

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATHEUS FERNANDES DA CRUZ

**IMAGEAMENTO CRUSTAL DA PORÇÃO SUL DA BACIA DO PARANÁ E
ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE PELO MÉTODO SISMOLÓGICO FUNÇÃO DO
RECEPTOR**

**Caçapava do Sul
2019**

MATHEUS FERNANDES DA CRUZ

**IMAGEAMENTO CRUSTAL DA PORÇÃO SUL DA BACIA DO PARANÁ E
ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE PELO MÉTODO SISMOLÓGICO FUNÇÃO DO
RECEPTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Dr. Marcus Vinicius Aparecido
Gomes de Lima

**Caçapava do Sul
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

d957i da Cruz, Matheus Fernandes

Imageamento crustal da Porção Sul da Bacia do Paraná e
Escudo Sul-Rio-Grandense pelo método sismológico Função do
Receptor / Matheus Fernandes da Cruz.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2019.

"Orientação: Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima".

1. Geofísica. 2. Sismologia. 3. Espessura Crustal . 4.
Função do Receptor. 5. Crosta. I. Título.

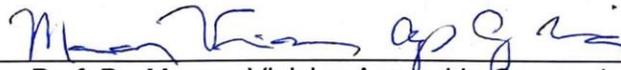
MATHEUS FERNANDES DA CRUZ

**IMAGEAMENTO CRUSTAL DA PORÇÃO SUL DA BACIA DO PARANÁ E
ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE PELO MÉTODO SISMOLÓGICO FUNÇÃO DO
RECEPTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 09/12/2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Felipe Guadagnin
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza
UNIPAMPA

“Dedico este trabalho a minha amada mãe
Elisabete da Cruz Fernandes, a pessoa
mais importante do mundo para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e técnicos que estiveram presentes e de alguma forma contribuíram para o meu aprendizado durante a graduação.

Aos integrantes do Laboratório de Análise de Sinais Geofísicos (LASG), mais especificamente aos professores Marcus Vinicius, Felipe Guadagnin, Everton Frigo e Ezequiel Galvão os quais tiveram uma enorme importância ao decorrer da minha graduação.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Marcus Vinicius por me ajudar a produzir este trabalho e com ele concluir esta fase tão importante na vida. E ao professor Everton Frigo, por incentivar os alunos a sempre buscar seus objetivos, pelo trabalho realizado como coordenador em prol do curso da Geofísica, por todo o conhecimento que a mim foi passado e pela oportunidade de trabalhar com o mesmo em um projeto de iniciação científica.

Agradeço muito por poder compartilhar esta fase com todos os colegas que estiveram presentes, em especial ao Welynton Araujo, Victor Gustavo, Matheus Freire, Guilherme Alcalde, Barbara Caprara, Daniel Coppi, Bruna Farias, Lessandro Sadala e Jonas Oliveira. As lembranças de todos os momentos felizes e tristes que passamos juntos ficarão guardadas na memória para sempre.

Um agradecimento mais do que especial a minha família, ao meu Pai por todo amor e carinho, a minha namorada Luana, por sempre me apoiar e incentivar a correr atrás dos meus sonhos, saiba que sem vocês eu não teria chegado até aqui.

E com lágrimas no rosto que faço uma homenagem a principal pessoa responsável pela minha graduação e por quem eu me tornei, minha mãe Elizabete. Pessoa que sempre fez de tudo para me ver feliz, agradeço por todo amor, carinho, risadas e abraços que pude receber de ti mãe, saiba que tudo o que eu conquistar na minha vida será em sua homenagem, queria muito poder te abraçar na minha formatura e te agradecer por me fazer a pessoa mais feliz do mundo, sei que isso não será possível, mas sei que onde eu estiver você estará dentro do meu coração. Apesar da dor da saudade, vou continuar lutando para ser o filho que você sempre sonhou, mesmo que você não esteja mais comigo fisicamente, você estará guardada em um lugar especial dentro do meu coração. Te amo muito mãe.

“O amor é a única coisa que somos capazes de perceber que transcende as dimensões do tempo e do espaço”.

Dr. Brand (Interestelar, 2014)

RESUMO

A utilização de métodos sismológicos para o estudo do interior da Terra é uma ferramenta fundamental para compreender a dinâmica do planeta. A sismologia contribuiu para a construção do modelo clássico da estrutura interna da Terra a partir de estudos relacionados a propagação de ondas sísmicas geradas por terremotos, tais estudos foram capazes de identificar as diferentes camadas internas do planeta. Em uma menor escala, estudos geofísicos associados a estrutura e composição crustal são importantes para a compreensão da evolução tectônica de uma região. Neste contexto, o presente trabalho tem como proposta a aplicação do método sismológico Função do Receptor em dados registrados por oito estações sismográficas, com o objetivo de obter valores referentes a espessura da crosta e razão V_p/V_s para região do estado do Rio Grande do Sul, englobando a porção Sul da Bacia do Paraná e Escudo Sul-Rio-Grandense. O método Função do Receptor utiliza ondas P geradas por eventos telessísmicos, que ao incidirem em uma interface que separa dois meios com velocidades distintas, tem parte da sua energia convertida em onda S e a outra parte sofre reflexões múltiplas. A partir da diferença de tempo entre as chegadas das ondas P e P_s é possível obter informações sobre a estrutura interna da Terra a partir da deconvolução entre as componentes de registro. Os dados sismológicos utilizados são provenientes da rede BL, sendo utilizadas as estações ITQB, CPSB, CNLB e PLTB e da rede XC, onde foram utilizadas as estações RODS, UNIS, ALGR e CRSM, todas localizadas no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos a partir do processamento dos dados mostram que a espessura da crosta no estado do Rio Grande do Sul varia de 36,6 km a 42 km, possuindo uma V_p/V_s média de 1,76. Na região do Escudo Sul-Rio-Grandense, a espessura crustal tem valor de aproximadamente 36 km e V_p/V_s de aproximadamente 1,75. A região Sul da Bacia do Paraná possui espessura crustal de aproximadamente 42 km e V_p/V_s em torno de 1,77. Os valores de espessura crustal obtidos demarcam o limite entre a Bacia do Paraná e o Escudo Sul-Rio-Grandense e possuem uma correlação com dados topográficos e gravimétricos e também corroboram com valores de espessura crustal obtidos por trabalhos anteriores realizados na mesma área.

Palavras-Chave: Geofísica. Sismologia. Função do Receptor. Espessura Crustal.

ABSTRACT

The use of seismological methods to study the interior of the earth is a fundamental tool to understand the dynamics of the planet. The seismology contributed to the construction of the classical model of the internal structure of the earth from studies related to the propagation of seismic waves generated by earthquakes, such studies were able to identify the different inner layers of the planet. On a smaller scale, geophysical studies associated with crustal structure and composition are important for understanding the tectonic evolution of a region. In this context, the present work proposes the application of the Receiver Function seismological method in data recorded by eight seismographic stations, aiming to obtain values related to crust thickness and V_p / V_s ratio for the region of Rio Grande do Sul state, encompassing the southern portion of the Paraná Basin and South-Rio-Grandense Shield. The Receiver Function method uses P waves generated by teleseismic events, which, when focused on an interface that separates two media at different speeds, have part of their energy converted to S wave and the other part undergoes multiple reflections. From the time difference between the arrival of the P and Ps waves it is possible to obtain information about the internal structure of the Earth from the deconvolution between the register components. The seismological data used come from the BL network, using the ITQB, CPSB, CNLB and PLTB stations and from the XC network, where the RODS, UNIS, ALGR and CRSM stations were used, all located in the state of Rio Grande do Sul. The results obtained from the data processing show that the thickness of the crust in the state of Rio Grande do Sul varies from 36.6 km to 42 km, having an average V_p / V_s of 1.76. In the south-Rio-Grandense Shield region, the crustal thickness is approximately 36 km and V_p / V_s approximately 1.75. The southern region of the Paraná Basin has a crustal thickness of approximately 42 km and V_p/V_s around 1.77. The obtained crustal thickness values demarcate the boundary between the Paraná Basin and the Sul-Rio-Grandense Shield and are correlated with topographic and gravimetric data and also corroborate the crustal thickness values obtained from previous work in the same area.

Keywords: Geophysics. Seismology. Receiver Function. Crustal thickness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa topográfico da área de estudo mostrando a localização das estações sismográficas utilizadas.	19
Figura 2 – Mapa do contexto geológico da área de estudo.....	20
Figura 3 – Compartimentação tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense.	22
Figura 4 – Mapa geológico da Bacia do Paraná.....	25
Figura 5 – Mosaico com as fotografias das estações da rede BL utilizadas.	27
Figura 6 – Mapa gravimétrico de Anomalia Bouguer mostrando a localização das estações sismográficas utilizadas.	28
Figura 7 – (A) Modelo simplificado mostrando o caminho percorrido pelas ondas e suas principais conversões. (B) Registro de tempo e amplitude das ondas em termos da Função do Receptor.	29
Figura 8 – Ilustração mostrando a rotação do sistema de coordenadas da estação.	30
Figura 9 – Ilustração mostrando uma onda refratando em uma interface com contraste de propriedade física.	32
Figura 10 – Ilustração mostrando uma onda P em laranja incidindo em uma superfície horizontal.	33
Figura 11 – Fluxograma do processamento dos dados.	37
Figura 12 – Sismograma mostrando as componentes Leste-Oeste (HHE), Norte -Sul (HHN) e Vertical (HHZ) de um evento sísmico de magnitude 5.6 ocorrido dia 25/11/2013 registrado pela estação CPSB.	38
Figura 13 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação ITQB.	39
Figura 14 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CPSB.	39
Fonte: Auto (2019).	39
Figura 15 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação PLTB.	40
Figura 16 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CNLB.....	40
Figura 17 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação RODS.....	41

Figura 18 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação UNIS.....	41
Figura 19 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação ALGR.	42
Figura 20 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CRSM.....	42
Figura 21 – Resultado do cálculo da Função do Receptor nas suas componentes radial e transversal.	43
Figura 22 - Espectro de amplitude com a utilização do nível de água. Em (A) um espectro de amplitude com nível de água real e em (B) um espectro de amplitude após a aplicação do nível de água.	45
Figura 23 – Resultado da Função do Receptor para diferentes valores para o filtro Nível de Água.....	45
Figura 24 – Gráfico da função do filtro gaussiano para dois valores de a. E vermelho $a=x$ e em azul $a=2x$	46
Figura 25 – Resultado da Função do Receptor para diferentes valores para o Filtro Gaussiano.	47
Figura 26 – Resultado do cálculo e seleção das FRs de cada estação sismográfica nas suas componentes radial e tangencial. O polígono cinza representa o intervalo de tempo de chegada da fase P_s	48
Figura 27 – Resultado do método HK-Stacking para a estação ITQB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	53
Figura 28 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CPSB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	54
Figura 29 – Resultado do método HK-Stacking para a estação PLTB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	55
Figura 30 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CNLB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos	

eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	56
Figura 31 – Resultado do método HK-Stacking para a estação RODS. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	57
Figura 32 – Resultado do método HK-Stacking para a estação UNIS. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	58
Figura 33 – Resultado do método HK-Stacking para a estação ALGR. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	59
Figura 34 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CRSM. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos telessísmicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s	60
Figura 35 – Mapa da espessura crustal para o estado do Rio Grande do Sul.	64
Figura 36 – Em A) mapa da anomalia Bouguer e em B) mapa de espessura crustal.	66
Figura 37 – Em A) mapa gravimétrico da anomalia Bouguer com a localização do perfil AB, em B) mapa da espessura crustal do Rio Grande do Sul com a localização do perfil AB e em C) os gráficos de topografia, anomalia Bouguer e espessura crustal.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações sobre as estações sismográficas utilizadas.....	26
Tabela 2 - Espessura crustal e razão V_p/V_s obtidos para as estações sismográficas localizadas no Rio Grande do Sul.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALGR - Estação sismográfica de Alto Alegre

CGIAR - Consultative Group for International Agricultural Research, Consortium for Spatial Information

CNLB - Estação sismográfica de Canela

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CPSB - Estação sismográfica de Caçapava do Sul

CRSM - Estação sismográfica de Crissiumal

ESRg - Escudo Sul-Rio-Grandense

FR - Função do Receptor

GMT - Generic Mapping Tools

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ITQB - Estação sismográfica de Itaqui

km - Quilômetros

m - Metros

Moho - Descontinuidade de Mohorovičić

NE - Nordeste

PLTB - Estação sismográfica de Pelotas

RODS - Estação sismográfica de Rosário do Sul

RS - Rio Grande do Sul

SW - Sudoeste

UNIS - Estação sismográfica de Unistalda

WGM - World Gravity Map

ZNE - Vertical, Norte-Sul, Leste-Oeste

ZRT - Vertical, Radial, Transversal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 JUSTIFICATIVA	18
4 ÁREA DE ESTUDO	18
5 CONTEXTO GEOLÓGICO	19
5.1 Escudo Sul-Rio-Grandense	21
5.2 Bacia do Paraná.....	23
6 MATERIAIS E MÉTODOS	26
6.1 MATERIAIS	26
6.1.1 Banco de Dados.....	26
6.1.1.1 Dados Sismológicos	26
6.1.1.2 Dados Gravimétricos	27
6.2 MÉTODO	28
6.2.1 Função do Receptor.....	28
6.2.1.1 Parâmetro de Raio.....	32
6.2.1.2 Velocidade aparente horizontal	33
6.2.1.3 Tempo de percurso, razão V_p/V_s e espessura da crosta	35
6.2.1.4 Programa <i>HK-Stacking</i>	36
7 PROCESSAMENTO	37
7.1 Preparação e seleção dos eventos	37
7.2 Rotação do sistema de coordenadas.....	43
7.3 Cálculo das Funções do Receptor	43
7.4 Seleção das Funções do Receptor	44
7.5 FILTROS	44
7.5.1 Filtro Nível d'água	44
7.5.2 Filtro Gaussiano	46
8 RESULTADOS	48
8.1 Cálculo das Funções do Receptor	48
8.2 Cálculo da Espessura Crustal e Razão V_p/V_s no <i>HK-Stacking</i>	52
8.3 Integração dos dados sismológicos e dados gravimétricos	65
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
10 REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O modelo clássico da estrutura interna da Terra é basicamente definido por crosta (continental e oceânica), manto (superior e inferior) e núcleo (externo e interno), que são caracterizados por variações de propriedades físicas e químicas, tais como densidade, temperatura, pressão e composição química. Neste contexto a sismologia desempenha um papel importante, pois permitiu investigar e relacionar as variações de velocidades das ondas sísmicas geradas por terremotos, às interfaces, que demarcam o limite entre duas camadas com propriedades físicas distintas, as quais causam o efeito de refração e reflexão de ondas sísmicas, fazendo com que uma onda P, por exemplo, ao incidir em uma descontinuidade, tenha parte de sua energia convertida em outros tipos de ondas.

No presente trabalho, a principal descontinuidade a ser estudada será a descontinuidade de Mohorovičić (ou Moho), descrita por Andrija Mohorovičić em 1909, representando o limite entre a crosta e o manto, cuja profundidade pode variar de 30 km a 70 km nos continentes e de 7 km a 8 km nos oceanos (FOWLER, 1990; STEIN & WYSESSION, 2003).

Estudos objetivando o conhecimento da estrutura e composição crustal são importantes para a determinação das principais feições geológicas e para o entendimento da evolução tectônica de uma determinada região. Dentre os diversos métodos sismológicos, a Função do Receptor (FR) é um dos mais utilizados pelo fato de possibilitar um estudo em grandes profundidades fornecendo estimativas referentes a espessura crustal e razão V_p/V_s da crosta por diversos autores de maneira bem-sucedida (ASSUMPCÃO et al., 2013; PAVÃO et al., 2013; LIMA, 2016).

Embora amplamente estudada por geologia de superfície, a região Sul do Brasil, especificamente o estado do Rio Grande do Sul (RS), carece de estudos geofísicos de escala crustal/regional, relacionados localmente à investigação da porção Sul da Bacia do Paraná e Escudo Sul-Rio-Grandense. Assumpção et al. (2013) utilizaram o método da Função do Receptor para a determinação da espessura da crosta utilizando diversas estações sismográficas distribuídas por toda a América do Sul, porém para o estado do RS a resolução do estudo foi baixa em função da escassez de estações no estado.

Portanto neste trabalho, serão utilizados dados de oitos estações sismográficas distribuídas pelo estado do RS, com o objetivo de se aplicar o método da Função do Receptor para a estimativa de valores referentes a profundidade da descontinuidade de Moho e razão V_p/V_s da crosta sob as estações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a determinação de um modelo da estrutura da crosta para o estado do Rio Grande do Sul, por meio da aplicação do método da função do receptor, utilizando dados provenientes de oito estações sismográficas distribuídas pelo estado.

2.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- (a)** Obtenção do banco de dados registrados nas estações;
- (b)** Preparação e seleção de eventos telessísmicos para cada estação;
- (c)** Processamento de dados de eventos telessísmicos de acordo com a técnica Função do Receptor;
- (d)** Geração de um mapa de espessura crustal para o estado do Rio Grande do Sul;
- (e)** Integração de dados sismológicos com dados de anomalia Bouguer obtidos a partir de satélite.

3 JUSTIFICATIVA

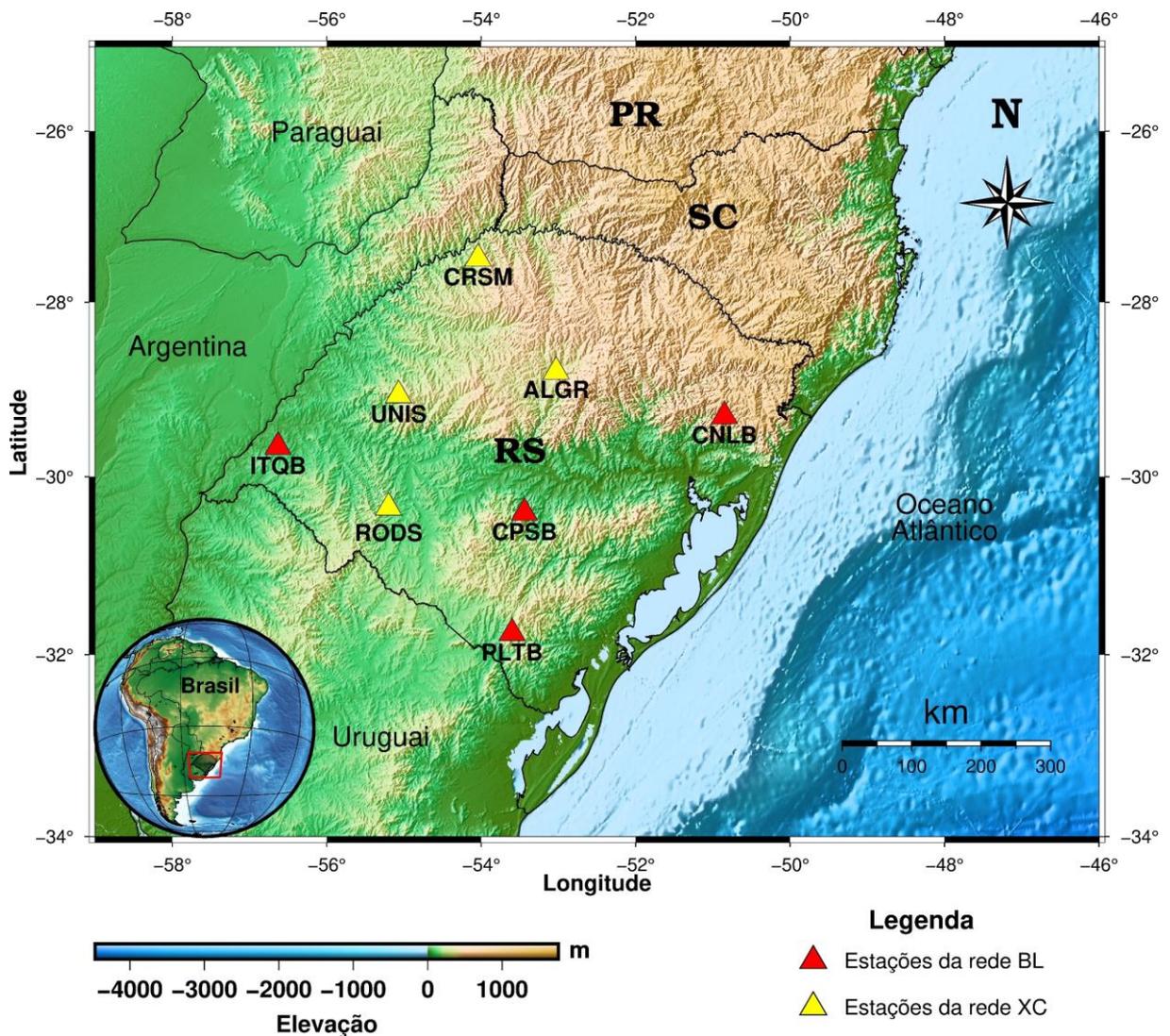
O estado do Rio Grande do Sul é marcado por uma complexa evolução geológica, tanto tectônica quanto estrutural. Deste modo, é de suma importância a aplicação de estudos relacionados a estrutura crustal, visando auxiliar no entendimento e interpretação de feições profundas como, por exemplo, a descontinuidade de Mohorovicic, que até o presente momento carece de estudos com alta resolução nesta escala de investigação para a região Sul do Brasil.

Portanto o presente trabalho pretende a aplicação do método da Função do Receptor a partir de dados registrados por oito estações sismográficas. De modo a contribuir com informações sobre a estrutura crustal a partir da determinação de valores referentes a profundidade da descontinuidade de Moho e da razão V_p/V_s sob as estações sismográficas.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende todo o estado do Rio Grande do Sul. Para a realização do trabalho, foram utilizadas um total de oito estações sismográficas localizadas nos municípios de Itaqui (ITQB), Caçapava do Sul (CPSB), Canela (CNLB), Pelotas (PLTB), Rosário do Sul (RODS), Unistalda (UNIS), Alto Alegre (ALGR) e Crissiumal (CRSM). A localização das estações é representada na figura 1.

Figura 1 – Mapa topográfico da área de estudo mostrando a localização das estações sismográficas utilizadas.



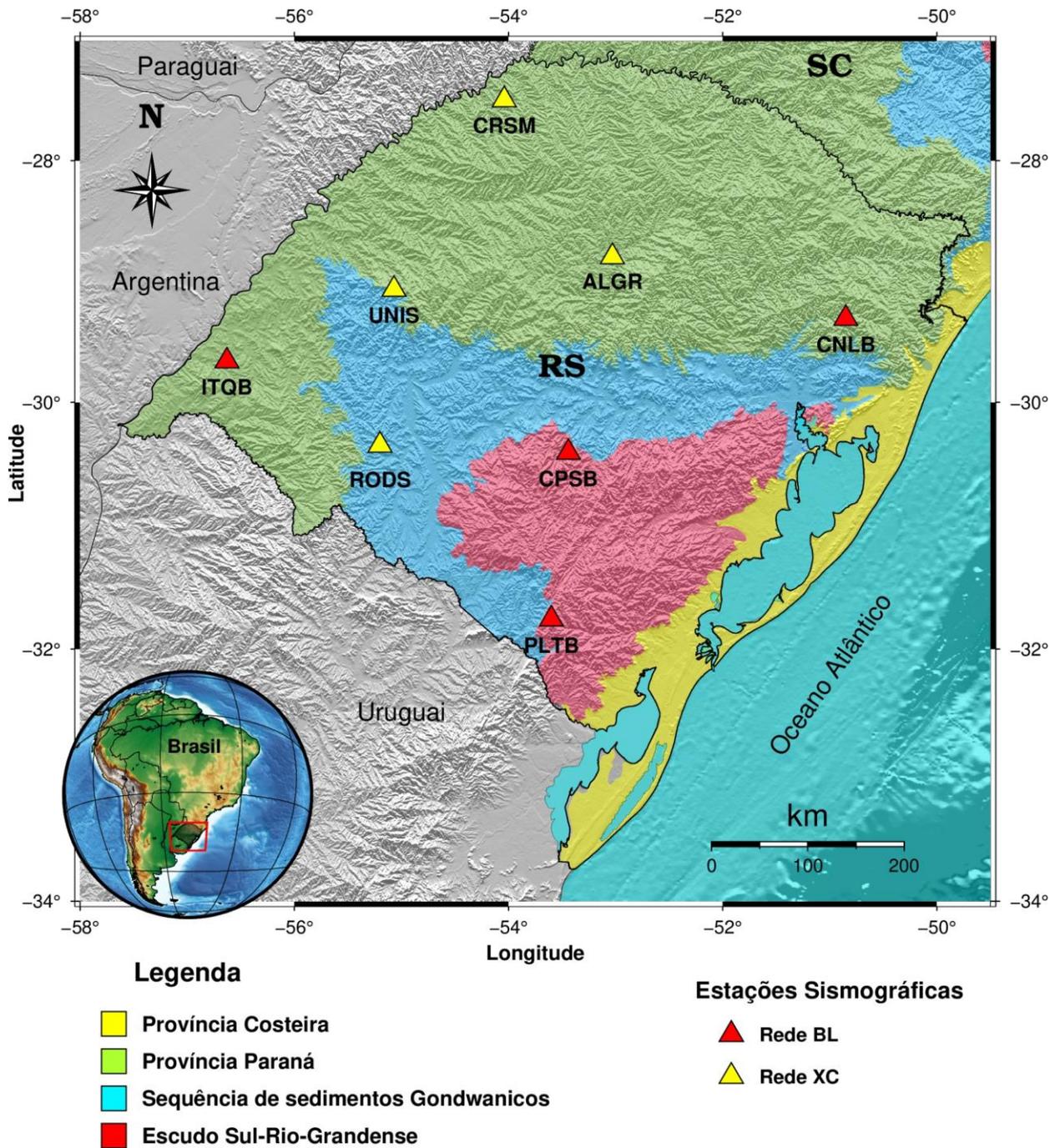
Fonte: Modelo digital de elevação extraído de Consultative Group for International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information (CGIAR -CSI, 2004), limites estaduais extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO

O estado do Rio Grande do Sul pode ser dividido geologicamente em uma porção central, denominada Escudo Sul-Rio-Grandense, composta por uma associação de rochas cristalinas, pertencentes a Província Mantiqueira e descrita originalmente por Almeida et al. (1977); A Província Paraná, que é constituída por formações sedimentares, as quais foram depositadas desde o Permiano até o

Jurássico; E pela Província Costeira, que é constituída por sedimentos do Cenozoico, de composição siliciclástica, possuindo uma espessura de algumas poucas centenas de metros (TOMAZZELI et al., 2007); (Figura 2).

Figura 2 – Mapa do contexto geológico da área de estudo.



Fonte: Modificado de CPRM (2010).

5.1 Escudo Sul-Rio-Grandense

O escudo Sul-Rio-Grandense (ESrg) ocupa a região central do estado do Rio Grande do Sul, sendo delimitado ao norte, oeste e sul pelos sedimentos da Bacia do Paraná e, a leste, pelos depósitos inconsolidados da Província Costeira do Rio Grande do Sul (SOLIANI, 1986). O ESrg se localiza na porção meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1976), possuindo uma área de aproximadamente 65.000 km², sendo composto por associações de rochas ígneas, predominantemente graníticas, intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, recobertas por 5000 m de espessura de rochas sedimentares intercaladas a rochas vulcânicas (WILDNER et al., 2000).

De acordo com Chemale (2000), o ESrg pode ser segmentado em quatro unidades geotectônicas representadas pelo Bloco Taquarembó, Bloco São Gabriel, Bloco Encruzilhada do Sul e Bloco Dom Feliciano (Figura 3).

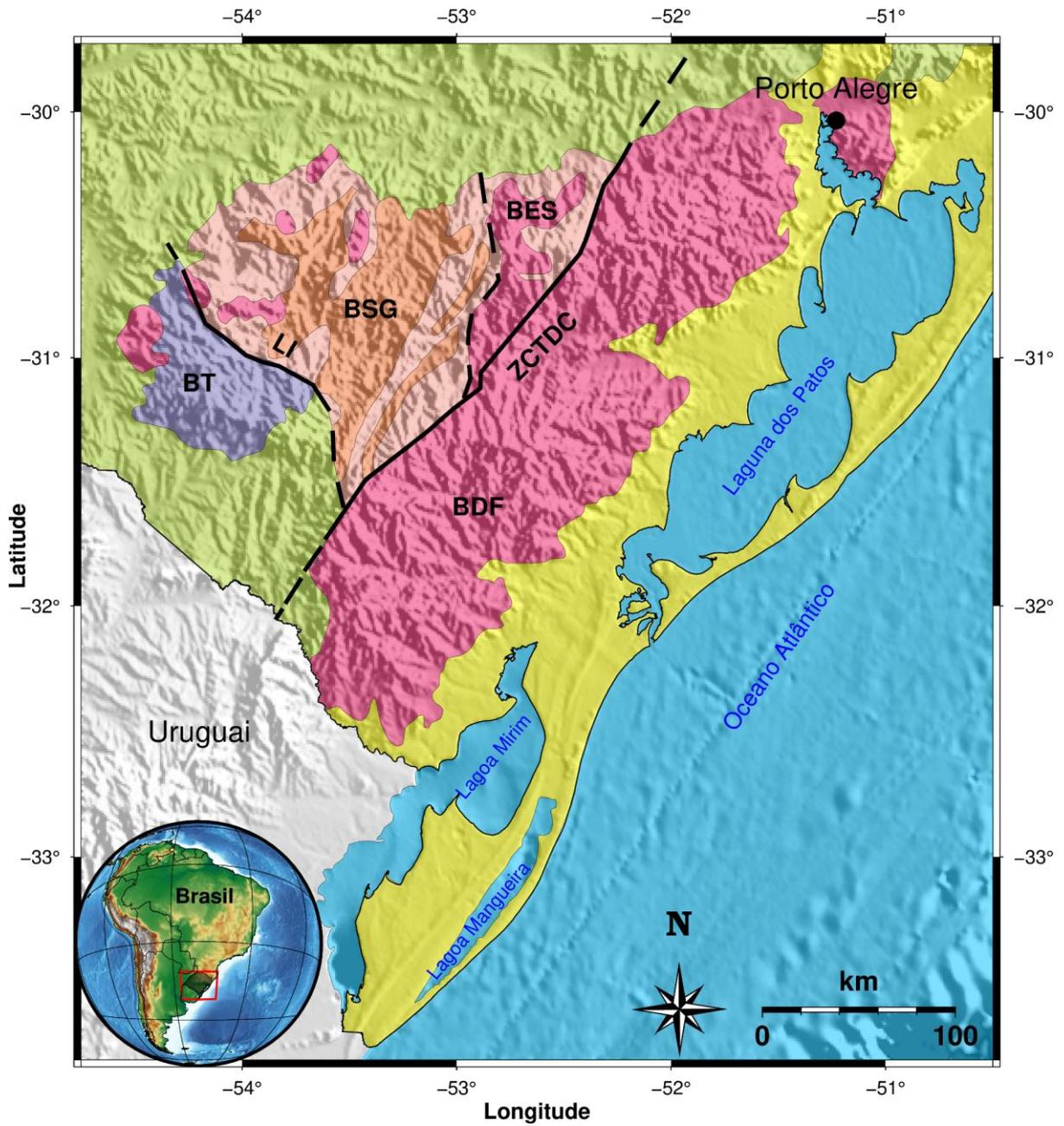
O Bloco Taquarembó é composto por rochas vulcano-sedimentares de idades paleoproterozóicas (NARDI & HARTMANN, 1979), pertencente ao Complexo Granulítico, o qual ocorre no extremo oeste do RS, sendo constituído predominantemente por granulitos félsicos e máficos.

O Bloco São Gabriel possui forma alongada de direção NE-SW, sendo delimitado ao norte pelas coberturas sedimentares da Bacia do Paraná e à sudoeste pelo Lineamento de Ibaré. O Bloco São Gabriel é composto principalmente por rochas plutônicas e metavulcânicas de idade neoproterozóica (HARTMANN et al., 2007).

O Bloco Encruzilhada do Sul ocorre a leste do Bloco São Gabriel, possuindo forma alongada de direção NE-SW, sendo composto por associações e rochas metassedimentares e metavulcânicas com idades mesoproterozóica a neoproterozóica (HARTMANN et al., 2007).

O Bloco Dom Feliciano de acordo com Babinski et al. (1996), é constituído por associações de rochas granito-gnáissicas-migmatíticas, em um embasamento de idade paleoproterozóica.

Figura 3 – Compartimentação tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense.



Legenda

- Província Costeira**
- Província Paraná**
- Cobertura Vulcanossedimentar**
- Complexo Granítico**
- Cinturação Metavulcanossedimentar**
- Cinturação Granulítico**
- Contato Geológico**
- Limite Tectônico**

Província Mantiqueira	BT	Bloco Taquarembó	LI	Lineamento de Ibaré
	BSG	Bloco São Gabriel	ZCTDC	Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu
	BES	Bloco Encruzilhada do Sul		
	BDF	Bloco Dom Feliciano		

Fonte: Modificado de Soliani (1986).

5.2 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná classificada por Fúlfaro et al. (1982) como intracontinental, tem forma alongada de direção SW-NE, abrangendo uma área de aproximadamente $1,7 \times 10^6$ km², sendo que somente em território brasileiro, a bacia ocupa uma área de 1.050.000 km², se estendendo para os territórios da Argentina (400×10^3 km²), Uruguai e Paraguai (100×10^3 km²) (ZALÁN et al., 1990). O depocentro da bacia está localizado na sua porção centro-oeste, onde seu registro sedimentar e vulcânico, possui uma espessura cumulativa de aproximadamente 7.500 m, dos quais 5500 m são sedimentos, cuja deposição durou 385 milhões de anos, com início no Ordoviciano e término no Cretáceo (MILANI, 1997). No seu contexto litoestratigráfico a bacia registra a maior manifestação de vulcanismo fissural em região continental, resultando no empilhamento de até 2000 m de lavas sobre seus sedimentos, intrudindo por entre os mesmos, na forma de diques e soleiras (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000); (Figura 4).

Milani (1997) organizou os ciclos de preenchimento da bacia em seis supersequências, denominadas: Rio Ivaí (Ordoviciano – Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero – Eocretáceo), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico – Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Figura 4).

A supersequência Rio Ivaí foi depositada a partir da geração do espaço de acomodação criado pela reativação de zonas de fraquezas do embasamento. O topo da supersequência Rio Ivaí é marcado por uma superfície de inundação máxima, onde a exposição subárea desse pacote resultou em uma discordância neossiluriana (MILANI, 1997).

Ainda segundo o autor, após retomada a subsidência, depositou-se a supersequência do Paraná, a qual compreende um ciclo transgressivo – regressivo, onde foram depositados sedimentos das formações Furnas e Ponta Grossa, as quais foram erodidas resultando na discordância neodevoniana.

Sobre a discordância neodevoniana depositou-se cerca de 2500 m de sedimentos pertencentes a supersequência Gondwana I, que segundo Milani (1997) comporta uma porção basal transgressiva, correspondendo aos Grupos Itararé e

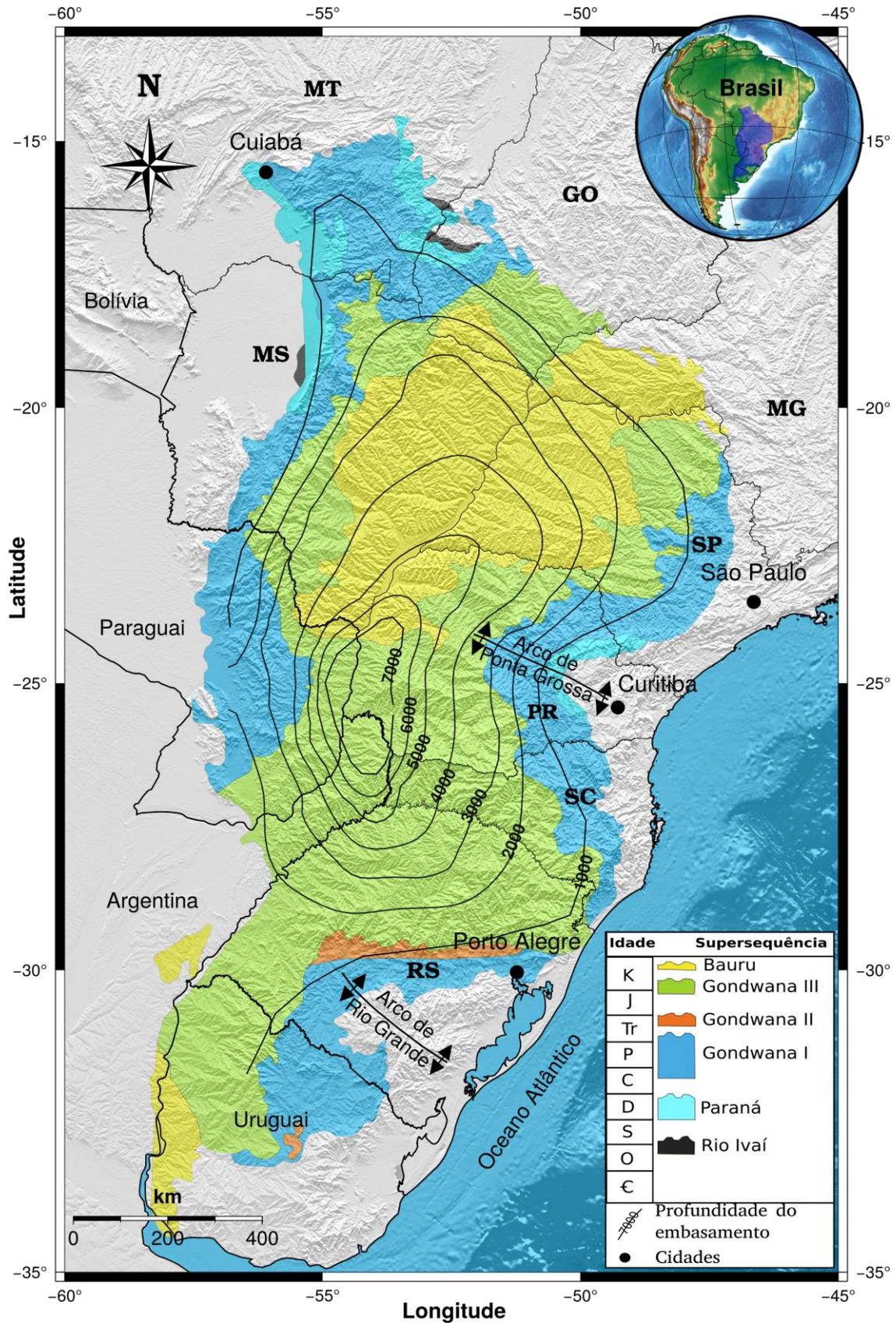
Guatá. Na parte superior, regressiva, acomoda-se um ciclo de subsidência, o qual corresponde ao Grupo Passo Dois, constituído pelas Formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto.

A supersequência Gondwana II é composta por rochas do Grupo Rosário do Sul, caracterizados por arenitos e pelitos, provenientes de depósitos fluviais e lacustres (MILANI, 1997).

Posteriormente, se depositou a supersequência Gondwana III, a qual corresponde ao Grupo São Bento, composto pela Formação Botucatu, e a Formação Serra Geral, a qual registra o maior vulcanismo fissural em região continental, resultando na acumulação de até 2000 m de basaltos sobre os sedimentos da Bacia do Paraná (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000).

Por fim, a supersequência Bauru depositou-se no Cretáceo Superior, após cessadas as atividades vulcânicas e promovidos os ajustes isostáticos, onde definiu-se uma depressão sobre o pacote basáltico. A supersequência Bauru finalizou a história deposicional da Bacia do Paraná, sendo composta por rochas sedimentares de sistemas eólicos, fluviais e aluviais (MILANI, 2007).

Figura 4 – Mapa geológico da Bacia do Paraná.



Fonte: Modificado de Milani (1997).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 MATERIAIS

6.1.1 Banco de Dados

6.1.1.1 Dados sísmológicos

No presente trabalho, foram utilizados dados de oito estações sísmográficas localizadas no Estado do Rio Grande do Sul, as estações fazem parte de duas redes sísmográficas a rede BL e a rede XC. A rede BL faz parte da RSBR (Rede Sísmográfica Brasileira) possuindo um total de 119 estações distribuídas pelo Brasil cujo banco de dados é de acesso aberto. As estações da rede XC do projeto da FAPESP 2013 / 24214-6 - Pantanal-Chaco-Paraná Basins (PCPB), são de acesso privado e o projeto tem como objetivo aprofundar o conhecimento da estrutura profunda na parte oeste do Brasil e países vizinhos investigando aspectos sobre a evolução crustal nas bacias do Pantanal, Chaco e Paraná (Tabela 1).

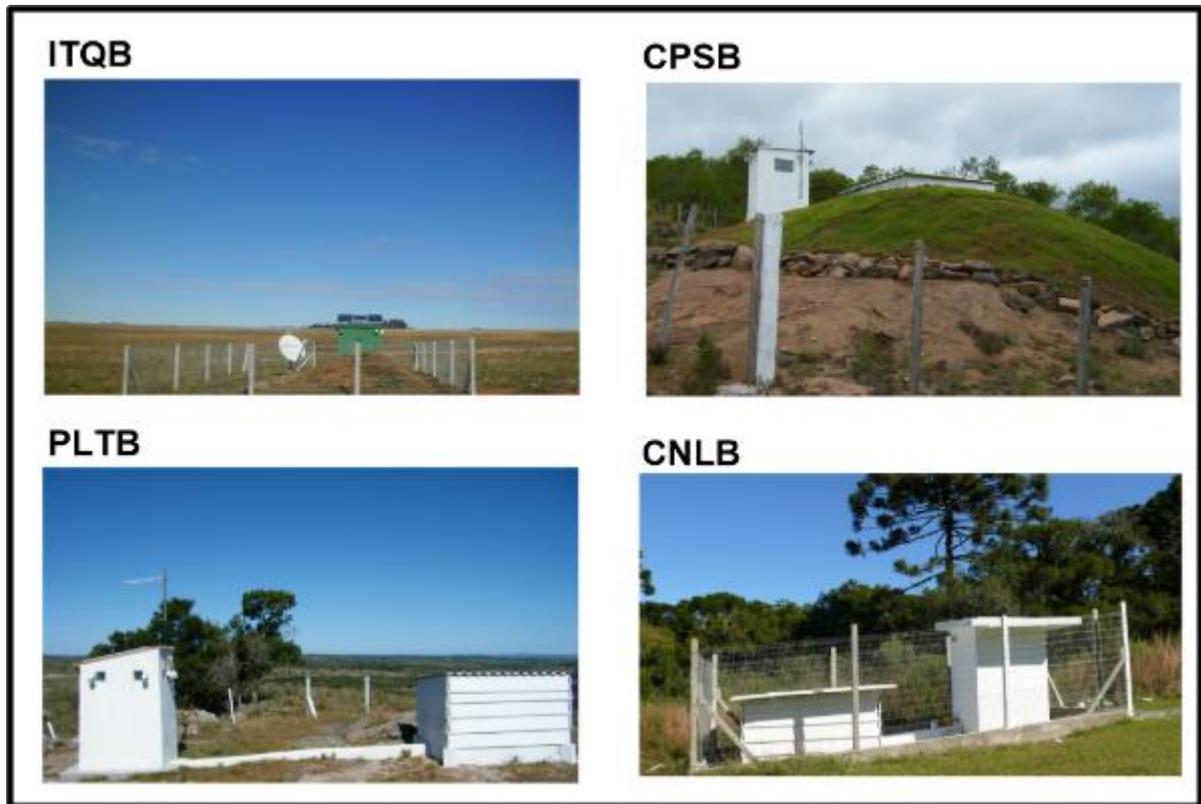
Tabela 1 - Informações sobre as estações sísmográficas utilizadas.

Sigla	Município	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevação (m)	Rede
ITQB	Itaqui (RS)	-29,66	-56,63	95	BL
CPSB	Caçapava do Sul (RS)	-30,41	-53,44	290	BL
PLTB	Pelotas (RS)	-31,76	-53,60	412	BL
CNLB	Canela (RS)	-29,31	-50,85	712	BL
RODS	Rosário do Sul (RS)	-30,35	-55,20	241	XC
UNIS	Unistalda (RS)	-29,07	-55,07	319	XC
ALGR	Alto Alegre (RS)	-28,80	-53,03	775	XC
CRSM	Crissiumal (RS)	-27,49	-54,04	304	XC

Fonte: Autor (2019).

A figura 5 é um mosaico de imagens fotográficas do local onde as estações da rede BL utilizadas no trabalho foram instaladas.

Figura 5 – Mosaico com as fotografias das estações da rede BL utilizadas.



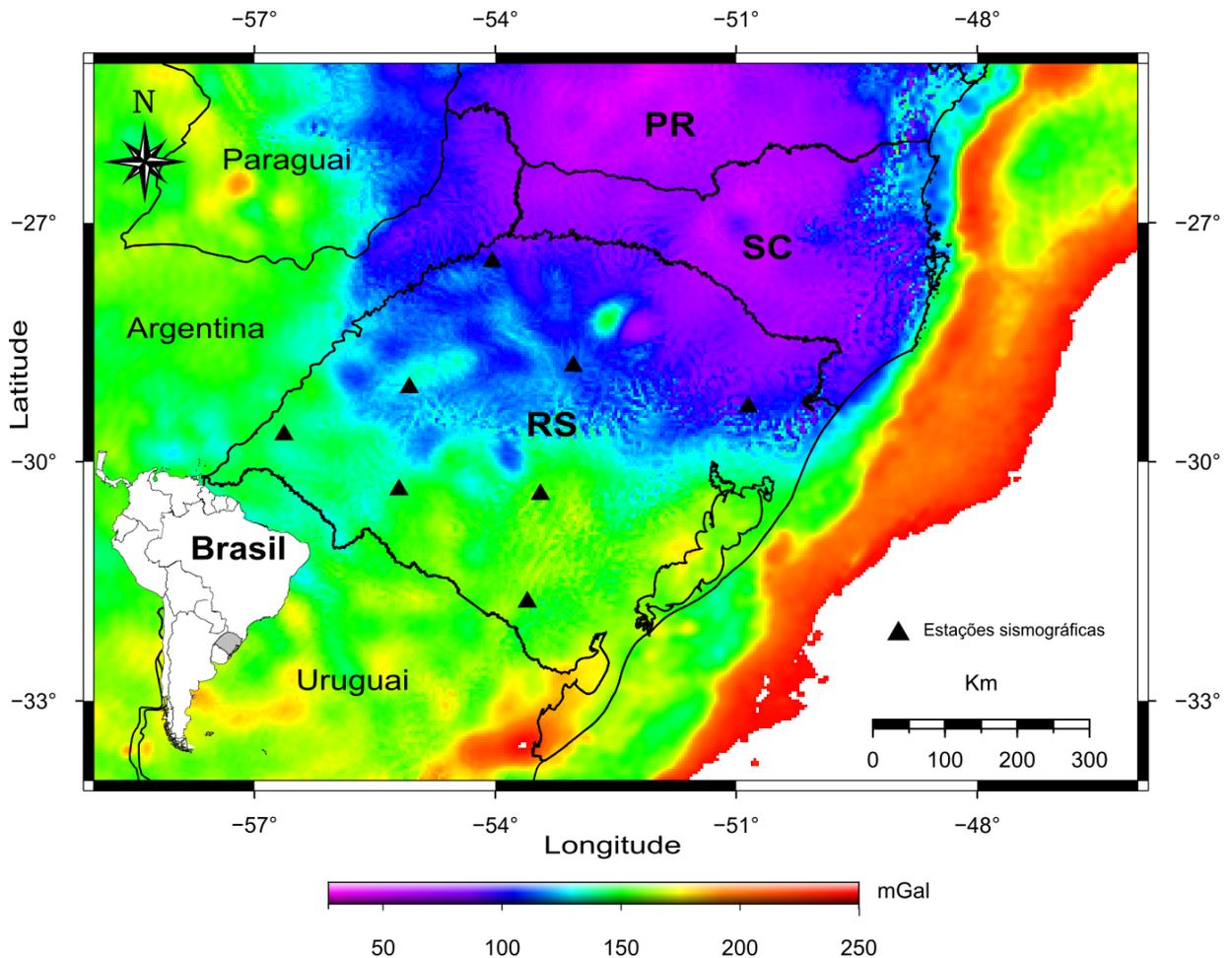
Fonte: Imagens retiradas do site do Centro de Sismologia USP.

6.1.1.2 Dados Gravimétricos

Os dados gravimétricos utilizados no presente trabalho são derivados do modelo de gravidade mundial (WGM) do ano de 2012, onde mesmo está disponível no site do *International Gravimetric Bureau*. O WGM2012 é o primeiro lançamento de uma rede de alta resolução ($2' \times 2'$) de mapas de anomalias gravitacionais da Terra (Bouguer, Isostática e Ar livre) calculados em escala global.

Os dados do modelo WGM2012 foram obtidos em formato apropriado para uso no *software* GMT, onde o pré-processamento para se obter a anomalia Bouguer (correções de ar-livre, maré, *drift* instrumental e Bouguer) foi realizado pela própria instituição responsável pela geração do modelo WGM (Figura 6).

Figura 6 – Mapa gravimétrico de Anomalia Bouguer mostrando a localização das estações sismográficas utilizadas.



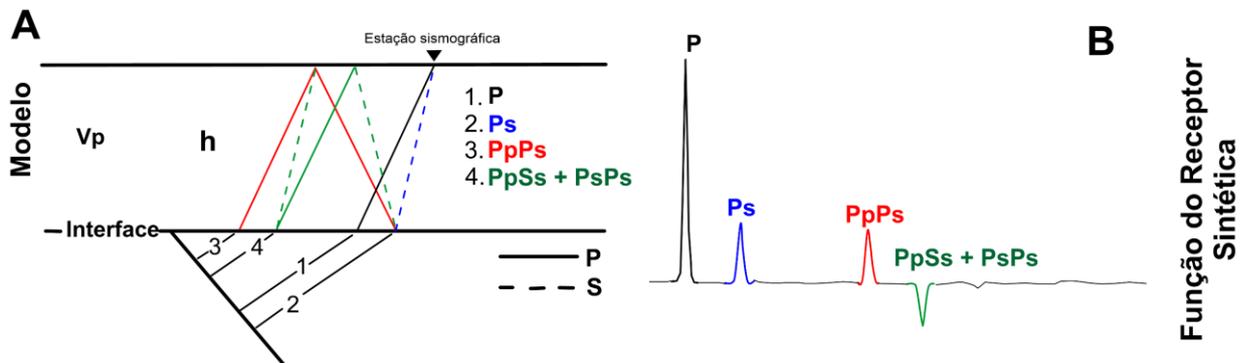
Fonte: Modificado de WGM 2012.

6.2 MÉTODO

6.2.1 Função do Receptor

O método da função do receptor, desenvolvido por Langston (1979), tem como objetivo inferir a estrutura crustal, em termos da espessura da crosta e da razão V_p/V_s sob as estações sismográficas. O método utiliza ondas P geradas por telessismos que, ao incidirem numa interface que separa meios com velocidades diferentes, como por exemplo, a descontinuidade de Mohorovicic, com um ângulo inferior a 40° com relação a vertical, são refratadas e tem parte de sua energia convertidas em ondas S (Ps) e outra parte sofre reflexões múltiplas (PpPs e PpSs + PsPs), as quais são registradas nas estações sismográficas (Figura 7).

Figura 7 – (A) Modelo simplificado mostrando o caminho percorrido pelas ondas e suas principais conversões. (B) Registro de tempo e amplitude das ondas em termos da Função do Receptor.

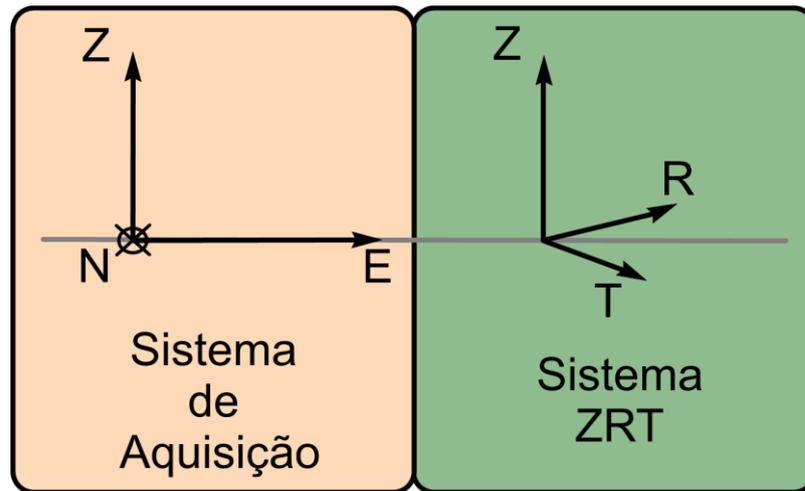


Fonte: Modificado de Moreira (2013).

O primeiro registro de fase na estação é a onda P, seguida da sua principal conversão a onda Ps e posteriormente ocorre a chegada de suas conversões múltiplas PpPs e PpSs + PsPs. Como as velocidades das ondas P e S são distintas, é possível correlacionar seus tempos de registro com suas velocidades (V_p e V_s) e espessura da camada (h), possibilitando inferir a profundidade da descontinuidade de Moho, conforme descrito por Bianchi (2003).

As estações registram os sismos utilizando sistema de coordenadas geográficas ZNE (Vertical, Norte-Sul, Leste-Oeste) e o primeiro passo para a obtenção da Função do Receptor é a separação das ondas P e S. Para isso, é necessário fazer a rotação do sistema de registro ZNE para o sistema ZRT (Vertical, Radial e Transversal), o qual se baseia na direção de polarização das ondas P e S. Neste sistema, a componente radial é posicionada paralelamente ao sentido de propagação da onda (Figura 8).

Figura 8 – Ilustração mostrando a rotação do sistema de coordenadas da estação.



Fonte: Modificado de Bianchi (2003).

O registro de um sismo em uma estação sismográfica traz informações referentes a resposta da fonte $S(t)$, do instrumento $I(t)$ e da estrutura crustal sob a estação $H(t)$, deste modo, Langston (1979), desenvolveu o método da função do receptor a fim de isolar a resposta equivalente apenas a estrutura crustal.

O método consiste na deconvolução dos registros da componente radial e tangencial pela componente vertical. No domínio do tempo, um sinal telessísmico pode ser representado pelas equações abaixo:

$$R_v(t) = I(t) * S(t) * H_v(t) \quad (1)$$

$$R_R(t) = I(t) * S(t) * H_R(t) \quad (2)$$

$$R_T(t) = I(t) * S(t) * H_T(t) \quad (3)$$

Onde $R_v(t)$, $R_R(t)$ e $R_T(t)$ representam a componente vertical, radial e tangencial, respectivamente, $H_v(t)$, $H_R(t)$ e $H_T(t)$ são as respostas das estruturas sob as estações e suas componentes vertical, radial e transversal, respectivamente.

A onda P telessísmica, cujo ângulo de incidência em relação à superfície é próximo da vertical, gera um registro de um pico inicial na vertical. Os picos secundários registrados, possuem amplitude desprezível, quando comparados ao

inicial, desta forma, é possível desprezá-los e fazer uma aproximação da resposta da componente vertical como sendo representativa da estrutura crustal sob a estação $H_v(t)$:

$$H_v(t) \cong \delta(t) \quad (4)$$

Na operação de convolução, a função impulso ($\delta(t)$) não modifica o resultado final, desta forma, o sinal registrado na componente vertical, pode ser representado através da substituição da equação (4) na equação (1) da seguinte forma:

$$R_v(t) \cong I(t) * S(t) \quad (5)$$

Com o objetivo de se obter as expressões no domínio da frequência, e assim, a convolução passar a ser uma multiplicação espectral, aplica-se a transformada de Fourier nas expressões 2, 3 e 5, obtendo as seguintes relações:

$$R_v(\omega) \cong I(\omega)S(\omega) \quad (6)$$

$$R_R(\omega) \cong I(\omega)S(\omega)H_R(\omega) \quad (7)$$

$$R_T(\omega) \cong I(\omega) S(\omega)H_T(\omega) \quad (8)$$

Onde (ω) representa a frequência angular.

Substituindo a equação (6), nas equações (7) e (8), elimina-se os termos referentes a resposta do instrumento $I(\omega)$ e da fonte $S(\omega)$:

$$R_R(\omega) \cong R_v(\omega) H_R(\omega) \quad (9)$$

$$R_T(\omega) \cong R_v(\omega) H_T(\omega) \quad (10)$$

Isolando o termo $H_R(\omega)$ e $H_T(\omega)$ nas equações (9) e (10), temos:

$$H_R(\omega) \cong \frac{R_R(\omega)}{R_V(\omega)} \quad (11)$$

$$H_T(\omega) \cong \frac{R_T(\omega)}{R_V(\omega)} \quad (12)$$

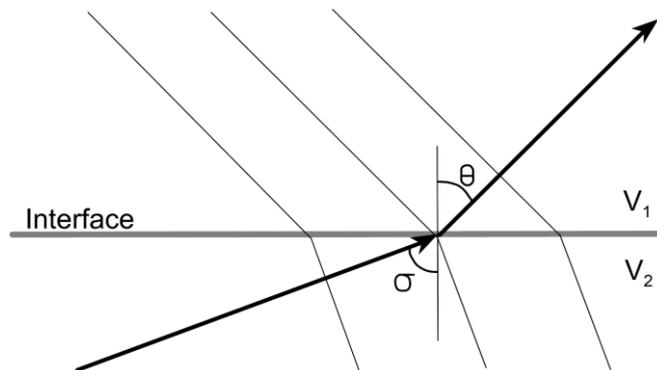
Onde $H_R(\omega)$ e $H_T(\omega)$ representam a resposta das estruturas sob a estação nas componentes radial e transversal, respectivamente. Desta forma, se obtém a deconvolução das componentes radial e tangencial pela componente vertical, e assim, é possível obter a informação referente a estrutura crustal sob a estação sismográfica.

6.2.1.1 Parâmetro de Raio

A incidência de uma frente de onda na estação sismográfica não é exatamente na vertical, deste modo, deve-se levar em consideração o parâmetro de raio e a velocidade aparente horizontal.

O parâmetro de raio depende da trajetória dos raios sísmicos através de um determinado meio. Quando uma onda plana atravessa a interface que separa dois meios homogêneos com velocidades diferentes de propagação para as ondas P e S, parte da sua energia é transmitida e outra parte é refletida (Figura 9).

Figura 9 – Ilustração mostrando uma onda P refratando em uma interface com contraste de propriedade física.



Fonte: Modificado de Shearer (2009).

Nesta situação o parâmetro do raio (p), o qual equivale a lei de Snell-Descartes, será o mesmo para todo o percurso da onda, desde seu hipocentro até a estação sismográfica (Equação 13).

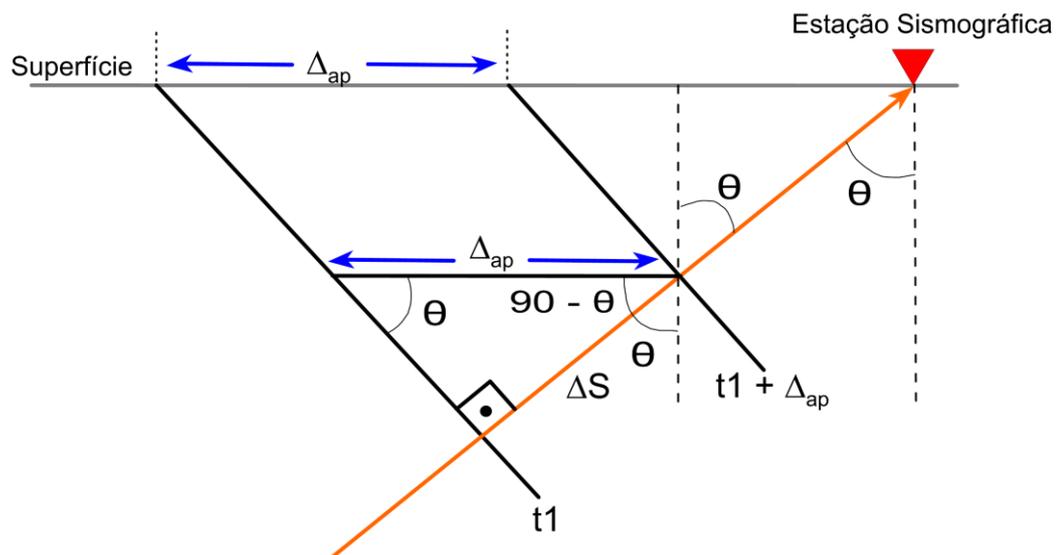
$$\frac{\sin(\sigma)}{V_1} = \frac{\sin(\theta)}{V_2} = \frac{1}{V_{ap}} = p \quad (13)$$

Onde σ e θ correspondem aos ângulos da onda incidente e refratada em relação a normal à interface, respectivamente, V_1 e V_2 correspondem as velocidades dos meios 1 e 2, respectivamente e V_{ap} corresponde a velocidade aparente da onda.

6.2.1.2 Velocidade aparente horizontal

A figura 10 mostra a incidência de uma onda P em uma superfície horizontal, com um percurso ΔS e com ângulo de incidência θ .

Figura 10 – Ilustração mostrando uma onda P em laranja incidindo em uma superfície horizontal.



Fonte: Modificado de França (2003).

De acordo com a figura 10 a distância aparente percorrida pela onda pode ser representada pela seguinte equação:

$$\Delta_{ap} = \frac{\Delta S}{\sin\theta} \quad (14)$$

Onde ΔS representa o percurso da onda, Δ_{ap} é a distância aparente e θ é o ângulo de incidência da onda em relação a normal à superfície.

A velocidade de propagação da onda ao longo do percurso ΔS é dada por:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (15)$$

Deste modo, substituindo a equação (14) em (15) temos:

$$\Delta_{ap} \sin\theta = V \Delta t \quad (16)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (16) por $\frac{1}{\sin\theta \Delta t}$, temos:

$$\frac{\Delta_{ap}}{\Delta t} = \frac{V}{\sin\theta} = V_{ap} \quad (17)$$

Onde V_{ap} representa a velocidade aparente da frente de onda que se propaga na superfície.

6.2.1.3 Tempo de percurso, razão V_p/V_s e espessura da crosta

O tempo de percurso das ondas P e suas conversões PpPs, PpSs + PsPs depende da espessura da camada (h), do parâmetro de raio do evento (p), das velocidades médias das ondas P (V_p) e S (V_s) e da razão entre as velocidades das ondas P e S (V_p/V_s). Segundo Zandt et al. (1995) a relação entre essas variáveis pode ser definida como:

$$t_{Ps} - t_p = h \left[(V_s^{-2} - p^2) - (V_p^{-2} - p^2)^{1/2} \right] \quad (18)$$

$$t_{PpPms} - t_p = 2h \left(\frac{1}{V_p^2} - p^2 \right)^{1/2} \quad (19)$$

Onde t_{Ps} é o tempo de chegada da onda Ps, t_p é o tempo de chegada da onda P e t_{PpPms} é o tempo de chegada da primeira múltipla convertida na descontinuidade de Moho.

Segundo Zandt et al. (1995), a razão entre as velocidades das ondas P e S (V_p/V_s) não depende do valor da espessura crustal, e é obtida através da divisão da equação (18) pela equação (19):

$$\frac{V_p}{V_s} = \left\{ (1 - p^2 V_p^2) \left[2 \left(\frac{t_{Ps} - t_p}{t_{PpPms} - t_p} \right) + 1 \right]^2 + p^2 V_p^2 \right\}^{1/2} \quad (20)$$

A espessura crustal é dependente dos valores da razão entre as velocidades das ondas P e S (V_p/V_s) e da velocidade da onda P (V_p). Isolando o termo h na equação (18) se obtém a expressão para o cálculo da espessura da crosta como sendo:

$$h = \frac{V_p (t_{Ps} - t_p)}{\sqrt{\frac{V_p^2}{V_s^2} - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2}} \quad (21)$$

6.2.1.4 Programa *HK-Stacking*

O *HK-Stacking* é um programa de inversão utilizado para a estimativa das profundidades das descontinuidades (H) e do parâmetro K, o qual corresponde as razões Vp/Vs para um modelo que melhor representa os traços fornecidos (ZHU & KANAMORI, 2000).

O programa *HK-Stacking* se baseia nas expressões (21) e (20), as quais são referentes a espessura da crosta e razão Vp/Vs, respectivamente, sendo necessário informar os valores da velocidade média da onda P (Vp) e atribuir pesos (\mathcal{W}_i) para as fases Ps, PpPs (1ª múltipla) e PpSs + PsPs (2ª múltipla), sendo que o somatório dos pesos deve ser igual a 1 ($\sum_{i=1}^3 \mathcal{W}_i = 1$).

O programa *HK-Stacking* é definido pela seguinte equação:

$$s(H, K) = \sum_i \mathcal{W}_1 r_i(P_s) + \mathcal{W}_2 r_i(P_p P_s) - \mathcal{W}_3 r_i(P_p S_s + P_s P_s) \quad (22)$$

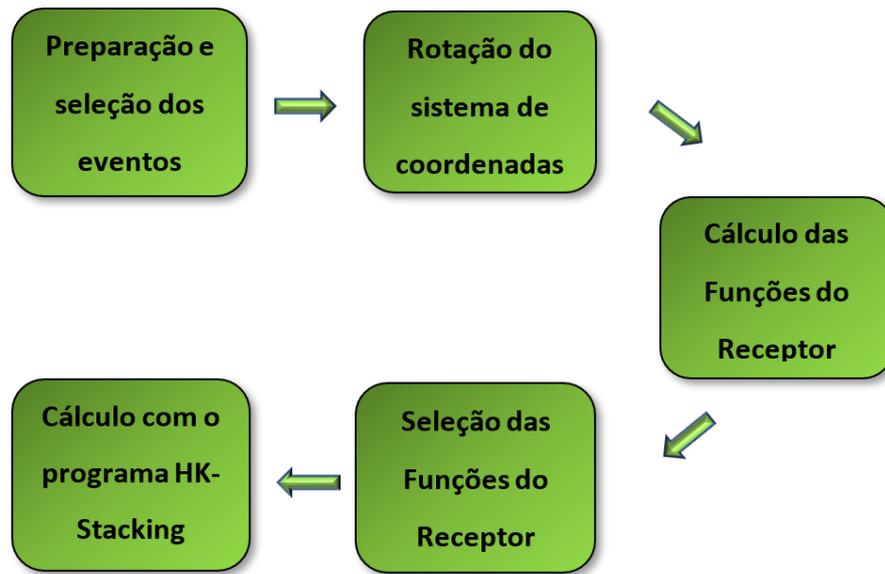
Onde i representa cada uma das Funções do Receptor, $r_i(P_s)$, $r_i(P_p P_s)$ e $r_i(P_p S_s + P_s P_s)$ representam os valores de amplitude da componente radial do traço da função do receptor para os tempos teóricos das fases Ps, PpPs e PpSs + PsPs, respectivamente e \mathcal{W}_1 , \mathcal{W}_2 e \mathcal{W}_3 representam os pesos referentes as fases Ps, PpPs e PpSs + PsPs, respectivamente. Zhu & Kanamori (2000) sugerem como referência valores para os pesos \mathcal{W}_1 , \mathcal{W}_2 e \mathcal{W}_3 de 0.7, 0.2 e 0.1, respectivamente. Sendo o maior peso dado para a fase Ps, a qual possui maior amplitude.

As principais vantagens do método *HK-Stacking* segundo Zhu & Kanamori, (2000) são que (i) a maioria das formas de ondas podem ser processadas; (ii) é desnecessário marcar os tempos de chegadas das fases convertidas; (iii) no momento do empilhamento das Funções do Receptor de diferentes distâncias e direções, o método suprime os efeitos relacionados a variação lateral de estruturas e um modelo crustal médio é obtido; e (iv) as incertezas relacionadas a determinação dos valores referentes a espessura da descontinuidade H e da razão Vp/Vs podem ser determinadas a partir do comportamento da função $s(H, K)$.

7 PROCESSAMENTO

O processamento dos dados no presente trabalho seguiu o fluxograma apresentado na figura 11 abaixo.

Figura 11 – Fluxograma do processamento dos dados.



Fonte: Autor (2019).

7.1 Preparação e seleção dos eventos

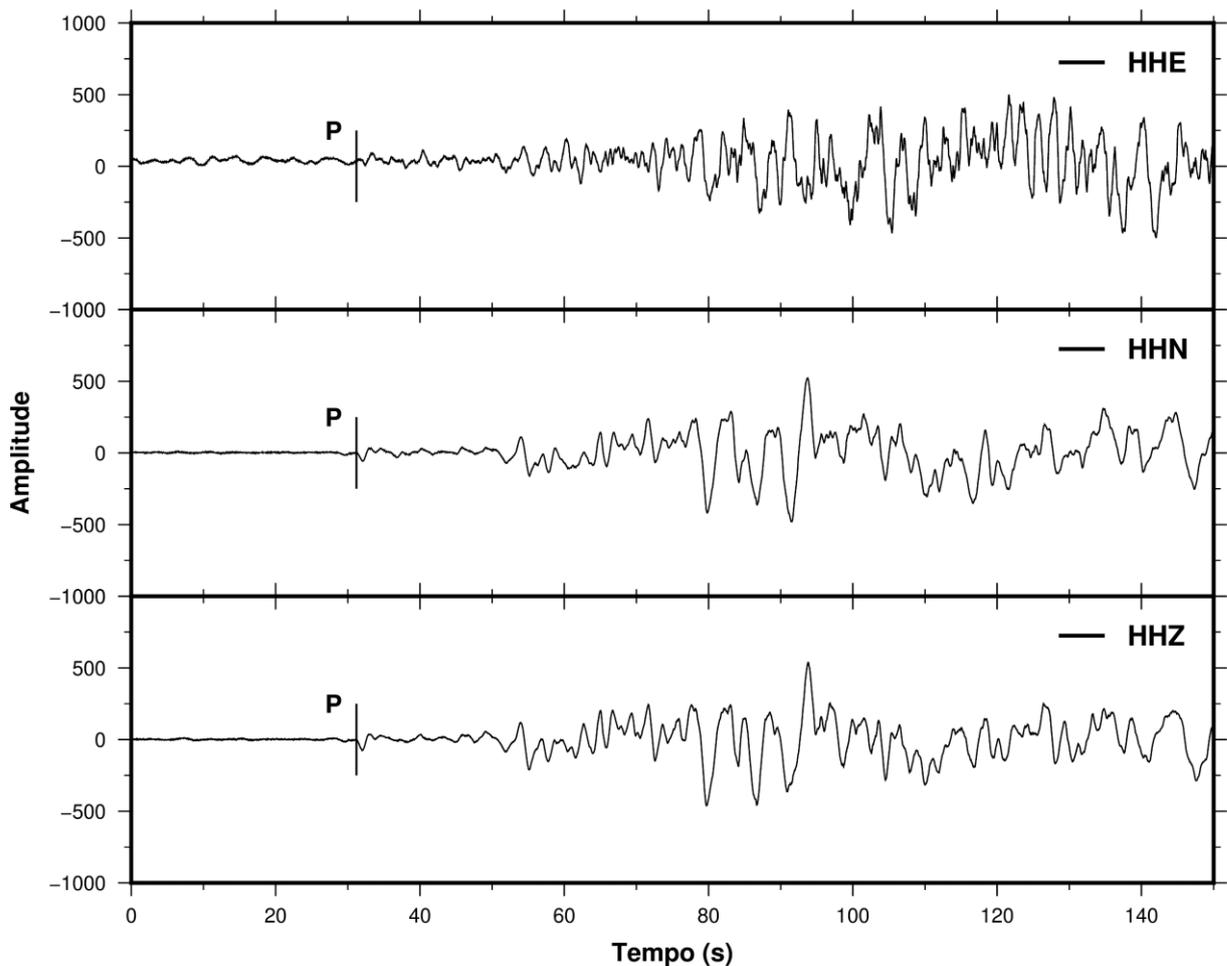
A primeira etapa para o cálculo da Função do Receptor é a obtenção da base de dados dos eventos telessísmicos. Para tal, foi utilizada uma ferramenta desenvolvida pelo Centro de Sismologia do IAG-USP (programa POET – Python ObsPy Earthquake Tool, escrito em linguagem Python), onde foi possível, a partir da determinação de um catálogo de referência, gerar uma lista de eventos para cada estação sismográfica baseada em parâmetros definidos pelo usuário, tais como período de seleção, distância epicentral, magnitude e profundidade dos eventos, para posterior *download* dos dados com base na lista de eventos gerada.

Na etapa de preparação e seleção dos eventos foi gerada uma lista de eventos para cada estação sismográfica seguindo os seguintes critérios:

- i) Foram selecionados apenas eventos com distâncias epicentrais entre 20° e 90° e que possuam magnitudes maiores que 5 Mb.

Os sismogramas foram fornecidos pelo Centro de Sismologia do IAG-USP, onde os mesmos consistem de três arquivos, correspondendo as três componentes de registro da estação, uma componente vertical (HHZ) e duas componentes horizontais – Leste-Oeste (HHE) e Norte-Sul (HHN) (Figura 12).

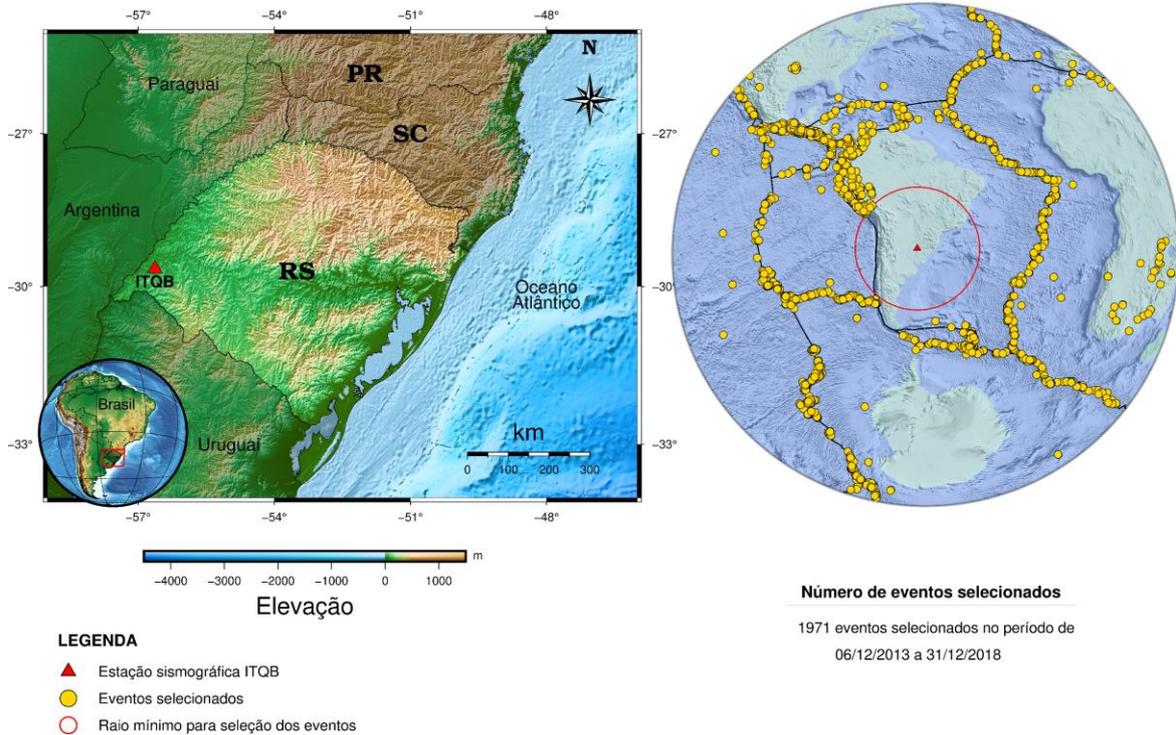
Figura 12 – Sismograma mostrando as componentes Leste-Oeste (HHE), Norte -Sul (HHN) e Vertical (HHZ) de um evento sísmico de magnitude 5.6 ocorrido dia 25/11/2013 registrado pela estação CPSB.



Fonte: Autor (2019).

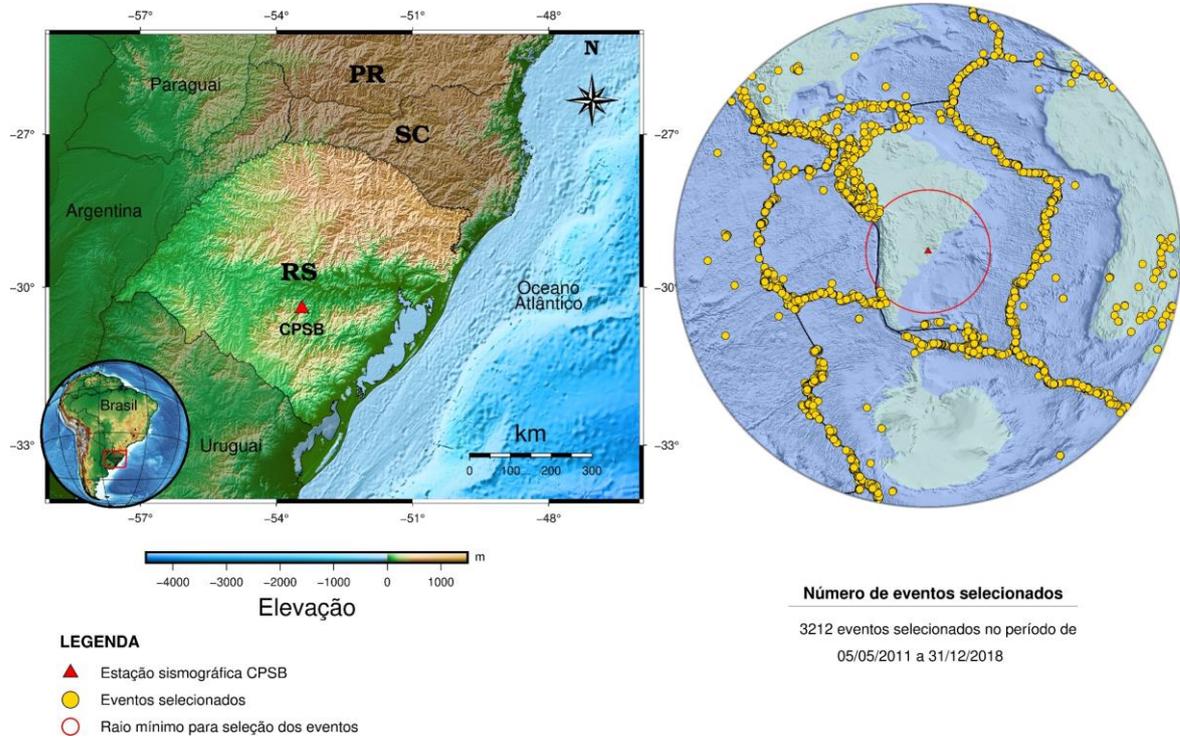
As figuras 13 a 20 abaixo apresentam o mapa mostrando a distribuição dos eventos selecionados para cada estação sismográfica. O círculo vermelho representa a distância radial mínima de 20° a partir da estação para a seleção dos eventos.

Figura 13 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação ITQB.



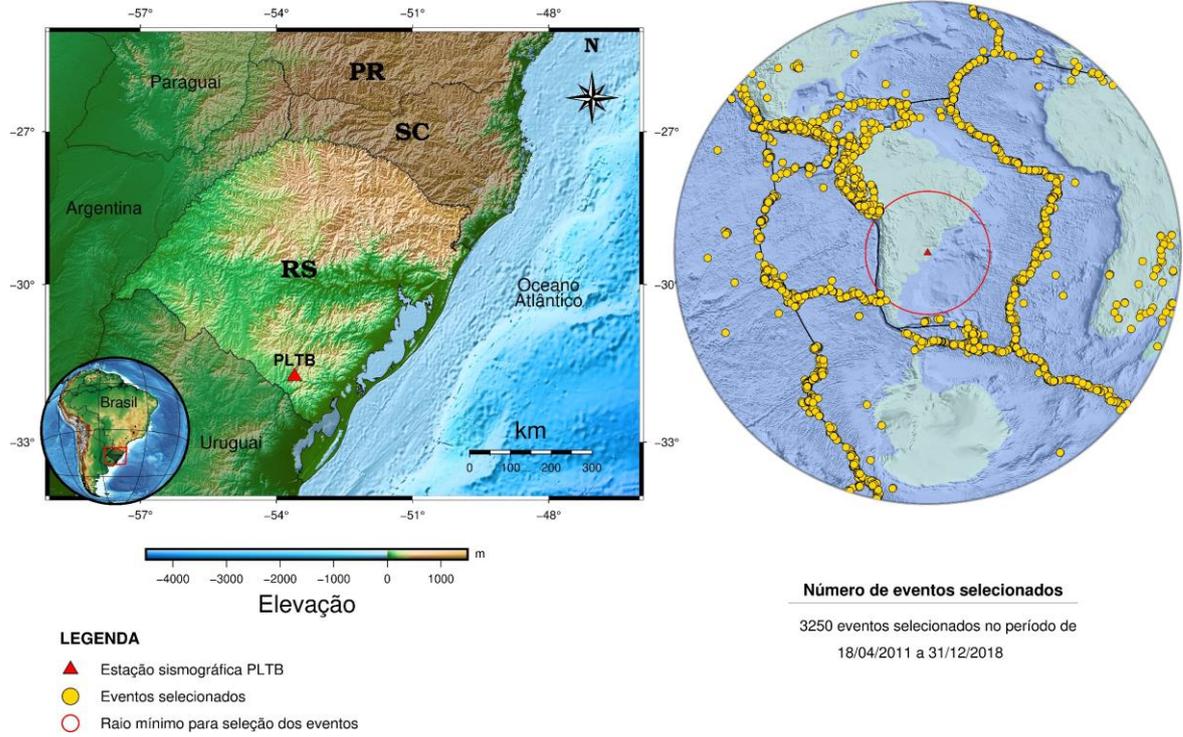
Fonte: Autor (2019).

Figura 14 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CPSB.



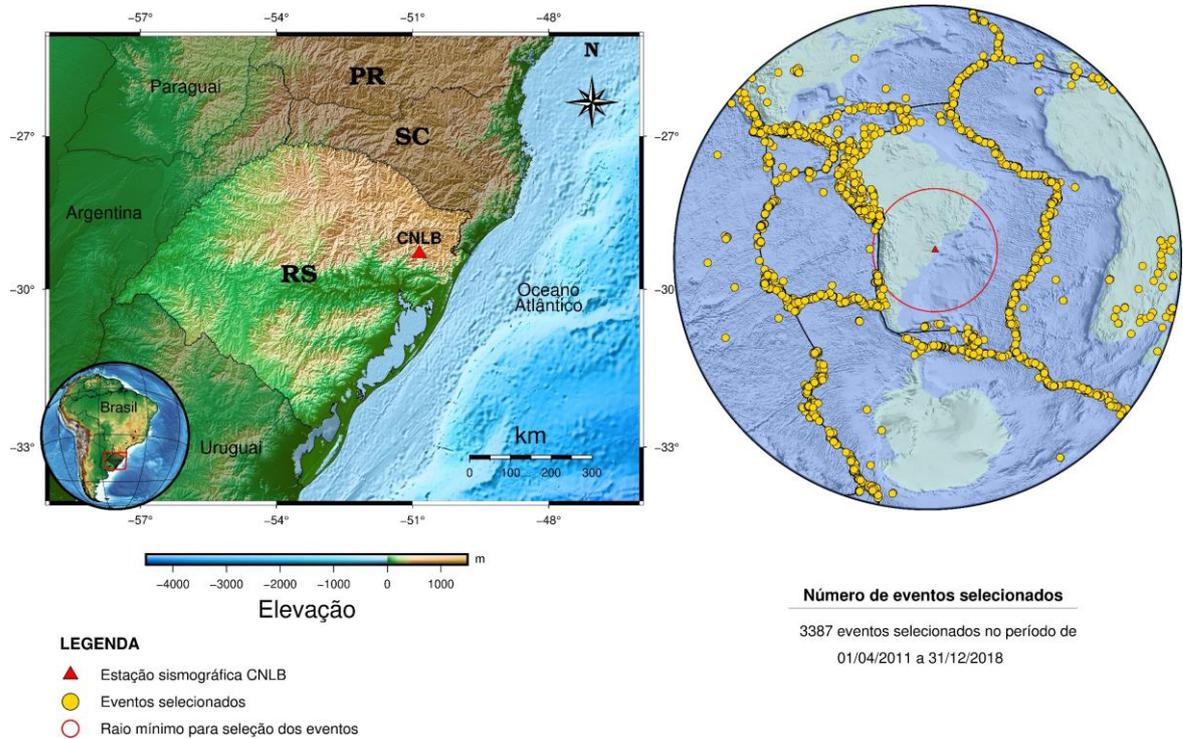
Fonte: Autor (2019).

Figura 15 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação PLTB.



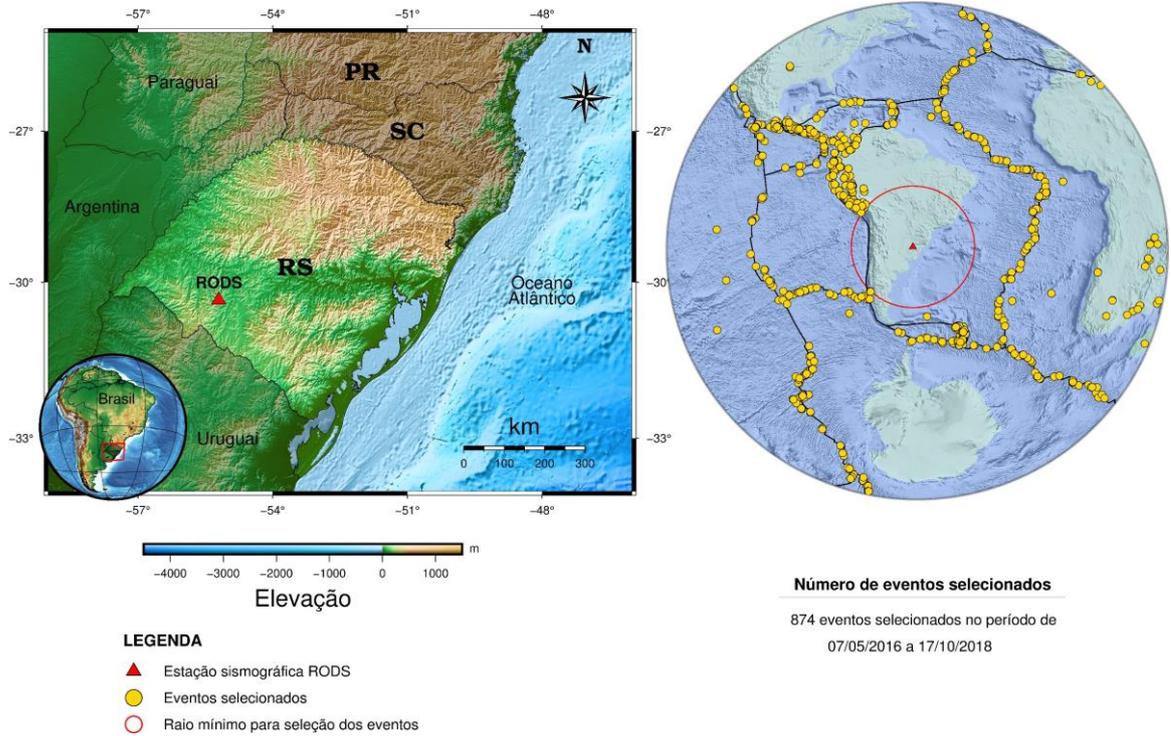
Fonte: Autor (2019).

Figura 16 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CNLB.



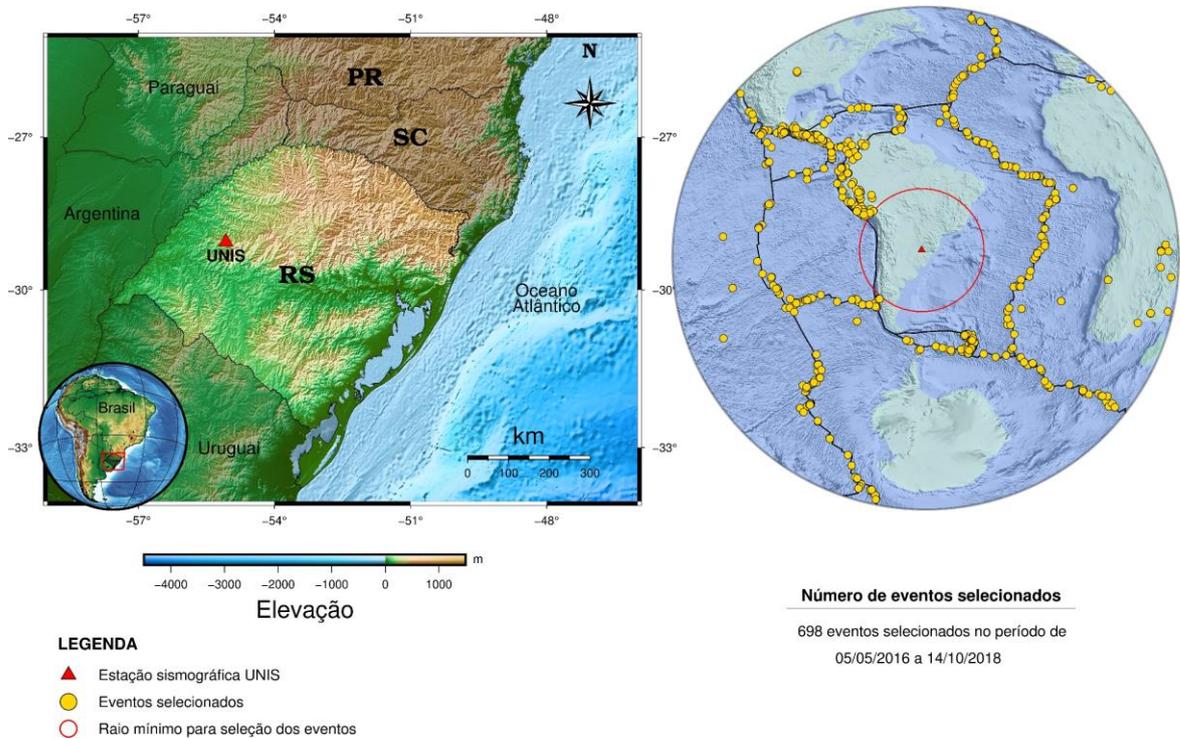
Fonte: Autor (2019).

Figura 17 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação RODS.



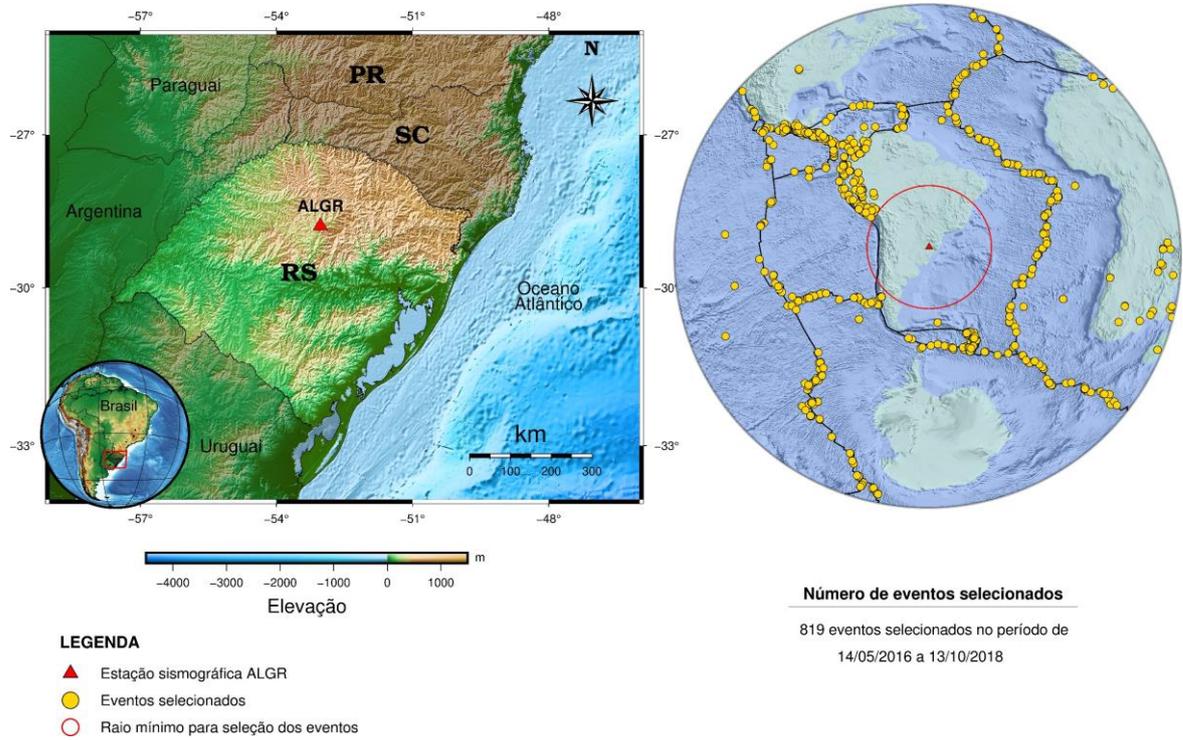
Fonte: Autor (2019).

Figura 18 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação UNIS.



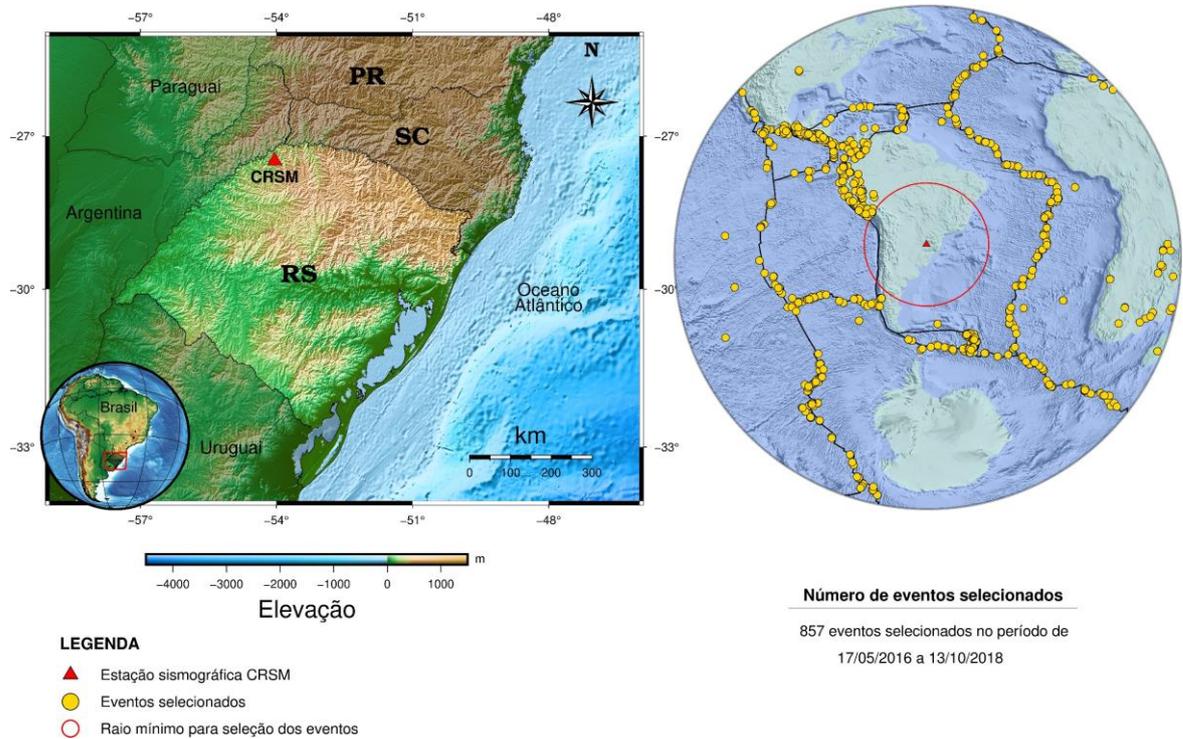
Fonte: Autor (2019).

Figura 19 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação ALGR.



Fonte: Autor (2019).

Figura 20 – Mapa mostrando a localização dos eventos selecionados para a estação CRSM.



Fonte: Autor (2019).

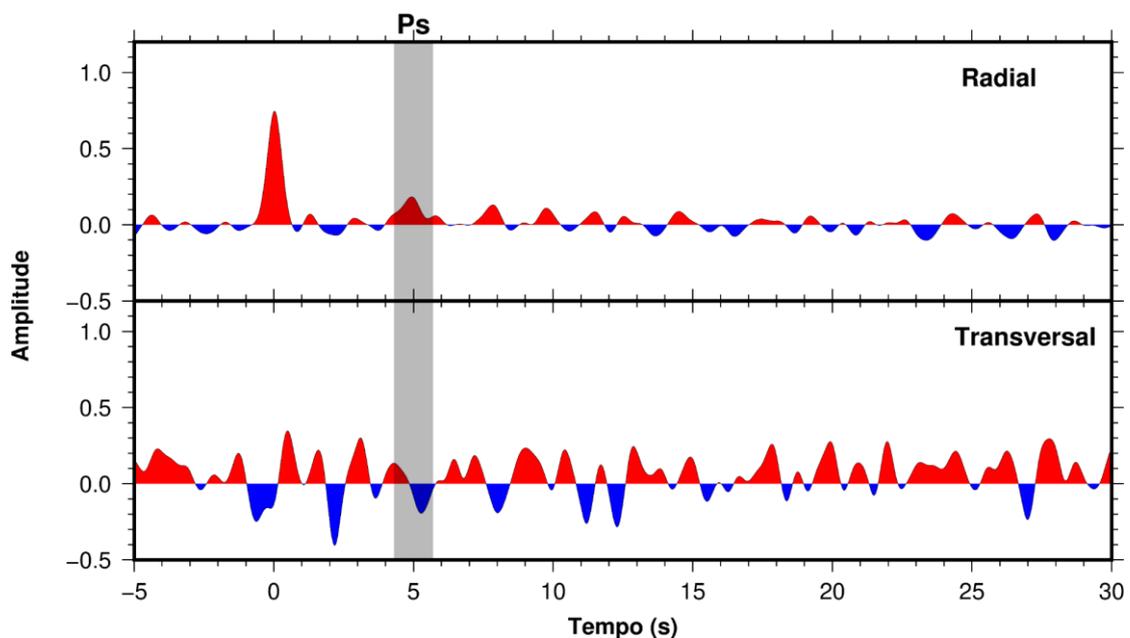
7.2 Rotação do sistema de coordenadas

Após a etapa de seleção dos eventos, os dados são preparados/processados para o cálculo das FRs. Nesta etapa, é feita basicamente a rotação do sistema de coordenadas de registro da estação ZNE para o sistema ZRT, além de correções instrumentais como remoção da média e tendência linear do equipamento.

7.3 Cálculo das Funções do Receptor

Após a rotação do sistema de coordenadas foi realizado o cálculo da Função do Receptor para cada evento (Figura 21). Para a obtenção da Função do Receptor é necessário a realização da deconvolução dos sismogramas, a partir do programa *pwaveqn* (AMMON, 1997), sendo necessário informar os valores para o filtro Nível de Água e para o filtro Gaussiano, que são parâmetros de entrada que condicionam a influência do nível de ruído local da estação. Para o processamento dos dados dos eventos telessísmicos, utilizou-se um valor para o filtro Gaussiano de 3 e um valor para o filtro Nível de Água de 0.0001 para todas as estações.

Figura 21 – Resultado do cálculo da Função do Receptor nas suas componentes radial e transversal.



Fonte: Autor (2019).

7.4 Seleção das Funções do Receptor

Após o cálculo das Funções do Receptor para cada evento inicialmente listado, foram selecionadas as Funções do Receptor que apresentaram melhor resposta em termos da razão S/N e, por consequência, serão capazes de fornecer os melhores ajustes no programa *Hk-Stacking*.

7.5 FILTROS

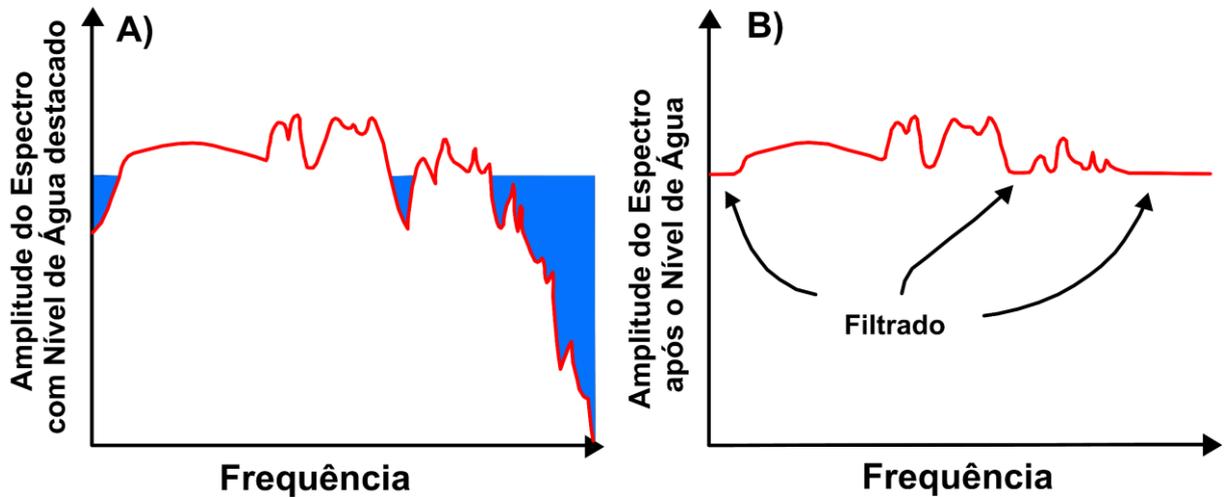
7.5.1 Filtro Nível d'água

A deconvolução da componente radial e tangencial pela componente vertical, usada para obter a Função do Receptor é uma divisão espectral (Equações 11 e 12), deste modo, quando o denominador possui um valor muito pequeno, uma instabilidade pode ser gerada. Para contornar essa instabilidade, pode-se substituir os pequenos valores de amplitude por uma fração do maior valor de amplitude do denominador (AMMON, 1997). A fração é chamada de parâmetro de nível de água (c) e foi proposto por Clayton & Wiggins (1976). O valor de c determina a amplitude mínima permitida no denominador da equação (23):

$$E_R(\mathcal{W}) = \frac{D_R(\mathcal{W}) D_V^*(\mathcal{W})}{\max[D_V(\mathcal{W}) D_V^*(\mathcal{W}), c \cdot \max[D_V(\mathcal{W}) D_V^*(\mathcal{W})]]} \quad (23)$$

Substituindo os valores pequenos por valores maiores no denominador da equação (23), atenua-se as frequências para as quais a componente vertical tem amplitude pequena (Figura 22). O valor de Nível d'água deve ser escolhido de modo a não aumentar o nível de ruído do traço da função do receptor.

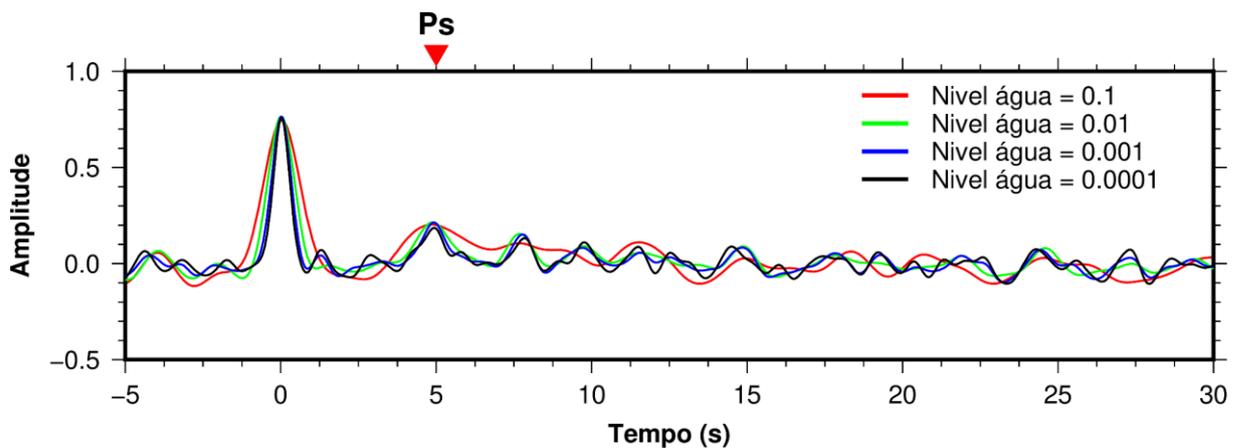
Figura 22 - Espectro de amplitude com a utilização do nível de água. Em (A) um espectro de amplitude com nível de água real e em (B) um espectro de amplitude após a aplicação do nível de água.



Fonte: Modificado de Ammon (1997)

A figura 23 abaixo, mostra um exemplo da aplicação de quatro valores diferentes para o filtro nível de água para um mesmo evento registrado pela estação CPSB. É possível notar que diferentes valores para o filtro resultam em diferentes formas de onda. No geral, quanto maior o valor do filtro, maior é a suavização da resposta da Função do Receptor, já que maior será o conteúdo de frequência eliminado. Para a estação CPSB, todos os eventos foram processados utilizando o valor de 0.0001 para o filtro nível de água.

Figura 23 – Resultado da Função do Receptor para diferentes valores para o filtro Nível de Água.



Fonte: Autor (2019).

7.5.2 Filtro Gaussiano

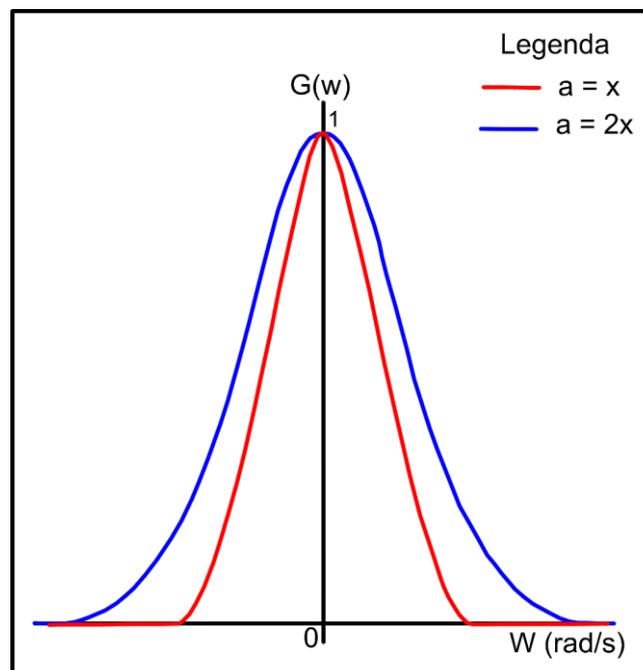
Com o objetivo de se eliminar ruídos de alta frequência na função do receptor utiliza-se um filtro passa-baixa representado por uma curva gaussiana, dado pela seguinte expressão:

$$G(\mathcal{W}) = \frac{e^{-\mathcal{W}^2}}{4a^2} \quad (23)$$

Onde a é denominado fator de extensão do Filtro Gaussiano e \mathcal{W} é a frequência.

A figura 24 apresenta o gráfico da equação (23). A escolha do fator $a = x$, em vermelho, elimina frequências superiores a $x/2$, enquanto que a escolha do fator $a = 2x$, em azul, elimina frequência superiores a x .

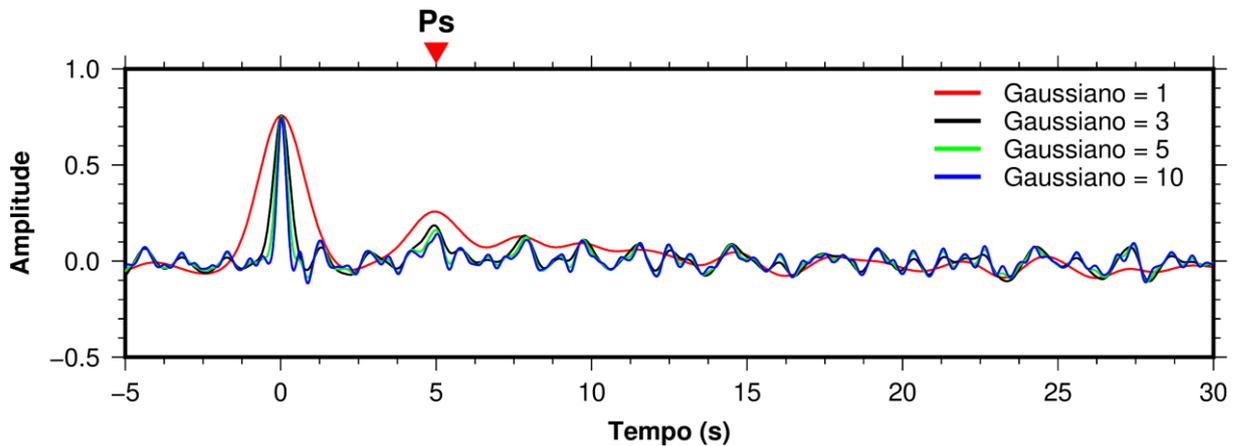
Figura 24 – Gráfico da função do filtro gaussiano para dois valores de a . E vermelho $a=x$ e em azul $a=2x$.



Fonte: Autor (2019).

A figura 25 mostra a resposta da Função do Receptor utilizando quatro valores distintos para o filtro gaussiano para o mesmo evento mostrado na figura 12. Para a estação CPSB, todos os eventos foram processados utilizando o valor de 3 para o filtro gaussiano.

Figura 25 – Resultado da Função do Receptor para diferentes valores para o Filtro Gaussiano.



Fonte: Autor (2019).

Observando a figura 25, é possível notar que diferentes valores para o filtro gaussiano resultam em diferentes formas de onda, para a escolha do valor do filtro usado neste trabalho, levou-se em consideração aquele que resultava em uma melhor representação da forma de onda relacionada a Função do Receptor. Observando a linha vermelha, nota-se que o valor do filtro gaussiano de 1, resultou em uma suavização da forma de onda que pode estar mascarando alguma chegada de onda que seria importante para o dado.

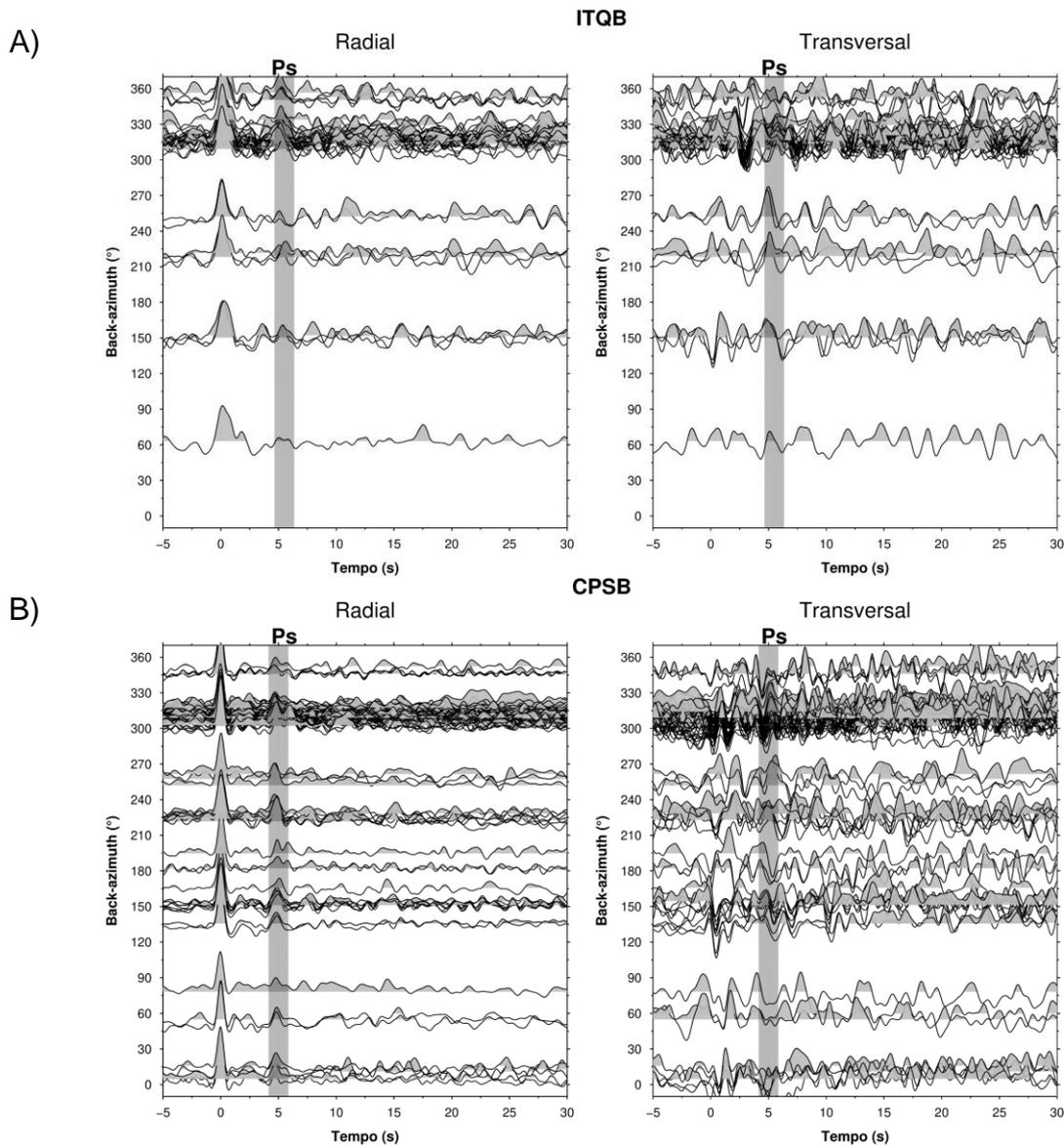
Já observando o gráfico azul, nota-se que o valor 10 para o filtro gaussiano, resultou em uma forma de onda com um conteúdo de frequência desnecessário, acarretando a um aumento de ruído no traço da Função do Receptor, desta forma o valor adotado para o filtro gaussiano no presente trabalho foi de 3 para todas as estações sismográficas analisadas, pois o mesmo apresentou uma boa resposta em relação a razão sinal/ruído para os traços da Função do Receptor

8 RESULTADOS

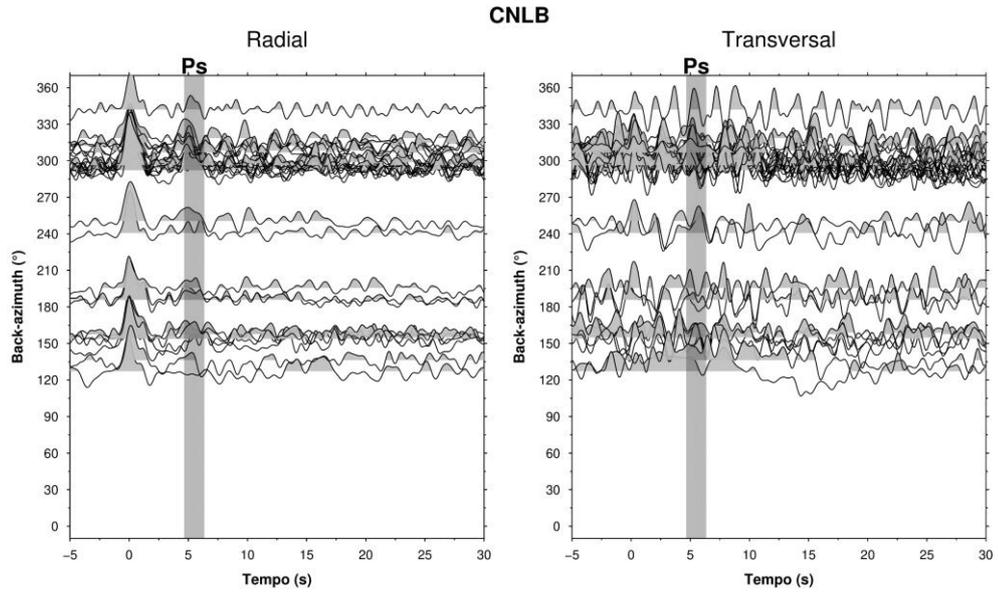
8.1 Cálculo das Funções do Receptor

Para cada evento selecionado foi calculado um traço de Função do Receptor e posteriormente foi feita a seleção das melhores FRs que apresentaram a melhor relação da razão sinal-ruído. A figura 26 mostra o resultado do cálculo e seleção das FRs para cada estação.

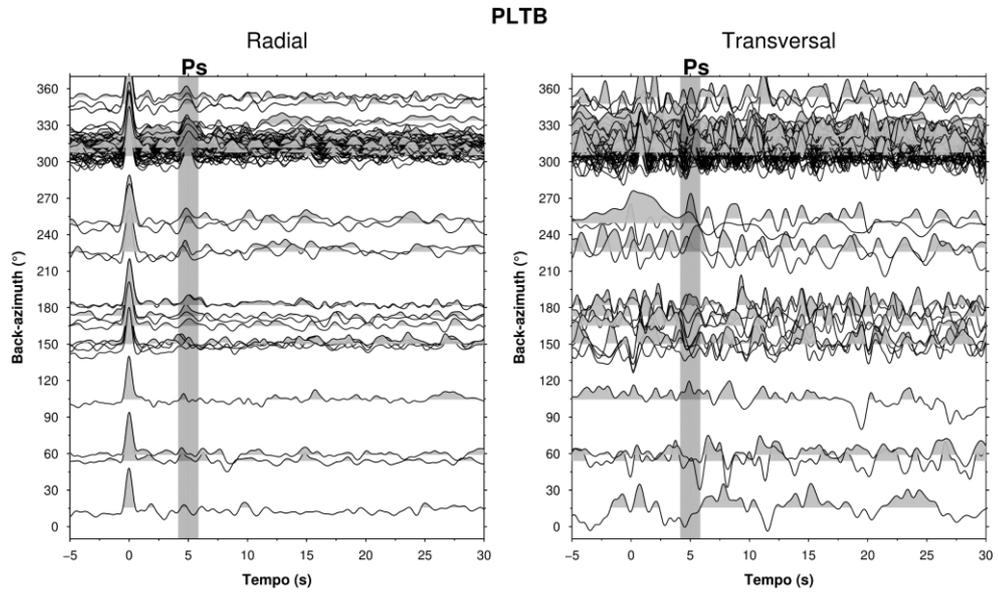
Figura 26 – Resultado do cálculo e seleção das FRs de cada estação sismográfica nas suas componentes radial e tangencial. O polígono cinza representa o intervalo de tempo de chegada da fase Ps.



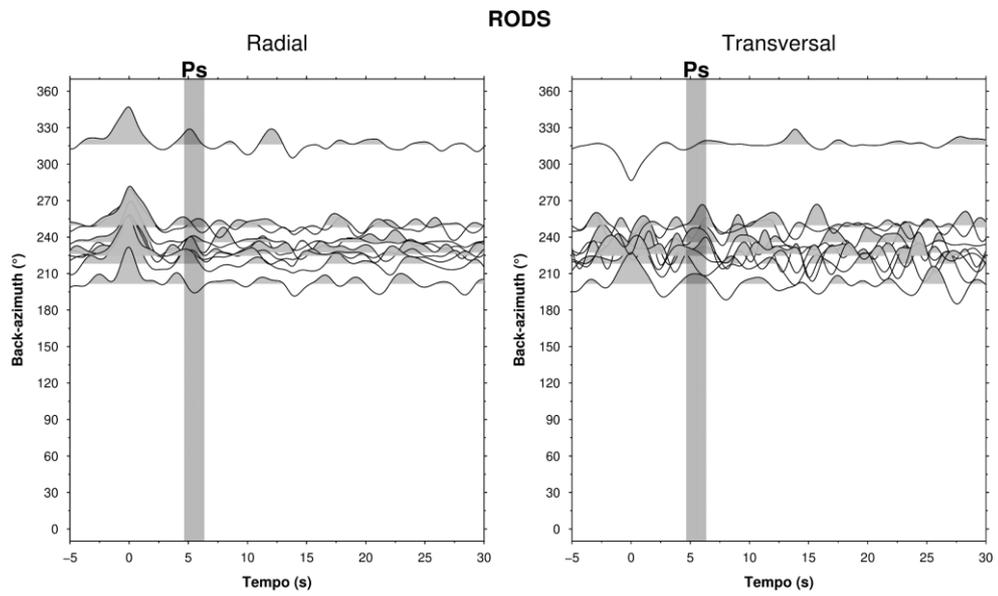
C)



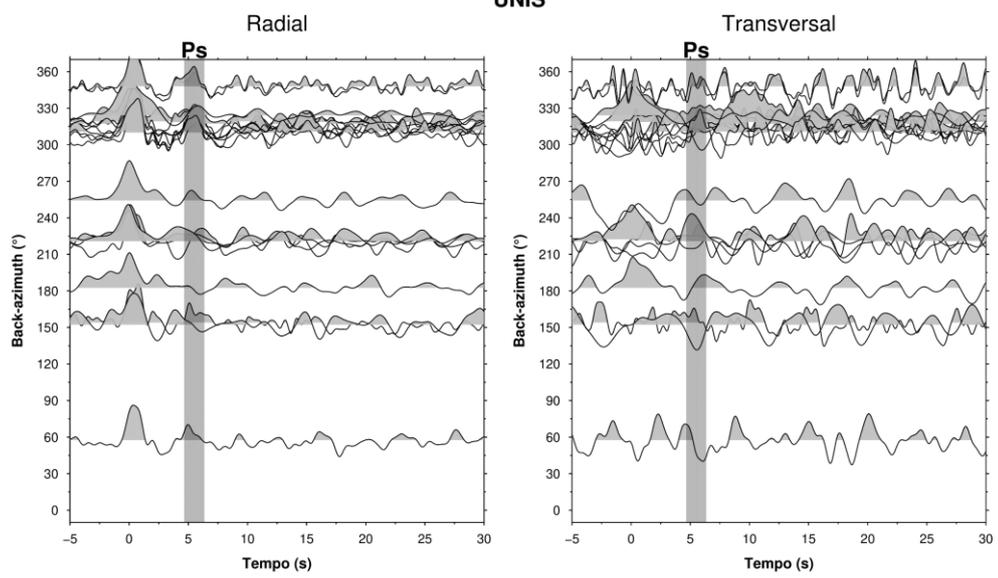
D)



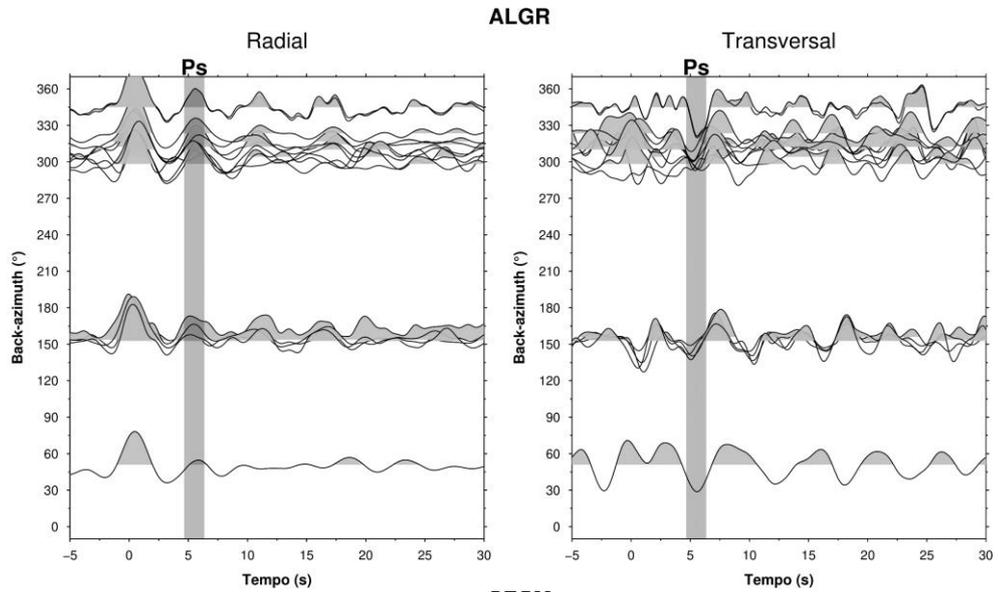
E)



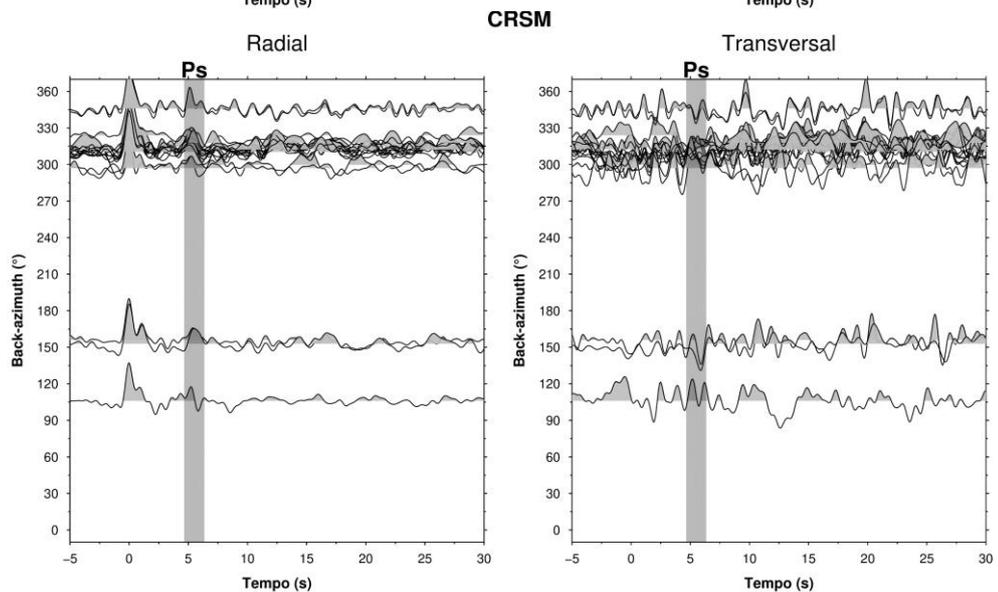
F)



G)



H)



ITQB – Itaqui (Figura 26 A) – Para a estação ITQB foram selecionadas 42 Funções do Receptor para servir de entrada no programa *HK-Stacking*. Na componente radial, a onda P pode ser visualizada centrada em 0 segundos e a chegada da onda Ps, conversão da onda P em S na descontinuidade de Moho ocorre pouco após 5 segundos. Na componente transversal não é possível identificar alguma chegada de onda bem definida por conta do ruído contido nessa componente.

CPSB – Caçapava do Sul (Figura 26 B) – Para a estação CPSB foram selecionadas 82 Funções do Receptor. Na componente radial é possível observar a chegada da onda P bem definida e com alta amplitude centrada em 0 segundos e 5 segundos depois a chegada da onda Ps com menor amplitude.

CNLB – Canela (Figura 26 C) – Para a estação CNLB foram selecionadas 32 Funções do Receptor. É possível observar a chegada da onda P centrada em 0 segundos, podendo também ser observada uma chegada de menor amplitude juntamente com a onda P, podendo esta estar associada a alguma fase relacionada a bacia, já que a estação CNLB se encontra localizada na região da Bacia do Paraná. A chegada da onda Ps ocorre próxima da 5 segundos, não estando bem definida nesta estação.

PLTB – Pelotas (Figura 26 D) – Para a estação PLTB foram selecionadas 89 Funções do Receptor, sendo uma das estações com a maior quantidade de eventos selecionados. Na componente radial, a onda P se encontra bem definida centrada em 0 segundos e sua conversão Ps é visualizada com amplitude inferior próxima de 5 segundos.

RODS – Rosário do Sul (Figura 26 E) – Para a estação RODS foram selecionadas apenas 10 Funções do Receptor, sendo esta a estação com a menor quantidade de eventos selecionados por conta do seu nível de ruído. A onda P é observada próxima de 0 segundos, se apresentando de forma não definida. A chegada da onda Ps possui uma variação de tempo em torno de 5 segundos, possuindo pequena amplitude e não se apresentando de maneira definida.

UNIS – Unistalda (Figura 26 F) – Para a estação UNIS foram selecionadas 20 Funções do Receptor. Na sua componente radial, é possível observar a chegada da onda P centrada próximo de 0 segundos, com algumas chegadas conjuntas

juntamente com a onda P, indicando alguma fase de onda relacionada a bacia. Em torno de 5 segundos é possível observar um alinhamento dos traços das Funções do Receptor, indicando a chegada da onda Ps.

ALGR – Alto Alegre (Figura 26 G) – Para a estação ALGR foram selecionadas 15 Funções do Receptor para servir de entrada no programa *HK-Stacking*. Na componente radial é possível observar as chegadas das ondas P e Ps bem definidas em 0 segundos e 5 segundos, respectivamente. Na componente transversal, em torno de 5 segundos, é possível observar um alinhamento de traços de amplitude negativa.

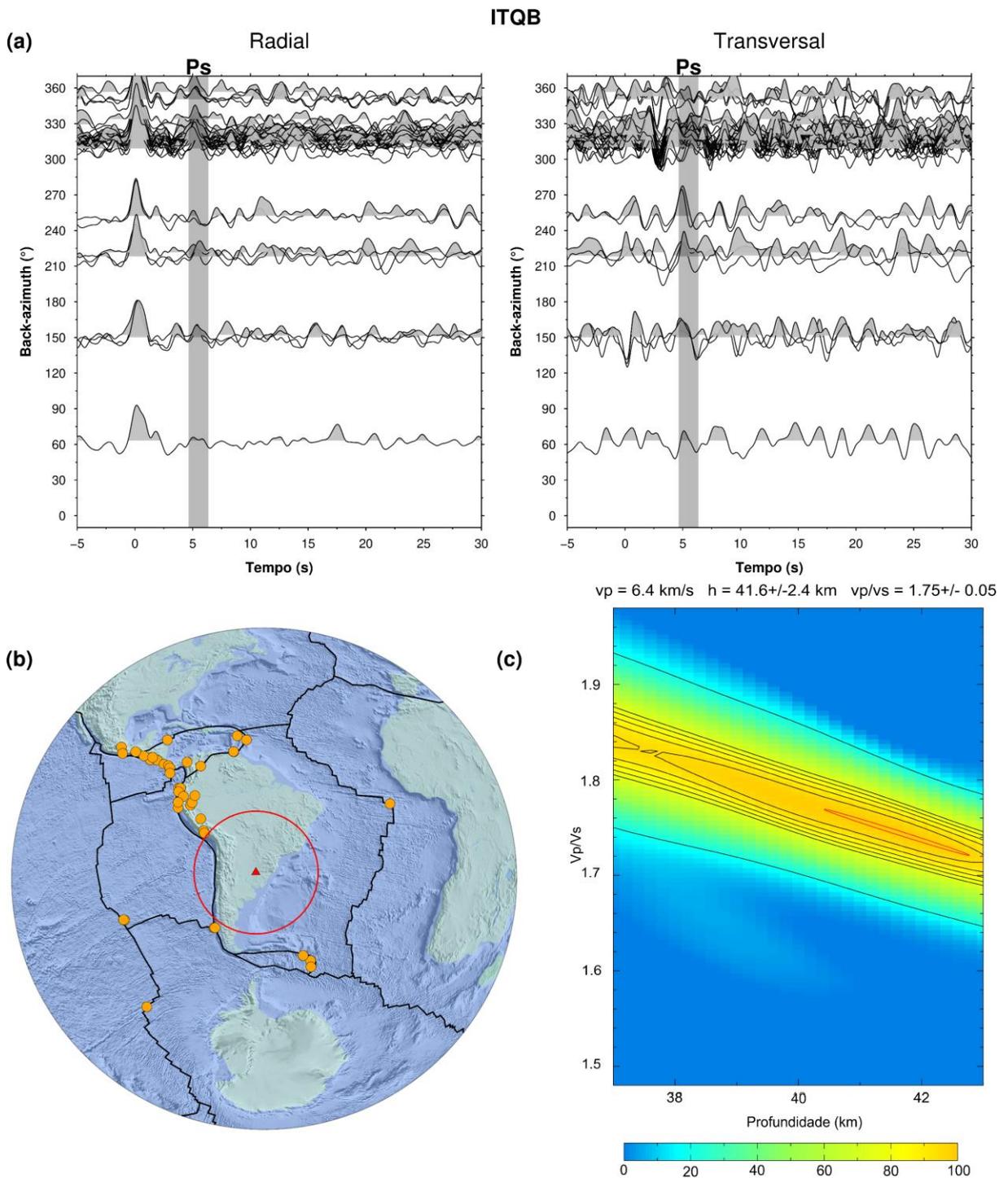
CRSM – Crissiumal (Figura 26 H) – Para a estação CRSM foram selecionadas 20 Funções do Receptor. A onda P é observada próximo de 0 segundos na componente radial, com uma chegada conjunta de menor amplitude, associada a fase da Bacia do Paraná.

8.2 Cálculo da Espessura Crustal e Razão Vp/Vs no *HK-Stacking*

Após a etapa do cálculo e seleção das Funções do Receptor para cada estação, tais dados foram utilizados como entrada no programa *HK-Stacking* para obter a estimativa dos valores de espessura crustal e razão Vp/Vs sob cada estação sismográfica. Para este método, é necessário informar o valor médio da velocidade da onda P no meio, o qual foi adotado o valor de 6.4 km/s, sendo o mesmo valor utilizado por outros autores de maneira bem-sucedida (LIMA, 2016; MOREIRA, 2013; TRINDADE, 2014).

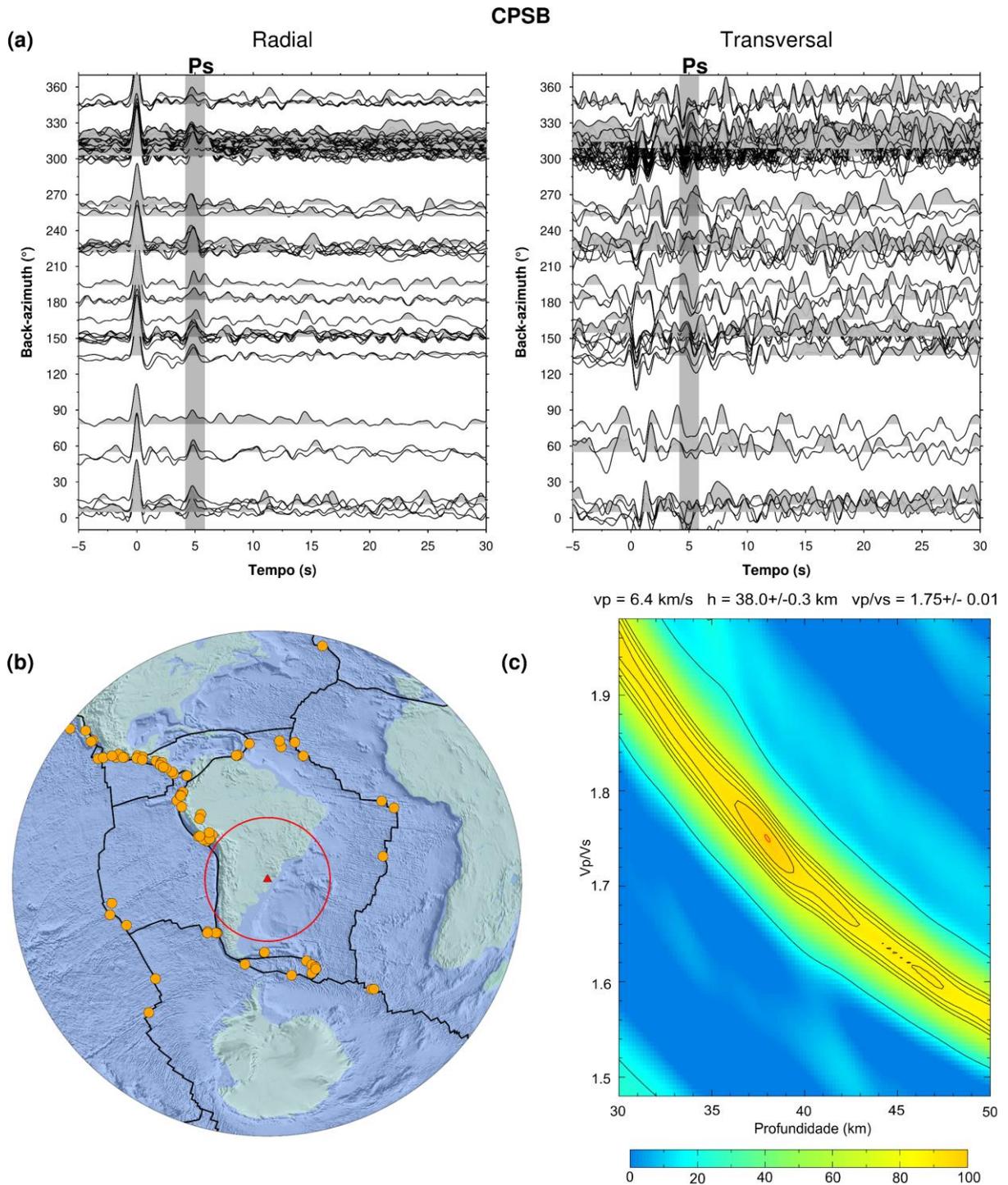
As figuras 27 a 34 mostram o resultado do programa *HK-Stacking*, o qual se trata de um gráfico Vp/Vs (km/s) versus Profundidade (km), onde a escala de cores representa o grau de coerência em porcentagem (%).

Figura 27 – Resultado do método HK-Stacking para a estação ITQB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



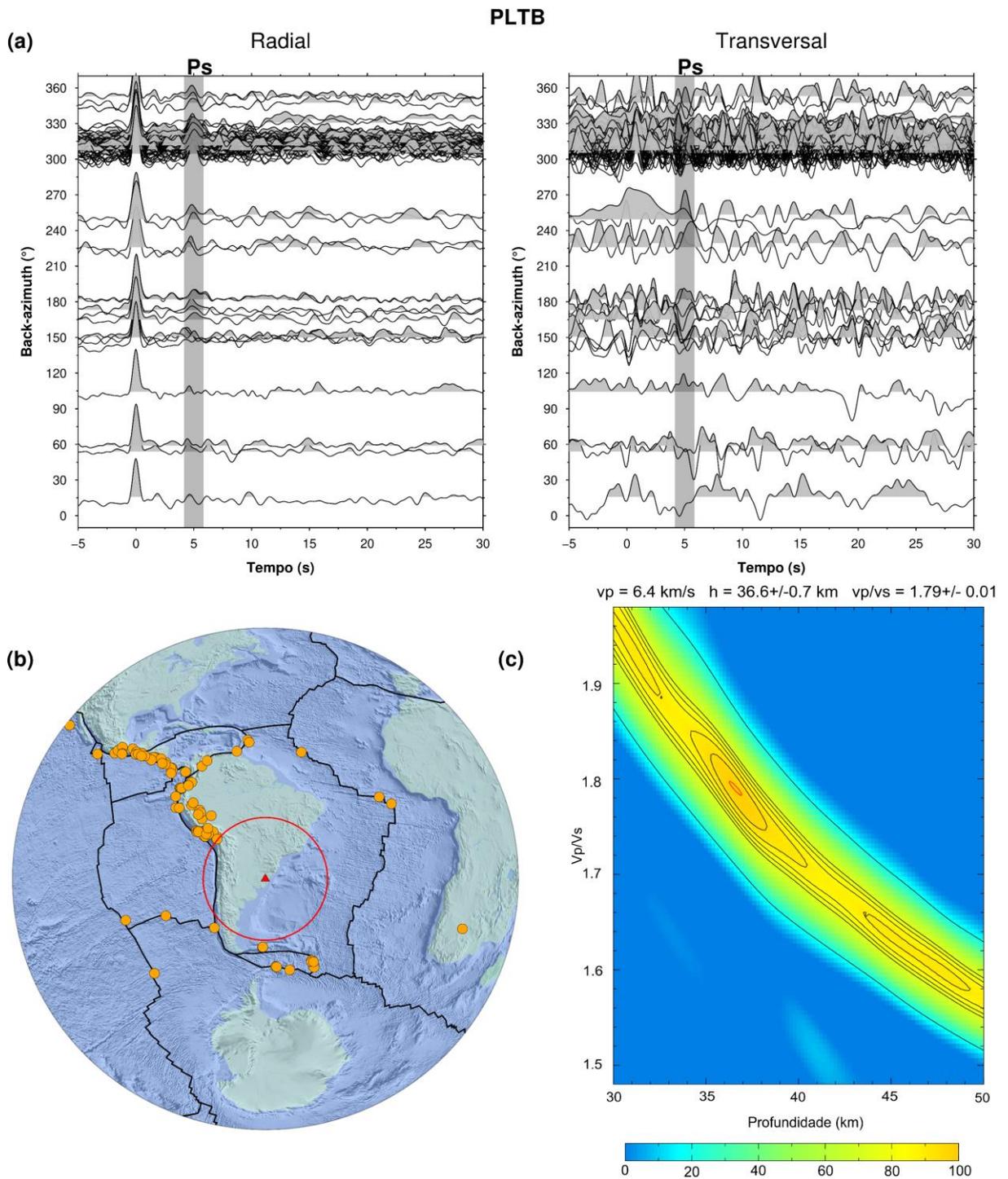
Fonte: Autor (2019).

Figura 28 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CPSB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



Fonte: Autor (2019).

Figura 29 – Resultado do método HK-Stacking para a estação PLTB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



Fonte: Autor (2019).

Figura 30 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CNLB. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .

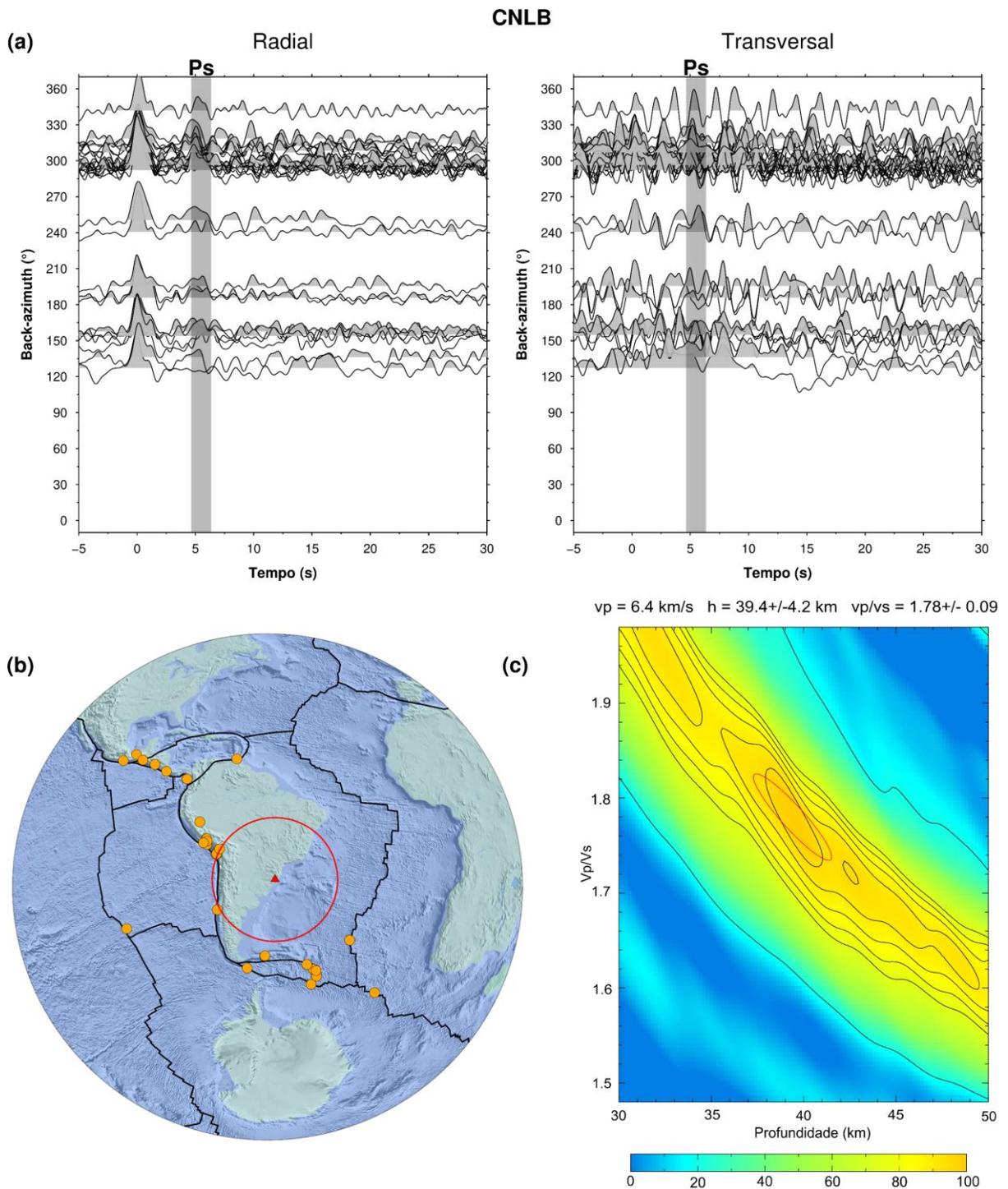
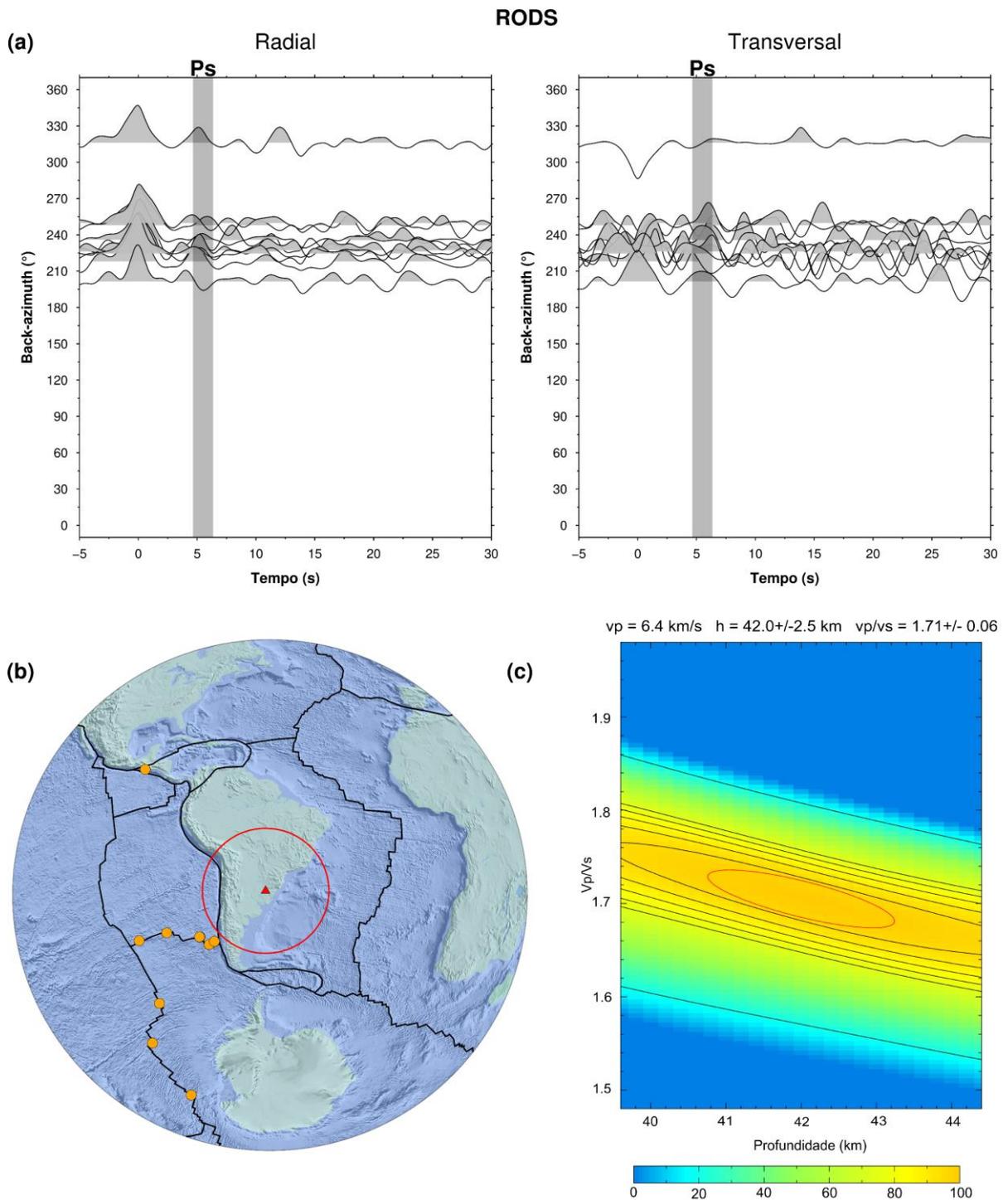
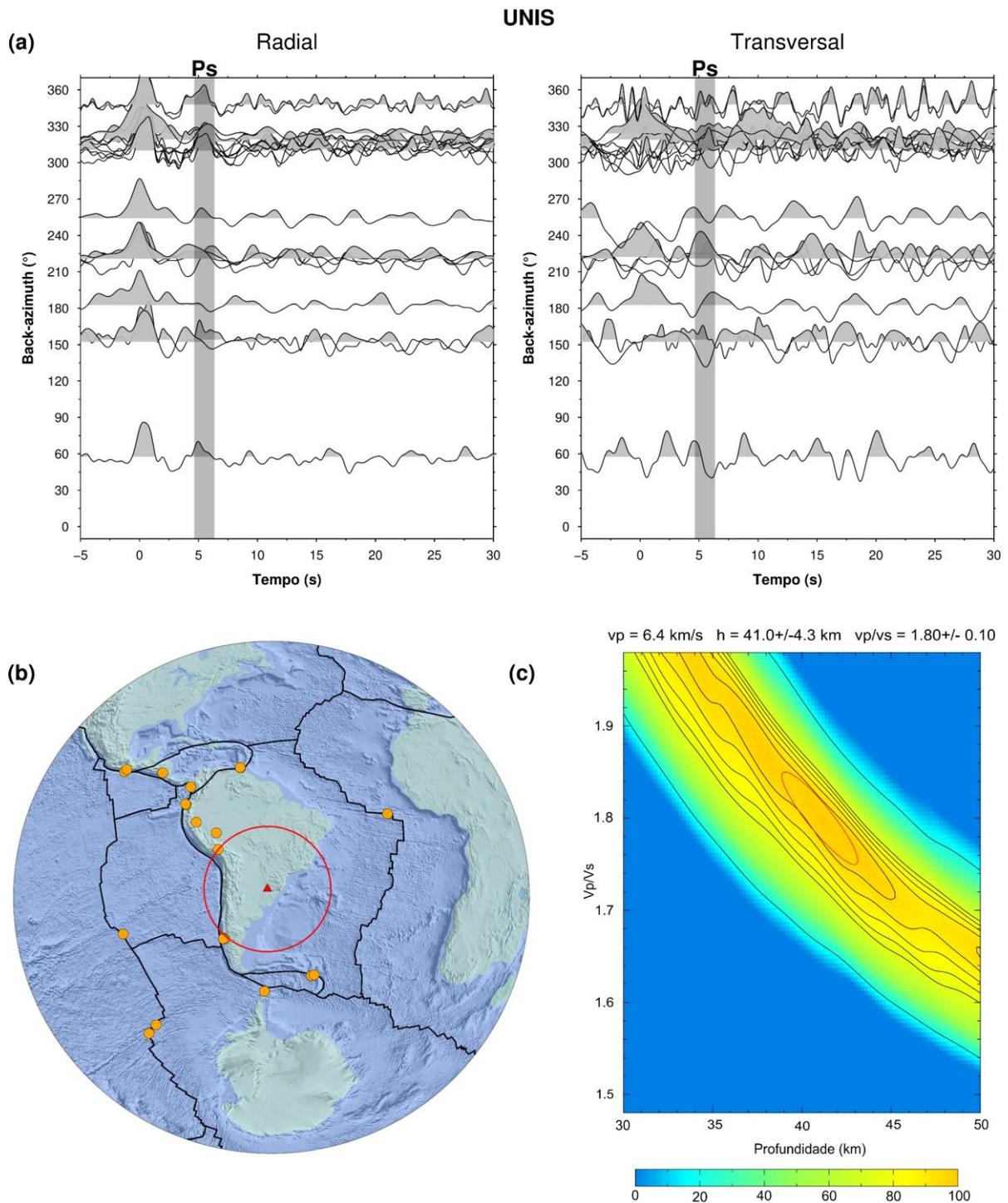


Figura 31 – Resultado do método HK-Stacking para a estação RODS. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



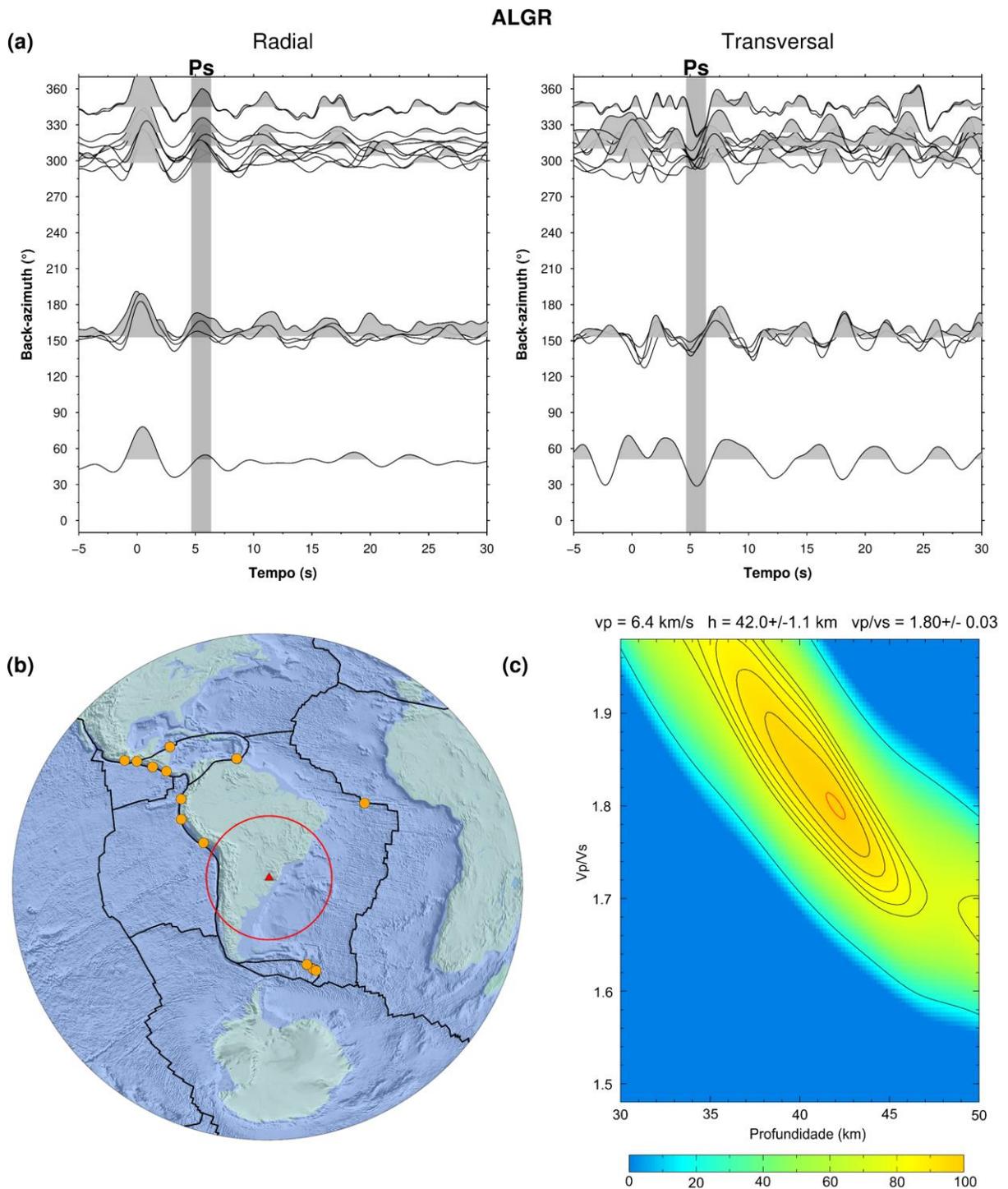
Fonte: Autor (2019).

Figura 32 – Resultado do método HK-Stacking para a estação UNIS. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



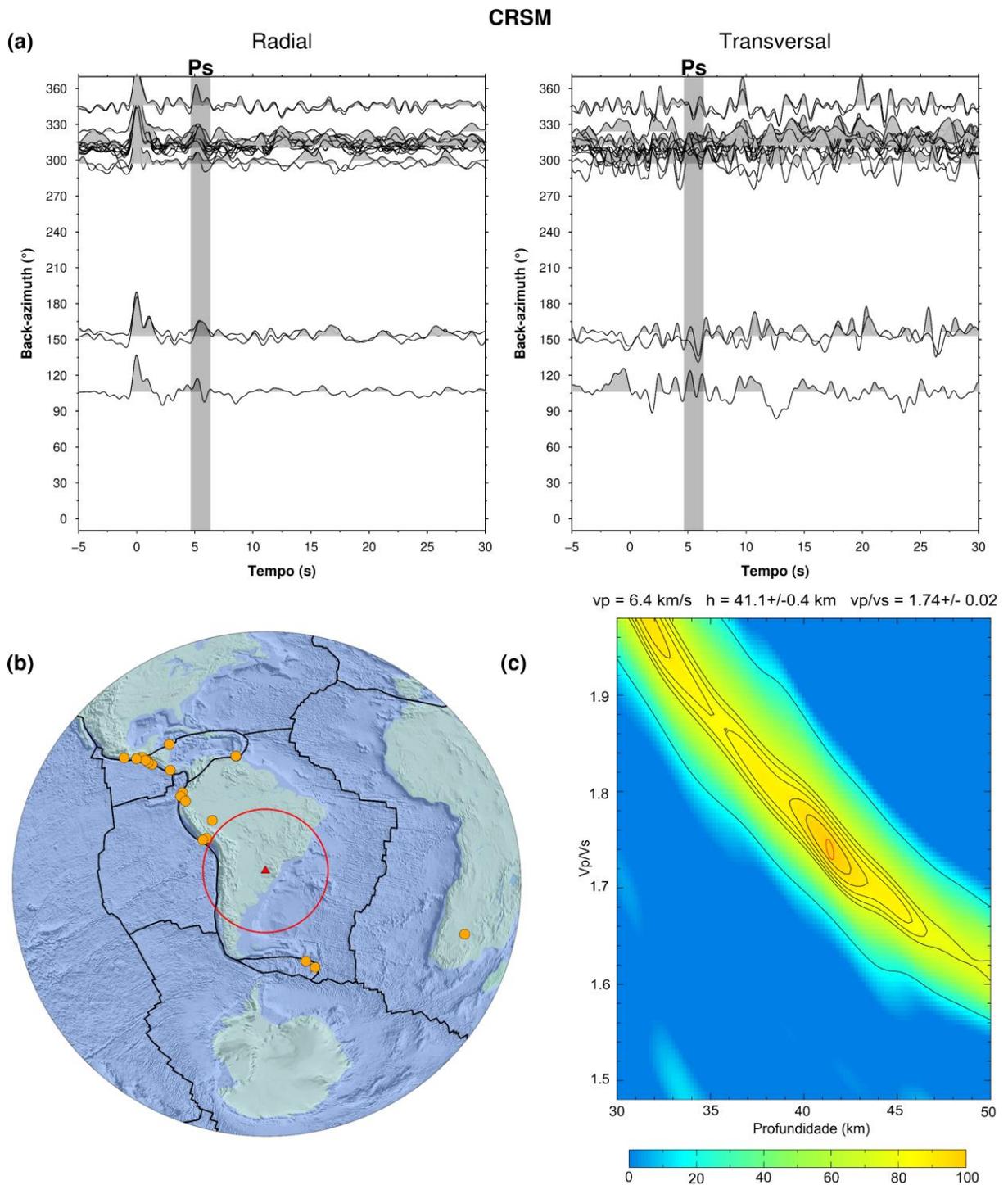
Fonte: Autor (2019).

Figura 33 – Resultado do método HK-Stacking para a estação ALGR. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



Fonte: Autor (2019).

Figura 34 – Resultado do método HK-Stacking para a estação CRSM. Em (a) as Funções do Receptor radial e tangencial selecionadas, em (b) a localização dos eventos tectônicos e em (c) o gráfico do HK-Stacking mostrando os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s .



Fonte: Autor (2019).

ITQB – Itaqui (Figura 27) – Para a estação ITQB, foram utilizadas 42 formas de onda para servir de entrada no programa *HK-Stacking*. Analisando a figura 27-a) e b) observa-se que para esta estação, a maior cobertura azimutal de eventos ocorreu entre 300° e 360°. A partir da figura 27-c) observa-se que para a estação ITQB o valor da espessura crustal obtido foi de 41,6 km com um erro de 2,4 km e o valor da razão V_p/V_s foi de 1,75 com um erro de 0,05. Sob a estação ITQB a crosta se apresenta de forma mais espessa comparada a região do ESRg, estando a mesma localizada acima da região da Bacia do Paraná, sendo esta região caracterizada por altos valores de espessura crustal.

CPSB – Caçapava do Sul (Figura 28) – A estação CPSB contou com 82 formas de ondas para entrada no *HK-Stacking*, representando um grande número de Funções do Receptor, sendo a maioria de ótima qualidade em relação a razão sinal ruído. A estação teve uma boa cobertura azimutal de eventos, com uma concentração nos azimutes entre 300° e 360°. Os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s obtidos a partir do *HK-Stacking* foram de 38+/-0,3 km e 1,75+/-0,01, respectivamente, sendo esta estação a que obteve o menor erro em relação a espessura crustal e razão V_p/V_s .

PLTB – Pelotas (Figura 29) – A estação PLTB teve o maior número de Funções do Receptor utilizadas no programa *HK-Stacking*, sendo utilizadas um total de 89 FR's, possuindo as mesmas a fase P bem definida e centrada em 0 segundos e a fase Ps chegando aproximadamente 5 segundos depois da P. A estação possui uma boa cobertura azimutal de eventos, sendo mais significativa entre os azimutes 300° e 360°. Os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s obtidos foram de 36,6+/-0,7 km e 1,79+/- 0,01, respectivamente. A estação PLTB está localizada sobre a região do ESRg, e dentre todas as estações analisadas, foi a que obteve o menor valor de espessura crustal.

CNLB – Canela (Figura 30) – Para a estação CNLB foram utilizadas 32 Funções do Receptor no programa *HK-Stacking*, com uma cobertura de eventos entre os azimutes 120° e 360°. Os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s para a estação CNLB foram de 39,4+/-4,2 km e 1,78+/- 0,09, respectivamente.

RODS – Rosário do Sul (Figura 31) – Para a estação RODS foram utilizadas apenas 10 formas de ondas para servir de entrada no programa HK-Stacking, sendo esta a estação com o menor número de Funções do Receptor selecionados por conta da qualidade dos dados. A estação possui uma baixa cobertura azimutal de eventos, sendo concentrado nos azimutes entre 180° e 270°. Os valores obtidos de espessura crustal e razão V_p/V_s para a estação RODS foram de $42 \pm 2,5$ km e $1,71 \pm 0,06$, respectivamente.

UNIS – Unistalda (Figura 32) – Para a estação UNIS foram utilizadas 20 Funções do Receptor como entrada no programa HK-Stacking. A estação possui uma quantidade pequena de formas de ondas selecionadas, porém possui uma boa cobertura azimutal, com uma concentração maior de eventos entre os azimutes 150° a 360°. Os valores obtidos de espessura crustal e razão V_p/V_s foram de $41 \pm 4,3$ km e $1,80 \pm 0,10$, respectivamente.

ALGR – Alto Alegre (Figura 33) – A estação ALGR contou com 15 Funções do Receptor selecionadas para servir de entrada no programa *HK-Stacking*. Para esta estação a cobertura azimutal é baixa, ficando restrita a apenas alguns intervalos de azimutes. Em relação aos valores obtidos, observa-se uma crosta com espessura de $42 \pm 1,1$ km e razão V_p/V_s de $1,80 \pm 0,03$. A estação ALGR se encontra na região da Bacia do Paraná, o que justifica a alta espessura crustal obtida para esta estação.

CRSM – Crissiumal (Figura 34) – E por fim, para a estação CRSM foram selecionados 20 eventos para seguir para o processamento no programa *HK-Stacking*, onde no mesmo foram obtidos valores de espessura crustal e razão V_p/V_s de $41,1 \pm 0,4$ km e $1,74 \pm 0,02$, respectivamente. Quanto a cobertura azimutal da estação, os eventos selecionados se concentraram entre os azimutes 300° e 360°.

A tabela 2 abaixo apresenta os valores de espessura crustal (H) e razão Vp/Vs obtidos no presente trabalho a partir do processamento dos eventos telessísmicos para o estado do Rio Grande do Sul com seus respectivos erros.

Tabela 2 - Espessura crustal e razão Vp/Vs obtidos para as estações sismográficas localizadas no Rio Grande do Sul.

Estação	H (km)	Vp/Vs
ITQB	41,6 +/- 2,4	1,75 +/- 0,05
CPSB	38,0 +/- 0,3	1,75 +/- 0,01
PLTB	36,6 +/- 0,7	1,79 +/- 0,01
CNLB	39,4 +/- 4,2	1,78 +/- 0,09
RODS	42,0 +/- 2,5	1,71 +/- 0,06
UNIS	41,0 +/- 4,3	1,80 +/- 0,10
ALGR	42,0 +/- 1,1	1,80 +/- 0,03
CRSM	41,4 +/- 0,4	1,74 +/- 0,02

Fonte: Autor (2019).

As estações sismográficas localizadas acima da região do Escudo Sul-Rio-Grandense (CPSB e PLTB), obtiveram valores de espessura crustal abaixo de 40 km, o que já era esperado para esta região. Para a estação CPSB, o valor de espessura crustal obtido foi de 38 +/- 0,3 km, valor este semelhante aos valores obtidos por outros autores para esta mesma estação. Assumpção et al. (2013) obteve 36.6 +/- 1,4 km de espessura crustal para a estação CPSB, semelhante também a valores obtidos por Lima (2016) (36,4 ± 0,82 km). Para a estação PLTB, o valor de espessura crustal obtido foi de 36,6 +/- 0,7 km, valor semelhante aos de Assumpção et al., (2013) e Lima (2016), que obtiveram 36,4 +/- 1,4 km e 36,42 +/- 1,3 km, respectivamente.

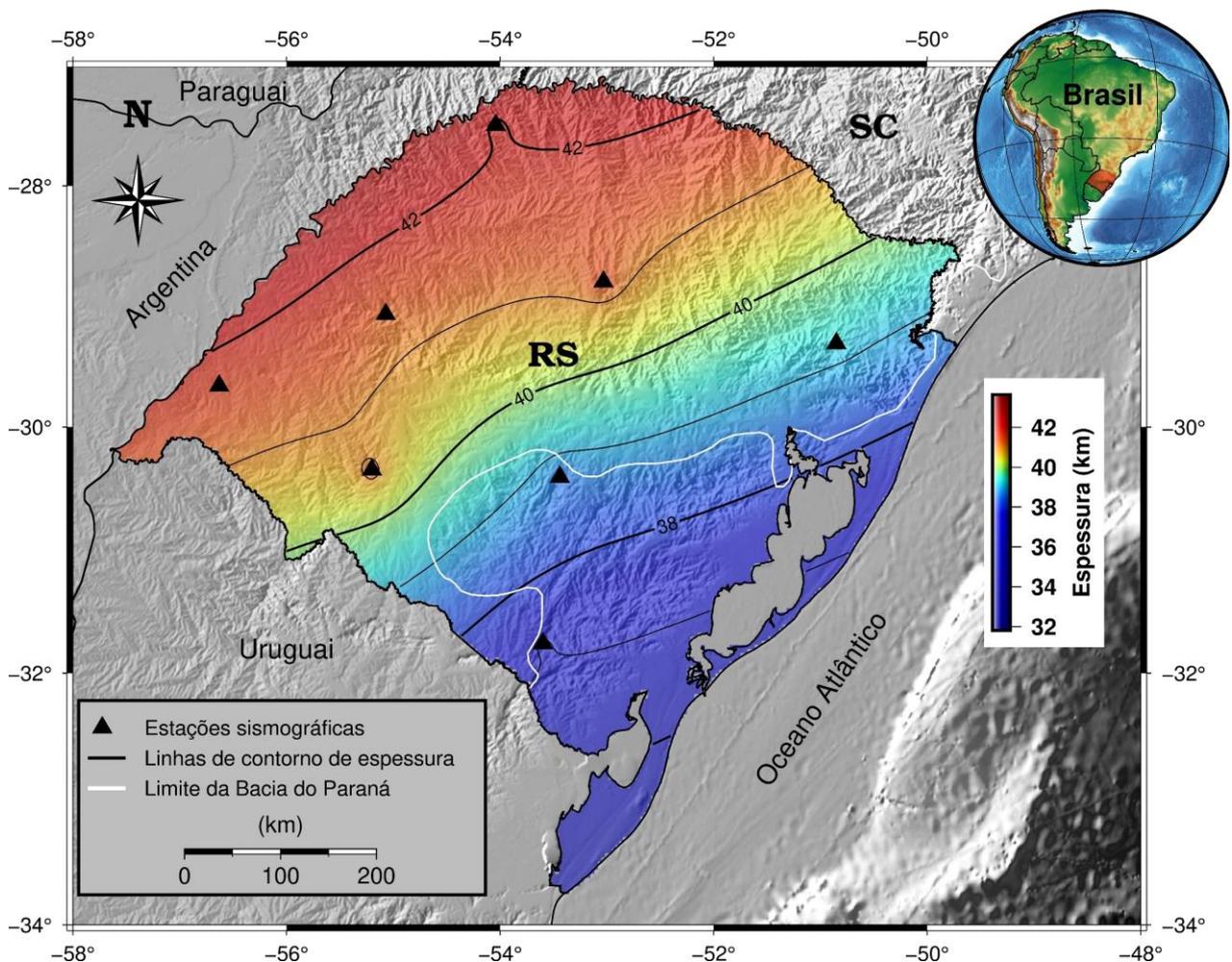
O valor da razão Vp/Vs obtido para as estações CPSB e PLTB foram de 1,75 +/- 0,01 e 1,79 +/- 0,01, respectivamente. Tais valores podem estar associados a uma crosta de composição mais máfica, pois altos valores da razão Vp/Vs remetem

a uma crosta com rochas de composição mais básica, assim como baixos valores da razão V_p/V_s estão relacionados a uma crosta com rochas de composição ácida.

As estações sismográficas que estão localizadas na região da Bacia do Paraná apresentaram valores de espessura crustal por volta de 40 km, valor este que corrobora com trabalhos anteriores como os obtidos por Assumpção et al., (2013), Lima (2016) e Moreira (2013).

O limite geológico entre o Escudo Sul-Rio-Grande e a Bacia do Paraná é bem definido pelos valores de espessura crustal obtidos no presente trabalho, como pode ser observado no mapa de espessura crustal da figura 35 abaixo.

Figura 35 – Mapa da espessura crustal para o estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autor (2019).

Analisando o mapa da figura 35 pode-se notar que existem duas áreas distintas em relação a espessura crustal para o estado do Rio Grande do Sul, a região da Bacia do Paraná que é caracterizada por uma crosta de espessura variando entre 39,4 km a 42 km e a região do ESRg que possui valores de espessura crustal variando entre 36,6 km a 38 km. Entre essas duas regiões existe uma zona transicional onde a mesma está correlacionada com o principal limite litológico existente no RS.

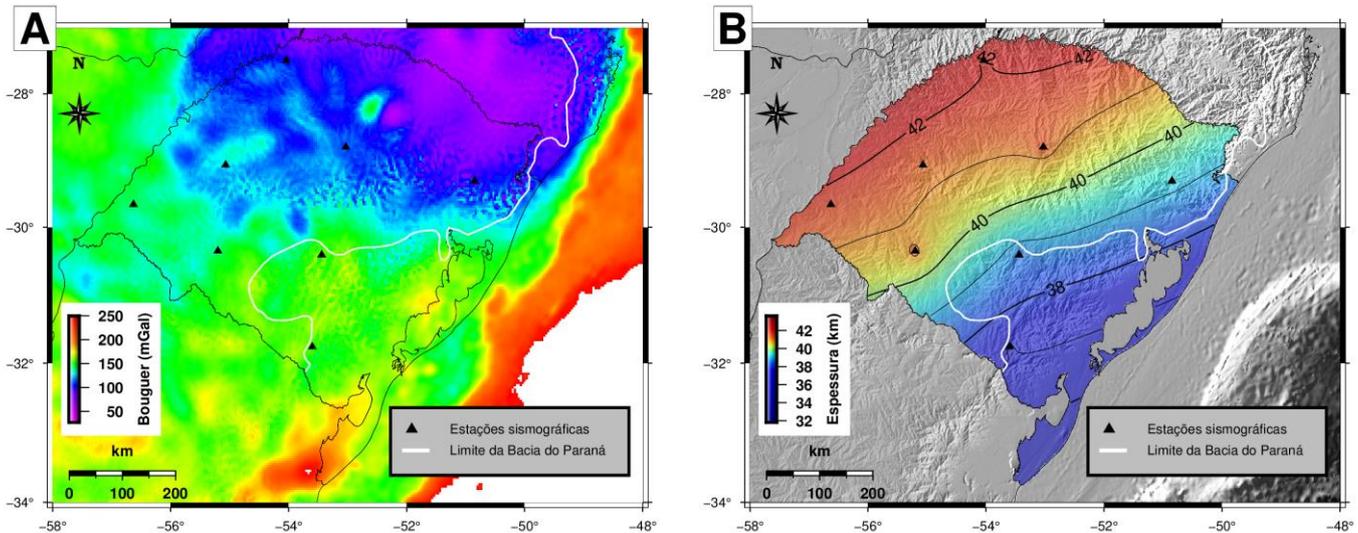
É possível observar uma estrutura de direção NW-SE referente aos valores de espessura crustal que está relacionada ao Arco de Rio Grande, que é uma das principais estruturas geológicas contidas no estado do Rio Grande do Sul, responsável pelo soerguimento das unidades do ESRg e Bacia do Paraná, o que explica os valores de espessura crustal baixos para a região influenciada pelo Arco de Rio Grande.

8.3 Integração dos dados sismológicos e dados gravimétricos

Comparando o mapa gravimétrico de anomalia Bouguer contido na figura 6, com o mapa de espessura crustal da figura 35, pode-se notar que existe uma correlação entre os valores de espessura crustal obtidos com os valores da anomalia Bouguer.

No geral o limite entre a Bacia do Paraná com o Escudo Sul-Rio-Grandense é bem demarcado pelo mapa de anomalia Bouguer, onde o mesmo apresenta valores mais baixos para região da Bacia do Paraná, sendo esta variação de valores estando na ordem de 150 mGal para a região do ESRg e menos de 50 mGal para a região da Bacia do Paraná (Figura 36).

Figura 36 – Em A) mapa da anomalia Bouguer e em B) mapa de espessura crustal.



Fonte: Autor, 2019.

Para a integração dos dados foi gerado um perfil de 530 km de extensão de direção S-N onde foram analisadas as variáveis topografia, espessura crustal e anomalia Bouguer o que possibilita uma melhor compreensão da relação entre essas três variáveis (Figura 37).

Analisando a figura 37 observa-se que o perfil foi posicionado de forma a cruzar o limite entre a Bacia do Paraná e ESRg, atravessar a região onde ocorre a variação de valores nas variáveis analisadas e que houvesse um alinhamento de estações sismográficas, para uma melhor confiabilidade dos dados.

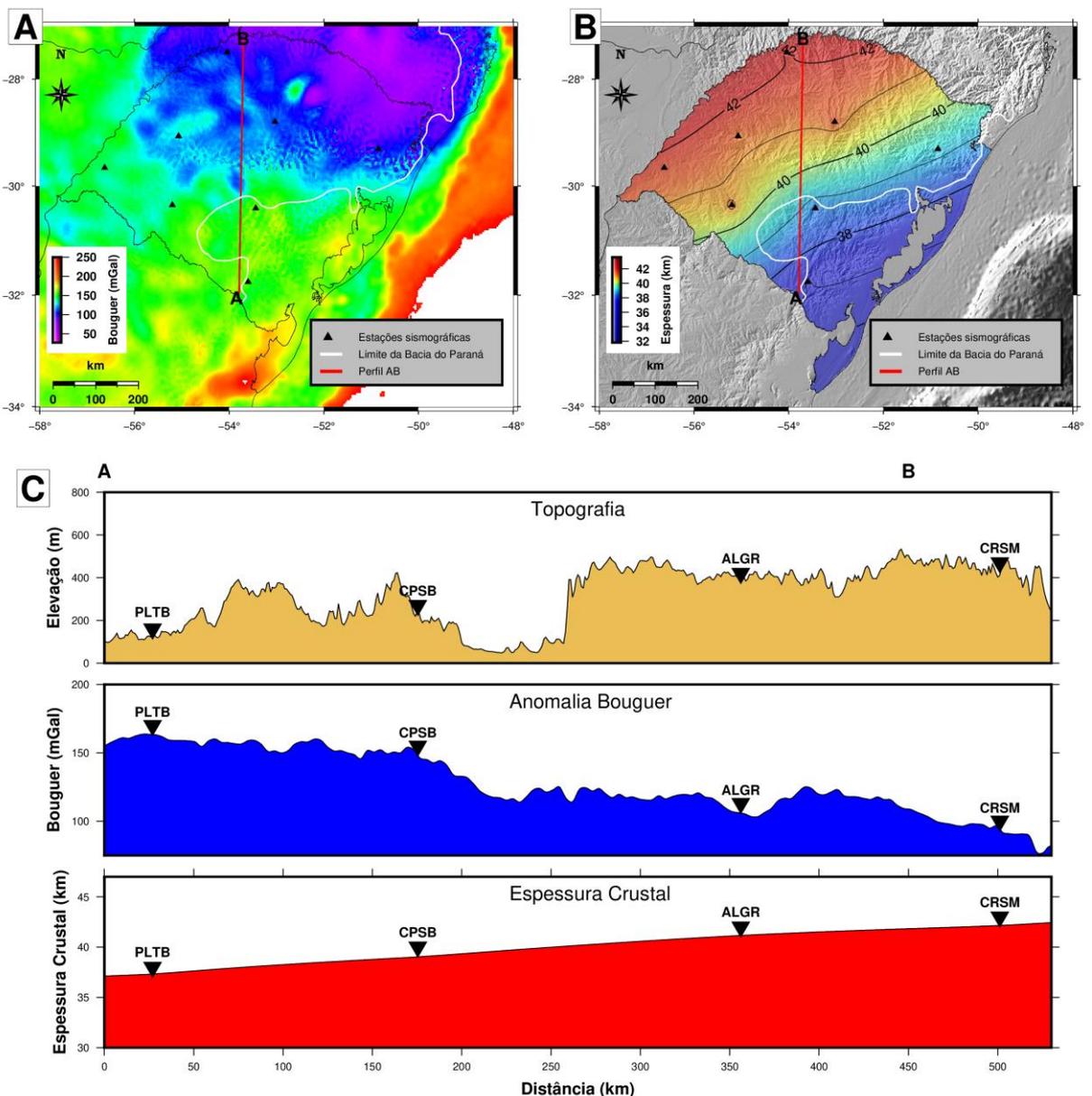
A variação mais significativa de valores ocorre na região do limite entre a Bacia do Paraná e o ESRg. Nessa região, os valores de topografia apresentam uma variação abrupta, passando de menos de 200 m de altitude para aproximadamente 500 m. Na mesma região a anomalia Bouguer sofre uma diminuição, que é ocasionada pelo aumento nos valores de topografia e um acréscimo nos valores de espessura crustal.

No geral observa-se que regiões de altos topográficos e crosta espessa estão correlacionadas com valores baixos da anomalia Bouguer para o perfil AB.

A característica de existir uma variação entre os valores relacionados a anomalia Bouguer para as regiões do ESRg e Bacia do Paraná, pode ser devida a efeitos intracrustais como, por exemplo, uma variação lateral de densidade da

crosta, porém, esta característica está mais diretamente relacionada a uma mudança significativa na profundidade da descontinuidade de Moho. Tal efeito pode ser explicado pelo fato de que em regiões onde existe uma crosta espessa, a mesma está tomando espaço do manto que é composto de um material mais denso em relação ao material que compõem a crosta, desta forma o valor da anomalia Bouguer será menor para estas regiões, o que explica o porquê de todos os altos rochosos do planeta apresentarem um baixo em relação a anomalia Bouguer.

Figura 37 – Em A) mapa gravimétrico da anomalia Bouguer com a localização do perfil AB, em B) mapa da espessura crustal do Rio Grande do Sul com a localização do perfil AB e em C) os gráficos de topografia, anomalia Bouguer e espessura crustal.



Fonte: Autor, 2019.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do processamento dos dados sismológicos pelo método Função do Receptor, foi possível obter informações importantes relacionadas a estrutura crustal para a região do estado do Rio Grande do Sul, essas informações poderão contribuir para trabalhos futuros correlacionados a estrutura crustal realizados no estado.

Os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s obtidos se apresentam de forma satisfatória, uma vez que trabalhos anteriores realizados na mesma área por outros autores resultaram em valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho.

Os valores obtidos para a profundidade da descontinuidade de Moho variam entre 36,6 km a 42 km para todo o estado, onde foi possível observar que valores próximos ou acima de 40 km estão associados a região da Bacia do Paraná e valores menores que estes para a região do ESRg.

Para a região do Escudo Sul-Rio-Grandense se observa uma faixa de crosta mais fina que corrobora com a localização do Arco de Rio Grande, estrutura responsável pelo soerguimento da crosta, fato que poderia explicar a diferença dos valores de espessura crustal entre o ESRg e a Bacia do Paraná.

A partir da integração dos dados sismológicos aos dados gravimétricos e topográficos foi possível observar que existe uma correlação entre essas variáveis. No geral se observa que em regiões com altos topográficos e crosta espessa existe um baixo da anomalia Bouguer para a região do Rio Grande do Sul, sendo que a variação na profundidade da Moho tem uma contribuição maior para este efeito.

Para um melhor entendimento do comportamento da estrutura da descontinuidade de Moho para o estado do Rio Grande do Sul, é necessário a instalação de novas estações sismográficas o que possibilitará um aumento no detalhe dos resultados e a possibilidade da geração de modelos tridimensional para uma melhor compreensão e visualização dessa estrutura. E além disso, a integração de dados sismológicos com dados sísmicos e gravimétricos são extremamente importantes para o conhecimento da estrutura da crosta de uma região, logo, recomenda-se a geração de perfis sísmicos de refração no estado, para que os mesmos sejam utilizados juntamente aos dados gravimétricos e sismológicos.

10 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M et al. **Províncias estruturais brasileiras**. Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande SBG, v. 8, p. 363–391, 1977.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B. **The upper precambrian of South america**. Boletim IG, v. 7, p. 45–80, 1976.

AMMON C.J. 1997. **An overview of receiver-function analysis**, obtido via internet: < <http://www.essc.psu.edu/~ammon/HTML/RftnDocs/rftn01.html>> Acessado em: 06/05/2019.

ASSUMPÇÃO, M. et al. **Crustal thickness map of brazil: Data compilation and main features**. Journal of South American Earth Sciences, Elsevier, v. 43, p. 74–85, 2013.

BABINSKI, Marly et al. **Juvenile accretion at 750–700 Ma in southern Brazil**. *Geology*, v. 24, n. 5, p. 439-442, 1996.

BIANCHI, M.B. **Um estudo do empilhamento da Função Receptor para a determinação da razão V_p/V_s na crosta**. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil., 2003.

Centro de Sismologia do IAG-USP < <http://moho.iag.usp.br/mda/> > Acessado em 24/04/2019

CHEMALE, F. J. **Evolução geológica do escudo sul-rio-grandense**. Geologia do Rio Grande do Sul, CIGO/UFRGS Porto Alegre, p. 13–52, 2000.

CLAYTON, R.W.; WIGGINS, R. A. **Source shape estimation and deconvolution of teleseismic bodywaves**. Geophysical Journal International, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 47, n. 1, p. 151–177, 1976.

CONSULATIVE GROUP FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH – CONSORTIUM FOR SPACIAL INFORMATION. *SRTM 90 m Digital Elevation Database*. versão 4.1. **Modelo Digital de Elevação**. 2004. Disponível em: <<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>>. Acesso em: 28/04/2019.

FOWLER, C. M. R. **The solid earth: an introduction to global geophysics**. [S.l.]: Cambridge University Press, p. 472, 1990.

FRANÇA G.S.L.A. **Estrutura da crosta no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, usando função do receptor**. Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, p. 163, 2003.

FÚLFARO, V. J. et al. **Compartimentação e evolução tectônica da bacia do Paraná**. In: Geologia da bacia do Paraná: reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. São Paulo: Consórcio PAULIPETRO/CESP/IPT, p. 75-115, 1982.

HARTMANN, L.A.; CHEMALE, Jr., F.; PHILIPP, R.P. 2007 **Evolução geotectônica do rio grande do Sul no pré-cambriano**. Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.), v. 50, p. 97–123, 2007.

Internacional Gravimetric Bureau < <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012> > Acessado em 15/05/2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão política do Brasil. **Base de dados georreferenciada**. 2006. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 28/04/2019.

LIMA, J. N. **Aplicação do método de função do receptor para determinação da estrutura da crosta e manto superior sob a região sul do Brasil**. Universidade Federal do Pampa, 2016.

LANGSTON, C. A. **Structure under mount rainier, washington, inferred from teleseismic body waves**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Wiley Online Library, v. 84, n. B9, p.4749–4762, 1979.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental**. Tese (Doutorado) —Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 1997.

MILANI, E. J.; FILHO, A. T. **Sedimentary basins of south america. Tectonic Evolution of South America**, In-Fólio Produção Editorial, Rio de Janeiro, Brasil, v. 31, p. 389–449, 2000.

MOREIRA. L. D. **Aplicação da função receptor de alta frequência em estações sismográficas da região sul do Brasil**. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2013.

NARDI, L.V.S. & Harmann, L. A. **O complexo Santa Maria Chico do Escudo Sul-rio-grandense**. Acta Geológica Leopoldensia, v. 3, n. 6, 1979.

PAVÃO, C. G. **Estudo de discontinuidades crustais na província borborema usando a função do receptor**. M. Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SHEARER, P. M. **Introduction to Seismology**. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.

SOLIANI Jr., E. **Os dados geocronológicos do escudo sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. São Paulo. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

STEIN, S.; WYSESSION, M. **An introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure**. [S.l.]: Blackwell Publishing, p. 498, 2003.

TRINDADE, C., R. **Espessura crustal e Razão de Poisson do Brasil Central: uma aproximação por função do receptor**. 2014. 90 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas), Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TOMAZELLI, L. et al. **Sistemas deposicionais e evolução geológica da planície costeira do Rio Grande do Sul: Uma síntese**. Iannuzzi R, Frantz JC (eds), v. 50, 2007.

WILDNER, W. **Associação vulcano-plutônica taquarembó: magmatismo alcalino básico-ácido cambriano do escudo sul-rio-grandense**. Porto Alegre. 175p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (Coords.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobras, p. 135- 168, 1990.

ZANDT, G.; AMMON, C. J. **Continental crust composition constrained by measurements of crustal poisson's ratio**. Nature, Nature Publishing Group, v. 374, n. 6518, p. 152, 1995.

ZHU, L; KANAMORI, H. **Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 105, n. B2, p. 2969-2980, 2000.