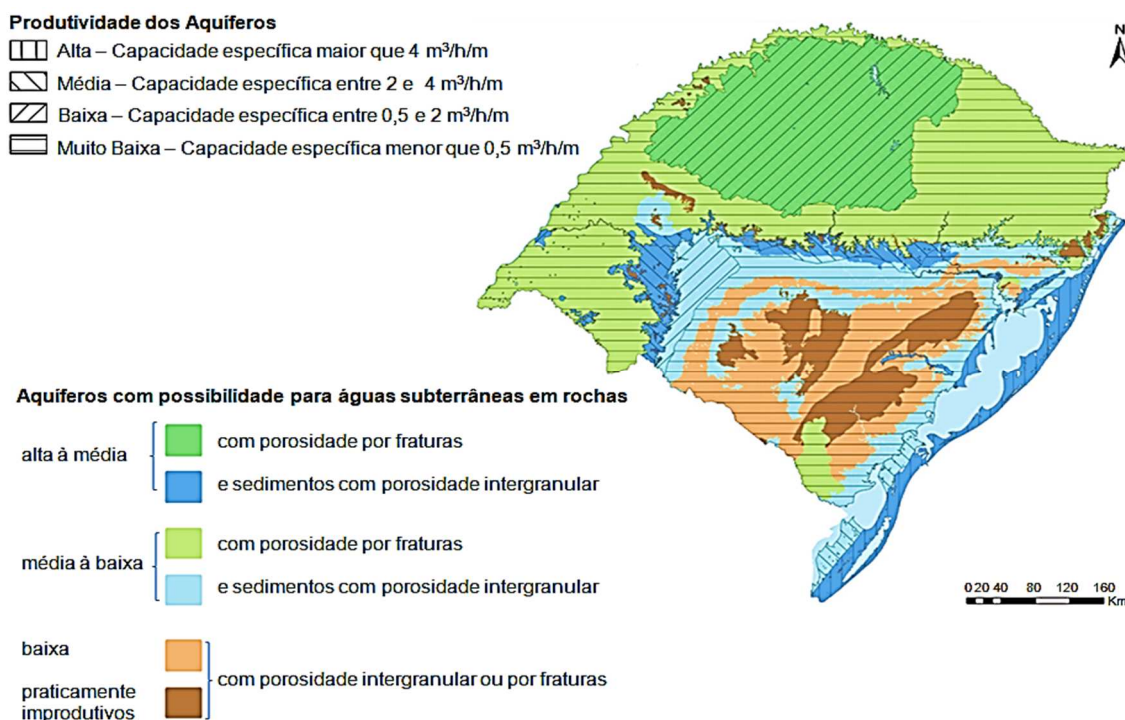


Figura 3.7: Mapa ilustrando a compartimentação e a produtividade do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul [33].

Diferentes características hídricas sugerem que a origem da água também seja distinta. Uma investigação sísmica interessada em avaliar o grau de vulnerabilidade local pode indicar áreas mais suscetíveis à contaminação antrópica.

3.2. Vulnerabilidade intrínseca de aquíferos subterrâneos

No contexto do presente estudo, a vulnerabilidade, como já foi mencionada, é entendida como a suscetibilidade dos aquíferos serem afetados por cargas contaminantes usados pelo homem, que acontece em função da facilidade dos contaminantes transporem a zona não-saturada do solo.

O crescimento populacional e o desenvolvimento industrial e agrícola vêm incrementando a ampliação do consumo de água potável de origem subterrânea para as mais diversas finalidades. Assim, a carência de planejamento urbano das cidades, associada ao crescimento populacional desordenado, pode causar modificações no equilíbrio de ecossistemas locais. Para Baptista et al. (2011), a urbanização provoca alterações significativas no meio ambiente, influenciando diretamente nos processos hidrológicos, por meio da ação direta dos cursos de água nas bacias hidrográficas [35].

Estudos apontam que a qualidade da água tem grande impacto na saúde pública, sendo essencial para o equilíbrio e o funcionamento dos ecossistemas. Carvalho (2016) considera fundamental que os componentes ambientais e suas concepções sistêmicas devam ser compreendidos de forma integrada. Dessa maneira, a água deve ser gerida considerando suas estreitas inter-relações com os outros componentes do meio (solos, vegetação, relevo) e com a ação do homem, que altera as condições de funcionamento dos sistemas naturais, produzindo mudanças que podem afetar diretamente a qualidade e quantidade de água disponível [36].

Os processos de urbanização e industrialização das cidades, quando mal elaborado, têm a capacidade de degradar a qualidade das águas. Vale salientar que, esses processos, tanto podem afetar as águas superficiais, que mantêm um contato imediato com os poluentes agrícolas e industriais, como também as águas subterrâneas, por possuírem uma ligação com zonas de recarga e afloramento. Mesmo assim, o solo e a camada insaturada do subsolo podem possuir características capazes de filtrar o contaminante, ou seja, impedir sua percolação, tornando o aquífero sotoposto, mais protegido naturalmente. Porém, diferentes ocupações e usos dos solos, associados à hidrogeologia local podem facilitar a contaminação das águas subterrâneas.

Segundo Foster et al., (2006), uma redução da qualidade das águas subterrâneas pode ser ocasionada pela junção de fatores como a deficiência dos sistemas de esgotamento sanitário e a exploração em demasia. Sendo assim, ele recomenda a necessidade de se estudar características fisiográficas, hidrogeológicas e antrópicas do local para determinar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, ou seja,

a sensibilidade de um aquífero aos diferentes efeitos de uma carga contaminante a ele imposta [12].

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos tem sido utilizada como instrumento técnico indispensável em muitos sistemas de avaliação de risco ao uso de águas subterrâneas para abastecimento público, sobretudo por agências ambientais [37].

Segundo Maia *et al.* (2011), porém, os métodos tradicionais para avaliar a vulnerabilidade foram desenvolvidos, de maneira geral, para um tipo particular de aquífero, quase sempre definindo os valores dos parâmetros por meio de tabelas e aplicando fatores de ponderação definidos com bastante subjetividade a cada uma delas, o que compromete seus resultados [8]. Paralta e colaboradores (2005) realizaram um estudo no qual comparavam a utilização de diferentes métodos de análise de vulnerabilidade em uma mesma região. Seus resultados indicaram tendências totalmente discrepantes, classificando uma dada região ora como pouco vulnerável, ora como extremamente vulnerável à poluição agrícola [11].

Todavia, as características geológicas relevantes para o estudo da vulnerabilidade intrínseca de um aquífero estão relacionadas a fatores, que interferem no comportamento hidrogeológico. Nesse contexto, estudos apontam, porém, que os fatores que influenciam o comportamento hidrogeológico dos aquíferos podem sofrer variações. Dessa forma, nos aquíferos fissurais, a vulnerabilidade depende da intensidade do fraturamento; nos Cársticos, do grau de carstificação e nos Granulares, de ambientes deposicionais. Tais fatores não são avaliados nas tabelas de parâmetros e provocam distorções nos índices dos principais métodos [8].

Dentro do contexto, conforme já mencionado em capítulos anteriores, este estudo apresenta uma maneira alternativa para quantificar o grau de vulnerabilidade local de aquíferos subterrâneos utilizando a sísmica como ferramenta analítica para obtenção de dados, relacionando-os com a vulnerabilidade.

O desenvolvimento de um método para análise de vulnerabilidade pode ocorrer de diferentes formas. Uma delas trata-se da definição dos valores de parâmetros por meio de tabelas dados e aplicação de fatores de ponderação, os quais convergem para resultados subjetivos. Outra maneira é utilizando os próprios parâmetros mensurados, indicando para cada um o índice de ponderação, que remete a

importância destes, sem que estes parâmetros percam a sua relação com os valores medidos [8]. Entretanto, a criação de uma equação que quantifique a vulnerabilidade através da utilização dos parâmetros medidos e atribuição de índices, necessita que se tenha certeza da independência desses parâmetros para que não haja sobreposição dos efeitos das propriedades.

3.2.1. Métodos de quantificação da Vulnerabilidade em Aquíferos

Muitos trabalhos propondo métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos foram escritos desde a década de 80. Nos métodos tradicionais, como os que serão descritos a seguir, são considerados parâmetros específicos para avaliar qualitativa e semi-quantitativamente a vulnerabilidade. A maior parte das variáveis é vinculada às características dos solos e à litologia dos aquíferos. Desse modo, é importante que os pesos e ponderações característicos de cada método sejam considerados de forma adequada.

O mais utilizado e completo destes métodos é o DRASTIC que foi desenvolvido por Aller et al. (1987) [13]. Considerando a complexidade e grande quantidade de parâmetros necessários no método DRASTIC, devido à dificuldade de obtenção e aplicação de todos esses parâmetros, alguns autores propuseram métodos mais simples ou algumas pequenas modificações como o GOD [9], o AVI [38], o SINTACS [39], o DAT [40], o SORETO [41] e o MAIA [8].

Devido a sua popularidade, na literatura existem várias adaptações ao método DRASTIC acrescentando parâmetros como mapa de uso e cobertura de solo [42-45] e propriedades estruturais [46], dos contaminantes [47] e de adsorção e conteúdo de argila [48]. O método GOD também foi ajustado adicionando um parâmetro exclusivo para solo, onde a característica observada é a textura do solo [12].

Alguns tipos de aquíferos necessitaram a determinação de novos métodos que se adequassem a algumas características especiais, como o MAIA para os aquíferos fissurais ou cársticos [8] e o EPIK para aquíferos cársticos [49].

3.2.1.1. Método DRASTIC

Segundo Aller et al. (1987) o objetivo da criação do DRASTIC foi desenvolver um método que permitisse avaliar o potencial de poluição de aquíferos usando como parâmetros, características físicas hidrogeológicas [13]. As características abordadas neste método são: profundidade do nível estático (D), rede de recarga (R), tipo de aquífero (A), tipo de solo (S), declividade do terreno (T), impacto da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica do aquífero (C). Cada parâmetro recebe um peso de 1 a 5 de acordo com a sua importância, sendo posteriormente subdividido em subparâmetros com valores indexados entre 1 e 10, com respeito a seu potencial de poluição.

Os autores consideram o solo como uma zona de alteração de até 1,8 m com atividade biológica significativa e determina que as características dos solos mais expressivas são a textura, a mineralogia e o conteúdo de matéria orgânica, sendo a textura a característica de maior aplicação. Essa espessura de solo é bastante inferior a existente em regiões de climas tropicais que podem chegar a mais de 100 m. A Equação 3.1 representa um somatório dos parâmetros mencionados com suas ponderações.

$$DRASTIC = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i \quad (3.1)$$

3.2.1.2. Método GOD

Com intuito de simplificar conceito e aplicação do método existente, uma vez que as informações necessárias encontram-se disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional, Foster (1987) e Foster & Hirata (1988) desenvolveram o método GOD levando em conta o confinamento hidráulico da água subterrânea ou tipo de aquífero (G), os estratos de cobertura (O) e profundidade nível estático (D) como principais parâmetros a serem analisados. Dentro de cada um desses parâmetros o índice pode variar entre 0,0 e 1,0 [9,50].

O parâmetro estratos de cobertura pondera a partir da permeabilidade, características litológicas e o grau de consolidação da zona vadosa ou camada

confinante. Este parâmetro pode ser subdividido entre uma porção de sedimentos não consolidados e outra de rochas consolidadas porosas ou duras. Para a classificação dos estratos de cobertura o fator principal considerado foi a possibilidade de fluxo preferencialmente a partir de fraturas, que por sua vez podem aumentar a vulnerabilidade e reduzir a atenuação da carga contaminante. A Equação 3.2 apresenta o produto dos três parâmetros que possibilitam determinar o índice de vulnerabilidade.

$$\text{Índice} = G.O.D \quad (3.2)$$

3.2.1.3. Método SEEPAGE

Segundo os autores Navulur & Enger (1996) e Gogu & Dessargues (2000), o método foi desenvolvido combinando três modelos e utiliza como parâmetros vários conceitos hidrogeológicos e propriedades físicas dos solos [51,52]. Os parâmetros utilizados são declividade do solo, profundidade do lençol freático, material da zona vadosa, material do aquífero, profundidade do solo e potencial de atenuação. Este último parâmetro considera vários fatores importantes dos solos como textura em superfície, textura em subsuperfície, pH, conteúdo de matéria orgânica, classe de drenagem e permeabilidade.

A cada parâmetro deve ser atribuído um valor relativo entre 1 e 50, sendo esses valores para o parâmetro de menor e de maior significância para a vulnerabilidade respectivamente. Após a obtenção destes valores relativos, esses seis parâmetros devem ser somados.

3.2.1.4. Método AVI

O Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) descrito por Van Stempvoort et al. (1993) é o único dos métodos, que considera apenas a espessura da camada sedimentar (d) ou superfície saturada do aquífero e a condutividade hidráulica estimada em cada uma dessas camadas (k) como os parâmetros físicos

fundamentais para a determinação da vulnerabilidade de um aquífero [38]. O autor sugere que a resistência hidráulica seja calculada para cada poço ou buraco de teste. Correspondente ao parâmetro solo está a espessura da camada sedimentar que funciona como um atenuante por dispersar a carga contaminante. A Equação 3.3 apresenta o somatório da relação entre as camadas sedimentares e sua respectiva condutividade hidráulica.

$$AVI = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{k_i} \quad (3.3)$$

3.2.1.5. Método EPIK

Este método foi criado por Doerfliger & Zwahlen (1997) para determinar, exclusivamente, a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos cársticos [49]. Como características que afetam o fluxo e as condições de transporte de água em um sistema cárstico são avaliadas a zona epicárstica (E), a cobertura de proteção (P), condições de infiltração (I) e desenvolvimento do carste (K).

Os pesos são dados de acordo com o grau de vulnerabilidade de cada parâmetro, e diferentemente dos outros modelos, quanto maior a vulnerabilidade menor o peso. Já os índices variam de acordo com a existência ou não de um sistema cárstico, o tipo de carste, qual o tipo de cobertura e sua espessura e o tipo de infiltração. A cobertura protetora pode ser entendida como o fator solo onde pedologia, litologia e espessura da camada são os aspectos mais importantes a serem considerados. A Equação 3.4 apresenta o somatório dos parâmetros envolvidos com seu respectivo peso.

$$V_i = \alpha \cdot E_i + \beta \cdot P_i + \gamma \cdot I_i + \delta \cdot K_i \quad (3.4)$$

onde: α , β , γ e δ são os pesos. Os autores sugerem o uso dos seguintes valores: 3, 1, 3 e 2 respectivamente.

3.2.1.6. Método SINTACS

O método descrito é o mais parecido ao DRASTIC, porém a partir de vários testes Civita (1994) e Civita & de Maia (2004) trocaram o parâmetro rede de recarga pela infiltração efetiva para melhor adequação do método à determinação da vulnerabilidade [39,53]. As características destacadas são a profundidade do nível freático, a infiltração efetiva, a capacidade de atenuação do solo/cobertura, a capacidade de atenuação da zona não saturada, as características hidrogeológicas do aquífero, a condutividade hidráulica e o papel hidrológico da topografia. Há uma maior flexibilidade na escolha dos pesos e índices dos parâmetros. A Equação 3.5 apresenta o somatório dos parâmetros envolvidos com seu respectivo peso.

$$SINTACS = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i \quad (3.5)$$

3.2.1.7. Método DAT

O método DAT foi desenvolvido por Ross et al. (2004) para avaliar a vulnerabilidade do aquífero a partir do transporte descendente das cargas contaminantes [40]. Apesar de ter uma forma simplificada, possibilita a confecção de modelos geológicos 3D a partir de informações geológicas e hidrogeológicas, fatores mutáveis como uso do solo ou efeitos climáticos, comportamento do contaminante relacionado ao da água, contaminantes lançados ao solo e o fluxo vertical do aquífero. Para isso, são usados como parâmetros a taxa de recarga (q), a espessura da camada de cobertura até o nível freático (m) e volume de conteúdo de água (θ) limitado pela porosidade (n). A Equação 3.6 apresenta o somatório dos parâmetros envolvidos na determinação da vulnerabilidade.

$$DAT = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n m_i \cdot \theta_i \quad (3.6)$$

3.2.1.8. Método SAI

No método proposto por Heredia & Cirelli (2007) o Índice de Atenuação do Solo – SAI propõe uma forma normalizada de classificação para os parâmetros escolhidos para determinar a vulnerabilidade [54]. As características (C) envolvidas nesse método são profundidade do nível freático, espessura da zona vadosa, conteúdo de carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, pH e conteúdo de argila. Os fatores recebem o peso (P) variando de 1 a 4 de acordo com seu impacto na atenuação dos contaminantes, sendo o valor 4 o mais importante. Ao invés da utilização de índices, este método utiliza uma escala de 10 a 100%. A Equação 3.7 apresenta o somatório dos parâmetros envolvidos na determinação da vulnerabilidade.

$$SAI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i.P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.7)$$

3.2.1.9. Método SORETO

Segundo Cunha (2009), após várias ponderações sobre os fatores hidrogeológicos e sua importância, definiu que os principais condicionantes para a vulnerabilidade como conceito são a capacidade de atenuação de cargas contaminantes pelo solo, a resistência vertical ao fluxo e o transporte de contaminantes [41]. Além disso, o autor também leva em consideração os solos tropicais e sugere pesos pré-definidos como resultados de estudos. Os parâmetros utilizados são solo (So), recarga (Re), topografia (To), zona vadosa (I), profundidade do nível estático (D), aquífero (A) e condutividade hidráulica (C). A Equação 3.8 apresenta o somatório dos parâmetros envolvidos na determinação da vulnerabilidade.

$$SORETO = S_o + R_e.3 + T_o.3 + I.3 + D.3 + A + C \quad (3.8)$$

3.2.1.10. Método MAIA

O método proposto por Maia & Cruz (2011) descarta o uso de ponderações para os parâmetros com a finalidade de tornar a avaliação do potencial de contaminação mais direta [8]. Os principais parâmetros utilizados foram separados em fatores direta ou inversamente proporcionais à vulnerabilidade.

Os fatores inversamente proporcionais são profundidade da água (PA), espessura do solo (ES) e declividade do terreno (DT), enquanto os diretamente proporcionais são densidade das fraturas (DF), transmissividade do aquífero (TA), capacidade específica (CE) e recarga potencial (RE). Este método avalia a espessura do solo ou regolito como um parâmetro importante para a atenuação da carga contaminante e proteção do aquífero. Existem duas propostas de equações neste método, sendo uma para aquíferos fissurais e cársticos onde a densidade de fraturas é bastante valorizada e outra para aquíferos granulares com a transmissividade do aquífero evidenciada e por ambos os resultados estarem na mesma escala, os índices obtidos podem ser comparados. Na falta de dados disponíveis, a densidade das fraturas e a transmissividade do aquífero podem ser excluídas da avaliação. As Equações 3.9 e 3.10 apresentam as duas propostas para determinação da vulnerabilidade de aquíferos.

$$V_{(Fissural)} = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + DF \quad (3.9)$$

$$V_{(Granular)} = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + TA \quad (3.10)$$

3.3. Algumas considerações sobre o Rio Grande do Sul

Tendo em vista a abrangência deste estudo, serão abordadas nesta sessão, considerações gerais e geológicas de algumas regiões de interesse do Rio Grande do Sul.

3.3.1. Considerações Gerais

Os municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária e a região da Quarta Colônia pertencem à Bacia do Guaíba que é a mais densamente povoada do Estado. Apresenta grande concentração industrial e urbana, além de inúmeras atividades, incluindo a agricultura e a pecuária. O mapa apresentado na Figura 3.8 ilustra as posições geográficas dos municípios citados.

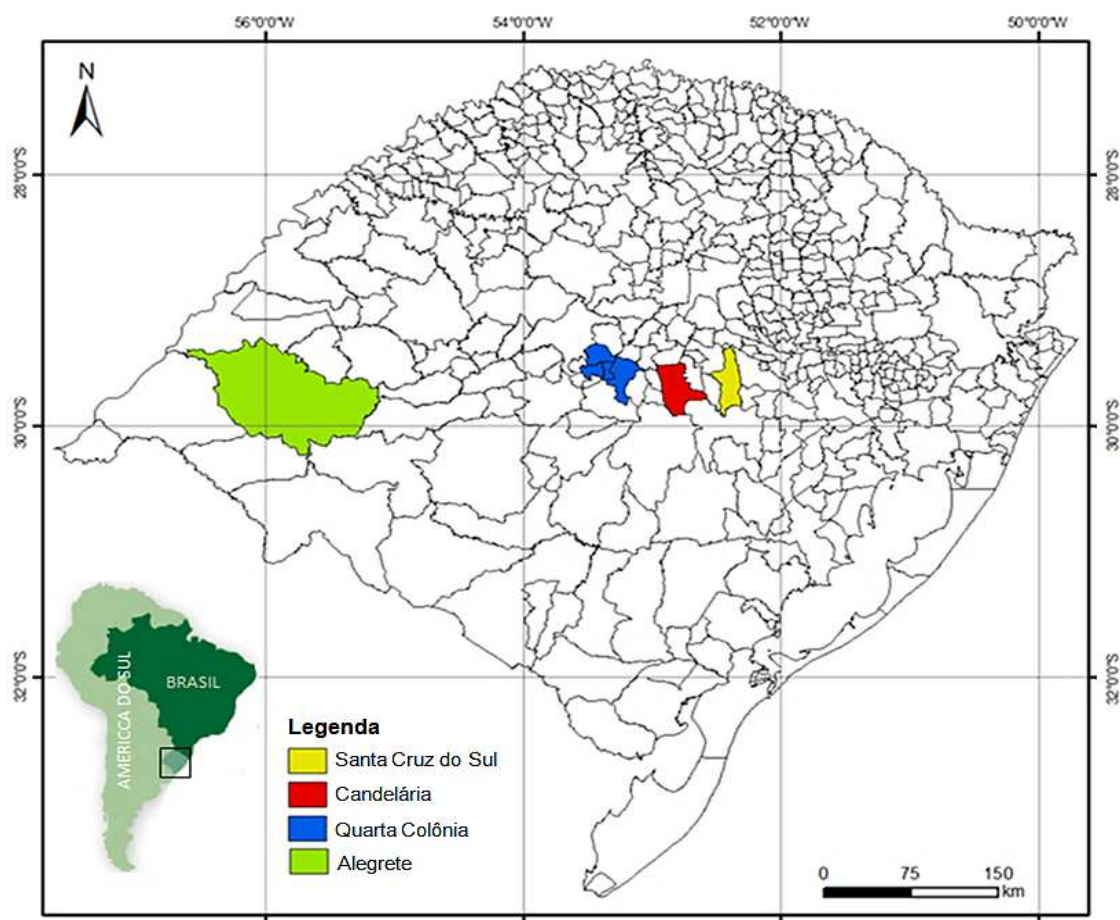


Figura 3.8: Mapa ilustrando os municípios de Santa Cruz do Sul, de Candelária, alguns da Quarta Colônia e de Alegrete [55].

O município de Santa Cruz do Sul, localiza-se no centro do estado a 155 km de Porto Alegre e a 142 km de Santa Maria [56], a uma latitude de 29°42'47" sul e a uma longitude de 52°25'54" oeste, e é mostrado geograficamente no mapa da Figura 3.9. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [57], possui uma

população estimada em 129 427 habitantes, sendo o 15º município mais populoso do Rio Grande do Sul. Com uma área de 733 km², localiza-se na região do Vale do Rio Pardo, fazendo fronteira com os municípios de Vera Cruz, Rio Pardo, Sinimbu, Venâncio Aires, e Passo do Sobrado [56]. Com clima temperado, constitui uma região fisiográfica de transição entre o Planalto e a Depressão Central, contando com vegetação oriunda da Mata Atlântica e do Pampa, e predominância litográfica de rochas vulcânicas. Conseqüentemente, uma declividade é observada no sentido norte-sul, indo de, aproximadamente, 600 m (na porção norte) até, aproximadamente, 80 m (na porção Sul) em relação ao nível do mar [58], além da presença de escarpas na zona de transição.

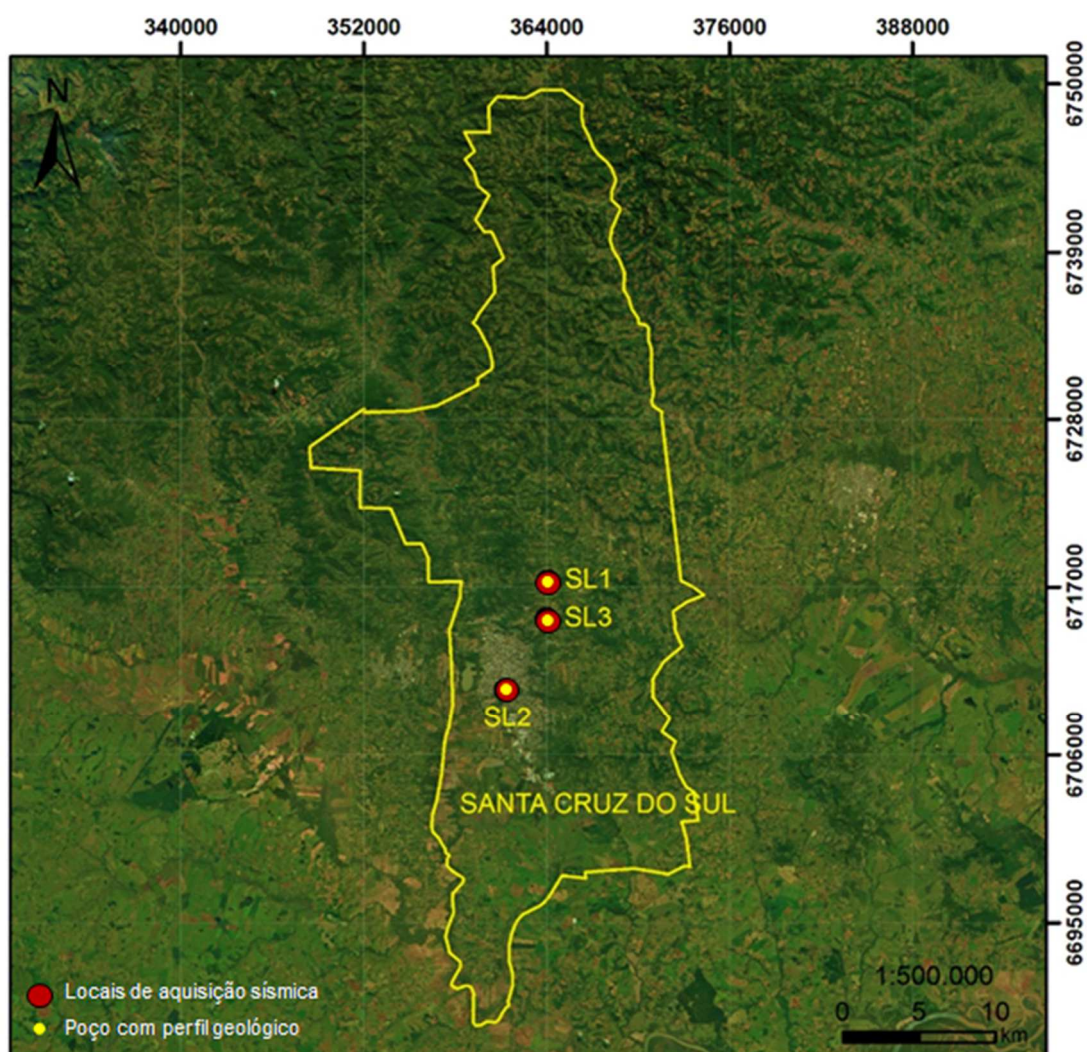


Figura 3.9: Imagem de satélite mostrando o município de Santa Cruz do Sul e as posições dos levantamentos sísmicos [55].

As principais indústrias de tabaco do Brasil (Souza Cruz® e Philip Morris®) estão presentes em Santa Cruz do Sul. Além do tabaco, destacam-se também as culturas de milho, arroz, mandioca, soja, feijão, oleicultura, fruticultura, floricultura, cana-de-açúcar, batata-doce, batata-inglesa e uva.

O município de Candelária localiza-se a uma latitude de 29°40'53" sul e a uma longitude de 52°47'59" oeste e é apresentado de forma geográfica no mapa da Figura 3.10.

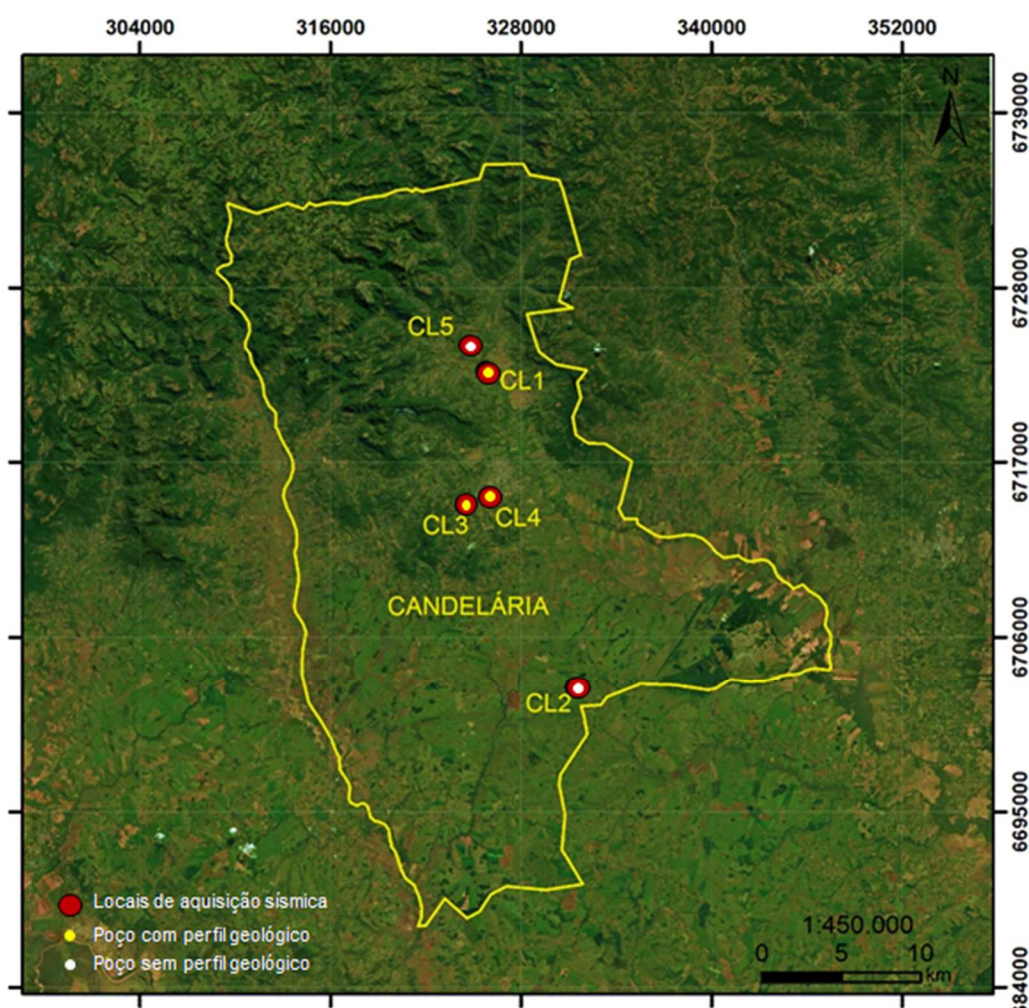


Figura 3.10: Imagem de satélite mostrando o município de Candelária e as posições dos levantamentos sísmicos [55].

A 36 km ao norte de Santa Cruz, se estende por 944 km². Vizinha dos municípios de Novo Cabrais, Vale do Sol e Vera Cruz, Candelária conta com aproximadamente 32.000 habitantes, de acordo com o IBGE [59]. Está localizado no

divisor de águas da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo e parte da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, através do Rio Botucaraí, do qual obtém água para consumo urbano e, também para atividades agrícolas. O relevo varia de montanhoso ao norte, contando também com chapadas, planícies retilíneas e coxilhas no Sul, sendo uma área de transição para o Escudo Rio-Grandense [60].

A região da Quarta Colônia situada no centro do estado do Rio Grande do Sul recebe este nome por ter sido o quarto núcleo de colonização italiana no Rio Grande do Sul. Região próxima à Santa Maria reúne nove municípios: Silveira Martins, Ivorá, Nova Palma, Faxinal do Soturno, São João do Polêsine, Dona Francisca, Pinhal Grande, Agudo e Restinga Seca [61]. A Figura 3.11 mostra a localização geográfica da Quarta Colônia e alguns de seus municípios.

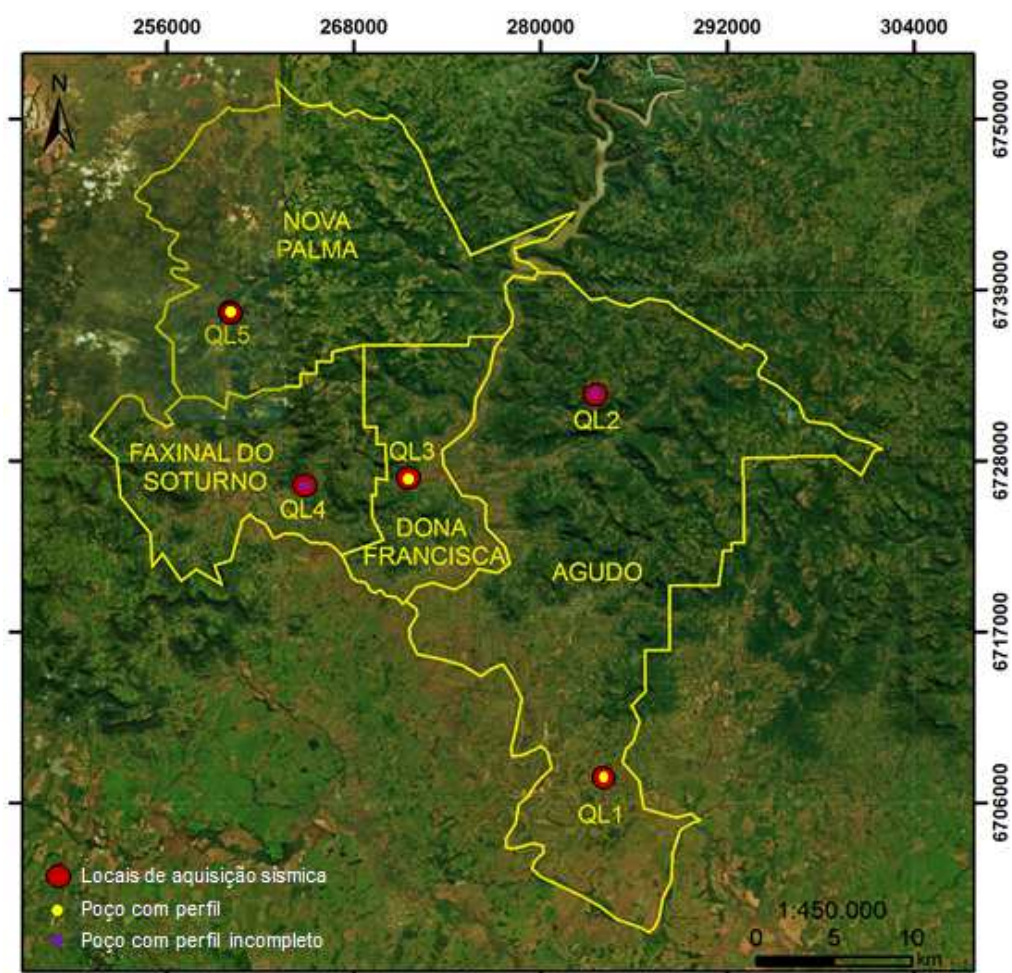


Figura 3.11: Imagem de satélite mostrando os municípios da Quarta Colônia e as posições dos levantamentos sísmicos [55].

Na região, a pequena propriedade rural é muito característica. A produção artesanal apresentada é muito diversificada, o que possibilita e motiva o desenvolvimento da agricultura familiar.

O município de Alegrete encontra-se a uma altitude de 102 m e, localiza-se a uma latitude de 29°47'01" sul e a uma longitude de 55°47'27" oeste, conforme ilustra o mapa da Figura 3.12, estando a 506 km de Porto Alegre. Possui uma população de aproximadamente 79 000 habitantes e é considerado o maior município da Região Sul do Brasil [62]. Com uma área territorial maior do que 7.800 km² está alocado sobre a bacia do Uruguai. Sua economia é baseada principalmente na agricultura de arroz, soja, milho, sorgo e trigo, além da pecuária bovina [63].

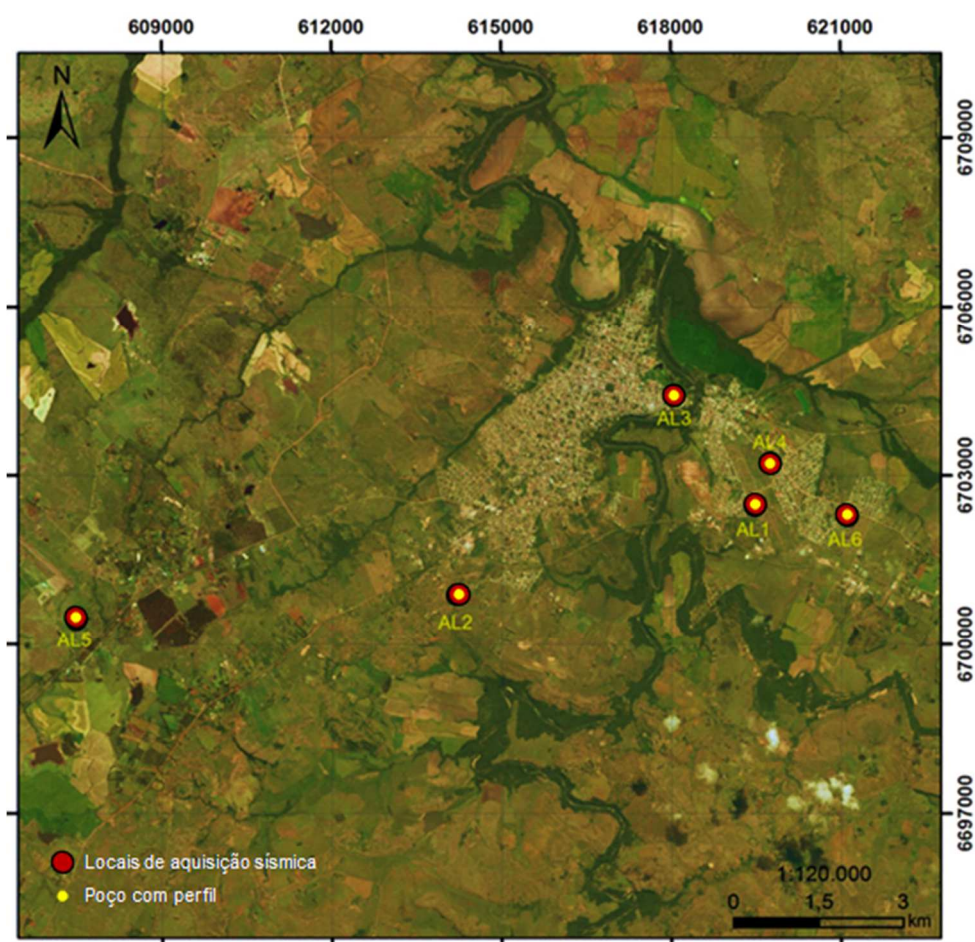


Figura 3.12: Imagem de satélite mostrando o município de Alegrete e as posições dos levantamentos sísmicos [55].

A paisagem caracteriza-se como estepe de campo nativo e florestas representadas pelas matas ciliares. É possível observar, extensas planícies de campo limpo com algumas ondulações e raros morros residuais de arenito silicificado. O município encontra-se totalmente sobre o SAG e seu lençol freático apresenta água potável sem restrições para o uso humano e para a irrigação.

3.3.2. Formações geológicas

A seguir serão descritas as formações geológicas encontradas na região de estudo com intuito de evidenciar características relevantes, que possam auxiliar no esclarecimento da suscetibilidade de alguns locais a contaminantes de origem antrópica.

3.3.2.1. Depósitos Aluvionares

Depósitos Aluvionares são depósitos de sedimentos como areia, lama ou cascalho (sedimentos clásticos) associados a ambientes fluviais. Os sedimentos são materiais erodidos, transportados e retrabalhados pela água e seu curso [64]. Quanto maior o sedimento, menor é o transporte sofrido por este, pois a corrente perde energia conforme segue seu curso. O sedimento mais fino, em contraste com o maior, é carregado por distâncias maiores.

3.3.2.2. Formação Serra Geral

Do período cretáceo, era Mesozóica, essa formação representa uma colossal atividade vulcânica, que precedeu a fragmentação do supercontinente Gondwana apresentando, predominantemente, rochas basálticas ácidas [65]. As rochas basálticas ácidas apresentam uma porosidade exclusiva de fraturas e, por consequência, atuam como confinantes à água subterrânea [32]. A grande quantidade de fraturas observadas nos afloramentos de tal formação resulta em um forte processo de alteração das rochas, gerando solos argilosos.

A formação Serra Geral pode ser dividida nas formações Fácies Gramado, Fácies Alegrete e Fácies Caxias. Foi dada atenção às Fácies Gramado e Fácies

Alegrete, por consequência da localização dos levantamentos sísmicos de investigação.

3.3.2.2.1. Fácies Gramado

Representando os primeiros derrames magmáticos sobre o deserto Botucatu, essas fácies ocorrem ao longo da zona de transição, nas escarpas, fazendo intercalações com a formação Botucatu na região de interface. Com espessura máxima de 300 m, essa primeira manifestação foi confinada pelo deserto Botucatu, que “moldou” o caminho percorrido formando paleovales e ambientes entre as dunas do deserto Botucatu. Ao fim do aporte da formação Botucatu, as posteriores manifestações magmáticas dominaram e encobriram o deserto, condicionando a topografia local [66].

As rochas dessas fácies são basálticas maciças, possuindo textura microfanerítica, coloração de cinza a negra, espessuras entre 15 a 35 m [49], idade de 132 milhões de anos e granulação de fina a média [67].

3.3.2.2.2. Fácies Alegrete

As rochas vulcânicas dessa formação afloram na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul. A espessura média da Fácies Alegrete é tipicamente inferior a 100 m, mas pode atingir até 300 m. Trata-se de um conjunto de derrames vulcânicos de composição andesítica a basáltica, como os derrames Catalán e Cordillera, que comportam espessas brechas de topo cimentadas por calcita, com quantidades menores de zeólitas [68].

3.3.2.3. Formação Botucatu

Precedente à formação anterior, a formação Botucatu corresponde ao imenso ambiente desértico do período cretáceo Inferior da era Mesozóica (203 a 135 milhões de anos atrás). Essa formação é constituída principalmente por rochas sedimentares areníticas, de granulometria fina a média. Há ocorrência, também, de arenitos

feldspáticos, bem como quartozos e conglomerados, mas apenas em regiões específicas. A estrutura sedimentar predominante de tal formação é a estratificação cruzada, de tipo tabular (de espessura variável, de pequeno a grande porte), porém há ocorrência também de laminações plano-paralelas [32].

Os sedimentos que formaram tais rochas foram trabalhados continuamente por ação eólica e, eventualmente, fluvial, em um clima variável de semiárido a árido – ambiente desértico [69], resultando na granulometria descrita no parágrafo anterior.

No contato com a formação Serra Geral ocorre intercalações de tais formações, resultando em *intertrapps* de arenito também conhecidos com lentes de arenito.

3.3.2.4. Formação Guará

A formação pertence ao Jurássico superior, segundo período da era Mesozóica, compreendido entre 199 e 155 milhões de anos atrás. A formação Guará apresenta diversos vestígios de fósseis como gastrópodes, répteis e peixes, os quais sugerem a idade. Sua camada estratigráfica está disposta sobre os depósitos fluviais da formação Sanga do Cabral (descrita a seguir, no item 3.3.2.7) e sob depósitos eólicos da Formação Botucatu (descrita anteriormente, no item 3.3.2.3). Sua espessura varia entre 70 a 100 m e sua composição é formada por arenito fino a grosseiro e argilito [70].

A localização dessa formação está disposta à margem sul da Bacia do Paraná, na divisa do Rio Grande do Sul com Uruguai e Argentina limitada ao norte por um sistema de falhas transcorrentes na direção noroeste. Em seu afloramento, ao longo da faixa de norte a sul, a formação Guará apresenta uma mudança de fácies. A formação também registra uma relação estreita entre os processos fluviais e eólicos. Enquanto a Porção Norte tem características de depósitos atribuídos a rios, na porção sul, o rio é gradualmente substituído por dunas eólicas [70].

3.3.2.5. Formação Caturrita

Consistindo de arenitos finos a médios intercalados com siltitos e folhelhos [71], tal formação foi originada no período Triássico sobre a Bacia do Paraná. Os arenitos

são predominantemente quartzosos de matriz argilosa [72]. Tal formação tem origem fluvial e apresenta comportamento predominante de aquífero [71]. No Grupo Rosário do Sul, a formação Caturrita situa-se no topo [73].

3.3.2.6. Formação Santa Maria

A formação Santa Maria, junto às formações Caturrita e Sanga do Cabral correspondem ao Grupo Rosário do Sul [71].

A formação Santa Maria, do período Triássico, corresponde, predominantemente, a arenitos, pelitos e siltitos argilosos [32]. Toda a formação é resultante de um sistema deposicional continental flúvio-lacustre [74]. Está subdividida em dois membros: Alemoa, no topo e, Passo das Tropas, na base. Os arenitos dessa formação apresentam laminação plano-paralela e estratificação cruzada acanalada (de pequeno a médio porte). Possuem granulometria grossa (em sua maioria), indicando fluxo de alta energia do sistema deposicional. Os pelitos, por sua vez, são muitas vezes maciços, ocasionalmente com ocorrência de uma fina laminação, e apresentam intercalações com siltitos e arenitos finos. Os siltitos argilosos, por fim, são também maciços ou pobremente laminados, com espessuras de camadas que ultrapassam 70 m localmente [32,74].

3.3.2.7. Formação Sanga do Cabral

A geologia da formação Sanga do Cabral pertence ao Triássico inferior e consiste, basicamente, de arenitos finos a muito finos de matriz argilosa e cor avermelhada. Em consequência de sua composição litológica, tal formação apresenta reduzida capacidade de armazenamento de águas subterrâneas. Poços tubulares que se utilizam de tal formação para captação de água tem vazão pequena e, em alguns casos, até nula – poço seco [71]. Ocupa a base no Grupo Rosário do Sul [72].

3.4. Sismologia

A sismologia é a ciência que estuda o comportamento das ondas sísmicas, buscando conhecer ou determinar em que circunstâncias ocorreram e quais as suas causas. As circunstâncias podem ser devidas à dinâmica das placas geológicas, uma vez que essas placas sofram compressão, distensão ou cisalhamento. Caso ocorra a ruptura da placa tectônica, por algum desses eventos, uma onda sísmica é gerada dando origem aos terremotos. A sismologia pode ser usada para prever terremotos e evitar essas catástrofes em tempo e espaço. Essas ondas podem atravessar grandes distâncias e seus sismos serem registrados a vários quilômetros de onde tiveram origem. Os sismos são um dos fenômenos naturais mais difíceis de prever e um dos que mais provocam destruição [2].

Um sismo ocorre quando o material das camadas geológicas inferiores se rompe, após ter sofrido forças que ultrapassaram os limites de sua resistência. Isso gera a ocorrência de falhas, as quais liberam a energia na forma de ondas elásticas.

Com o estudo das ondas sísmicas, a sismologia pode determinar o epicentro e o hipocentro de um sismo, ou seja, o local onde o sismo é sentido e o local no interior da Terra onde o sismo teve origem, respectivamente.

3.4.1. Ondas sísmicas

As ondas mecânicas são vibrações, que se propagam em meios materiais transportando energia ao longo desse meio. Quando ondas mecânicas se propagam pela superfície ou no interior da Terra recebem a denominação de ondas sísmicas, e podem ser classificadas como ondas profundas e ondas de superfície [75-77]. Uma explicação mais detalhada sobre cada tipo de onda é apresentada no Anexo I deste trabalho.

3.4.2. Propagação das ondas sísmicas

A energia da onda sísmica propaga-se no meio e ao encontrar camadas com diferentes propriedades elásticas, pode sofrer refração ou reflexão. Interface é o nome

dado à região que separa as com diferentes propriedades elásticas. Além disso, pode ocorrer também a absorção de energia sísmica pelo meio [78].

Uma onda sísmica é transmitida em um meio homogêneo através de uma frente de onda com formato esférico. Na frente de onda, todos os pontos estão em concordância de fase. Uma frente de onda é o lugar geométrico das partículas que possuem o mesmo tempo de percurso da onda desde sua geração [77].

A Figura 3.13 apresenta uma frente de onda, constituída por semicírculos indicando regiões de mesma fase. Alternativamente, pode-se utilizar raios sísmicos orientados, ou seja, setas normais às frentes de onda.

O raio sísmico é uma abstração física da onda, representado por uma linha perpendicular à frente de onda e orientado na direção de sua propagação. Raios sísmicos orientados são muito utilizados para mostrar graficamente o percurso das ondas [78]. Na figura, λ representa o comprimento de onda, V a velocidade de propagação da onda no meio e f a frequência da onda sísmica.

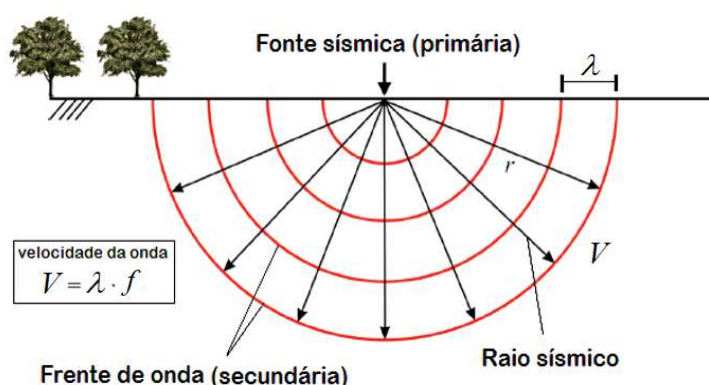


Figura 3.13: Representação de uma frente de onda e sua possível representação em raio de onda.

Adaptado de [75].

A propagação das ondas sísmicas pode ser entendida com auxílio da Lei de Snell e com os princípios de Fermat e de Huygens [79,80].

O princípio de Fermat estabelece que uma onda sempre seguirá a trajetória que apresente o menor tempo de percurso entre dois pontos.

O princípio de Huygens estabelece que qualquer ponto de uma frente de onda se comporta como uma nova fonte de onda elementar, que se propaga para além da

região já atingida pela onda original e com a mesma frequência que ela. Então, cada ponto sobre uma superfície refletora pode ser considerado como uma fonte secundária de energia gerando sua própria frente de onda. Isso também explica como a onda consegue contornar um obstáculo. Dessa maneira, em modelagem sísmica as ondas que refratam no ângulo crítico são também conhecidas como ondas frontais. Na investigação sísmica, no entanto, costuma-se usar simplesmente o termo onda refratada para se referir às ondas refratadas criticamente.

A lei de Snell, definida para a óptica geométrica, também pode ser aplicada às ondas mecânicas, para se estimar a direção do raio refratado, quando ele passa de um meio para outro [79]. Os processos de reflexão e refração são descritos em termos de três leis simples, as quais relacionam o ângulo da incidência $i_{\text{incidência}}$, o ângulo de reflexão $i_{\text{refletido}}$ e o ângulo de refração $i_{\text{refratado}}$. Todos os ângulos são medidos em relação à reta normal à superfície onde ocorre a reflexão e a refração. São elas:

- a) Todos os raios, sejam eles, incidente, refletido ou refratado estão contidos no mesmo plano, o qual é perpendicular ao plano de interface entre dois meios.
- b) O ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão.
- c) A relação entre ângulo de incidência e ângulo da refração depende da relação entre índices da refração de dois meios e é expressa pela lei de Snell, mostrada na Equação 3.11.

$$\frac{\sin(i_{\text{incidência}})}{V_1} = \frac{\sin(i_{\text{refratado}})}{V_2} = \frac{\sin(i_{\text{refletido}})}{V_2} \quad (3.11)$$

onde $\sin(i_{\text{incidência}})$ é o seno referente ao ângulo de incidência, $\sin(i_{\text{refratado}})$ é o seno referente ao ângulo de refração, $\sin(i_{\text{refletido}})$ é o seno referente ao ângulo de reflexão e V_1 e V_2 , são respectivamente as velocidades de propagação da primeira camada e da segunda camada.

A Figura 3.14 ilustra um raio sísmico incidindo com um ângulo crítico i_c (explicado a seguir) e, a direção dos percursos dos raios sísmicos da onda direta, da

onda refletida e da onda refratada para um modelo geológico de duas camadas com velocidades de propagação diferentes, V_1 e V_2 , sendo $V_2 > V_1$.

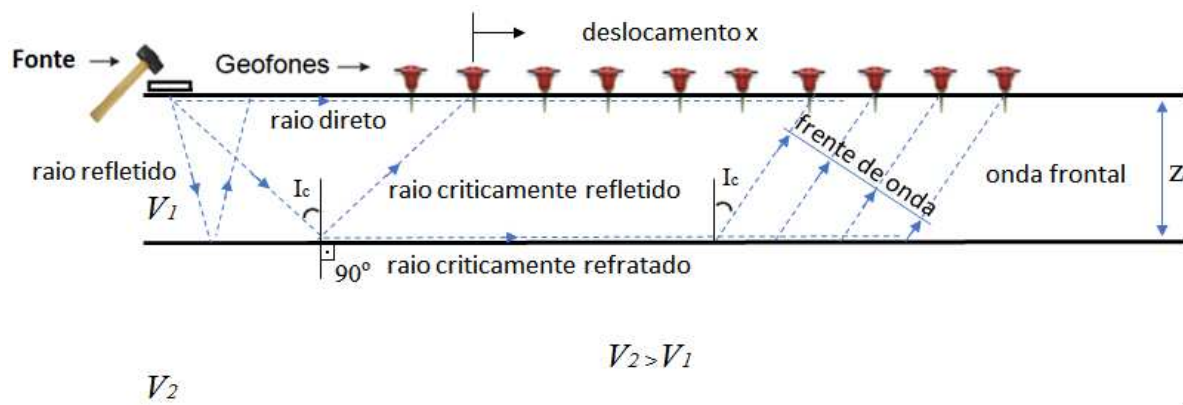


Figura 3.14: Representação das trajetórias dos raios de onda direto, refletido e refratados para um modelo geológico de duas camadas, modificado de [78].

Considerando o modelo de duas camadas da Figura 3.14, de acordo com o princípio de Fermat, o ângulo de reflexão sísmica será igual ao ângulo incidência. Já o ângulo de refração, conforme Lei de Snell, depende da relação entre os índices de refração das duas camadas. Assim, quando a velocidade de propagação da camada inferior for maior do que a da superior, o raio refratado distancia-se da normal e, quando a velocidade de propagação da camada inferior for menor do que a da superior, o raio refratado aproxima-se da normal. Além disso, existirá um ângulo limite de incidência, que fará com que o ângulo do raio refratado $i_{refratado}$ seja de 90° , e ele propagar-se-á paralelamente à interface, com a velocidade da camada inferior V_2 . Este ângulo é uma situação limite onde o ângulo de incidência assume o seu maior valor para que ocorra a reflexão e a refração. Ele é também conhecido como ângulo crítico (i_c), pois, para valores maiores, teremos o fenômeno de reflexão interna total.

Aplicando a Lei de Snell, para esse ângulo crítico teremos:

$$\frac{\sin(i_c)}{V_1} = \frac{\sin(90^\circ)}{V_2} \therefore \sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.12)$$

que é a expressão que possibilita determinar o i_c , caso sejam conhecidas V_1 e V_2 .

3.4.3. Receptores de onda sísmica

Os geofones que recebem a energia sísmica são sensores transdutores (mecânico-elétrico) de velocidade e convertem movimentos bruscos do terreno em respostas voltaicas. São constituídos de um ímã permanente de forma cilíndrica, com uma cavidade circular onde fica alojada uma bobina de enrolamento finíssimo suspensa por molas. Essas são fixadas na periferia da peça metálica que constitui o ímã. A disposição das molas permite que a bobina se mova no interior da cavidade onde está alojada longitudinalmente. As ondas compressoriais, observadas neste estudo, possuem uma componente vertical, por isso são melhores detectadas por geofones de bobina vertical.

3.4.4. Velocidades típicas das ondas sísmicas primárias

A velocidade de propagação da onda sísmica primária depende da porosidade, já que, o conteúdo de fluido nos poros da rocha provoca mudanças relacionadas à densidade do meio e, conseqüentemente, à impedância acústica.

A Tabela 3.1 mostra valores típicos de velocidade de propagação para ondas compressoriais e as densidades respectivas para diferentes tipos de rochas e fluidos.

Além disso, a litologia, a permeabilidade, a pressão de confinamento, a geometria e a microestrutura dos grãos são fatores que também modificam a velocidade de propagação [78]. Nas rochas ígneas ou metamórficas, que, em geral, apresentam pouca porosidade, a velocidade de propagação das ondas sísmicas vai depender, fundamentalmente, das constantes elásticas e densidades de seus constituintes mineralógicos. Assim, a faixa de variação da velocidade nestas famílias de rochas é bem menor que nas rochas sedimentares, onde a porosidade e a variedade de materiais, que podem preencher os poros, desempenham um papel fundamental.

Tabela 3.1: Tabela de valores de velocidades para onda primária e densidade [75,78].

Material	V_p (m/s)	Densidade (kg/m^3)
Ar	330	1200-1300
Gelo	3400	900
Solo	100-500	2200-3000
Areia (seca)	200-1000	1500-1700
Areia (terra amarela)	200-2000	1900
Estuário de lama	300-1800	1200
Areia e cascalho (perto das superfícies)	400-2300	1800
Argila	1000-2500	2000-2400
Petróleo	1300-1400	600-900
Água	1450-1530	1000
Areia (saturada de água)	1500-2000	1900-2100
Folhelho	1700	---
Argilito	1800-2000	---
Gesso	2000-3500	1800-2300
Arenito	1400-4500	2100-2400
Xisto	2000-4100	2400-2800
Carvão	2200-2700	1300-1800
Dolomita	2500-6500	2500-2900
Areia e cascalho (a 2 km de profundidade)	3000-3500	---
Anidrita	3500-5500	2900-3000
Calcário	3500-6000	2400-2700
Gnaisse	3500-7600	2610-2990
Mármore	3780-7000	2600-2750
Basalto alterado	3500-3750	---
Sal	4000-5500	2100-2300
Granito	4600-6200	2500-2700
Basalto	5500-6500	2700-3100
Serpentinita	5500-6500	---
Gabro	6400-7000	2850-3120
Peridotita	7800-8400	3100-3400

CAPÍTULO 4 : MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Região de estudo

A região de interesse do trabalho encontra-se entre o rebordo da Serra Geral, a Depressão Central e a parte oeste do Estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente, nos municípios de Santa Cruz do Sul, Candelária, alguns municípios da Quarta Colônia e Alegrete.

Essas regiões são intensamente exploradas pela agricultura de diversos cultivos e pela pecuária, além de indicar uma grande concentração industrial e urbana em crescimento desordenado. Nessas regiões, também são encontradas alguma das principais zonas de recarga e de afloramento do SAG. Tais estruturas constituem as principais ligações da superfície com as estruturas com potencial para o armazenamento de água subterrâneo. Essa característica torna evidente a importância do controle e monitoração da região com métodos, que estimem zonas de maior vulnerabilidade para sua eventual preservação.

Para tanto, as formações geológicas aflorantes, isto é, aparentes na superfície, servem de complemento para as análises realizadas nos locais de estudo. Dessa forma, a Figura 4.1 apresenta um mapa das formações geológicas presentes no município de Santa Cruz do Sul, que são a formação Serra Geral (Fácies Caxias) ao norte, a formação Serra Geral (Fácies Gramado), que se estende de norte até a região central e aparece contornada pela formação Botucatu, a formação Santa Maria no centro-sul e os Depósitos Aluvionares ao sul. No mapa, também é possível observar as identificações dos pontos, que representam os registros sísmicos, nomeados como: SL1 (localizado sobre a formação Serra Geral, Fácies Caxias), SL2 (localizado

sobre a formação Serra Geral, Fácies Caxias e Gramado) e SL3 (localizado sobre a formação Serra Geral, Fácies Caxias).

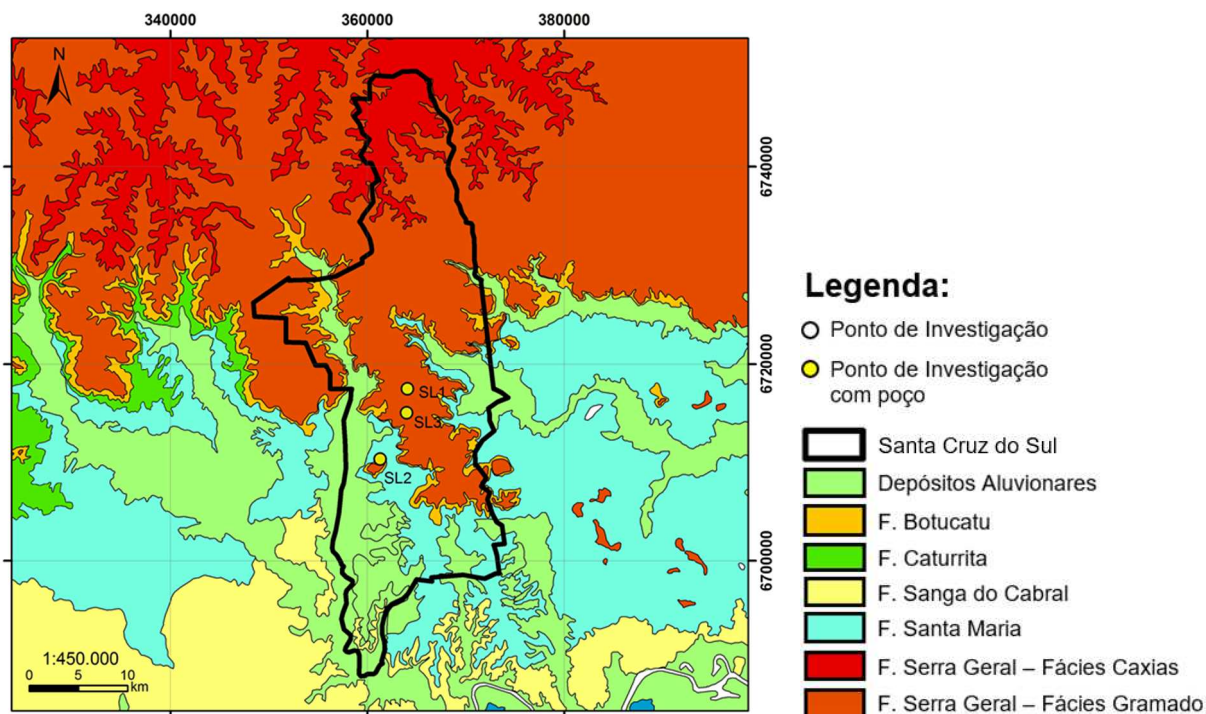


Figura 4.1: Mapa ilustrando as formações geológicas do município de Santa Cruz do Sul [55].

Na região de Candelária, a oeste da cidade, as formações flúvio-lacustres aflorantes aparecem ora sotoposta aos arenitos da Formação Botucatu, ora aos basaltos da Formação Serra Geral que aparece na porção norte do município [59].

A Formação Botucatu apresenta-se mais delgada para o sul ou está completamente ausente, fazendo com que a Formação Serra Geral encontre a Formação Santa Maria. A Figura 4.2 apresenta um mapa das formações mencionadas e os locais dos levantamentos sísmicos de subsuperfície identificados como CL1 (localizado sobre Depósitos Aluvionares), CL2 (localizado sobre a formação Santa Maria), CL3 e CL4 (localizados sobre formação Caturrita) e CL5 (localizado sobre Depósitos Aluvionares).

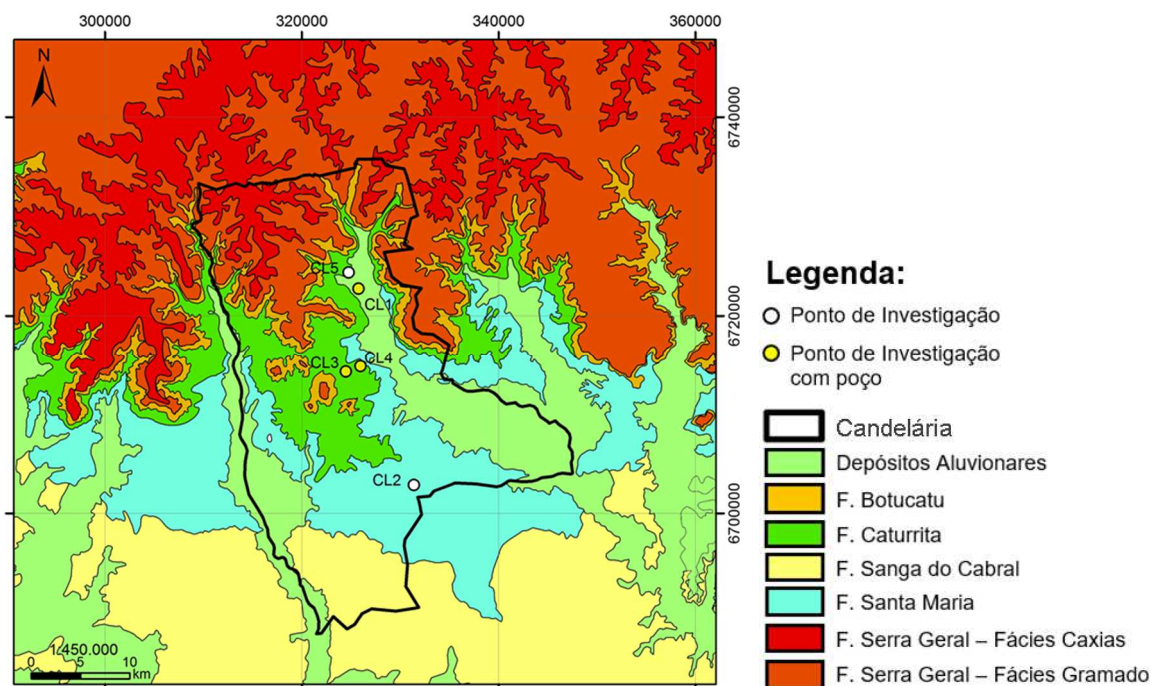


Figura 4.2: Mapa ilustrando as formações geológicas do município de Candelária [55].

Na região da Quarta Colônia foram analisados pontos nos municípios de Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno e Nova Palma. As formações aflorantes são: (i) a formação Serra Geral (Fácies Gramado) ao norte, em todos os municípios, sendo que Nova Palma está recoberta em quase sua totalidade, restando apenas pequenas faixas da formação Botucatu e, (ii) formação Caturrita ao sul. Nos municípios de Agudo, Dona Francisca e Faxinal do Soturno as formações Botucatu, Caturrita e os Depósitos Aluvionares têm maior abrangência ao sul.

Essa região apresenta um grande desenvolvimento na agricultura familiar. Dentro desse contexto, a preservação ambiental é importantíssima, uma vez que o ambiente deve estar em boas condições para garantir as futuras gerações seu igual aproveitamento. Sendo assim, o estudo aplicado na região, possibilita que órgãos responsáveis disponham de um novo método de quantificação para o grau de vulnerabilidade local e, assim, consigam implementar medidas de conservação dos reservatórios de água subterrânea.

O mapa da Figura 4.3 ilustra as formações geológicas e apresenta os pontos de levantamento sísmicos de subsuperfície identificados como QL1 (localizado sobre formação Sanga do Cabral), QL2 (localizado sobre formação Serra Geral, Fácies

Gramado), QL3 e QL4 (localizado sobre formação Caturrita) e QL5 (localizado sobre formação Botucatu).

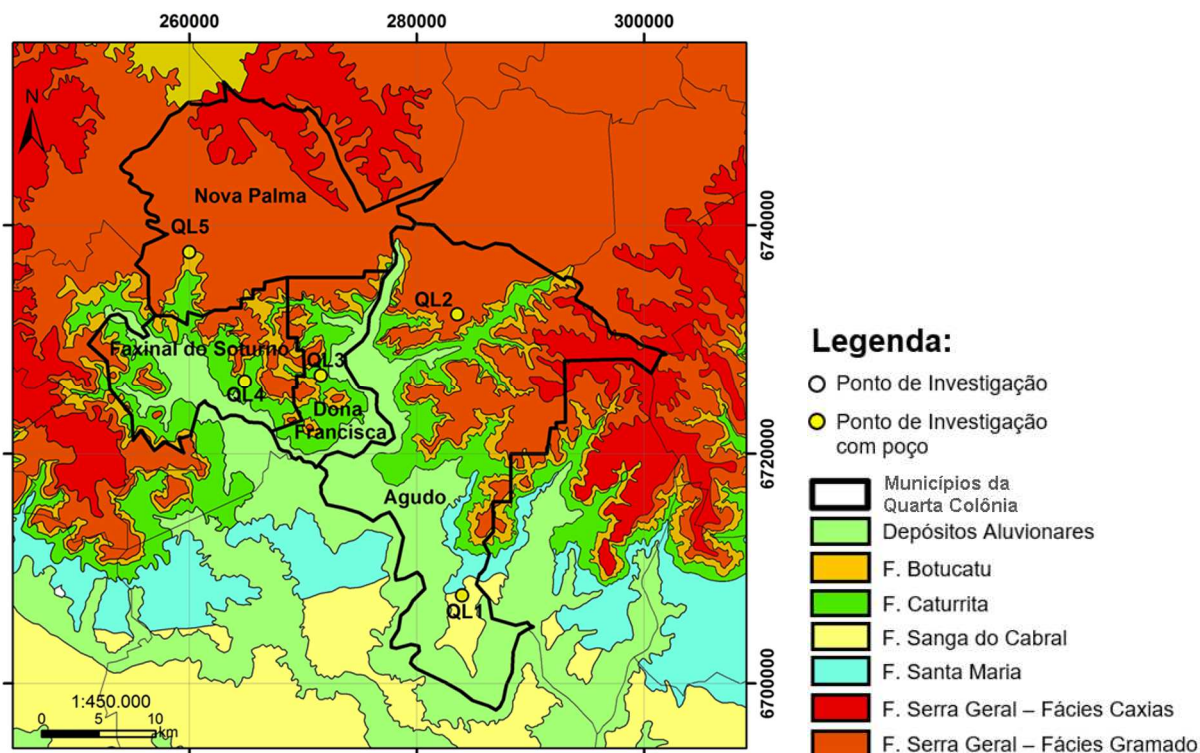


Figura 4.3: Mapa ilustrando as formações geológicas de alguns municípios da Quarta Colônia [55].

Por fim, a região mais a oeste do estudo pertence ao município de Alegre. Essa região apresenta características diferentes das demais devido ao Sistema de Falhas Jaguari-Mata, que já foi descrito na sessão 3.1.4. Algumas de suas diferenças, em relação às regiões de estudo mais a leste, podem ser confirmadas após comparação entre as potencialidades hídricas, que são muito melhores no compartimento oeste, e as formações geológicas, que podem ser observadas na Figura 4.4. Nesse caso, predominam as formações de Depósitos Aluvionares, Serra Geral (Fácies Alegre e Gramado), Botucatu e Guará.

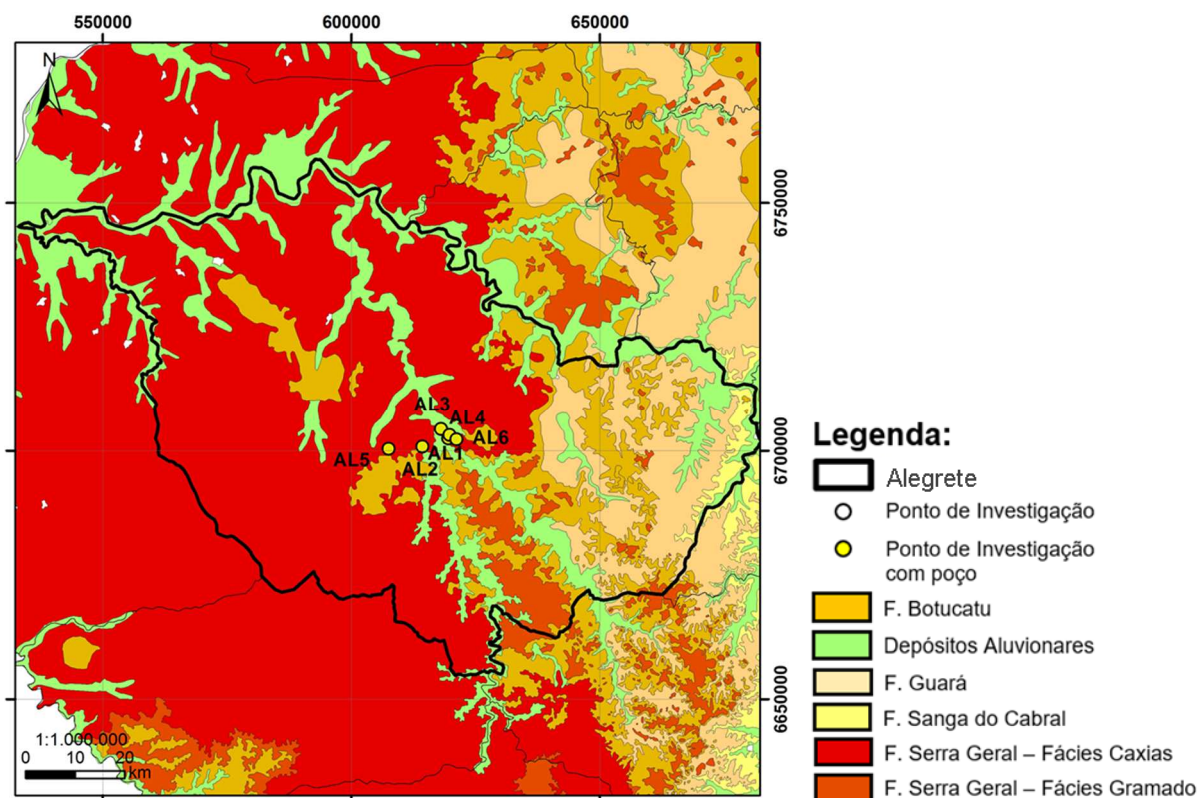


Figura 4.4: Mapa ilustrando as formações geológicas do Alegrete [55].

A área é constituída de um delicado ecossistema. A super exploração agrícola e a pecuária extensiva podem provocar danos ambientais se mal planejadas. Além disso, já existe na região o exemplo, do chamado "Deserto dos Pampas" ou "Deserto de São João", que foi provocado pela prática incorreta da agricultura nessa região. O termo deserto não pode ser usado devido ao fato de haver abundância de chuva na região. O que ocorre na região é a remoção da vegetação original e a consequente exposição do solo arenoso do local, que apresenta uma certa predisposição para a formação dos bancos de areia, intensificando-se a arenização da superfície [81].

Os perfis sísmicos de subsuperfície analisados no presente estudo, podem revelar locais com maior vulnerabilidade em aquíferos rasos, cuja contaminação pode afetar aquíferos mais profundos com o passar do tempo. Os locais dos levantamentos sísmicos AL 1 (localizado sobre formação Serra Geral, Fácies Caxias), AL 2 (localizado sobre formação Serra Geral, Fácies Caxias), AL 3 e AL 4 (localizado sobre formação Serra Geral, Fácies Caxias), AL 5 e AL 6, podem ser observados na Figura 4.4

4.2 Topografia e posicionamento

Para fazer as correções topográficas locais dos levantamentos sísmicos, a cota de cada posição dos doze receptores de onda, na superfície, foi medida utilizando uma estação total Topcon gts 213. A Figura 4.5 apresenta uma imagem do equipamento descrito.



Figura 4.5: Imagem de uma estação total Topcon gts 213. Fonte: o autor.

O levantamento altimétrico é a operação que determina as diferenças de nível entre diferentes posições do terreno. O nivelamento dessas posições, porém, não termina com a identificação do desnível entre elas, mas, inclui também, o transporte da altitude com relação a um ponto conhecido, por exemplo, o nível médio do mar. Para realizar os cortes geológicos da seção 5.3.

A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas em UTM das linhas sísmicas, bem como os valores de altitude do primeiro geofone de cada levantamento de subsuperfície.

A importância do nivelamento neste trabalho é tal, que permite fazer comparações entre os levantamentos sísmicos para investigar a presença da mesma formação geológica em diferentes regiões.

Sendo assim, para determinar a altitude de cada levantamento sísmico com relação ao nível médio do mar, foram consultadas cartas topográficas do Banco de Dados Geográficos do Exército (BDGEx).

Tabela 4.1: Posições das linhas sísmicas e das distâncias entre poços e linhas.

	LEVANTAMENTO		UTM_X	UTM_Y	COTA (BDGEx)	DISTÂNCIA (poço - linha)
Santa Cruz do Sul	SL1	Linha	364082	6717381	202 m	5 m
		Poço	364074	6717380		
	SL2	Linha	361312	6710274	115 m	5,5 m
		Poço	361300	6710268		
	SL3	Linha	364006	6714941	230 m	560 m
		Poço	364175	6715533		
Quarta Colônia	QL1	Linha	284011	6707641	60 m	15 m
		Poço	284001	6707689		
	QL2	Linha	283582	6732211	500 m	4.000 m
		Poço	286536	6734098		
	QL3	Linha	271574	6726879	90 m	85 m
		Poço	271594	6727024		
	QL4	Linha	264875	6726330	100 m	30 m
		Poço	264913	6726365		
	QL5	Linha	259995	6737646	140 m	220 m
		Poço	260180	6737525		
Candelária	CL1	Linha	325771	6722735	55 m	55 m
		Poço	325741	6722806		
	CL2	Linha	331395	6702839	100 m	-
		Poço	-	-		
	CL3	Linha	324478	6714318	80 m	1.500 m
		Poço	325971	6714727		
	CL4	Linha	325952	6714844	75 m	105 m
		Poço	325921	6714744		
	CL5	Linha	324766	6724355	75 m	-
		Poço	-	-		
Alegrete	AL1	Linha	619494	6702499	103 m	10 m
		Poço	619447	6702484		
	AL2	Linha	614250	6700872	130 m	5 m
		Poço	614202	6700902		
	AL3	Linha	618045	6704386	80 m	500 m
		Poço	617396	6704772		
	AL4	Linha	619765	6703207	105 m	2000 m
		Poço	621622	6702095		
	AL5	Linha	607471	6700415	145 m	1700 m
		Poço	605872	6699321		
	AL6	Linha	621134	6702308	100 m	-
		Poço	-	-		

4.3. Descrição geológica dos poços

As informações geológicas descritas nos perfis dos poços permitem avaliar a sensibilidade do método sísmico, quanto à capacidade de diferenciar camadas subterrâneas. Outra informação, que também pode ser extraída do perfil de poços é o nível estático, ou nível hidrostático. Neste trabalho as informações geológicas advindas dos poços foram utilizadas para comparar as informações geológicas detectadas pela sísmica. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**¹ apresenta as coordenadas em UTM dos perfis dos poços que foram usados para fazer a corroboração dos resultados.

Durante muito tempo, a perfuração de poços foi a principal singularidade ligada a estudos hidrogeológicos. Em decorrência do desenvolvimento das pesquisas em hidrogeologia, esse conceito está aos poucos se modificando. Diversas áreas como contaminação, monitoramento, modelagem, sensoriamento remoto, dentre outros são as principais motivadoras.

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), com atribuições de Serviço Geológico do Brasil (SGB), representa uma parcela do desenvolvimento hidrogeológico, em decorrência da execução de diversas atividades envolvendo estudos das águas subterrâneas. Uma delas é o cadastramento de poços em diversos estados. Isso resultou no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). As informações geradas atualmente pela CPRM fornecem um panorama das perfurações e das condições de exploração das águas subterrâneas, em um país com dimensões continentais. Para uma maior eficiência na gestão dos mananciais de águas subterrâneas, é essencial que existam sistemas de informações que compilem as características particulares de cada região de interesse.

O SIAGAS armazena o cadastro nacional de poços com acesso gratuito ao público via *internet*, possuindo centenas de milhares de poços arrolados em seu banco de dados. Dessa forma, o mesmo torna-se um sistema capaz de atender as demandas de informações sobre poços em todo o Brasil.

Além do SIAGAS, foram também consultados poços da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e perfis de poços fornecidos pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER).

Tendo em vista que os levantamentos sísmicos visavam a comparação com as informações dos poços, de modo geral, a sísmica foi realizada no mesmo local dos poços.

4.4. Princípios de aquisição sísmica

Nesta seção, serão descritos os principais conceitos sobre a aquisição sísmica, bem como seu princípio físico.

A técnica trata-se de uma maneira de quantificar propriedades físicas do interior da Terra de forma indireta, ou seja, sem a necessidade de intervenção no meio ambiente. O levantamento sísmico baseia-se no registro das ondas elásticas, que se propagam com diferentes velocidades em diferentes materiais. Em virtude disso é possível obter informações sobre a geologia de subsuperfície.

Em pequena escala, usando fontes artificiais de percussão, a sísmica não afeta o ambiente de modo significativo. As ondas produzidas causam vibrações no terreno, que são detectadas e registradas por diversos receptores de onda na superfície. Isso permite medir seus tempos de chegada em outros pontos na superfície, tornando possível calcular a velocidade de propagação da onda em diferentes camadas geológicas e estimar suas espessuras, formas, e composições [77].

Durante a aquisição, o posicionamento da linha sísmica, o cuidado com o espaçamento na distribuição dos geofones e a configuração que será adotada, são de grande importância, pois o processamento dos dados depende deles. Desse modo, é recomendada uma total atenção nos registros dos parâmetros, que serão explicados na seção 4.5.3.1 deste capítulo.

Além disso, na presença de perturbações do meio ambiente (ruídos), que possam causar o comprometimento dos resultados da aquisição, um empilhamento é recomendado. O empilhamento é um somatório das amplitudes recebidas nos sismogramas do sinal sísmico, que serve para minimizar eventuais ruídos e maximizar e evidenciar o contraste de interfaces existentes. No presente trabalho, não houve a necessidade da aplicação desse tratamento de dados, porque foram tomados cuidados durante a aquisição. A Figura 4.6 apresenta uma linha de aquisição sísmica e o instrumental envolvido.

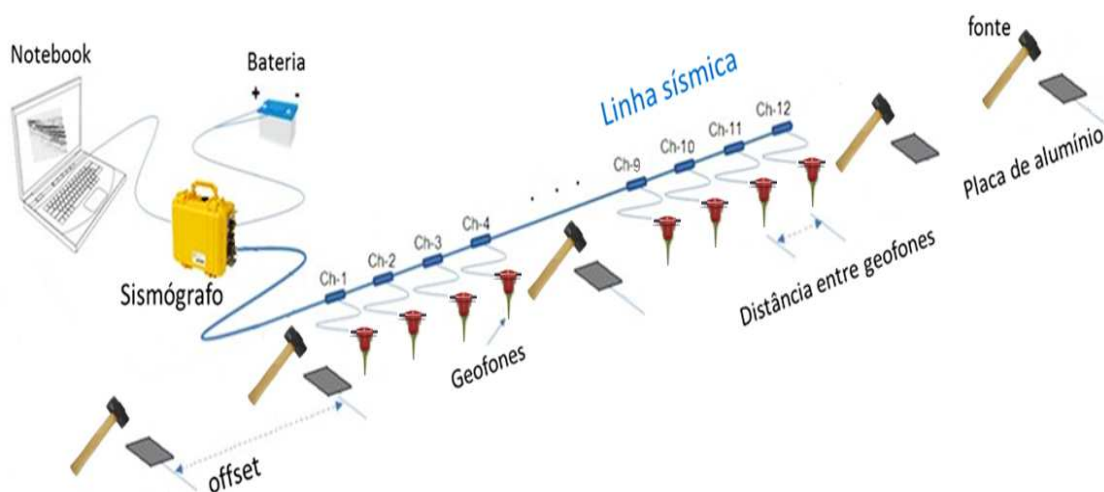


Figura 4.6: Ilustração da disposição da linha sísmica mostrando os pontos de disparo.

Adaptado de [82].

As dimensões do levantamento sísmico, tanto em comprimento, quanto em profundidade, dependem do comprimento do arranjo. Sendo assim, a fonte sísmica pode ser alterada dependendo do objetivo do estudo, ou seja, para arranjos de grande comprimento será necessária uma fonte sísmica mais energética e para arranjos mais curtos, fonte sísmica menos energética. A resolução lateral fica por conta da distância entre os geofones, já a resolução vertical é em torno da metade desse valor.

A técnica descrita aqui apresenta como contraste de mapeamento a grandeza física denominada impedância acústica, definida como o produto da velocidade de propagação da onda pela densidade do meio de propagação. Isso permite que se façam diferenciações entre as camadas geológicas pela diferença entre as velocidades de propagação da onda no respectivo meio. Durante o seu percurso, as ondas sísmicas refletem e refratam, quando encontram camadas com impedâncias acústicas diferentes. A partir delas, as ondas refletidas retornam à superfície, enquanto as ondas que sofreram refração crítica propagam-se, com velocidade do meio refrator, obedecendo ao princípio de Huygens. Assim, uma onda de choque conhecida como onda frontal é gerada, possibilitando o retorno à superfície com o mesmo ângulo crítico de incidência.

Outras grandezas físicas, porém, não serão identificadas pelo método descrito aqui. Logo, assim como em outras áreas de pesquisa experimental, a utilização de

mais de um método de investigação é sempre oportuna e mais confiável. A sondagem direta pode ser um método auxiliar para aferição dos resultados após o processamento de dados sísmicos. Por isso, foi usada a descrição geológica dos poços existentes próximos às áreas de levantamento.

4.4.1. Principais trajetórias sísmicas

A análise e a interpretação dos resultados dependem da visualização das trajetórias dos raios sísmicos. Essas trajetórias apresentam, por meio de amplitudes nos traços sísmicos, o tempo de percurso da onda até encontrarem meios de propagação com diferentes impedâncias acústicas. Esses traços, quando em conjunto, formam trajetórias típicas de refração ou reflexão, que permitem estimar características da subsuperfície.

Para entender melhor a propagação das ondas sísmicas em subsuperfície, vamos assumir um modelo geológico de duas camadas com, velocidades V_1 e V_2 , no qual supomos, $V_1 < V_2$, conforme mostrado na Figura 4.7 a). Efetuando-se um disparo na superfície, ondas propagar-se-ão sob diversas trajetórias entre as camadas. Geofones distribuídos ao longo de uma linha sísmica na superfície registram o retorno do pulso com diferentes tempos de percurso. Os resultados obtidos são os tempos de trânsito da onda. A descrição, a seguir, aborda cada tipo de trajetória.

O raio direto, que se propaga com velocidade V_1 na superfície, é a primeira a ser registrada, e está representada na Figura 4.7 I). A onda refletida, viajando numa velocidade V_1 , será detectada pelos geofones seguindo a lei da reflexão especular, conforme mostrado na Figura 4.7 II). A onda refratada se propaga com velocidade V_2 que é maior que a velocidade V_1 , provocando a formação de uma onda de choque chamada de onda frontal, ilustrada na Figura 4.7 III). Segundo Anomohanran (2013), qualquer raio associado à onda frontal apresenta-se inclinado segundo o ângulo crítico i_c . Devido à onda frontal, a energia sísmica retorna à superfície após a refração crítica em uma camada inferior de velocidade maior [15]. A partir desse ponto sua detecção obedecerá a uma mesma frente de onda. As distâncias entre os geofones estão representadas por “b” [38].

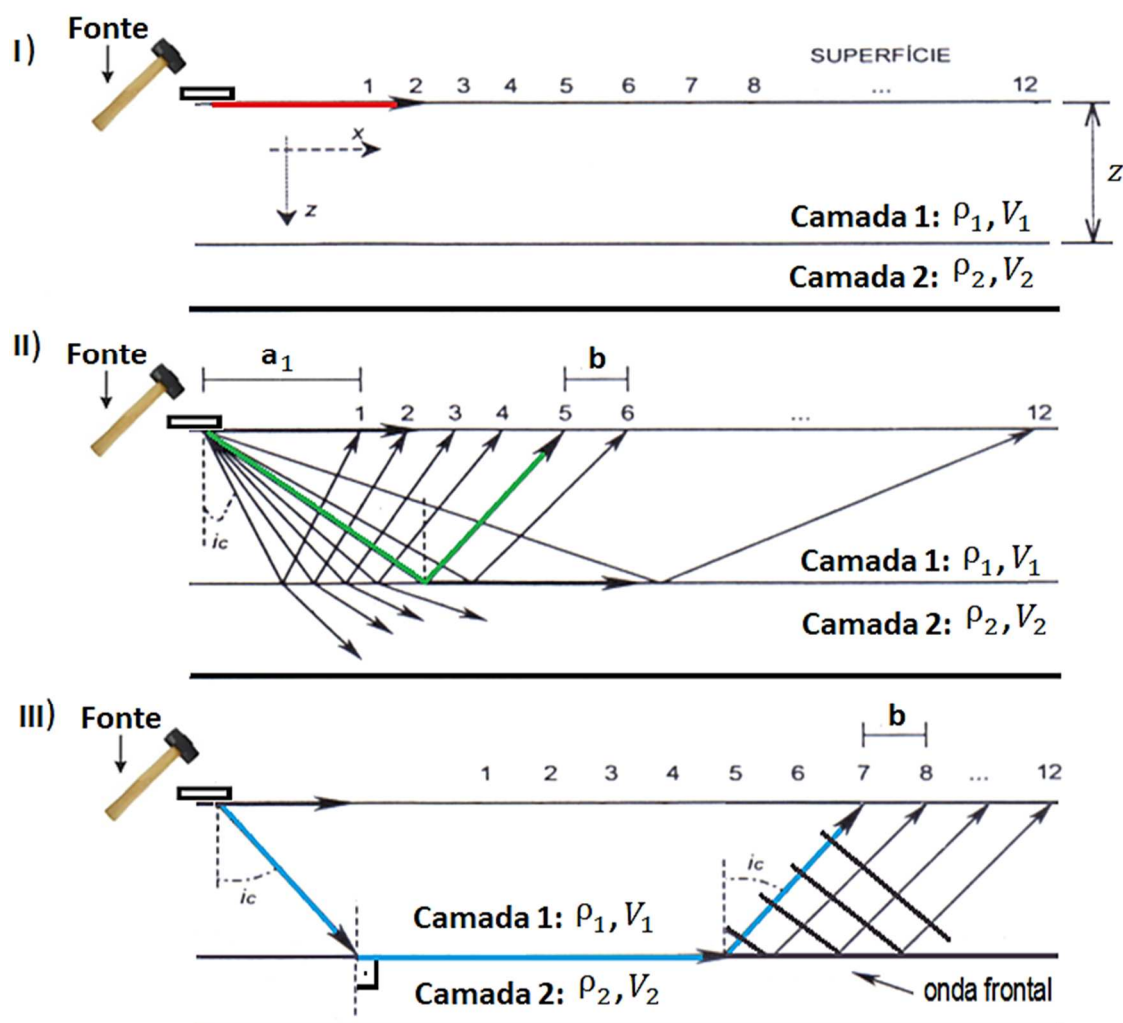


Figura 4.7: Representação da geometria dos eventos sísmicos para o caso do modelo de duas camadas planas e horizontais com $V_1 < V_2$: a) modelo geométrico e raio direto; b) raios diretos, refletidos e refratados; c) raios diretos e refratados criticamente. Os números de 1 a 12 representam os receptores sísmicos. Adaptado de [83].

4.4.2. O Sismograma

O sismograma representa a conversão do sinal adquirido pelo sismômetro em um registro temporal de um evento sísmico. Em outras palavras, é um conjunto de traços sísmicos registrados ao longo do tempo e dispostos na respectiva posição de cada geofone. A invenção dos sismógrafos eletromagnéticos permitiu a conversão do sinal sísmico em sinal elétrico, que é então registrado. Atualmente, os sismógrafos modernos convertem o sinal elétrico em sinal digital. Após o processamento, o sinal

digital é, geralmente, convertido para ser visualizado e interpretado [84]. A Figura 4.8 representa um esquema de como é gerado um sismograma.

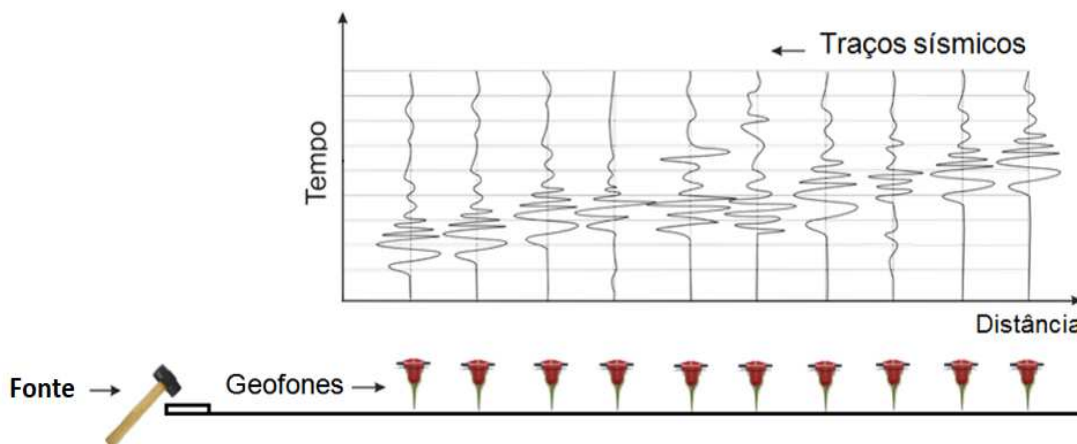


Figura 4.8: Ilustração de um sismograma sendo gerado. Adaptado de [82].

Em um sismograma, são detectadas pelos geofones: (i) as ondas aéreas (*air-waves*), as quais se propagam no ar com velocidade de cerca de 340 m/s (velocidade do som no ar) e, (ii) as ondas de rolagem no solo (*ground-roll*), que são ondas de superfície, as quais se propagam mais lentamente que as ondas do tipo P. O rolamento se deve à interface terra-ar, também conhecida como superfície livre. A Figura 4.9 mostra as trajetórias dessas ondas através de traços sísmicos agrupados.

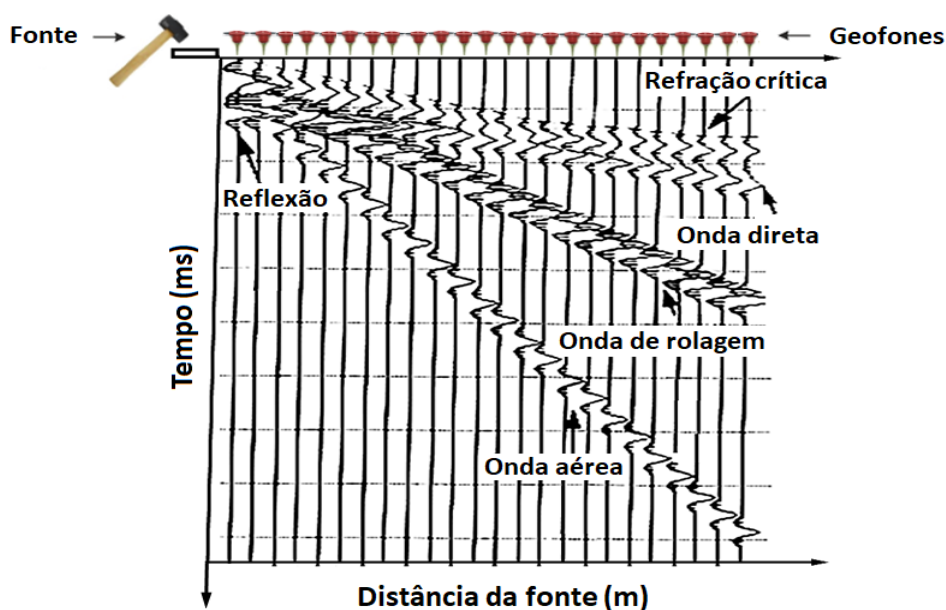


Figura 4.9: Representação das ondas aéreas, rolagem, direta, refletida e refratada criticamente.

Adaptado de [75].

Cabe lembrar alguns termos comuns nos estudos sísmicos como: *wiggle*, que corresponde à oscilação do traço sísmico e *travel time*, que é o nome dado à curva obtida a partir do sismograma correspondente ao tempo de trânsito da onda ao se propagar pelo material.

4.4.3. Sismógrafo

Para obtermos os sinais sísmicos, foi utilizado o sismógrafo multicanal RAS-24 da marca Seistronix™. Ele possui uma bateria de 12 V que permite seu uso em lugares sem energia elétrica. O instrumento, conforme mostrado na Figura 4.10, possui os seguintes acessórios: extensão do disparador, disparador (*trigger*), cabo de transmissão de dados, sismógrafo RAS-24 e 12 geofones com frequência de ressonância de 10 Hz. O intervalo mínimo de amostragem permitido pelo instrumento é igual a 0,125 ms e o máximo é de 4 ms. Seu maior tempo de gravação é de 32 s e possui quatro opções de pré-amplificação de ganho: 12, 14, 36 e 48 db. O cabo de conexão dos geofones permite montar arranjos com extensão de até 120 m com capacidade para instalar até 12 geofones. A marreta de 8 kg, acompanhada de uma placa de alumínio de 2 x 20 x 20 cm constitui a fonte sísmica artificial.



Figura 4.10: Partes componentes do sismógrafo multicanal. a) Extensão do disparador, b) RAS-24, c) bateria de 12 V, d) disparador e) cabo serial, f) 12 geofones, g) cabo de conexão dos geofones de 120 m, h) marreta de 8 kg e i) placa de alumínio.

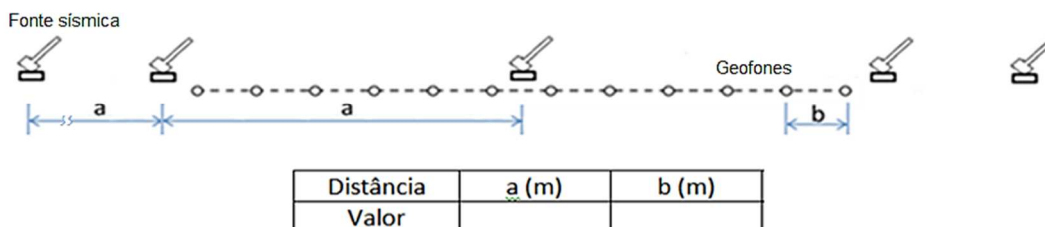
4.4.3.1. Metodologia de aquisição de dados para o levantamento sísmico de refração

Um levantamento sísmico baseia-se na análise de sismogramas, que representam graficamente a distância dos receptores como função do tempo de percurso do sinal desde sua geração até seu retorno à superfície. Com esse diagrama é possível traçar retas, que representam os caminhos dos raios sísmicos, associados aos tempos de trânsito (*travel time*) da onda sísmica no meio geológico.

Para realização deste estudo, no qual buscou-se investigar regiões de subsuperfície rasa, o pulso sísmico foi sempre produzido por uma marreta de 8 kg, que possui energia suficiente para mapear um arranjo de 60 m. Como o método empregado tem a finalidade de mapear refratores em subsuperfície, é fundamental escolher a geometria e os parâmetros de aquisição adequados. Tal procedimento na aquisição garante que as chegadas das frentes de onda refratadas sejam detectadas por um mesmo segmento do arranjo.

Os parâmetros de aquisição foram divididos entre os de geometria e os de cobertura do arranjo. Os parâmetros de geometria referem-se a características espaciais da linha sísmica. Dentre eles, podemos citar o tipo de arranjo (linear), o comprimento do arranjo (60 m), o intervalo entre os receptores (5 m), o intervalo entre os pontos de tiro (30 m), a quantidade de geofones (12 canais verticais), a frequência dos geofones (10 Hz), a fonte geradora da onda sísmica (marreta de 8 kg) e uma placa de metal para acoplamento do pulso sísmico à superfície local. Já os parâmetros de cobertura do arranjo, referem-se ao intervalo de amostragem (0,25 ms), tempo do registro (1 s), filtros de frequência para remover ruídos e comprimento do arranjo. Além disso, outros registros de informações, durante a aquisição, facilitam, organizam e evitam erros durante o processamento. A Figura 4.11 apresenta a ficha de parâmetros utilizados durante a aquisição, na figura, (a) representa a distância entre os pontos de disparo e (b) a distância entre os geofones.

Data: / / Hora de início:	Local da aquisição:
Dia: seco[], úmido [], ventoso[]	Direção:
Topografia: Plana [], Inclínada []	Nome do arq. Calibração:
Comp. da linha mapeada:	Equipe:



OBS: Marque nas posições o nome dos sismogramas que foram adquiridos.

		1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	12		

Figura 4.11: Ilustração da ficha de parâmetros utilizados durante de aquisição sísmica.

Fonte: o autor.

Cada sismograma foi obtido em triplicata e, posteriormente à aquisição dos dados sísmicos, foi realizada a seleção dos melhores registros, escolhendo-se o sismograma menos ruidoso. Além disso, também foram observadas as quebras da onda nos sismogramas, as quais marcam o início de outra camada.

Em todos os processamentos a inversão dos dados iniciou com a geração de um arquivo no formato SU (*seismic unix*) com o software *WinsSism*TM Versão 10.15. Nesse arquivo fica armazenado os tempos de trânsito gastos pela onda para percorrer as camadas geológicas. Outra etapa do processamento é a marcação das chegadas de onda no sismograma, que é denominado picagem [85]. Durante o processamento, informações como velocidade de propagação da onda no meio refrator, definição do número de camadas adotadas e características como inclinação e espessura dos refratores puderam ser obtidas por meio do diagrama de tempo de trânsito com o uso de ferramentas presentes no *software*. Na Figura 4.12 I) é apresentada uma ilustração da metodologia aplicada no estudo.

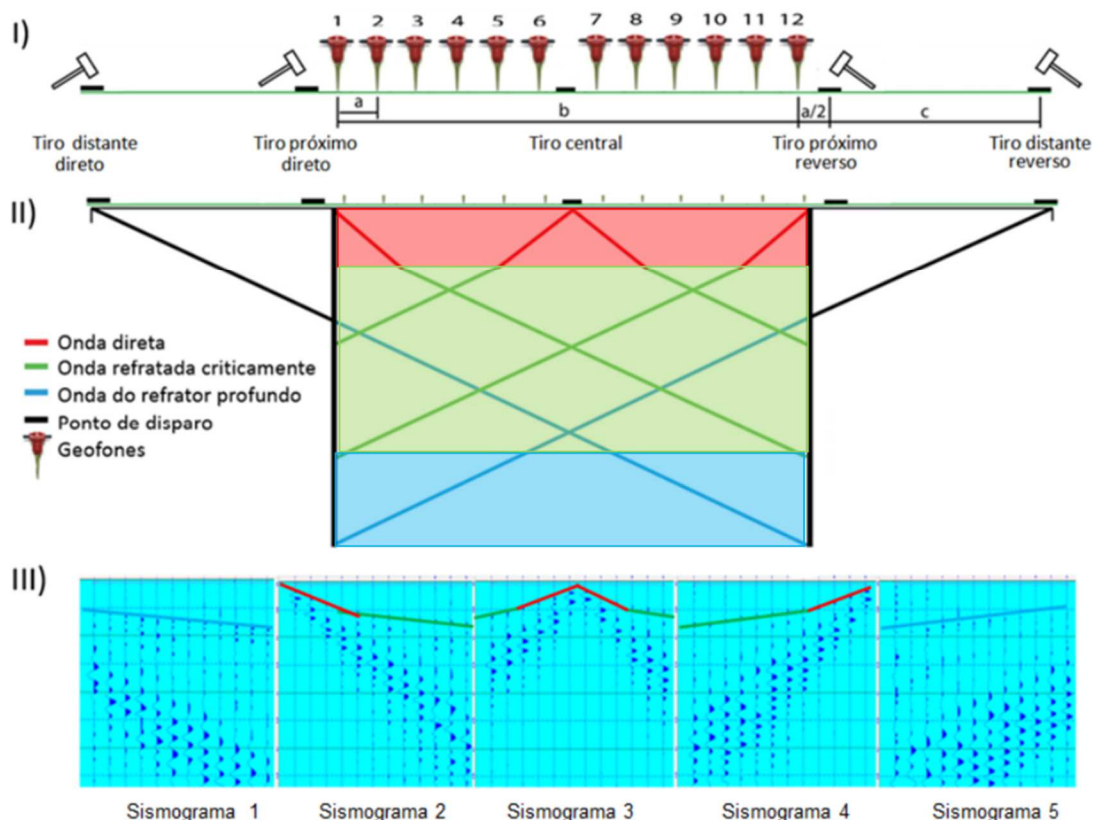


Figura 4.12: a) Ilustração de uma linha sísmica de aquisição com os pontos de disparo; b) Ilustração dos sismogramas dos respectivos pontos de disparo. Figura do autor.

A disposição dos pontos de tiro permitiu varrer por inteiro o refrator de subsuperfície e, com isso, possibilitou a aplicação do método mais-menos [86]. De maneira geral, esse método baseia-se no tempo de trânsito gasto pela onda percorrer o material até retornar a superfície, possibilitando determinar a velocidade do meio abaixo de cada geofone, bem como, as profundidades das camadas. Uma explicação detalhada sobre o método mais-menos, consta no Anexo II deste trabalho. Para gerar o diagrama de tempo de trânsito, apresentado na Figura 4.12 II), foram necessários os dados dos cinco sismogramas, os quais podem ser observados na Figura 4.12 III). As retas coloridas representam os tempos de trânsito dos refratores presentes, ao trasladá-los para os respectivos pontos de disparo obtém-se o diagrama mencionado.

O resultado foi a geração de um perfil de velocidades, que se apresentou de forma crescente em profundidade, no qual os estratos geológicos podem ser

diferenciados por sua velocidade sísmica. Os procedimentos de processamento dos dados sísmicos seguiram sempre a mesma metodologia.

Uma padronização das cores, que representam as velocidades dos diferentes estratos foi adotada nos resultados com o intuito de facilitar sua interpretação e classificação. A escala de cores e suas respectivas velocidades de propagação em metros por segundo pode ser observada na Figura 4.13.

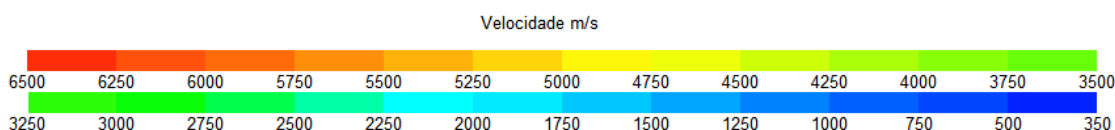


Figura 4.13: Ilustração da escala de cor utilizada para padronização dos levantamentos sísmicos.

Fonte: o autor.

A possibilidade de empregar a varredura sísmica de refração para avaliar a vulnerabilidade local foi associada à sua característica de diferenciar camadas geológicas e determinar suas profundidades. Foram consultados, nos métodos tradicionais de determinação da vulnerabilidade, os parâmetros comuns mais relevantes, dentre os quais aqueles que podiam ser extraídos do levantamento sísmico. Assim, foram selecionados quatro parâmetros: (i) o nível freático, (ii) a espessura de solo, (iii) a geologia da zona insaturada e (iv) a declividade local do terreno.

Este estudo aplicou a sísmica de refração, em localidades próximas a poços de abastecimento de água. A existência de perfis dos poços permitiu a comparação das litologias encontradas nos perfis sísmicos inicialmente e auxiliou na validação e calibração da técnica para a determinação da estrutura geológica nos arredores dos poços. Cabe lembrar, nesse contexto, que o novo método proposto não torna essencial a existência de um perfil geológico de poço, mas sim o nível freático.

As informações retiradas dos levantamentos sísmicos ajudaram na quantificação local de vulnerabilidade intrínseca, no que diz respeito à suscetibilidade do meio à contaminantes de origem antrópica em reservatórios de águas subterrâneas.

As regiões escolhidas para este estudo contemplam áreas intensamente explorada pelo cultivo de diversos produtos. A agricultura de base familiar, bastante

praticada nas regiões, torna as comunidades envolvidas dependentes da exploração do solo. Muitas vezes, as propriedades são passadas de geração para geração. Porém, as boas condições de saneamento, aliadas à correta prática do manejo e uso do solo são de grande importância para continuação desse ciclo. Dessa maneira, o conhecimento e o monitoramento, por autoridades responsáveis, de áreas mais suscetíveis à contaminação podem garantir a preservação de reservatórios subterrâneos de água para futuras gerações.

Além disso, conforme já citado na introdução, nestas regiões, também estão presentes as zonas de recarga e de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. O SAG é constituído, por sua vez, por um conjunto de formações geológicas rica em areia e pobre em argila, que resulta em uma espécie de esponja compartimentada com potencial para acumular água subterrânea. Em alguns compartimentos, os reservatórios são cobertos por rochas impermeáveis e, devido a isso, são naturalmente protegidos. Já em outros, porém, a ação do intemperismo e de processos de transformação da crosta terrestre, causam alterações e fraturamentos tornando algumas formações mais suscetíveis à contaminação antrópica. Essas características tornam esses locais, portas de entrada para águas pluviais e fluviais. Assim, se houver contaminação devido ao manejo do solo, pela agricultura, ou ocasionados por rejeitos industriais ou dejetos cloacais oriundos da urbanização, os reservatórios subterrâneos estarão em risco.

No que se refere à aplicação do método sísmico de refração, a escolha desta região ainda possibilitou avaliar sua sensibilidade na detecção de diferentes litologias, já que é essa característica, que permitiu comparar os mapeamentos sísmicos com os perfis estratigráficos dos poços existentes. Para tanto, alguns pontos de levantamento sísmico foram realizados em regiões mais elevadas (Serra Geral), enquanto outros foram realizados em regiões mais baixas (Depressão Central).

4.5. Descrição do método de quantificação da vulnerabilidade GOD

Os principais fatores que controlam a vulnerabilidade de um aquífero estão ligados às dificuldades de acessibilidade hidráulica e a capacidade de atenuação do próprio aquífero. Os dados hidrogeológicos necessários para a composição destes

fatores são a definição do grau de confinamento do aquífero, a determinação da profundidade até o topo do aquífero, umidade da zona não saturada, a condutividade hidráulica da zona não saturada, bem como, a mineralogia completa do aquífero. Entretanto, esses não são dados facilmente acessíveis, obtendo-se na maioria das vezes, somente o tipo de contaminante subterrâneo, a profundidade até o lençol freático, o grau de consolidação e as características litológicas do aquífero [12].

Pode-se observar na Figura 4.14, um esquema com a caracterização das componentes da vulnerabilidade geral do aquífero, segundo a metodologia GOD, e suas respectivas escalas.

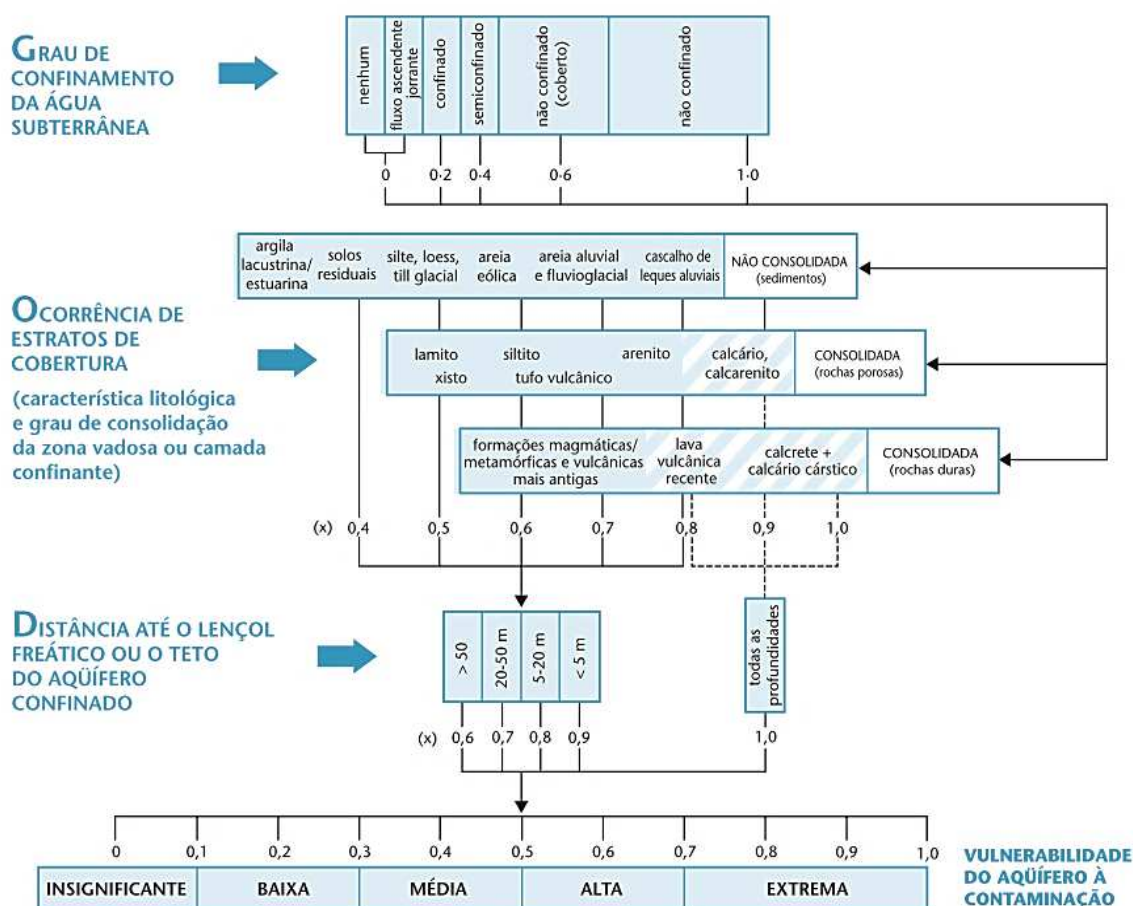


Figura 4.14: Esquema apresentando os parâmetros utilizados para o cálculo de vulnerabilidade, usando o método de quantificação GOD [12].

A metodologia GOD foi empregada para avaliação da vulnerabilidade do aquífero livre das regiões de estudo, por sua facilidade de aplicação em virtude do

reduzido número de parâmetros, que possibilitam seu uso, mesmo em situações em que não se tem muita informação disponível. Sua nomenclatura é o acrônimo de três parâmetros fundamentais no idioma inglês:

1. Ocorrência de água subterrânea (*Ground water occurrence*), onde os valores são obtidos dentro de um intervalo de 0 a 1;

2. Classificação dos estratos acima da zona saturada do aquífero em termos do grau de consolidação e caráter litológico (*Overall aquiferclass*). Esta propriedade conduzirá a um segundo ponto na escala de 0,3 a 1,0;

3. Profundidade do topo do aquífero (*Depth to ground water table*), que definirá o terceiro ponto, na escala de 0,4 a 0,9.

Todos os parâmetros possuem o mesmo nível de importância. O índice de vulnerabilidade é determinado pela multiplicação dos valores obtidos em cada fator.

Os índices GOD foram calculados de acordo com o estabelecido na Figura 4.14, introduzindo-se os parâmetros em uma planilha no *software* EXCEL® 2007 e multiplicando-os.

O índice de vulnerabilidade pode ser representado na forma de mapas, permitindo aos órgãos competentes, uma melhor avaliação das propostas de desenvolvimento aliada ao controle da poluição e monitoramento da qualidade da água subterrânea [6]. Porém, devido ao objetivo desse trabalho e sua pequena distribuição espacial de dados, no que se refere aos locais de levantamento, o mapa gerado a partir da interpolação matemática seria prejudicado e não representaria de forma representativa a vulnerabilidade das regiões estudadas. Dessa maneira, será atribuída uma legenda, na qual o índice de vulnerabilidade será representado por um marcador circular colorido.

4.6. Descrição do novo método de quantificação de vulnerabilidade proposto

A diferenciação das camadas litológicas e sua boa corroboração com a estratigrafia descrita em poços possibilitaram usar os levantamentos sísmicos de subsuperfície, para estimar o grau de vulnerabilidade, que um determinado meio geológico possui a contaminação de origem antrópica. O cálculo para estimar o grau

de vulnerabilidade por sísmica de refração será chamado vulnerabilidade por sísmica de refração - VSR.

Para o desenvolvimento do método foram selecionados quatro parâmetros, levando em conta seu grau de importância. Esses parâmetros podem ser extraídos dos levantamentos sísmicos, exceto o nível freático.

A seguir, serão descritos os significados associados a cada parâmetro, que tiveram índices definidos no intervalo de 1 a 10 para representar os valores mensurados em cada caso.

Parâmetro 1: Nível hidrostático ou freático

O nível freático contribui sobre a espessura da litologia. Dessa maneira, quanto maior sua profundidade mais difícil será para o contaminante atingir o aquífero livre. Esse parâmetro foi extraído de perfis geológicos de poços artesianos locais, mas poderia ser medido de outras maneiras sem prejuízo para o método. O índice (I_{NE}), que varia de 1 até 10, está mostrado no Quadro 4.1 e seu valor é inversamente proporcional à profundidade. A escala de profundidade atribuída a esse parâmetro foi até 50 m, pois os parâmetros empregados no método sísmico de refração usado não permitem formar inversões mais profundas.

Quadro 4.1: Índices de ponderação do nível freático utilizados para o cálculo de VSR.

Parâmetro (m)	>50-41	40-36	35-31	30-26	25-21	20-16	15-11	10-6	até 5	0
I_{NE}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Parâmetro 2: Espessura do solo

Esse parâmetro contribui com a atenuação dos efeitos do contaminante sobre o solo depende da sua espessura, pois, para solos mais espessos, a tendência é diminuir os efeitos prejudiciais dos agentes poluentes [87,88].

Conforme foi mencionado na seção 4.4.3.1. a sísmica de refração deve ser cuidadosamente planejada e seus parâmetros registrados para uso na inversão. Como consequência, a profundidade máxima alcançada pelos registros sísmicos foi

inferior a 50 m. Logo a escala associada a esse parâmetro ficou limitada a esse valor.

Desse modo, para cada intervalo mensurado de espessura de solo, foi associado um valor de 1 até 10, que foi definido como índice (I_p), como está mostrado no Quadro 4.2. Assim, quanto maior a espessura do solo, menor será o valor do índice. A variabilidade longitudinal do grau de vulnerabilidade está vinculada a esse parâmetro uma vez que a subsuperfície revela algumas nuances.

Quadro 4.2: Índices de ponderação da espessura do solo utilizados para o cálculo de VSR.

Parâmetro (m)	>41	40-36	35-31	30-26	25-21	20-16	15-11	10-6	até 5	0
I_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Parâmetro 3: Litologia da zona insaturada

A litologia da zona insaturada contribui para o cálculo do grau de vulnerabilidade ao envolver a velocidade de propagação da onda P. De uma forma geral, sem levar em conta outras propriedades físicas das rochas, quanto maior for a velocidade, menor será a quantidade de espaços vazios na rocha. Assim, foi definido o índice (I_{V_p}), compreendido no intervalo que varia de 1 até 10, de maneira que para maiores velocidades de propagação, seu valor seja menor. A Tabela 4.2 apresenta as litologias consideradas neste trabalho, com suas velocidades médias de propagação, e os índices definidos no presente trabalho. As cores não aparecem na mesma ordem que a escala de cor dos levantamentos sísmicos, porque foram estabelecidas a partir das velocidades médias da tabela de velocidades de propagação típicas de onda P e algumas litologias estão representadas dentro de intervalos maiores que outras.

Tabela 4.2: Índices de ponderação da velocidade da onda P utilizados para o cálculo de VSR.

Litologia	V_P (m/s)	V_{Pm} (m/s)	I_{V_P}
	Tabela 3.1		
Solo	100-500	300	10
Areia (seca)	200-1000	600	9
cascalho (perto das superfícies)	400-2300	1350	8
Folhelho	1700	1700	7
Argila	1000-2500	1750	6
Areia (saturada de água)	1500-2000	1750	5
Argilito	1800-2000	1900	4
Arenito	1400-4500	2950	3
Alteração de basalto	3500-3750	3625	2
Basalto	5500-6500	6000	1

Parâmetro 4: Declividade local do terreno

A declividade local do terreno, ou a inclinação superficial do terreno, contribui com o escoamento superficial da água: quanto mais inclinado for o terreno menor será a infiltração. Foi proposto o índice (I_T), definido no intervalo que varia de 1 até 10, conforme mostra no Quadro 4.3. Assim o índice associa um valor menor para terrenos com maiores declividades.

Para determinação do grau de vulnerabilidade nesse trabalho foi levado em consideração apenas o comprimento da linha sísmica.

Quadro 4.3: Índices de ponderação da declividade utilizados para o cálculo de VSR.

Parâmetro	10%	10-8%	8-6%	6-4%	4-2%	<0%
I_T	1	2	4	6	8	10

Foi proposto que o cálculo do grau de vulnerabilidade seja determinado pela Equação 4.1, que faz uma soma dos índices apresentados para cada característica selecionada no levantamento sísmico. Definimos um coeficiente numérico de ponderação mostrado no Quadro 4.4, para hierarquizar a relevância dos índices associados a cada parâmetro na determinação da vulnerabilidade de reservatórios subterrâneos. Como foram selecionados quatro parâmetros usamos também quatro

coeficientes de ponderação. O nível que a água se encontra da superfície é colocado como principal fator de contaminação levando peso quatro, seguido da espessura do solo com peso três e da litologia da zona insaturada, identificada pela velocidade de propagação da onda P com peso dois. A declividade ficou com peso um, pois para pequenos comprimentos como foi o caso de estudo (60 m), não houve grandes variações.

$$VSR = 4I_{NE} + 3I_P + 2I_{V_P} + I_T \quad (4.1)$$

Quadro 4.4: Coeficientes associados aos parâmetros utilizados para o cálculo de VSR.

Parâmetro Proposto	Grandeza Observada	Coeficiente
Nível estático (NE)	Nível de água subterrânea	4
Espessura de solo insaturado (E)	Profundidade	3
Tipo de litologia (L)	Velocidade onda P	2
Topografia (T)	Declividade do terreno	1

O grau de vulnerabilidade será atribuído conforme os intervalos apresentados na Quadro 4.5. O menor e o maior valor da escala, 0,0 (zero) e 100,0 (cem), respectivamente, foram encontrados ao associar os menores e os maiores índices possíveis na equação 4.1.

Quadro 4.5: Grau de vulnerabilidade de acordo com os valores de índice obtidos por VSR.

Valor de VSR	Grau de vulnerabilidade
De 10 até 25	Desprezível
De 26 até 50	Baixo
De 51 até 75	Médio
De 76 até 100	Alto

Além disso, para verificação da ausência de correlação entre os parâmetros propostos para o desenvolvimento do método de quantificação da vulnerabilidade, foi estimado através da análise de correlação de Pearson.

O índice de Pearson, também chamado de Coeficiente de Correlação Produto-Momento de Pearson, é uma medida de correlação linear entre dois parâmetros. O coeficiente, portanto, é capaz de apontar o grau de relação e a direção da relação entre os pares quando estes apresentam um comportamento linear. O coeficiente pode ser descrito tanto para análise de uma população como para análise de uma amostra, sendo a equação utilizada para análise de uma amostra descrita a seguir:

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.2)$$

sendo n o tamanho da amostra, x_i e y_i as i -ésimas observações e \bar{x} e \bar{y} as médias amostrais.

Pelo denominador da equação, percebe-se que o coeficiente não poderá ser calculado caso ao menos um dos conjuntos de dados seja completamente homogêneo.

O coeficiente r_p variam entre -1 e 1 , inclusive, onde o sinal indica a direção da relação e o módulo do valor indica o grau do relacionamento. Quando a correlação de Pearson atinge o valor -1 diz-se que há uma correlação perfeitamente negativa entre os pares, de modo que o valor numérico de um dos parâmetros diminui, enquanto o outro aumenta. Analogamente, quando o valor é 1 , diz-se que a correlação é perfeita e positiva, indicando que o valor numérico de um dos parâmetros cresce enquanto o outro também. Quando seu valor está próximo de zero, entende-se que os parâmetros têm baixo grau de correlação [89].

CAPÍTULO 5 : RESULTADOS

5.1. Validação dos levantamentos sísmicos realizados

A seguir são discutidas, em detalhes, as variações estratigráficas dos levantamentos sísmicos registrados em cada região de estudo com a finalidade de investigar o desempenho do método sísmico na detecção de diferentes geologias.

Para isso, os levantamentos sísmicos foram comparados com as descrições geológicas dos poços locais e apresentaram ótimos níveis de corroboração. Essa característica torna viável a sua aplicação para auxiliar na análise do grau de vulnerabilidade local à contaminação antrópica.

Tradicionalmente as informações geológicas são retiradas da descrição geológica da sondagem de poços. Algumas regiões, porém, carecem de poços e não é difícil encontrá-los com a descrição geológica incompleta, o que também inviabiliza ou mascara os resultados devido à falta da informação. A seguir, analisaremos os resultados sísmicos à luz dos perfis de poços, nos casos em que estes estavam disponíveis.

O levantamento mais a norte, obtido em Santa Cruz do Sul, mostra uma perfeita corroboração de dados de perfil de poço com a primeira, segunda e terceira camadas identificadas pelo método sísmico. Essas camadas sugerem, conforme a tabela de velocidades de propagação da onda P, que se trata respectivamente de solo (cor azul), uma área de transição (cor verde) e uma de basalto (cor vermelha). A confirmação da estratigrafia através do poço pode ser observada na Figura 5.1.

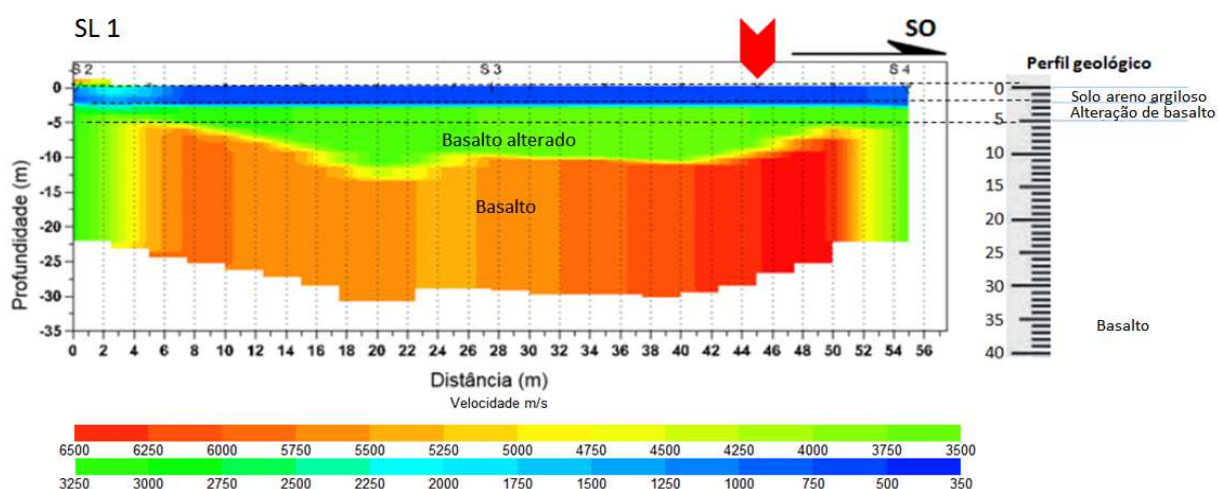


Figura 5.1: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Santa Cruz do Sul.

Cabe ressaltar aqui a vantagem do levantamento sísmico, que tem comprimento horizontal de aproximadamente 55 m, sobre o perfil do poço, que é praticamente pontual, se pensarmos nas nuances da subsuperfície, a informação do poço não contempla, corretamente, outros pontos do terreno.

O levantamento realizado em Candelária, que foi usado para realizar a comparação de dados com o perfil do poço pode ser observado na Figura 5.2.

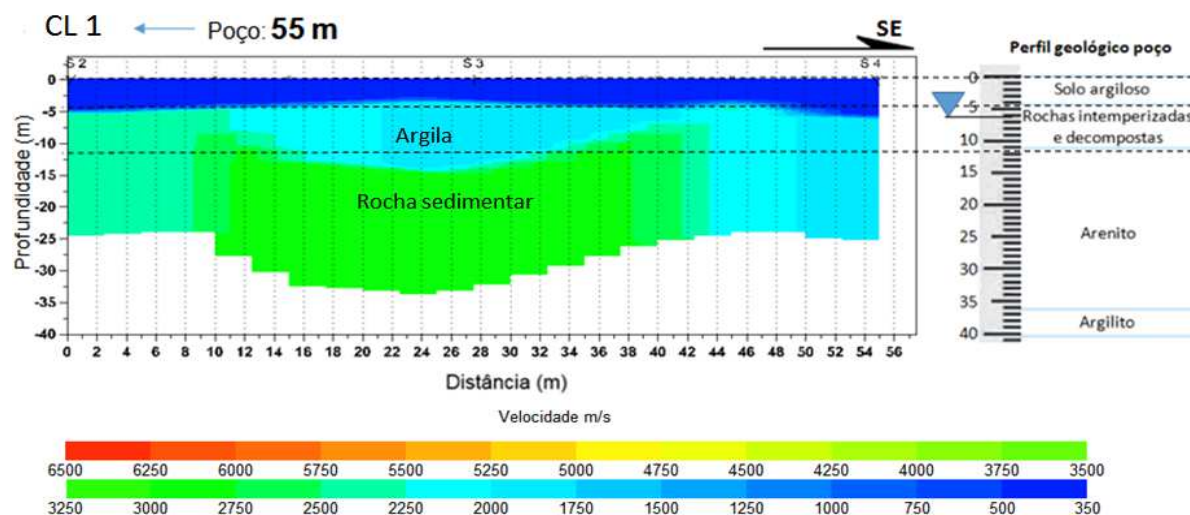


Figura 5.2: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Candelária.

As velocidades de propagação da onda P identificadas no levantamento sísmico sugerem a existência de solo, argila e rocha sedimentar. Essa geologia foi corroborada na comparação com a descrição geológica do perfil do poço.

O levantamento realizado na região da Quarta Colônia, que foi usado para realizar a comparação de dados com o perfil do poço pode ser observado na Figura 5.3.

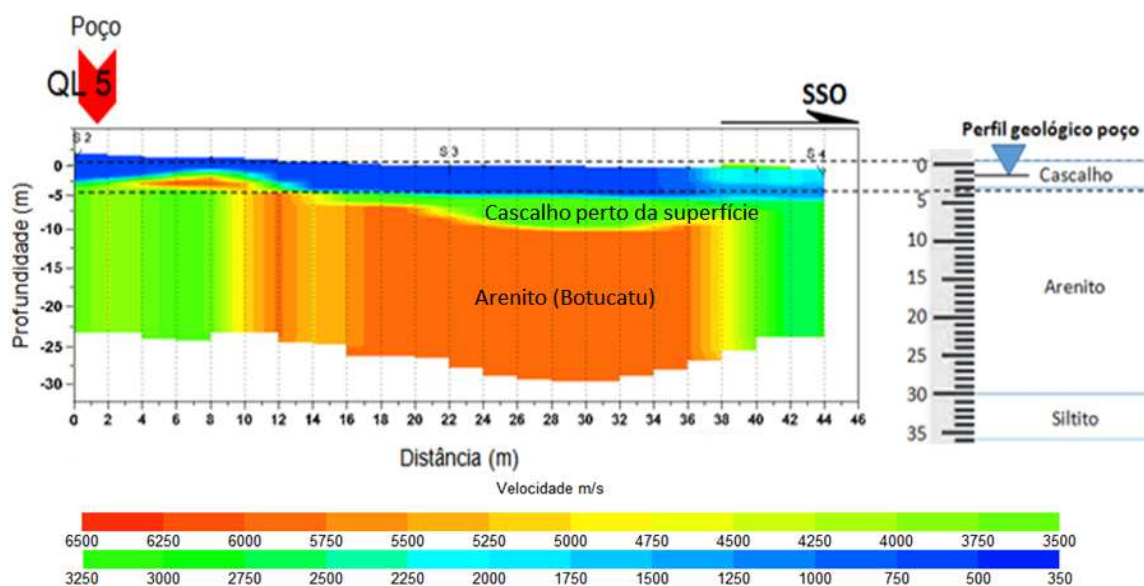


Figura 5.3: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local na região da Quarta Colônia.

O levantamento realizado na região de Alegrete, que foi usado para realizar a comparação de dados com o perfil do poço pode ser observado na Figura 5.4. As velocidades de propagação da onda P identificadas no levantamento sísmico sugere a presença de uma pequena camada de solo de aproximadamente 2,5 m, na segunda camada identificamos argila e na terceira temos uma alteração de basalto. Nesse caso, a varredura sísmica apresenta uma camada de argila não descrita no perfil do poço. Porém o poço está a 5 m de distância da extremidade do arranjo sísmico e, como nos casos anteriores, houve uma boa corroboração de dados, indicando que o método de levantamento de dados geológicos está consistente.

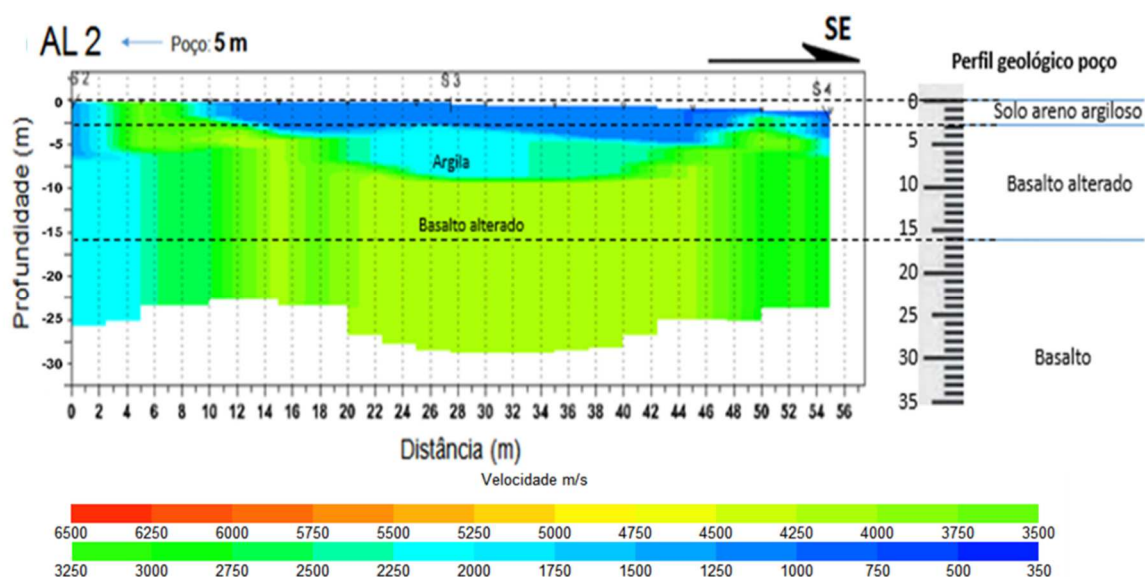


Figura 5.4: Ilustração da corroboração estratigráfica do levantamento sísmico com o perfil geológico do poço local no município de Alegrete.

5.2. Levantamentos sísmicos realizados

A seguir são apresentados os resultados dos levantamentos sísmicos realizados nos locais de interesse do estudo. O triângulo à direita das imagens dos levantamentos sinaliza o nível freático representado pela linha pontilhada horizontal. Tal valor, foi obtido através dos perfis geológicos de poços e podem ser observados no Anexo III.

5.2.1. Levantamentos sísmicos no município de Santa Cruz do Sul

Os perfis dos levantamentos sísmicos analisados, no município de Santa Cruz do Sul, apresentados na Figura 5.5 sugerem à presença de formações geológicas com potencial para armazenamento de água à 10 m de profundidade, como é o caso do mapeamento SL 1.

O método sísmico possibilitou analisar três estratigrafias diferentes. Assim, foi possível analisar as características geológicas locais.

Para o levantamento SL 1, com base nas velocidades de propagação das ondas P da Tabela 3.1, tem-se que de 350 até 500 m/s (solo), de 3500 até 3750 m/s (alteração de basalto) e de 5750 até 5500 m/s (basalto). A primeira camada (azul

escuro) constitui o manto de intemperismo e atinge cerca de 2,5 m de profundidade formando o solo. A segunda camada (azul claro) apresenta uma transição de solo para o basalto alterado, que vai até aproximadamente 10 m. Na terceira camada (multicolorida) é possível observar uma heterogeneidade da litologia, que possui uma velocidade de propagação comparável à do basalto.

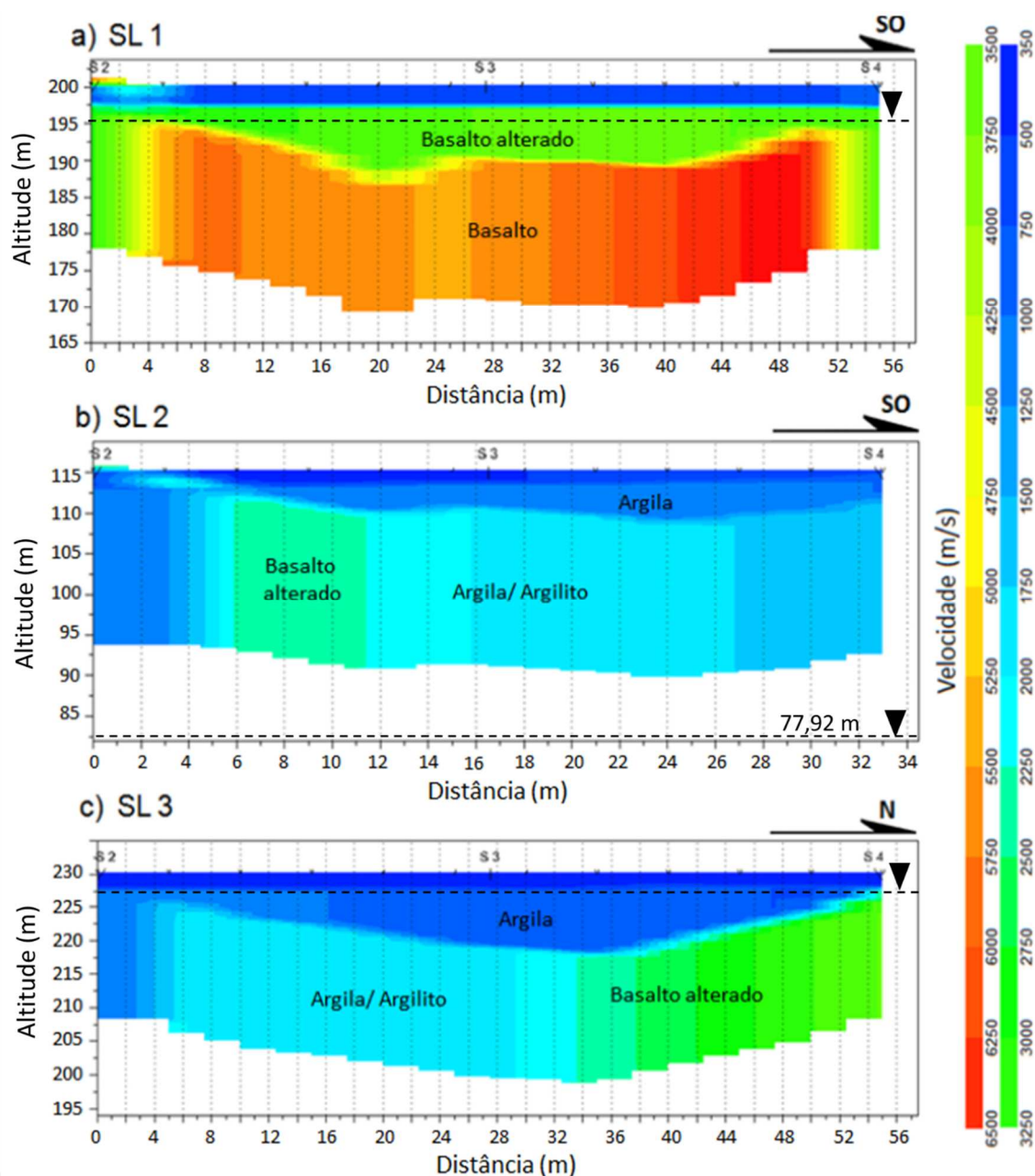


Figura 5.5: Levantamentos sísmicos realizados no município de Santa Cruz do Sul.

Para o levantamento SL 2, os intervalos das velocidades tabeladas de propagação das ondas P, Tabela 3.1, são de 350 até 500 m/s (solo), de 1000 até 1250 m/s (argila) e de 1750 até 2000 m/s (argila /argilito). A primeira camada (azul escuro) constitui o manto de intemperismo e apresentou uma profundidade de aproximadamente 1 m. A segunda camada (azul claro) apresenta um solo argiloso até 4 m de profundidade, a qual está sotoposta à terceira camada, que apresenta velocidade de propagação comparável ao do argilito.

Para o levantamento SL 3, conforme valores tabelados de velocidade de onda P foi possível sugerir que os intervalos de 350 m até 500 m/s sejam de solo, formando a primeira camada (azul escuro), que constitui o manto de intemperismo e atinge cerca de 2,5 m de profundidade nesse caso. O intervalo seguinte, de 1000 até 1250 m/s (camada azul claro), indica a presença de argila, que vai até 10 m de profundidade. Por fim, a terceira camada multicolorida apresenta intervalos de velocidade de propagação de 2000 até 2250 m/s (azul turquesa) e 2750 até 3000 m/s (verde), comparável a uma transição de basalto alterado e/ou argilito para argila.

5.2.2. Levantamentos sísmicos no município de Candelária

De acordo com os perfis dos levantamentos sísmicos analisados, no município de Candelária, apresentados na Figura 5.6, é sugerida uma semelhança de estratos devido à proximidade dos levantamentos sísmicos e, também às formações geológicas locais. Sendo assim, foi possível analisar os levantamentos, agrupando CL 1 com CL 5 e CL 2 com CL 3 e CL 4.

Os levantamentos CL 1 e CL 5, estão localizados muito próximos e, conforme mostrado no mapa de formação geológicas, já apresentado na Figura 4.2, elas fazem parte da mesma formação. Sendo assim, com base na Tabela 3.1, que apresenta as velocidades de propagação das ondas P, é possível identificar uma camada de solo de até 4 m aproximadamente (azul escuro). O intervalo seguinte, de 2000 até 2250 m/s (azul claro), sugere a presença de argila, que vai até aproximadamente 12 m de profundidade. Por fim, a terceira camada apresenta intervalos de velocidade de propagação de 3750 até 4000 m/s (camada verde), comparável com as rochas sedimentares (arenito).

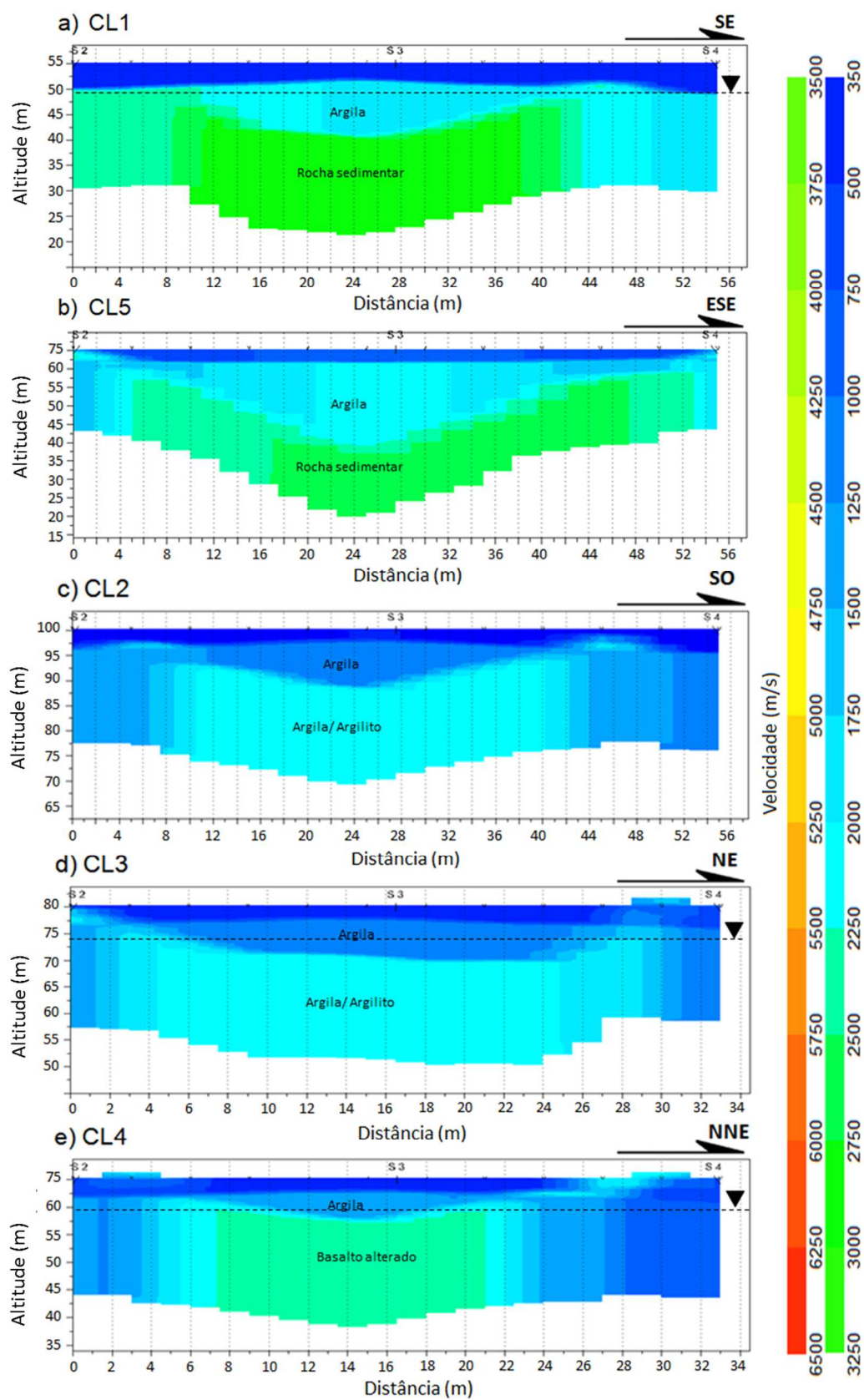


Figura 5.6: Levantamentos sísmicos realizados no município de Candelária.

Os levantamentos CL 2, CL 3 e CL 4, com base nas velocidades tabeladas de propagação das ondas P apresentam grande semelhança. Para esses casos, o manto de intemperismo atingiu aproximadamente 3 m. As segundas camadas têm velocidades compatíveis à da argila com intervalo de velocidade da onda P, de 2000 até 2250 m/s (azul claro) e estende-se até 10 m. As terceiras camadas visíveis nos mapeamentos apresentam velocidades, que sugerem argilito e argila.

5.2.3. Levantamentos sísmicos na Região da Quarta Colônia

Os levantamentos sísmicos da Região da Quarta Colônia são apresentados na Figura 5.7. A análise dos resultados foi realizada de maneira semelhante à realizada no município de Candelária. Sendo assim, foi possível agrupar os levantamentos QL 2 com QL 5 e QL 1, QL 3 com QL 4. Para os levantamentos QL 2 e QL 5, com base na, Tabela 3.1, as velocidades de propagação das ondas P, tem-se a primeira camada (azul escuro) constituindo o manto de intemperismo que atinge aproximadamente 2 m de profundidade e abrange o intervalo de velocidade de onda P de 350 até 500 m/s formando o solo. Nas camadas seguintes essa semelhança acaba. O motivo principal para isso é a altitude, pois enquanto QL 2 está a 470 m de altitude, QL 5 está a 80 m. Isso acontece porque, a segunda camada de QL 2 (amarela), apresenta uma transição de solo para o basalto alterado, que vai até aproximadamente 12 m, e na sequência, há basalto na terceira camada com intervalos de velocidade de onda P de 6000 até 6250 m/s. Basalto esse, que pertence à formação Serra Geral. Na segunda camada do mapeamento QL 5, é possível observar o intervalo de 2000 até 2250 m/s, para velocidade de onda P, condizente com cascalho (perto da superfície). Essa camada encontra-se sotoposta à terceira camada com velocidades de onda P no intervalo entre 5000 até 5250 m/s, que sugere a presença de arenito, provavelmente, da formação Botucatu. Outro aspecto importante no caso dos levantamentos QL 2 e QL 5 é homogeneidade litológica, que confere ao basalto em QL 2 boas características para o confinamento de reservatórios, já em QL 5 a homogeneidade do arenito reforça características típicas de antigos desertos com granulometrias uniformes, que deram origem à formação Botucatu.

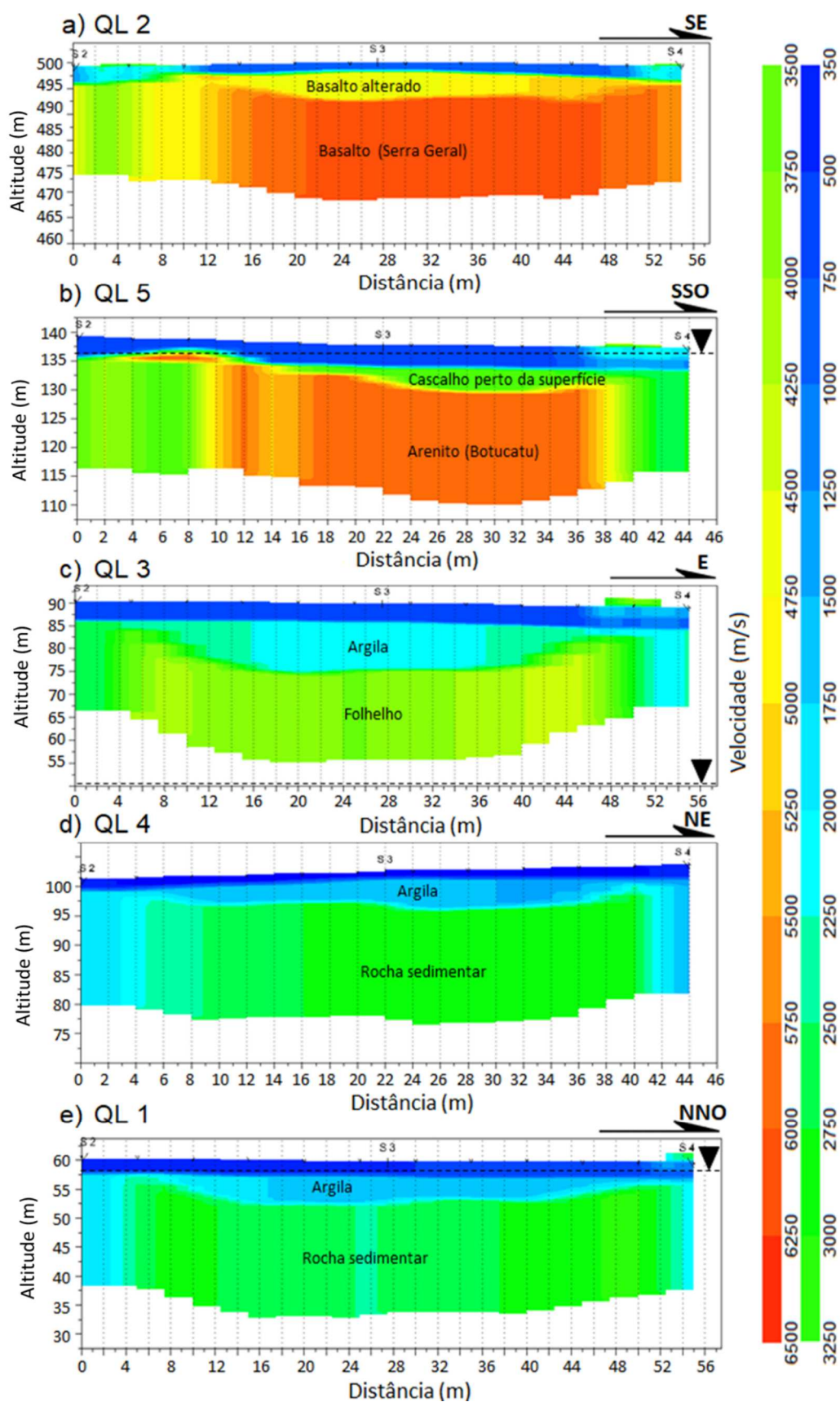


Figura 5.7: Levantamento sísmico realizados na região da Quarta Colônia.

Para os levantamentos QL 1, QL 3 e QL 4, com base nas velocidades tabeladas de propagação das ondas P, temos a presença de uma pequena camada de solo de aproximadamente 4 m, seguida de uma pequena zona de transição argilosa, que encontra o arenito em QL 1 e em QL 4, e o folhelho em QL 3. Essas rochas sugerem a existência de bons reservatórios subterrâneos, pois apresentam grande permeabilidade e porosidade, no caso do folhelho são pouco porosos.

5.2.4. Levantamentos sísmicos no município de Alegrete

As principais estruturas responsáveis pela compartimentação dos reservatórios de água subterrânea no estado do Rio Grande do Sul são as falhas regionais, já citadas na seção 3.1.4, conhecidas como: Dorsal de Canguçu, Jaguari-Mata e Terra de Areia-Posadas. Geologicamente, a parte oeste do estado é afetada particularmente pela falha Jaguari-Mata. Assim, é provável que se observe características diferentes daquelas encontradas nas regiões analisadas anteriormente.

Diferentes características hidrogeológicas sugerem que a origem da água também seja distinta. Por isso, uma investigação das condições de vulnerabilidade, na região, pode contribuir com a preservação de áreas mais suscetíveis a contaminação.

Os levantamentos sísmicos realizados na região de Alegrete são apresentados na Figura 5.8. Os levantamentos AL 1, AL 3 e AL 4, com base na Tabela 3.1, as velocidades de propagação das ondas P apresentam grande semelhança. Para esses casos, o manto de intemperismo atinge aproximadamente 2 m. As segundas camadas têm velocidades compatíveis à de basalto alterado com intervalo de velocidade da onda P entre 4250 até 4500 m/s (verde claro) e estende-se até 20 m. As terceiras camadas visíveis nos levantamentos apresentam velocidades, que sugerem rocha basáltica com intervalo de velocidade da onda P de 6000 até 6500 m/s (vermelho).

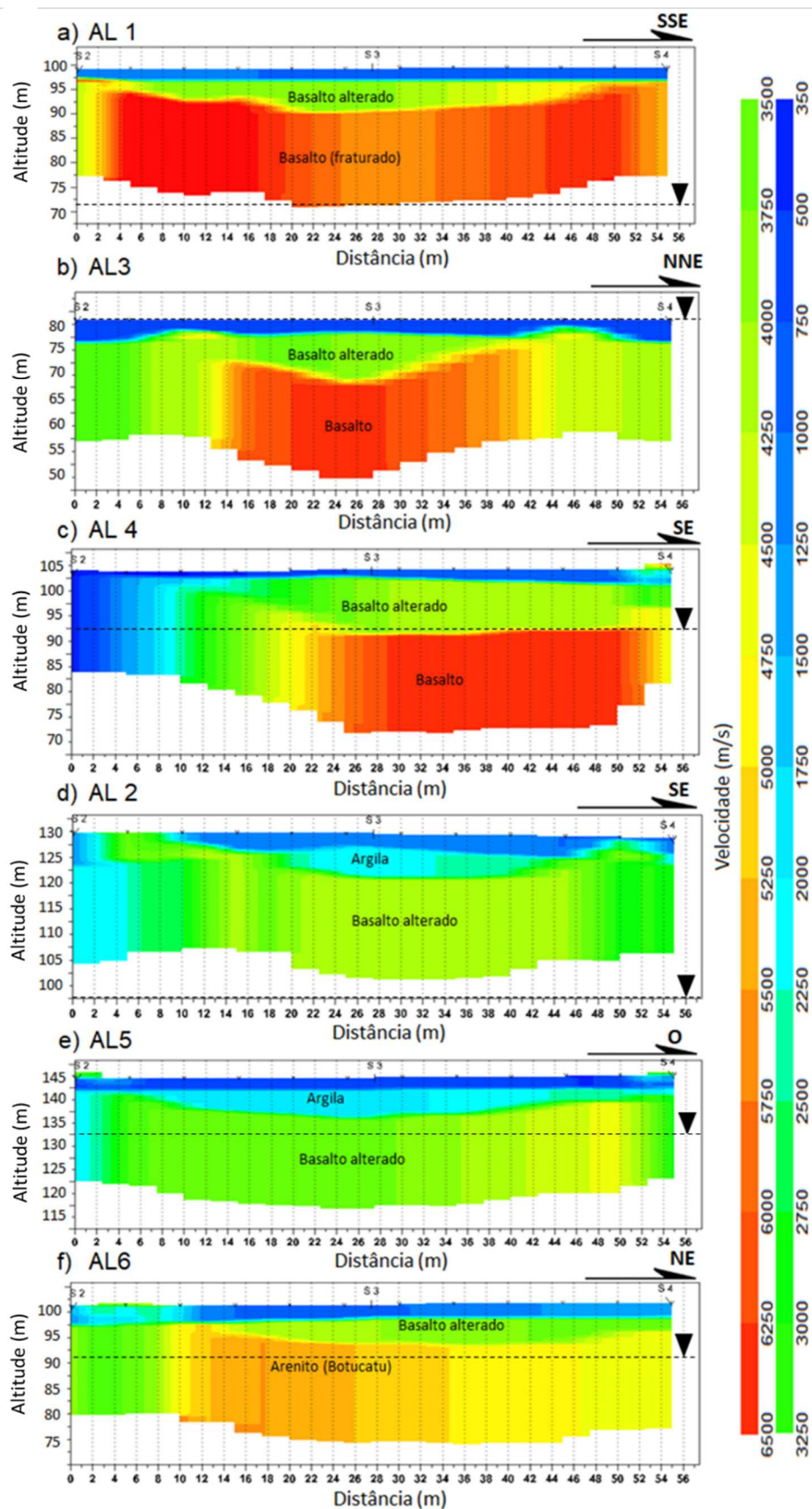


Figura 5.8: Levantamentos sísmicos realizados no município de Alegrete.

Um comportamento semelhante pode ser observado nos levantamentos AL 2 e AL 5. Para esses casos, o manto de intemperismo atingiu aproximadamente 2,5 m. As segundas camadas têm velocidades compatíveis à argila com intervalo de velocidade da onda P, de 2000 até 2250 m/s (azul claro) e estende-se até 15 m. As terceiras camadas visíveis nos levantamentos apresentam velocidades, que indicam alteração de basalto com intervalo de velocidade da onda P entre 4250 até 4500 m/s (verde claro).

O levantamento sísmico AL 6, por sua vez, assemelha-se muito aos levantamentos AL 2 e AL5, exceto por apresentar uma segunda camada de argila no lugar da alteração de basalto. Sua camada seguinte também apresenta maior velocidade de propagação da onda P, além de variar entre 4750 até 5250 m/s (amarelo e laranja) o que indica uma camada heterogênea.

5.3. Análise dos cortes geológicos obtidos com os registros sísmicos

A comparação entre os perfis sísmicos de subsuperfície, com as correções altimétricas, na região de Santa Cruz do Sul, possibilitou observar uma semelhança entre os perfis sísmicos SL 2 e SL 3, que apresentou um considerável espessamento da segunda camada em SL 3, que, como já foi descrito, sugere ser argila. Isso pode ser provocado pelas modificações de intemperismo sofridas pela formação Serra Geral. O corte e sua orientação são mostrados na Figura 5.9. O perfil SL 1, mais ao norte, apresenta em sua subsuperfície características mais rochosas pelo que sugere as velocidades de propagação da onda P, isso confirma a presença da formação Serra Geral.

As regiões, que aparecem granuladas, na imagem, representam as regiões extrapoladas a partir dos centros de cada registro sísmico.

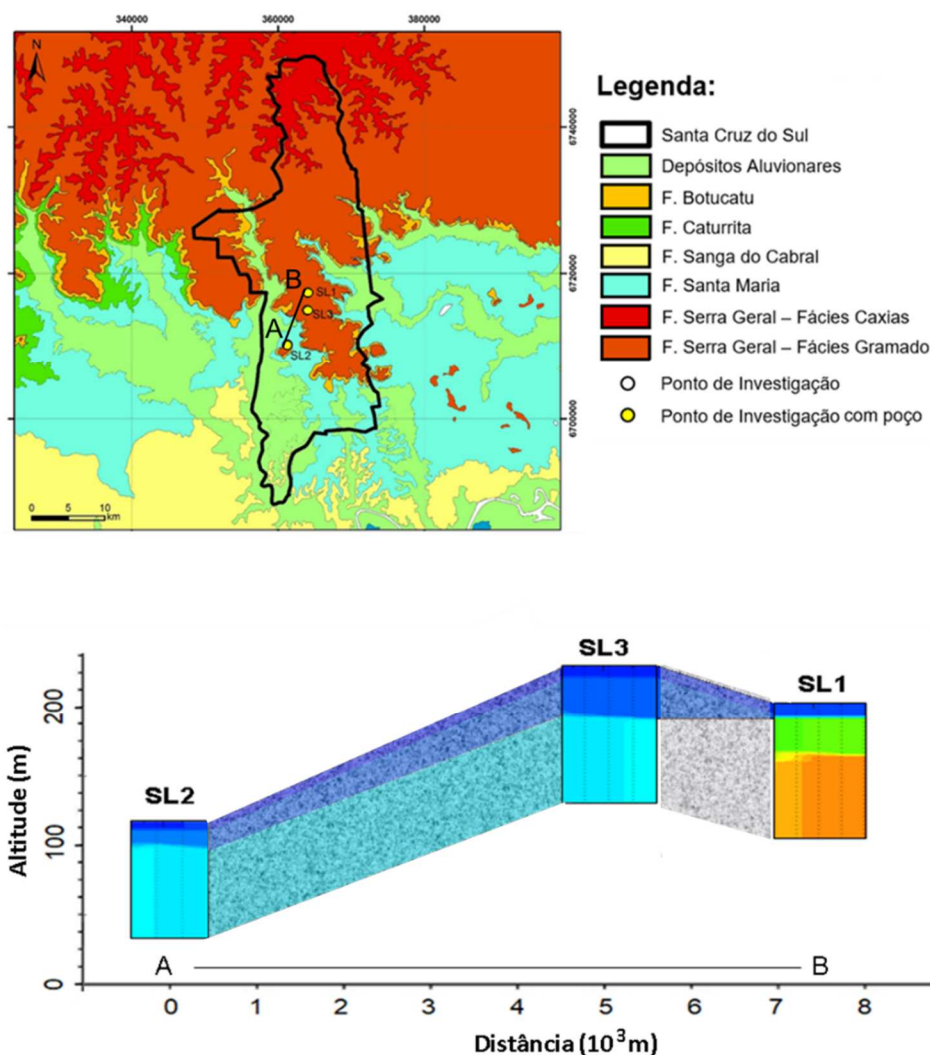


Figura 5.9: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Santa Cruz do Sul.

Conforme pode ser observado, no corte geológico, da região de Candelária, mostrados na Figura 5.10, já com as correções altimétricas realizadas, os levantamentos sísmicos CL 2 e CL 3 apresentaram grande semelhança e comprovaram as formações geológicas ilustradas no mapa. Os perfis CL 4, CL 1 e CL 5 apresentam boa semelhança. Porém foram observadas variações de profundidade, além de uma gradual mudança na velocidade de propagação da onda P, na terceira camada, o que sugere uma rocha sedimentar provavelmente da formação Caturrita.

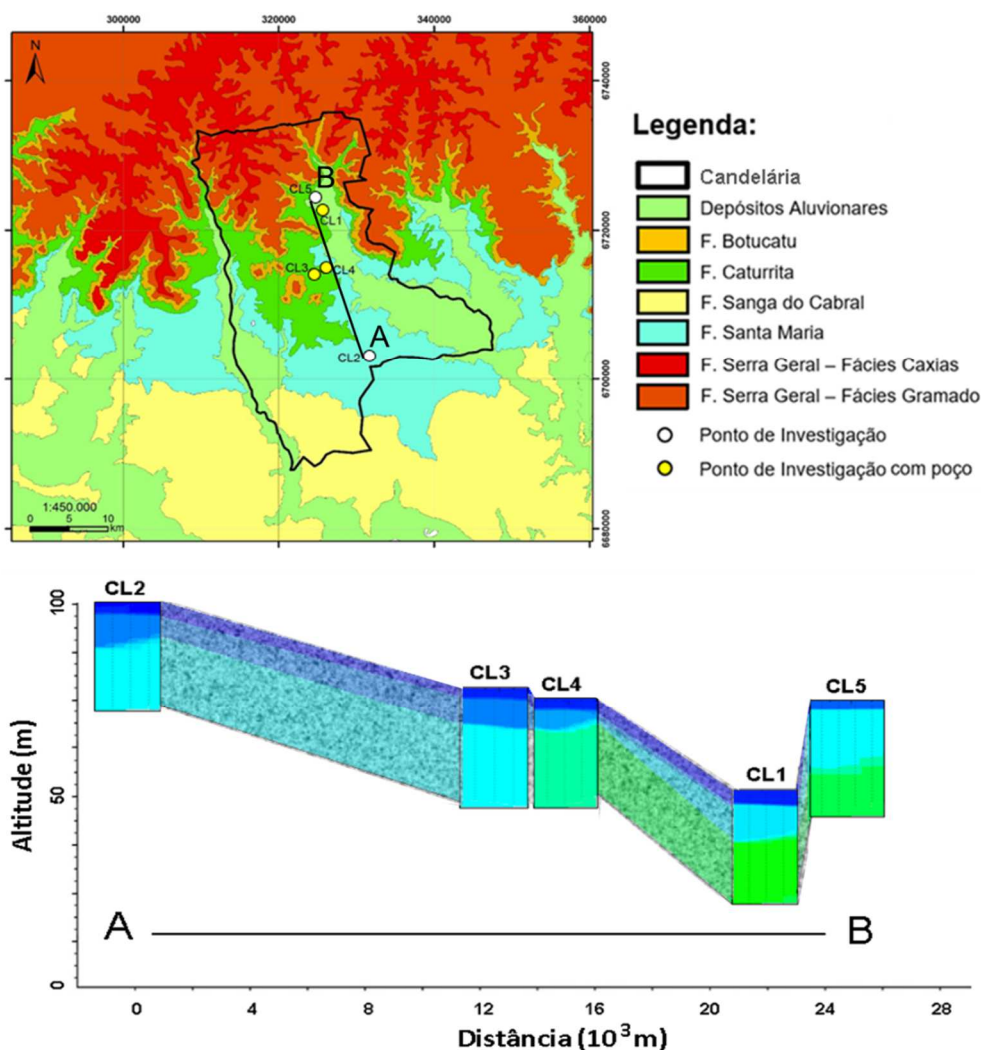


Figura 5.10: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Candelária.

Para montar o corte geológico, da região da Carta Colônia, já levando-se em consideração as correções altimétricas, de modo que os levantamentos sísmicos estivessem o mais próximo possível do segmento AB, o perfil QL 2 não foi considerado, além disso este é o único ponto a 500 m de altitude, seguido do QL 5 com 140 m de altitude. Como é possível observar, no corte geológico, com as correções altimétricas, esse ponto do perfil, apresenta grande velocidade, na terceira camada, típicas de arenito. Essa característica, também pode ser observada no mapa de formações geológicas, como na formação Botucatu. Os levantamentos sísmicos de subsuperfície QL 1, QL 3 e QL 4, apresentaram uma grande semelhança estratigráfica entre si. A Figura 5.11 mostra o corte geológico e sua orientação.

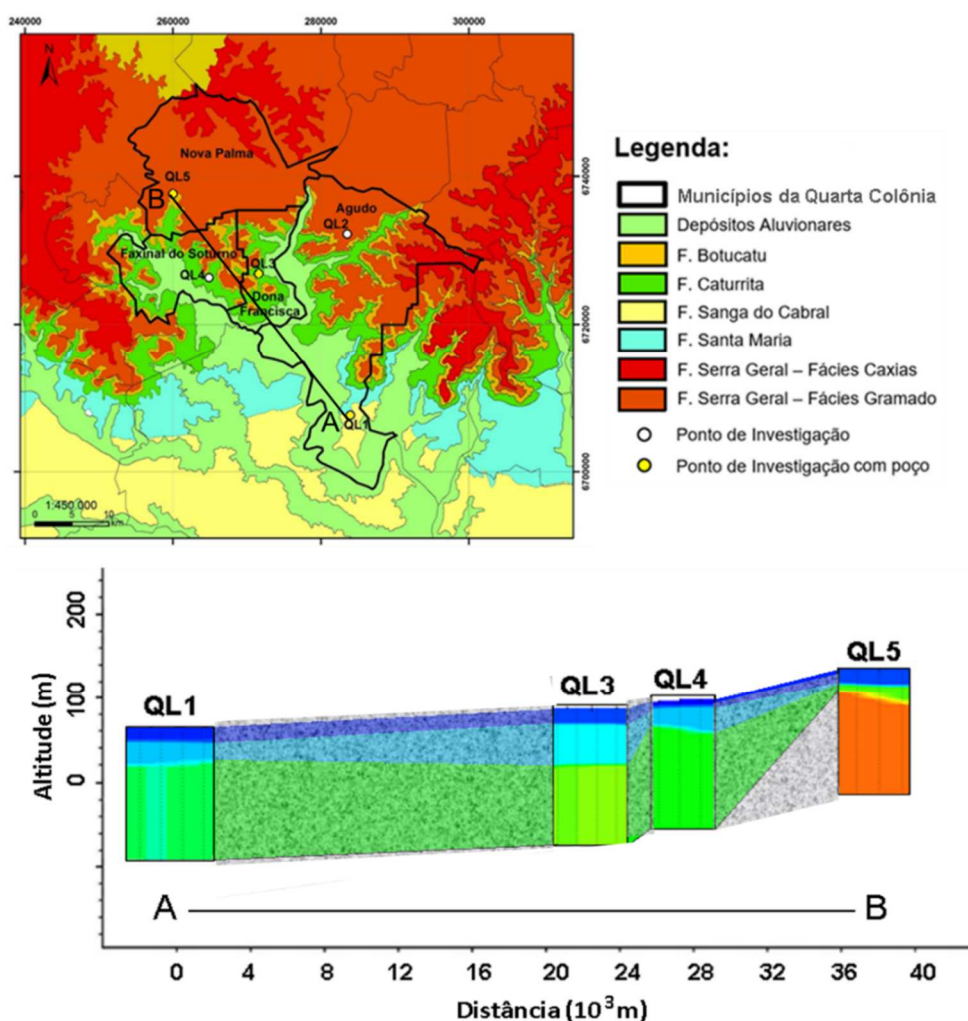


Figura 5.11: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados na Quarta Colônia.

O corte geológico elaborado com os levantamentos sísmicos adquiridos em Alegrete pode ser observado na Figura 5.12, já com as correções altimétricas realizadas. As posições onde cada um foi adquirido estão representadas como AL 1, AL 2, AL 3, AL 4, AL5 e AL 6.

Os perfis AL 3 e AL 4, não foram aproveitados no corte geológico, porque estão fora da linha de corte AB. Os levantamentos AL 6 e AL 1 apresentam grande semelhança e suas terceiras camadas também sugerem a existência de rochas basáltica com velocidades de propagação da onda P bastante elevadas, além disso, no mapa de formações geológicas é possível notar que a Serra Geral (Fácies Alegrete) está a oeste. Da mesma maneira é possível observar nos levantamentos

AL 2 e AL 5, uma boa semelhança estratigráfica dos levantamentos sísmicos e novamente uma comprovação, na terceira camada, de Depósitos Aluvionares, conforme está ilustrado no mapa de formações.

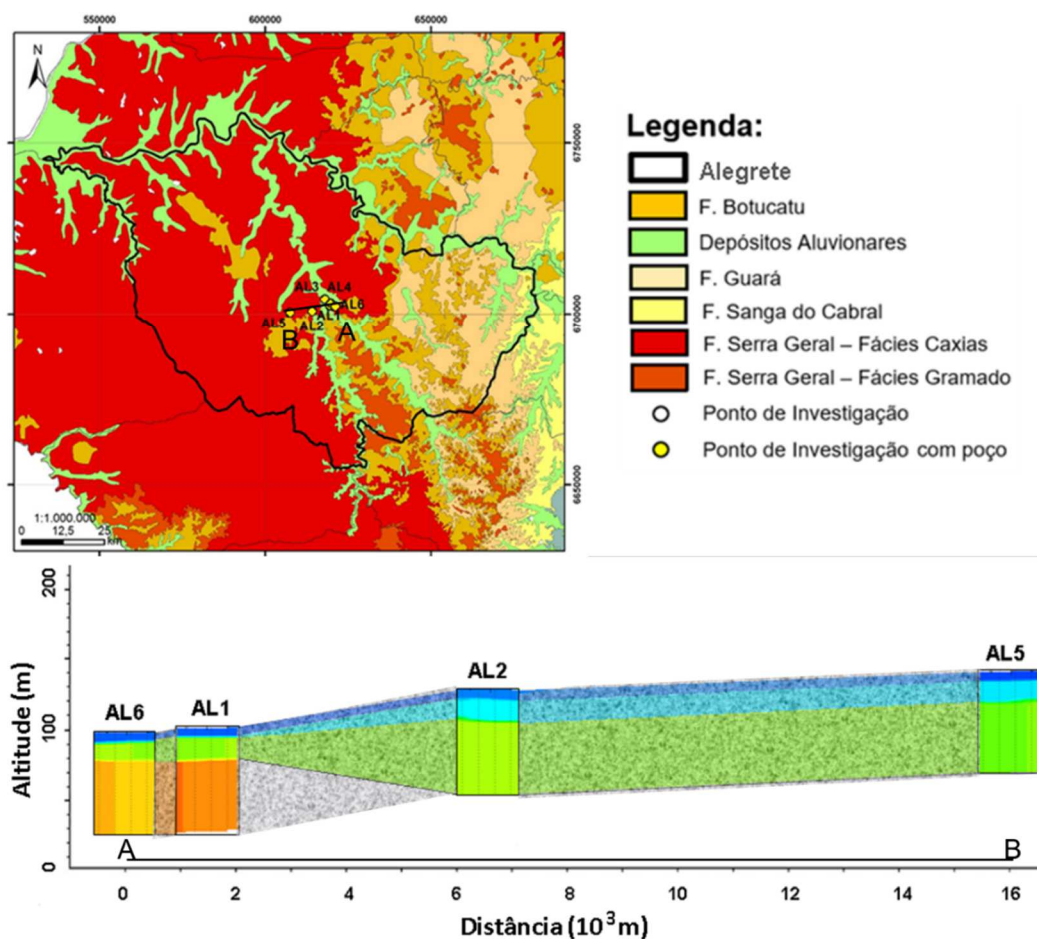


Figura 5.12: Ilustração de um corte geológico (A-B) baseado nos levantamentos sísmicos realizados em Alegrete.

5.4. Determinação do grau de vulnerabilidade

A seguir são apresentados os resultados obtidos pela aplicação o método VSR nas regiões onde foram feitos os levantamentos sísmicos, bem como a discussão dos valores da vulnerabilidade obtidos para cada localidade.

5.4.1. Resultados do grau de vulnerabilidade usando método GOD

O índice de vulnerabilidade dos poços, presentes nas regiões de estudo, foi também calculado com a aplicação do método GOD. Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados da aplicação do método GOD nos poços locais existentes nos levantamentos sísmicos.

	Linha Sísmica	G	Grau conf.	O	Zona insaturada	D	Nível freático	GOD	Grau
Santa Cruz do Sul	SL1	0.6	livre	0.6	basalto	0.8	8.62	0.29	baixo
	SL2	0.4	semi confinado	1	argilito	0.5	77.92	0.20	baixo
	SL3	0.2	confinado	0.5	solo arg.	0.9	2.60	0.09	Insignif.
Candelária	CL1	0.6	livre	0.6	rocha decomp.	0.8	6,00	0.29	baixo
	CL2							-	perf. Inc.
	CL3	0.4	semi confinado	0.5	siltito branco	0.8	5.50	0.16	baixo
	CL4	0.4	semi confinado	0.5	siltito arg.	0.8	5.50	0.16	baixo
	CL5							-	perf. Inc.
Quarta Colônia	QL1	0.6	livre	0.5	solo arg.	0.9	2.13	0.27	baixo
	QL2							-	sem perf.
	QL3	0.6	livre	0.5	folhelho	0.6	42.35	0.18	baixo
	QL4							-	sem perf.
	QL5	0.6	livre	0.7	seixos	1	0.90	0.42	médio
Alegrete	AL1	0.6	livre	0.7	basalto frat.	0.6	28.20	0.25	baixo
	AL2	0.6	livre	0.6	basalto	0.6	33.44	0.22	baixo
	AL3	0.2	confinado	0.6	basalto alt.	1	0	0.12	baixo
	AL4	0.6	livre	0.7	basalto	0.7	12	0.29	baixo
	AL5	0.6	livre	0.6	basalto	0.7	13	0.25	baixo
	AL6	0.6	livre	0.7	basalto alt.	0.8	9.57	0.34	médio

Os locais de levantamentos sísmicos CL 2 e CL 5 de Candelária, não dispõem de perfis de poços, e QL 2 e QL 4 da Quarta Colônia, apresentam perfis de poços incompletos, por isso, não foram calculados.

Os resultados acima serão utilizados na sequência para comparação com o método de VSR.

5.4.2. Resultados do grau de vulnerabilidade usando o novo método VSR

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para verificar a independência dos parâmetros propostos para utilização na Equação 4.1 do método proposto: nível freático (NE), espessura do solo (E), tipo de litologia (L) e topografia (T). A seguir, na Tabela 5.2 é apresentada a matriz de correlação.

Tabela 5.2: Resultados do coeficiente de correlação de Pearson obtidos.

	NE	E	L	T
NE	1	-0.31122	0.007575	0.154466
E		1	0.339535	0.016046
L			1	-0.26621
T				1

A matriz de correlação dos parâmetros utilizados indica que não está ocorrendo qualquer superposição significativa dos seus efeitos. Analisando os coeficientes de correlação dos pares, percebemos que NE e L e E, T apresentam correlação ínfima e positiva, NE e T, E e L, apresentam uma correlação fraca e positiva, enquanto que NE e E, L e T, apresentam correlação fraca e negativa.

Dessa forma conclui-se que a utilização dos parâmetros na equação do método proposto é adequada, uma vez que não ocorre sobreposição dos efeitos das propriedades.

Os resultados obtidos com o método VSR, referem-se inicialmente à posição central do arranjo sísmico. O grau de vulnerabilidade calculado, bem como as grandezas observadas e os índices correspondentes a cada uma, podem ser observados na Tabela 5.3, na coluna da direita. Dessa maneira, foi possível verificar, conforme atribuições feitas pela escala do grau de vulnerabilidade, descritas no

Capítulo 4, a variabilidade de cada local de estudo. De acordo com a escala proposta no método VSR, as localidades grifadas de vermelho (VSR entre 76 a 100) indicam uma alta vulnerabilidade, seguido das localidades grifadas em amarelo (VSR entre 51 a 75), que revelam as localidades de média vulnerabilidade. O estudo também revelou um local de baixa vulnerabilidade grifado em verde (VSR entre 26 a 50) e dois casos (SL 2 e QL 3) com VSR igual a 51, ou seja, por pouco não ficou com grau de baixa vulnerabilidade pela escala adotada.

Tabela 5.3: Apresentação dos resultados obtidos com o método VSR para uma posição do levantamento sísmico.

LINHA	I _{NE}	N.E.	I _p	Espessura solo	I _{vp}	Tipo de litologia VP	I _T	Topografia	VSR
SL1	8	8,62 m	8	10m	2	basalto alterado	10	plana	70
SL2	1	77,92 m	9	2m	6	argila	8	0,5m	51
SL3	9	2,60 m	8	10m	6	argila	10	plana	82
CL1	8	6,00 m	7	12,5m	6	argila	10	plana	75
CL2	-	-	8	10m	-	-	10	plana	-
CL3	8	5,50 m	8	10m	6	argila	10	plana	78
CL4	8	5,50 m	8	7,5m	6	argila	10	plana	78
CL5	-	-	5	25m	-	-	10	plana	-
QL1	9	2,13m	8	7,5m	6	argila	8	0,5m	80
QL2	-	-	8	7,5m	-	-	8	2m	-
QL3	2	42,35m	7	15m	7	folhelho	8	2m	51
QL4	-	-	9	5m	-	-	8	2,5m	-
QL5	9	0,90 m	8	6,5m	8	cascalho	8	2,5m	84
AL1	4	28,20 m	8	10m	10	basalto (fraturado)	10	plana	70
AL2	3	33,44m	8	7,5m	2	basalto alterado	10	plana	50
AL3	10	0 m	8	10m	2	basalto alterado	10	plana	78
AL4	7	12 m	7	14,5m	1	basalto	10	plana	61
AL5	7	13 m	8	7,5m	2	basalto alterado	10	plana	66
AL6	5	9,57 m	8	7m	3	arenito	10	plana	60
VSR de 10 até 25			VSR de 26 até 50			VSR de 51 até 75			VSR de 76 até 100

O método VSR, no entanto, apresenta sua principal característica, quando é levado em consideração a variabilidade longitudinal. Os levantamentos sísmicos de

subsuperfície possibilitam observar as nuances dos estratos permitindo conhecer suas espessuras. Dessa maneira, pode-se medir, por exemplo, a espessura do solo em diferentes posições. Esse parâmetro da expressão, que determina a VSR, é o único, que contribui na variação longitudinal para a determinação do grau de vulnerabilidade usando a sísmica de refração. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos após aplicação do método VSR em sete posições diferentes (três para cada lado, a partir do centro do arranjo sísmico, que está grifado em negrito).

Tabela 5.4: Apresentação dos resultados obtidos com o método VSR para sete posições do levantamento sísmico.

Linha	VSR 1	VSR 2	VSR 3	VSR	VSR 4	VSR 5	VSR 6
SL1	70	67	67	70	70	70	70
SL2	51	51	51	51	51	51	51
SL3	82	82	82	82	79	79	82
CL1	75	75	75	75	75	75	75
CL2	-	-	-	-	-	-	-
CL3	78	78	78	78	75	75	78
CL4	81	81	78	78	81	81	81
CL5	-	-	-	-	-	-	-
QL1	83	80	80	80	80	80	83
QL2	-	-	-	-	-	-	-
QL3	54	51	51	51	51	51	54
QL4	-	-	-	-	-	-	-
QL5	87	87	87	84	84	84	84
AL1	70	70	70	70	70	70	70
AL2	53	53	53	50	50	50	53
AL3	78	78	78	78	78	81	81
AL4	67	64	61	61	61	61	61
AL5	69	66	66	66	66	69	69
AL6	63	63	60	60	60	60	60
VSR de 10 até 25		VSR de 26 até 50		VSR de 51 até 75		VSR de 76 até 100	

Conforme, pode ser observado houve uma variação nos valores de VSR ao se modificar, longitudinalmente, a posição de medida da espessura de solo. Não houve, porém, grandes modificações de cores, longitudinalmente, mas isso é resultado dos intervalos adotados na metodologia, que estão na última linha da tabela.

5.4.3. Comparação entre o grau de vulnerabilidade obtido pelos métodos VSR e GOD

A presente secção tem a finalidade de discutir os diferentes resultados alcançados na determinação do grau de vulnerabilidade usando o método GOD e o método proposto, chamado VSR.

Cabe salientar, inicialmente, que não é uma questão de avaliar se os métodos estão certos ou errados, e sim, de evidenciar características geológicas, que são mais e menos suscetíveis à contaminação e representá-las em uma escala numérica. Cada método de estudo emprega diversos parâmetros geológicos para determinar ou mapear a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero. Mesmo assim, fornecem resultados parciais, pois não contemplam parâmetros hidroquímicos.

Com essa ressalva, os resultados obtidos resultaram semelhanças nos pontos AL 2 e AL 6, além de valores limítrofes em SL 1, SL 2, QL 3 e AL 4.

Para SL1 e AL 4, o valor de vulnerabilidade 0,29, na escala do método GOD é classificado como baixo, porém esse intervalo termina em 0,30, a partir daí, é classificado como vulnerabilidade média e, portanto, corresponderia a mesma classificação adotada no método VSR.

Para SL 2 e QL 3, o valor de vulnerabilidade 51, na escala do método VSR é classificado como médio, também é nesse valor que inicia o intervalo para essa classificação, ou seja, muito perto da classificação de baixa vulnerabilidade, que corresponderia a mesma dada pelo método GOD.

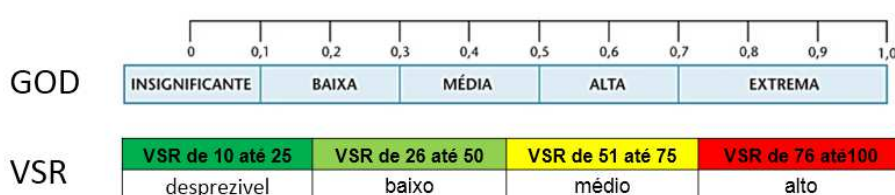
Em contraste aos resultados anteriores, não corresponderam a mesma classificação SL 3, CL 3, CL 4, QL 1, AL 3, AL 5. A causa disso é atribuída ao peso dado, no método VSR, ao nível freático (NE), pois nesses locais ele encontra-se a menos de 10 m da superfície. Tal condição evidencia a suscetibilidade do reservatório a contaminantes.

Conforme o método VSR, o resultado de vulnerabilidade no ponto AL 1 é médio e, conforme o método GOD é baixo. Porém o basalto fraturado (camada multicolorida), que pode ser observada em seu levantamento sísmico torna o local mais suscetível a infiltração de contaminantes ao reservatório. Nesse caso, o resultado obtido com o método VSR representa melhor a realidade local.

O resultado de vulnerabilidade no ponto CL 1, conforme o método VSR é médio e, conforme o método GOD é baixo. Porém, quando observamos o nível freático de 6 m da superfície fica evidente sua suscetibilidade, portanto o método VSR, neste caso, também representa melhor a condição de vulnerabilidade local. A Tabela 5.5 apresenta os resultados descritos.

Tabela 5.5: Apresentação dos resultados de comparação entre o método GOD e o VSR.

Local	GOD		VSR		Análise	Motivo
	Índice	Grau	Índice	Grau		
SL1	0.29	baixo	70	médio	✓	Limite sup. GOD
SL2	0.09	baixo	51	médio	✓	Limite inf. VSR
SL3	0.45	insignificante	82	alto	✗	NF (2.6 m)
CL1	0.29	baixo	75	médio	✓	Limite sup. GOD
CL2	-	-	-	-	✗	Perfil incomp.
CL3	0.08	baixo	78	alto	✗	NF (5.5 m)
CL4	0.08	baixo	78	alto	✗	NF (5.5 m)
CL5	-	-	-	-	✗	Perfil incomp.
QL1	0.27	baixo	80	alto	✗	NF (2.0 m)
QL2	-	-	-	-	✗	Não tem NF
QL3	0.18	baixo	51	médio	✓	Limite inf. GOD
QL4	-	-	-	-	✗	Não tem NF
QL5	0.42	médio	84	alto	✗	NF (0.9 m)
AL1	0.25	baixo	70	médio	✗	Basalto fraturado
AL2	0.22	baixo	50	baixo	✓	ok
AL3	0.12	baixo	78	alto	✗	NF (0.0 m)
AL4	0.29	baixo	61	médio	✓	Limite sup. GOD
AL5	0.25	baixo	66	médio	✗	NF (13.0 m)
AL6	0.34	médio	60	médio	✓	ok



- ✓ Coincidem
- ✓ Limite da escala
- ✗ Não coincidem
- ✗ Perfil incompleto
- ✗ Não tem perfil

Cabe ressaltar a importância das observações de campo feitas durante as aquisições de dados. Elas contribuíram com informações, que auxiliaram a estabelecer características locais presentes, como por exemplo, a declividade do terreno, o tipo de rocha aflorante no local e a composição do solo evitando subjetividades. Outro ponto de notável relevância para o trabalho foi a análise detalhada e criteriosa das inversões sísmicas realizadas após à aquisição, pois esse momento proporcionou o cruzamento e a interpretação dos resultados obtidos com as observações locais.

CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

6.1. Conclusões

A técnica de varredura sísmica, utilizando o equipamento RAS-24, mostrou-se potencialmente capaz para registrar características físicas acústicas, que permitem sugerir as litologias de subsuperfície. Também é muito prática de se lidar devido a sua mobilidade em locais distantes. Os registros puderam ser realizados, rapidamente, assim como o processamento de dados, bastando um breve treinamento.

As interpretações dos dados sísmicos foram realizadas levando-se em conta informações a priori dos locais de aquisição e são descritas a seguir.

A ordem da estratigrafia presenciadas nos levantamentos sísmicos de Santa Cruz do Sul possibilitaram inferir que locais como SL 3 apresentam uma relativa proteção natural de suas águas subterrâneas rasas. Outros estudos também afirmam que a formação Botucatu é constituída por rochas sedimentares areníticas de granulometria fina a média e apresenta baixa porosidade no seu contato superior com os basaltos da formação Serra Geral, onde os arenitos tornam-se bastante silicificados, endurecidos e com reduzida porosidade [90]. Possíveis falhas e fraturas, no entanto, existentes na formação sotoposta, observadas no levantamento sísmico, podem formar a porta de entrada para contaminantes.

Por outro lado, reservatórios rasos de água subterrânea localizados nas posições SL 1 e SL 2 são mais protegidos de possíveis contaminações externas naturalmente. Isso devido aos estratos sotopostos ao manto de intemperismo, que se trata de argila e argilito originários da formação Santa Maria. Casos semelhantes foram observados no município de Candelária.

Os levantamentos realizados na região da Quarta Colônia apresentam características, que sugerem rochas sedimentares, provavelmente da formação Caturrita e Botucatu. Mais a oeste, no município de Alegrete, as velocidades encontradas sugerem a existência de rochas como o basalto em todos levantamentos, o que era esperado devido à formação geológica da região.

As informações apresentadas pelos registros sísmicos locais, quando comparadas com as descrições geológicas dos poços disponíveis, corroboraram, satisfatoriamente. Dessa maneira, a sísmica de refração pode ser empregada como uma aliada potencial, na análise da variabilidade local, em questões importantíssimas como a quantificação da vulnerabilidade de reservatórios de água subterrânea.

A comparação entre os métodos GOD e VSR encontrou resultados diferentes, essa característica não está fora do esperado, pois outros estudos também encontraram discrepâncias entre os resultados obtidos com diferentes métodos para o mesmo local. Tal situação, evidencia que os métodos de vulnerabilidade usam parâmetros geológicos, que são mais e menos suscetíveis à contaminação que outros.

O método proposto neste trabalho permitiu estimar a variabilidade local da vulnerabilidade a partir de características geológicas dos registros sísmicos obtidos. Assim, foi possível determinar regiões mais suscetíveis à propagação de contaminantes de origem antrópica.

Na depressão central do Estado do Rio Grande do Sul, próximo ao rebordo da Serra Geral, concentra-se inúmeras cidades, que baseiam sua economia na agricultura dos mais variados cultivos e na pecuária. Nessa região, também são encontradas áreas de recarga e de afloramento, locais de maior vulnerabilidade para aquíferos subterrâneos. Tendo em vista esse problema, o estudo pode sinalizar zonas, que mereçam maiores cuidados de preservação, como são os casos dos locais SL 3, CL 3, CL 4, QL 1, QL 5 e AI 3. Nesses locais, o grau de vulnerabilidade calculado revelou-se alto. O valor elevado inferido pelo método proposto sugere que esse resultado se deva à baixa profundidade do nível hidrostático, que variou de zero a cinco metros aproximadamente. A Figura 6.1 apresenta os pontos de estudo com o respectivo grau de vulnerabilidade, segundo o método VSR.

O valor médio para o grau de vulnerabilidade foi verificado, em todas as regiões estudadas, nos locais indicados por SL 1, SL 2, CL 1, QL 3, AL 4, AL 5 e AL 6. Nesse caso, a combinação de níveis hidrostáticos mais profundos (aproximadamente 10 m), aliada a litologias de baixa permeabilidade (argila e basalto), diminuirão o valor da VSR encontrado. Isso permitiu considerar esses reservatórios subterrâneos menos propensos a contaminação.

O local identificado como AL 2, apresentou grau de vulnerabilidade baixo. Novamente a explicação reporta-se ao seu nível hidrostático, que é mais profundo (aproximadamente 33 m). Esse fato, provoca um efeito de atenuação dos contaminantes, uma vez que a camada insaturada atua como barreira física à sua passagem. Além disso, a formação geológica, sugerida pelos valores de velocidade de propagação da onda P é o basalto alterado. O índice adotado, no cálculo da VSR, para o tipo de litologia foi 2, que, ao ser comparado ao valor máximo da escala, mostra-se como um valor baixo.

Visão geral do grau de vulnerabilidade determinado pelo VSR

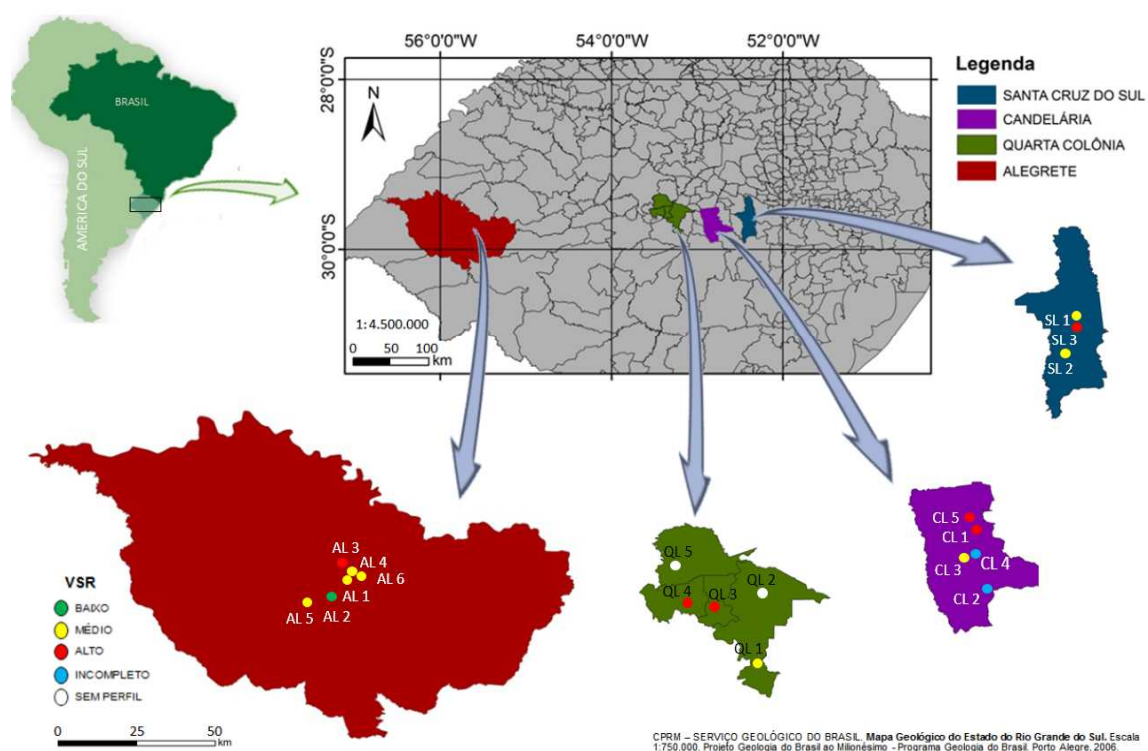


Figura 6.: Ilustração e identificação dos pontos com o grau de vulnerabilidade usando VSR.

O cálculo da VSR em diversos pontos do arranjo sísmico permitiu avaliar a variabilidade longitudinal da vulnerabilidade. Essa característica, do método proposto, garante uma obtenção de dados mais representativos da realidade da subsuperfície devido às suas nuances. Dependendo do estudo e/ ou da resolução longitudinal desejada, o arranjo sísmico pode ser alterado para se obter levantamentos mais longos ou mais profundos ou combinado para formar uma matriz de dados.

No que tange os cortes geológicos montados a partir dos levantamentos sísmicos de refração de cada local, foi possível verificar em todas as quatro regiões uma semelhança de estratigrafias entre os levantamentos próximos. Outro aspecto relevante refere-se à identificação das litologias, tanto nos mapas de formações geológicas como nos levantamentos sísmicos. Isso confirma a boa sensibilidade na diferenciação de impedância acústica oferecida pela sísmica de refração, além da possibilidade de auxiliar de maneira mais grosseira a análise do grau da vulnerabilidade de alguma região que não tenha registro sísmico de refração.

Apesar do cuidado na seleção dos parâmetros envolvido na determinação do grau de vulnerabilidade VSR, é importante certificar o método, isso pode ser realizado por análise química de marcadores, que simulem contaminantes usados na superfície, os quais possam ser identificados em subsuperfície.

6.2. Propostas Futuras

Com a intenção de fornecer um mapa, que apresente a variabilidade da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos subterrâneos, um aumento na distribuição dos registros sísmicos deve ser planejado. Isso possibilitaria o fornecimento de um mapa do grau de vulnerabilidade para cada município.

Aumentar o número de municípios estudados também vai contribuir com o fornecimento de mais informações regiões de vulnerabilidade. Assim, órgãos competentes poderão planejar e delimitar áreas de preservação ambiental.

O estudo contempla apenas aspectos físicos a respeito da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos livres, por isso, adicionar aspectos químicos e biológicos ligados à hidrologia, complementaria o trabalho. Nesse contexto, um ponto de grande importância diz respeito a confirmação e validação dos resultados encontrados com o

método VSR através de marcadores, que possam ser identificados quimicamente em águas subterrâneas.

Aquisições sísmicas orientadas, linear e geograficamente, facilitarão futuras montagens de cortes geológicos, assim como registros sísmicos mais profundos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Neto, J. V.; Santos, R. J. Q. dos; Wanderley, P. R. B. Revisão sobre Águas Subterrâneas, **Revista Águas Subterrâneas**, 16, p. 57–75, 2002.
- [2] Moutinho, S.; Faria, J.; Vasconcelos, C. **John Milne, the Man Who Mapped the Shaking Earth : Vida e obra de um dos pioneiros da sismologia**. In: 1º Encontro de História da Ciência no Ensino, Porto: Universidade do Porto, 2015.
- [3] Guiguer, N; Kohnke, M. W. **Métodos para Determinação da Vulnerabilidade de Aquíferos**. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais. São Paulo, 2002.
- [4] Silva, M. P.; Silva, L. R. da; Liesenfeld, K. A.; Martini, L.; Kemerich, P. D da C.; Filho, L. L. V. De.; e Fernandes, G. D´A. Vulnerabilidade do Aquífero nas Proximidades do Cemitério Municipal de Caçapava do Sul – Rio Grande do Sul , Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 40 (1), p. 206–216, 2017.
- [5] Batista, C. S. P.; Gesualdo, G. C.; Leite, P. C. C.; Lastoria, G.; Gabas, S. G.; Cavazzana, G. H.; Casadei, J. de M.; Azoia, T. de S. Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica. **Revista Águas Subterrâneas**, 1 (67), p. 1-14.
- [6] Ribeiro, D. M.; Rocha, W. F.; Garcia, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub- bacia do rio siriri , Sergipe. **Revista Águas Subterrâneas**, 25(1), p. 91–102, 2011.
- [7] Feitosa, F. A. C.; Filho, J. M.; Feitosa, C.; Demétrio, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- [8] Maia, P. H. P.; Cruz, M. J. M. Um Novo Método para Avaliar a Vulnerabilidade de Aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**. 15(2), p. 29–40, 2011.
- [9] Foster, S. S.; Hirata, R. C. **Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data**. Lima: WHO/PAHO/HPE/CEPIS, 1988.
- [10] Cutrim, A. O.; Campos, J. E. G. Avaliação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis (MT). **Revista de Geociências**. 29(3) p. 401–411, 2010.
- [11] Paralta, E. A.; Frances, A. P.; Ribeiro, L. F. **Avaliação do sistema aquífero dos Gabros de Breja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva quadro**

da água. In: 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). 7, p. 17, 2005.

[12] Foster, S; Hirata, R; Gomes, D; D'Elia, M; Paris, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea - um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** São Paulo: Servemar; 2006.

[13] Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. J.; Hackett, G. **DRASTIC : standardized System for Evaluating Ground ater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings.** Oklahoma: National Water Well Association Dublin, 1987.

[14] Brito, V. S.; Heitor, D.; Tinoco, C.; Melo, B. S. A. de. Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos no Município de Campo Formoso. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. p.1–8, 2010.

[15] Anomohanran, O. Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum. **American Journal of Applied Sciences.** 10(8), p.857–862, 2013.

[16] Paula, A.; Soares, A. P.; Soares, P. C.; Holz, M. Heterogeneidades hidroestratigráficas no Sistema Aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Geociências.** 38(4), p.598–617, 2008.

[17] Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH; EDUSP. 1993.

[18] Miranda, R. A. C. de; de Oliveira, M. V. S.; Silva, D. F. da. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos. **GEOUERJ,** 1(21), p.109–119, 2010.

[19] _____. Portefólio de Biologia e Geologia, 2009. [Online]. Disponível em: <http://hpqc.blogspot.com/2009/05/aguas-subterraneas.html>. Acessado em 25/01/2019.

[20] Borghetti, N. R. B.; Borghetti, J. R.; Filho, E. F. da R. **Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração Dos Países do Mercosul.** Curitiba: Ed. dos Autores, 2004.

[21] Iritani, M. A.; Ezaki, S. **As águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** In: Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo: SMA, 2008.

[22] Bruno, M. S.; Bovberg, C. A.; Nakagawa, F. M. **Anisotropic stress influence on permeability of weakly cemented sandstones.** In: Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Roegiers, p. 375–383, 1991.

[23] Ahr, W. M. **Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

- [24] Gomes, M. A. F.; Filizola, H. F.; Spadotto, C. Classificação das áreas de recarga do sistema Aquífero Guarani no Brasil em domínios pedomorfoagroclicmáticos–subsídio aos estudos de avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas. **Revista do Departamento de Geografia**. 18, p. 67–74, 2006.
- [25] _____. **Aquífero Guarani: programa estratégico de ação**. In: Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Organização dos Estados Americanos (OEA). Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai, 2009.
- [26] Francisco, E.; Virmond, A.; Bittencourt, L.; Chemas, E.; Bittencourt, A.; Filho, R. Estudo sobre os tipos das águas e as condicionantes estruturais do Sistema Aquífero Guarani no extremo Oeste do Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**. 20(2), p.39-48, 2006,
- [27] Barros, A. de; . Soares, A. P; Bittencourt, A. V.; Ferreira, F. J. F. Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**. 41(2), p. 319–333, 2011.
- [28] Oliveira, L. A.; Vieira, A. S. Estado da arte do sistema aquífero guarani-SAG. **Caminhos de Geografia**.11, p.174–189, 2010.
- [29] Villar , P. C. **Gestão das águas subterrâneas e o Aquífero Guarani: desafios e avanços**. In: V Encontro Nacional da Anppas, 2010.
- [30] _____. **Bacias e Sub-bacias hirográficas**. In: Atlas Sócio-Econômico do Rio Grande do Sul, Secretaria de Planjamento Orçamento e Gestão, 2019. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/bacias-e-sub-bacias-hidrograficas>. Acessado em 15/12/2019.
- [31] Machado, J. L. F. **Aquífero Guarani e seu Potencial de uso na Agricultura**. In: II Simpósio Nacional sobre o Uso da Água na Agricultura. Serviço Geológico do Brasil. p. 16, 2013.
- [32] Machado, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar. Porto Alegre: UNISINOS, 2005.
- [33] Machado, J. L. F. **Caracterização dos Compartimentos Estruturais do Sistema Aquífero Guarani do Rio Grande do Sul**. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2006.

- [34] Freitas, M. A. de; Goffermann, M. **Rede Básica Nacional de Monitoramento Integrado das Águas Subterrâneas-Rimas no Estado do Rio Grande do Sul**. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. 2010.
- [35] Baptista, M.; Nascimento, N.; Barraud, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. São Paulo: ABRH, 2011.
- [36] Lisbôa, E. G.; Carvalho, J. M. C. M. de; Mendes, R. L. R. O Uso da Geoestatística na Avaliação dos Parâmetros Hidrogeológicos para Compor o Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 21(1), p.188–199, 2016.
- [37] Pinheiro, R. J. B.; Carla, A.; Rauber, C.; Nummer, A. V.; Luis, J. Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria - RS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**. 12(2), p. 61–79, 2015.
- [38] Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar L. Aquifer Vulnerability Index: A GIS - Compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Canadian Water Resources Journal**. 18(1), p. 25–37, 1993.
- [39] Civita M. **Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria and practica**. Bologna: Pitagora, 1994.
- [40] Ross, M; Martel, R; Lefebvre, R; Parent, M; Savard, M. M. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from St. Lawrence Lowlands, Canada. **Geofísica International**. 43(4), p. 591–602, 2004.
- [41] Cunha, L. S. **Modelamento matemático do aquífero barreiras no complexo industrial e portuário do Pécem - CE : Mapa previsual do transporte de contaminantes**. Universidade de Brasília, 2009.
- [42] Secunda, S; Colin, M. L; Melloul, A. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. **Journal of Environmental Management**. 54, p. 39–57, 1998.
- [43] Fritch, T. G; McKnight, C. L; Yelderian, J; Dworkin, S; Arnold, J. G. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxi Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System. **Environmental Geology**. 39(9), p. 1063–1069, 2000.

- [44] Panagopoulos, G. P; Antonakos, A.; Lambrakis, N. J. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. **Hydrogeology Journal**. 14, pg. 894–911, 2006.
- [45] Gomezdelcampo, E; Dickerson, R. A modified DRASTIC model for Siting Confined Animal Feeding Operations in Willians County, Ohio, USA. **Environmental Geology**. 46(5), p.149–59, 2007 .
- [46] Rodríguez RC. The role of urban areas in aquifer vulnerability assessments: The Salamanca Mexico case. *Geophys Int*. 2004;43(4):583–9.
- [47] Wang, Y; Merkel, B. J; Li, Y; Hui, Y; Fu, S; Ihm, D. Vulnerability of groundwater in quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. *Environmental Geology*. 53, p. 479–484, 2007.
- [48] Guo, Q.; Wang, Y.Y; Gao, X.; Ma, T. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination as basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. *Environmental Geology*. 52, p. 923–932, 2007.
- [49] Doerfliger, N; Zwahlen, F. **EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment**. In: **Gunay G. JA., organizador**. Proceedings of the 5th International symposium field seminar on karst waters and environmental impacts. Antalya, Turkey: Balkema, Rotterdam, p. 117–23, 1997.
- [50] Foster, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Duijvenbooden W van WH van, organizador. **Vulnerability soil Groundw to Pollut Proc Information**. 38, pg. 69–86, 1987.
- [51] Navulur, K. C. S; Enger, B. A. **Predicting spatial distributions of vulnerability of Indiana state aquifer systems to nitrate leaching using a GIS**. Third International Conference and Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fe, NM. p. 21–26, 1996.
- [52] Gogu, R.; Dassargues, A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. **Environmental Geology**. 29(6). p.549–59, 2000.
- [53] Civita, M; Maio, M. de. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach. *Geofísica Internacional*. 43(4). p. 513–532, 2004.

- [54] Heredia, O.; Cirelli, A. F. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. *Environmental Geology*. 53. p.249–255, 2007.
- [55] _____. (CPRM) CDPERM. **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000**. Serviço Geológico Brasileiro; 2005.
- [56] _____. **Revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento Social e Urbano - Santa Cruz do Sul**. Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão de Santa Cruz do Sul, 2015.
- [57] _____. **Santa Cruz do Sul**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [Online]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-cruz-do-sul/panorama>. Acessado em: 15/01/2019.
- [58] Hasenack, H.; Weber, E. **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010.
- [59] _____. **Candelária**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [Online]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/candelaria/panorama>. Acessado em 15/01/2019.
- [60] Radtke, L.; Fröhlich, C. P.; Corte, O.; Waechter, R.; Cezar, D. B. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Candelária / RS**. Prefeitura de Candelária, 2011.
- [61] Godoy, M. M.; Binotto, R. B.; Silva, R. C. da; Zerfass, H. **Geoparques/propostas: Quarta Colônia (RS)**. In: Schobbenhaus, C.; Silva, C. R. da (Org.). *Geoparques do Brasil: propostas*. Rio de Janeiro: CPRM, 2012.
- [62] _____. **Alegrete**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [Online]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/alegrete/panorama>. Acessado: 05/01/2019.
- [63] _____. **Alegrete**. [Online]. Disponível em: www.alegrete.rs.gov.br. Acessado em: 05/11/2019
- [64] Marangon, M. **Geotecnia de Fundações. Formação Geológica dos Solos**. Minas Gerais: UFMG, 2008.
- [65] Rossetti, L. de M. M. **Arquitetura de fácies vulcânicas da Formação Serra Geral na Região de Feliz - Caxias do Sul**. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- [66] Wildner, W.; Orlandi Filho, V.; Giffoni, L. E. **Excursão Virtual aos Aparados da Serra - RS/SC: Aspectos Geológicos e Turísticos – Canions do Itaimbezinho e Fortaleza**. Porto Alegre: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2004.

- [67] Modena, R. C. C.; Hoff, R.; Farias, A. R.; Viel, J. **Diferenciação de Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral utilizando Gamaespectrometria Terrestre na Região Vitivinícola Serra Gaúcha, RS – Brasil**. In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia, 2014.
- [68] Martins, L. C.; Wildner, W.; Hartmann, L. A. Estratigrafia dos derrames da Província Vulcânica Paraná na região oeste do Rio Grande do Sul, Brasil, com base em sondagem, perfilagem gamaespectro- métrica e geologia de campo. **Pesquisas em Geociências**, 38(1), p. 15–27, 2011.
- [69] Manieri, D. D. **Comportamento Morfoestrutural e Dinâmica das Formas do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio São Pedro – Faxinal – PR**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Estadual de Maringá, 2010.
- [70] Scherer, C. M. S.; Lavina, E. L. C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian – fluvial strata of the Upper Jurassic Guara Formation, southern Brazil”. **Sedimentology**. 52, p. 1323–1341, 2005.
- [71] Machado, J. L. F. **Hidroestratigrafia química preliminar dos aquíferos na região central do Rio Grande do Sul**. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1998.
- [72] Pedron, F. A.; Fink, J. R.; Dalmolin, R. S. D.; Azevedo, A. C. Morfologia dos contatos entre solo-saprolito-rocha em neossolos derivados de arenitos da formação caturrita no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileiro de Ciência do Solo**. 34(6), 2010.
- [73] Nowatzki, C. H.; Klein, C. A Formação Sanga do Cabral na Região de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Geologia Colombiana**. 26, 2001.
- [74] Silva, R. C. da; Carvalho, I. S. de; Fernandes, A. C. S. Pegadas de dinossauros do triássico (Formação Santa Maria) do Brasil. **Ameghiniana**. 45(4), p. 783–790, 2008.
- [75] Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos: 2010.
- [76] Miranda, J. M.; Costa, P. T.; Luis, J. F.; Matias, L.; Santos, F. M. **Sismologia**. In: Fundamentos de Geofísica. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2016.
- [77] Ardito, J. C. **O Uso do Método de Análise de Ondas Superficiais Empregando Fontes Passivas e Ativas**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, 2013.
- [78] _____. **Técnicas Geofísicas Terrestres Aplicáveis ao Estudo do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Guia Básico de Dados Regionais Sistema Aquífero Guarani**.

In: Série dos Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Organização dos Estados Americanos (OEA). Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai, 2013.

[79] Nussenzveig, H. M. **Curso de Física Básica** - v.4. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

[80] Rosa, A. L. R. **Análise do Sinal Sísmico**. Rio de Janeiro: SBGf, 2010.

[81] Suertegaray, D. M. A.; Guasselli, L. A.; Verdum, R. **Atlas da Arenização Sudoeste do Rio Grande do Sul. Secretaria da Coordenação e Planejamento e Secretaria da Ciência e Tecnologia Governo do Estado do RS**. 1.ed. Porto Alegre, 2011.

[82] _____. How o acquire data for Vs30m Evaluation. 2007 [Online]. Disponível em: <http://www.parkseismic.com/SSC-Vs30mACQ.html>. Acessado em: 07/09/2018.

[83] Ribeiro, H. J. P. S. **Estratigrafia de Sequencias**. São Leopoldo: Unisinos, 2001.

[84] Ecco, D. **Remoção de ruídos sísmicos utilizando transformada Wavelet 1D e 2D com software em desenvolvimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Univesidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

[85] _____. **WINSISM Seismic refraction processing**. W-GeoSoft. [Online]. Disponível em: <http://www.wgeosoft.ch>. Acessado em: 07/09/2018.

[86] Hagedoorn, J. G. The Plus minus method of interpreting seismic refraction sections. **Geophysical Prospecting**. 7(2), p. 158–182, 1959.

[87] Ferreira, J. P. C. L. **Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas: Fundamentos e Conceitos para uma melhor Gestão e Proteção dos Aquíferos de Portugal**. In: 4º Congresso da Água, 1998.

[88] Daniel, P.; Ritter, L. G.; Borba, W. F. de. Vulnerabilidade ambiental e áreas de infiltração máxima de água Environmental vulnerability and areas of maximum water infiltration. **Revista Monografias Ambientais**. 5, p. 3761–3776, 2014.

[89] Dănăcică, D. Methodological and Applicative Problems of using Pearson Correlation Coefficient in the Analysis of Socio-Economic Variables. **Romanian Statistical Review**. 2, p. 148–163, 2017.

[90] Noronha, F. D. L.; Mizusaki, A. M.; Bressani, L. A. 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), p. 127–145, 2012.

[91] Hawkins., L. V. The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations. **Geophysics**. 26(6), p. 806–819, 1961.

ANEXO I

Ondas Profundas

As ondas profundas, ou também conhecidas como ondas de corpo, recebem esse nome por se propagarem pelo interior da Terra. Elas podem ser subdivididas como ondas primárias (ou simplesmente ondas P), que são ondas longitudinais, ou como ondas secundárias, (também conhecidas como ondas S), que são ondas transversais.

As ondas primárias são as que se movimentam com maior velocidade ao longo do meio, durante sua propagação. Partículas do meio vibram paralelamente em relação à direção de propagação, correspondendo a deformações de compressão ou expansão, de forma que as partículas se deslocam para frente e para trás. Esse movimento acontece na mesma direção da propagação da onda e envolve oscilações em torno de um referencial fixo, conforme a Figura A.1 a). Propagam-se em meios sólidos, líquidos e gasosos.

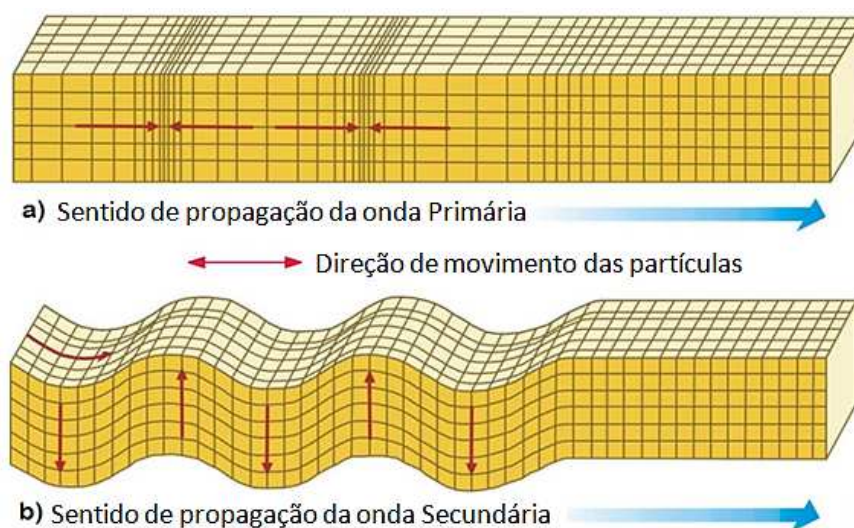


Figura A.1: Representação das deformações e movimentos sofridos por partículas do meio associados à passagem de ondas de corpo: (a) ondas P; (b) ondas S. Adaptado de [75].

Ao longo do estudo, será dada maior atenção às considerações relativas às ondas compressoriais (ondas P) refratadas, já que as ondas S são raramente

utilizadas no método de varredura sísmica de refração e as ondas de superfície agregam muitas informações misturadas provenientes das interações das ondas P e S com o meio de propagação.

As ondas S propagam-se mais lentamente do que as ondas P. Sua propagação acontece através de um cisalhamento puro, ou seja, existem mudanças de posição das partículas do meio na direção perpendicular à direção de propagação da onda e pode ter polarização vertical ou horizontal. A Figura A.1 b), apresenta uma onda S com polarização vertical. Essas ondas somente propagam-se em meios sólidos.

Ondas Superficiais

As ondas de superfície recebem esse nome em função de sua propagação, que se dá na superfície da Terra. Os dois tipos de ondas de superfície são: ondas Rayleigh, também conhecidas como ondas R e as ondas Love ou simplesmente ondas L.

Na onda Rayleigh as partículas descrevem um movimento elíptico, num plano perpendicular e vertical à direção de propagação. São ondas mais lentas que as ondas Love, mas são as mais destrutivas. Propagam-se em meios sólidos e líquidos, conforme mostra a Figura A.2 a).

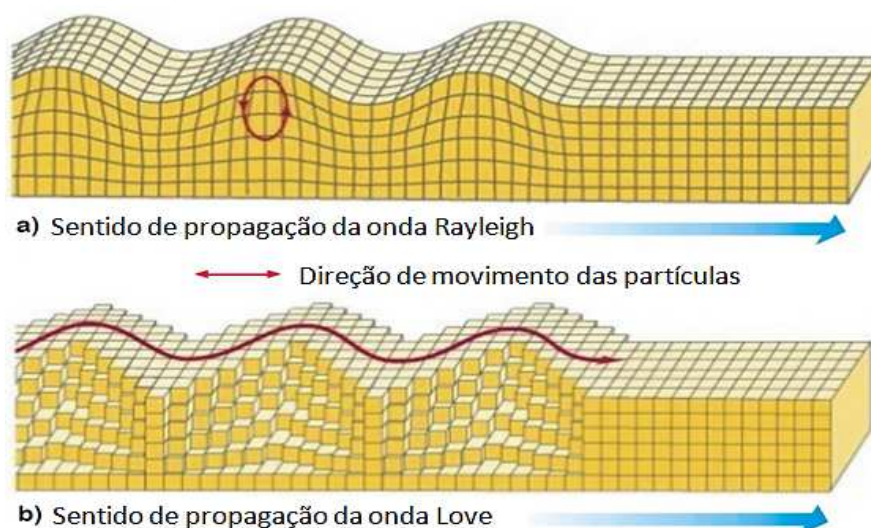


Figura A.2: Representação das deformações e movimentos sofridos por partículas do meio, associados à passagem de ondas de superfície: a) ondas R; b) ondas L. Adaptado de [75].

Na onda Love as partículas vibram horizontalmente, fazendo um ângulo reto com a direção de propagação, semelhante às ondas S horizontais. São ondas lentas e propagam-se em meios sólidos. A Figura A.2 b) ilustra o formato das ondas superficiais.

ANEXO II

Método usado no processamento de dados

A interpretação cuidadosa de uma aquisição sísmica depende da total iluminação dos refratores pela onda sísmica. Para tanto, se aplicou o método de processamento do tempo de atraso (*delay-time*) também conhecido simplesmente por *ABC* [86], que utiliza pelo menos cinco pontos de disparos durante a aquisição, sendo dois deles afastados da linha sísmica, dois nas extremidades e um no centro, todos no mesmo alinhamento, conforme está apresentado na Figura A.3 (I).

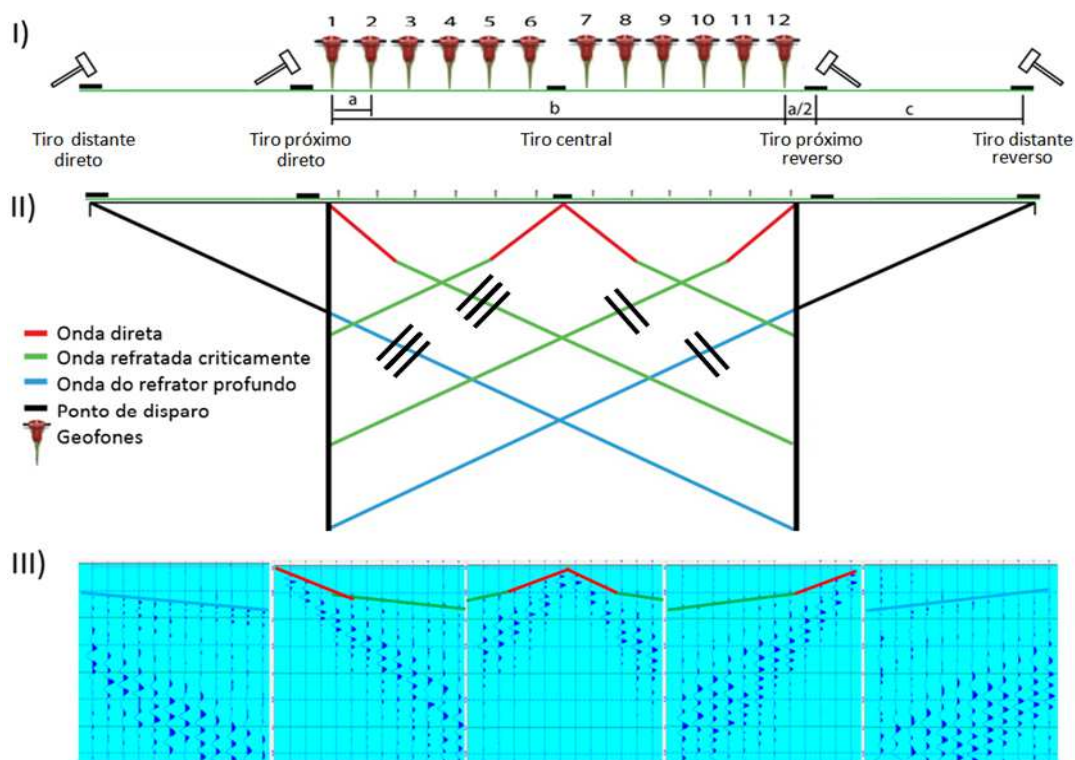


Figura A.3: I) Ilustração do arranjo com os pontos de tiro em A, B, C, D e E; II) Ilustração dos respectivos tempos de trânsito da onda; III) Sismogramas adquiridos nos pontos de tiro.

O objetivo de tais registros é avaliar a distribuição das velocidades do refrator ao longo do perfil e determinar sua profundidade.

Conforme a lei do paralelismo, ou seja, os tempos de trânsito das posições de tiro distante direto e reverso, da Figura A.3 (II), são paralelos aos segmentos de

tempos de trânsito do refrator nas posições de tiro próximo direto e reverso. Estes segmentos são devidos a mesma camada e tem os mesmos caminhos de onda. Na prática, não se pode esperar ter um exato paralelismo entre as curvas devido a uma dispersão inevitável na determinação dos tempos de chegada. Os pontos das extremidades são conhecidos como tiro direto por se encontrar na posição inicial da varredura sísmica e tiro reverso por estar na outra extremidade, na qual a onda será registrada no sentido contrário ao do tiro direto. Os sismogramas da Figura A.3 (III) ilustram suas respectivas contribuições no diagrama de tempo de trânsito da onda sísmica.

Outro conceito importante para a análise da velocidade e para a determinação da profundidade do refrator é a reciprocidade entre os tempos de trânsito dos tiros diretos e dos reversos. Isso significa que o tempo de trânsito em ambos os pontos de tiro devem ser o mesmo de acordo com a Lei de Fermat. O tempo recíproco é mostrado por uma linha tracejada horizontal no gráfico da Figura A.4.

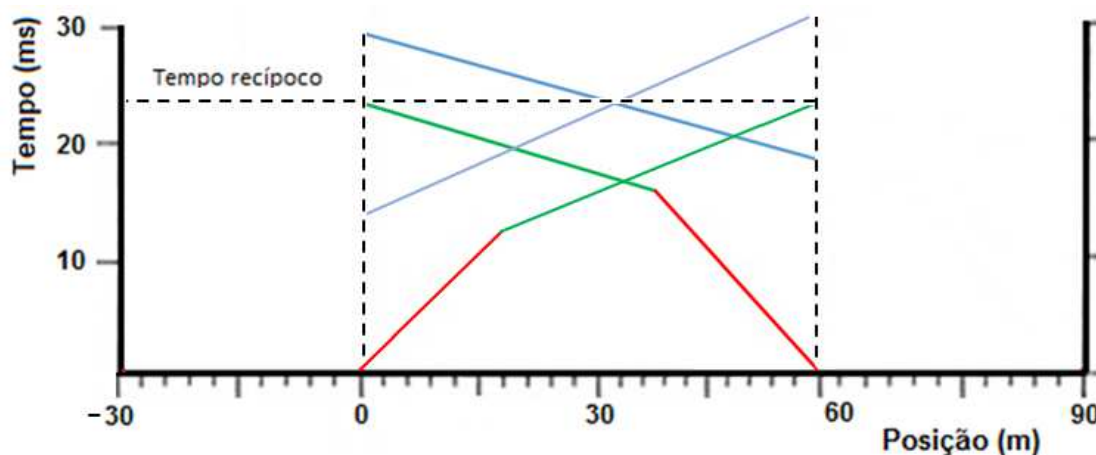


Figura A.4: Paralelismo nos segmentos de velocidade do refrator [91].

Chegada fantasma (Ponto distante e próximo)

A cobertura em subsuperfície de um refrator obtido pela sobreposição do tiro inicial e tiro final da linha, ao longo de um levantamento sísmico, não são totalmente coincidentes, de acordo com a Figura A.5 (A).

Com objetivo de aumentar a cobertura do refrator em subsuperfície, são utilizados pontos de tiro distantes da linha sísmica (direto e reverso), capazes de cobrir todo o refrator como mostrado no esquema do levantamento da Figura A.5 (B). O paralelismo observado nos dois tempos de trânsito nos dois pontos de tiro, nas posições de 60 m e de 90 m, mostra que a diferença entre os dois tempos dos segmentos de reta referentes à cobertura do refrator deve ser praticamente constante, já que é tirada da mesma parte do refrator em subsuperfície.

A diferença dos tempos ao deslocar a chegada de cada geofone em cada ponto de tiro referente ao tempo de trânsito do refrator é conhecida como chegada fantasma (*phantoming arrival*).

O procedimento, de obter a cobertura total do refrator dentro de uma linha sísmica, é de extrema importância na aplicação do método de processamento *delay-time*, pois os registros dos pontos de aquisição serão úteis para determinar a velocidade e as características como: inclinação e variações de profundidade do refrator. Esse procedimento é melhor discutido a seguir, no item Método de Processamento Delay-Time.

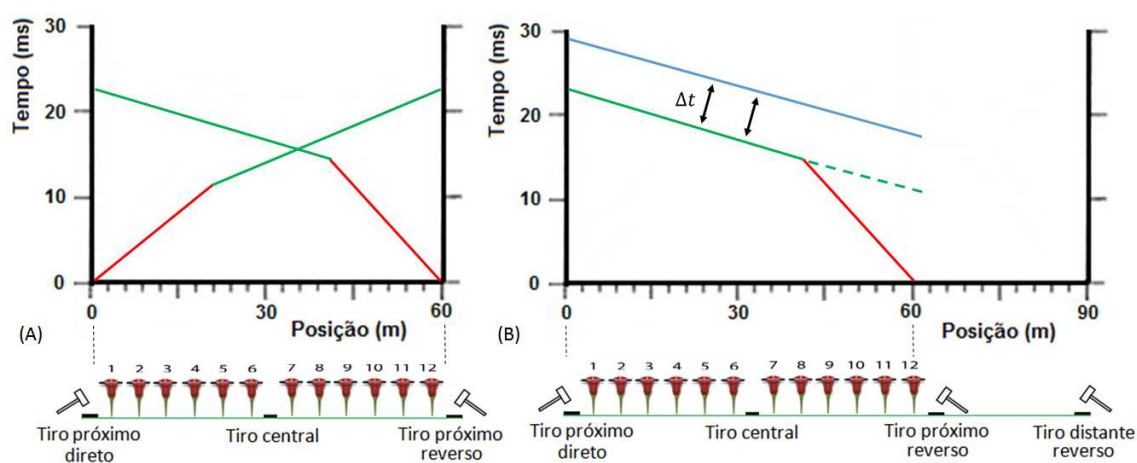


Figura A5: (A) Sobreposição da cobertura do refrator pelos pontos de tiro próximo direto e reverso com o correspondente diagrama de tempo de trânsito e (B) a cobertura total da linha sísmica dada pelos pontos de aquisição distante (tiro reverso). O prolongamento do registro do refrator ao ponto de aquisição significa a chegada fantasma (Phantoming arrival) correspondentes ao registro do ponto de aquisição (tiro reverso) [76].

Método de Processamento *Delay-Time*

Este método de processamento do registro sísmico pertence ao grupo dos métodos recíprocos. Na Figura A.7 A) está ilustrado um modelo que possui duas camadas com uma interface refratora irregular. Além de mostrar trajetórias de raios associadas a uma linha sísmica de comprimento L entre os pontos de tiro A e B, em ambas as extremidades do perfil. Assim, existem dois pontos de aquisição do registro sísmico, um do tiro direto A e outro do tiro reverso B, que emergem do refrator para culminar num único ponto C na superfície. O nome ABC dado ao método tem origem desses três pontos. Na Figura A.7 B), temos uma representação do diagrama dos tempos de trânsito direto e reverso, bem como a representação do tempo recíproco. Segundo o qual, o tempo de trânsito da onda sísmica entre o ponto de aquisição A até o ponto de aquisição B deve ser o mesmo, que na direção reversa (em relação à inversão temporal do percurso do sinal), ou seja, de B até A.

Os termos dos tempos de trânsito, característicos no processamento dos dados sísmicos deste método foram introduzidos por Edge e Laby (1931). A técnica de processamento foi descrita por Heiland (1940) e Jakosky (1950), sob os nomes de “*Sistema ABC*” e “*Método das Diferenças*”, respectivamente. O método tem sido desde então desenvolvido por Hagedoorn (1959) [86] com o nome de “*Método Mais-Menos*” (*Plus-Minus*), e por Hawkins (1961) [91].

O tempo de atraso (*delay time*) é definido como a diferença em tempo entre o trajeto inclinado AD através da camada superior e o tempo que seria necessário para um raio percorrer a distância DH, Figura A.6.

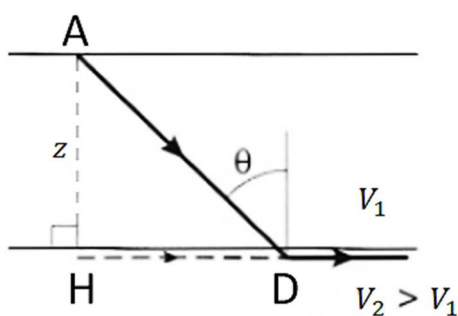


Figura A.6: Ilustração do tempo de atraso [75,86].

Os atrasos não podem ser medidos diretamente, mas ocorrem em pares na equação de tempo de percurso para um raio refratado, a partir de uma fonte em superfície até um geofone na mesma superfície.

Da Eq. A.1, é possível perceber que o tempo de interceptação T_i pode ser separado em dois tempos de atraso.

$$T_{SG} = \frac{x}{V_2} + T_i \quad (A1)$$

Logo adaptando os índices das parcelas da Eq. A.1 ao modelo ilustrado na Figura A.6, temos:

$$T_{AB} = \frac{L}{V_2} + \delta_{tA} + \delta_{tB}, \quad (A.2)$$

Onde δ_{tA} é o tempo de atraso, da trajetória de A até C passando por D-E e δ_{tB} é o tempo de atraso, da trajetória de B até C passando por F-G, que pode ser observado na Figura A.7.

Esta equação descreve o tempo de percurso de um raio refratado deslocando-se de uma extremidade da linha à outra, por isso T_{AB} é conhecido como tempo recíproco.

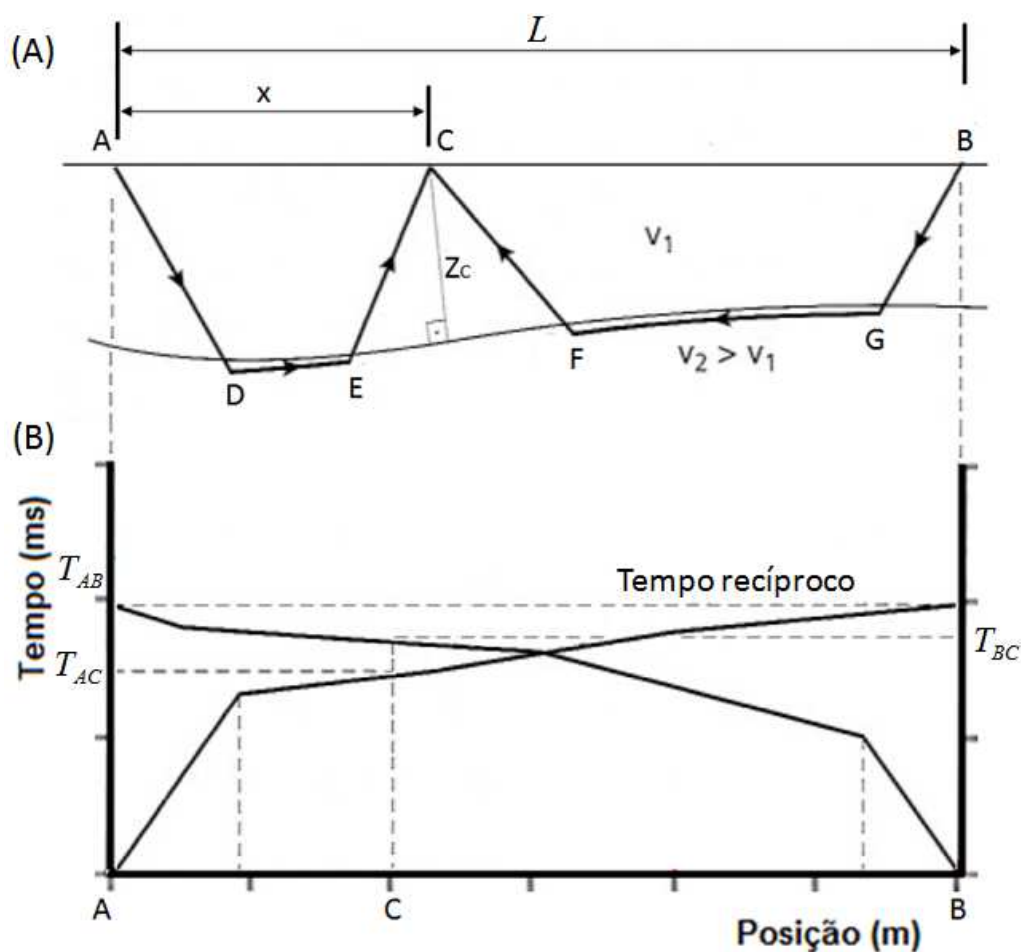


Figura A.7: Método mais-menos de interpretação de refração, em: (A) Trajetórias de raio refratado a partir de cada extremidade de uma linha sísmica até um geofone numa posição intermediária; (B) Diagrama dos tempos de trânsito nas direções direta e reversa [75,86].

Assim, os tempos de percurso para o raio direto, que se deslocam para um geofone numa posição intermediária C, a partir da extremidade A da linha, é:

$$T_{AC} = \frac{x}{v_2} + \delta_{tA} + \delta_{tC} \quad (\text{A.3})$$

Para o raio reverso, a partir da extremidade B da linha é:

$$T_{BC} = \frac{(L-x)}{v_2} + \delta_{tB} + \delta_{tC} \quad (\text{A.4})$$

Onde δ_{tC} é o atraso no geofone em uma posição intermediária C. A velocidade v_2 não pode ser calculada diretamente da curva irregular de tempo versus distância das chegadas refratadas, mas pode ser estimada por meio do termo “menos”

de Hagedoorn. Isso é obtido fazendo-se à diferença das Eqs. A.3 e A.4. Essa subtração elimina a variável de atraso do geofone $\bar{\delta}_{tC}$ da equação.

Logo temos:

$$T_{AC} - T_{BC} = \frac{x}{V_2} + \delta_{tA} + \delta_{tC} - \frac{(L-x)}{V_2} - \delta_{tB} - \delta_{tC} = \frac{(2x-L)}{V_2} + \delta_{tA} + \delta_{tB} \quad (A.5)$$

Já o termo “*mais*” de Hagedoorn é obtido fazendo-se à soma das Eqs. A.3 e A.4. Assim:

$$T_{AC} + T_{BC} = \frac{x}{V_2} + \bar{\delta}_{tA} + \bar{\delta}_{tC} + \frac{(L-x)}{V_2} + \bar{\delta}_{tB} + \bar{\delta}_{tC} = \frac{(L)}{V_2} + \bar{\delta}_{tA} + \bar{\delta}_{tB} + 2\bar{\delta}_{tC} \quad (A.6)$$

Substituindo a Eq. A.2 na Eq. A.6, temos:

$$T_{AC} + T_{BC} = T_{AB} + 2\bar{\delta}_{tC} \quad (A.7)$$

Reescrevendo a equação para $\bar{\delta}_{tC}$ o tempo de atraso é dado por:

$$\bar{\delta}_{tC} = \frac{1}{2} (T_{AC} + T_{BC} - T_{AB}) \quad (A.8)$$

Esse atraso é o termo “*mais*” do método mais-menos e pode ser usado para calcular a profundidade perpendicular z do refrator em subsuperfície. Para tanto, use-se a Eq. A.13 (mostrada a seguir), que pode ser deduzida aplicando o conceito de atraso baseado na Figura A.6, assim, $\bar{\delta}_t = T_{AD} - T_{DH}$. Como pode ser visto abaixo:

$$\bar{\delta}_t = \frac{AD}{V_1} - \frac{DH}{V_2} = \frac{z}{V_1 \cos i_c} - \frac{z \text{sen} i_c}{V_1 \cos i_c} = \frac{z(1 - \text{sen}^2 i_c)}{V_1 \cos i_c} = \frac{z \cos i_c}{V_1} \quad (A.9)$$

Da Lei de Snell para o ângulo o crítico (i_c), temos:

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{A.10})$$

Logo, o cosseno pode ser escrito como:

$$\cos i_c = \sqrt{1 - V_1^2/V_2^2} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo o $\cos i_c$ na Eq. A.9 temos:

$$\delta_t = \frac{z(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_2} \quad (\text{A.12})$$

Resolvendo a Eq. A.12 para z temos:

$$z = \frac{\delta_t V_1 V_2}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}} \quad (\text{A.13})$$

Assim o *método mais-menos* fornece uma maneira para obter os valores de atraso individuais para o cálculo das profundidades locais de um refrator irregular.

No método o somatório dos tempos de atraso no refrator, requer um recobrimento total das chegadas desta camada, isso significa que toda subsuperfície deve receber energia sísmica para garantir registros nos geofones e possibilitar o mapeamento do levantamento. Se na Figura A.8, as únicas curvas dos tempos de trânsito disponíveis forem aquelas dos pontos A e B, o método seria limitado para a área ao redor do ponto C, onde há um recobrimento parcial do refrator. Contudo, os registros de tiro distante direto e reverso, fornecem neste caso os tempos de trânsito referentes ao recobrimento total do refrator, fornecendo um meio para somar os tempos de atraso em relação ao tempo recíproco entre os pontos A e B. Os tempos de trânsito dos tiros distante direto e reverso são então, deslocadas para baixo até coincidirem com os respectivos segmentos dos tempos de trânsito das posições A e B de acordo com o procedimento do *phantoming*. Neste caso, a soma dos tempos de chegada em cada geofone pode ser tratada pelo método mais-menos.

Para a determinação da profundidade devem-se usar as diferenças entre os tempos somados e o tempo recíproco entre os pontos A e B, ou seja, $(T_{AC} + T_{BC} - T_{AB})$. Cabe ressaltar, que a construção com as chegadas fantasmas é uma aplicação da lei do paralelismo e pode ser observada na Figura A.8. Conseqüentemente, a interseção entre os tempos de trânsito das chegadas fantasmas, resultantes da translação dos tiros distantes, com o eixo temporal, são usadas para determinar tempo de Intercepção (*Intercept Time*) da onda refratada. Este tempo de intercepção é igual à diferença entre $T_{AC} + T_{BC}$ e o tempo recíproco T_{AB} entre os pontos A e B.

A soma dos tempos de chegada ao longo do perfil, como indicado no topo do da Figura A.8, é chamado de curva ABC.

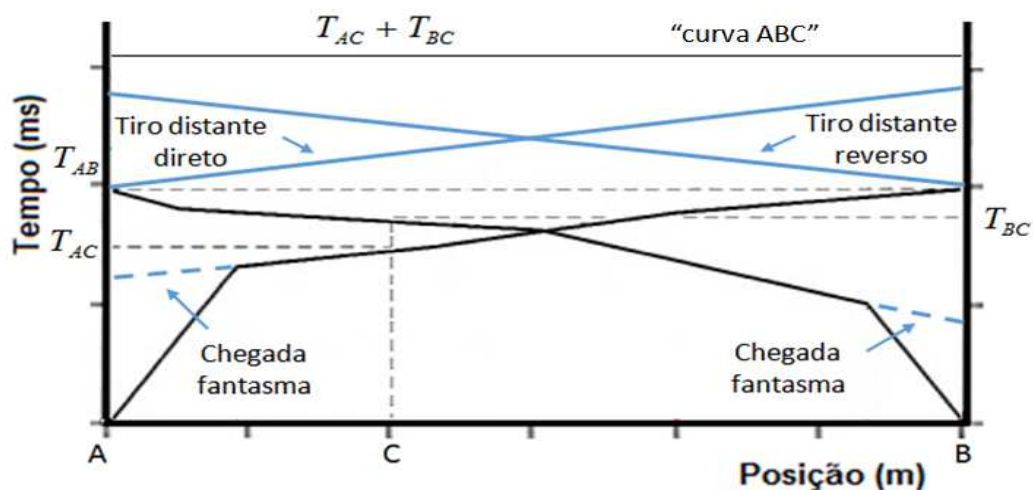


Figura A.8: O método mais-menos aplicado a um caso de duas camadas com refrator plano.

Adaptado[75].

Se a curva ABC for uma linha horizontal reta, a profundidade do refrator será constante e também não haverá variação de velocidade ao longo do perfil. Desvios na linha horizontal indicam variação de velocidade do refrator e das condições geológicas em subsuperfície.


ANEXO III

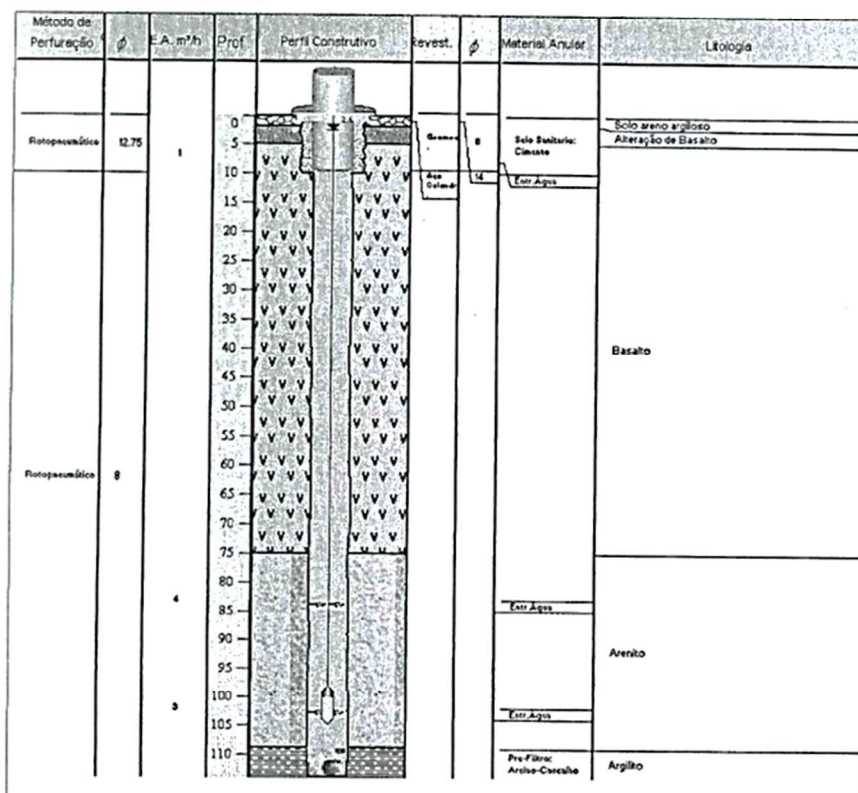
Perfis dos poços locais estudados

Santa Cruz do Sul

SL 1

LOTEAMENTO

 Companhia Riograndense de Saneamento <small>Operadora de Saneamento de Base em Saneamento Básico e Meio Ambiente SURENIA</small>		Código Poço COR SCZ LSC 05 Número Geral 3279	
Município SANTA CRUZ DO SUL Localidade LINHA SANTA CRUZ		Coordenadas UTM 364175 E, 6715533 N	
Endereço Av. Prof. Orlando Oscar Baumhardt Regional SURGEN Bacia Pardo G-090		Coordenadas Geográficas Folha SH.22-V-D-IV-1 Carta Santa Cruz do Sul	
Perfurador Carlos Roberto da Rocha Proprietário Corsan Aqüífero Sist. Aquíf. Guarani		Fuso 22 J Merid. Centr 51 Início 13/09/2006 Fim 18/09/2006	
		CREA CORSAN N° 17065 ART Obran°	

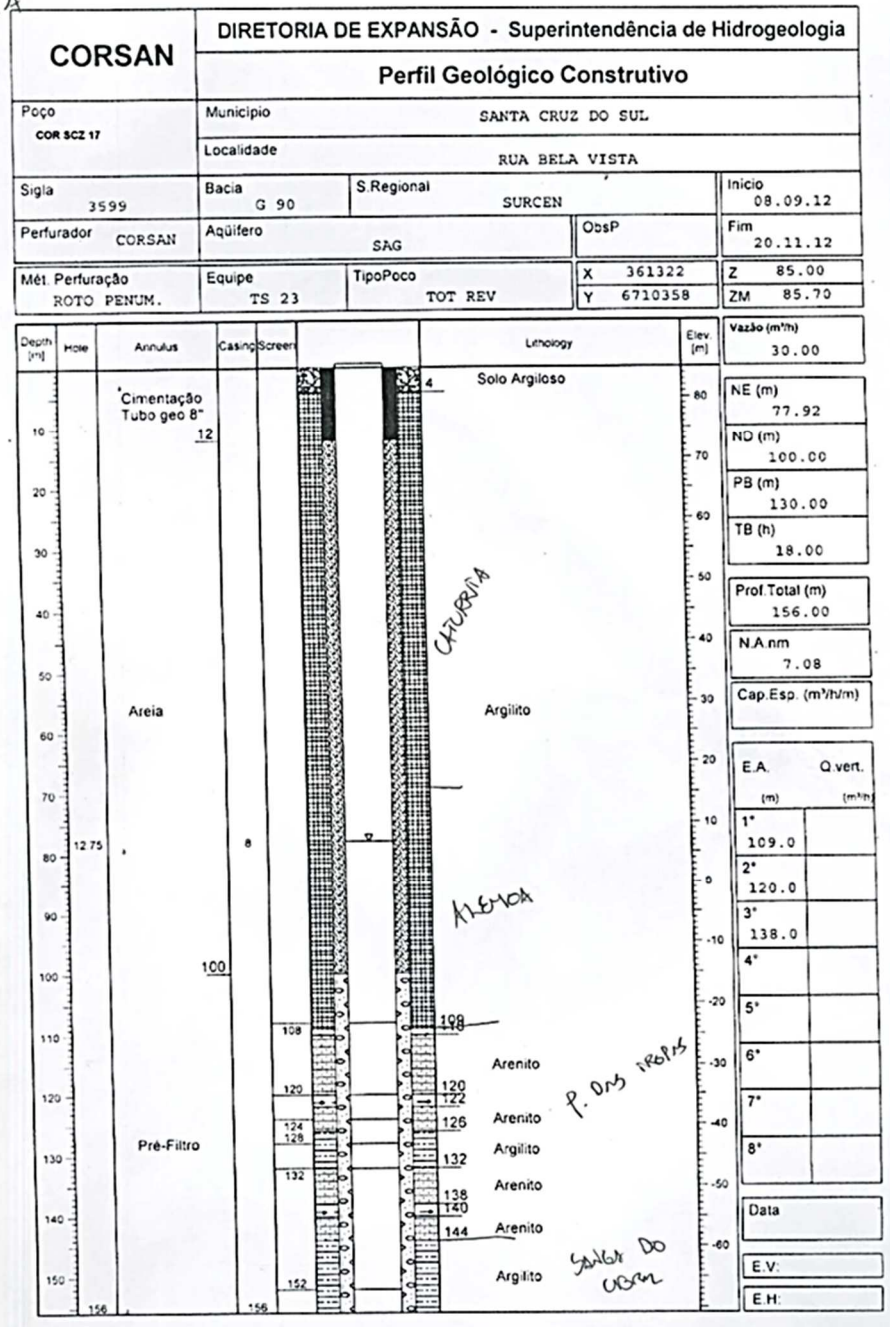


Dados Operacionais

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Prof. Bomba (m)	Tempo Máx. Bombeamento (h)
6,0	84,00	8,62	94,00	104,00	14,00
Profundidade Total		114 m	Situação		18/10/2006
Profundidade Útil		109 m	Serviço		
Capacidade Específica		m³/h/m	Licença		
Restrição					

SL 2

ETA



SL 3

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300023674

Poço: 4300023674 UF: RS

Município: Santa
cruz do sulLocalidade: LINHA
SANTA CRUZ

Versão para Impressão

Perfil Construtivo		Dados Gerais:			
	Nome:				
	Data da Instalação:				
	Proprietário:	CORSAN - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO			
	Natureza do Ponto:	Poço tubular			
	Uso da Água:				
	Cota do Terreno (m):				
	Localização:				
	Localidade:	LINHA SANTA CRUZ			
	UTM (Norte/Sul):	6715533			
	UTM (Leste/Oeste):	364175			
	Latitude (GMMSS):	294058			
	Longitude (GMMSS):	522414			
	Bacia Hidrográfica:	Atlântico Sul-Sudeste	Nível Estático (m):	Duração do Teste (h):	
	Subbacia Hidrográfica:	Rio Taquari	2.60	24	
	Situação:		Coefficiente de Armazenamento:	Vazão Livre (m3/h):	
Data:		Vazão Após Estabilização (m3/h):	7.86		
Situação:		Tipo do Teste:	Rebaixamento		
Feição Geomorfológica:					
Descrição:					
Formação Geológica:					
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:			
0.00	75.00	Formação serra geral			
75.00	114.00	Formação rosário do sul			
Dados Litológicos:					
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:		
0	5	Solo argiloso	Solo argiloso		
5	75	Basalto	Basalto		
75	109	Arenito médio	Arenito médio		
109	114	Argilito	Argilito		
Aquífero no Ponto					
		Topo (m):	75.00		
		Base (m):	114.00		
Aquífero: Poroso		Captação:	Única		
		Condição:	Confinado		
		Penetração:	Parcial		
Nível da Água:					
Data:					
Nível da Água (m):					
Nível Medido Bombeando (S/N)?					
Vazão (m3/h):					

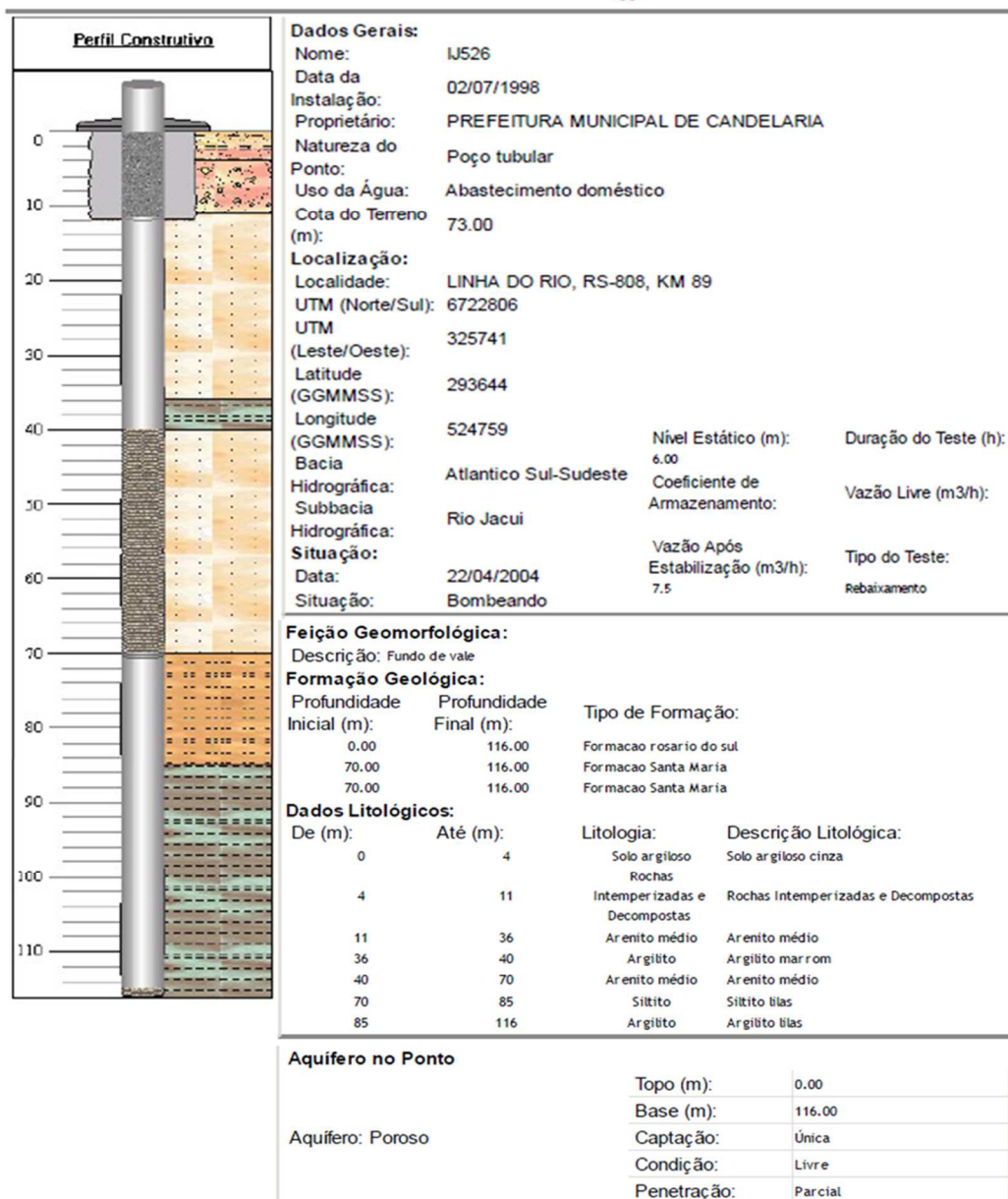
Candelária

CL 1

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300006306

Poço: 4300006306 UF: RS

Município:
CandeláriaLocalidade: LINHA
DO RIO, RS-808, KM
89 Versão para Impressão

CL 2

Não encontrado

CL 3

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=430006327

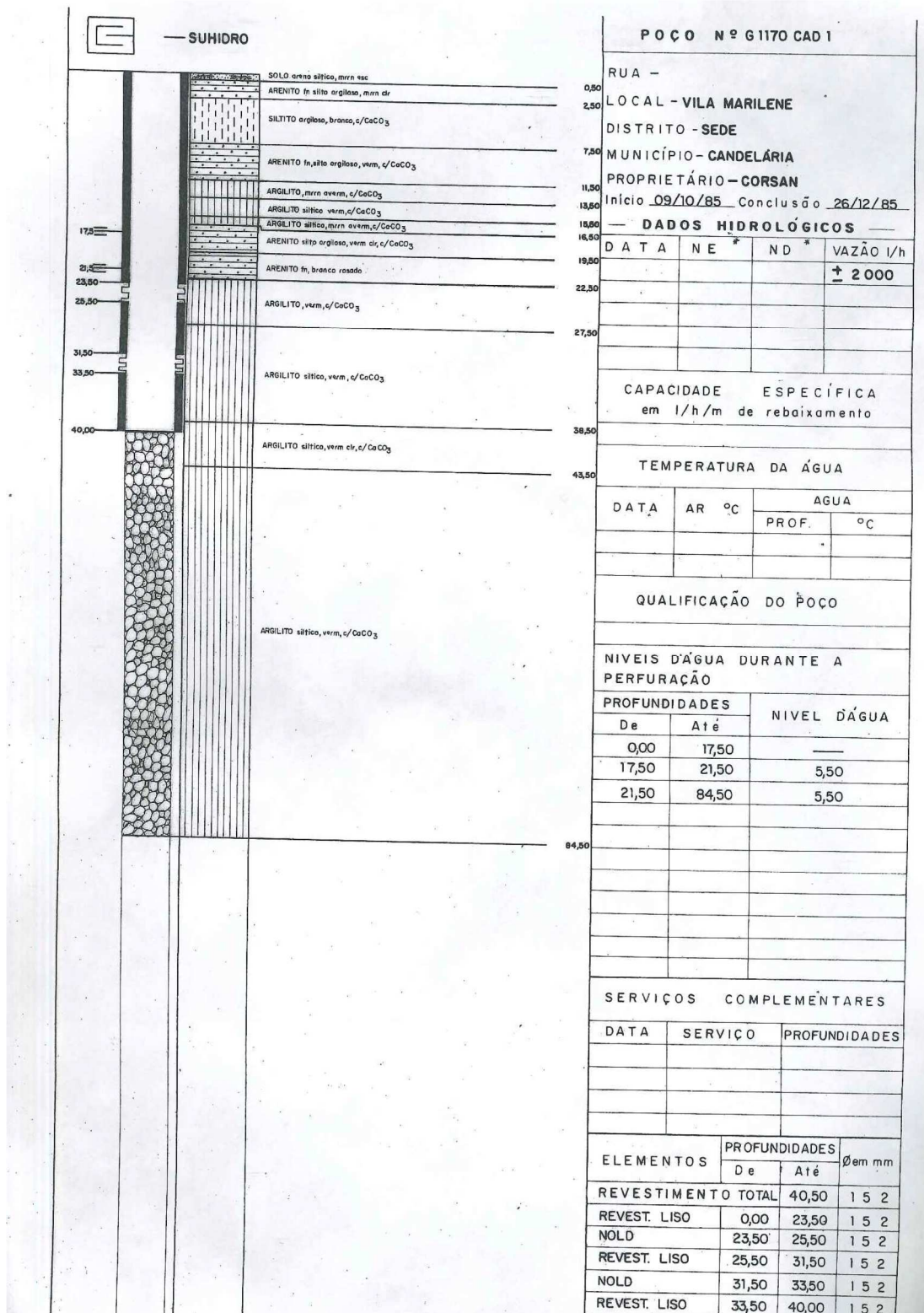
Poço: 430006327 UF: RS

Município:
CandeláriaLocalidade: VILA
MARILENE

Versão para Impressão

Perfil Construtivo		Dados Gerais:		Dados Gerais:		Dados Gerais:	
	Nome:	IJ547		Nome:	IJ547		
	Data da Instalação:			Data da Instalação:			
	Proprietário:	CORSAN - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO		Proprietário:	CORSAN - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO		
	Natureza do Ponto:	Poço tubular		Natureza do Ponto:	Poço tubular		
	Uso da Água:			Uso da Água:			
	Cota do Terreno (m):	60.00		Cota do Terreno (m):	60.00		
	Localização:			Localização:			
	Localidade:	VILA MARILENE		Localidade:	VILA MARILENE		
	UTM (Norte/Sul):	6714727		UTM (Norte/Sul):	6714727		
	UTM (Leste/Oeste):	325971		UTM (Leste/Oeste):	325971		
Latitude (GMMSS):	294107		Latitude (GMMSS):	294107			
Longitude (GMMSS):	524755		Longitude (GMMSS):	524755			
Bacia Hidrográfica:	Atlântico Sul-Sudeste		Nível Estático (m):	5.50		Duração do Teste (h):	
Subbacia Hidrográfica:	Rio Jacuí		Coefficiente de Armazenamento:			Vazão Livre (m3/h):	
Situação:	Abandonado		Vazão Após Estabilização (m3/h):	2		Tipo do Teste:	Rebaixamento
Data:	26/04/2004						
Situação:	Abandonado						
Feição Geomorfológica:							
Descrição: Planície fluvial							
Formação Geológica:							
Profundidade Inicial (m):	0.00	Profundidade Final (m):	84.50	Tipo de Formação:			
				Formação rosario do sul			
Dados Litológicos:							
De (m):	0	Até (m):	0.5	Litologia:	Descrição Litológica:		
	0.5		2.5	Areia siltosa	Areia siltosa marrom		
	2.5		7.5	Arenito siltoso	Arenito siltoso branco amarronzado		
	7.5		11.5	Siltito	Siltito branca		
	11.5		16.5	Arenito fino	Arenito fino vermelho		
	16.5		22.5	Argilito	Argilito vermelho amarronzado		
	22.5		84.5	Arenito siltoso	Arenito siltoso vermelho		
				Argilito	Argilito vermelho		
Aquífero no Ponto							
				Topo (m):	0.00		
				Base (m):	84.50		
Aquífero: Poroso				Captação:	Única		
				Condição:	Livre		
				Penetração:	Parcial		
Nível da Água:							
Data:							
Nível da Água (m):							
Nível Medido Bombeando (S/N)?							
Vazão (m3/h):							

CL 4



POÇO Nº G1170 CAD 1			
RUA -			
LOCAL - VILA MARILENE			
DISTRITO - SEDE			
MUNICÍPIO - CANDELÁRIA			
PROPRIETÁRIO - CORSAN			
Início 09/10/85 Conclusão 26/12/85			
DADOS HIDROLÓGICOS			
DATA	NE *	ND *	VAZÃO l/h
			± 2000
CAPACIDADE ESPECÍFICA em l/h/m de rebaixamento			
TEMPERATURA DA ÁGUA			
DATA	AR °C	ÁGUA	
		PROF.	°C
QUALIFICAÇÃO DO POÇO			
NÍVEIS D'ÁGUA DURANTE A PERFURAÇÃO			
PROFUNDIDADES		NÍVEL D'ÁGUA	
De	Até		
0,00	17,50	—	
17,50	21,50	5,50	
21,50	84,50	5,50	
SERVIÇOS COMPLEMENTARES			
DATA	SERVIÇO	PROFUNDIDADES	
ELEMENTOS	PROFUNDIDADES		Ø em mm
	De	Até	
REVEST. LISO	0,00	23,50	152
NOLD	23,50	25,50	152
REVEST. LISO	25,50	31,50	152
NOLD	31,50	33,50	152
REVEST. LISO	33,50	40,00	152

CL 5

Não encontrado
Quarta Colônia

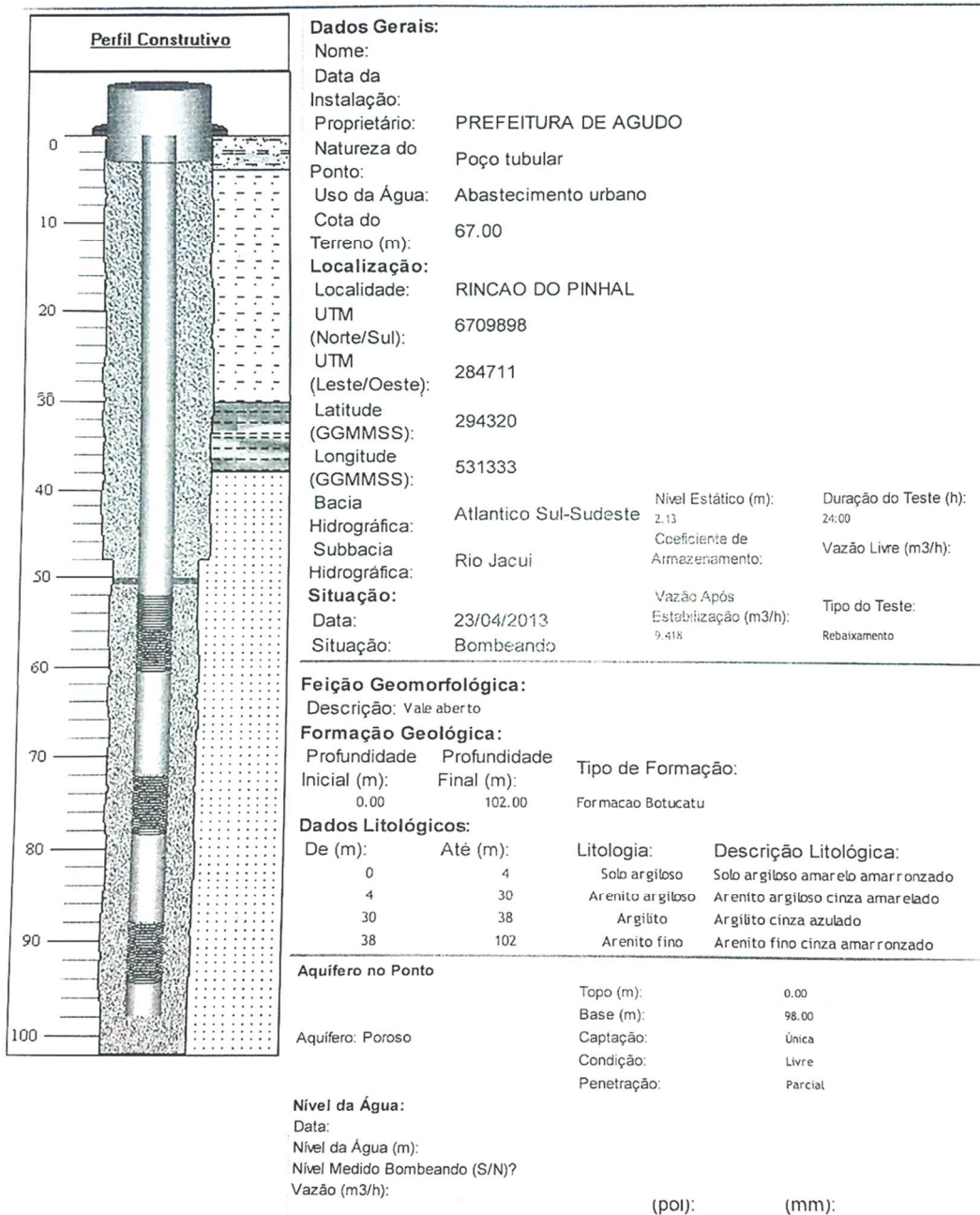
QL 1

Poço: 4300021299 UF: RS

Município: Agudo

Localidade:
RINCAO DO PINHAL

Versão para Impressão



QL 2

Incompleto

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=430006571

Poço: 430006571 UF: RS Município: Agudo Localidade: CERRO SECO Versão para Impressão

Perfil Construtivo																									
	<p>Dados Gerais: Nome: U728 Data da Instalação: Proprietário: PREFEITURA DE AGUDO Natureza do Poço: Poço tubular Ponto: Uso da Água: Cota do Terreno (m): 539.00 Localização: Localidade: CERRO SECO UTM (Norte/Sul): 6734098 UTM (Leste/Oeste): 286536 Latitude (GMMSS): 293016 Longitude (GMMSS): 531208 Bacia Hidrográfica: Atlantico Sul-Sudeste Nível Estático (m): Subbacia Hidrográfica: Rio Jacui Coeficiente de Armazenamento: Duração do Teste (h): Situação: Vazão Após Estabilização (m3/h): Vazão Livre (m3/h): Data: 27/05/2004 Tipo do Teste: Situação: Seco</p> <p>Feição Geomorfológica: Descrição: Plato Formação Geológica: Profundidade Inicial (m): 0.00 Profundidade Final (m): 240.00 Tipo de Formação: Formação serra geral</p> <p>Dados Litológicos:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>De (m):</th> <th>Até (m):</th> <th>Litologia:</th> <th>Descrição Litológica:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>60</td> <td>Basalto</td> <td>Basalto cinza</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>78</td> <td>Basalto</td> <td>Basalto marrom</td> </tr> <tr> <td>78</td> <td>200</td> <td>Basalto</td> <td>Basalto cinza</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>226</td> <td>Basalto</td> <td>Basalto marrom</td> </tr> <tr> <td>226</td> <td>240</td> <td>Basalto</td> <td>Basalto cinza</td> </tr> </tbody> </table>	De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:	0	60	Basalto	Basalto cinza	60	78	Basalto	Basalto marrom	78	200	Basalto	Basalto cinza	200	226	Basalto	Basalto marrom	226	240	Basalto	Basalto cinza
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:																						
0	60	Basalto	Basalto cinza																						
60	78	Basalto	Basalto marrom																						
78	200	Basalto	Basalto cinza																						
200	226	Basalto	Basalto marrom																						
226	240	Basalto	Basalto cinza																						
	<p>Aquífero no Ponto</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>Topo (m):</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Base (m):</td> <td>240.00</td> </tr> <tr> <td>Aquífero: Fissural</td> <td>Captação: Simultânea</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Condição: Confinado</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Penetração: Total</td> </tr> </tbody> </table> <p>Nível da Água: Data: Nível da Água (m): Nível Medido Bombeando (S/N)? Vazão (m3/h):</p>	Topo (m):	0.00	Base (m):	240.00	Aquífero: Fissural	Captação: Simultânea		Condição: Confinado		Penetração: Total														
Topo (m):	0.00																								
Base (m):	240.00																								
Aquífero: Fissural	Captação: Simultânea																								
	Condição: Confinado																								
	Penetração: Total																								

QL 3

Poço: 4300007744 UF: RS

Município: Dona
franciscaLocalidade:
FORMOSO,
TERRAS DE ELOI
SARI

Versão para Impressão

Perfil Construtivo		Dados Gerais:		
	Nome:	IJ734		
	Data da Instalação:			
	Proprietário:	PREFEITURA DE DONA FRANCISCA		
	Natureza do Ponto:	Poço tubular		
	Uso da Água:	Abastecimento urbano		
	Cota do Terreno (m):	93.00		
	Localização:	FORMOSO, TERRAS DE ELOI SARI		
	UTM (Norte/Sul):	6727024		
	UTM (Leste/Oeste):	271594		
	Latitude (GGMMSS):	293356		
	Longitude (GGMMSS):	532127		
	Bacia Hidrográfica:	Atlantico Sul-Sudeste	Nível Estático (m):	Duração do Teste (h):
	Subbacia Hidrográfica:	Rio Jacui	42.35	24:00
	Situação:	Abandonado	Coefficiente de Armazenamento:	Vazão Livre (m3/h):
	Data:	16/08/2004	Vazão Após Estabilização (m3/h):	Tipo do Teste:
Situação:	Abandonado	23.125	Rebaixamento	
Feição Geomorfológica:				
Descrição: Depressao				
Formação Geológica:				
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:		
0.00	120.00	Formacao rosario do sul		
Dados Litológicos:				
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:	
0	12	Solo areno-argiloso	Solo areno-argiloso vermelho amarronzado	
12	104	Folhelho	Folhelho cinza	
104	120	Arenito médio	Arenito médio amarelo amarronzado	
Aquífero no Ponto				
	Topo (m):	0.00		
	Base (m):	105.00		
Aquífero: Poroso	Captação:	Única		
	Condição:	Livre		
	Penetração:	Parcial		
Nível da Água:				
Data:				
Nível da Água (m):				
Nível Medido Bombeando (S/N)?				
Vazão (m3/h):				

QL 4

Incompleto

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300023454

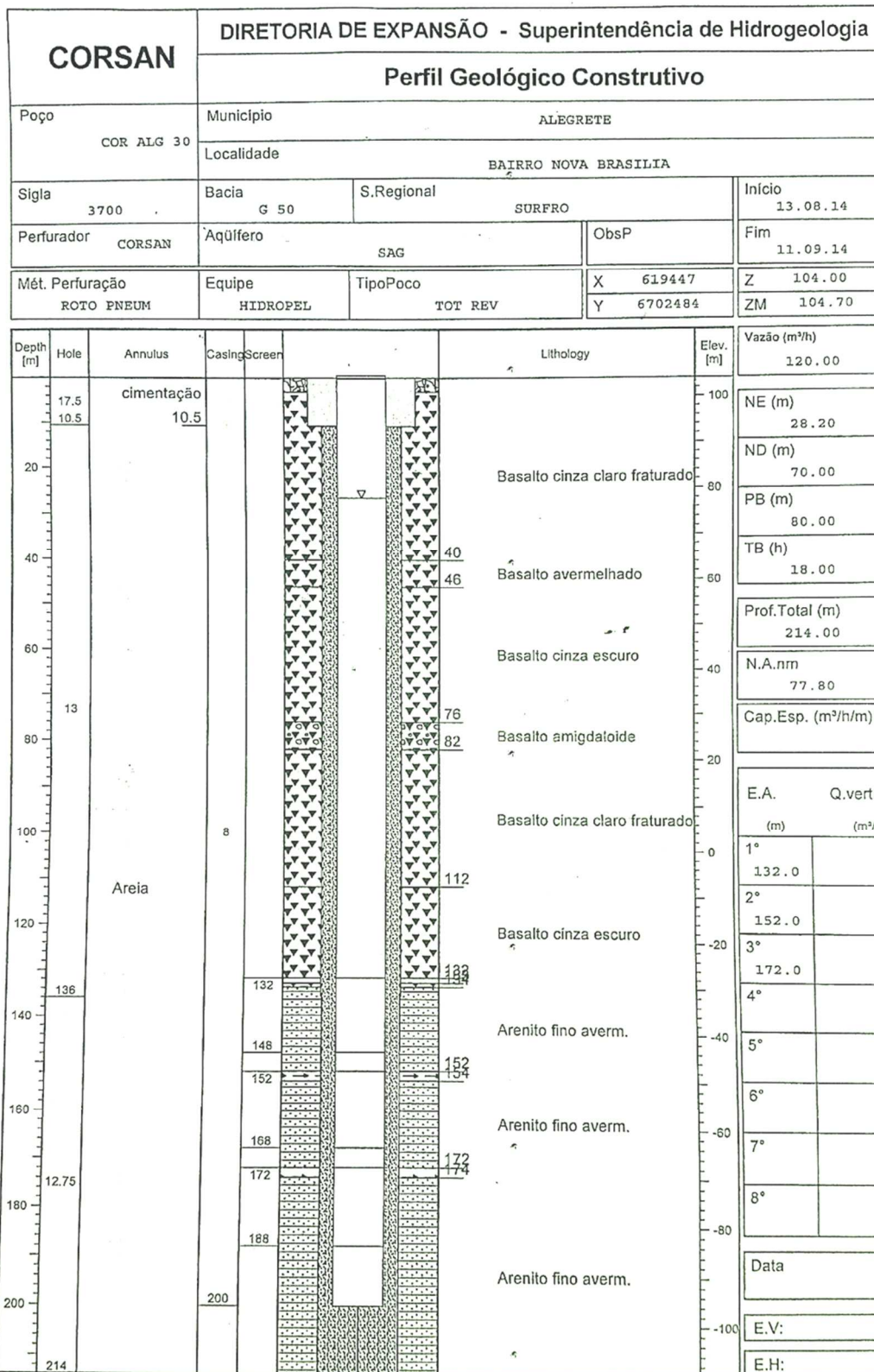
Poço: 4300023454 UF: RS

Município: Faxinal
do soturnoLocalidade: CERRO
COMPRIDO

Versão para Impressão

Perfil Construtivo	Dados Gerais:			
	Nome:	COR-FXS-05 G.3187		
	Data da Instalação:			
	Proprietário:	CORSAN - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO		
	Natureza do Ponto:	Poço tubular		
	Uso da Água:	Sem uso		
	Cota do Terreno (m):			
	Localização:	CERRO COMPRIDO		
	Localidade:	CERRO COMPRIDO		
	UTM (Norte/Sul):	6726365		
	UTM (Leste/Oeste):	264913		
	Latitude (GMMSS):	293413		
	Longitude (GMMSS):	532536		
	Bacia Hidrográfica:	Atlântico Sul-Sudeste	Nível Estático (m):	Duração do Teste (h):
	Subbacia Hidrográfica:	Rio Jacuí	Coefficiente de Armazenamento:	Vazão Livre (m3/h):
	Situação:		Vazão Após Estabilização (m3/h):	Tipo do Teste:
Data:	01/01/2016			
Situação:	Fechado			
Feição Geomorfológica:				
Descrição:				
Formação Geológica:				
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:		
0,00	66,00	Formação Santa Maria		
Dados Litológicos:				
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:	
0	4	Solo areno-argiloso	SOLO ARGILO ARENOSO CINZA AMARROIZADO	
4	6	Arenito fino	Arenito fino marrom	
6	8	Arenito médio	ARENITO E ARGILITO AVERMELHADO	
8	12	Conglomerado	SEIXOS E ALTERAÇÃO marrom	
12	16	Arenito fino	Arenito fino cinza	
16	60	Conglomerado	SEIXOS EM MATRIZ AVERMELHADA	
Aquífero no Ponto				
	Topo (m):	0,00		
	Base (m):	66,00		
Aquífero: Fissural	Captação:	Simultânea		
	Condição:	Confinado		
	Penetração:	Total		
Nível da Água:				
Data:				
Nível da Água (m):				
Nível Medido Bombeando (S/N)?				
Vazão (m3/h):				

Alegrete



AL 1

AL 3

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300024853

Poço: 4300024853 UF: RS

Município: Alegrete Localidade: SEDE Versão para Impressão

Perfil Construtivo		Dados Gerais:	
	Nome:	COR-ALG-20-A G.3482	
	Data da Instalação:		
	Proprietário:	CORSAN - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO	
	Natureza do Ponto:	Poço tubular	
	Uso da Água:		
	Cota do Terreno (m):		
	Localização:		
	Localidade:	SEDE	
	UTM (Norte/Sul):	6704772	
	UTM (Leste/Oeste):	617396	
	Latitude (GMMSS):	294654	
	Longitude (GMMSS):	554708	
	Bacia Hidrográfica:	Rio Uruguai	
	Subbacia Hidrográfica:	Rios Uruguai, Ibicui e outros	
	Situação:		
Data:			
Situação:			
Feição Geomorfológica:			
Descrição:			
Formação Geológica:			
Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:	
0.00	120.00	Formação Serra geral	
120.00	354.00	Formação Botucatu	
Dados Litológicos:			
De (m):	Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:
0	120	Basalto	Basalto
120	354	Arenito médio	Arenito médio
Aqüífero no Ponto			
		Topo (m):	120.00
		Base (m):	354.00
Aqüífero: Poroso		Captação:	Única
		Condição:	Confinado
		Penetração:	Parcial
Nível da Água:			
Data:			
Nível da Água (m):			
Nível Medido Bombeando (S/N)?			
Vazão (m ³ /h):			
Teste de Bombeamento:			
Data:	Surgência:	Nível Estático (m):	Duração do Teste (h):
30/01/2010	N	0.00	24
Nível Dinâmico (m):	Vazão Específica (m ³ /h/m):	Coefficiente de Armazenamento:	Vazão Livre (m ³ /h):
22.81	16.291		
Permeabilidade (m/s):	Transmissividade (m ² /s):	Vazão Após Estabilização (m ³ /h):	Tipo do Teste:
		371.6	Rebaixamento
Método:	Unidade:		
	Bomba submersa		

AL 4

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?pono=4300007958

Poço: 4300007958 UF: RS Município: Alegrete Localidade: NOSSA SENHORA DA CONCEICAO Versão para impressão

Perfil Construtivo		Dados Gerais:			
	0	Nome: I438			
	10	Data da Instalação: 04/02/1982			
	20	Proprietário: CORLAC - PREDIO DESATIVADO			
	30	Natureza do Poço: Poço tubular			
	40	Uso da Água: Abastecimento doméstico			
	50	Cota do Terreno (m): 33.00			
	60	Localização: NOSSA SENHORA DA CONCEICAO			
	70	Localidade: NOSSA SENHORA DA CONCEICAO			
	80	UTM (Norte/Sul): 6702095			
	90	UTM (Leste/Oeste): 621622			
	100	Latitude (GGMSS): 294820			
	110	Longitude (GGMSS): 554429			
120	Bacia Hidrográfica: Rio Uruguai				
		Subbacia Hidrográfica: Rios Uruguai, Ibicui e outros			
		Situação: Bombeando			
		Data: 23/08/2004			
		Situação: Bombeando			
Perfuração:					
Data:		Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Perfurador:	Método:
04/02/1982		0.00	125.00	S.A - DIMEC	Percussão
Diâmetro:					
Feição Geomorfológica:					
Descrição: Planície fluvial					
Formação Geológica:					
Profundidade Inicial (m):		Profundidade Final (m):	Tipo de Formação:		
0.00		105.00	Formação serra geral		
105.00		125.00	Formação Botucatu		
Dados Litológicos:					
De (m):		Até (m):	Litologia:	Descrição Litológica:	
0		10	Argila	ARGILA VERMELHA, GRANULACAO GROSSEIRA.	
10		20	Bacalto	GRANULACAO GROSSEIRA POUCO ALTERADO, COR CINZA.	
20		50	Bacalto	BASALTO CINZA, GRANULACAO FINA A MEDIA, POUCO ALTERADO.	
50		70	Bacalto	BASALTO CINZA, RELATIVAMENTE ALTERADO.	
70		90	Bacalto	BASALTO CINZA, POUCO ALTERADO.	
90		105	Bacalto	ROCHA VERMELHA, DE POUCA ALTERACAO.	
105		125	Areia média	AREIA DE GRANULACAO MEDIA, COM CRISTAIS DE COR CLARA.	
Aquífero no Ponto					
Topo (m):			105.00		
Base (m):			125.00		
Aquífero: Poroso					
Captação:			Única		
Condição:			Livre		
Penetração:			Parcial		
Nível da Água:					
Data:					
Nível da Água (m):					
Nível Medido Bombeando (S/N)?					
Vazão (m ³ /h):					
Teste de Bombeamento:					
Data:	Surgência:	Nível Estático (m):	Duração do Teste (h):		
04/02/1982	N	12.00	05:00		
Nível Dinâmico (m):	Vazão Específica (m ³ /h/m):	Coefficiente de Armazenamento:	Vazão Livre (m ³ /h):		
13.00	5				
P permeabilidade (m/s):	Transmissividade (m ² /s):	Vazão Após Estabilização (m ³ /h):	Tipo do Teste:		
		5	Rebaixamento		
Método:	Unidade:				
	Cacamba				

AL 5

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001641

Poço: 4300001641

UF: RS

Município: Alegrete

Localidade: SITIO
SAO MARCOS

Versão para Impressão

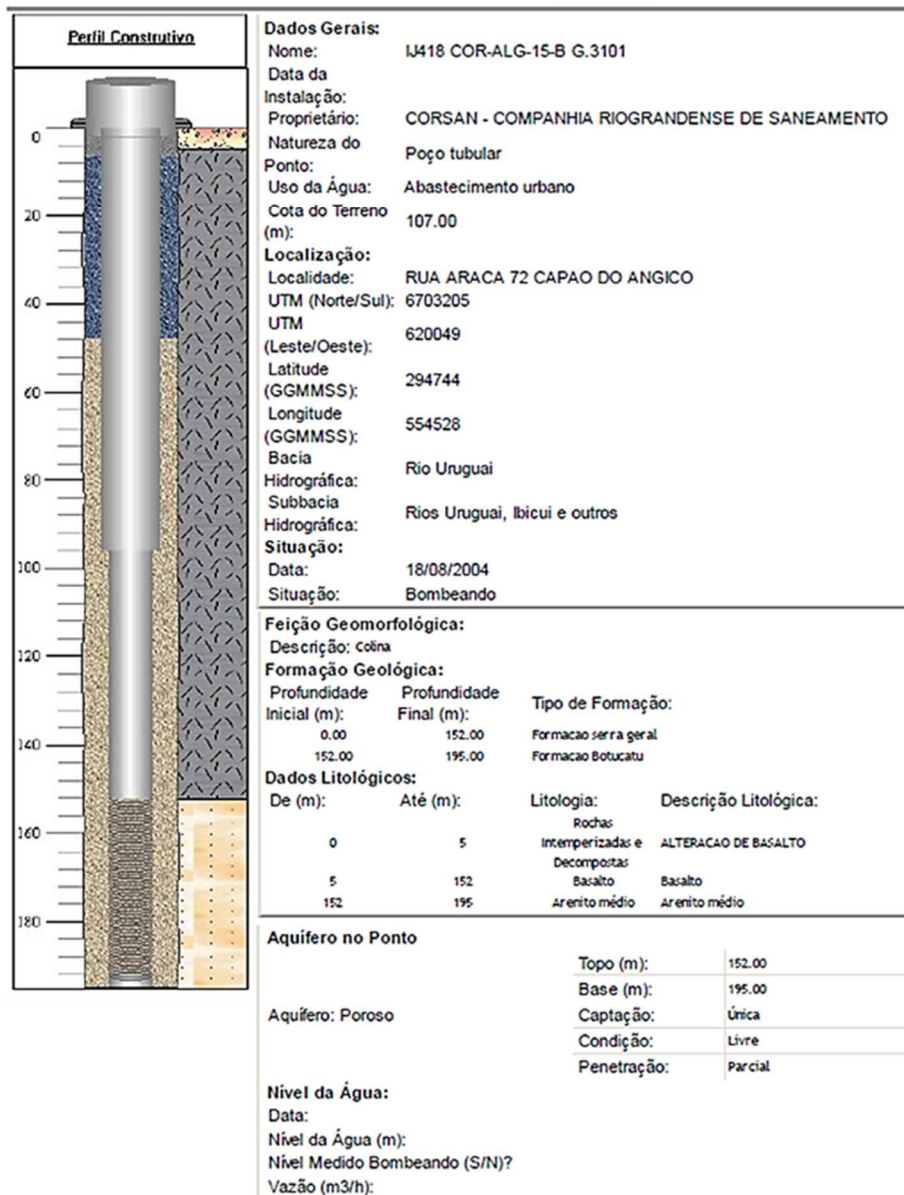
Perfil Construtivo		Dados Gerais:	
	Nome:	ALE-37/7	
	Data da Instalação:		
	Proprietário:	IGNACIO FREITAS	
	Natureza do Ponto:	Poço tubular	
	Uso da Água:	Abastecimento doméstico	
	Cota do Terreno (m):	120.00	
	Localização:		
	Localidade:	SITIO SAO MARCOS	
	UTM (Norte/Sul):	6699321	
	UTM (Leste/Oeste):	605872	
	Latitude (GMMSS):	294955	
	Longitude (GMMSS):	555415	
	Bacia Hidrográfica:	Rio Uruguai	
	Subbacia Hidrográfica:	Rios Uruguai, Ibicui e outros	
	Situação:		
Data:			
Situação:			
Feição Geomorfológica:			
Descrição:			
Formação Geológica:			
Profundidade Inicial (m):	0.00	Profundidade Final (m):	50.00
Tipo de Formação:	Formacao serra geral		
Dados Litológicos:			
De (m):	0	Até (m):	50
Litologia:	Basalto		
Descrição Litológica:	BASALTO		
Aquífero no Ponto			
	Topo (m):		
	Base (m):		
Aquífero: Fissural	Captação:	ÚNICA	
	Condição:	LIVRE	
	Penetração:	PARCIAL	
Nível da Água:			
Data:			
Nível da Água (m):			
Nível Medido Bombeando (S/N)?			
Vazão (m3/h):			

AL 6

05/11/2018

siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300009356

Poço: 4300009356 UF: RS

Município: Alegrete Localidade: RUA
ARACA 72 CAPAO DO ANGICO Versão para Impressão

ANEXO IV

Application of refraction seismic in the vulnerability of underground aquifers.

Júlio César Gall Pires^{1,2}, Daniela G. Sotelo^{1,2}, Adolpho H. Augustin¹, Vanessa C. Osório¹, Tales F. de Paula³, Cássio S. Moura^{1,3}

¹ Pontifical University of Rio Grande do Sul (PUCRS), Institute of Petroleum and Natural Resources, Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre/RS, CEP 90619-900, Brazil

² Postgraduate Program in Materials Engineering and Technology – PUCRS

³ School of Sciences– PUCRS

E-mail: gallpires@hotmail.com

Abstract. The multichannel seismic survey consists of a geophysical technique of indirect quantification, whose principles are based on the acoustic properties of the seismic waves produced locally. The study deals with seismic refraction, whose main advantages are avoidance of any environmental impact during the exploration, low cost and a fast way to present the results.

The objective of the technique is to show acoustic characteristics of the geological environment, such as the propagation velocity of the P wave allowing the estimation of the type of rock that constitutes the subsoil underground. The layers depths determination depends of velocities estimated in the data analysis.

This information provided by the seismic survey taken from the results helps to determine the degree of vulnerability of local groundwater reserves. The interest region of this study is the central depression of the State of Rio Grande do Sul, Brazil. This region consists of one of the recharge region and outcrop areas of the Guarani - SAG Aquifer System. This system consists of a set of geological formations rich in sand and poor in clay, which results in a kind of compartmentalized sponge with potential to accumulate underground water, covered by impermeable rock. Profiles analyzed, in the region of the municipality of Santa Cruz do Sul, border of the general saw (rock that covers the upper SAG), suggest the presence of basalt, argillite and sandstone at approximately 10 meters depth. With these conditions it is possible to infer local variability in the issue of vulnerability of groundwater from geological characteristics. Thus some regions are, of course, more protected than others, which require more attention in the matter of propagation of some contaminant.

1. Introduction

A practical way to investigate different stratigraphic layers, which may reveal geological structures with potential for water storage, is to drill wells in the region. However, this technique, besides being economically unfavorable, leaves entrance doors for contaminants since the confining layers can be broken.

Seismic waves are mechanical vibrations that are propagated in geological layers [1]. These waves can be natural or artificial. Seismic wave propagation obeys the Snell-Descartes law, which states that when a seismic wave encounters an interface that separates two layers with different acoustic impedances, two different waves are created: one reflected wave and one refracted wave.

In this work, an assessment local vulnerability of groundwater reserves using the geophysical technique of multi-channel terrestrial seismic was carried out. For this, it was necessary to determine the propagation velocity of the primary waves to correlate the local acoustic characteristics found with the subsurface rock type.

A seismic survey is based on the analysis of seismograms, that is, a graphical representation of the distance of the receivers by the time of displacement of the signal until it returns to the surface. With this graph it is possible to draw lines, which represent the transit times of the seismic wave in the geological environment, which are commonly called "travel time". In this research the ABC reciprocal method was applied, whose processing depends on 5 shooting points [2]. In general, the reciprocal ABC

method is used to create the seismic profiles, which makes it possible to estimate the thicknesses of the lithological layers.

2. Materials and methods

2.1. Seismograph

The equipment used was a Seistronix™ multi-channel seismograph known as RAS-24. A 12v battery, was included on the seismographs to support it in more distant places, without electricity. Also includes accessories such as: trigger, extension of the trigger, data cable for connection with notebook, geofones and the connection cable of the same. This cable allows mounting arrangements up to 120m with the capacity to install up to 12 geophones. The parameters used for acquisition were sampling period equal to 0.125ms with recording time is 1s and pre-amplification of 24db. The natural frequency of the geophones is 10Hz. The artificial seismic source consists of a 8kg sledgehammer accompanied by a 20x20cm aluminum plate for the coupling of the shot with the ground, as show Figure 1.



Figure 1: a) Extension of the trigger, b) RAS-24, c) 12v battery, d) Trigger e) Serial cable, f) 12 geophones, g) Connection cable of 120m geophones, h) 8kg hammer and, i) Aluminum plate 20x20 cm.

2.2. Processing method

A seismic survey is based on the analysis of seismograms, which graphically represent the distance of the receivers by the time course of the signal to return to the surface. With this graph it is possible to draw lines, which represent the transit times of the seismic wave in the geological environment, which are commonly known as "travel time".

The method used has the purpose of mapping refractors in subsurface. For that, it was fundamental to choose geometry. At acquisition, we created the seismic pulse through mechanical percussion. Where, for small arrangements (up to 60 m), the use of an 8 kg sledgehammer was sufficient. Such a procedure ensures that the arrivals of the refracted wave fronts are detected by the same segment of the array on the surface.

The reciprocal ABC method [2] was applied using 5 trigger points distanced by 30m. For this, 12 geophones were arranged in a straight line at a distance of 5m from each other totalling an arrangement of 60m. Three acquisitions were made at each trigger point. The 5 seismograms obtained in each row were superimposed for analysis Figure 2.

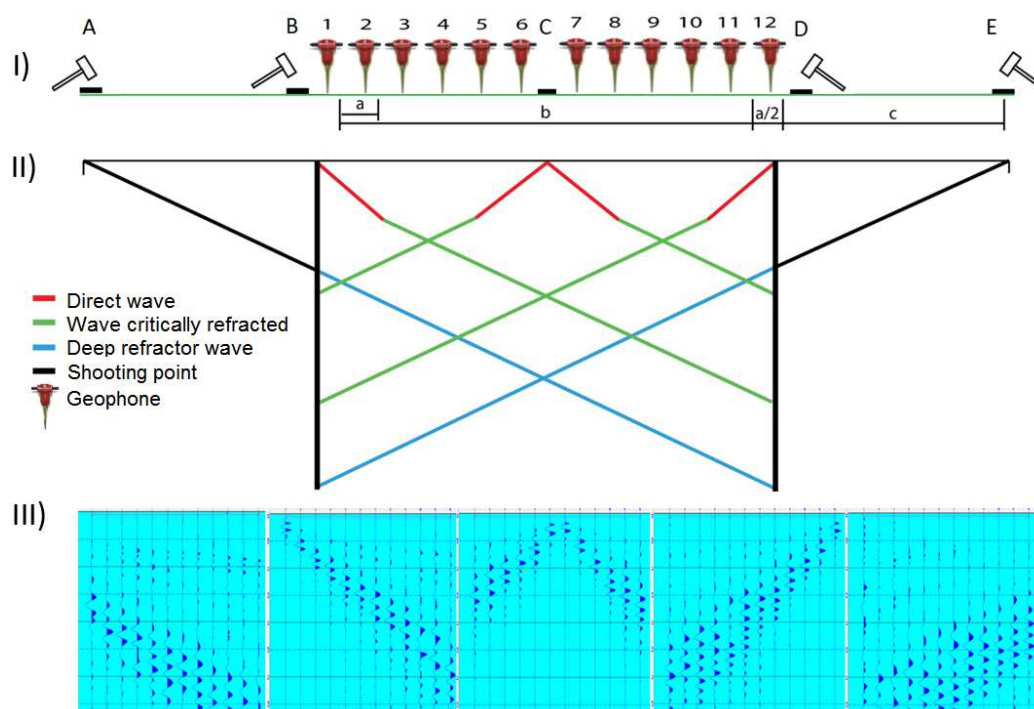


Figure 2: I) Illustration of the arrangement with the shooting points in A, B, C, D and E; II) Illustration of the respective wave transit times; III) Seismograms acquired at shooting points.

After the acquisition of the seismic data, the best records were chosen, which were obtained in triplicate. In addition, the visualization and marking of the first arrivals of the wave in the seismogram, the calculation of velocities and the depth of each layer are also fundamental for compiling the profile. To generate the Travel-Time chart of the survey, the marking of the first wave arrival on each geophone for each record was made using WinsSism™ Version 10.15 processing software.

In the processing step, information such as refractor speed, definition of the number of layers adopted, velocities and characteristics such as inclination and thickness of the refractors can be obtained through the Travel-Time chart with the use of tools present in the software. The final result is the generation of a velocity profile, which is presented in increasing depth, in which the geological strata are differentiated by the seismic velocity found. The procedures for seismic data processing always followed the same methodology. Figure 2 shows an illustration of the methodology applied in the study. The arrangement of the points of fire allows to completely sweep the refractor and, therefore, it is possible to use the Phantom Arrival method [3], which is based on the delay time of the wave, making it possible to accurately measure the velocity of the medium semi-infinite (last layer perceived) as well as, the depths of the layers.

2.3. Location of the seismic survey

The region investigated was that of the municipality of Santa Cruz do Sul, where there is a strong development process due to the agricultural and urban exploitation. In addition, in this region, the weathering mantle presents a regolithic origin and is small in thickness and can be easily damaged, this can compromise the local groundwater reservoirs.

The municipality, as shown in Fig. X, is located in the transition between Basaltic Plateau and Central Depression of Rio Grande do Sul. Consequently, a slope is observed in the north-south direction, going from approximately 600 m to about 80 m in relation to the level of the sea [4], besides the presence of escarpments in the zone of transition, Figure 3.

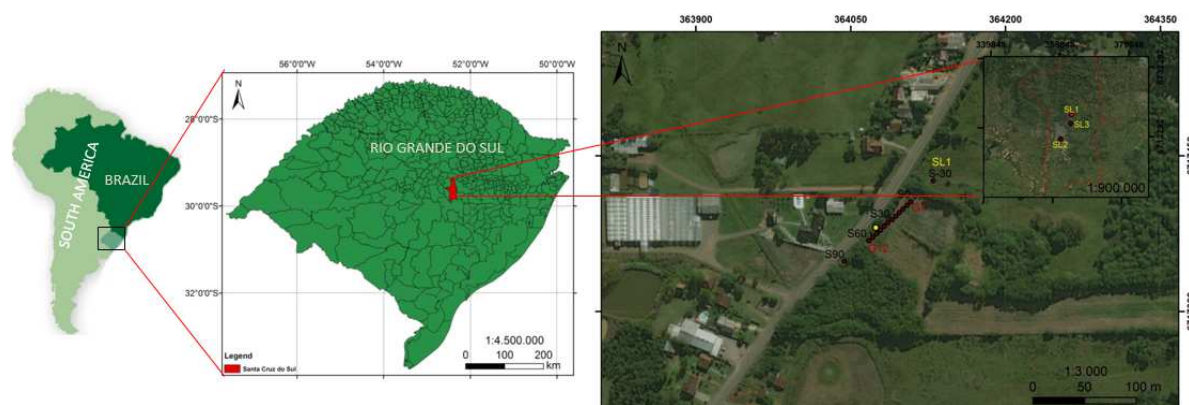


Figure 3: Location of seismic surveys in Santa Cruz do Sul.

In the region it is possible to find outcrops, the Serra Geral formation, the Botucatu formation and the Santa Maria formation, as well as recent sedimentary deposits. Such formations may have characteristics conducive to the storage of groundwater.

The Serra Geral formation belongs to the Cretaceous period, Mesozoic era, this formation represents a colossal volcanic activity that preceded the fragmentation of the supercontinent Gondwana and presents, predominantly, basaltic acid rocks [5]. These have a unique porosity of fractures and, consequently, act as confinants to groundwater [6]. The large number of fractures observed in the outcrops of such formation results in a strong alteration process in these, generating clayey soils. The Serra Geral formation can be divided into the facies Gramado and facies Caxias formations. Attention will be given to facies Gramado, as a consequence of the location of the seismic research surveys.

The Facies Gramado formation represents the first magmatic spills on the Botucatu desert, these facies occur along the transition zone, on the cliffs, making intercalations with the Botucatu formation in the interface region between these. With a maximum thickness of 300 m, this first manifestation was confined by the Botucatu desert, which shaped the path to be travelled forming paleovals and environments between the dunes of such desert. At the end of the contribution of the Botucatu formation, the later magmatic manifestations dominated and covered the desert, conditioning the local topography [7]. The rocks of these facies are massive basaltic, with microfiber texture, gray to black colour and thicknesses between 15 and 35 m [7], age of 132 million years and fine to medium granulation [8].

The Botucatu Formation preceding the Facies Gramado formation corresponds to the immense desert environment of the Jurassic period of the Mesozoic era (203 to 135 million years ago). This formation consists mainly of sandstone sedimentary rocks of fine to medium granulometry. There is also occurrence of feldspar sandstones as well as quartzozos, and conglomerates, but only in specific regions. The predominant sedimentary structure of this formation is cross-stratification, of tabular type (of variable thickness from small to large), but there is also occurrence of plane-parallel laminations [6]. The sediments that formed these rocks were continuously worked by wind and, eventually, fluvial action, in a variable climate from semi-arid to arid - desert environment [9], resulting in the granulometry described. In contact with the Serra Geral formation, intercalations of such formations occur, resulting in sandstone "intertrapps" also known with sandstone lenses.

3. Results and discussions

By analysis of the data processing acquired in the region of the municipality of Santa Cruz do Sul it was possible to distinguish three different layers in the three study sites, showed in Figure 4. The profiles, identified as: SL1; (Figure 4 a), SL2; (Figure 4 b) and SL3; (Figure 4 c) suggest, respectively, the presence of basalt, argillite and sandstone at approximately 10 meters depth. This suggests the existence of shallow groundwater reservoirs. Based on the propagation velocities of the P waves (350, 3000 and 6000 m / s), present in Figure 4 a, it is possible to differentiate three very different layers.

Based on the velocity it is possible to suggest that the first layer consists of weathered rocks and has a thickness of 2.5 m. In the second layer, the velocity increases and makes it possible to relate it to a transition to the sandstone, which descends to 10 m, where it encounters basalt, the third layer that the equipment allowed to reveal. In Figure 4 b, it is possible to suggest that the first layer consists of rocks altered by weathering, constituting the soil with a thickness of 2.5 m, based on the propagation velocities of the P waves (350, 1200 and 2500 m / s). The second layer presents a transition possibly to clay, which reaches up to approximately 6 m, where it meets the clay, which forms the third layer that the equipment allowed to reveal. In Figure 4 c, it is possible to differentiate three layers based on the propagation velocities of the P waves (350, 500 and 3000 m / s). In the first and second layers it is possible to find low velocities from weathered rocks that form the weathering mantle, their thicknesses vary from 2.5m to approximately 11m. In the third layer it was possible to find speeds higher than possibly sandstone. The Botucatu formation is mainly responsible for this geology.

4. Conclusions

The results suggest the presence of geological formations with potential for water storage at 10 m depth. In this case, the fragility of the probable free aquifers of the region is evidenced by the proximity of these formations to the surface.

The seismic method used allowed us to analyze three different stratigraphies, so it was possible to infer the local variability in the issue of vulnerability of groundwater from geological characteristics. Thus, SL1 and SL2 sites are more vulnerable due to the billing of their geological formation. Sites such as SL3 are, of course, more protected since the Botucatu formation consists of sandstone sedimentary rocks of fine to medium granulometry and presents low porosity. Its superior contact with the basalts of the Serra Geral Formation is evidenced by a non - conforming surface, where the sandstones become much silicified, hardened and with reduced porosity [10].

As the main vectors of the technique, we refer to low cost and a quick way to get results. In addition, the use of a sledgehammer as strong seismic avoids any environmental impact during an investigation. The geophysical technique employed presents its contrast in variations of acoustic impedance, but not all geological features involve this greatness. In this way, the more techniques are associated, the greater the degree of reliability and geological characterization of the study.

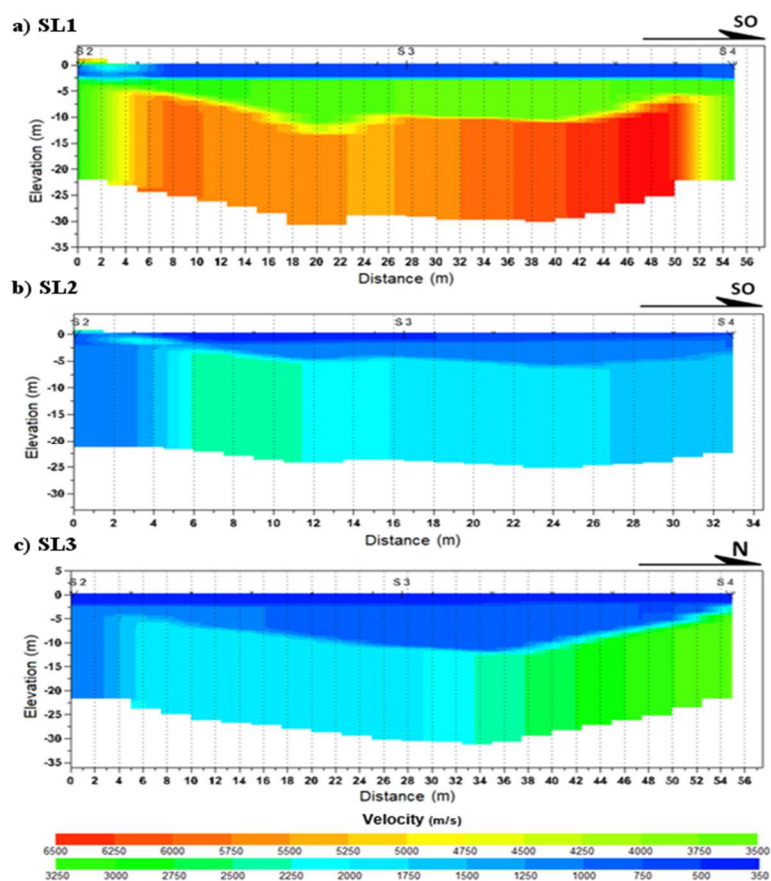


Figure 4: Mapping of the three study sites in Santa Cruz do Sul

Acknowledgments

Authors would like to thanks CAPES by finalcial support and all people involved in the execution of activities in this project.

References

- [1] ANOMOHANRAN, O. Seismic Refraction Method: a Technique for Determining the Thickness of Stratified Substratum. *American Journal of Applied Sciences* 10, 857–862. 2013
- [2] HAWKINS, L. V. The reciprocal method of routine shallow seismic refractions. *Geophysics*, 6, 806-19. 1961
- [3] HAGEDOORN, J. G. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical prospecting*, 7, 2, 158-182. 1959.
- [4] HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Ecologia. 2010.
- [5] ROSSETTI, L. M. M. Arquitetura de Fácies Vulcânicas da Formação Serra Geral na Região de Feliz – Caxias do Sul. Porto Alegre: UFRGS, Geociências. 2011.
- [6] MACHADO, J. L. F. Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UNISINOS. 2005.
- [7] WILDNER, W.; FILHO, V. O.; GIFFONI, L. E. Excursão Virtual aos Aparados da Serra – RS/SC. CPRM. Porto Alegre, 2004.

- [8] MODENA, R. C. C.; HOFF, R.; FARIAS, A.R.; VIEL, J. A. Diferenciação de Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral Utilizando Gamaespectrometria Terrestre na Região Vitivinícola Serra Gaúcha, RS – Brasil. 47º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. 2014.
- [9] MANIERI, D. D. Comportamento Morfoestrutural e Dinâmica das Formas do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio São Pedro – Faxinal – PR. Maringá: UEM, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Departamento de Geografia. 2010.
- [10] NORONHA, F. L; BRESSANI, L. A; MIZUSAKI, A. M. P. Mapeamento geotécnico da área urbana de santa cruz do sul. In: V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, Pelotas, RS. 2009



Different Approaches on the Investigation of Ground Water

Cássio Stein Moura¹, Roberto Heemann¹, Moisés Razeira², Daniela Govoni Sotelo¹, Gabriela Borges Soares¹, Giovanna Ramos Garcez¹, Júlio César Gall Pires¹, Vanessa da Conceição Osório¹ and Heldiane Souza dos Santos¹

1. *Institute of Petroleum and Natural Resources, Pontifical University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90619-900, Brazil*

2. *Federal University of the Pampa, Caçapava do Sul 96570-000, Av. Ipiranga, 6681, Prédio 96 J, Porto Alegre, RS, Brazil*

Abstract: In this paper we discuss ways to obtain information about the quality of ground water and their availability. We classify the different approaches in two categories: geophysical methods, e.g., electroresistivity sounding, seismic survey, gravimetry, MT (magnetotelluric) method, and geochemical methods. The former ones are able to provide information on the geological structure, meaning depth, range, amount of water and possible connections among different exploration areas or regions at risk due to contamination. On the other hand, the last ones provide information about the quality of water and the possible of use for agriculture, industry or human consumption. As a case study we aim at the Guarani Aquifer, more specifically at its recharge zone on the southern rim.

Key words: Drought, ground water, geophysics, geochemistry.

1. Introduction

Drought used to be a problem of some specific regions in Brazil but over the past few years it has become a problem on regions where water was historically abundant. The possible reasons range from the occurrence of the La Niña and El Niño—Southern Oscillation climate pattern to human actions on the atmosphere. Brazilian economy is strongly dependent on the rain regime for some important economic pillars are agriculture and cattle raising. The industrial sector linked to the primary sector is very dependent on water resources for food processing. Due to the strong fluctuation on the rain regime and the spreading of drought over the country, one possible solution to overcome the lack of meteoric water is the exploration of ground water.

It is well known that in the southern region of Brazil is located an enormous groundwater reservoir called Guarani Aquifer that has been partially studied and there is still a huge lack of knowledge about it. Its groundwater could be used for the drought mitigation problem. The United Nations [1] computed that for producing 1 kg of grain requires approximately 1,500 liters of water while 1 kg of beef requires 15,000 liters. Brazilian

government is concerned about economic losses and social problems caused by natural disasters. Since 2015, the project Subsurface Mapping of the Guarani Aquifer has been supported by Science, Technology and Telecommunication Ministry.

In 2012, the National Geologic Service published a study [2] based on the distributions of sedimentary basins on the state. The information about the Guarani Aquifer shows in a preliminary way that: there is a large compartmentalization of the system which means percolation through adjacent areas is opposed by the presence of geological barriers; that the reservoir depth varies from region to region; and that the salinity level varies along the geographical distances. The determination of these properties is fundamental to compute the water extraction cost and the possible uses, e.g., human or animal consumption, agriculture or industry.

Brazil is a country with high per capita water availability. However, according to the National Water Agency [3], the country has uneven distribution of water resources. Examples are: the Amazon Hydrographic Region which has the less populated region of Brazil, with about 80% of water availability; Northeast which has low water

Corresponding author: Cássio Stein Moura, Dr., prof., research fields: underground water, inversion methods, molecular dynamics, nanostructures, experimental physics.

availability and is a highly populated region; South Region which has a high demand for irrigation water; South and Southeast Regions together which have high demand besides having large amount of ionic substances launched in the rivers, compromising the quality of the waters [4].

There are regions where it is not possible to supply the population with surface water because of pollution or overexploitation. Therefore, groundwater will tend to be increasingly studied. Knowledge about groundwater is considered to be much lower than the knowledge about surface water. When it comes to groundwater there is a lag in data such as the quality, quantity and physicochemical characteristics of these waters [5].

The state of Rio Grande do Sul has a significant share one of the largest aquifers in the world. The Guarani Aquifer is the third largest in the world in terms of volume, behind only to the Nubian Sandstone and North Sahara aquifers, both located in Africa [6].

The Guarani Aquifer is a heterogeneous system of sedimentary layers from several origins which have different porosities and permeabilities. These layers were deposited over a period of more than 100 million years and their characteristics influence the aquifer potentiality [7]. It occupies an area of approximately 1.2 million km², in which about two thirds of this area is disposed in Brazilian territory. The state of Rio Grande do Sul has 157,600 km² of the aquifer's area [8] The Guarani Aquifer is a hydrostratigraphic unit associated to a set of rocks formed by sediments originating from the mechanical accumulation of dendritic particles (produced by the decomposition of rocks and silicates: gravel, sand, silt and clay) from the Paraná Basin (Brazil and Paraguay), the Chacoparanaense Basin (Argentina) and the North Basin (Uruguay) [7, 9].

The waters range from very recent to more than 35,000 years. The outcrop area in the State of Rio Grande do Sul is located in the State Central Depression, ranging from the cities of Santo Antônio da Patrulha to Santana do Livramento. The confined area is present in the northern part of the state and is confined by the volcanic rocks of the Serra Geral Formation from the western border to the coastal region of the state [10].

One cannot ignore the human effects on the quality of the water stored in the subsurface.

Several kinds of industries discard their toxic waste on the land surface which can lixiviate down to the water table. Urban waste if not well conditioned may contaminate ground water. Industrial scale agriculture uses large amounts of chemical fertilizers and agrotocics that can easily reach the water table. In recent years the oil and gas industry has made use of rock fracturing in order to exploit shale gas. During this process some chemicals are introduced into the ground and may endanger the water quality. Therefore, besides knowing the quantity and localization of ground water it is important to prevent its pollution caused by anthropic influences.

Several geophysical and geochemical techniques can be used to investigate and characterize a ground water reservoir. In this paper we present and discuss some of them having as case study the Guarani Aquifer.

2. Electroresistivity Sounding

For a full monitoring of the wells located in the Guarani Aquifer region, the GIGA (Interdisciplinary Group for Applied Geophysics), founded in 2008 at PUCRS, suggests the electrical resistivity method to determine the depth and the quality of underground water reservoirs. Special attention was given to the recharge zones, where cities, farms and industrial plants are located requiring large amounts of water for their use and, at the same time, presenting a large contamination risk to the aquifer. The geoelectrical methods were originated in the 18th century, when rock resistivity and soil conductivity were discovered. In the early 20th century, works with mineral prospecting were carried out as the first application. Researchers such as Conrad Schlumberger and Frank Wenner had a great value in the development of the electrical resistivity method [11]. Electrical methods are currently applied in 55% of groundwater geophysical studies, according to geophysical journals in the last 22 years, which included works carried out around the world [12].

The ER (electrical resistivity) sounding is a geophysical method to determine the electrical resistivity of soils and rocks, and then to identify them lithologically. This avoids excavations which require lots of time and huge costs. Among the main applications are geological mapping, mining, civil engineering, environment and groundwater

prospecting.

The resistivity of geological materials can vary within an extensive range. Igneous rocks, for example, present high resistivity values, sedimentary rocks are more conductive and metamorphic rocks present intermediate resistivity values.

The definition of electrical resistivity is given by Ohm's laws. Physically, electrical resistance represents the difficulty of establishing an electric current in a given conductor. In geology, the classification of the types of conductivity is given from the mechanisms of propagation of electric current. The electronic conductivity occurs due to the transport of electrons in the rock matrix. The ionic conductivity is related to the displacement of ions existing in fluid that fill the pores, sediments or fissures of the rocks, and this is the type of mechanism of greater relevance in the studies applied to hydrogeology [11]. The electrical resistivity method is based on the study of the electric potential in the natural electric fields, as well as on the electric potential of the artificially induced fields.

The usual configuration is formed by a set of four electrodes, called A, B, M and N. The pair of electrodes AB is used to inject the electric current in the subsoil whilst the pair MN is used to measure the electrical potential difference generated as a result of the current flow. Several arrays can be employed, depending on the complexity and purpose of the survey. These procedures are related with the position of the electrodes on field and offer great versatility to the method. The main arrays applied are: dipole-dipole, Wenner and Schlumberger.

In the last years the electrical resistivity method has been applied around the world in the groundwater exploration, geoelectric and hydrogeological characterization of water resources and in the study of underground water contamination.

In the Guarani Aquifer located in São Paulo, the hydrological characterization of the recharge area has been performed. Information about the flow, depth and different lithologies was obtained [13]. At Bacia do Alto Rio Curaçá, BA, a hydrogeological model of water storage and transmission was proposed in order to explain salinization mechanisms [14]. In Minas Gerais, a study of the water flow in the recharge area of an aquifer was

performed. The electrical resistivity method was efficient for assessing the recharge process, even when dealing with subtle differences in water content [15].

In Tamilnadu, Southern India, pollution was identified in highly industrialized areas, due to contamination of the soil and shallow water table by effluents [16]. In Rio Claro, SP, monitoring of the contamination plume was performed, in 1999 and 2008. Two flow directions were found and the plume showed to become bigger and deeper during this time span [17].

In a region close to Rio Claro, SP, a study about natural vulnerability of aquifers was carried out, relating hydraulic accessibility and attenuation capacity [18]. In Canoas, RS, a study performed by Petrobras identified more and less protected zones, defined by the presence of a clayey layer above the confined aquifer [11]. In Texas, USA, the impacts on the quality of aquifers due to CO₂ leakage were studied [19].

3. Seismic Survey

A practical way to investigate different stratigraphic layers which may reveal geological structures with potential water storage is to drill wells in the region of interest. However, this technique, besides being economically unfavorable, can facilitate the entry of contaminants once the confining layers are broken.

To minimize the likelihood of contamination it is common to use some seismic refraction geophysical technique which allows indirect quantification of acoustic properties from seismic waves [20]. This study addresses the behavior of the seismic primary wave with which it is possible to determine the propagation velocity of the wave in the geological environment and, after that estimate, the composition and the depth of different layers [21]. This information can contribute to ascertaining the vulnerability of underground water reserves. It is important to have information on the wells depth in order to calibrate the mechanical wave velocity through the different rock layers [22].

The seismic waves are mechanic vibrations, which are propagated in the geologic layers and may be natural or artificial. The propagation of the seismic waves follows the Snell-Descartes' law. According to this law, when a seismic wave finds an interface which separates two layers with different

acoustic impedances, reflected and refracted waves are generated. The acoustic impedance is defined as the product of the rock density by the wave propagation velocity in the layer. A wave passing from a medium with a lower velocity to one with a higher velocity will be reflected back in the same angle as the incident wave and a refracted wave will be transmitted following Snell's law. When the incident wave reaches the surface at a critical angle, refraction occurs at 90° and the seismic wave propagation occurs along the separation interface between the two layers. Since density increases with depth, propagation velocities are greater at deeper layers, as it is found in most geological situations. Therefore, full refraction is favored in the geological environment.

We have used seismic sounding to investigate shallow water resources in the Guarani Aquifer recharge region. The seismic pulse is produced through mechanical percussion, where, for small arrangements (up to 60 m) it is sufficient to use an 8 kg hammer. The method used has the purpose of mapping refractors in subsurface and it becomes fundamental to choose the geometry and the dimensions of the arrangements. This procedure ensures that the same segment of the spread (set of geophones and connecting cable) detects the arrivals of refracted wave fronts. The seismograph

used is a multi-channel Seistronix device with a maximum spread of 120 m and 12 geophones.

After data collection, comes the step of seismogram analysis that is a graphical representation of the distance of the receivers by the signal travel time of the mechanical wave back to the surface [23].

In such a graph, straight lines are drawn representing the travel time of the wave. We use the reciprocal ABC method whose processing depends on 5 shooting points, where three of them are located inside the spread and two outside the seismic line with a distance of at least half the length of the spread.

They are known as direct shot and reverse shot. Fig. 1 shows a representation of the method applied in our experiments. The arrangement of the shooting points allows sweeping the refractor entirely, making possible the use of the Phantom Arrival method [24] which is based on the delay time of the wave, providing a more accurate strategy specifically with respect to the depths of the layers. With such method we are able to identify geological structures near the surface that play important roles on the aquifer structure.

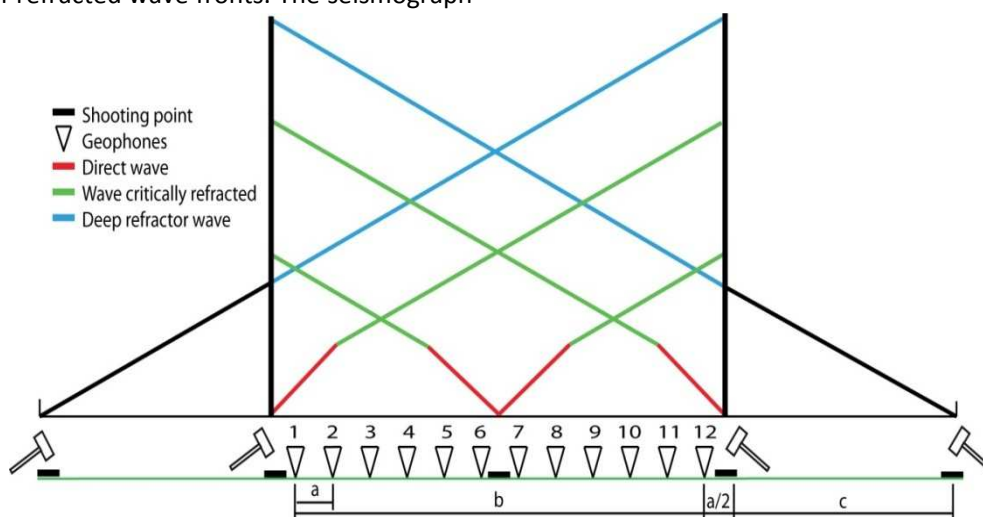


Fig. 1 Representation of shooting points and travel time graphs for the ABC seismic method. In (a) spacing between geophones, (b) length of the arrangement and (c) spacing of the distant shots.

4. Gravimetry

Gravimetric surveys are based on measurements of the variation of the Earth's gravity field. In other words, gravimetry consists of a set of techniques whose purpose is to measure the intensity of gravity on a determined region. The fundamental law of the gravimetric method is Newton's Law given by the equation

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

where, F is the force of attraction between the masses m_1 and m_2 , r is the distance between the masses, considering them being of negligible size, and G is the universal gravitation constant whose value in SI units is $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$. The data obtained in gravimetric measurements are the acceleration of gravity usually expressed in m/s^2 , or, more commonly, mGal which equals 0.001 cm/s^2 .

Field missions carrying a gravimeter are able to perform local measurements at predetermined points. Such missions require using dedicated human resources, personnel dispatching and logistic expenses. An option to such procedures is the use of open available satellite data. The GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) consists of two identical artificial satellites that were placed in the same polar orbit at approximately 500 km of altitude and separated by 220 km from each other. They use a K-band resonant microwave system that gauges the speeds and distances between the two satellites due to Earth's gravitational field changes that are correlated to changes in mass (topography) and irregularities in mass density distributions. These satellite path variations allow the determination of tiny gravitational alterations. The two satellites are capable of sensing a change in their separation equivalent to one micron [25]. The GRACE products are obtained, processed and archived by the SDS (Science Data System) and distributed by JPL (Jet Propulsion Laboratory), UTCSR (University of Texas Center Space Research) and GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam). SDS releases the gravity field models of the Earth and distributes them via the PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) and/or ISDC (Information System end Data Center) after the validation

of the mathematical models.

Thus, using GRACE data, one can estimate the variation of the water mass in an underground reservoir such as the Guarani Aquifer. During the seasonal recharging period the amount of water within the geologic formation increases and tends to be depleted in the dry period due to its exploration. This variation causes changes of gravity due to alterations of masses in a thin layer of the Earth's surface. Moreover, a plastic deformation of the crust takes place and can be observed through calculation of the Stokes coefficients provided by GRACE mission [26]. Therefore, it is possible to foresee the future of the aquifer based on the balance between recharging and exploration.

5. MT (Magnetotelluric) Method

The MT method uses the natural temporal variation of the terrestrial EM (electromagnetic) field as a signal source to estimate the electrical conductivities in subsurface in the frequency domain. It is assumed that the incidence of the EM field on Earth is a flat EM wave that moves vertically to Earth. The diffusion of the magnetic field within the Earth induces electric currents called telluric currents. They generate new secondary magnetic fields that are measured by the MT sensor. The intensity of the current is small for it is a natural source, thus a small source of noise may cause interference in the measurement. These interferences can be derived from human action or natural sources of EM fields, such as antennas, electric fences, lightning, solar explosions, among others [27]. The laws of physics, which control these EM induction processes are represented by the Maxwell's equations. The method output is an impedance tensor which is interpreted in terms of resistivity as a function of position and depth by means of mathematical models. These models need some initial hints to start from and can be 1D (one-dimensional), 2D (two-dimensional) or 3D (three-dimensional) [27, 28].

This method has been widely used in several countries around the world due to the unique capacity of exploration at shallow and great depths without the use of an artificial source. Possible uses encompass prospection of water, oil and gas. The method is well suited to the case of the Guarani Aquifer for in several regions the water reservoir is located underneath a deep basalt structure reaching

more than 1 km of depth. An advantage of the method is the ability to provide data with little or no environmental impact [28]. Another advantage of this method is the characterization of regions with local electrical heterogeneities, usually associated with fault structures, and the recognition of areas with large sedimentary thicknesses. In addition, there is the low cost of fieldwork compared to other geophysical methods, such as seismic sounding. Therefore, the MT method turns to be an adequate way to map the Guarani Aquifer.

6. Integration of Geophysical Data

It is well known that, in many cases, the ground prospecting with geophysical techniques is a kind of problem known as inverse problem [29].

When the equations that describe the system, the boundary and initial conditions are known, the problem is said mathematically well posed and thus solvable. Otherwise, the problem is said ill-posed and is of an inverse type.

The inverse problem has no single solution. That is, it is ambiguous. Thus the geophysical prospecting presents ambiguities in the determination of geological structures in the ground.

A technique that minimizes these ambiguities requires the use of multiple geophysical methods, like the ones described in the present article. Once the data are collected they are integrated (processed simultaneously) to produce an approximation to the solution in order to determine the properties and geological structures of the system being studied, e.g., the Guarani Aquifer.

One of the most promising tools for analyzing multiple geophysical data with minimal human interpretation is machine learning tools. The most widely used machine learning tools nowadays are neural networks and genetic algorithms.

Thus, the method of data processing by machine learning appears to be the most suitable for the study of the Guarani Aquifer. The use of these techniques nowadays represents a new research area in geophysics and is in the state of the art of the field.

7. Geochemistry

The recharge area and a part of the confined area of the Guarani Aquifer is

located at its southern rim and presents an adequate region to be investigated due to its shallow depth and accessibility through water wells already in use by the population. In the eastern part of this recharge area is located the city of Santa Cruz do Sul in the Central Depression region of the State of Rio Grande do Sul [30]. The city presents the following lithological units: sandstone, shales, siltstones and argillites [10]. Its geographic coordinates are 29°43'59" South and 52°24'52" West. It has an average altitude of 122 m and a total area of 794.49 km², with 156.96 km² of urban area and 637.53 km² of rural area. Geologically, the outcropping units in the study areas correspond to the Neotriassic and Jurassic-Euclidean supersequences of the Paraná Basin, formed respectively by the Rosário do Sul Group, represented by the member Alemoa of the Santa Maria Formation and by the Caturrita Formation, and the São Bento Group, composed of the Botucatu and Serra Geral formations [31]. The main economic activities in the city are tobacco, food, clothing, metallurgy, plastic and rubber industries. The survey of land use in Santa Cruz do Sul indicates that the city's most intense agricultural crops are tobacco, irrigated rice, corn and soy. These activities were investigated by several authors due to the high potential risk of contamination of the soil and groundwater by the substances used in their control, which allow diffuse contamination, making it difficult to identify and control them [32].

Pesticides have been widely distributed on the region and their traits have been detected in all areas of the environment: air, water and soil [33]. According to data extracted from the final Report of the Health Surveillance Center of the Health Department of Rio Grande do Sul, the most likely pesticides to be found in this area are: 2,4-D, glyphosate, imazetapyr, fipronil, clomazine, imazetapique and quincloraque [34].

Knowledge of groundwater quality used by the community is extremely important. Mainly in the rural areas of the city, where it is common practice to drill artesian wells and cacimbas to supply houses, which, in the majority of cases, are done without any analysis of water quality prior to the start of use neither constant monitoring. There are families that have reported on the use of the artesian well by the family for more than five

decades without ever having performed an analysis of the quality of the well. In many cases, the land where the artesian well that supplies the family is housed is the same as for housing chicken or pigs and growing tobacco, corn, soybeans or rice. For these cases, it would be important to monitor water quality, since both animal waste and pesticides applied to plantations have great potential to reach groundwater. The main concern regarding the contamination by agrochemicals in groundwater is due to the fact that the environment provides some resistance to these substances due to the lack of the necessary conditions for their degradation, such as the existence of low temperatures, a reduced amount of oxygen, absence of light and little microbial activity [32].

The main processes that occur after the application of pesticides in the soil are leaching, surface runoff, sorption, chemical and biological degradation and volatilization. Leaching is characterized by infiltration of the products to the deeper layers. It depends on soil moisture and porosity, and can reach the water table, being the main mechanism of contamination of groundwater. In surface waters, runoff is characterized as the main threat, which can contaminate reservoirs, lakes and rivers [35, 36].

The following physical and chemical parameters are investigated in situ directly from the water collected from artesian wells: temperature, dissolved oxygen, electrical conductivity, pH and salinity. The quantification of metals present in the groundwater occurs through the technique called inductively coupled ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry). The anions present in these waters are quantified through IC (ion chromatography) and the pesticides present are analyzed by HPLC (high performance liquid chromatography).

The ICP-OES is an analytical technique that quantifies elements (metals, semimetals and rare earths) in several types of samples. It is based on the detection of EM radiation emitted by neutral atoms or excited ions in the regions of the visible and ultraviolet EM spectrum. The fundamental principle of atomic emission spectrometry is the property of atoms emitting EM radiation when subjected to certain conditions. In this case,

the ionization of the elements to be analyzed will be done by the inductive plasma of argon. The plasma presents temperature varying between 7,000 K and 10,000 K and has sufficient energy to promote the excitation of most of the existing chemical elements, allowing the quantification of a wide range of analytes [37].

Chromatography is the name used to designate a set of techniques where two phases are used, one stationary and the other one mobile, through which the various components of the solution are distributed. The way in which the stationary phase is defined is the type of chromatography. When fixed in a tube through which the mobile phase is required to pass, it is referred to as column chromatography and may be classified as liquid, gaseous or fluid, according to the mobile phase used. Ionic chromatography allows the ionic composition to be separated from a sample by passing it through a column filled with resins or zeolites [38]. Once separated, the ions are identified, detected and quantified. The method can be applied efficiently in potable or groundwater for the determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate, sulphate, calcium, potassium, sodium and magnesium.

HPLC is the most used of all analytical separation techniques due to its sensitivity, its easiness of adaptation to accurate quantitative determinations, its suitability to separation of non-volatile or thermally fragile species and, above all, its wide applicability [39]. HPLC has been used for the determination of pesticides coupled to several detectors, among them the DAD [40, 41] and MS [42-44], which help in the identification and quantification of the compounds [45].

Studies of the application of screening models for the assessment of the potential for contamination of groundwater have been increasingly used because of the easiness in obtaining the parameters and the low cost. However, the most commonly used parameters are those adopted by the EPA (Environmental Protection Agency), the GUS (Groundwater Ubiquity Score) index and the GOSS method [46, 47]. All the mentioned methods represent different combinations of parameters such as: water solubility, soil organic matter adsorption coefficient, Henry's Law constant, speciation, half-life in water, half-life in the soil, annual rainfall.

Another widely used assessment methodology, the GOD system, evaluates the vulnerability of the aquifer to contamination. This index is obtained from the product among three evaluated parameters. “G” evaluates the degree of hydrological confinement; “O” stands for the occurrence of the overlying substrate and is related to the lithological characteristics and degree of consolidation of the saturated zone or confining layers (free, confined and semi-confined) and “D” represents the depth of groundwater [48]. Some limitations should be considered in the models presented, such as the absence of data on some substances and mainly their metabolites, as well as the individual evaluation of the compounds to the detriment of the effects caused by their combination, since in many cases several substances are simultaneously applied in the soil [49, 50]. The models are simplifications of the behavior of pesticides in the environment and therefore a follow-up through the collection and analysis of samples is necessary in the validation of the model employed plus the evaluation of how much it diverges from reality.

8. Conclusion

The increase of the water demands by mankind has posed a great problem to current society. It is necessary to have a clear view that the surface water per se is not sufficient for the population use: the exploration of underground water is an urgent necessity and presents itself as a great challenge to be overcome. Besides the rational use of underground water there is the need to protect it from pollution. In this paper we discussed some of the geophysical and geochemical techniques that can be used to better understand an underground water reservoir choosing as a case study the Guarani Aquifer.

Acknowledgments

We acknowledge the Brazilian Coordination of the Improvement of the Graduate Level Personnel (CAPES) for its financial support.

References

[1] UNWater.org [homepage on the internet]. New York: The United Nations Inter-Agency Mechanism on all Freshwater Related Issues, Including Sanitation; c2014 [updated 2014 Oct 16]. Available from: <http://www.unwater.org/statistics/statistics->

[detail/en/c/211645/](http://www.unwater.org/statistics/statistics-detail/en/c/211645/).

- [2] CPRM. 2012. “Recursos Hídricos Subterrâneos—Levantamento de Recursos Hídricos Subterrâneos.” *Relatório Diagnóstico* 16.
- [3] ANA—Agência Nacional de Águas. 2013. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*.
- [4] Portugal, J. P. S., Reydon, B. P., and Portugal, N. S. 2015. “As águas minerais no Brasil: uma análise do mercado e da institucionalidade para uma gestão integrada e sustentável.” *Rev. Ambiente e Água* 10 (2): 413-30.
- [5] Faria, A. M. J. B. 2014. *Aquífero Guarani: defesa da soberania e sustentabilidade*. Multideia: Curitiba-PR.
- [6] UNESCO/IHP. 2003. “Interdisciplinary Approaches in Small Catchment Hydrology: Monitoring and Research.” In *Proceedings of the 9th Conference of the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB) Demänovská dolina (Slovakia)*, 25-28 September.
- [7] Machado, J. L. F. 2005. “Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul.” PhD Thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo.
- [8] Silva, P. C. A. 2011. *Reserva Hídrica: Aquífero Guarani e seu uso sustentável*. Monografia. Pós-graduação do centro de formação, treinamento e aperfeiçoamento da câmara dos deputados. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação. Coordenação de biblioteca. Brasília.
- [9] Rebouças, A. C., and Amore, L. 2002. “O Sistema Aquífero Guarani—SAG.” *Revista Águas Subterrâneas* 16: 135-43.
- [10] Viero, A. C., and da Silva, D. R. A. 2010. *Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade*. Porto Alegre, Brasil: CPRM—Serviço Geológico do Brasil.
- [11] Braga, A. C. O., Malagutti Filho, W., and Dourado, J. C. 2006. Resistivity (DC) Method Applied to Aquifer Protection Studies. *Revista Brasileira de Geofísica* 24 (4): 573-81.
- [12] Consórcio Guarani: Tahal Consulting Engineers Ltd., Seinco, S. R. L., Hidroestructuras, S. A., Hidrocontrol, S. A., Hidroambiente, S. A. Técnicas Geofísicas Terrestres Aplicáveis ao Estudo no Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Guia Básico de Dados Regionais.
- [13] Oliva, A., Gastmans, D., Zamprogno, C. F., Paula e Silva, F., Romualdo, D. B., Lobo, G. A., Lima, W. P., Rocha, H. R., and Chang, H. K. 2006. “Utilização do método da eletrorresistividade na caracterização hidrogeológica de área de recarga do Sistema

- Aquífero Guarani." *XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*.
- [14] Lima, A. O. 2010. "Estruturas geoeletrica e hidroquímica do Sistema Aquífero cristalino da Bacia do Alto Curaçá, semi-árido da Bahia." *Rev Bras Geof* 28 (3): 445-61.
- [15] Morais, F., and Bacelar, L. A. P. 2010. "Geofísica Aplicada ao Estudo de Fluxos da Água no Solo." *Sociedade & Natureza* 22 (1): 213-22.
- [16] Srinivasamoorthy, K., Sarma, V. S., Vasantavigar, M. P., Vijayaraghavan, Chidambaram, S., and Rajivganthi, R. 2009. "Electrical Imaging Techniques for Groundwater Pollution Studies: A Case Study from Tamil Nadu State, South India." *Earth Sci. Res. J.* 13 (1): 30-9.
- [17] Bortolin, J. R. M., and Malagutti Filho, W. 2010. "Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos." *Eng Sanit Ambient* 15 (4): 367-74.
- [18] Braga, A. C. O. 2008. "Estimativa da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal." *Rev. Bras. Geof.* 26 (1): 61-8.
- [19] Carroll, S. A. 2014. "Key Factors for Determining Groundwater Impacts due to Leakage from Geologic Carbon Sequestration Reservoirs." *Int. J Greenhouse Gas Control* 29: 153-68.
- [20] Nonrandom, O. 2013. "Seismic Refraction Method: A Technique for Determining the Thickness of Stratified Substratum." *American Journal of Applied Sciences* 10 (8): 857-62.
- [21] Michel, G. P., and Kobiyama, M. 2015. "Estimativa da profundidade do solo: Parte 1—Métodos de campo." *Revista Brasileira de Geografia Física.* 8 (4): 1206-24.
- [22] Gandolfo, O. C. B. 2014. A determinação da profundidade do nível d'água pelo método da refração sísmica. Sociedade Brasileira de Geofísica. VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. 2014 Out [cited 2014 Nov]; [about p. 5]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/268745295>.
- [23] Schuster, G. T., and Quintus-Bosz, A. 1993. "Wave Path Eikonal Travel Time Inversion: Theory." *Geophysics* 58 (9): 1314-23.
- [24] Hagedoorn, J. G. 1958. "The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections." *Geophysical Prospecting* 7 (2): 158-82.
- [25] NASA [homepage on the internet]. Houston: Studying the Earth's Gravity from Space: The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE); c2003. Available from: http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/fact_sheet/index.html.
- [26] Bonfim, E. P., and Molina, E. C. 2009. "Análise da variação dos elementos do campo de gravidade na Região do Aquífero Guarani a partir dos dados GRACE." *Revista Brasileira de Geofísica* 27 (1): 17-34.
- [27] Guaragna, I. M. 2014. *Atenuação de ruídos regionais para dados Magnetotélúricos (MT)*. Monografia (Universidade Federal Fluminense).
- [28] Costa, F. A. 2005. "Investigações Eletromagnéticas na Porção Continental da Bacia do Espírito Santo e suas Adjacências Cristalinas." M.Sc. thesis, Ministério da Ciência e Tecnologia, Observatório Nacional, Departamento de Geofísica.
- [29] Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sherif, R. F. 2004. *Applied Geophysics*, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press. UNESCO/WWAP. Water for People Water for Life. 2003 [updated 2015 Sept. 04]. Available from: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001297/129726e.pdf>.
- [30] IBGE. Produção Agrícola Municipal—2011. Elaboração: SEPLAG RS/DEPLAN—01/2013.
- [31] Noronha, F. D. L., Mizusaki, A. M., and 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): 127-45.
- [32] Silva, D. R. O., de Avila, L. A., Da Cas Bundt, D. A. A., and Caldas, E. G. P. S. S. 2011. "Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavouras de arroz irrigado." *Química Nova* 34 (5): 748-52.
- [33] Yadav, I. C., Devi, N. L., Syed, J. H., and Jones, K. C. 2015. "Current Status of Persistent Organic Pesticides Residues in Air, Water, and Soil, and Their Possible Effect on Neighboring Countries: A Comprehensive Review of India." *Science of the Total Environment* 511: 123-37.
- [34] CEVS/SES (Centro de Vigilância em Saúde da Secretaria da Saúde). 2010. Secretaria Estadual da Saúde Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Levantamento do Uso e da Criticidade dos Agrotóxicos Usados no Estado do Rio Grande do Sul. Talha-Mar Soluções Ambientais, RELATÓRIO FINAL.
- [35] Demoliner, A. 2008. "Otimização e Validação de Metodologia Analítica Empregando SPE e LC-ESI-MS/MS para Determinação de Multiclasses de Agrotóxicos e Metabólitos em Água de Superfície e de Abastecimento Público." Dissertation, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande.
- [36] Rebelo, R. M., and Caldas, E. D. 2014. "Avaliação de Risco Ambiental de Ambientes Aquáticos Afetados pelo uso de Agrotóxicos." *Química Nova* 37 (7): 1199-

208.

[37] USP (Universidade de São Paulo) Central Analítica, Instituto de Química. Espectrometria de emissão óptica com plasma—ICP OES [homepage on the Internet]. São Paulo. [Updated 2017 Apr 27]. Available from:

http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=13.

[38] Gonçalves, M. L. S. S. 2001. *Métodos Instrumentais para análise de soluções*. Análise Quantitativa, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

[39] Skoog, D. A., Skoog, D. A., Holler, F. G., Nieman, T. A., and Caracelli, I. 2002. *Princípios de Análise Instrumental* (5th ed.). Porto Alegre: Bookman.

[40] Cerejeira, M., Viana, P., Batista, S., Pereira, T., Silva, E., Valerio, M. J., Silva, A., Ferreira, M., and Silva-Fernandes, A. M. 2003. "Pesticides in Portuguese Surface and Ground Waters." *Water Research* 37: 1055-63.

[41] D'Archivio, A. A., Fanelli, M., Mazzeo, P., and Ruggieri, F. 2007. "Comparison of Different Sorbents for Multiresidue Solidphase Extraction of 16 Pesticides from Groundwater Coupled with High Performance Liquid Chromatography." *Talanta* 71: 25-30.

[42] Marín, J. M., et al. 2006. "Quantification and Confirmation of Anionic, Cationic and Neutral Pesticides and Transformation Products in Water by on-line Solid Phase Extraction-Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry." *Journal of Chromatography A* 1133: 204-14.

[43] Ferrer, I., and Thurman, E. M. 2007. "Multi-residue Method for the Analysis of 101 Pesticides and Their Degradates in Food and Water Samples by Liquid Chromatography/Time-of-Flight Mass Spectrometry." *Journal of Chromatography A* 1175: 24-37.

[44] Shomar, B. H., et al. 2006. "Occurrence of Pesticides in Groundwater and Topsoil of the Gaza Strip." *Water, Air and Soil Pollution* 171: 237-51.

[45] Braga, J. W. B. 2007. "Determination of Pesticides and Metabolites in Wine by High Performance Liquid Chromatography and Second-Order Calibration Methods." *Journal of Chromatography A* 1148: 200-10.

[46] Primel, E. G., Zanellall, R., Kurzll, M. H. S., Gonçalvesll, F. F., MachadoIII, S. O., and Marchezan, E. 2005. "Poluição das águas por herbicidas utilizados no cultivo do arroz irrigado na região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil: Predição teórica e monitoramento." *Quimica Nova* 28 (4): 605-9.

[47] Zini, L. B. 2016. "Contaminação de agrotóxicos na água para consumo humano no RS: avaliação de riscos, desenvolvimento e validação de método empregando SPE e LC-MS/MS." M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[48] Foster, S., and Hirata, R. 1988. *Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data*. Peru Lima: Pan American Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS).

[49] Lourencatti, C., Spadotto, C. A., Santiago-Silva, M., and Ribeiro, M. L. 2005. "Avaliação do potencial de contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: comparação entre métodos de previsão de lixiviação." *Pesticidas: Risco Exotóxicológico e Meio Ambiente* 15: 1-14.

[50] Neto MLF. 2010. "Norma Brasileira de Potabilidade de Água: Análise dos parâmetros de agrotóxicos numa abordagem de avaliação de risco." PhD Thesis, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Rio de Janeiro.



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
Site: www.pucrs.br