

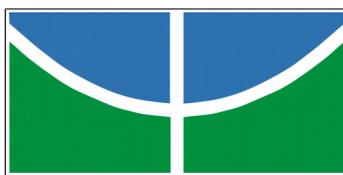
**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas**

Dissertação de Mestrado Nº 110

**ESTUDOS CRUSTAIS NAS REGIÕES NORTE E CENTRO-OESTE
DO BRASIL**

DIOGO FARRAPO ALBUQUERQUE

BRASÍLIA-DF, 2017.



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas**

DIOGO FARRAPO ALBUQUERQUE

**ESTUDOS CRUSTAIS NAS REGIÕES NORTE E CENTRO-OESTE
DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas.

Orientador

Prof. Dr. George Sand Leão Araújo de França
Universidade de Brasília

Coorientador

Prof. Dr. Lucas Paes Moreira
Instituto Federal de Brasília

**BRASÍLIA-DF
2017**

DIOGO FARRAPO ALBUQUERQUE

**ESTUDOS CRUSTAIS NAS REGIÕES NORTE E CENTRO-OESTE
DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas.

Aprovado em 20 de fevereiro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Sand Leão Araújo de França
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Cesar Garcia Pavão
Universidade Tiradentes

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FD591e Farrapo Albuquerque, Diogo
Estudos Crustais nas regiões Norte e Centro-Oeste
do Brasil / Diogo Farrapo Albuquerque; orientador
George Sand Leão Araújo de França; co-orientador
Lucas Paes Moreira. -- Brasília, 2017.
89 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2017.

1. Função do Receptor. 2. Espessura crustal. 3.
Razão Vp/Vs. 4. Cráton Amazônico. 5. Regiões Norte e
Centro-Oeste. I. Sand Leão Araújo de França, George,
orient. II. Paes Moreira, Lucas, co-orient. III.
Título.

*“Em algum lugar, alguma coisa incrível
está esperando para ser conhecida.”*

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José e Edna, e à minha noiva, Karla, por terem me ajudado a enfrentar muitas das dificuldades da vida.

Ao meu amigo de longa data e orientador, George Sand Leão Araújo de França, pela paciência e auxílio para a construção deste trabalho.

Ao meu amigo e coorientador, Lucas Paes Moreira, pelas críticas e sugestões de grande valor para o andamento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento do Projeto de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (MCTI/CNPq/Universal 14/2014 – Faixa C, Processo 456560/2014-9).

Ao Observatório Sismológico de Brasília, por ter fornecido os equipamentos e a estrutura física necessária para a conclusão deste projeto.

Aos professores Marcelo Assumpção e Marcelo Bianchi, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), por fornecerem valiosas informações a este estudo.

Aos amigos e companheiros de pesquisa Cristobal Condori Quispe, Magda Estrela, Umberto Travaglia e Paulo Araújo.

À equipe técnica do Observatório Sismológico de Brasília, em especial a Fernando Paiva, pelo auxílio na solução dos problemas computacionais relativos à pesquisa.

A todos os professores do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, em especial, a Marcelo Peres Rocha e Lucas Vieira Barros.

E, finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, participaram deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

Estudos crustais nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil

RESUMO

O estudo da crosta utilizando a Função do Receptor pode fornecer valiosas informações geológicas, como composição crustal média, dinâmica de formação e evolução tectônica de uma região, além de servir como referência inicial para a geração de modelos de velocidade das ondas sísmicas a fim de melhorar a localização de terremotos. Com o objetivo de preencher as lacunas de informação crustal das regiões Norte e Centro-Oeste, foram aplicados os métodos da Função do Receptor e do empilhamento H-k para estimar a espessura da crosta e a razão V_P/V_S a partir de dados sismológicos. Os resultados indicam que crosta da região de estudo é, predominantemente, félsica, com V_P/V_S em torno de 1,72, e espessura média de 38,7 km, variando de 27,4 a 55,3 km. A interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal tornou possível a delimitação do Cráton Amazônico, que corresponde à área com espessura média igual ou maior que 39 km. Além disso, foi possível identificar seus possíveis blocos cratônicos, assim como o da Bacia do Paraná, conhecido como Bloco Paranapanema. A geometria do cráton, definida por sua espessura crustal, é corroborada pela distribuição da sismicidade natural que acompanha suas bordas. Estas, por sua vez, estão relacionadas à zona de sutura entre os paleocontinentes Amazônico, São Francisco/Congo e Paranapanema. Já as bacias sedimentares que passaram por algum processo de estiramento possuem crosta mais fina, geralmente inferior a 37 km. Devido à grande variabilidade dos resultados, não foi possível estipular um valor característico de espessura crustal ou razão V_P/V_S quando se considera o contexto das províncias estruturais.

Palavras-chave: Função do Receptor. Espessura crustal. Razão V_P/V_S . Cráton Amazônico. Regiões Norte e Centro-Oeste.

Crustal studies in the North and Central-West regions of Brazil

ABSTRACT

The study of the crust using Receiver Functions can provide valuable geological information, such as average crustal composition, formation dynamics and tectonic evolution of a region, as well as serve as an initial reference for the generation of seismic wave velocity models in order to improve earthquakes location. In order to fill in the crustal information gaps in the North and Central-West regions, the Receiver Function and H-k stacking methods were used to estimate the crustal thickness and the V_P/V_S ratio from seismic data. The results indicate that the crust of the study region is predominantly felsic, with V_P/V_S around 1.72 and an average thickness of 38.7 km, ranging from 27.4 to 55.3 km. The interpolation by minimum curvature of the crustal thickness values made possible the delimitation of the Amazon Craton, which corresponds to the area with a average thickness equal to or greater than 39 km. In addition, it was possible to identify its possible cratonic blocks, as well as that of the Paraná Basin, known as the Paranapanema Block. The geometry of the craton, defined by its crustal thickness, is corroborated by the distribution of the natural seismicity that accompanies its edges. These, in turn, are related to the suture zone between the Amazonian, São Francisco/Congo and Paranapanema paleocontinents. The sedimentary basins that undergo some stretching process have a thinner crust, usually less than 37 km. Due to the great variability of the results, it was not possible to stipulate a characteristic value of crustal thickness or V_P/V_S ratio when considering the context of the structural provinces.

Keywords: Receiver Function. Crustal thickness. V_P/V_S ratio. Amazon Craton. North and Center-West regions.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo..... | 2 |
| 1.2 Escolha dos métodos..... | 2 |
| 1.3 Localização das estações sismográficas..... | 3 |
| 2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO..... | 6 |
| 2.1 Cráton Amazônico..... | 8 |
| 2.2 Província Amazonas..... | 9 |
| 2.3 Província Tocantins..... | 10 |
| 2.4 Bacia dos Parecis..... | 10 |
| 2.5 Bacia do Paraná..... | 11 |
| 2.6 Bacia do Parnaíba..... | 11 |
| 3. ESTUDOS DE ESTRUTURA CRUSTAL NO BRASIL..... | 12 |
| 4. MÉTODOS..... | 16 |
| 4.1 Estrutura interna da Terra..... | 16 |
| 4.2 Função do Receptor..... | 17 |
| 4.3 Empilhamento H-k..... | 21 |
| 5. PROCESSAMENTO..... | 25 |
| 6. RESULTADOS..... | 30 |
| 6.1 Províncias estruturais..... | 31 |
| Cráton Amazônico..... | 31 |
| Província Amazonas..... | 33 |
| Bacia dos Parecis..... | 34 |
| Bacia do Paraná..... | 35 |
| Bacia do Parnaíba..... | 35 |
| Província Tocantins..... | 36 |
| 6.2 Variação de espessura crustal e implicações geológicas..... | 37 |
| 6.3 Comparação entre modelos crustais..... | 45 |
| 6.4 Sismicidade e espessura crustal..... | 47 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 50 |

| | |
|--|----------|
| | v |
| REFERÊNCIAS..... | 52 |
| ANEXO A – Resultados de Função do Receptor radial e do empilhamento H-k..... | 62 |
| ANEXO B – Banco de dados de espessura crustal e razão V_P/V_S | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização das estações com a indicação das redes e instituições a que pertencem: Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq) e Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná, da Universidade de São Paulo (PCPB-USP).....5
- Figura 2 – Localização das estações sismográficas no contexto das províncias estruturais (ALMEIDA *et al.*, 2000). As siglas representam as províncias estruturais: Província Amazonas (PrAm), Cráton Amazônico (CrAm), Bacia dos Parecis (BcPr), Província Tocantins (PrTo), Cráton São Francisco (CrSF), Bacia do Parnaíba (BcPb) e Bacia do Paraná (BcPn).....7
- Figura 3 – Cráton Amazônico e suas províncias geocronológicas (SANTOS, 2004)...8
- Figura 4 – Mapa com a localização das estações e dos pontos de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos a partir da pesquisa bibliográfica. A elipse vermelha, a seta amarela e a linha tracejada em vermelho indicam as hipóteses levantadas por Krüger *et al.* (2002), por Rosa *et al.* (2015) e por Assumpção *et al.* (2013), respectivamente. As siglas representam as províncias estruturais: Província Amazonas (PrAm), Cráton Amazônico (CrAm), Bacia dos Parecis (BcPr), Província Tocantins (PrTo), Cráton São Francisco (CrSF), Bacia do Parnaíba (BcPb) e Bacia do Paraná (BcPn).....13
- Figura 5 – a) Médias e variações dos valores de espessura crustal (H) e de V_P/V_S . b) Distribuição de frequência dos valores de espessura crustal. c) Distribuição de frequência dos valores de V_P/V_S14
- Figura 6 – Variação de densidade do meio e de velocidade das ondas P e S em função da profundidade, de acordo com o Modelo Terrestre de Referência Preliminar (PREM - *Preliminary Reference Earth Model*), elaborado por Dziewonski e Anderson (1981).....16
- Figura 7 – Diagrama de raios simplificado que ilustra o princípio físico da Função do Receptor (FR), com a indicação das fases convertidas e reverberadas, para o caso de um meio com uma camada de espessura H e um semiespaço. Dentro do

- retângulo cinza, é mostrado um traço de FR radial com a indicação das fases P direta, Ps e múltiplas. Fonte: AMMON (1991), com alterações.....18
- Figura 8 – Gráfico de espessura crustal (H) versus razão V_P/V_S (k), para um determinado conjunto de valores, que ilustra o método H-k (ZHU e KANAMORI, 2000). O ponto preto é a interseção entre as curvas das fases Ps, PpPms e PpSms+PsPms, que informa o valor aproximado de H e k.....23
- Figura 9 – Mapa com a localização dos telessismos utilizados para aplicar o método da Função do Receptor. Os círculos representam os epicentros, com seu tamanho proporcional à magnitude, e as cores informam sua profundidade relativa (hipocentro).....26
- Figura 10 – a) Janela do programa *Geotool* com as polaridades da fase P nas três componentes do sismograma para a estação BOAV. b) Mapa gerado pelo programa, com a indicação da localização (cruz preta) e azimute (linha preta) do evento e o azimute estimado de acordo com o movimento de partícula (linha verde). c) Movimento de partícula da onda P para o plano radial e ortogonal. Para este caso, a diferença entre o azimute real e o medido foi de, aproximadamente, 172°29
- Figura 11 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação PTLB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S32
- Figura 12 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação ITTB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S33
- Figura 13 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação VILB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta,

Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S34

Figura 14 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação SMTB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S36

Figura 15 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação ARAG, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S37

Figura 16 – a) Mapa de interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos na literatura (100 pontos). b) Mapa de interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos neste trabalho (46 pontos). A linha tracejada em preto indica os limites aproximados do Cráton Amazônico, definidos de acordo com as fronteiras das províncias estruturais. Os números representam os locais que serão objeto de discussão. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).....39

Figura 17 – Mapa com a interpolação de espessura crustal combinando os valores obtidos na literatura com os deste trabalho (total de 146 pontos). As linhas tracejadas em azul representam os perfis AB, CD e EF, que serão mostrados na figura 18. A linha tracejada em preto indica os novos limites do Cráton Amazônico, definidos em termos de espessura crustal, e os números, os locais que serão objeto de discussão. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província

Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).....41

Figura 18 – Variação topográfica e de espessura crustal (H) ao longo das linhas AB, CD e EF da figura 17. A variação de H foi obtida a partir da interpolação de três conjuntos de pontos: das referências (figura 16a), dos obtidos neste trabalho (figura 16b) e a combinação dos dois (figura 17). Os triângulos representam as estações sismográficas das referências (em azul) e as que forneceram os dados processados neste estudo (em vermelho). No perfil AB, as linhas verticais tracejadas indicam os limites entre as bacias sedimentares que compõem a Província Amazonas. No perfil EF, a linha tracejada vertical indica o limite entre a Província Amazonas e o Cráton Amazônico.....42

Figura 19 – Mapa com a interpolação de espessura crustal (H) combinando os valores obtidos na literatura com os deste trabalho para as províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (SANTOS, 2004): Carajás (Crjz), Amazônia Central (AmCt), Transamazonas (TrAm), Tapajós-Parima (TaPa), Rio Negro (RiNg), Rondônia-Juruena (RoJu) e Sunsás (Suns).....44

Figura 20 – a) Interpolação por mínima curvatura do modelo CRUST 1.0. b) Interpolação por mínima curvatura do modelo GEMMA 1.0. c) Interpolação por mínima curvatura com dados da literatura. d) Interpolação por mínima curvatura dos dados da literatura e obtidos neste trabalho. As siglas representam as províncias estruturais brasileiras: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).....46

Figura 21 – Mapa com a interpolação dos dados obtidos neste trabalho e na literatura. Os círculos vermelhos representam sismos ocorridos entre 1950 e 2016. A linha tracejada em preto indica os limites crustais do Cráton Amazônico. A faixa escurecida indica a zona de sutura entre o cráton e as demais províncias. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).....48

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações NPGB, PRPB, PTLB, BOAV, CZSB, ETMB, IPMB e ITTB..... | 63 |
| Figura 23 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações MACA, MALB, MCPB, TBTG, PDRB, VILB, PAR1 e PAR2..... | 64 |
| Figura 24 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações PAR3, PAR5, PAR6, SFA1, ARAG, PEXB, SALV e SNDB..... | 65 |
| Figura 25 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações CAN1, CAN3, SSV2, MR07, LAJE, TUC4, TMAB e SMTB..... | 66 |
| Figura 26 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações PAL1 e PAL2..... | 67 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Informações das estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR)..... | 3 |
| Tabela 2 – Informações das estações do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB)..... | 4 |
| Tabela 3 – Informações das estações da Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq)..... | 4 |
| Tabela 4 – Informações das estações da Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná (PCPB) da Universidade de São Paulo (USP)..... | 4 |
| Tabela 5 – Quantidade de pontos de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S para cada província estrutural..... | 12 |
| Tabela 6 – Período de dados utilizados e tipo de estação da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR)..... | 27 |
| Tabela 7 – Período de dados utilizados e tipos de estação do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB)..... | 27 |
| Tabela 8 – Período de dados utilizados e tipo de estação da Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq)..... | 28 |
| Tabela 9 – Resultados de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S para cada província estrutural..... | 30 |
| Tabela 10 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para o Cráton Amazônico..... | 69 |
| Tabela 11 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia do Paraná..... | 69 |
| Tabela 12 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Província Amazonas..... | 70 |
| Tabela 13 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia do Parnaíba..... | 70 |
| Tabela 14 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Província Tocantins..... | 71 |

Tabela 15 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para o Cráton São Francisco.....72

Tabela 16 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia dos Parecis.....72

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos de estrutura da crosta e da litosfera utilizando a Função do Receptor no Brasil, começaram em 1993, com o projeto “Estudos Sísmicos da Litosfera Continental no Sudeste do Brasil” (JAMES *et al.*, 1993), um trabalho de cooperação entre a Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto Carnegie de Washington, Estados Unidos. Desde então, muitos trabalhos desse tipo foram realizados, mas se concentraram no Nordeste, Sudeste e parte do Centro-Oeste, regiões que, historicamente, possuem uma maior densidade de estações sísmográficas.

Esse cenário começou a mudar a partir de 2013, quando o número de estações cresceu substancialmente devido à implementação da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), projeto financiado pela Petrobras. Atualmente, esta rede possui 86 estações e, deste total, aproximadamente 20 localizam-se nas regiões Norte e Centro-Oeste, que passaram a ter um monitoramento sísmográfico em tempo real, com dados disponibilizados livremente à comunidade científica.

A motivação deste trabalho surgiu da necessidade de preencher lacunas a respeito das variações de espessura crustal e de razão V_P/V_S das regiões Norte e Centro-Oeste, pois tais parâmetros podem fornecer informações importantes como composição crustal média, dinâmica de formação e evolução tectônica, além de servir como referência inicial para a geração de modelos de velocidade de propagação das ondas sísmicas a fim de melhorar a localização de terremotos.

Serão apresentados os resultados de espessura crustal e razão V_P/V_S , obtidos no âmbito desta pesquisa, do Cráton Amazonas e demais províncias que compõem a geologia das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil. Para isso, foram aplicados os métodos da Função do Receptor (LIGORRÍA e AMMON, 1999) e do empilhamento H-k (ZHU e KANAMORI, 2000) aos dados de 35 estações sísmográficas, das quais 20 fazem parte da RSBR, 9 pertencem ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB) e 6 são do projeto “Estudos Tectônicos sobre a Bacia dos Parecis”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), vinculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

Com a cortesia dos professores Marcelo Assumpção e Marcelo Bianchi, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), foram utilizados os resultados de espessura crustal e razão V_P/V_S de outras 12 estações sismográficas temporárias do projeto “Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná (PCPB)”, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é obter valores de espessura crustal e razão V_P/V_S , utilizando o método da Função do Receptor (LIGORRÍA e AMMON, 1999), para verificar se há correlação dos resultados com as atuais teorias de formação geotectônica do território nacional, mais especificamente das províncias estruturais localizadas nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil.

1.2 Escolha dos métodos

Os métodos da Função do Receptor (LIGORRÍA e AMMON, 1999) e do empilhamento H-k (ZHU e KANAMORI, 2000) foram escolhidos pelas seguintes razões:

- A Função do Receptor é sensível à variação de velocidade entre a crosta e o manto (descontinuidade de Mohorovičić), gerando fases convertidas e reverberadas que podem ser identificadas para estimar a espessura da crosta e a razão V_P/V_S .
- O empilhamento H-k gera estimativas confiáveis de espessura da crosta e de razão V_P/V_S sem a necessidade de identificar o tempo de chegada das fases de interesse, tornando possível que uma grande quantidade de traços de FR seja processada automaticamente.
- Todos os programas são de código aberto e disponibilizados gratuitamente para a comunidade científica.

1.3 Localização das estações sismográficas

Foram processados os dados de 35 estações sismográficas (tabelas de 1 a 3), distribuídas em 4 redes pelas regiões Norte e Centro-Oeste (figura 1). Desse total, 20 pertencem à Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), 9 ao Observatório Sismológico (SIS) da Universidade de Brasília (UnB) e 6 à Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-MCTI/CNPq).

Os dados de outras 12 estações temporárias (tabela 4), pertencentes à Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná (PCPB), foram processados pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP).

Tabela 1 – Informações das estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR).

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | Cidade/Estado |
|---------|--------------|---------------|--------------|-----------------------------|
| SMTB | -8,8617 | -47,5886 | 292 | Santa Maria do Tocantins/TO |
| SALV | -15,9012 | -55,6936 | 213 | Santo Antônio Leverger/MT |
| IPMB | -17,9830 | -48,2117 | 706 | Ipameri/GO |
| PDRB | -11,6123 | -56,7296 | 330 | Porto dos Gaúchos/MT |
| ARAG | -15,7060 | -51,8121 | 237 | Araguaiana/MT |
| PTLB | -15,4487 | -59,1368 | 72 | Pontes e Lacerda/MT |
| VILB | -12,9528 | -60,2002 | 434 | Vilhena/RO |
| MACA | -3,1615 | -60,6838 | 75 | Manacapuru/AM |
| MALB | -1,8529 | -54,2649 | 27 | Monte Alegre/PA |
| NPGB | -7,0454 | -55,3579 | 0 | Novo Progresso/PA |
| ITTB | -4,3672 | -55,7343 | 118 | Itaituba/PA |
| PRPB | -6,1724 | -49,8150 | 265 | Parauapebas/PA |
| CZSB | -7,7299 | -72,7049 | 196 | Cruzeiro do Sul/AC |
| ETMB | -9,8168 | -66,2137 | 118 | Porto Velho/RO |
| MCPB | -0,3602 | -52,0567 | 127 | Macapá/AP |
| TMAB | -2,3704 | -48,0957 | 26 | Tomé-Açu/PA |
| TBTG | -4,1868 | -69,9090 | 91 | Tabatinga/AM |
| SNDB | -11,9742 | -51,2943 | 252 | Serra Nova Dourada/MT |
| BOAV | 2,3953 | -60,5225 | 114 | Boa Vista/RR |
| PEXB | -12,1056 | -48,3006 | 350 | Peixe/TO |

Tabela 2 – Informações das estações do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB).

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | Cidade/Estado |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------------------|
| LAJE | -9,9816 | -48,3185 | 294 | Lajeado/TO |
| SFA1 | -17,9707 | -47,7017 | 829 | Catalão/GO |
| TUC4 | -4,2514 | -49,5366 | 100 | Tucuruí/PA |
| CAN1 | -13,4175 | -48,0852 | 315 | Cavalcante/GO |
| CAN3 | -13,0830 | -48,2890 | 430 | Palmeirópolis/TO |
| SSV2 | -12,8507 | -48,2143 | 315 | Palmeirópolis/TO |
| MR07 | -13,7742 | -49,1623 | 376 | Estrela do Norte/GO |
| PAL1 | -6,6400 | -47,5640 | 320 | Palmeiras do Tocantins/TO |
| PAL2 | -6,7478 | -47,3274 | 300 | Estreito/MA |

Tabela 3 – Informações das estações da Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq).

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | Cidade/Estado |
|---------|--------------|---------------|--------------|----------------------|
| PAR1 | -11,5548 | -57,8661 | 314 | Juara/MT |
| PAR2 | -12,0982 | -58,3334 | 374 | Brasnorte/MT |
| PAR3 | -11,4656 | -58,7166 | 347 | Juína/MT |
| PAR4 | -11,5332 | -59,0580 | 352 | Juína/MT |
| PAR5 | -11,5819 | -57,3888 | 255 | Porto dos Gaúchos/MT |
| PAR6 | -11,5171 | -58,1693 | 260 | Brasnorte/MT |

Tabela 4 – Informações das estações da Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná (PCPB) da Universidade de São Paulo (USP).

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | Cidade/Estado |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------------------------|
| VBST | -14,5330 | -60,0153 | 235 | Vila Bela de Santíssima Trindade/MT |
| NBRS | -14,3224 | -55,7772 | 490 | Nobres/MT |
| PTET | -15,3795 | -57,1610 | 185 | Porto Estrela/MT |
| POCN | -16,6213 | -56,7343 | 116 | Poconé/MT |
| PANT | -18,9893 | -56,6168 | 271 | Corumbá/MT |
| BDQN | -20,4487 | -56,7497 | 180 | Bodoquena/MS |
| MURT | -21,6592 | -57,6100 | 123 | Porto Murtinho/MS |
| DVLD | -16,6373 | -52,1646 | 548 | Doverlândia/GO |
| RVDE | -19,0286 | -54,9389 | 470 | Rio Verde/MS |
| RPRD | -20,4808 | -53,7008 | 343 | Ribas do Rio Pardo/MS |
| ANTJ | -21,9999 | -56,0046 | 532 | Antônio João/MS |
| AMBA | -22,9269 | -54,9905 | 330 | Amambai/MS |

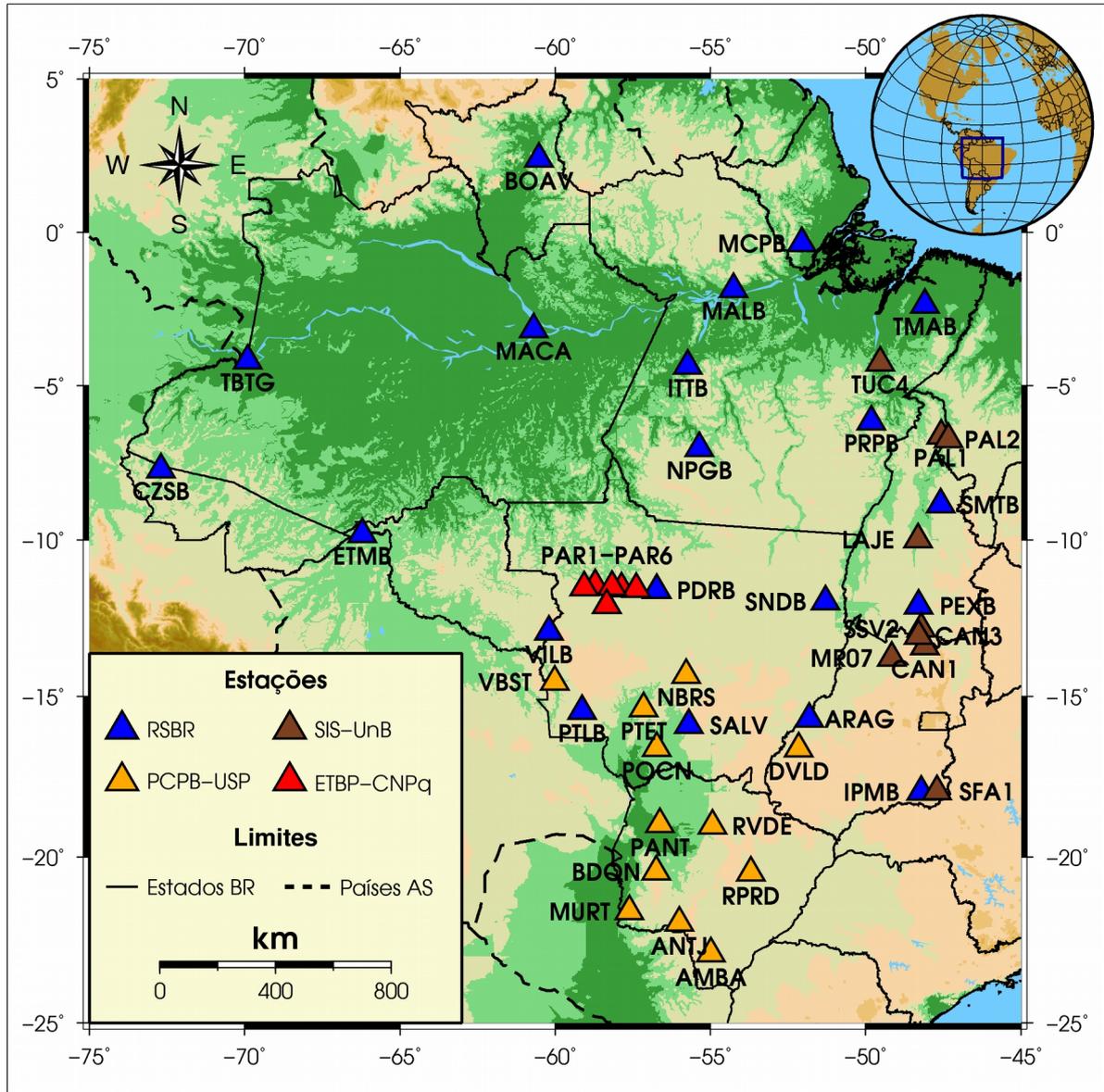


Figura 1 – Localização das estações com a indicação das redes e instituições a que pertencem: Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq) e Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná, da Universidade de São Paulo (PCPB-USP).

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO

O Brasil localiza-se no interior da Plataforma Sul-Americana, definida por Almeida *et al.* (2000) como a porção continental da crosta que permaneceu estável e relativamente não-deformada durante o último evento orogênico ocorrido nas eras Mesozoica e Cenozoica (orogênicas do Caribe e dos Andes).

O embasamento da plataforma Sul-Americana originou-se a partir do arranjo de blocos crustais arqueanos e proterozoicos durante três eventos orogênicos principais: (1) Transamazônico/Eburneano (Paleoproterozoico - 2,2 a 1,8 Ga), (2) Mesoproterozoico tardio (1,3 a 0,95 Ga) e (3) Brasileiro/Pan-Africano (0,9 a 0,5 Ga). Este último, por sua vez, é considerado o principal evento que deu origem ao padrão global de componentes tectônicos e pela formação do quadro estrutural na época em que a plataforma fazia parte do supercontinente Gondwana (ALMEIDA *et al.*, 2000).

As coberturas sedimentares são de idade fanerozoica (figura 3) e seu desenvolvimento iniciou-se no período Ordoviciano, testemunhando a evolução dos continentes Gondwana e Pangea (SCHOBENHAUS e BRITO NEVES, 2003).

Levando em consideração o contexto das províncias estruturais (ALMEIDA *et al.*, 2000), a geologia das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil (figura 2) é dominada pelo Cráton Amazônico, com as bacias que o têm como embasamento (Província Amazonas e Bacia dos Parecis), e pela Província Tocantins. Em menor proporção, as Bacias do Paraná e dos Parecis e o Cráton São Francisco completam a geologia dessa grande área que engloba dez estados e o Distrito Federal.

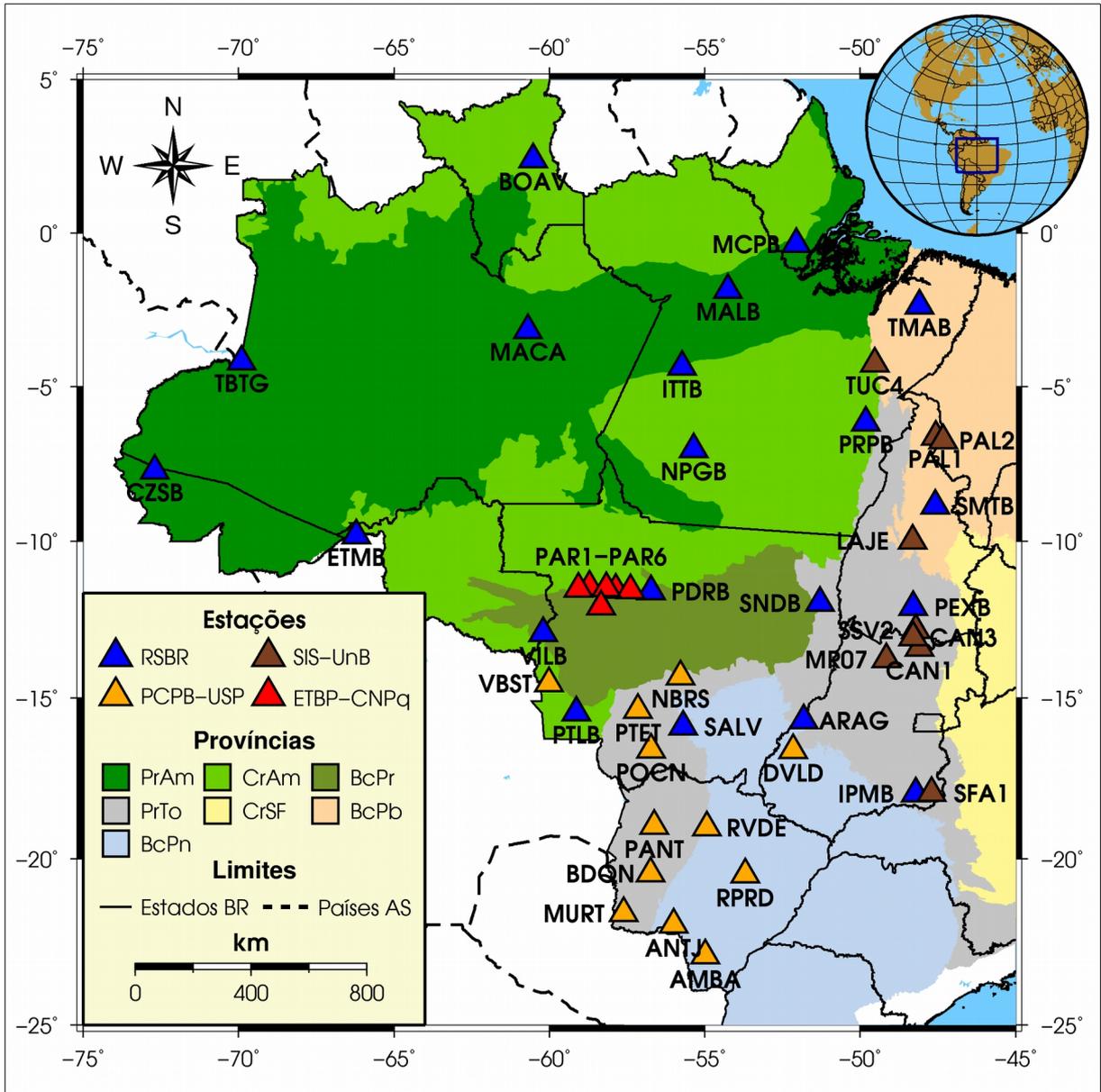


Figura 2 – Localização das estações sismográficas no contexto das províncias estruturais (ALMEIDA et al., 2000). As siglas representam as províncias estruturais: Província Amazonas (PrAm), Cráton Amazônico (CrAm), Bacia dos Parecis (BcPr), Província Tocantins (PrTo), Cráton São Francisco (CrSF), Bacia do Parnaíba (BcPb) e Bacia do Paraná (BcPn).

2.1 Cráton Amazônico

O Cráton Amazônico (figuras 2 e 3) é uma das maiores e menos estudadas regiões pré-cambrianas do mundo, possuindo cerca de 5.600.000 km², dos quais 4.400.000 km² estão em território brasileiro. Pimentel e Fuck (1992) delimitam-no pelos grupos Baixo Araguaia (a leste), Alto Paraguai, Cuiabá e Corumbá (ao sul e sudeste), constituídos por rochas formadas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (930 a 540 Ma).

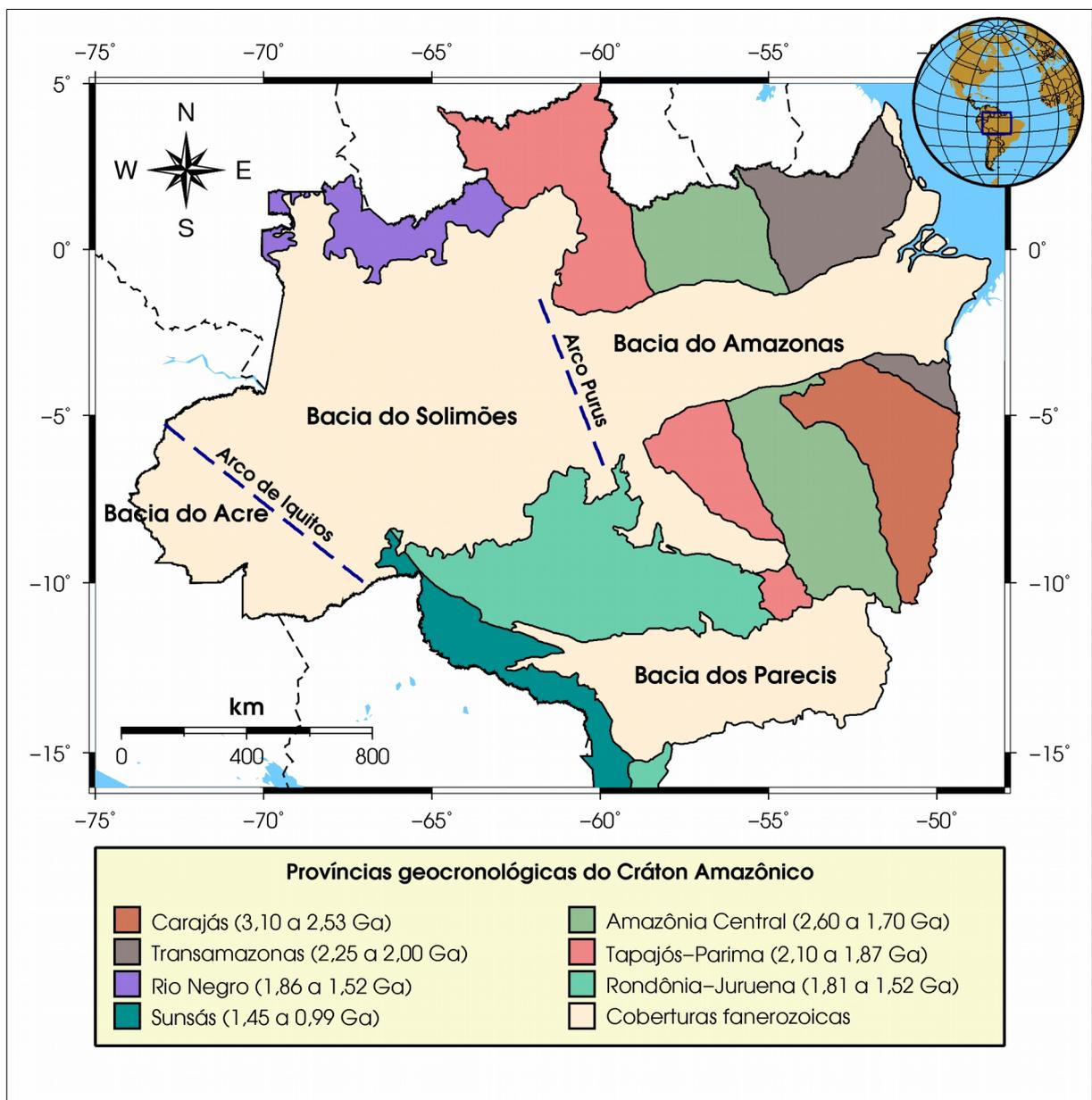


Figura 3 – Cráton Amazônico e suas províncias geocronológicas (SANTOS, 2004).

Dois modelos distintos compartimentam o cráton: o geofísico-estrutural e o geocronológico. O primeiro o considera a união de doze blocos ou paleoplacas arqueanas, com suas margens delimitadas por dezenove faixas colisionais ou de cisalhamento com a mesma idade dos blocos (HASUI *et al.*, 1984). O segundo considera dados geocronológicos, obtidos por datação de U-Pb (SANTOS, 2004), subdividindo o cráton em oito províncias tectônicas (figura 3): Carajás (3,10 a 2,53 Ga), Amazônia Central (2,60 a 1,70 Ga), Transamazonas (2,25 a 2,00 Ga), Tapajós-Parima (2,10 a 1,87 Ga), Rio Negro (1,86 a 1,52 Ga), Rondônia-Juruena (1,81 a 1,52 Ga) e Sunsás (1,45 a 0,99 Ga).

2.2 Província Amazonas

A Província Amazonas é formada por duas grandes bacias sedimentares, a do Solimões e a do Amazonas, e pela Bacia do Acre, menor e mais a oeste (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000). Tais bacias (figura 3) possuem como embasamento as rochas do Cráton Amazônico.

A Bacia do Amazonas (figura 3) possui cerca de 515.000 km² e seus limites são demarcados a oeste, pela Bacia do Solimões (Arco Purus), e a leste, pelo rifte mesozoico de Marajó. Sua origem está associada a processos de rifteamento, relacionados ao movimento de uma pluma mantélica iniciado no Cambriano Médio (507 Ma), e ao de sinéclise, iniciada desde a deposição da Formação Acari. O processo de formação da bacia foi pontuado por episódios de sedimentação, criando um aporte com até 5.000 m de espessura, e de orogenia (SANTOS *et al.*, 2003; CUNHA *et al.*, 2000).

A Bacia do Solimões possui cerca de 500.000 km² e suas fronteiras são demarcadas a leste, com a Bacia do Amazonas (Arco Purus), e a oeste, pela Bacia do Acre (Arco de Iquitos) (CUNHA *et al.*, 2007). O preenchimento da bacia consiste em pacotes sedimentares separados por discordâncias bem marcadas, formando seis supersequências: ordoviciana, siluro-devoniana, devoniano-carbonífera, carbonífero-permiana, cretácea e terciária (EIRAS *et al.*, 1994).

A Bacia do Acre faz parte da porção brasileira da Bacia Marañon-Ucayali-Acre, integrando o sistema de Bacias de Antepaís Retroarco da Cordilheira dos Andes, sendo a parte mais distal da cunha sedimentar, cuja idade compreende o intervalo do Cretáceo ao Plioceno. Seu aporte pode chegar a uma profundidade de 6.000 m (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000), sendo composto por quatro supersequências: carbonífero-permiana, jurássica, cretácea e terciária (FEIJÓ e SOUZA, 1994).

2.3 Província Tocantins

A Província Tocantins localiza-se na parte central do Brasil e sul do Cráton Amazônico (figura 2), é composta por um conjunto de orógenos brasileiros, caracterizados por cinturões de dobras e empurrões, gerados no ciclo orogênico Pan-Africano/Brasiliano (Neoproterozoico), a partir da convergência de três blocos continentais: o Cráton Amazônico (a oeste), o Cráton São Francisco (a leste), o Cráton Paranapanema (a sudoeste), encoberto pelas rochas da Bacia do Paraná (ALMEIDA *et al.*, 1981; UNRUG, 1996).

Segundo Fuck (1994), a Província Tocantins está compartimentada tectonicamente nas seguintes unidades: Zona Cratônica, Faixa Brasília, Maciço Goiás, Arco Magmático do oeste de Goiás e Faixa Paraguai-Araguaia.

2.4 Bacia dos Parecis

A Bacia dos Parecis, localizada no setor sul-sudeste do Cráton Amazônico, compreende uma área de aproximadamente 500.000 km². Sua origem data do período Ordoviciano, quando ocorreu um evento extensional que afetou o Cráton Amazônico, criando um ambiente de rifte continental.

O aporte da bacia pode alcançar uma espessura de até 6.000 m, composto por sedimentos paleozoicos, mesozoicos e cenozoicos, essencialmente siliciclásticos, incluindo rochas vulcânicas (derrames e diques) do Cretáceo (SIQUEIRA, 1989).

A partir de dados geofísicos, a Bacia dos Parecis foi subdividida, de oeste para leste, em três domínios tectonossedimentares: o extremo oeste, com uma

depressão conhecida como Fossa Tectônica de Rondônia; a região central, com um baixo gravimétrico; e o extremo leste, com uma bacia interior denominada de Alto Xingu (SCHOBENHAUS e CAMPOS, 1984; BAHIA *et al.*, 2007).

2.5 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar que inclui territórios do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área de cerca de 1.500.000 km², dos quais, aproximadamente, 1.050.000 km² em território brasileiro.

O processo de formação da bacia teve início no Ordoviciano, sendo interrompido no período Cretáceo, com a ocorrência de magmatismo toleítico de Serra Geral, considerado um dos maiores derrames basálticos ocorridos na história da Terra (ZALÁN *et al.*, 1990; FRANK *et al.*, 2009).

Seu embasamento é composto por rochas ígneas e metamórficas com idades entre o Proterozoico superior e Paleozoico inferior, que correspondem ao Ciclo Brasileiro (CORDANI *et al.*, 1984).

2.6 Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba possui, aproximadamente, 600.000 km² e seus limites são definidos a norte, pelo Arco Ferrer (Arco São Vicente Ferrer-Urbano Santos-Guamá); a leste, pela Falha de Tauá; a sudeste, pelo Lineamento Senador Pompeu; a oeste, pelo Lineamento Tocantins-Araguaia; e, a noroeste, pelo Arco Tocantins (GÓES, 1995).

De evolução policíclica e complexa, a Bacia do Parnaíba foi subdividida em quatro sítios deposicionais, com gênese, tectônica, sedimentação e idades distintas: Bacia do Grajaú, Bacia das Alpercatas, Bacia do Parnaíba, propriamente dita, e Bacia do Espigão-Mestre (GÓES, 1995).

O substrato é composto, basicamente, por rochas arqueanas, crátons sin-brasilianos e cinturões orogênicos brasilianos, em que se formaram estruturas grabeniformes no Mesoproterozoico, Neoproterozoico e no Fanerozoico (Cambro-ordoviciano).

3. ESTUDOS DE ESTRUTURA CRUSTAL NO BRASIL

França (2003) apresentou o primeiro mapa com a compilação de espessura crustal para a região Sudeste e parte do Centro-Oeste. Pavão *et al.* (2012) realizaram uma compilação de valores de espessura crustal e V_P/V_S obtidos com o método da Função do Receptor (FR) para o Brasil. Assumpção *et al.* (2013) adicionaram ao trabalho de Pavão *et al.* (2012) estimativas de espessura crustal obtidas com os métodos de Refração Sísmica Profunda (SOARES *et al.*, 2006, entre outros), FR (BIANCHI, 2008; LLOYD *et al.*, 2010; ALBUQUERQUE *et al.*, 2011, entre outros) e modelos de velocidade gerados a partir da Inversão Conjunta de FR e Dispersão de Ondas de Superfície (JULIÀ *et al.*, 2008), para a América do Sul.

Para atualizar as compilações anteriores, foi realizada uma pesquisa em trabalhos de conclusão de curso (NASCIMENTO *et al.*, 2011; ALBUQUERQUE, 2014; FILHO *et al.*, 2014), resumos expandidos apresentados em simpósios e congressos (COSTA *et al.*, 2008), e artigos publicados a partir de 2013 (TRINDADE *et al.*, 2014).

Somando a quantidade de pontos das referências, 100 foram de espessura crustal (H) e 59 de V_P/V_S (tabela 5). A diferença entre a quantidade para cada parâmetro é devido à ausência de informações de V_P/V_S em muitos trabalhos.

Tabela 5 – Quantidade de pontos de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S para cada província estrutural.

| Província estrutural | Nº de pontos - H | Nº de pontos - V_P/V_S |
|----------------------|------------------|--------------------------|
| Cráton Amazônico | 13 | 7 |
| Província Amazonas | 14 | 6 |
| Bacia dos Parecis | 1 | 1 |
| Província Tocantins | 47 | 33 |
| Bacia do Paraná | 8 | 2 |
| Cráton São Francisco | 5 | 3 |
| Bacia do Parnaíba | 12 | 7 |
| Total | 100 | 59 |

A figura 4 apresenta a localização dos pontos relacionados na pesquisa bibliográfica (tabela 5) e suas respectivas localizações em relação ao contexto das províncias estruturais brasileiras.

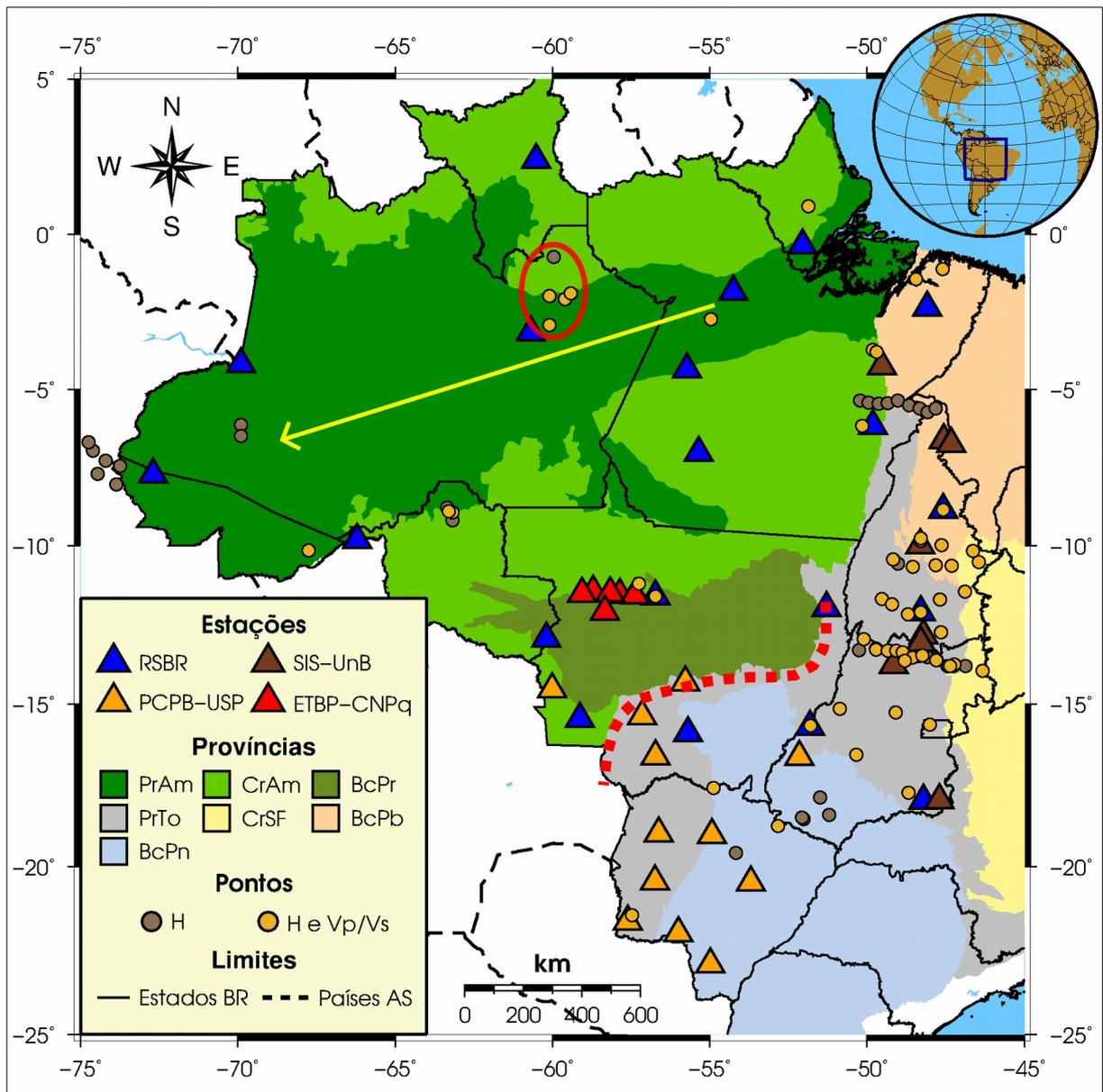


Figura 4 – Mapa com a localização das estações e dos pontos de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos a partir da pesquisa bibliográfica. A elipse vermelha, a seta amarela e a linha tracejada em vermelho indicam as hipóteses levantadas por Krüger et al. (2002), por Rosa et al. (2015) e por Assumpção et al. (2013), respectivamente. As siglas representam as províncias estruturais: Província Amazonas (PrAm), Cráton Amazônico (CrAm), Bacia dos Parecis (BcPr), Província Tocantins (PrTo), Cráton São Francisco (CrSF), Bacia do Parnaíba (BcPb) e Bacia do Paraná (BcPn).

O mapa da figura 4 deixa evidente que a maioria dos pontos obtidos no levantamento bibliográfico se concentra nas bordas do Cráton Amazônico, deixando uma ampla região sem cobertura, corroborando o que foi mencionado na justificativa do trabalho. Além disso, as estações utilizadas neste estudo, em sua maioria, estão localizadas onde não há informações de espessura crustal e/ou V_P/V_S .

A figura 5 apresenta a variação de H e V_P/V_S para cada província e as estatísticas destes parâmetros, obtidas no levantamento bibliográfico.

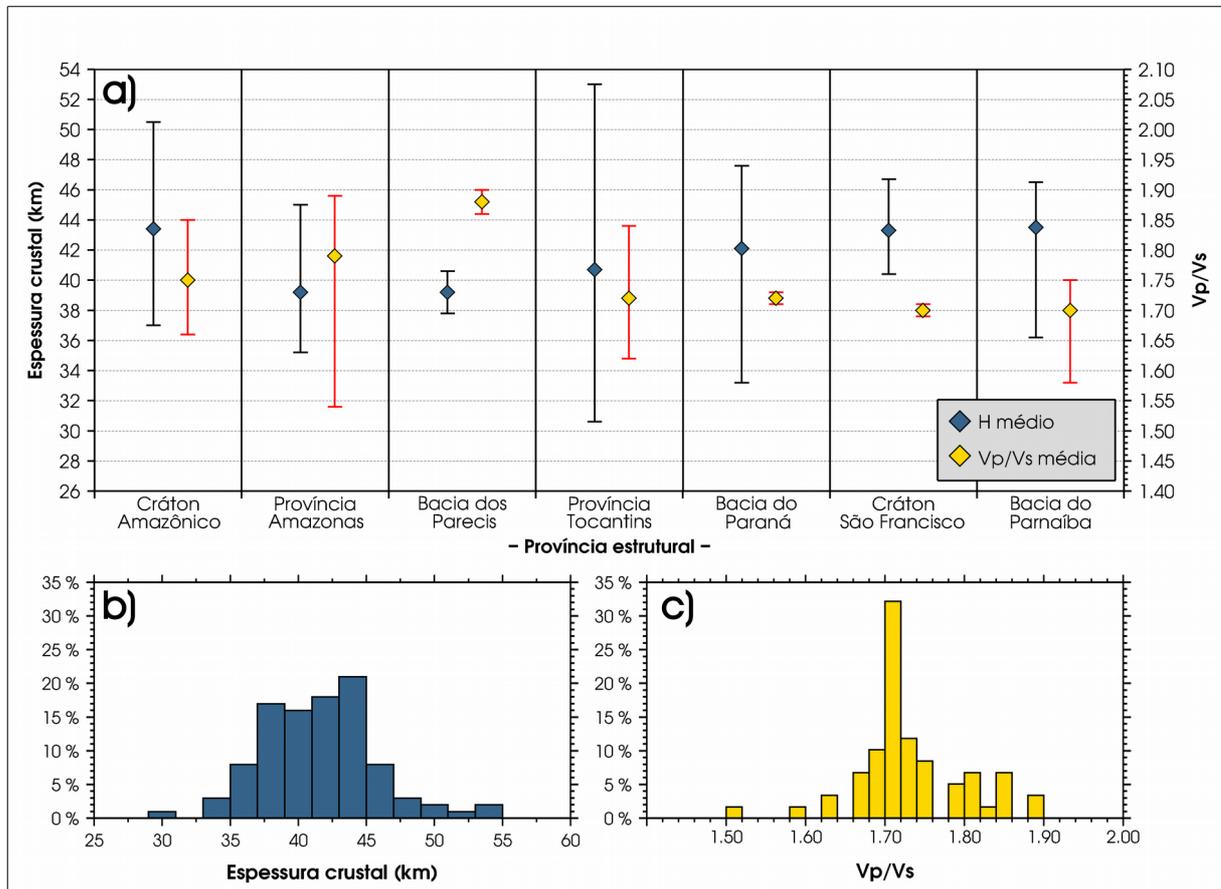


Figura 5 – a) Médias e variações dos valores de espessura crustal (H) e de V_P/V_S . b) Distribuição de frequência dos valores de espessura crustal. c) Distribuição de frequência dos valores de V_P/V_S .

Considerando as regiões Norte e Centro-Oeste, a espessura crustal média foi estimada em 41,6 km, variando de 30,6 km a 53,0 km, com mínimo e máximo obtidos para a Província Tocantins. A média de H é próxima a 41,5 km, estimada por Christensen e Mooney (1995) para escudos e plataformas.

Já a razão V_P/V_S média foi estimada em 1,75, variando de 1,54 (Província Amazonas) a 1,90 (Bacia dos Parecis). Segundo a relação de Musacchio *et al.* (1997), essa média indica uma crosta predominantemente félsica (abaixo de 1,80).

O gráfico na figura 5a mostra que não é possível estabelecer um valor característico para os parâmetros H e V_P/V_S , uma vez que há uma grande flutuação nas estimativas e nas médias. Em 5b e 5c, é possível notar que a distribuição de

espessura se concentra entre 35 e 47 km, enquanto a de V_P/V_S se concentra entre 1,66 a 1,76.

Algumas hipóteses foram levantadas em estudos sismológicos do Cráton Amazônico para explicar algumas observações. Krüger *et al.* (2002), utilizando dados de uma rede sismográfica local (figura 4, elipse vermelha), encontraram uma variação abrupta de espessura crustal entre a porção norte do Cráton Amazônico (Escudo das Guianas) e a Bacia do Amazonas, o que pode indicar um mergulho na Moho de, aproximadamente, 20° na direção norte.

Lloyd *et al.* (2010), ao gerarem um mapa de espessura crustal para a América do Sul, encontraram uma correlação positiva entre a idade de certas regiões do cráton e suas espessuras, indicando que a Moho é mais profunda em locais com idades variando de 2 a 3 Ga.

Rosa *et al.* (2016) identificaram uma tendência de afinamento crustal no sentido NE-SW da Província Amazonas (figura 4, seta amarela) e que sua porção norte (Escudo das Guianas) possui uma raiz remanescente de sua história tectônica.

Assumpção *et al.* (2013) encontraram indícios de um afinamento crustal na região conhecida como Faixa de Dobramentos Paraguai (figura 4, linha tracejada em vermelho), que pode representar uma feição remanescente da zona de sutura entre os blocos crustais amazônico e atlântico.

Ao correlacionarem a sismicidade do Brasil com a espessura crustal, Agurto-Detzel *et al.* (2015) apontam que a incidência de sismos é maior em regiões com espessura crustal inferior a 35 km, e menor, em crostas com espessura entre 35 e 45 km.

As demais províncias das regiões Norte e Centro-Oeste possuem uma geologia bastante estudada, que será discutida a partir da análise dos resultados obtidos neste trabalho.

4. MÉTODOS

4.1 Estrutura interna da Terra

Os tempos de percurso das ondas sísmicas podem ser utilizados para obter informações a respeito da variação de velocidade de acordo com a profundidade e, por isso, são utilizados na obtenção de modelos para descrever a estrutura interna da Terra.

Exceto por algumas diferenças relacionadas ao manto superior, todos os modelos atuais são semelhantes ou baseados no Modelo Terrestre de Referência Preliminar (PREM - *Preliminary Reference Earth Model*) construído por Dziewonski e Anderson (1981).

O PREM (figura 6) leva em consideração mudanças de velocidade nas ondas sísmicas primárias (P) e secundárias (S) em função da profundidade e da densidade do material, desde as camadas mais superficiais até o núcleo da Terra.

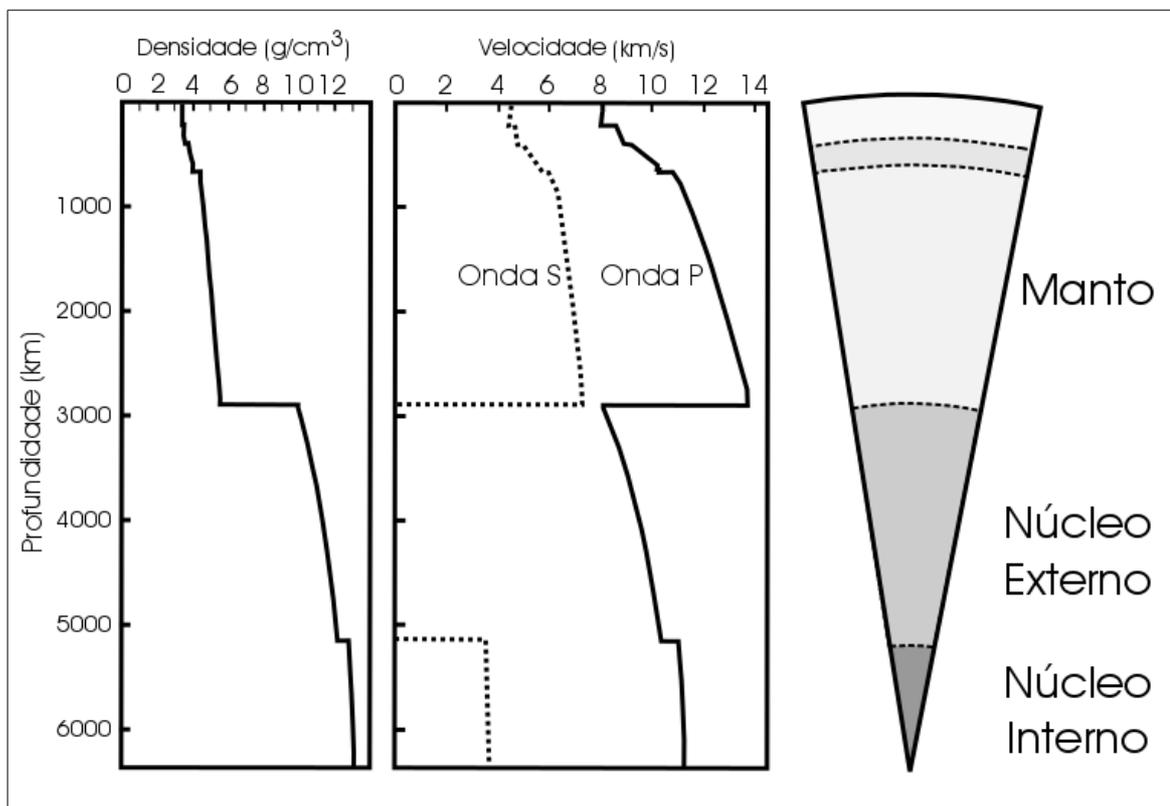


Figura 6 – Variação de densidade do meio e de velocidade das ondas P e S em função da profundidade, de acordo com o Modelo Terrestre de Referência Preliminar (PREM - *Preliminary Reference Earth Model*), elaborado por Dziewonski e Anderson (1981).

Combinando o PREM (DZIEWONSKI e ANDERSON, 1981) com informações composicionais (PRESS *et al.*, 2006; COOK *et al.*, 2010), temos o seguinte modelo, representando as principais camadas que constituem o interior da Terra:

- Crosta: é a camada mais externa, com variação de espessura entre 7 e 10 km em região oceânica, e entre 30 e 80 km em região continental. Possui composição predominantemente félsica. A velocidade das ondas P varia de 6 km/s (crosta superior) a 7 km/s (crosta inferior).
- Manto: localiza-se entre a crosta e o núcleo externo, entre cerca de 7 e 2.900 km de profundidade. Possui composição ultramáfica (peridotito) e a velocidade das ondas P sofre um aumento súbito de 7 km/s para valores acima de 8 km/s. A fronteira que separa a crosta do manto é chamada de descontinuidade de Mohorovičić ou simplesmente Moho.
- Núcleo: localiza-se abaixo do manto, a cerca de 2.900 km de profundidade. Pressupõe-se que seja composto por uma liga de ferro-níquel nos estados líquido (núcleo externo) e sólido (núcleo interno). Ao atravessarem a interface manto-núcleo (descontinuidade de Gutenberg), as ondas P sofrem uma redução súbita de velocidade de, aproximadamente, 13 km/s para 8 km/s. O efeito de redução da velocidade das ondas P e, conseqüentemente sua deflexão, combinado ao desaparecimento das ondas S, dá origem ao fenômeno denominado Zona de Sombra da onda P, compreendida entre 105° e 142° de distância.

4.2 Função do Receptor

Um sismograma é o registro da movimentação do chão causada por um terremoto, que traz consigo informações do mecanismo de fonte e da estrutura próxima a esta, dos efeitos de propagação no percurso pelo manto, da estrutura próxima ao receptor e da resposta do instrumento. Se os efeitos da fonte e da propagação pelo manto inferior forem eliminados, um modelamento detalhado dos primeiros 20 a 30 segundos do sismograma pode fornecer vínculos sobre a estrutura de velocidade logo abaixo do receptor (AMMON *et al.*, 1991).

A Função do Receptor (FR) é um método desenvolvido por Langston (1979), que utiliza sismos distantes (telessismos) para isolar a resposta pontual da estrutura da crosta próxima à estação sismográfica (receptor). Para isso, considera-se o princípio de que uma onda P telessísmica é aproximadamente plana e, ao atingir a base de uma descontinuidade, muda de um meio de maior para um de menor velocidade e, conseqüentemente, tem parte de sua energia convertida em onda S (fase Ps), gerando também múltiplas reflexões entre a superfície livre e a interface.

A figura 7 apresenta o diagrama de raios da FR, indicando a conversão da fase P em S (Ps) e as reflexões múltiplas (PpPms e PpSms+PsPms) para o caso de uma onda P, aproximadamente plana, que incide na descontinuidade de Moho. Com exceção da letra inicial, as minúsculas denotam um percurso ascendente, as maiúsculas, um percurso descendente e a letra “m” indica reflexão na Moho.

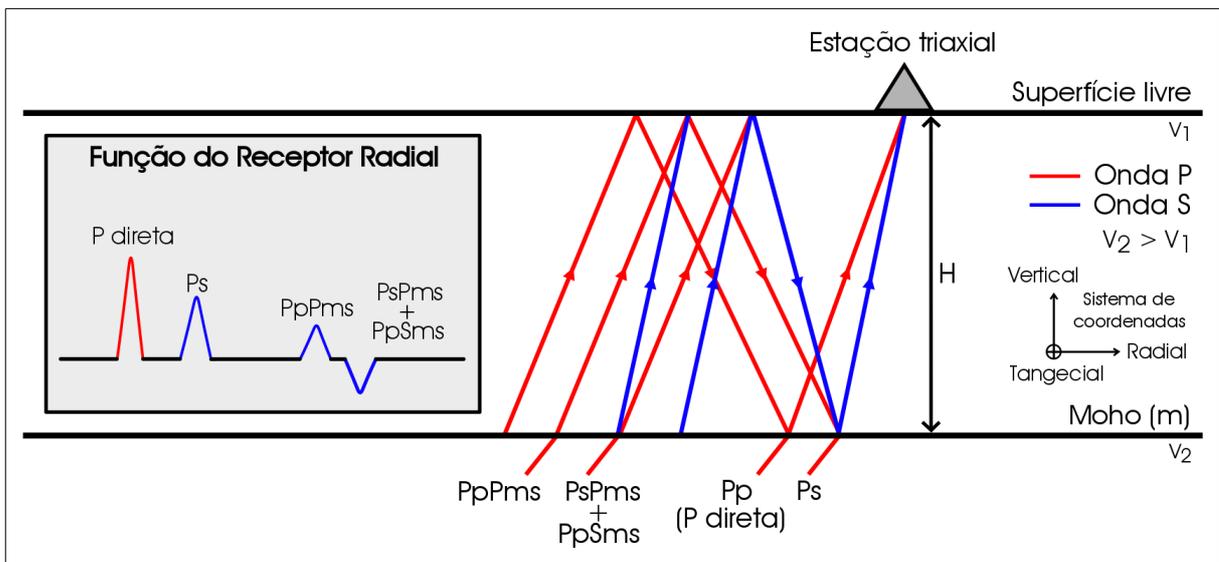


Figura 7 – Diagrama de raios simplificado que ilustra o princípio físico da Função do Receptor (FR), com a indicação das fases convertidas e reverberadas, para o caso de um meio com uma camada de espessura H e um semiespaço. Dentro do retângulo cinza, é mostrado um traço de FR radial com a indicação das fases P direta, Ps e múltiplas. Fonte: AMMON (1991), com alterações.

Devido ao grande contraste de velocidade entre a crosta e o manto (Moho), o pico relativo à fase Ps é, geralmente, o maior depois da fase P direta.

Para tornar mais claras as fases horizontais de interesse, antes de aplicar o método da FR, é necessário rotacionar o sismograma original para a direção de

propagação do telessismo, mudando do sistema de coordenadas convencional de aquisição da estação (Vertical, Norte-Sul e Leste-Oeste) para o sistema ZRT (Vertical, Radial e Tangencial). Desse modo, haverá um registro da onda P, polarizado na direção vertical (Z), e das fases Ps e múltiplas, na direção radial.

Os telessismos devem estar localizados entre 30° e 90° de distância para evitar efeitos como: triplicação das ondas sísmicas no manto, ângulo de incidência próximo à horizontal, zonas de sombra e atenuação das ondas sísmicas para distâncias maiores que 90° (LANGSTON, 1979).

Existem diversas técnicas para gerar a Função do Receptor, cada uma com suas particularidades. Neste caso, foi utilizada a técnica iterativa no domínio do tempo de Ligorría e Ammon (1999), que será descrita a seguir.

Realizando-se uma simplificação para um modelo de velocidade com uma camada e um subespaço (figura 7), e considerando o sismograma como a convolução das respostas instrumental $[I(t)]$, das estruturas próximas à fonte $[S(t)]$ e da estrutura logo abaixo do receptor $[E_{Z,R,T}(t)]$, têm-se:

$$D_Z(t) = I(t) * S(t) * E_Z(t) \quad (1)$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \quad (2)$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \quad (3)$$

As funções $D_Z(t)$, $D_R(t)$ e $D_T(t)$ representam, respectivamente, as componentes vertical, radial e tangencial do sismograma. O asterisco denota o operador matemático da convolução, que é dada por:

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(\tau) g(t - \tau) \quad (4)$$

A onda P, para telessismos entre 30° e 90° de distância epicentral, incide com um ângulo próximo à vertical na estação (figura 7). Por isso, pode-se supor que a resposta da estrutura na componente vertical seja somente um pico contendo toda energia da onda P, que pode ser aproximada como uma função Delta de Dirac $[\delta(t)]$.

$$E_Z \approx \delta(t) \quad (5)$$

Como $\delta(t)$ é o elemento neutro da convolução, pode-se reescrever a equação (1) na forma de:

$$D_Z(t) \approx I(t) * S(t) \quad (6)$$

O método de Ligorría e Ammon (1999) realiza um processo iterativo no domínio do tempo que estima uma FR sintética. Esta, por sua vez, é convolvida com a componente vertical para gerar um sinal radial (equação 7), que é comparado com o sismograma da componente radial registrado pela estação.

$$D_R(t) = D_Z(t) * E_R(t) \quad (7)$$

A técnica é baseada no cálculo do resíduo $[r(t)]$ gerado pela redução por mínimos quadrados da diferença entre o sismograma horizontal observado e o sinal predito que é gerado pela convolução de um trem de picos $[E_{Ri}(t)]$, atualizados iterativamente, com o sismograma da componente radial. A equação 8 sintetiza esse procedimento.

$$r(t) = \int_0^t [D_R(t) - D_Z(t) * E_R(t)]^2 dt \quad (8)$$

A “qualidade” do traço de FR pode ser definido pelo coeficiente de ajuste (correlação cruzada) entre $D_R(t)$ e $D_Z(t) * E_R(t)$, dado em termos de porcentagem de ajuste entre os sinais.

Para eliminar ruídos de alta frequência, aplica-se um filtro do tipo Gaussiano em (7), que possui a seguinte forma no domínio do tempo (t):

$$G(t) = e^{-t^2 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}} \quad (9)$$

A abertura do filtro (α) tem relação com o conteúdo de frequência que se deseja remover do sinal. Por isso, é necessário cuidado na sua escolha, pois um valor baixo demais pode suavizar a FR, enquanto um mais alto pode permitir que frequências indesejáveis mascarem as fases de interesse.

O procedimento para estimar a FR no domínio do tempo pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. É calculada a correlação cruzada entre $D_R(t)$ e $D_Z(t)$ para estimar o atraso do primeiro e maior pico da Função do Receptor, com sua amplitude dada pela equação de Kikuchi e Kanamori (1982).
2. A convolução da estimativa atual é subtraída da componente radial do sismograma e o procedimento é repetido para estimar outros picos.
3. Com cada pico adicional, o desajuste entre $D_R(t)$ e a convolução $D_Z(t)*E_R(t)$ é reduzido.
4. A iteração é interrompida quando a redução do desajuste se torna insignificante.

Por esse método, a Função do Receptor pode ser entendida como a soma finita de uma sequência de picos que foram gerados de forma iterativa, e a correlação cruzada fornece a semelhança (%) entre o sismograma radial gerado e o registrado.

A principal vantagem da técnica de Ligorria e Ammon (1999) em relação a outras, como a da deconvolução por divisão espectral (LANGSTON, 1979), é gerar traços de FR sem a necessidade de estabelecer valores complexos de nível de água (CLAYTON e WIGGINS, 1976), que pode variar de acordo com a razão sinal/ruído de cada registro telessísmico. Isso evita, por exemplo, que seja adicionada uma etapa de seleção visual das FRs de acordo com o nível de água escolhido, permitindo otimizar o processamento dos eventos.

4.3 Empilhamento H-k

O empilhamento H-k (ZHU e KANAMORI, 2000) é um método para estimar a espessura da crosta (H) e a razão V_P/V_S (k) para um dado conjunto de traços de Função do Receptor. Para isso, são utilizadas as seguintes equações:

$$H = \frac{t_{Ps} - t_P}{\sqrt{\frac{1}{V_S^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_P^2} - p^2}} \quad (10)$$

$$H = \frac{t_{PpPms} - t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_S^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_P^2} - p^2}} \quad (11)$$

$$H = \frac{t_{PpSms+PsPms}}{2\sqrt{\frac{1}{V_S^2} - p^2}} \quad (12)$$

$$\frac{V_P}{V_S} = \left\{ (1 - p^2 V_P^2) \left[2 \left(\frac{t_{Ps} - t_P}{t_{PpPms} - t_{Ps}} \right) + 1 \right]^2 + p^2 V_P^2 \right\} \quad (13)$$

Onde V_P e V_S são as velocidades médias (km/s) das ondas P e S na crosta, respectivamente; t é o tempo (segundos) de chegada da fase e o seu índice indica as fases Ps , $PpPms$ e $PpSms+PsPms$; p é o parâmetro de raio (s/km).

Analisando a equação 10, em que se utiliza o tempo da fase Ps para calcular a espessura crustal pontual (H), conclui-se que este parâmetro é pouco sensível a variações na velocidade da onda P (V_P) dada como valor de entrada, enquanto é bastante sensível a variações na razão V_P/V_S .

Por exemplo, se a V_P variar de 6,10 km/s a 6,66 km/s, para $t_P - t_{Ps}$ igual a 5 segundos, uma V_P/V_S de 1,73 e p igual 0,06 s/km, a variação em H será em torno de 3,32 km. Por isso, a escolha da V_P média, de acordo com um modelo prévio, pode ser feita sem alarde. Já se a V_P/V_S variar de 1,70 a 1,98, mantendo a V_P igual a 6,4 km/s, para os mesmos valores de $t_P - t_{Ps}$ e p , temos uma variação em H em torno de 12,27 km, quase 3,7 vezes superior à estimativa anterior.

O método H-k gera as curvas das equações (10), (11) e (12), a partir da variação dos valores de V_S e, portanto da V_P/V_S , mantendo constantes a V_P , o tempo de chegada da fase $PpSms+PsPms$ ($t_{PpSms+PsPms}$) e as diferenças de tempo entre as fases Ps e P direta ($t_{Ps} - t_P$) e entre Ps e $PpPms$ ($t_{Ps} - t_{PpPms}$). Assim, somente um valor de razão V_P/V_S permitirá a convergência das três curvas, como mostra o ponto preto na figura 8.

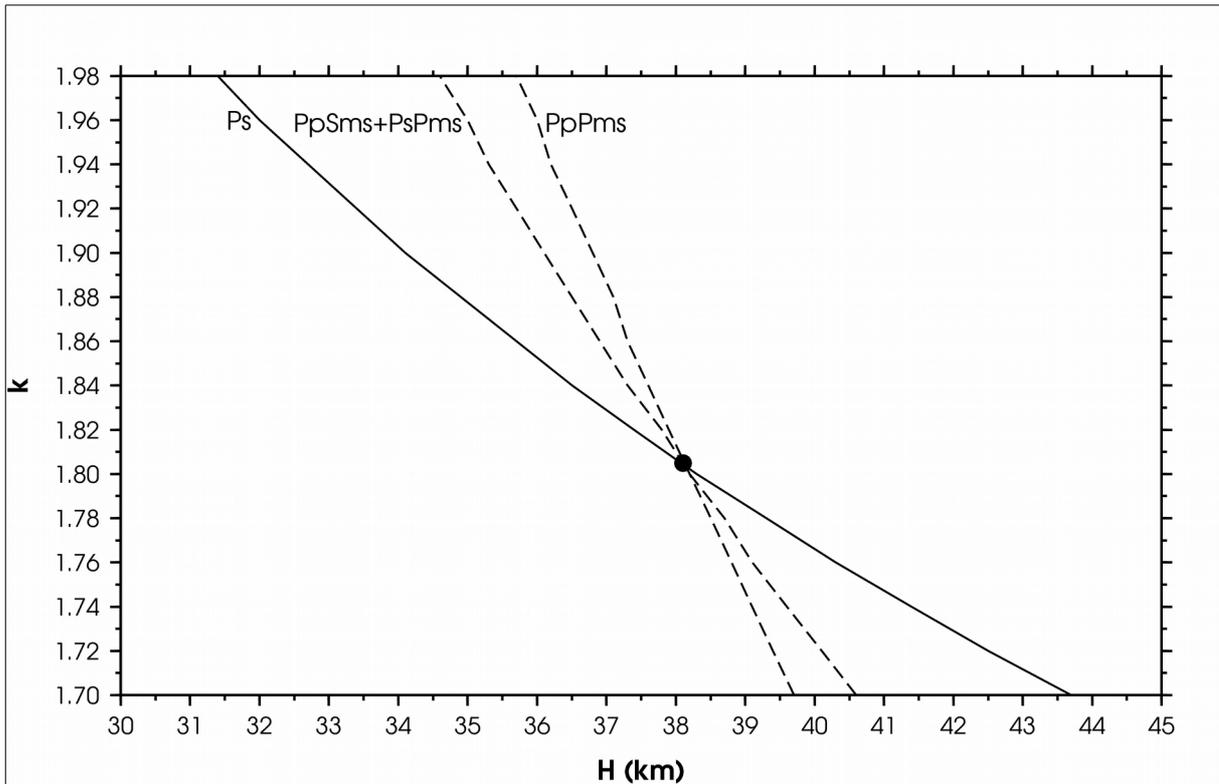


Figura 8 – Gráfico de espessura crustal (H) versus razão V_P/V_S (k), para um determinado conjunto de valores, que ilustra o método H - k (ZHU e KANAMORI, 2000). O ponto preto é a interseção entre as curvas das fases Ps , $PpPms$ e $PpSms+PsPms$, que informa o valor aproximado de H e k .

No método H - k , as amplitudes das FRs são empilhadas nos tempos de percurso calculados para as fases Ps e múltiplas, considerando um determinado valor de H e k (V_P/V_S). A função de empilhamento [$S(H, k)$] é definida por:

$$S(H, k) = w_1 r(t_1) + w_2 r(t_2) - w_3 r(t_3) \quad (14)$$

Onde $r(t)$ é a Função do Receptor radial, t_1 , t_2 e t_3 são os tempos das fases Ps , $PpPms$ e $PpSms+PsPms$, correspondentes à espessura crustal (H) e a razão V_P/V_S (k), dados pelas equações (10), (11) e (12). w_i são os fatores de peso, em que $\sum w_i = 1$. A função $S(H, k)$ alcança o máximo quando todas as três fases estão empilhadas coerentemente com o valor correto de H e k (ZHU e KANAMORI, 2000).

Para estimar o erro associado aos parâmetros, é utilizada a técnica *bootstrap* (EFRON e TIBSHIRANI, 1991), em que um subconjunto de traços é selecionado de forma aleatória e empilhado. Assim, calcula-se o tempo previsto para

as fases Ps e múltiplas e o encontrado no empilhamento. Então, o processo parte para outro subconjunto de dados até o número desejado de iterações. O erro está relacionado à dispersão dos valores (desvio padrão) dos parâmetros obtidos para cada subconjunto de traços de FR.

As principais vantagens do empilhamento H-k são:

- Uma grande quantidade de traços de FR pode ser empilhada sem a necessidade de marcação das fases Ps e múltiplas;
- Ao empilhar traços de FR de diferentes distâncias e azimutes, efeitos como variações laterais de estrutura são suprimidos, gerando um modelo crustal médio.

A razão V_P/V_S é um parâmetro de grande importância para estudos crustais, pois está relacionada à pressão de poro e à composição e estrutura cristalina das rochas. Em termos composicionais, esse parâmetro é utilizado como uma medida relativa da quantidade de sílica nas rochas, de forma que valores menores que 1,80 estão relacionados a crostas félsicas e, maiores, a crostas máficas (MUSACCHIO *et al.*, 1997).

5. PROCESSAMENTO

O processamento dos dados foi subdividido em diversas etapas, começando com a preparação dos *shell scripts*, passando pela verificação da orientação das estações sismográficas, realizando a separação dos eventos e gerando os traços de Função do Receptor no domínio do tempo, até, finalmente, a obtenção dos resultados de espessura crustal e razão V_P/V_S com o empilhamento H-k.

Os programas utilizados para o processamento foram:

- ITERDECON (versão 1.04): aplica a técnica iterativa no domínio do tempo de Ligorría e Ammon (1999);
- HKSTACK: aplica o empilhamento H-k de Zhu e Kanamori (2000);
- *Seismic Analysis Code - SAC* (GOLDSTEIN e SNOKE, 2005): utilizado para processar as formas de onda e fazer a inspeção visual dos traços de Função do Receptor;
- *Generic Mapping Tools - GMT* (WESSEL *et al.*, 2013): utilizado para gerar os gráficos, as figuras dos traços de Função do Receptor, assim como realizar a interpolação dos valores de espessura crustal e construir os mapas;
- *Geotool* (MILJANOVIC, 2007): utilizado para a verificação da orientação dos sismômetros das estações.

As listagens com os parâmetros de fonte utilizados na seleção dos telessismos (figura 9) foram obtidas dos servidores do IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*). Foram selecionados telessismos com distâncias de 30° a 100° e magnitudes maiores que 4,5. A distância foi estendida de 90° para 100°, pois a zona de sombra para a onda P não possui uma fronteira bem definida. Além disso, terremotos com profundidades maiores que 60 km e magnitudes a partir de 6,5 tendem ser menos atenuados com a distância.

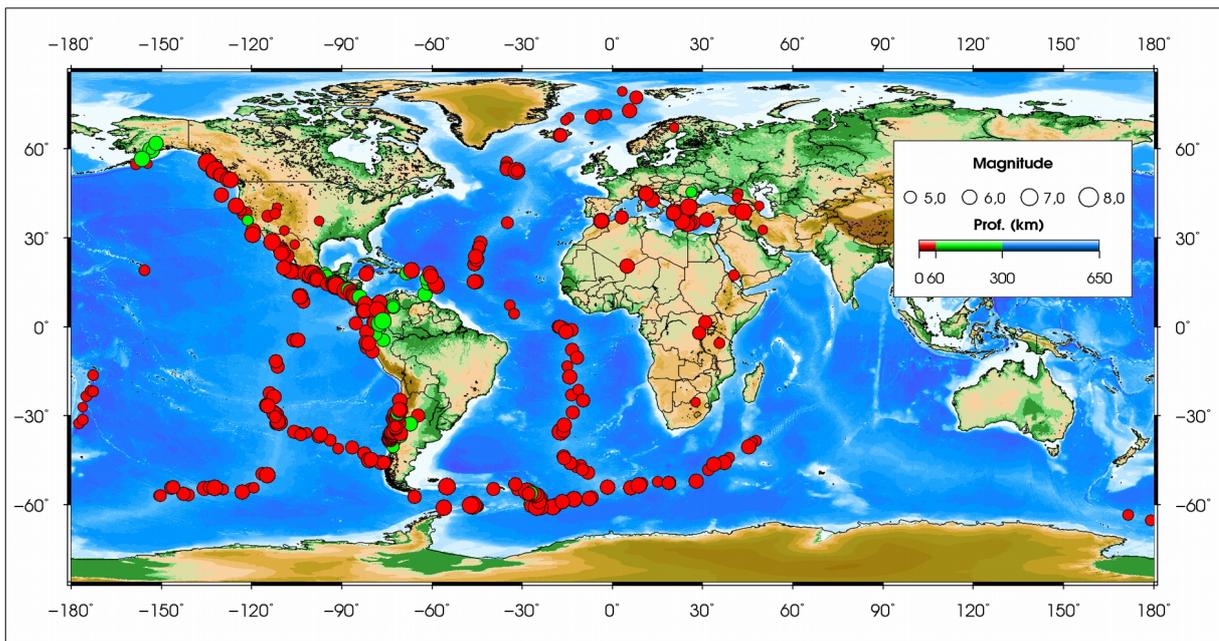


Figura 9 – Mapa com a localização dos telessismos utilizados para aplicar o método da Função do Receptor. Os círculos representam os epicentros, com seu tamanho proporcional à magnitude, e as cores informam sua profundidade relativa (hipocentro).

Os programas ITERDECON e HKSTACK necessitam de algumas informações *a priori* para gerar os traços de FR e as estimativas de espessura crustal e razão V_P/V_S , respectivamente. Para o primeiro, foram definidas 200 iterações e filtro Gaussiano de 2,5. Já para o segundo, foram definidos um valor de 6,4 km/s para a V_P , pesos iguais a 0,7 (w_1), 0,2 (w_2) e 0,1 (w_3) e 500 iterações (quantidade de subconjuntos do *bootstrap*).

O número de iterações, tanto para gerar os traços de FR (ITERDECON) quanto para estimar a espessura crustal e a razão V_P/V_S (HKSTACK), corresponde ao máximo que os programas permitem.

O filtro Gaussiano (α) foi definido por meio da análise dos traços de FR gerados variando seu valor de 1,0 até 3,0. Assim, $\alpha=2,5$ foi considerado um valor de equilíbrio, por não suavizar demasiadamente a amplitude dos traços e filtrar o ruído de alta frequência que dificulta a identificação das fases de interesse.

O valor definido para a V_P corresponde à média encontrada, para a região de estudo, no levantamento bibliográfico. Como o método H-k não possui grande sensibilidade a variações nesse parâmetro, a inserção de valores entre 6,0 e 6,5 km/s é aceitável.

A escolha dos pesos está relacionada à clareza na identificação das fases Ps e múltiplas. Como a Ps é, geralmente, a fase com maior amplitude depois da P, dá-se a ela um peso maior. Para as demais, que quase sempre estão mascaradas por ruído, o peso é consideravelmente menor.

As tabelas de 6 a 8 apresentam os tipos de estação sismográfica e os intervalos de dados utilizados para a obtenção dos valores de espessura crustal e razão V_P/V_S com o método da Função do Receptor.

Tabela 6 – Período de dados utilizados e tipo de estação da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR).

| Estação | Tipo | Período |
|---------|------------|-------------------------|
| SMTB | Permanente | 11/09/2011 a 27/03/2016 |
| SALV | Permanente | 01/06/2012 a 27/03/2016 |
| IPMB | Permanente | 28/10/2012 a 26/02/2016 |
| PDRB | Permanente | 07/12/2012 a 24/03/2016 |
| ARAG | Permanente | 02/10/2013 a 17/02/2016 |
| PTLB | Permanente | 17/03/2014 a 18/07/2016 |
| VILB | Permanente | 30/03/2014 a 14/09/2015 |
| MACA | Permanente | 11/04/2014 a 17/07/2016 |
| MALB | Permanente | 05/05/2014 a 21/03/2016 |
| NPGB | Permanente | 07/05/2014 a 23/03/2016 |
| ITTB | Permanente | 08/05/2014 a 20/03/2016 |
| PRPB | Permanente | 10/05/2014 a 25/03/2016 |
| CZSB | Permanente | 21/07/2014 a 14/02/2016 |
| ETMB | Permanente | 28/07/2014 a 16/02/2016 |
| MCPB | Permanente | 28/07/2014 a 18/07/2016 |
| TMAB | Permanente | 11/08/2014 a 18/07/2016 |
| TBTG | Permanente | 31/08/2014 a 29/09/2015 |
| SNDB | Permanente | 29/09/2014 a 28/03/2016 |
| BOAV | Permanente | 27/01/2014 a 24/10/2016 |
| PEXB | Permanente | 01/01/2011 a 25/03/2016 |

Tabela 7 – Período de dados utilizados e tipos de estação do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB).

| Estação | Tipo | Período |
|---------|------------|-------------------------|
| LAJE | Permanente | 19/11/2014 a 30/03/2016 |
| SFA1 | Permanente | 04/09/2014 a 31/03/2016 |
| TUC4 | Permanente | 21/11/2014 a 31/03/2016 |
| CAN1 | Temporária | 05/06/2008 a 19/01/2015 |
| CAN3 | Permanente | 05/06/2008 a 17/12/2014 |
| SSV2 | Permanente | 31/08/2010 a 16/05/2014 |
| MR07 | Temporária | 29/10/2010 a 14/02/2011 |
| PAL1 | Permanente | 01/07/2008 a 05/05/2014 |
| PAL2 | Permanente | 18/10/2010 a 29/08/2014 |

Tabela 8 – Período de dados utilizados e tipo de estação da Rede de Estudos Tectônicos da Bacia dos Parecis (ETBP-CNPq).

| Estação | Tipo | Período |
|---------|------------|-------------------------|
| PAR1 | Temporária | 23/04/2015 a 29/03/2016 |
| PAR2 | Temporária | 22/05/2015 a 29/03/2016 |
| PAR3 | Temporária | 09/08/2015 a 29/03/2016 |
| PAR4 | Temporária | 11/08/2015 a 19/08/2015 |
| PAR5 | Temporária | 12/05/2015 a 01/12/2015 |
| PAR6 | Temporária | 10/08/2015 a 01/12/2015 |

As estações da Rede de Estudos Estruturais do Pantanal, Chaco e Bacia do Paraná (PCPB) são temporárias e seus dados não foram processados neste trabalho.

Devido à pequena quantidade de dados das estações da rede PCPB, aos traços de FR, foi aplicada a correção *move-out* para um parâmetro de raio de 6,4 s/grau, que corresponde a uma distância epicentral de 66°, e empilhados para melhorar a razão sinal/ruído e, conseqüentemente, deixar as fases Ps mais evidentes.

Como é necessário rotacionar os sismogramas antes de executar o ITERDECON, um erro acima de 10° na orientação do sismômetro pode prejudicar os resultados de FR. Para realizar essa verificação, foi utilizada a ferramenta de geração de movimento de partícula do programa *Geotool* (MILJANOVIC, 2007), para analisar a polaridade de chegada da onda P nas três componentes (figura 10).

A análise exige que os sinais tenham boa razão sinal/ruído e que a polaridade da onda P seja clara nas três componentes. Por isso, foram selecionados telessismos com distâncias maiores que 30°, para evitar efeitos de triplicação no manto, e magnitudes acima de 6,0, para gerar registros com amplitudes mais altas.

Como referência, adotou-se o sinal positivo para correções azimutais no sentido horário e negativo, para o anti-horário.

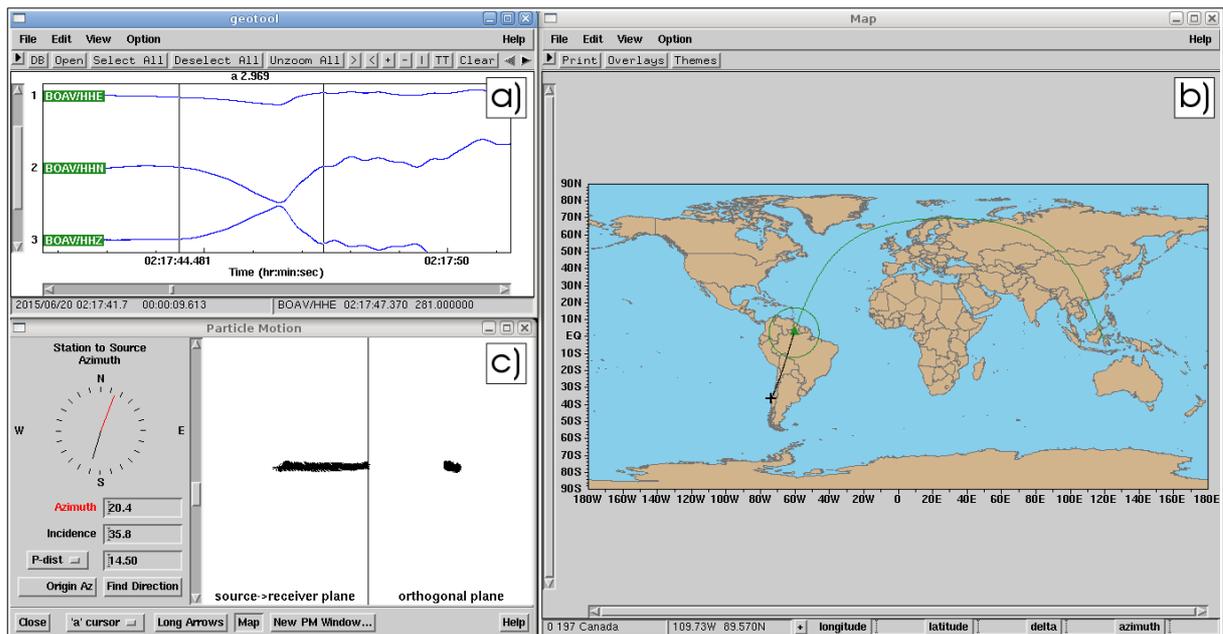


Figura 10 – a) Janela do programa Geotool com as polaridades da fase P nas três componentes do sismograma para a estação BOAV. b) Mapa gerado pelo programa, com a indicação da localização (cruz preta) e azimute (linha preta) do evento e azimute estimado de acordo com o movimento de partícula (linha verde). c) Movimento de partícula da onda P para o plano radial e ortogonal. Para este caso, a diferença entre o azimute real e o medido foi de, aproximadamente, 172° .

Constatou-se que seis estações possuíam erro médio de orientação acima de 10° : FUN1 ($+15,5^\circ$), MACA ($+14,2^\circ$), MCPB ($+40,5^\circ$), PTLB ($+32,2^\circ$), TMAB ($+42,8^\circ$) e BOAV ($+172,3^\circ$). Destas, somente MCPB, PTLB, TMAB e BOAV tiveram sua correção aferida com a bússola em campo, e o erro entre a estimativa e a aferição ficou em torno de 2° para as três primeiras e de 8° para a última.

Como a diferença encontrada entre a estimativa e a aferição direta com a bússola foi pequena, pode-se afirmar que o movimento de partícula é um método confiável para realizar esse tipo de correção. Contudo, para a rotação das componentes, preferiu-se utilizar os valores aferidos, quando disponíveis, por serem mais precisos.

6. RESULTADOS

A tabela 9 apresenta os resultados de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos com os métodos da Função do Receptor (LIGORRÍA e AMMON, 1999) e do empilhamento H-k (ZHU e KANAMORI, 2000).

Tabela 9 – Resultados de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S para cada província estrutural.

| Província estrutural | Estação | H (km) | V_P/V_S | H médio (km) | V_P/V_S média |
|----------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|
| Cráton Amazônico | NPGB | 34,4 ± 0,9 | 1,73 ± 0,02 | 43,4 | 1,69 |
| | PRPB | 37,7 ± 0,4 | 1,73 ± 0,02 | | |
| | PTLB | 41,1 ± 0,3 | 1,68 ± 0,01 | | |
| | BOAV | 55,3 ± 3,6 | 1,60 ± 0,05 | | |
| | VBST | 48,6* | 1,73 | | |
| Província Amazonas | CZSB | 27,4 ± 4,5 | 1,41 ± 0,15 | 38,2 | 1,72 |
| | ETMB | 44,2 ± 2,5 | 1,71 ± 0,10 | | |
| | IPMB | 37,8 ± 1,0 | 1,81 ± 0,02 | | |
| | ITTB | 42,7 ± 0,6 | 1,73 ± 0,01 | | |
| | MACA | 42,0 ± 1,8 | 1,86 ± 0,12 | | |
| | MALB | 40,2 ± 0,8 | 1,82 ± 0,03 | | |
| | MCPB | 33,4 ± 1,1 | 1,82 ± 0,03 | | |
| | TBTG | 38,2 ± 2,5 | 1,57 ± 0,04 | | |
| Bacia dos Parecis | PDRB | 40,4 ± 2,2 | 1,48 ± 0,03 | 37,2 | 1,75 |
| | VILB | 40,4 ± 0,5 | 1,78 ± 0,01 | | |
| | PAR1 | 33,4 ± 2,4 | 1,79 ± 0,10 | | |
| | PAR2 | 38,2 ± 3,6 | 1,75 ± 0,10 | | |
| | PAR3 | 43,0 ± 4,6 | 1,78 ± 0,09 | | |
| | PAR4 | - | - | | |
| | PAR5 | 30,0 ± 4,5 | 1,80 ± 0,11 | | |
| PAR6 | 34,9 ± 2,7 | 1,86 ± 0,13 | | | |
| Província Tocantins | SFA1 | 43,2 ± 2,0 | 1,70 ± 0,04 | 38,9 | 1,72 |
| | ARAG | 32,2 ± 0,4 | 1,74 ± 0,02 | | |
| | PEXB | 39,6 ± 0,8 | 1,69 ± 0,02 | | |
| | SALV | 35,5 ± 2,1 | 1,66 ± 0,07 | | |
| | SNDB | 37,4 ± 1,3 | 1,71 ± 0,03 | | |
| | CAN1 | 43,1 ± 2,8 | 1,71 ± 0,07 | | |
| | CAN3 | 40,5 ± 2,3 | 1,67 ± 0,04 | | |
| | SSV2 | 42,6 ± 1,8 | 1,77 ± 0,04 | | |
| | MR07 | 39,0 ± 1,9 | 1,71 ± 0,04 | | |
| | NBRS | 41,5* | 1,73 | | |
| | PTET | 39,0* | 1,73 | | |
| | POCN | 29,3* | 1,73 | | |
| | PANT | 35,6* | 1,73 | | |
| | BDQN | 41,9* | 1,73 | | |
| MURT | 43,6* | 1,73 | | | |
| Bacia do Parnaíba | LAJE | 41,7 ± 3,6 | 1,72 ± 0,07 | 38,1 | 1,73 |
| | TUC4 | 41,8 ± 2,0 | 1,75 ± 0,08 | | |
| | TMAB | 38,6 ± 2,8 | 1,73 ± 0,07 | | |
| | SMTB | 36,9 ± 0,4 | 1,84 ± 0,01 | | |
| | PAL1 | 31,4 ± 2,2 | 1,64 ± 0,06 | | |
| | PAL2 | 35,4 ± 1,5 | 1,72 ± 0,04 | | |

| | | | | | |
|-----------------|------|-------|------|------|------|
| | DVLD | 38,6* | 1,73 | | |
| | RVDE | 29,8* | 1,73 | | |
| Bacia do Paraná | RPRD | 39,0* | 1,73 | 36,4 | 1,73 |
| | ANTJ | 33,1* | 1,73 | | |
| | AMBA | 41,5* | 1,73 | | |

* Espessura crustal calculada com V_P/V_S fixa (1,73).

A espessura da crosta nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil é bastante variável, sendo que o menor valor foi encontrado para a Província Amazonas (27,4 km) e o maior, para o Cráton Amazônico, na região conhecida como Escudo das Guianas, alcançando uma espessura de 55,3 km. Quanto à razão V_P/V_S , o menor valor foi de 1,41 (Província Amazonas) e o maior, de 1,86 (Bacia dos Parecis e Província Amazonas).

Levando em consideração a grande flutuação nas estimativas para ambos os parâmetros, não é possível estabelecer um valor característico para cada província estrutural. Portanto, não estão relacionados, diretamente, com os critérios geológicos ou geofísicos que foram utilizados para delimitá-las.

6.1 Províncias estruturais

A seguir, serão discutidos aspectos importantes, evidenciados pela análise da Função do Receptor radial e das variações de espessura crustal e razão V_P/V_S . Para cada província estrutural, será apresentando o resultado com o menor erro associado a cada parâmetro e a indicação da estação que forneceu os dados. Os resultados para as demais estações estão presentes no ANEXO A.

Cráton Amazônico

A espessura crustal do Cráton Amazônico varia de 34,4 a 55,3 km, com uma média de 43,4 km, próxima ao valor de 41,5 km estimado por Christensen e Mooney (1995) para escudos e plataformas.

Os resultados com os menores erros associados foram obtidos para a estação PTLB (figura 11), em que a espessura crustal estimada foi de $41,1 \pm 0,3$ km e uma V_P/V_S de $1,68 \pm 0,01$ (figura 11b).

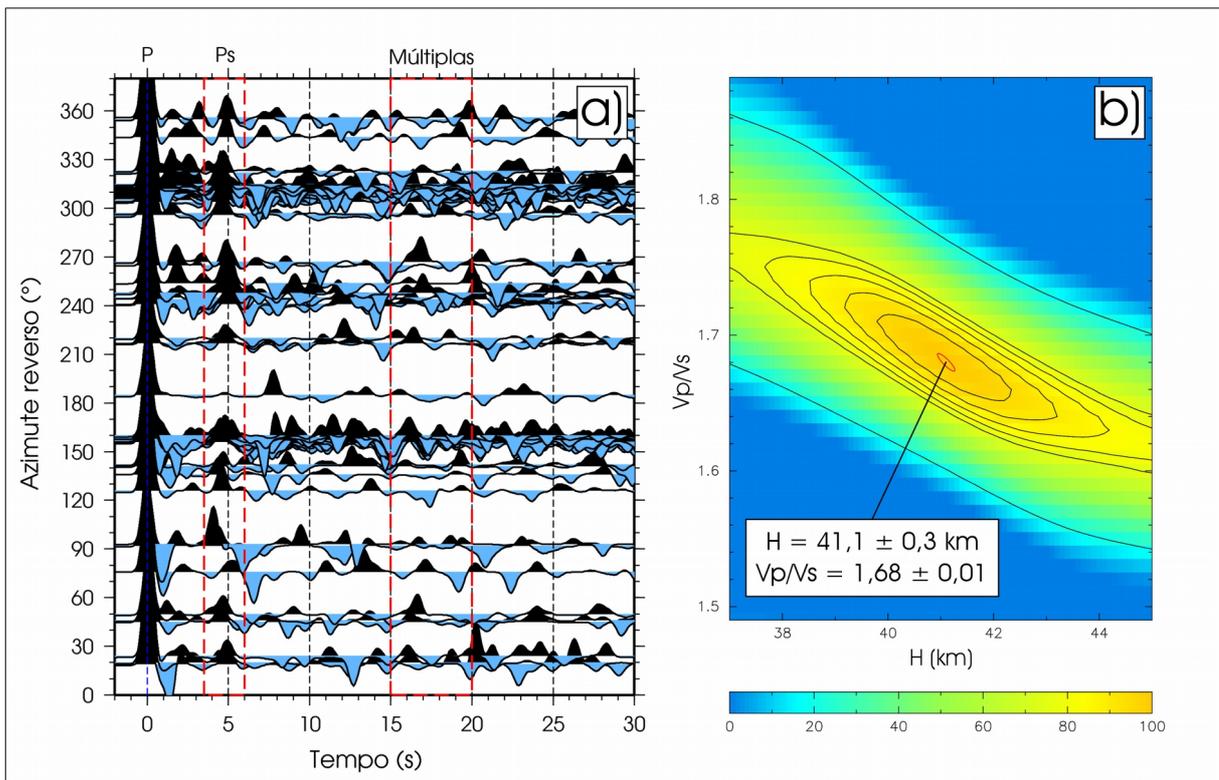


Figura 11 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação PTLB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S .

O Cráton Amazônico possui uma razão V_P/V_S média igual a 1,69, variando, em termos absolutos, de 1,60 a 1,73. Como a crosta superior é, em geral, de composição félsica (MUSACCHIO *et al.*, 1997), é possível que a maior influência para a geração de valores abaixo de 1,73 seja da crosta inferior, em que uma pequena variação em sua composição pode afetar de forma substancial o valor de V_P/V_S .

Uma crosta inferior mais félsica pode apresentar maior contraste de velocidade com o manto, gerando conversões de fase P em S (Ps) mais agudas e com maior amplitude. Isso pode ser corroborado pelos traços de FR radial da figura 11a, em que a fase Ps, na maioria deles, possui essas características.

Duas fases, entre a P direta e a Ps (figura 11a), indicam uma estratificação crustal. A primeira, abaixo de 2 segundos, pode estar relacionada a uma conversão no embasamento, e a seguinte, em torno de 3 segundos, pode estar relacionada à interface entre a crosta superior e a inferior (descontinuidade de Conrad).

Província Amazonas

A espessura crustal da Província Amazonas varia de 27,4 a 44,2 km, com uma média de 38,5 km, próxima ao valor de 41,5 km, estimado por Christensen e Mooney (1995) para escudos e plataformas.

Os resultados com os menores erros associados foram obtidos para a estação ITTB (figura 12), em que a espessura crustal estimada foi de $42,7 \pm 0,6$ km e V_P/V_S de $1,73 \pm 0,01$ (figura 12b).

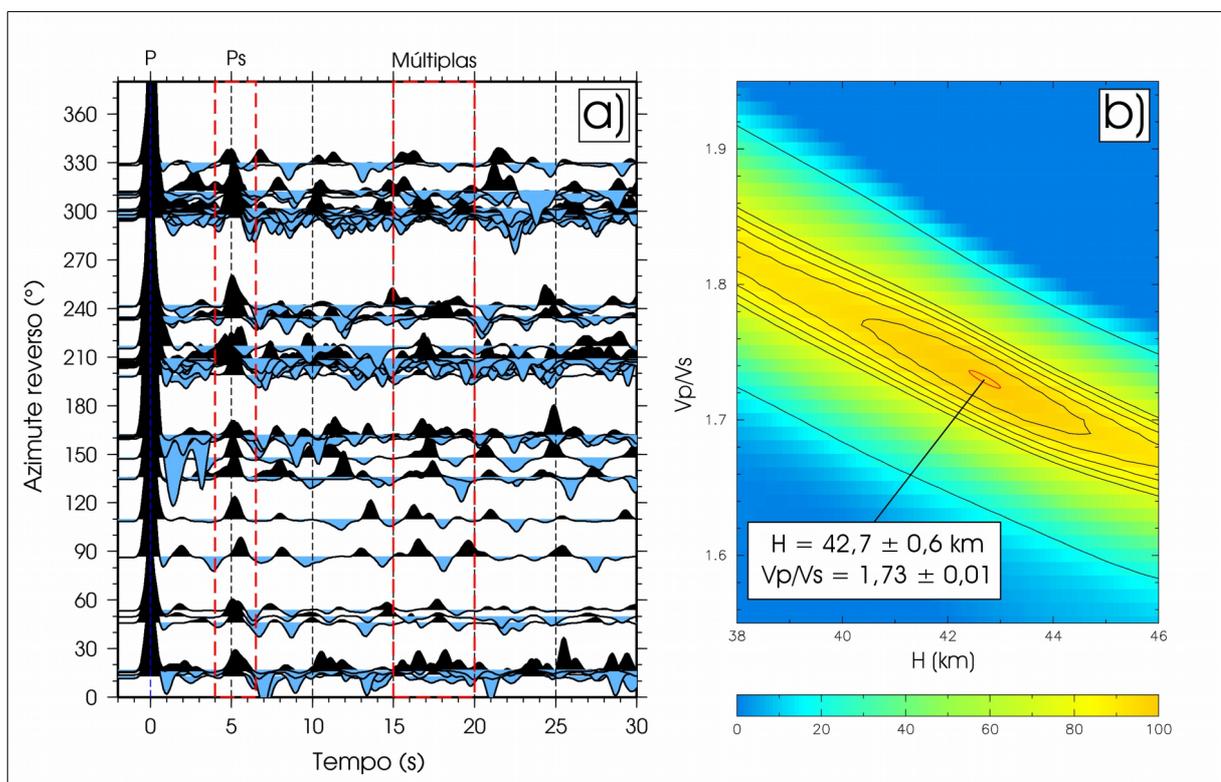


Figura 12 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimuth reverso para a estação ITTB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S .

A Província Amazonas possui uma razão V_P/V_S média de 1,72, variando, em termos absolutos, de 1,41 a 1,86, o que indica uma crosta média de félsica à máfica (MUSACCHIO *et al.*, 1997).

O valor de V_P/V_S para a estação ITTB (1,73) indica uma crosta inferior mais félsica, apresentando um contraste maior de velocidade na Moho, gerando fases Ps mais agudas e de maior amplitude, como pode ser visto na figura 12a.

De forma semelhante à estação PTLB, é possível notar que, em alguns traços de FR (figura 12a), há uma fase entre a P direta e a Ps, em torno de 2 a 3 segundos, que pode estar relacionada a uma conversão na interface de Conrad.

Bacia dos Parecis

A espessura crustal da Bacia dos Parecis varia de 30,0 a 43,0 km, com uma média igual a 37,2 km. Os resultados com os menores erros associados foram obtidos para a estação VILB (figura 13), em que a espessura crustal estimada foi de $40,4 \pm 0,5$ km, com uma V_P/V_S de $1,78 \pm 0,01$ (figura 13b).

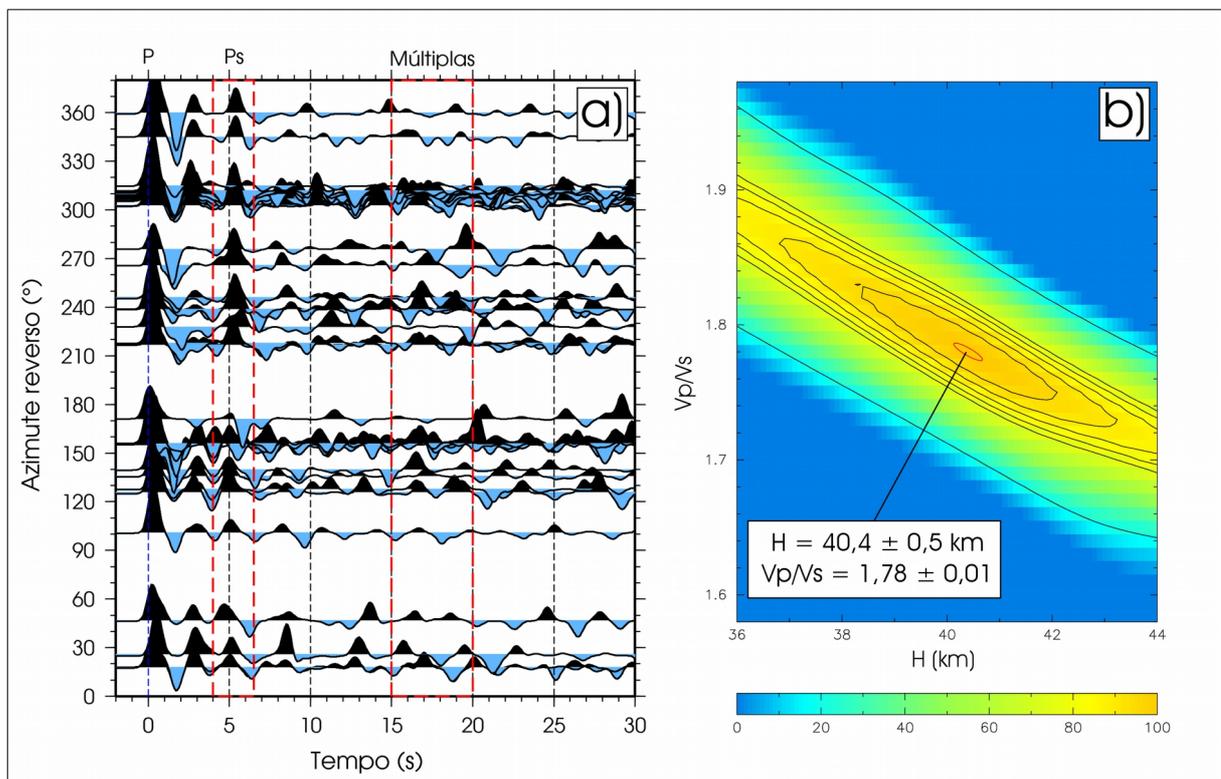


Figura 13 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação VILB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S .

A Bacia dos Parecis possui uma razão V_P/V_S média igual a 1,75, variando, em termos absolutos, de 1,48 a 1,86. Isso significa que há uma grande diferença composicional ao longo de sua extensão.

Apesar de, em alguns pontos (PAR3 e PAR6), o valor de V_P/V_S estar

relacionado uma crosta máfica, a média de V_P/V_S pode indicar uma crosta inferior mais félsica. Isso fica evidente para a estação VILB, que apresenta fases Ps mais agudas e com maior amplitude (figura 13a). Além disso, é possível identificar uma fase anterior à Ps, localizada entre 2 e 3 segundos em alguns traços, que pode estar relacionada a uma conversão na descontinuidade de Conrad.

Bacia do Paraná

A espessura crustal da Bacia do Paraná varia de 29,8 a 41,5 km, com uma média de 36,4 km, e uma razão V_P/V_S fixada em 1,73. Esses valores ainda são bastante preliminares, já que o período de dados disponível para o processamento foi de poucos meses para a maioria das estações. Por isso, ainda não é viável discutir sua composição crustal em termos de variação na V_P/V_S .

Bacia do Parnaíba

A espessura crustal da Bacia do Parnaíba varia de 31,4 a 41,8 km, com uma média de 38,1 km. Os resultados com os menores erros associados foram obtidos para a estação SMTB (figura 14), em que a espessura crustal foi estimada em $36,9 \pm 0,4$ km, com uma V_P/V_S igual a $1,84 \pm 0,01$ (figura 14b).

A crosta da bacia possui uma razão V_P/V_S média igual a 1,73, variando, em termos absolutos, de 1,64 a 1,84. Nos locais em que os valores estão abaixo de 1,73, é possível que a crosta inferior seja mais félsica, e para os que estão acima de 1,80, a crosta seja mais máfica (MUSACCHIO *et al.*, 1997).

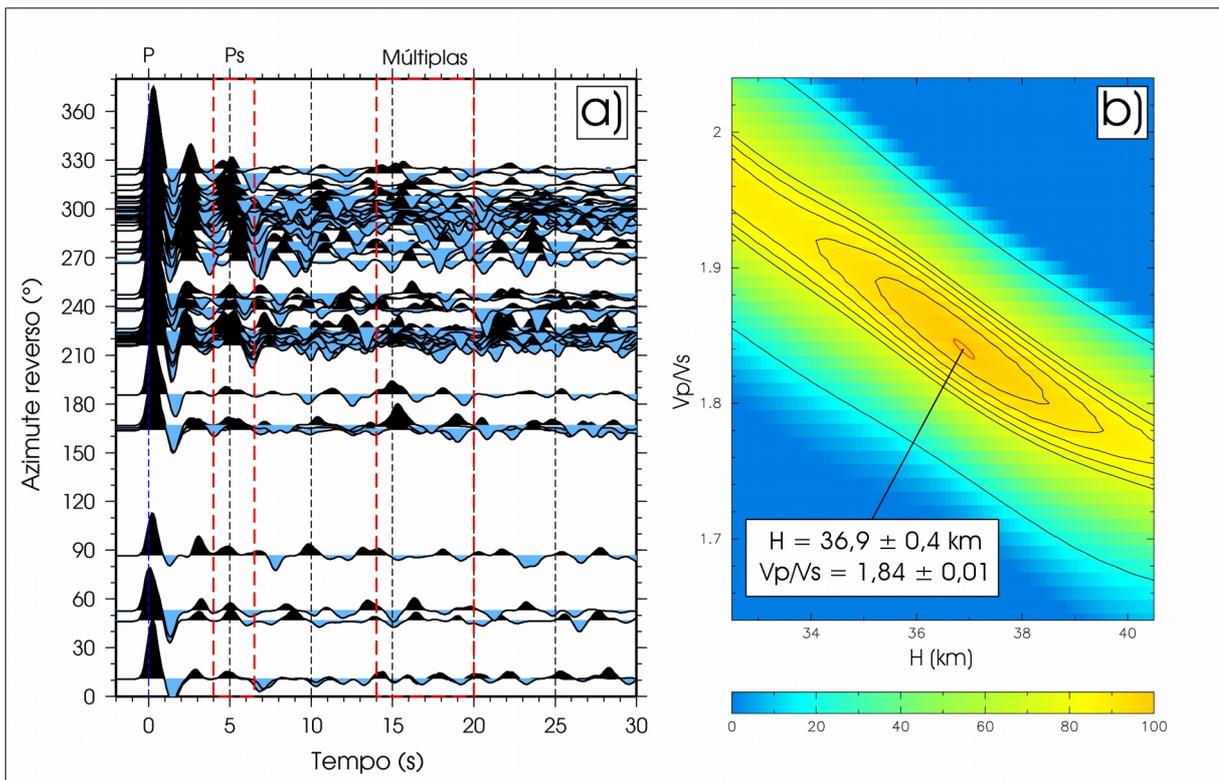


Figura 14 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação SMTB, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_P/V_S , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_P/V_S .

Uma crosta inferior mais máfica pode apresentar menor contraste de velocidade com o manto, gerando fases Ps de menor amplitude e picos mais largos, como pode ser visto na maioria dos traços da figura 14a.

Uma fase anterior à Ps, e com maior amplitude que esta, localiza-se entre 2 e 3 segundos (figura 14a), possivelmente, uma conversão na descontinuidade de Conrad. Essa característica mostra que o contraste de velocidade entre a crosta superior (félsica) e a inferior (máfica) é maior do que a desta com o manto.

Província Tocantins

A espessura crustal da Província Tocantins varia de 29,3 a 43,6 km, com uma média de 38,9 km. Os resultados com os menores erros associados foram obtidos para a estação ARAG (figura 15), em que a espessura crustal estimada foi de $32,2 \pm 0,4$ km e uma V_P/V_S igual a $1,74 \pm 0,02$ (figura 15b).

A razão V_P/V_S média foi estimada em 1,72, variando, em termos absolutos,

de 1,66 a 1,77. Nos locais em que os valores estão abaixo de 1,73, é possível que a crosta seja, predominantemente, félsica. Estes resultados estão de acordo com estudos de refração sísmica profunda e de Função do Receptor realizados por Soares *et al.* (2006) no Brasil central, que encontraram uma variação de 1,69 a 1,74.

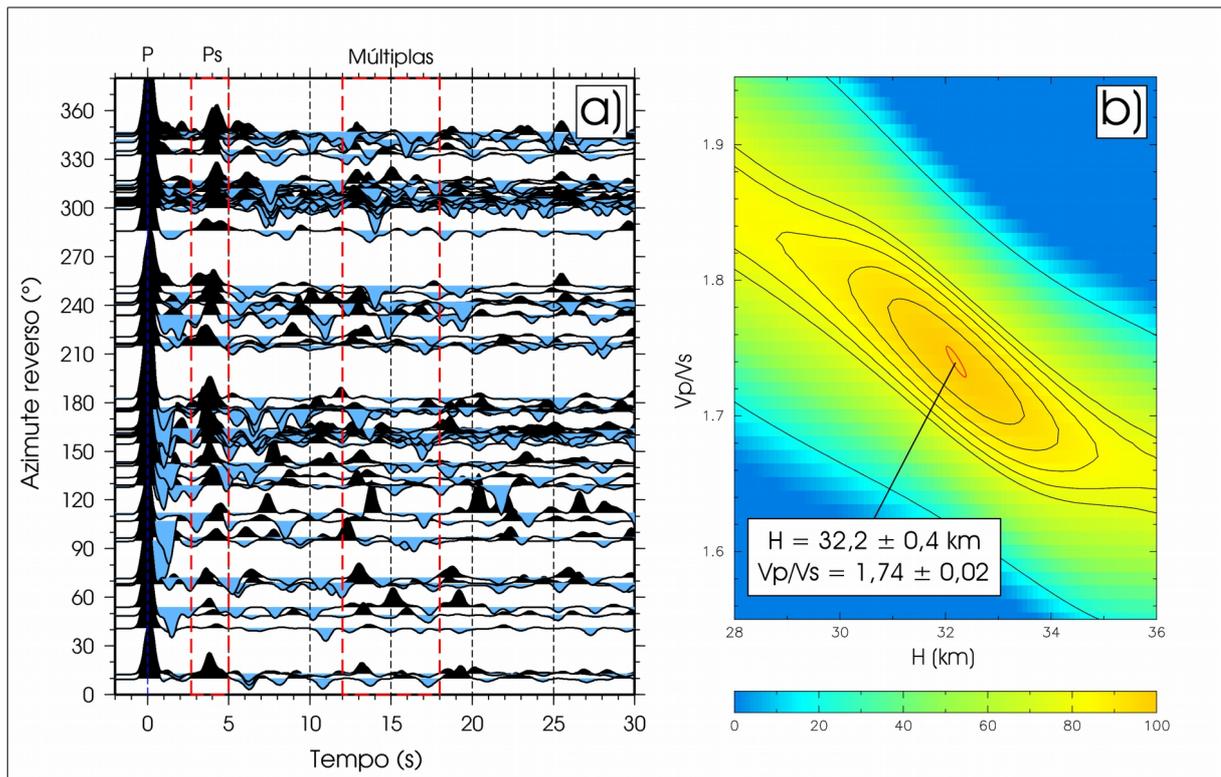


Figura 15 – a) Traços de Função do Receptor radial ordenados por azimute reverso para a estação ARAG, com a indicação dos tempos aproximados das fases P direta, Ps e múltiplas. b) Resultado do empilhamento H-k, com a indicação dos valores de espessura crustal (H) e V_p/V_s , dados pela elipse vermelha, em que seu tamanho representa o erro da estimativa. A escala de cores indica a correlação (%) entre os parâmetros H e V_p/V_s .

A presença de fases Ps mais agudas e de maior amplitude, na maioria dos traços de FR (figura 15a), evidencia uma crosta inferior mais félsica. Além disso, é possível notar uma fase anterior à Ps, com tempo aproximado de 2 segundos, que pode estar relacionada a uma conversão na descontinuidade de Conrad.

6.2 Variação de espessura crustal e implicações geológicas

A partir dos resultados obtidos na literatura e neste trabalho, foram gerados mapas com a interpolação dos valores de espessura crustal (figuras 16 e 17),

utilizando o método da mínima curvatura (SMITH e WESSEL, 1990).

Para gerar a superfície, o interpolador implementado no programa GMT (WESSEL *et al.*, 2013) necessita de dois parâmetros de entrada: o espaçamento ou incremento do *grid* (I) e o fator de tensão (T), em que $0 \leq T \leq 1$. O primeiro define a resolução espacial da variável que se deseja interpolar e o segundo, a suavização dos máximos e mínimos da superfície de interpolação.

A escolha do valor de I foi pautada na resolução lateral da Função do Receptor, que corresponde, aproximadamente, à profundidade da descontinuidade que se deseja identificar (AMMON *et al.*, 1990). Como a Moho é a que interessa para estimar a espessura da crosta (H), I foi definido como a média dos valores de H (41 km), obtida a partir das referências (ANEXO B) e dos novos resultados (tabela 9).

Alguns testes foram realizados para escolha de T, variando seu valor de 0 a 1. Os resultados da interpolação mostraram que $0 \leq T \leq 0,25$ é aceitável e não altera, consideravelmente, a superfície resultante. Como a variação de espessura da crosta, em geral, já possui um comportamento suavizado, isto é, já funciona como um vínculo de suavização, foi definido zero para este parâmetro.

A figura 16 apresenta a interpolação dos valores de espessura crustal obtidos no levantamento bibliográfico (a) e neste trabalho (b).

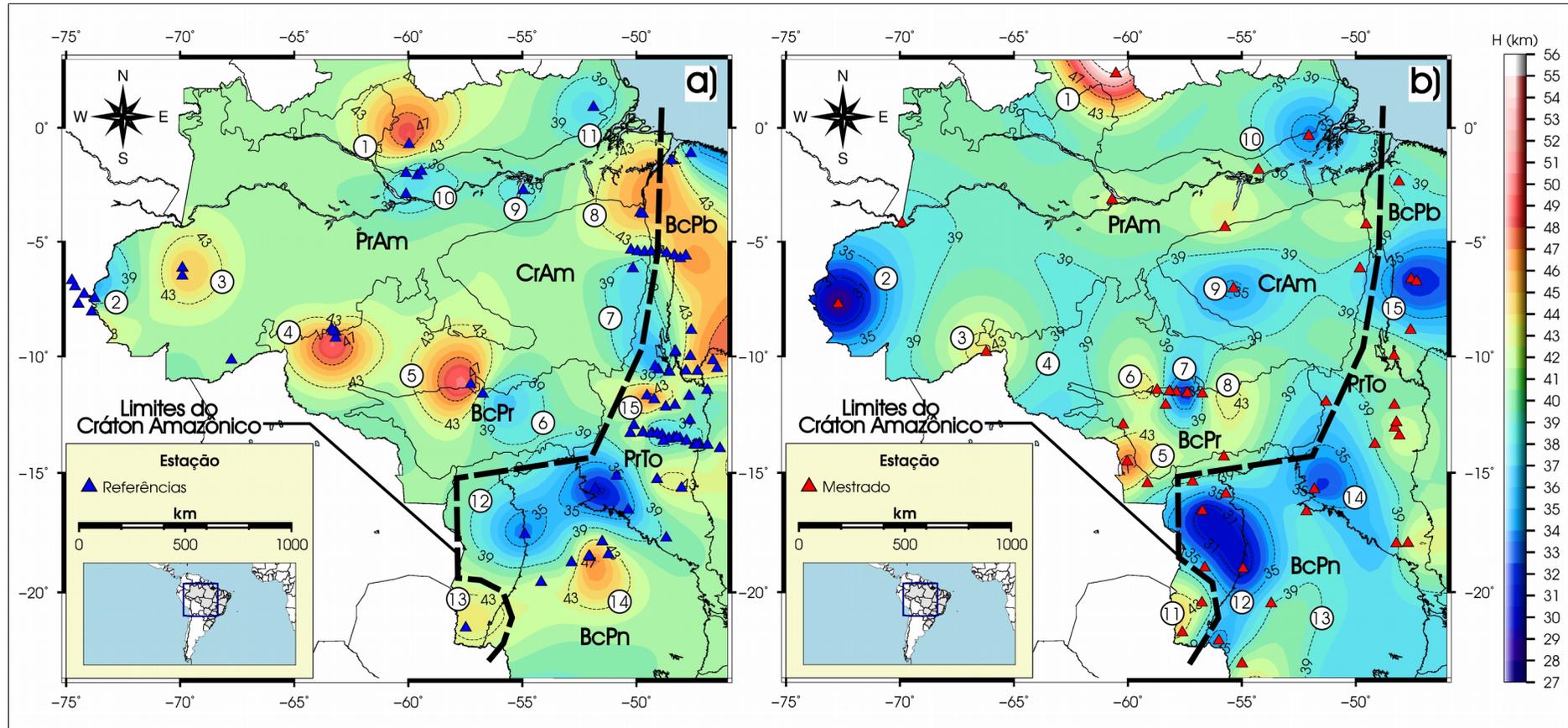


Figura 16 – a) Mapa de interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos na literatura (100 pontos). b) Mapa de interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos neste trabalho (46 pontos). A linha tracejada em preto indica os limites aproximados do Cráton Amazônico, definidos de acordo com as fronteiras das províncias estruturais. Os números representam os locais que serão objeto de discussão. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).

No mapa da figura 16a, gerado a partir da interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos no levantamento bibliográfico (100 pontos), os números 1, 3, 4, 5, 8, 13, 14 e 15 indicam os locais com crosta mais espessa ($H \geq 43$ km). Os locais de número 1, 3, 4, 5 e 8 podem estar relacionados aos blocos que compõem o Cráton Amazônico. Da mesma forma, o número 14 pode estar relacionado ao bloco Paranapanema (MANTOVANI e QUINTAS, 1996), localizado na Bacia do Paraná.

Já os números 2, 6, 7, 9, 10, 11 e 12 indicam onde a crosta é mais fina ($H \leq 39$ km). Estão relacionados às bacias do Acre (2), do Amazonas (9 e 10) e do Paraná/Pantanal (12). A região de crosta mais fina (7), localizada nos limites entre o Cráton Amazônico e a Província Tocantins, corresponde ao Cinturão Araguaia (HASUI *et al.*, 1980).

No mapa da figura 16b, gerado a partir da interpolação por mínima curvatura dos valores de espessura crustal obtidos neste estudo (46 pontos), os números 1, 3, 5, 6, 8 e 11 indicam os locais com crosta mais espessa ($H \geq 43$ km), distribuídos de forma semelhante aos da figura 16a, principalmente os números 1, 3, 6 e 11, o que endossa a hipótese dos blocos cratônicos. Já os de número 2, 4, 7, 9, 10, 12, 14 e 15 são aqueles onde a crosta é mais fina ($H \leq 39$ km), também com comportamento semelhante para as bacias mencionadas no caso da figura 16a.

Na figura 16a, alguns locais de maior espessura crustal no Cráton Amazônico (3 e 8) não possuem correspondentes em 16b. De forma semelhante, em 16b foram identificados locais de crosta mais fina, também no cráton (4 e 9) e na Bacia dos Parecis (7), que não possuem correspondentes em 16a.

O mapa da figura 17 apresenta a interpolação por mínima curvatura combinando os valores de espessura crustal obtidos na literatura e neste trabalho, totalizando 146 amostras. Já a figura 18 apresenta os perfis de topografia e espessura da crosta (AB, CD e EF) mostrados no mapa da figura 17.

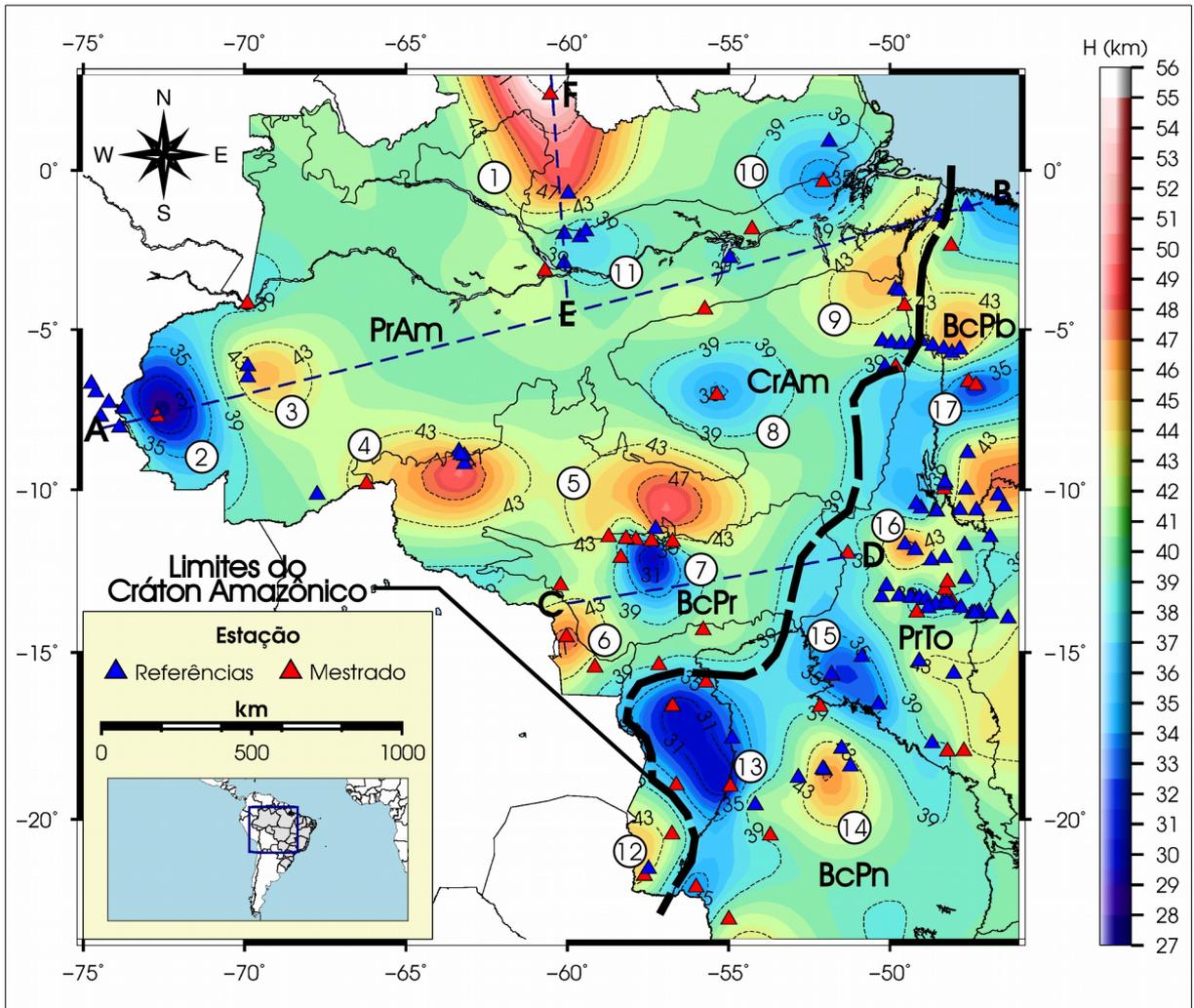


Figura 17 – Mapa com a interpolação de espessura crustal combinando os valores obtidos na literatura com os deste trabalho (total de 146 pontos). As linhas tracejadas em azul representam os perfis AB, CD e EF, que serão mostrados na figura 18. A linha tracejada em preto indica os novos limites do Cráton Amazônico, definidos em termos de espessura crustal, e os números, os locais que serão objeto de discussão. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecís) e PrTo (Província Tocantins).

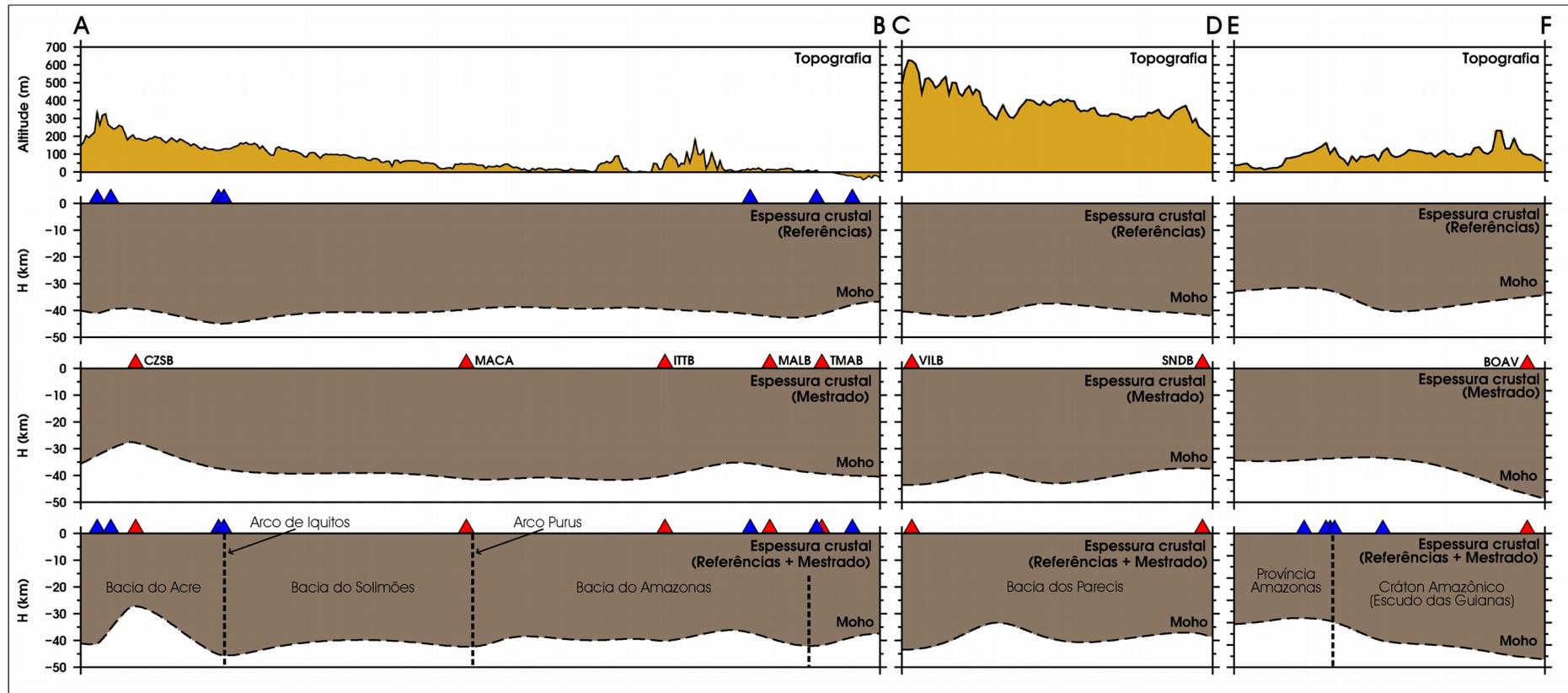


Figura 18 – Variação topográfica e de espessura crustal (H) ao longo das linhas AB, CD e EF da figura 17. A variação de H foi obtida a partir da interpolação de três conjuntos de pontos: das referências (figura 16a), dos obtidos neste trabalho (figura 16b) e a combinação dos dois (figura 17). Os triângulos representam as estações sismográficas das referências (em azul) e as que forneceram os dados processados neste estudo (em vermelho). No perfil AB, as linhas verticais tracejadas indicam os limites entre as bacias sedimentares que compõem a Província Amazonas. No perfil EF, a linha tracejada vertical indica o limite entre a Província Amazonas e o Cráton Amazônico.

Embora existam pontos de afinamento crustal no interior do Cráton Amazônico, é possível delimitá-lo como a porção a noroeste da linha tracejada em preto (figura 17), que possui espessura igual ou maior que 39 km. Esses limites estão de acordo com o que foi definido por Rosa *et al.* (2016) a partir de dados aerogeofísicos.

A hipótese de Rosa *et al.* (2016), a respeito do afinamento crustal no Cráton Amazônico no sentido NE-SW (figura 4, seta amarela), só pode ser notada no terceiro gráfico do perfil AB (figura 18). No entanto, isso não fica evidente nos segundo e último gráficos deste perfil.

Com base no quarto gráfico do perfil AB (figura 18), pode-se estabelecer um domínio central na Província Amazonas, com espessura crustal variando de 40 a 45 km, composto pelas bacias do Solimões e do Amazonas. Além disso, a definição dos limites das bacias por meio da variação de espessura crustal também coincide com a localização aproximada dos arcos que as separam, como o Arco Purus, entre as bacias do Amazonas e do Solimões, e o Arco de Iquitos, tido como o limite leste da Bacia do Acre. Esta, por sua vez, possui uma crosta relativamente fina, em torno de 27 km, relacionada diretamente à subsidência flexural causada pela cadeia andina na Placa Sul-Americana.

Tanto pelo mapa de interpolação (figura 17) quanto pelo perfil EF (figura 18), constata-se um aumento de espessura crustal no sentido da Província Amazonas (PrAm) para o Cráton Amazônico (CrAm), na região conhecida como Escudo das Guianas (EG). Isso corrobora as hipóteses de Krüger *et al.* (2002) e Rosa *et al.* (2016), que mencionam, respectivamente, um aumento de espessura crustal no sentido PrAm-EG, com uma inclinação na Moho e uma raiz remanescente dos eventos tectônicos que deram origem ao cráton.

Não foi possível estabelecer uma correlação entre a geocronologia das províncias do Cráton Amazônico (figura 19) e suas espessuras crustais, como citado por Lloyd *et al.* (2010), uma vez que existem regiões de crosta mais espessa em províncias mais jovens, como a Rondônia-Juruena, e de crosta mais fina em províncias mais antigas, como a Transamazonas. Até mesmo quando se considera uma mesma província, como a Tapajós-Parima, por exemplo, há variações grandes o suficiente para falsear essa correlação.

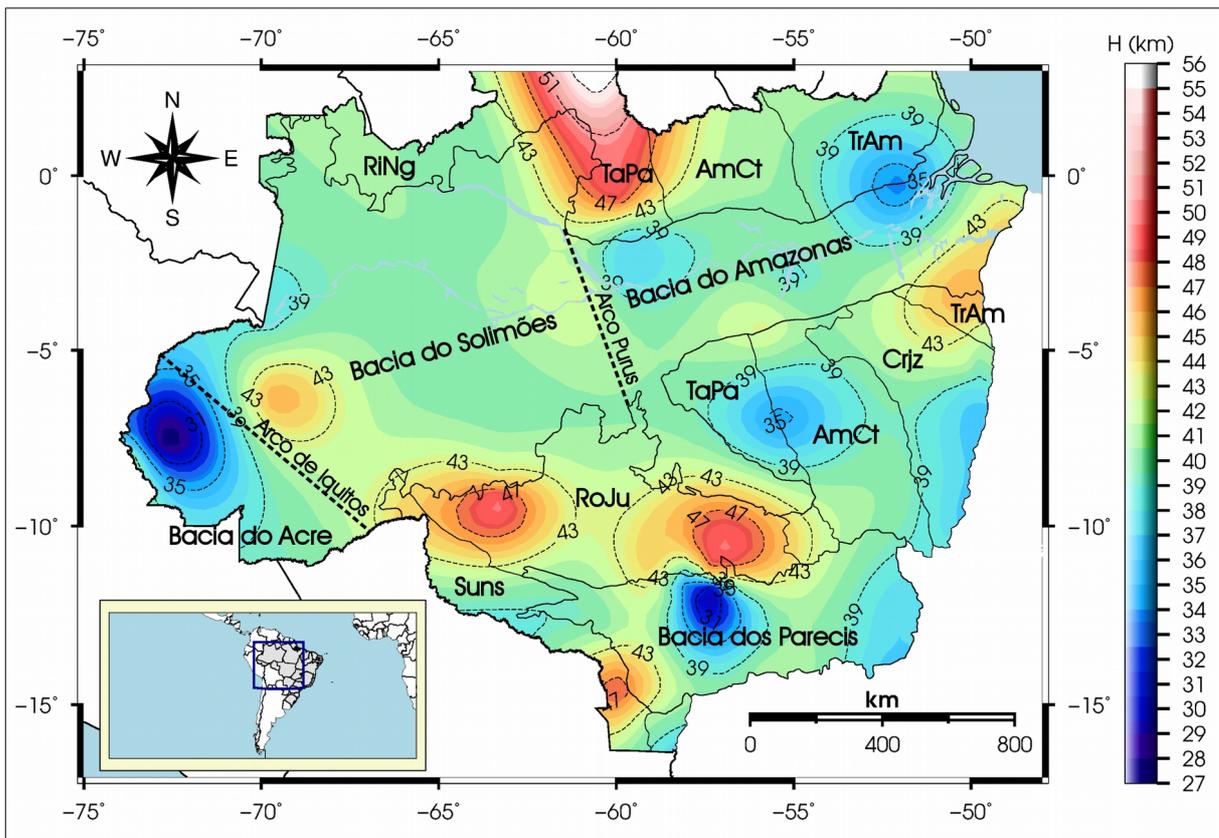


Figura 19 – Mapa com a interpolação de espessura crustal (H) combinando os valores obtidos na literatura com os deste trabalho para as províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (SANTOS, 2004): Carajás (Crjz), Amazônia Central (AmCt), Transamazonas (TrAm), Tapajós-Parima (TaPa), Rio Negro (RiNg), Rondônia-Juruena (RoJu) e Sunsás (Suns).

Os valores de espessura crustal da Baía dos Parecis (figuras 17 e 18) estão próximos aos de estimativas obtidas a partir de modelagens gravimétricas realizadas por Bahia (2007) e Faria (2015), que encontraram uma variação entre 30 e 40 km. Como pode ser visto no perfil CD (figura 18), há uma ondulação na Moho, relacionada, possivelmente, ao afinamento crustal ou litosférico ocorrido com elevação da astenosfera, em consequência dos processos de rifteamento sofridos pela Baía dos Parecis (BAHIA, 2007).

As regiões de maior espessura crustal ($H \geq 43$ km), com números 1, 3, 4, 5, 6 e 9 na figura 17, indicam os possíveis blocos que compõem o Cráton Amazônico. O número 14 indica o bloco Paranapanema, localizado na Baía do Paraná, e formado, aproximadamente, entre 1,0 Ga e 850 Ma (MANTOVANI e QUINTAS, 1996). Evidências geofísicas obtidas a partir de levantamentos gravimétricos na Baía do Paraná (MANTOVANI *et al.*, 2005) também corroboram sua existência.

De forma geral, as regiões de crosta mais fina estão localizadas em bacias sedimentares (regiões em azul na figura 17), indicando que algum processo tectônico de extensão crustal está relacionado à sua origem ou evolução.

Comparando a topografia com a variação de espessura crustal (figura 18), constata-se que não é possível correlacioná-las, ou seja, não há compensação isostática da topografia na crosta para todos os perfis analisados.

6.3 Comparação entre modelos crustais

Para verificar a consistência dos resultados obtidos neste trabalho, foram interpolados os valores de espessura crustal fornecidos por dois modelos: CRUST 1.0 (LASKE *et al.*, 2013) e GEMMA 1.0 (REGUZZONI e SAMPIETRO, 2014).

O modelo CRUST 1.0 (figura 20a) foi gerado a partir da compilação de um banco de dados com valores médios de espessura crustal, obtidos de estudos de sísmica e Função do Receptor, ajustados para um *grid* de 1°x1°.

O modelo GEMMA 1.0 (figura 20b) foi gerado a partir da inversão de dados gravimétricos globais, obtidos pelo satélite GOCE, e possui resolução horizontal de 0,5°x0,5° e vertical de 1 km.

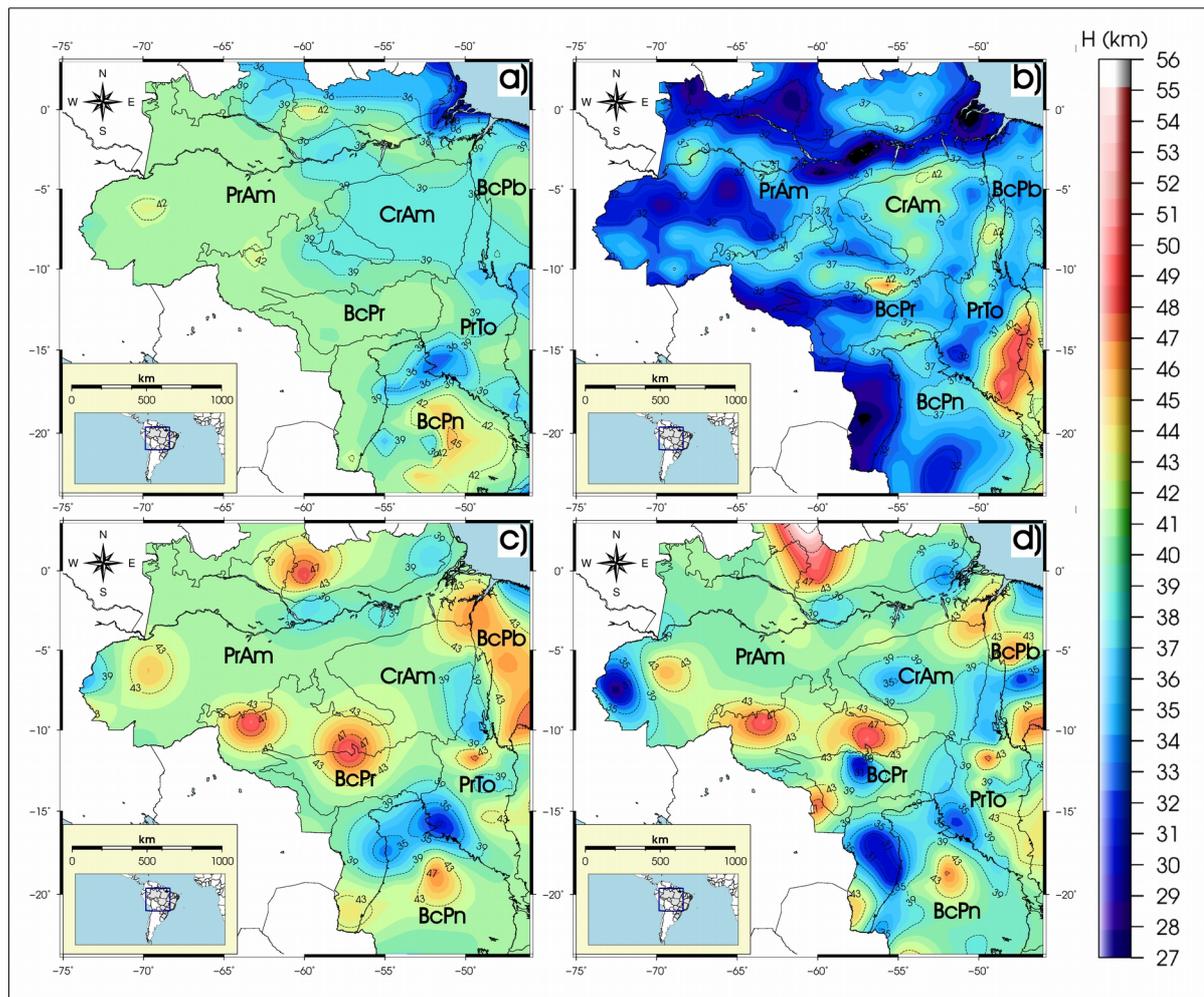


Figura 20 – a) Interpolação por mínima curvatura do modelo CRUST 1.0. b) Interpolação por mínima curvatura do modelo GEMMA 1.0. c) Interpolação por mínima curvatura com dados da literatura. d) Interpolação por mínima curvatura dos dados da literatura e obtidos neste trabalho. As siglas representam as províncias estruturais brasileiras: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).

Embora o modelo CRUST 1.0 (LASKE *et al.*, 2013), apresentado em 20a, seja mais suavizado, devido à pequena quantidade de informações para o Brasil e à resolução do seu *grid*, ainda possui alguma semelhança com os das figuras 20c e 20d, como no caso da Bacia do Paraná e do norte do Cráton Amazônico.

Já o modelo GEMMA 1.0 (REGUZZONI e SAMPIETRO, 2014), apresentado em 20b, de forma geral, subestima a espessura crustal do Cráton Amazônico e das bacias que o têm como embasamento, apresentando um valor médio abaixo dos 30 km, indicando que a inversão realizada para gerá-lo necessita de ajustes.

Apesar de grandes áreas do Cráton Amazônico não possuírem amostras,

fica evidente que o modelo gerado com todos os dados (figura 20d) possui melhor precisão que os demais, o que o torna mais confiável para ser utilizado como referência inicial em estudos crustais nas regiões Norte e Centro-Oeste.

6.4 Sismicidade e espessura crustal

O Brasil, por estar localizado na porção estável da Placa Sul-Americana, possui baixa sismicidade em comparação com regiões em bordas de placas e, até mesmo, em relação a regiões tectonicamente semelhantes, como o centro e o leste dos Estados Unidos, Austrália, Índia e China (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2014).

As causas da sismicidade intraplaca ainda são motivo de discussão, pois nem sempre é possível associá-la com alguma estrutura geológica identificável. Contudo, tende a se concentrar ao redor dos limites de crátons (MOONEY *et al.*, 2012) e em regiões de acúmulo de esforços na crosta superior devido ao afinamento litosférico, como na região do Brasil Central (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2004; 2014).

O mapa da figura 21 apresenta a distribuição dos sismos ocorridos no Brasil entre 1950 e 2016, com magnitudes a partir de 3,0. As informações foram retiradas do Catálogo Sísmico Brasileiro (SISBRA), fornecido pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB).

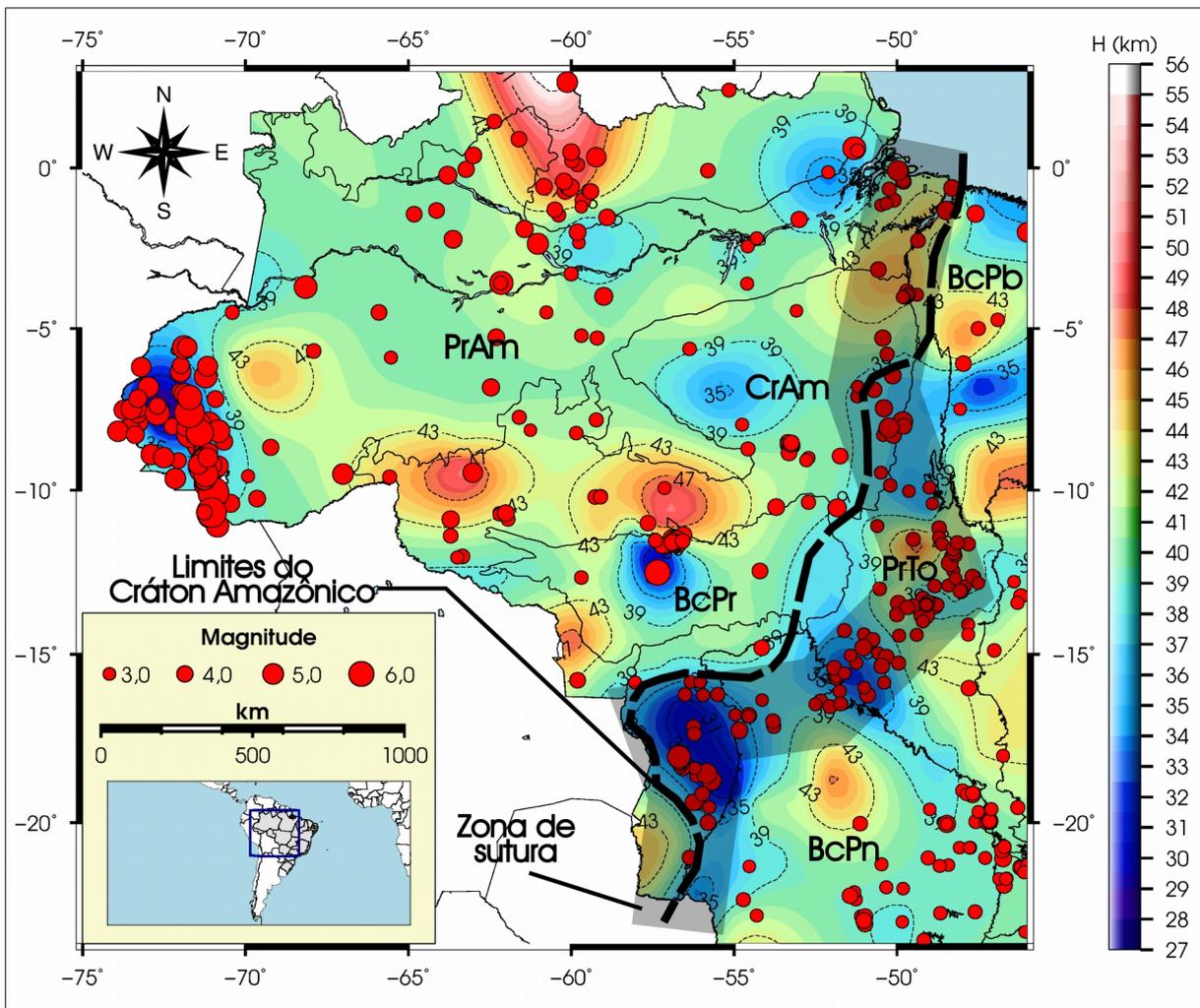


Figura 21 – Mapa com a interpolação dos dados obtidos neste trabalho e na literatura. Os círculos vermelhos representam sismos ocorridos entre 1950 e 2016. A linha tracejada em preto indica os limites crustais do Cráton Amazônico. A faixa escurecida indica a zona de sutura entre o cráton e as demais províncias. As siglas representam as províncias estruturais: PrAm (Província Amazonas), CrAm (Cráton Amazônico), BcPb (Bacia do Parnaíba), BcPn (Bacia do Paraná), BcPr (Bacia dos Parecis) e PrTo (Província Tocantins).

Apesar de estar condicionada à presença de estações sismográficas ao longo do Cráton Amazônico, que é bastante esparsa e irregular, é possível notar que a sismicidade se concentra ao longo de uma faixa com crosta geralmente mais fina ($H < 39$ km), que acompanha os limites do Cráton Amazônico (figura 21, faixa escurecida). Dessa forma, sua ocorrência está correlacionada com os limites ou zonas de sutura entre o cráton e as demais províncias estruturais, o que corrobora as teses de Mooney *et al.* (2012) e de Assumpção *et al.* (2004, 2014).

É possível notar também que existe uma concentração de sismos onde há uma variação abrupta na espessura da crosta, como entre a Bacia dos Parecis e o

Cráton Amazônico e entre este e a Província Amazonas. Contudo, ainda não há elementos suficientes para afirmar que isso tenha influência direta sobre a sismicidade.

Com exceção da região de crosta mais fina localizada na Bacia do Acre, onde ocorrem sismos profundos relacionados à subducção da Placa da Nazca, a sismicidade observada no Brasil possui causas bastante diversas, indicando que não há uma forte correlação entre crostas com espessuras menores do que 35 km e a ocorrência de sismos, como citado por Agurto-Detzel *et al.* (2015). De fato, essa tendência é observada somente para regiões com espessura crustal igual ou menor que 39 km, localizadas nas bordas do Cráton Amazônico.

7. CONCLUSÕES

De maneira geral, o método da Função do Receptor (LIGORRÍA e AMMON, 1999), aliado ao empilhamento H-k (ZHU e KANAMORI, 2000), forneceu valores de espessura crustal e razão V_P/V_S com boa precisão, demonstrando a qualidade dos dados fornecidos pelas instituições de pesquisa.

Os novos resultados preencheram lacunas de informação crustal, principalmente para o Cráton Amazônico, e tornaram possível a criação de um modelo de espessura da crosta mais preciso para toda a região de estudo, em comparação com os modelos CRUST 1.0 (LASKE *et al.*, 2013) e GEMMA 1.0 (REGUZZONI e SAMPIETRO, 2014).

A espessura crustal média das regiões Norte e Centro-Oeste foi estimada em 38,7 km e, portanto, de acordo com as médias globais para crostas continentais (39,2 km) e regiões de escudos e plataformas (41,5 km), segundo Christensen e Mooney (1995). Além disso, a razão V_P/V_S média, estimada em 1,72, indica uma composição crustal predominantemente félsica, de acordo com a relação de Musacchio *et al.* (1997).

Bacias sedimentares que passaram por algum processo de estiramento crustal durante sua formação ou evolução tectônica, como a Bacia dos Parecis e do Parnaíba, possuem uma crosta com espessura média abaixo de 37 km. Contudo, são necessários mais dados para dar peso a essa afirmação, pois tais regiões possuem um número reduzido de resultados.

Apesar de ser possível diferenciar regiões cratônicas de bacias sedimentares, devido à grande variabilidade nos valores de espessura crustal e razão V_P/V_S , não é possível estipular um valor característico de cada parâmetro quando se considera o contexto das províncias estruturais.

Não foi possível estabelecer uma correlação entre a geocronologia das províncias do Cráton Amazônico e sua espessura crustal, como citado por Lloyd *et al.* (2010), uma vez que existem regiões de crosta mais espessa em províncias mais jovens, e de crosta mais fina, em províncias mais antigas.

As regiões com crosta mais espessa, acima de 43 km, localizadas no Cráton Amazônico e na Bacia do Paraná, podem estar relacionadas a blocos

cratônicos antigos, que fizeram parte dos paleocontinentes Amazônico, São Francisco/Congo e Paranapanema. Este último, por sua vez, também possui existência confirmada por dados geofísicos (MANTOVANI *et al.*, 2005).

A delimitação do Cráton Amazônico, em termos de espessura crustal, segue o padrão da distribuição da sismicidade em suas bordas. Tal delimitação também corrobora estudos geofísicos (FUCK *et al.*, 2008; ROSA *et al.*, 2016) e representa a zona de sutura resultante da colisão entre os paleocontinentes mencionados.

Não foi encontrada uma forte correlação indicando que regiões com espessura crustal igual ou inferior a 35 km possuam maior sismicidade, como citado por Agurto-Detzel *et al.* (2015).

Recomenda-se, para estudos futuros, a utilização do método da Função do Receptor (FR) para dados de estações não incluídas neste trabalho e a construção de modelos de velocidade por meio da inversão conjunta de FR e curvas de dispersão de ondas de superfície para o Cráton Amazônico e adjacências.

REFERÊNCIAS

AGURTO-DETZEL, H. ASSUMPÇÃO, M. BIANCHI, M. e PIRCHINER, M. *Intraplate seismicity in mid-plate South America: correlations with geophysical lithospheric parameters*. Geological Society, London, Special Publications, V. 432 (1):3, 2015.

ALBUQUERQUE, D. F., PAVÃO, C. G., SILVEIRA, R. T. G., SANTOS, I. G. e FRANÇA, G. S. *Crustal thickness estimatives and Vp/Vs ratio using receiver functions*. In: 12th International Congress of Brazilian Geophysical Society, Extended Abstract, 4 p., 2011.

ALBUQUERQUE, D. F. 2014. 117 p. *Determinação de espessuras crustais utilizando o método da Função do Receptor*. Trabalho de Conclusão de Curso (Geofísica), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2014.

ALMEIDA F. F. M., HASUI Y., BRITO NEVES, B. B. e FUCK, R. A. *Brazilian Structural Provinces: An Introduction*. Earth Science Review, V. 17, p. 1-29, 1981.

ALMEIDA, F. F. M., BRITO NEVES, B. B. e DAL RÉ CARNEIRO, C. *The origin and evolution of the South American Platform*. Earth-Science Reviews, V. 50, p. 77-111, 2000.

AMARAL, G. *Geologia pré-cambriana da Região Amazônica*. 1974. 212 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.

AMMON, C. J., RANDALL, G. E. e ZANDT, G. *On the Nonuniqueness of Receiver Function Inversions*. Journal of Geophysical Research, V. 95, N. B10, p. 15.303-15.318, 1990.

AMMON, C. J. *The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms*. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 81, N. 6, p. 2504-2510, 1991.

ASSUMPÇÃO, M. S., SCHIMMEL, M., ESCALANTE, C., BARBOSA, J. R., ROCHA, M. e BARROS, L. V. *Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots*. Geophysical Journal International, V. 159, p. 390-399, 2004.

ASSUMPÇÃO, M. S., BIANCHI, M. JULIÀ, J., DIAS, F. L., FRANÇA, G. S., NASCIMENTO, R. M., DROUET, S., PAVÃO, C. G., ALBUQUERQUE, D. F. e LOPES, A. E. V. *Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features*. Journal of South American Earth Sciences, V. 43, p. 74-85, 2013.

ASSUMPÇÃO, M. S., FERREIRA, J., BARROS, L. V., BEZERRA, H., FRANÇA, G. S., BARBOSA, J. R., MENEZES, E., RIBOTTA, L. C., PIRCHINER, M., NASCIMENTO, A. e DOURADO, J. C. *Intraplate seismicity in Brazil*. In: *Intraplate Earthquakes*, Cambridge University Press, p. 50-71, 2014.

ASSUMPÇÃO, M., BIANCHI, M., ALBUQUERQUE, D. F., FRANÇA, G. S. L. e BARROS, L. *Crustal Thickness Map in South America: an updated version*. In: 1st Brazilian Symposium on Seismology, Resumo expandido, 5 p., Brasília, 2015.

BAHIA, R. B. C., MARTINS NETO, M. A., BARBOSA, M. S. S. e PEDREIRA, A. J. *Análise da evolução tectonossedimentar da Bacia dos Parecis através de métodos potenciais*. Revista Brasileira de Geociências, V. 37 (4), p. 639-649, 2007.

BIANCHI, M. B. *Variações da estrutura da crosta, litosfera e manto para a plataforma Sul-Americana através de funções do receptor para ondas P e S*. 2008. 134 p. Tese (Doutorado em Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008.

CHRISTENSEN, N. I. e MOONEY, W. D. *Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view*. Journal of Geophysical Research, V. 100, N. B7, p. 9761-9788, 1995.

CLAYTON, R. W. e WIGGINS, R. A. *Source shape estimation and deconvolution of*

teleseismic body waves. Geophysical Journal, V. 47 (1), p. 151-177, 1976.

COOK, F. A., WHITE, D. J., JONES, A. G., EATON, D. W. S., HALL, J. e CLOWES, R. M. *How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovicic discontinuity and crust-mantle transition*. Canadian Journal of Earth Sciences, V. 47, p. 315-351, 2010.

CORDANI, U. G., TASSINARI, C. C. G., TEIXEIRA, W., BASEI, M. A. S. e KAWASHITA, K. *Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos*. In: Congresso Geológico Chileno, 2, Santiago. Actas. Santiago, V. 4, p. 137-148, 1979.

CORDANI, U. G., GIUSEPPE, U., BRITO NEVES, B. B. de, FUCK, R. A., PORTO, A. THOMAZ FILHO e CUNHA, F. M. B. da. *Estudo preliminar de integração do Pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras*. Ciência, Técnica, Petróleo, Seção de Exploração de Petróleo, V. 15, p. 20-27, 1984.

COSTA, M. M. D., FRANÇA, G. S. e CHIMPLIGANOND, C. N. *Estudo da Estrutura da crosta da região norte do Brasil usando a Função do Receptor*. In: III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Resumo expandido, 2008.

COSTA, M. M. D., FRANÇA, G. S. e CHIMPLIGANOND, C. N. *Função do Receptor sob três estações na Região Norte do Brasil*. In: 5º Congresso de Iniciação Científica do Distrito Federal, Brasília. XIV Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Brasília, 2008.

CUNHA, P. R. da C., MELO, J. H. G. de e SILVA, O. B. da. *Bacia do Amazonas*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, V. 15, N. 2, p. 227-251, 2007.

DZIEWONSKI, A. M. E ANDERSON, D. L. *Preliminary reference Earth model*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, V. 25 (4), p. 297-356, 1981.

EFRON, B. e TIBSHIRANI, R. *Statistical Data Analysis in the Computer Age*. Science, New Series, V. 253, N. 5018, p. 390-395, 1991.

EIRAS, J. F., BECKER, C. R., SOUZA, E. M., GONZAGA, F. G. SILVA, J. G. F., DANIEL, L. M. F., MATSUDA, N. S. e FEIJÓ, F. J. *Bacia do Solimões*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, V. 8, N. 1, p. 17-45, 1994.

FARIA, H. P. A. F. 2015. 162 p. *Caracterização de domínios tectono-geofísicos na Bacia dos Parecis com base em dados de métodos potenciais*. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2015.

FEIJÓ, F. J. e SOUZA, R. G. *Bacia do Acre*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, V. 8, N. 1, p. 9-16, 1994.

FILHO, P. K. M. M. 2014. 66 p. *Caracterização da estrutura da crosta da Serra do Mar: integração de dados de função do receptor com estações sismográficas de período curto*. Trabalho Final de Graduação (Geofísica), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2014.

FRANÇA, G. S. *Estrutura da crosta no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, usando função do receptor*. 2003. 165 p. Tese (Doutorado em Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2003.

FRANK, H. T., GOMES, M. E. B. e FORMOSO, M. L. L. *Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America*. Pesquisas em Geociências, V. 36 (1), p. 49-57, 2009.

FUCK, R. A. *A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins*. In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, V. 4. Anais da Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 184-187, 1994.

FUCK, R. A., BRITO NEVES, B. B. e SCHOBENHAUS, C. *Rodinia descendants in South America*. Science Direct, Precambrian Research, V. 60, p. 108-126, 2008.

GÓES, A. M. *A formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba*. 1995. 204 p. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1995.

GOLDSTEIN, P. e SNOKE, A. *SAC Availability for the IRIS Community*. Incorporated Institutions for Seismology, Data Management Center, Electronic Newsletter, 2008. Disponível em: <<http://ds.iris.edu/ds/newsletter/vol10/no3/sac-v1012-release>>. Acesso em 16 de janeiro de 2014.

HASUI Y., TASSINARI, C. C. G., SIGA JR., O., TEIXEIRA, W., ALMEIDA, F. F. M. e KAWASHITA, K. *Datações Rb-Sr e K-Ar do centro norte do Brasil e seu significado geológico-geotectônico*. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, V. 31, Anais, p. 2659-2667, 1980.

HASUI, Y., HARALYI, N. E. e SCHOBENHAUS, C. *Elementos geofísicos e geológicos da Região Amazônica: Subsídios para o modelo geodinâmico*. In: SYMPOSIUM AMAZONICO 2. Anais DNPM, 518 p., 1984.

IRIS DMC. *Data Services Products: EARS EarthScope Automated Receiver Survey*, 2010. < doi:10.17611/DP/EARS.1 >.

JAMES, D. E., ASSUMPÇÃO, M. S. de, SNOKE, J. A., RIBOTTA, L. C. e KUEHNEL, R. *Seismic Studies of Continental Lithosphere Beneath SE Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, V. 65, N. suplemento, p. 227-250, 1993.

JULIÀ, J., ASSUMPÇÃO, M. e ROCHA, M. P. *Deep crustal structure of the Paraná Basin from receiver functions and Rayleigh-wave dispersion: evidence for a fragmented cratonic root*. Journal of Geophysical Research, V. 113, B08318, 2008.

KIKUCHI, M. e KANAMORI, K. *Inversion of complex body waves*. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 72, N. 2, p. 491-506, 1982.

KRÜGER, F., SCHERBAUM, F., ROSA, J. W. C., KIND, R., ZETSCHKE, F. e HOHNE, J. *Crustal and upper mantle structure in the Amazon region (Brazil) determined with broadband mobile stations*. Journal of Geophysical Research, V. 107 (B10), p. 2265, 2002.

LANGSTON, C. A. *Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves*. Journal of Geophysical Research, V. 84, p. 4749-4762, 1979.

LASKE, G., MASTERS., G., MA, Z. e PASYANOS, M. *Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust*. Geophysical Research Abstracts, V. 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.

LIGORRÍA, J. P. e AMMON, C. J. *Iterative Deconvolution and Receiver-Function Estimation*. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 89 (5), p. 1395-1400, 1999.

LLOYD, S., VAN DER LEE, S., FRANÇA, G.S., ASSUMPÇÃO, M. e FENG, M. *Moho map of South America from receiver functions and surface waves*. Journal of Geophysical Research, V. 115, B11315, 2010.

MANTOVANI, M. S. M. e QUINTAS, M. C. L. *A contribution to the study of the Paraná basin evolution*. 30th International Geological Congress (IUGS), Abstracts V. 3, pp. 102, 1996.

MANTOVANI, M. S. M., QUINTAS, M. C. L., SHUKOWSKY, W. e BRITO NEVES, B. B. *Delimitation of the Paranapanema Proterozoic block: a geophysical contribution*. Episodes, V. 28, N. 1, p. 18-22, 2005.

MILANI, E. J. e THOMAZ FILHO, A. *Sedimentary basins of South America*. P. 389-449. In: CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAZ-FILHO, A. e CAMPOS, D. A. (Eds). *Tectonic evolution of South America*. 31th International Geological Congress. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências e Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), 856 p., 2000.

MILJANOVIC, V. *Geotool software user guide*. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), IDC/SA/SI, 217 p., 2007.

MOONEY, W. D., RITSEMA, J. e HWANG, Y. *Crustal seismicity and maximum earthquake magnitudes (M_{max}) in stable continental regions (SCRs): correlation with the seismic velocity of the lithosphere*. Earth and Planetary Science Letters, V. 357, p. 78-83, 2012.

MUSACCHIO, G., MOONEY, W. D. e LUETGERT, J. H. *Composition of the crust in the Grenville and Appalachian Provinces of North America inferred from V_p/V_s ratios*. Journal of Geophysical Research, V. 102, N. B7, p. 15.225-15.241, 1997.

NASCIMENTO, P. F. 2011. 124 p. *Inversão de dados Geofísicos do Brasil Central*. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2011.

PAVÃO, C. G., FRANÇA, G. S., MAROTTA, G. S., MENEZES, P. H. B. J., NETO, G. B. S. e ROIG, H. L. *Spatial Interpolation Applied a Crustal Thickness in Brazil*. Journal of Geographic Information System, V. 4, p. 142-152, 2012.

PIMENTEL, M. e FUCK, R. A. *Neoproterozoic crustal accretion in Central Brazil*. Geology, V. 20 (4), p. 375-379, 1992.

PRESS, F., GROTZINGER, J., SIEVER, R. e JORDAN, T. *Para Entender a Terra*. 4ª edição - Porto Alegre: Bookman, 656 p., 2006.

REGUZZONI, A. e SAMPIETRO, D. *GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, V. 35A, p. 31-43, 2014.

ROSA, J. W. C., ROSA, J. W. C. e FUCK, R. A. *The structure of the Amazonian craton: Available geophysical evidence*. Journal of South American Earth Sciences, V. 70, p. 162-173, 2016.

SANTOS, J. O. S., POTTER, P. E., REIS, N. J., HARTMANN, L. A., FLETCHER, I. R. e MCNAUGHTON, N. J. *Age, source and regional stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima - like outliers in northern South America based on U-Pb geochronology*. Geological Society of America Bulletin, V. 115 (3), p. 331-348, 2003.

SANTOS, J. O. S. *Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil-Central*. In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H., Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas e SIG. CPRM. Brasília. Editora UnB, 673 p., 2004.

SCHOBENHAUS, C. e CAMPOS, D. de A. *Evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais*. Geologia do Brasil. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000. Coord. Carlos Schobbenhaus, Diógenes de Almeida Campos, Gilberto Ruy Derze, Haroldo Asmus. Brasília. Departamento Nacional de Produção Mineral, 1984.

SCHOBENHAUS, C. e BRITO NEVES, B. B. *A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana*. In: BIZZI, L. A, SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M. E GONÇALVES, J. H. (Eds.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil, p. 5-54, CPRM, 2003.

SILVEIRA, R. T., ALBUQUERQUE, D. F., SANTOS, I. G. dos, PAVÃO, C. G. e FRANÇA, G. S. *Função do Receptor no domínio do tempo e estimativas com PWSS*

para espessuras crustais do Observatório Sismológico. In: 8º Congresso de Iniciação Científica do Distrito Federal, 2011.

SIQUEIRA, L. P. *Bacia dos Parecis*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, V. 3 (1/2), p. 3-16, 1989.

SMITH, W. H. F e WESSEL, P. *Gridding with continuous curvature splines in tension*. Society of Exploration Geophysicists, V. 55, N. 3, p. 293-305, 1990.

SOARES, J. E., BERROCAL, J., FUCK, R. A., MOONEY, W. D. e VENTURA, D. B. R. *Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: A deep seismic refraction study*. Journal of Geophysical Research, V. 111, B12302, p. 1-31, 2006.

TRINDADE, C. R. 2014. 107 p. *Espessura crustal e razão de Poisson do Brasil central: uma aproximação por função do receptor*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (Unb), 2014.

TRINDADE, C. R., SOARES, J. E. P., FUCK, R. A., CARMELO, A. C. e PEIXOTO, C. L. O. *Estrutura crustal do Brasil Central*. Comunicações Geológicas, N. 101, Especial I, p. 339-343, 2014.

UNRUG, R. *The assembly of Gondwanaland*. Episodes, V. 19, N. 1 e 2, p. 11-20, 1996.

WESSEL, P., SMITH, W. H. F., SCHARROO, R. LUIS, J. F. e WOBBE, F. *Generic Mapping Tools: Improved version released*. EOS Trans. AGU, V. 94, p. 409-410, 2013.

ZALÁN P. V., WOLFF S., ASTOLFI M. A. M., VIEIRA, I. S., CONCEIÇÃO, J. C. J., APPI, V. T., SANTOS NETO, E. V., CERQUEIRA, J. R. e MARQUES, A. *The Paraná Basin, Brazil*. In: LEIGHTON, M. W., KOLATA, D. R., OLTZ, D. F. e EIDEL, J. J. (Eds.). Interior cratonic basins. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists,

AAPG Memoir, V. 51, p. 681-708, 1990.

ZHU, L. e KANAMORI, H. *Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions*. Journal of Geophysical Research, V. 105, N. B2, p. 2969-2980, 2000.

ANEXO A – Resultados de Função do Receptor radial e do empilhamento H-k.

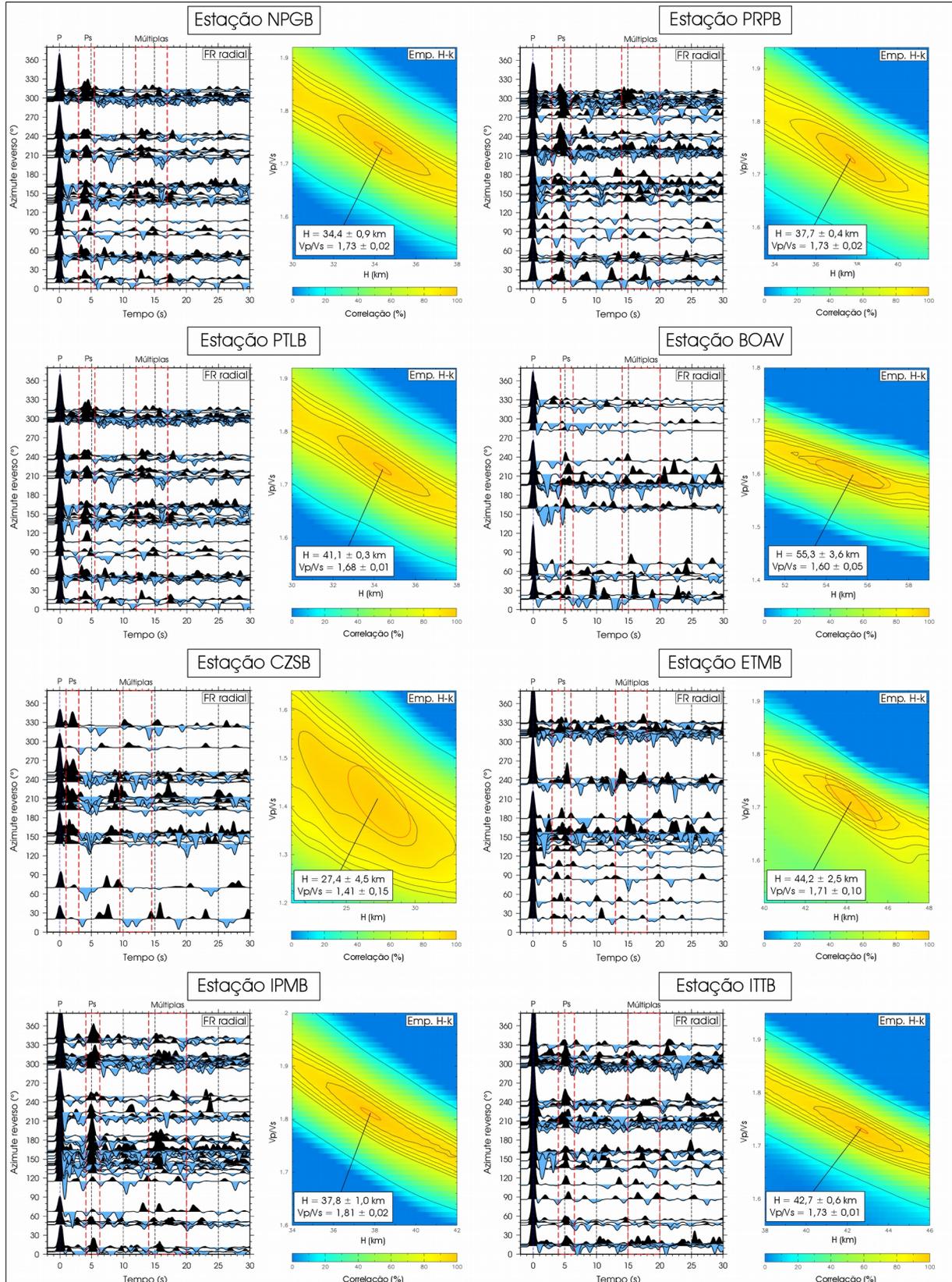


Figura 22 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações NPGB, PRPB, PTLB, BOAV, CZSB, ETMB, IPMB e ITTB.

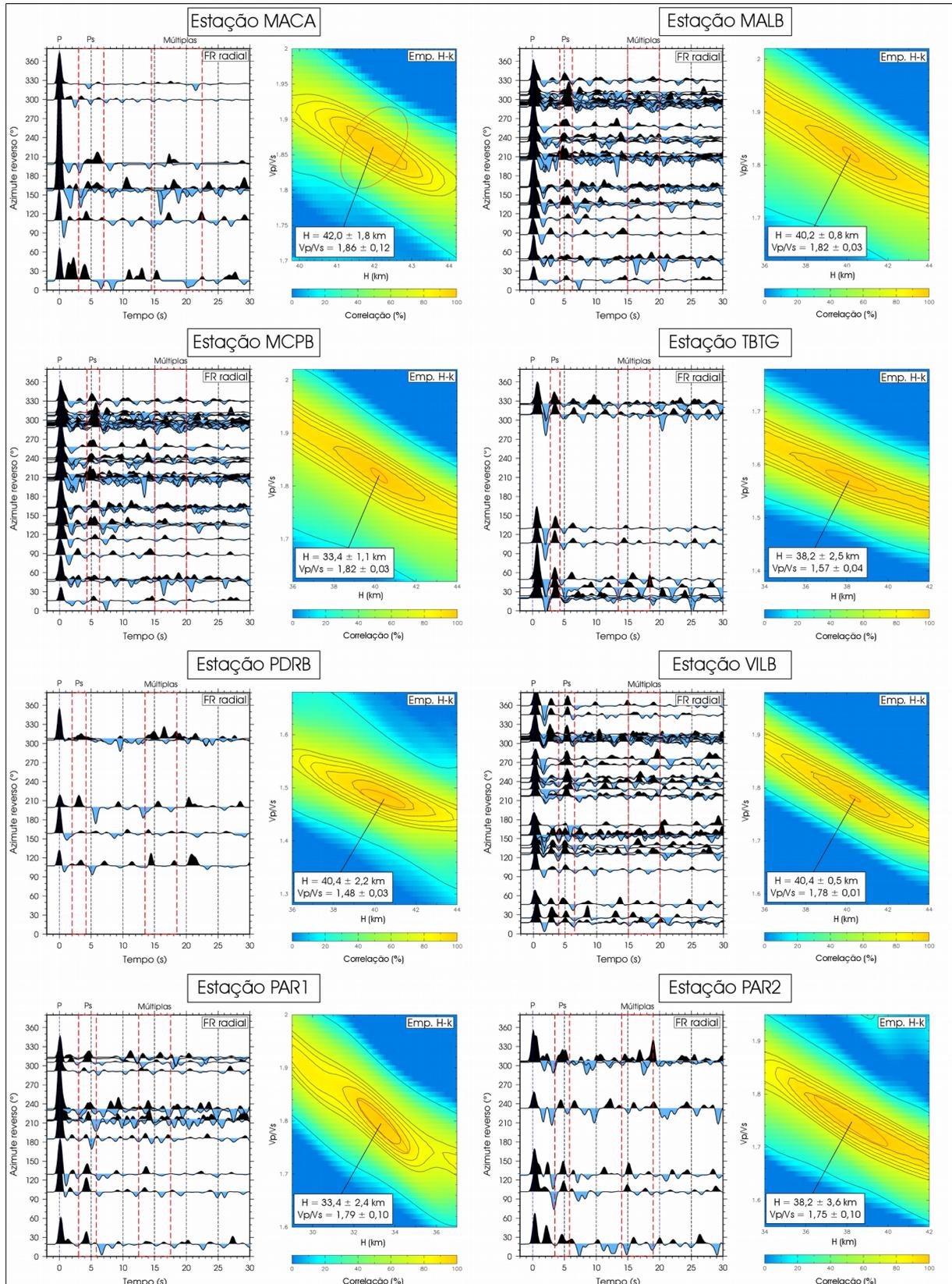


Figura 23 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações MACA, MALB, MCPB, TBTG, PDRB, VILB, PAR1 e PAR2.

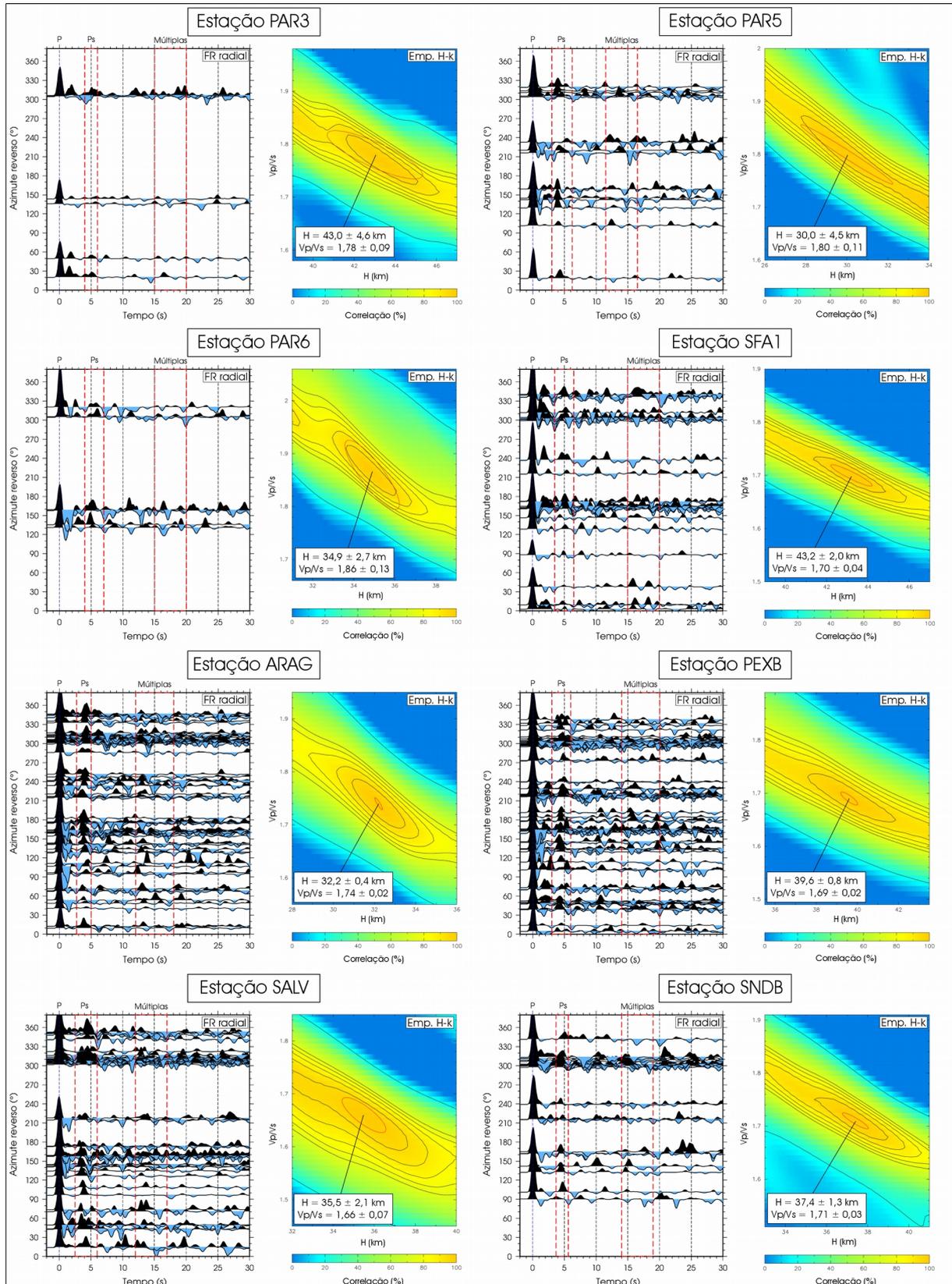


Figura 24 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações PAR3, PAR5, PAR6, SFA1, ARAG, PEXB, SALV e SNDB.

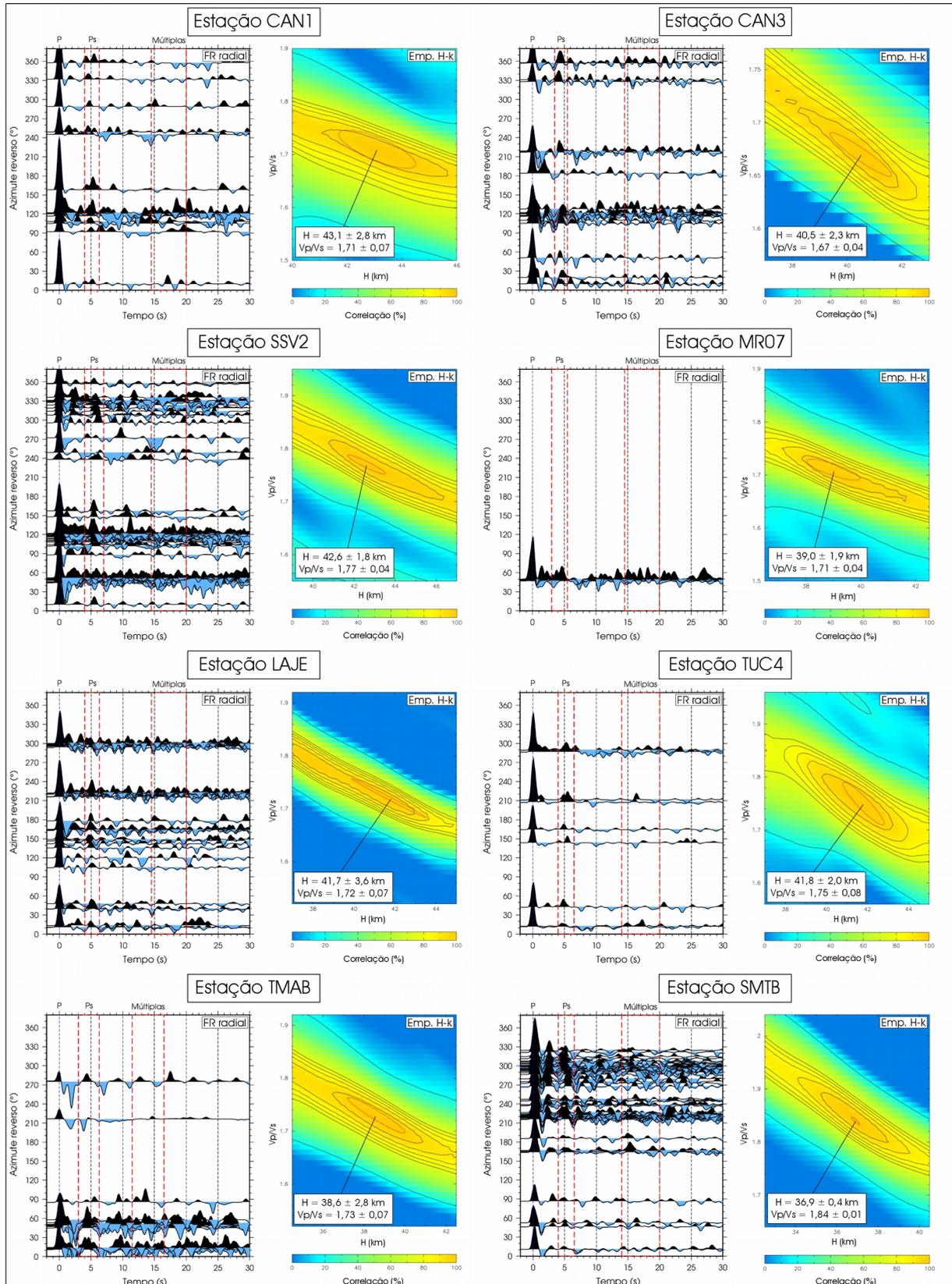


Figura 25 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações CAN1, CAN3, SSV2, MR07, LAJE, TUC4, TMAB e SMTB.

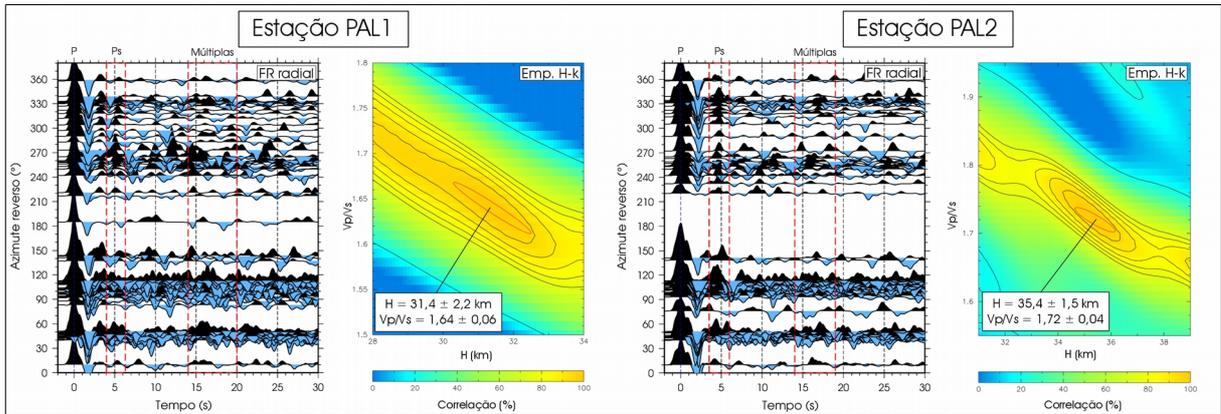


Figura 26 – Função do Receptor radial e empilhamento H-k para as estações PAL1 e PAL2.

ANEXO B – Banco de dados de espessura crustal e razão V_p/V_s .

Tabela 10 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para o Cráton Amazônico.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| PTGA | -0,7308 | -59,9666 | 141 | $48,0 \pm 6,9$ | - | Krüger <i>et al.</i> (2002). |
| SAML-S | -9,2000 | -63,1832 | 152 | $50,5 \pm 1,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| SAML-NW | -8,8000 | -63,3500 | 152 | $44,9 \pm 1,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| SAML | -8,9500 | -63,1800 | 120 | $43,0 \pm 2,8$ | $1,80 \pm 0,03$ | IRIS/EARS. |
| SAMB | -8,9120 | -63,2990 | 120 | $43,2 \pm 2,7$ | $1,81 \pm 0,05$ | Costa <i>et al.</i> (2008). |
| TUCB | -3,7340 | -49,8250 | 225 | $46,0 \pm 3,5$ | $1,66 \pm 0,08$ | Costa <i>et al.</i> (2008). |
| JUAB | -11,2163 | -57,2577 | 279 | 50,0 | 1,85 | Costa <i>et al.</i> (2008). |
| SNVB | -0,9051 | -51,8771 | 248 | $37,0 \pm 0,7$ | $1,69 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CRJB | -6,1702 | -50,1546 | 757 | $37,8 \pm 0,6$ | $1,71 \pm 0,05$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| TUCA | -3,7920 | -49,7090 | 225 | $41,4 \pm 1,5$ | $1,74 \pm 0,05$ | Albuquerque (2014). |
| TR1 | -5,3600 | -50,2300 | 207 | $42,3 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR801 | -5,4300 | -49,9500 | 206 | $40,9 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR1601 | -5,4600 | -49,6400 | 164 | $39,4 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |

Tabela 11 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia do Paraná.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| JATB | -17,8929 | -51,4929 | 817 | $43,8 \pm 0,8$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PP1B | -17,6003 | -54,8797 | 363 | $33,2 \pm 0,6$ | $1,71 \pm 0,02$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CMPA | -19,5792 | -54,1688 | 480 | $42,2 \pm 0,9$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CCUB | -18,4253 | -51,2126 | 474 | $43,8 \pm 2,6$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CDSB | -18,7655 | -52,8393 | 752 | $40,7 \pm 1,2$ | $1,73 \pm 0,03$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| APOB | -18,5471 | -52,0251 | 580 | $47,6 \pm 7,5$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| APOB2 | -18,5081 | -52,0740 | 657 | $46,2 \pm 2,9$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| C2SB | -18,7688 | -52,8377 | 764 | $39,2 \pm 3,3$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |

Tabela 12 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Província Amazonas.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|----------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| NEBL | -2,1000 | -59,6000 | 90 | $38,0 \pm 2,0$ | $1,83 \pm 0,10$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| JABU | -2,9250 | -60,1000 | 50 | 38,0 | 1,85 | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| TAJA | -2,0000 | -60,1000 | 90 | 38,0 | 1,85 | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| BALB | -1,9156 | -59,4138 | 191 | $36,0 \pm 0,4$ | $1,89 \pm 0,01$ | Silveira <i>et al.</i> (2011). |
| RIOB | -10,1501 | -67,7470 | 150 | $41,0 \pm 8,7$ | $1,80 \pm 0,07$ | IRIS/EARS. |
| ADSL1 | -6,1500 | -69,9000 | 100 | $45,0 \pm 3,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| ADSL2 | -6,5000 | -69,9000 | 170 | $45,0 \pm 4,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP1 | -6,9700 | -74,6100 | 360 | $38,4 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP2 | -7,4700 | -73,7500 | 280 | $35,2 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP3 | -7,2900 | -74,2100 | 260 | $35,5 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP4 | -6,7000 | -74,7500 | 280 | $40,1 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP5 | -7,7200 | -74,4600 | 250 | $37,5 \pm 8,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PREP_PP6 | -8,0600 | -73,8700 | 490 | $42,4 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| STMB | -2,7500 | -54,9600 | 195 | $38,4 \pm 2,2$ | $1,54 \pm 0,02$ | Bianchi (2008). |

Tabela 13 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia do Parnaíba.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| BEB | -1,4503 | -48,4443 | 2 | $44,8 \pm 1,2$ | $1,58 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| IGCB | -1,1272 | -47,6085 | 55 | $36,2 \pm 1,2$ | $1,75 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| LEM1 | -9,8500 | -48,3000 | 330 | $39,9 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| TR4001 | -5,5100 | -48,6700 | 101 | $43,6 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR4801 | -5,6100 | -48,3300 | 94 | $45,1 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR5601 | -5,7400 | -48,0700 | 144 | $46,5 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR6401 | -5,6200 | -47,8300 | 301 | $46,0 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| LJDO | -9,7700 | -48,2900 | 273 | $42,9 \pm 0,4$ | $1,72 \pm 0,02$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| SAMA | -8,8600 | -47,5900 | 312 | $44,1 \pm 0,7$ | $1,70 \pm 0,01$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| NOAC | -9,9900 | -47,6300 | 292 | $44,8 \pm 0,9$ | 1,71 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| MOCA | -10,6300 | -47,8300 | 262 | $43,9 \pm 0,6$ | $1,71 \pm 0,01$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| PATO | -10,6400 | -47,3100 | 349 | $44,7 \pm 2,7$ | 1,71 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |

Tabela 14 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Província Tocantins.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|-----------------------------------|
| CRIB | -10,5800 | -49,0300 | 300 | $35,0 \pm 8,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PORB | -13,3304 | -49,0787 | 365 | $36,4 \pm 0,6$ | $1,72 \pm 0,02$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| PAZB | -15,1369 | -50,8634 | 410 | $34,0 \pm 1,0$ | $1,73 \pm 0,10$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| GNSB | -15,2644 | -49,0855 | 1099 | $43,2 \pm 0,7$ | $1,72 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| ARAB | -15,6646 | -51,8078 | 290 | $30,6 \pm 1,2$ | 1,84 | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| SLMB | -16,5705 | -50,3455 | 700 | $33,5 \pm 0,6$ | $1,71 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CORB | -17,7433 | -48,6892 | 950 | $39,2 \pm 0,8$ | $1,81 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CV1B | -13,8142 | -47,3767 | 801 | $42,0 \pm 2,3$ | $1,62 \pm 0,08$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CV3B | -13,7571 | -47,2241 | 703 | $39,9 \pm 0,9$ | $1,69 \pm 0,01$ | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CVC3W | -13,8000 | -47,4500 | 1030 | $41,1 \pm 1,8$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CVC3E | -13,8000 | -47,2700 | 904 | $37,9 \pm 1,4$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR1 | -13,3071 | -50,2557 | 340 | $42,0 \pm 5,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR2 | -13,2655 | -49,7129 | 280 | $43,4 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR3A | -13,3300 | -49,2900 | 380 | $36,3 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR4 | -13,3909 | -48,8741 | 350 | $37,3 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR5 | -13,5469 | -48,5778 | 560 | $37,8 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR6A | -13,5000 | -48,3500 | 430 | $38,5 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR6B | -13,5300 | -48,0900 | 370 | $44,5 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| POR7 | -13,6329 | -47,7949 | 850 | $44,3 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CVC3 | -13,8003 | -47,3753 | 950 | $41,8 \pm 2,0$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| BRA7 | -15,6418 | -48,0148 | 1020 | $43,0 \pm 0,1$ | $1,66 \pm 0,01$ | Albuquerque <i>et al.</i> (2014). |
| TR2401 | -5,4400 | -49,3400 | 124 | $40,8 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| TR3201 | -5,3700 | -49,0200 | 51 | $41,6 \pm 1,1$ | - | Assumpção <i>et al.</i> (2015). |
| RET9 | -13,2900 | -49,7200 | 275 | $52,9 \pm 0,9$ | $1,68 \pm 0,04$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| PIUM | -10,4400 | -49,1800 | 267 | $53,0 \pm 2,3$ | $1,67 \pm 0,08$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET2 | -11,7000 | -49,5300 | 194 | $48,8 \pm 2,4$ | $1,79 \pm 0,13$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET3-SE | -11,8700 | -49,2100 | 280 | $41,1 \pm 0,9$ | $1,73 \pm 0,02$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET3-SW | -11,8700 | -49,2100 | 280 | $53,0 \pm 0,9$ | $1,63 \pm 0,01$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET8 | -12,9700 | -50,1000 | 264 | $39,7 \pm 2,0$ | $1,78 \pm 0,04$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET1 | -10,6700 | -48,5500 | 252 | $41,3 \pm 1,3$ | $1,79 \pm 0,04$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| RET4 | -12,1800 | -48,7100 | 265 | $41,9 \pm 3,3$ | $1,70 \pm 0,04$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| PEXB-NW | -12,1056 | -48,3006 | 346 | $42,3 \pm 2,4$ | $1,73 \pm 0,05$ | Trindade <i>et al.</i> (2014). |

| | | | | | | |
|---------|----------|----------|------|------------|-------------|--------------------------------|
| TIRO3 | -13,3200 | -49,3500 | 375 | 36,0 | 1,71 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| PORB | -13,3300 | -49,0800 | 365 | 37,1 ± 0,9 | 1,75 ± 0,02 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| TIRO4 | -13,3800 | -48,8700 | 365 | 37,2 | 1,71 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| TIRO5 | -13,5400 | -48,5700 | 520 | 37,8 | 1,70 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| TIRO6 | -13,4800 | -48,2400 | 500 | 38,4 | 1,70 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| PEXB-SE | -12,1056 | -48,3006 | 346 | 38,8 ± 2,0 | 1,71 ± 0,09 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| PARN | -12,7400 | -47,6500 | 382 | 39,8 ± 0,7 | 1,70 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| NTVD | -11,7100 | -47,6800 | 349 | 39,4 ± 1,0 | 1,70 ± 0,04 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| DIAN | -11,4600 | -46,8900 | 516 | 40,3 ± 1,2 | 1,70 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| CAVA | -13,6300 | -47,8000 | 1000 | 37,1 | 1,67 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| TIRO7 | -13,6400 | -48,8100 | 875 | 44,1 | 1,69 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| CAVA-W | -13,6300 | -47,8000 | 1000 | 41,1 | 1,70 | Soares <i>et al.</i> (2006). |
| BDFB | -15,6418 | -48,0148 | 1195 | 43,0 ± 0,7 | 1,72 ± 0,02 | IRIS/EARS. |
| PTMB | -21,4600 | -57,4800 | 240 | 43,9 ± 1,4 | 1,74 ± 0,08 | Bianchi (2008). |
| CAVB | -13,8000 | -47,3700 | 859 | 39,5 ± 0,9 | 1,69 ± 0,01 | Soares <i>et al.</i> (2006). |

Tabela 15 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para o Cráton São Francisco.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| CVC4 | -13,8073 | -46,8773 | 750 | 40,4 ± 2,0 | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| CVC5 | -13,9586 | -46,3347 | 650 | 42,0 ± 2,0 | - | Assumpção <i>et al.</i> (2013). |
| SFTO | -10,1800 | -46,6400 | 365 | 46,7 ± 1,4 | 1,71 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| MATE | -10,5200 | -46,4500 | 518 | 44,7 ± 2,4 | 1,71 | Trindade <i>et al.</i> (2014). |
| TIRO9 | -13,9600 | -46,3300 | 625 | 42,6 | 1,69 | Soares <i>et al.</i> (2006). |

Tabela 16 – Valores de espessura crustal (H) e razão V_P/V_S obtidos no levantamento bibliográfico para a Bacia dos Parecis.

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Elevação (m) | $H \pm$ Erro (km) | $V_P/V_S \pm$ Erro | Referência |
|---------|--------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| PDRB | -11,6123 | -56,7296 | 330 | 39,2 ± 1,4 | 1,88 ± 0,02 | Albuquerque (2014). |