UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

***Estudo da Camada de Basalto em Bebedouro, Bacia do Paraná, com
Função do Receptor - Implicações para a Sismicidade Induzida por
Poços Profundos****

Aluno

Fábio Luiz Dias

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Assumpção

Dissertação apresentada ao Departamento Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

SÃO PAULO
2011

*Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP (2009/06626-3)

Nesta versão da dissertação, as correções sugeridas pela banca foram efetuadas.
A versão original se encontra na biblioteca.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus.

À minha família e em especial aos meus pais João e Maria e meu irmão Flávio por todo apoio durante esses anos de estudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo pela oportunidade, pelos conselhos, pela dedicação e pela paciência (principalmente nesse último mês).

Agradeço imensamente à amiga Prof Dra. Tereza Yamabe pelas sugestões e revisão do texto.

Ao Dr. Martin Schimmel pela enorme ajuda na execução trabalho.

Aos colegas de trabalho Célia, Cleuza e Zé Roberto e ao pessoal de informática da sismologia que sempre foram muito pacientes comigo (principalmente quando eu sobrecarregava as máquinas do laboratório).

À minhas amigas Diana, Thais, Tatiana e Vanessa pelos momentos de risos.

Aos amigos da Fonte.

Aos professores do IAG pela qualidade das aulas e aos meus colegas de pós-graduação.

À FAPESP pela bolsa concedida.

Resumo

Este trabalho consiste no estudo da estrutura sedimentar da Bacia do Paraná da região de Bebedouro utilizando função do receptor, ondas de superfície e sísmica de refração.

Funções do Receptor (FR) mostram a resposta da estrutura geológica abaixo de uma estação sismográfica. Para diminuir a não unicidade na inversão do traço de uma FR, foram usadas curvas de dispersão de ondas de superfície como vínculos adicionais. Ondas de superfície foram também obtidas com a correlação cruzada de ruído sísmico ambiental. Esse método passivo permite a obtenção de dispersão em períodos intermediários entre os dados de telessismos e os dados de sísmica rasa auxiliando na determinação estruturas sedimentares.

Foi utilizada a inversão conjunta de FR de alta e baixa frequência, dispersão de fase e grupo de períodos menores que 2 s e dispersão de ondas Love e Rayleigh continentais (períodos entre 10 e 100 s). Na inversão conjunta, foram usados vários modelos iniciais diferentes para garantir melhor cobertura do espaço de soluções possíveis. Os resultados mostram uma camada de basalto com uma espessura entre 200 e 400 m, sob uma camada superficial de arenito de 50 a 100m. O embasamento da bacia está torno de 2.5 – 3.0 km. A espessura e razão V_p/V_s crustal da região foi estimada em 40.0 (± 1.0) km e 1.78 (± 0.02).

Foi possível identificar zonas de baixa velocidade dentro do pacote de basalto, possivelmente relacionadas a zonas de fraturas ou camadas de basalto alterado. Estas camadas de baixa velocidade estão na parte sul, próximas à área de maior sismicidade induzida e também relativamente mais perto dos poços profundos de maior vazão. Isto corrobora com a hipótese de que a sismicidade local está associada à exploração de poços e estrutura de falhas pré-existentes.

Abstract

A study of the seismic structure of the Paraná Basin in Bebedouro, SP, was carried out with Receiver Functions (RF). Both low frequency (with ~ 0.5 Hz low pass filter) and high-frequency (~ 10 Hz) RFs were jointly inverted with surface wave dispersion curves.

Surface-wave data included: long-period group velocities of Rayleigh and Love waves from continental-scale tomography in the period range 10-100 s (useful to control crustal scale structure and Moho depth), intermediate period group velocities near 1s period obtained from cross-correlation of ambient noise (useful to control sedimentary structure), phase velocities near 0.2-1.0 s obtained from local earthquakes, and phase velocities of Rayleigh waves from shallow seismic refraction data near ~ 0.1 s period (useful to control shallow layers).

Joint inversion was obtained with several different initial models to better cover all possible solutions. The results indicate that the basalt layer is 200 to 400m thick, beneath sandstones of about 50 – 100m thick. The Basin basement was detected between 2.5 – 3.0 km depth, consistent with expected values from regional bore-hole data in the Paraná Basin.

Beneath several stations a low-velocity zone was detected in the middle of the basalt pack which is interpreted as a zone of fractured or altered basalt. This anomalous low-velocity layer was detected near the most seismically active zone in the Andes district. It is also relatively close to the deep wells with larger outflow. The existence of this low-velocity zone in the middle of the basalt layer is consistent with the model proposed for the water-well induced seismicity.

Índice

Agradecimentos.....	II
Resumo.....	III
Abstract.....	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas.....	XII
1. Introdução	1
2. Região de Estudo	3
2.1. Geologia Regional.....	3
2.2. Geologia de Bebedouro.....	7
2.3. Rede de estações sismográficas.....	10
3. Metodologia.....	12
3.1. Fundamentos do Método Função do Receptor	12
3.2. Fundamentos da Correlação do Ruído Ambiental.....	15
4. Processamento	19
4.1. Função do Receptor	19
4.1.1. Seleção de eventos.....	19
4.1.2. Cálculo da Função do Receptor.....	20
4.1.3. Efeito do filtro antes da deconvolução	22
4.1.4. Empilhamento da Função do Receptor	25
4.1.5. Inversão de dados.....	29
4.1.6. Determinação da descontinuidade de Moho	31
4.1.7. Modelos iniciais.....	32
4.2. Correlação de Ruído Ambiental.....	34
4.2.1. Normalização no tempo e frequência.....	35
4.2.2. Correlação Cruzada.....	36
4.2.3. Empilhamento da correlação de ruído.....	38
4.2.4. Pré-filtro antes da correlação de ruído e curvas de dispersão.....	40
5. Resultados.....	44
5.1. Correlação de Ruído Ambiental.....	44
5.2. Função do Receptor	48
5.2.1. Determinação da descontinuidade da Moho.....	48
5.2.2. Pré-filtro na estação BEB4B.....	49

5.2.3. <i>Função do Receptor nas estações</i>	52
5.2.4. <i>Escolha dos melhores modelos</i>	55
5.2.5. <i>Estruturas e Perfis de Velocidade S</i>	58
5.2.6. <i>Relação com a sismicidade</i>	65
6. Conclusões e Perspectivas	67
7. Referências Bibliográficas	68
A. ANEXO 1 – Lista de eventos usados na inversão FR	75
B. ANEXO 2 – Correlação Ruído	84
C. ANEXO 3 – Eventos usados na determinação da Moho	86
D. ANEXO 4 – FRs e curvas de dispersão para as estações BB15B e BB16B	91
E. ANEXO 5 – 16 melhores modelos para cada estação	93

Lista de Figuras

- Figura 2.1:** Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural (profundidade) do embasamento cristalino e as supersequências estratigráficas (modificado de Milani et al., 2004). Em vermelho a região de estudo, Bebedouro, SP..... 4
- Figura 2.2:** Coluna cronoestratigráfica com as principais seqüências deposicionais e principais eventos de tectônica e magnetismo da Bacia do Paraná segundo Milani, 2007... 6
- Figura 2.3:** Geologia da região de Bebedouro e Andes. O grupo sedimentar Bauru (verde-claro) é representado pela formação Adamantina em Bebedouro. Em verde-escuro temos o basalto Serra Geral (CPRM, 2001). 7
- Figura 2.4:** Cota do topo do basalto (altitude acima do nível do mar) obtida com dados de poços de Andes. 8
- Figura 2.5:** Perfis dos poços das fazendas Aparecida (P1-P10) e Santa Ana (StA) mostrados na Figura 2.4. A linha preta, em negrito, é a topografia. Em azul, o nível estático (NE – sem bombeamento) e o nível dinâmico (ND – com bombeamento), em vermelho, a cota do basalto. As cruzes indicam a região de fraturas e os círculos indicam limites interderrames. Dados baseados em cadastro do DAEE - Araraquara. Figura de Assumpção et al., 2007. 9
- Figura 2.6:** Espessura total do arenito da Formação Adamantina obtida pela diferença entre os valores da topografia e os da cota do basalto nos poços tubulares (pontos pretos). 9
- Figura 2.7:** Locais das estações sismográficas (triângulos) que operaram em Bebedouro no período de 2005-2010. As cores indicam a topografia (utilizada para calcular a espessura dos sedimentos) e a linha azul representa os córregos e rios. 10
- Figura 2.8:** Período de operação de cada estação da rede sismográfica de Bebedouro. As barras mais grossas identificam as estações de período contínuo. A coluna esquerda e direita indicam, respectivamente, o nome da estação sismográfica e o número de dias de funcionamento. 11
- Figura 3.1:** Diagrama de raio da Função do Receptor. a) Diagrama de raio simplificado mostrando as principais conversões da onda P em onda S. b) Registro da FR na componente radial. 12
- Figura 3.2:** Sistema linear com resposta $h(t)$. Ao ser submetido a uma função de entrada $f(t)$ é originada a saída $g(t)$ 15
- Figura 3.3:** Espectro ilustrando os dois picos do ruído microssísmico. O pico secundário (5 - 10s) tem origem na interação do oceano com a crosta e o pico primário (10 - 20 s) com origem na interação atmosfera-oceano. Adaptado de Bromirski (2009). 17
- Figura 3.4:** Representação esquemática da interação entre as ondas do oceano e a costa litorânea na geração de ondas de superfície com períodos entre 5 e 10 s (microssismo secundário). Figura de Hoffmann et al., 2002. 18
- Figura 4.1:** Fluxograma do processo da função do receptor. 19
- Figura 4.2:** Traços empilhados com ajuste maior que 85% da FR de alta frequência ($G=20$) para diversos pré-filtros passa-alta das estações BEB4B, BB15B e BB16B. Em preto 5.0 Hz, cinza 2.0 Hz, ciano 1.0 Hz, azul 0.5 Hz, verde 0.1 Hz, roxo 0.01 Hz e

vermelho é o traço sem filtro. A estação mais afetada nesse processo é a BEB4B (topo) onde há um deslocamento do primeiro pulso dependendo do filtro utilizado. Essa diferença é mais discreta em BB15B e BB16B (abaixo), onde os traços mais afetados são o de 5 Hz (preto) e sem filtro (vermelho). 23

Figura 4.3: Figura com as FR de baixa frequência ($G=1$) na estação BEB15B para diversos filtros passa-alta (HP) indicado na figura. Note que a fase os (indicada na figura) desaparece à medida que o filtro aumenta. As características do sismo estão no cabeçalho da figura. 24

Figura 4.4: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BEB4B separados em grupos (quadriláteros pretos numerados). As estrelas vermelhas representam os eventos distantes. Em azul, os eventos com distância menor que 20° . As estrelas pretas são eventos descartados, com FR diferente da média do seu grupo. Note-se que foram descartados os grupos 4, 7 e 8 por apresentarem FR diferentes entre si. O triângulo simboliza a rede sismográfica de Bebedouro. As curvas pretas são isolinhas de distância e a curva vermelha demarca a $\Delta=95^\circ$ 26

Figura 4.5: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BB15B. A legenda é a mesma da anterior. 27

Figura 4.6: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BB16B. A legenda é a mesma da figura 4.4. 27

Figura 4.7: Locais das estações sismográficas que operaram em Bebedouro. O destaque indica os grupos formados de acordo com os dados disponíveis. 30

Figura 4.8: Resultado tomográfico de onda P para BEB7 na refração sísmica rasa. Linha branca tracejada é a profundidade do basalto esperada, tendo como base os dados de poços tubulares da área (precisão de 5 a 10m). As velocidades da onda P estão em m/s. 32

Figura 4.9: Perfil de velocidade S (linha vermelha) da estação BEB7 (C) construído a partir da tomografia sísmica (linha azul) da figura anterior. As linhas vermelhas em A e B são as curvas teóricas correspondentes ao modelo inicial C. Note que a camada de basalto tem início em aproximadamente 60 m ($V_s=2.2$ km/s). Em algumas estações a camada de basalto foi prolongada, até que se obtivesse um bom ajuste na FR de alta frequência (A) e no SASW (B). 33

Figura 4.10: Fluxograma do processo da correlação de ruído. 34

Figura 4.11: Sismograma do dia 27 de fevereiro de 2010 (acima). Abaixo o sismograma após os filtros de normalização nos domínios do tempo e frequência. 36

Figura 4.12: Espectro de potência do registro de um dia na estação BB16B com normalização no tempo (one-bit normalization). É possível notar o pico do microssismo primário em ~ 0.065 Hz e o secundário ~ 0.12 Hz. O pico próximo de 0.04 Hz (~ 25 s) é originado no Golfo da Guiné. 36

Figura 4.13: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB15B. O dia da correlação é apontado no eixo das ordenadas (01-08 – janeiro de 2008). Cada sismograma representa um dia de correlação. As faixas cinza são dias sem dados em alguma das estações. Os diferentes padrões de picos são indicados na figura. A escala de amplitude é relativa. Os “picos móveis” são causados por deriva do relógio de uma das estações (falta de correção do relógio do registrador). A escala de amplitude é relativa. 37

Figura 4.14: Correlação de ruído ambiental entre as estações BEB4B e BB16B. São mostradas as curvas para o dia do terremoto do Chile (preto), um dia sem registro de evento telessísmico (vermelho) e o resultado final de 325 dias de correlação (azul)..... 38

Figura 4.15: Empilhamento para as correlações entre as estações BEB4B e BB15B com diferentes quantidades de dias. As cores indicam a evolução do traço empilhado conforme são acrescentados mais dias. Quanto mais próximo ao roxo menos dias foram utilizados, o traço vermelho indica o empilhamento para os 152 dias. 39

Figura 4.16: Dispersões entre as estações BEB4B-BB16B obtidas com diferentes filtros antes do processo de normalização no tempo e frequência. Em destaque azul as curvas que apresentam, aproximadamente, a mesma dispersão..... 41

Figura 4.17: Dispersões entre as estações BEB4B-BB15B obtidas com diferentes filtros antes do processo de normalização no tempo e frequência. Em destaque azul as curvas que apresentam, aproximadamente, a mesma dispersão..... 42

Figura 4.18: A) Dispersão entre as estações BEB4B-BB15B usando o filtro de 0.1-10 Hz. As cores indicam a amplitude da envoltória para cada período. A curva associada à faixa 0.5-2.0 Hz não é, nesse caso, a curva de maior energia. B) Dispersão entre as estações BEB4B-BB15B usando o filtro de 0.5-2 Hz. Mostrando a mesma curva agora com a que possui a maior energia. O traço que gerou a dispersão é mostrado à direita de cada figura. 42

Figura 5.1: Empilhamento da correlação de ruído ambiental. São empilhados 152 dias para o par de estações BEB4-BB15B (curva verde) e 325 dias para o par de estações BEB4-BB16B (curva vermelha)..... 44

Figura 5.2: Mapa com as estações sismográficas usadas na correlação de ruído ambiental: Em azul BEB4B, em verde BB15B e em BB16B vermelho. A estação BEB4B está mais próxima do oceano (fonte de ruído). 45

Figura 5.3: Curvas de dispersão de velocidade de ondas Rayleigh (círculos). Em verde a dispersão obtida com as estações BEB4B-BB15B e em vermelho, a dispersão para BEB4B-BB16B. Em azul temos a dispersão de velocidade de fase para a onda Rayleigh medida com sismos locais por Souza et al. (2008). 46

Figura 5.4: Espessura sedimentar da Formação Adamantina em Bebedouro. São mostradas as estações utilizadas por Souza et al., (2008) na obtenção da curva de dispersão de fase de onda Rayleigh (BEB8, BEB1, BEB11, BEB9B, BE12 e BEB4B) e as estações utilizadas na correlação de ruído (BEB4B e BB15B). A estação BB15B está sobre um maior pacote sedimentar do que as estações usadas por Souza et al., (2008). 47

Figura 5.5: Empilhamento HK com todos os eventos das estações BEB4B, BB15B, BB16B com os pesos 0.6, 0.2 e 0.1. A linha vermelha é a elipse de incerteza dos parâmetros. O círculo preto representa os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s (44 km e 1.73) obtidas por Assumpção et al. (2002) 49

Figura 5.6: FRs para a estação BEB4B com os pré-filtros passa-alta 2.0 Hz (esquerda) e 0.1 Hz (direita). O empilhamento das FRs na radial (vermelho) e na transversal (azul) é mostrado no quadro acima junto com a distância média (Δ_M) e back-azimute médio (Baz_M) do traço empilhado. Abaixo são as FRs utilizadas no empilhamento com o respectivo índice ajuste (Rep). As FR estão na mesma escala..... 50

Figura 5.7: Inversão das FRs para a estação BEB4B com os pré-filtros passa-alta 2.0 Hz (esquerda) e 0.1 Hz (direita). As cores indicam o ajuste: quanto mais próximo do vermelho melhor o ajuste do modelo à curva FR. A linha preta é o modelo médio. Os modelos são

mostrados em duas escalas (0 – 1 km e 0 – 4 km). A seta indica a camada de alta velocidade que não é evidente na FR com pré-filtro 0.1 Hz..... 51

Figura 5.8: FRs para a estação BB15B. O empilhamento das FRs na radial (vermelho) e na transversal (azul) é mostrado no quadro acima junto com a distância média (Δ_M) e back-azimute médio (BAZ_M) do traço empilhado. Abaixo são as FRs utilizadas no empilhamento com o respectivo índice ajuste (Rep). São mostrados a hora de origem, a magnitude, o back-azimute (cruzes), a distância (pontos) e os sismogramas normalizados da componente radial (azul) e da vertical (preto) dos eventos sísmicos.....53

Figura 5.9: Traço da FR na radial (vermelho) e na transversal (azul) das estações utilizadas nesse estudo. A transversal possui amplitude bem menor do que a radial..... 54

Figura 5.10: Ajuste da FR na estação BEB11. As cores indicam o ajuste: quanto mais próximo do vermelho melhor o ajuste do modelo à curva FR e da dispersão de grupo e fase. À esquerda os modelos iniciais e à direita os finais. O modelo em preto é o modelo médio. Na figura são mostrados 6025 modelos. Na BEB11 houve ensaio de refração sísmica, portanto o início de todos os modelos iniciais (parte mais superficial) é o mesmo. 56

Figura 5.11: Distribuição dos 50 melhores modelos conforme a suavidade e peso para algumas estações. No eixo da abscissa apresentam-se os cinco conjuntos de suavidade (s) e o peso (i). A estação é mostrada acima junto com o número de modelos. Por exemplo, na estação BEB4B, 50/43 indica que há 50 modelos no histograma e 43 modelos iniciais diferentes, ou seja, sete modelos tiveram bom ajuste usando diferentes suavidades e pesos. 58

Figura 5.12: FR e curvas de dispersão para a estação BEB4B. RF-g00 é a FR de alta frequência e RF-g01 a g06 são as FR de baixa frequência. São mostradas a distância média (Δ_m) e o back-azimute médio (Baz_m) de cada. O gráfico A e B representam, respectivamente, a dispersão de velocidade de grupo de ondas Love e Rayleigh e a dispersão de velocidade de fase de onda Rayleigh. À direita estão os modelos de velocidade de onda S inicial (azul) e final (vermelho) em diferentes escalas. As setas indicam o basalto Serra Geral (gráfico C) com uma estrutura de alta velocidade em torno de 700 m (gráfico D) e o início da Moho (gráfico E). Acima da RF-g00 está informação sobre a inversão: nome da estação (sta), número do modelo inicial (m), suavidade (smth) e peso (infl) e número de iterações (ite). 59

Figura 5.13: Perfis de velocidade de onda S obtidos na região. A estação correspondente está indicada no perfil. 62

Figura 5.14: Perfis de velocidade de onda S obtidos com as estações sismográficas de Bebedouro. Em A é apresentado o perfil W-E e B o perfil S-N. A linha branca representa a velocidade de 2.3 km/s. Estações ordenadas sem escala. 63

Figura 5.15: Perfis de velocidade de onda S obtidos com as estações sismográficas de Bebedouro. A linha branca representa as velocidades de onda S de 3.0 e 3.2 km/s..... 64

Figura 5.16: Profundidade do embasamento na Bacia do Paraná baseada em poços profundos da Paulipreto e Petrobrás. O triângulo representa a rede sismográfica de Bebedouro. Adaptado de Meijian & Assumpção (2004)..... 65

Figura 5.17: Epicentros de sismos ocorridos em Andes com excelente localização epicentral. Em azul as estações que apresentam uma zona de baixa velocidade na camada de basalto. Triângulos brancos são estações onde o basalto parece mais compacto sem zona de baixa velocidade. 66

Figura B.1: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB15B (152 dias) com filtro passa-banda de 0.5-2.0 Hz.	84
Figura B.2: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB16B (325 dias) com filtro passa-banda de 0.1-10 Hz.	85
Figura D.1: FR e curvas de dispersão para a estação BB16B.	91
Figura D.2: FR e curvas de dispersão para a estação BB15B.	92
Figura E.1: Estação BEB1.	93
Figura E.2: Estação BEB2.	94
Figura E.3: Estação BEB4.	95
Figura E.4: Estação BEB4A.	96
Figura E.5: Estação BEB4B.	97
Figura E.6: Estação BEB7.	98
Figura E.7: Estação BEB11.	99
Figura E.8: Estação BEB13.	100
Figura E.9: Estação BEB14.	101
Figura E.10: Estação BB15B.	102
Figura E.11: Estação BB16B.	103
Figura E.12: Estação BEB17.	104
Figura E.13: Estação BEB18.	105
Figura E.14: Estação BEB19.	106
Figura E.15: Estação BEB20.	107
Figura E.16: Estação BEB21.	108
Figura E.17: Estação BEB22.	109

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Lista das estações utilizadas na FR e o número de sismos registrados. No cabeçalho da tabela a letra P identifica eventos próximos a estação ($\Delta < 20^\circ$) e L, eventos longe [distantes] ($20^\circ < \Delta < 95^\circ$). NIP e NIL são os números de candidatos iniciais a FR. NPP e NPL são os registros onde foi possível identificar a onda P. FR85P e FR85L representam os eventos com ajuste maior que 85%. NFP e NFL são os números finais de FRs efetivamente utilizadas na inversão. (*) Registros no trigger das estações de banda larga. (**) As FRs foram embutidas nas estações de registro contínuo. As estações de banda larga estão em negrito.....28

Tabela 5.1: Resultados de H e K para cada uma das estações de banda larga de Bebedouro para o método HK (Zhu & Kanamori, 2000). Os pesos usados foram de 0.7, 0.2 e 0.1 (721) e 0.6, 0.3 e 0.1 (631). A quantidade de eventos usados varia conforme a estação. 48

Tabela A.1: Eventos nas estações sismográficas de período curto. Dec. refere-se ao ajuste na deconvolução..... 75

Tabela A.2: Eventos nas estações sismográficas de período longo. Dec. refere-se ao ajuste na deconvolução e a coluna Grupo indica o grupo em que os eventos foram encaixados..... 78

Tabela C.1: Eventos usados na determinação da Moho. 86

1. Introdução

A partir de 2004 a população do distrito de Andes, Bebedouro - SP passou a sentir pequenos tremores de terra. Uma rede sismográfica instalada em 2005 mostrou que os sismos locais são induzidos por poços tubulares usados para irrigação (Assumpção et al., 2007; Assumpção et al., 2010).

A cidade de Bebedouro localiza-se no nordeste do Estado de São Paulo, na Bacia do Paraná, sobre uma fina camada de arenitos da Formação Adamantina (50 a 100 m), seguida por basaltos da Formação Serra Geral (300 a 500 m), arenitos da Formação Botucatu (que abrigam o aquífero Guarani) e outras formações (Milani et al., 1994). A profundidade do embasamento não é mapeada em detalhe, mas estima-se que seja entre 2 e 3 km (Assumpção et al., 2007).

As espessuras do basalto e do pacote sedimentar abaixo (arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia) também não são bem estimadas uma vez que não há poços que atingem o embasamento na região de Bebedouro. Dificuldades em mapear as estruturas abaixo do basalto e a profundidade do embasamento foram encontradas por Souza (1982), Rosa et al. (1982) e Silva & Vianna (1982). A presença do basalto dificulta a utilização de sísmica convencional para definir as estruturas inferiores: grande parte da energia refletida dificulta a identificação dos sinais fracos das camadas mais profundas (Souza, 1982).

Uma determinação mais apurada da espessura do basalto, e suas variações na área, são importantes para os estudos da sismicidade local induzida pelos poços. Melhor conhecimento da profundidade do embasamento e das características do pacote sedimentar abaixo do basalto também pode ser útil no planejamento e exploração dos recursos hídricos subterrâneos, à medida que a sua exploração se torna mais intensa a cada ano.

Julià et al. (2004) obtiveram bons resultados no estudo de bacias sedimentares utilizando o método de função do receptor e, recentemente, o mesmo método se mostrou promissor na Bacia do Paraná. Costa (2006) e An & Assumpção (2004) estimaram a estrutura da bacia empregando a função do receptor e a dispersão de ondas de superfície. Recentemente Zevallos et al. (2009) utilizaram o método em conjunto com dados magnetotelúricos.

Funções do Receptor (FRs) são ferramentas poderosas para o estudo de feições da crosta e do manto superior. A FR é uma série temporal obtida com o sismograma de sismos distantes registrado em três eixos ortogonais que mostra a resposta da estrutura subjacente em torno da estação. A série é obtida pela deconvolução da componente vertical da radial, processo que elimina efeitos da fonte e do percurso distante da onda sísmica, fazendo a FR depender apenas da estrutura logo abaixo da estação (e.g., Wilson & Aster, 2003; Zevallos et al., 2009).

Este trabalho consiste no estudo da estrutura da região de Bebedouro utilizando função do receptor, ondas de superfície, sísmica de refração. As ondas de superfície foram obtidas com o método de correlação cruzada de ruído sísmico ambiental.

2. Região de Estudo

2.1. Geologia Regional

Localizada no centro-oeste do continente sul-americano, cobrindo aproximadamente 1,5 milhões de quilômetros quadrados encontra-se a Bacia Sedimentar do Paraná (figura 2.1). Geograficamente, a bacia situa-se em grande parte na região meridional do Brasil, englobando porções do leste paraguaio, do nordeste argentino e do norte do Uruguai (Bizzi et al., 2003). Seu contorno imposto por limites erosivos, relacionados com a história geotectônica meso-cenozóica do continente, lhe define uma forma ovalada com eixo maior N-S (Milani et al., 2007).

Segundo Cordani et al. (1984), a Bacia do Paraná é classificada como sendo do tipo intracratônica com acumulação de rochas sedimentares e vulcânicas de idades entre o Ordoviciano e o Cretáceo. Esse pacote sedimentar-magmático tem uma espessura máxima em torno de 7 km e o seu depocentro estrutural coincide com a região de calha do Rio Paraná (Milani et al., 2007). O embasamento da bacia é composto por rochas ígneas e metamórficas com idades entre 700 a 450 Ma que correspondem ao ciclo orogêneo Brasileiro (Cordani et al., 1984; Zalán et al., 1990).

Entre 450 Ma e 65 Ma, sucessivos episódios de sedimentação acomodaram seus depósitos. Segundo Milani et al. (1997; 2007) esses, ditos supersequências, são: Rio Ivaí (Caradociano-Landoveriano), Supersequência Paraná (Lockoviano-Frasniano), Gondwana I (Westfaliano-Scythiano), Gondwana II (Anisiano-Norian), Gondwana III (Neojurássico-Berriasino) e Bauru (Aptiano-Maedtrichtiano). Os três primeiros representam grandes ciclos transgressivos-regressivos paleozoicos e os últimos, pacotes sedimentares continentais e rochas ígneas associadas (Figura 2.2).

A supersequência do Rio Ivaí corresponde os sedimentos mais antigos da bacia sedimentar. Seu registro envolve conglomerados e arenitos na base (Formação Vila Maria), diamictitos (Formação Iapó), folhelhos (Formação Vila Maria) e basalto (Formação Três Marias). Seu topo é definido por uma superfície de discordância que erodiu profundamente o pacote Ordovício-Siluriano. (Milani & Ramos, 1998; Milani et al., 2007).

Figura 2.1: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural (profundidade) do embasamento cristalino e as superseqüências estratigráficas (modificado de Milani, 2004). Em vermelho a região de estudo, Bebedouro, SP.

Sobre essa discordância ou diretamente sobre o embasamento deposita-se a superseqüência Paraná. Materializando um ciclo transgressivo-regressivo de oscilação do nível do Panthalassa, essa superseqüência inicia-se com sedimentos continentais a transicionais (Formação Furnas) seguidos por sedimentos marinhos da Formação Ponta Grossa (Milani & Ramos, 1998 e Milani et al., 2007).

Em seguida, encontra-se a supersequência Gondwana I que representa o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná (cerca de 2500 metros). É composta pelos diamictitos e argilitos do Grupo Itararé (Formação Aquidauana) relacionados à fase de degelo da glaciação gonwânica. Em sequência tem-se os siltitos e arenitos finos da Formação Tatuí, os carbonáticos da Formação Irati e, por fim, folhelhos e siltitos com intercalação de bancos carbonáticos representando a Formação Corumbataí.

Englobando as Formações Pirambóia, Rosário do Sul e Santa Maria encontra-se a Supersequência Gondwana II de idade Triássica. Essa supersequência apresenta arenitos avermelhados e esbranquiçados vindos de um ambiente continental flúvio-eólico com grande presença de fósseis vegetais, vertebrados e invertebrados.

A Supersequência Gondwana III agrupa os sedimentos eólicos da Formação Botucatu (Figura 2.2) e as efusivas da Formação Serra Geral. A Formação Botucatu constitui-se em arenitos com grãos esféricos médios a finos com tonalidades rósea. Exibem estratificação cruzada e no topo podem se apresentar intercalados aos derrames basais do Serra Geral que marcam o vulcanismo fissural Mesozóico.

Figura 2.2: Coluna cronoestratigráfica com as principais seqüências deposicionais e principais eventos de tectônica e magnetismo da Bacia do Paraná segundo Milani et al., 2007.

2.2. Geologia de Bebedouro

A figura 2.3 mostra a geologia de superfície da região de Bebedouro, SP: representados em verde-claro tem-se os sedimentos do Grupo Bauru (que engloba a Formação Adamantina) e, em verde-escuro, as localidades onde o basalto da Formação Serra Geral aflora.

Figura 2.3: Geologia da região de Bebedouro e Andes. O grupo sedimentar Bauru (verde-claro) é representado pela formação Adamantina em Bebedouro. Em verde-escuro temos o basalto Serra Geral (CPRM, 2001).

A maioria dos poços de pouca vazão ($<10 \text{ m}^3/\text{s}$) limita-se a explorar a camada sedimentar superior, enquanto aqueles de grande vazão, usados principalmente para irrigação, atingem os aquíferos fraturados presentes na parte superior do basalto. As fraturas são alimentadas pela infiltração de água do aquífero superior (Assumpção et al., 2007).

Nessa região é comum, entre os derrames basálticos, a presença de camadas de arenito. Esse fato é um indicativo de que houve um intervalo de tempo entre os derrames de basalto e, nesse hiato, sedimentos foram depositados (Yamabe et al., 2005).

A figura 2.4 mostra a cota do topo do basalto na região de Andes obtida a partir de poços (pontos pretos) com destaque para os poços P01 a P10 (Fazenda Aparecida) e StA (Fazenda Santa Ana). A superfície é bem suave, variando entre 480 e 520m. Os perfis desses poços são mostrados na figura 2.5 onde são indicadas as zonas de fratura e limites interderrames. A espessura total do arenito (figura 2.6) pode ser interpretada como a diferença entre a topografia (figura 2.7) e a cota do basalto (figura 2.4).

Figura 2.4: Cota do topo do basalto (altitude acima do nível do mar) obtida com dados de poços de Andes.

Figura 2.5: Perfis dos poços das fazendas Aparecida (P1-P10) e Santa Ana (StA) mostrados na figura 2.4. A linha preta, em negrito, é a topografia. Em azul, o nível estático (NE – sem bombeamento) e o nível dinâmico (ND – com bombeamento), em vermelho, a cota do basalto. As cruzes indicam a região de fraturas e os círculos indicam limites interderrames. Dados baseados em cadastro do DAEE - Araraquara. Figura de Assumpção et al., 2007.

Figura 2.6: Espessura total do arenito da Formação Adamantina obtida pela diferença entre os valores da topografia e os da cota do basalto nos poços tubulares (pontos pretos).

2.3. Rede de estações sismográficas

A rede sismográfica de Bebedouro (figura 2.7) começou a ser instalada em março 2005 para monitorar os tremores de Andes. A rede contou com 27 estações no total sendo até sete em operação simultânea. A maioria das estações contava com registro nas três componentes (necessário para realizar a função do receptor) e três eram estações de banda-larga com registro contínuo (para o método da correlação de ruído). Atualmente, em 2011, apenas as estações, BEB19, BEB22 e a pertencente ao projeto BRASIS, BB19B estão em operação.

Figura 2.7: Locais das estações sismográficas (triângulos) que operaram em Bebedouro no período de 2005-2010. As cores indicam a topografia (utilizada para calcular a espessura dos sedimentos) e a linha azul representa os córregos e rios.

A figura 2.8 mostra o período de operação das estações sismográficas de Bebedouro. As estações de banda larga e registro contínuo (representadas pelas barras mais grossas) são: BEB4B, BB15B e BB16B. Essas estações de banda larga operaram com amostragem de 40 *aps* enquanto as demais estações (período curto) foram amostradas com 500 *aps*. Em todas as estações foram utilizados o sensor L4C e registrador REFTEK.

Figura 2.8: Período de operação de cada estação da rede sismográfica de Bebedouro. As barras mais grossas identificam as estações de período contínuo. A coluna esquerda e direita indicam, respectivamente, o nome da estação sismográfica e o número de dias de funcionamento.

3. Metodologia

3.1. Fundamentos do Método Função do Receptor

O aspecto básico do método de função do receptor (FR) é que a incidência de uma onda P telessísmica em uma descontinuidade, nas proximidades da estação sismográfica, produzirá uma fase P refratada (ou transmitida) e uma fase S convertida (P_s) durante a refração (figura 3.1). Devido à menor velocidade da fase P_s , a diferença entre os tempos de chegada dessas fases refratadas será em função da profundidade da descontinuidade. Além disso, a análise das fases múltiplas, originadas por sucessivas reflexões na superfície e na Moho, poderá ser utilizada para determinar a razão V_P/V_S , entre as velocidades dessas ondas. Para isso, o método FR utiliza o processo de deconvolução para isolar os efeitos locais dos efeitos distantes na trajetória da onda P, resultando em uma função que depende somente da estrutura crustal abaixo da estação.

Figura 3.1: Diagrama de raio da Função do Receptor. a) Diagrama de raio simplificado mostrando as principais conversões da onda P em onda S. b) Registro da FR na componente radial.

Uma onda telessísmica contém informações da fonte do evento sísmico, da trajetória das ondas sísmicas desde a fonte até a estação onde foi registrada, da estrutura da crosta sob a estação e da resposta do instrumento. Como o objetivo da FR é isolar as informações da crosta presentes nos primeiros pulsos dos sinais telessísmicos, o processo de deconvolução é utilizado para remover os efeitos da fonte, da trajetória e do instrumento e obter um sinal somente com a resposta da estrutura sob a estação.

O registro na estação, $D(t)$, de um deslocamento teórico $S(t)$ de uma onda P telessísmica, de acordo com Langston (1979), pode ser representado como:

$$\begin{aligned} D_v(t) &= I(t) * S(t) * E_v(t) \\ D_r(t) &= I(t) * S(t) * E_r(t) \\ D_t(t) &= I(t) * S(t) * E_t(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde $D_v(t)$, $D_r(t)$ e $D_t(t)$ são as componentes vertical, radial e tangencial, respectivamente, $I(t)$ é a resposta do instrumento, $S(t)$ é a função temporal da fonte e da trajetória, e $E_v(t)$, $E_r(t)$ e $E_t(t)$ são as respostas vertical, radial e transversal da estrutura abaixo da estação e (*) representa o operador convolução, todos no domínio do tempo (t).

No domínio da frequência (w), a convolução é tratada como uma multiplicação espectral e as componentes das equações 3.1 ficam sendo:

$$\begin{aligned} D_v(w) &= I(w)S(w)E_v(w) \\ D_r(w) &= I(w)S(w)E_r(w) \\ D_t(w) &= I(w)S(w)E_t(w) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Para eventos telessísmicos a onda P deve conter quase toda a energia em sua componente vertical, o que faz com que $E_v(t)$ se comporte como um delta de Dirac ($E_v(t) \approx \delta(t)$), logo a primeira equação (3.2) pode ser representada por:

$$D_v(w) \approx I(w)S(w) \quad (3.3)$$

Dessa forma as equações (3.2) podem ser reescritas por:

$$E_r(w) = \frac{D_r(w)}{I(w)S(w)} = \frac{D_r(w)}{D_v(w)} \quad (3.4)$$

$$E_t(w) = \frac{D_t(w)}{I(w)S(w)} = \frac{D_t(w)}{D_v(w)}$$

Assim, as respostas da estrutura sob a estação na direção radial e tangencial ($E_r(t)$ e $E_t(t)$) são determinadas pela deconvolução da componente vertical

$D_v(t)$ com a componente da horizontal ($D_r(t)$ ou $D_t(t)$), ou seja, a função do receptor é definida por:

$$FR_r(w) = \frac{D_r(w)}{D_v(w)} \quad (3.5)$$

Para ter a incidência próxima da vertical na estação e evitar a zona de triplificação do manto evita-se utilizar eventos de distâncias menores que 30° na FR. O efeito de triplificação da onda P é causado pela zona de alto gradiente em 410 e 650 km de profundidade. Também eventos ocorridos em distâncias superiores a 95° não são recomendados. Isso se deve ao fato de que a partir dessas distâncias ocorre a zona de sombra onde não há registro da onda P. É aconselhável utilizar eventos de grande magnitude (maior que 5.0 mb de preferência) para se trabalhar com sinais de boa relação sinal/ruído.

O processo de deconvolução remove os efeitos das estruturas geológicas próximas à fonte e do próprio sismômetro. Antes da deconvolução, aplica-se um filtro gaussiano (passa-baixa) para eliminar ruídos e/ou selecionar a faixa de frequências de interesse. Resta isolado na FR apenas o efeito das estruturas próximas à estação, registrado como chegadas de reverberações e de conversões de P para S ocorridas nas interfaces das camadas.

Para o estudo de feições profundas da crosta com FRs telessismos com frequências menores que 1.0 Hz podem ser usados. No presente caso, entretanto, são necessárias frequências muito mais altas para investigar camadas mais rasas e menos espessas. A Bacia do Paraná está convenientemente localizada próxima à zona de subducção da Placa de Nazca, onde as ondas P de alta frequência, provenientes de sismos com profundidades intermediárias a altas, não são muito atenuadas. Isso ocorre porque essas ondas não passam pela astenosfera acima da zona de subducção (que age como um filtro passa-baixa para as ondas elásticas) e a astenosfera sob a plataforma estável sul-americana não é muito desenvolvida (Zevallos et al., 2009). Desta forma, os telessismos profundos registrados em Bebedouro constituem dados ideais para a geração e análise de funções do receptor de alta frequência.

3.2. Fundamentos da Correlação do Ruído Ambiental

Considere o sistema linear expresso da seguinte forma:

Figura 3.2: Sistema linear com resposta $h(t)$. Ao ser submetido a uma função de entrada $f(t)$ é originada a saída $g(t)$.

onde $f(t)$ é a função de entrada, $h(t)$ representa a resposta do sistema e $g(t)$ denota o sinal de saída. No sistema acima, a função de saída pode ser expressa, no domínio do tempo, pela convolução entre as funções $f(t)$ e $h(t)$:

$$g(t) = f(t) * h(t) \quad (3.6)$$

Caso o sinal de entrada $f(t)$ seja um impulso, $g(t)$ é igual a $h(t)$. Dessa forma $h(t)$ também é interpretado como resposta impulsiva do sistema, ou seja, a função de Green do sistema.

Estudos teóricos feitos por Weaver & Lobkis (2001) e Wapenaar (2004), dentre outros, mostraram que utilizando a correlação cruzada do registro sísmico de duas estações é possível extrair informação sobre a estrutura entre elas. Em outras palavras, a correlação cruzada entre estações representa a função de Green empírica entre elas, como se um impulso fosse aplicado em uma estação e registrado na outra. Para demonstrar a relação entre a correlação e a função de Green considere a correlação entre $f(t)$ e $g(t)$:

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) f(t - \tau) dt \quad (3.7)$$

da equação (3.6) segue que :

$$g(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) h(t - \xi) d\xi \quad (3.8)$$

Substituindo (3.7) em (3.8), tem-se (Leite, 1998):

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \xi) f(t - \tau) dt \quad (3.9)$$

Fazendo a mudança de variável $\sigma = t - \xi$, $d\sigma = dt$, $t = \sigma + \xi$ a equação 3.9 torna-se:

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) f(\xi + \sigma - \tau) d\xi \int_{-\infty}^{\infty} h(\sigma) d\sigma \quad (3.10)$$

Na equação 3.10, $f(\xi + \sigma - \tau)$ representa a $f(\xi)$ deslocada $\sigma - \tau$ no tempo, portanto a segunda integral pode ser interpretada como a auto-correlação da função $f(\xi)$:

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ff}(\tau - \sigma) h(\sigma) d\sigma \quad (3.11)$$

A auto-correlação é uma função par ($\phi_{ff}(\tau) = \phi_{ff}(-\tau)$), dessa forma 3.11 fica:

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\sigma) \phi_{ff}(\tau - \sigma) d\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ff}(\sigma) h(t - \sigma) d\sigma \quad (3.12)$$

A convolução no domínio no tempo corresponde à multiplicação no domínio da frequência:

$$\phi_{gf}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ff}(\sigma) h(t - \sigma) d\sigma \Rightarrow \phi_{gf}(w) = \phi_{ff}(w) H(w) \quad (3.13)$$

Portanto, podemos definir a resposta impulsiva do sistema como:

$$H(w) = \frac{\phi_{gf}(w)}{\phi_{ff}(w)} \quad (3.14)$$

Uma propriedade da auto-correlação (Leite, 1998) é $\phi_{ff}(w) = |F(w)|^2$, ou seja, onde $F(w)$ é espectro de potência de $f(t)$, ou seja:

$$H(w) = \frac{\phi_{gf}(w)}{|F(w)|^2} \quad (3.15)$$

Das equações 3.14 e 3.15 pode-se dizer que a resposta impulsiva do sistema $H(w)$ pode ser obtida pela deconvolução da correlação cruzada de $G(w)$ e $F(w)$ com a auto-correlação $F(w)$.

No caso da função de entrada no sistema linear ser um ruído aleatório branco, ou seja, $|F(w)| \cong \text{constante}$ a resposta do sistema será dada pela correlação ϕ_{gf} (Shapiro & Campillo, 2004).

Uma premissa do método é que o ruído sísmico pode ser considerado aleatório quando são tomadas grandes séries temporais (muito tempo de registro). Se as fontes de ruído estão bem distribuídas espacialmente o resultado da correlação é simétrico: em ambos os lados da correlação há o mesmo nível de energia (Stehly et al., 2006; Yang & Ritzwoller, 2008).

Campillo & Paul (2003) e Shapiro & Campillo (2004) observaram que a correção de ruído é dominada por ondas de superfície Rayleigh. Desde então muitos estudos foram realizados utilizando o ruído sísmico ambiental principalmente em tomografia sísmica (Shapiro & Campillo, 2004; Shapiro et al., 2005; Gerstoft et al., 2006; Yang et al., 2007; Lin et al., 2008; Huang et al., 2010). Recentemente outras aplicações têm surgido como o monitoramento de estruturas civis (Prietro et al., 2010) e a localização epicentral de eventos sísmicos (Barmin et al., 2011). A principal vantagem desse método é que não é necessária a ocorrência de eventos sísmicos nos registros.

Stehly et al. (2006) destacam que há duas fontes principais de ruído com períodos menores que 20 s (figura 3.3): microssismos primários (períodos 10 – 20 s), que têm origem na interação atmosfera-oceano, e microssismos secundários (5 – 10 s), com origem na interação das ondas do oceano com a costa litorânea (figura 3.4).

O microssismo primário, por estar relacionado com as condições atmosféricas em alto mar, apresenta uma variação sazonal, enquanto que o microssismo secundário se mantém constante aproximadamente durante o ano (figura 3.4). Uma vez que as fontes se localizam no mar é possível encontrar marcas de variações climáticas impressas nas correlações de ruído como tempestades oceânicas (Gerstoft et al., 2008 e Zhang et al., 2010) e até alterações na massa de gelo na Antártica (Stutzmann et al., 2009).

Figura 3.3: Espectro ilustrando os dois picos do ruído microssísmico. O pico secundário (5 -10s) tem origem na interação do oceano com a crosta e o pico primário (10 - 20 s) com origem na interação atmosfera-oceano. Adaptado de Bromirski (2009).

Figura 3.4: Representação esquemática da interação entre as ondas do oceano e a costa litorânea na geração de ondas de superfície com períodos entre 5 s e 10 s (microssismo secundário). Figura de Hoffmann et al., 2002.

4. Processamento

4.1. Função do Receptor

A figura abaixo resume o processamento da função do receptor.

Figura 4.1: Fluxograma do processo da função do receptor.

4.1.1. Seleção de eventos

Para realizar a FR são necessários registros telessísmicos nas três componentes. Com base no catálogo do USGS obtido com o programa *SOD*¹ (comando *find_events*), foi construída uma rotina que localiza os eventos telessísmicos no banco de dados onde estão armazenados os registros das estações de Bebedouro. Neste caso considerou-se candidato à FR qualquer sismo com magnitude maior que 5.0 mb a uma distância menor que 95°.

Em cada registro foi calculado o tempo teórico de chegada da onda P e a vagareza horizontal (parâmetro p) utilizando-se o programa *TAUP*². Posteriormente cada um desses sismos foi inspecionado visualmente e, para aqueles com boa relação sinal/ruído, foi feita a correção da chegada da onda P.

¹ <http://www.seis.sc.edu/sod/> (Acessado 20/12/2010)

² <http://www.seis.sc.edu/taup/> (Acessado 20/12/2010)

A próxima etapa constitui-se na separação em grupos. Essa divisão é baseada na distância epicentral e está relacionada com o conteúdo espectral do sismo: eventos mais próximos/distantes possuem um conteúdo de frequência maior/menor já que a Terra age como um filtro passa-baixa para as ondas elásticas (Bormann, 2002). Sismos localizados até 20° de distância (no texto esses sismos serão referidos como grupo 00) são utilizados no estudo de feições rasas e os tlessismos localizados entre de 20° e 95° , no estudo de estruturas mais profundas, por exemplo, a Moho. Esse segundo grupo só foi formado com as estações de banda larga de registro contínuo (BEB4B, BB15B e BB16B).

Os dois grupos de eventos (0 a 20° e 20° a 95°) foram rotacionados nas componentes radial (na direção do evento) e na transversal (perpendicular à direção do evento). Posteriormente os grupos de eventos foram filtrados de forma a isolar a parte do sinal de interesse, o que corresponde às frequências altas no primeiro grupo e às frequências mais baixas no segundo. A escolha do filtro será discutida mais adiante.

4.1.2. Cálculo da Função do Receptor

O cálculo da FR é um problema de deconvolução (Ammon, 1991). Dentre os diversos métodos para realizar a deconvolução (Oldenburg, 1981), no cálculo da FR destacam-se a divisão espectral com nível de água (Owens et al., 1984) realizada no domínio da frequência e a deconvolução iterativa no domínio do tempo proposta por Ligorria & Ammon (1999).

Para os sismos com boa relação sinal/ruído os métodos resultam em funções similares, porém, em dados ruidosos o resultado da deconvolução iterativa é melhor, principalmente na identificação das chegadas $P_{sps}+P_{pss}$ e P_{pps} , normalmente mascaradas pelo ruído (Ligorria & Ammon, 1999). Outro ponto levantado por Crotwell & Owens (2005), é o fato de que o nível de água, utilizado para estabilizar a divisão espectral, pode variar para cada evento e, portanto, a escolha desse método diminuiria a automatização do cálculo da FR.

A deconvolução proposta por Ligorria & Ammon (1999) calcula a FR através do método dos mínimos quadrados. Neste caso a FR será um traço que, convoluído com a componente vertical, mais se aproxima da componente horizontal (radial ou transversal). No método, esse traço é composto por sucessivas adições de del-

tas e cada acreção corresponde a uma iteração e, ao final do processo, é possível estipular a porcentagem do sinal explicado pela FR na componente horizontal. Outra vantagem desse método é que primeiro são definidas as grandes amplitudes (normalmente o primeiro pulso) e depois os detalhes. Neste trabalho optou-se por utilizar 500 iterações (ou seja, as FRs aqui presentes são compostas por um conjunto de 500 deltas) e somente são utilizadas FR com mais de 85 % de ajuste.

O cálculo da FR pode ser controlado de acordo com o nível de detalhe desejado, através da aplicação de um filtro gaussiano. Para feições rasas o filtro aplicado nos telessismos do grupo 00 foi Gauss (G) 20 (usado com sucesso por Souza et al., 2008). Esse filtro corresponde aproximadamente a um filtro passa-baixa de 10 Hz e possibilita que na FR sejam incorporadas informações de estruturas mais superficiais. Para as FR de baixa frequência foram utilizados dois filtros gaussianos. Para o método *HK* (Zhu & Kanamori, 2000) foi utilizado o Gauss 1 (o método será discutido mais adiante) e para inversão conjunta o Gauss utilizado foi de 3. Esses filtros correspondem respectivamente a um passa-baixa de 0.5 Hz e 1.5 Hz.

Outro fator a ser considerado é a largura da janela utilizada na obtenção da FR. Essa janela varia conforme o evento (uma vez que ela reflete diferentes características dos eventos, como, por exemplo, a magnitude, a distância, o azimuth e a fonte). Foi fixada uma janela iniciando em 0.5 s antes da P para o grupo 00 e 5.0 s para os demais grupos e a extensão da janela varia de 10 a 20 s e 30 a 100 s, respectivamente. Calculou-se a FR para todas essas janelas e no final foi escolhida a janela com melhor ajuste.

Ao final desse processo as FRs com ajuste inferior a 85% foram automaticamente descartadas e as com índice superior foram inspecionadas visualmente já que um ajuste bom não implica necessariamente em uma FR boa, como, por exemplo, o primeiro pico da FR ser negativo. Esse índice funciona, na realidade, como um indicativo, pois a deconvolução de ruído também pode apresentar um bom ajuste.

4.1.3. Efeito do filtro antes da deconvolução

As FRs resultantes variam de acordo com o filtro utilizado antes do processo de deconvolução chamado aqui de “pré-filtro”. Na figura 4.2 é apresentado o empilhamento de todas as FRs do grupo 00 com ajuste maior que 85% para diferentes estações. Os pré-filtros aplicados são passa-alta de 0.01 Hz, 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hz, 2.0 Hz e 5.0 Hz. Também é mostrado o resultado sem a utilização do filtro.

Nota-se que o início da FR, importante para a definição das camadas mais superficiais, é bastante afetado pelo pré-filtro passa-alta. Picos iniciais menores tendem a produzir modelos com velocidades menores.

As camadas mais rasas são mais bem definidas por frequências mais altas (períodos menores) enquanto feições mais profundas são mais bem amostradas por períodos mais longos. Portanto, ao utilizar-se um filtro passa-alta, na realidade, isolam-se melhor os efeitos das camadas mais rasas, ou seja, uma FR que representa melhor a estrutura logo abaixo da estação, além disso, com esse procedimento também se elimina o ruído de período mais longo, como os microssimos.

No entanto, nas FRs para sismos distantes, tem-se uma situação diferente. Como o alvo é a descontinuidade de Moho, períodos maiores são necessários. Isso fica mais claro na figura 4.3: Ao utilizar filtros altos o pico que corresponde a Ps da Moho (~ 5 s) praticamente desaparece, ou seja, a Moho é, para essa faixa de frequência, uma camada transicional.

Tendo em vista as considerações aqui colocadas decidiu-se utilizar um pré-filtro passa-alta 2.0 Hz para o grupo de sismos próximos e 0.1 Hz para os sismos distantes.

Para a FR de alta frequência, $G=20$ corresponde a passa-baixa de ~10 Hz. Portanto a escolha final do pré-filtro+Gauss equivale a um passa-banda de 2.0-10.0 Hz. Nas FRs de baixa frequência, a escolha do pré-filtro de 0.1 Hz e $G=1$ e 3 representa uma banda final de análise de 0.1-0.5 Hz e 0.1-1.5 Hz.

Figura 4.2: Traços empilhados com ajuste maior que 85% da FR de alta frequência ($G=20$) para diversos pré-filtros passa-alta das estações BEB4B, BB15B e BB16B. Em preto 5.0 Hz, cinza 2.0 Hz, ciano 1.0 Hz, azul 0.5 Hz, verde 0.1 Hz, roxo 0.01 Hz e vermelho é o traço sem filtro. A estação mais afetada nesse processo é a BEB4B (topo) onde há um deslocamento do primeiro pulso dependendo do filtro utilizado. Essa diferença é mais discreta em BB15B e BB16B (abaixo), onde os traços mais afetados são o de 5.0 Hz (preto) e sem filtro (vermelho).

2007.320.03.13.01.bb15b
 MAG 6.4MB – BAZ 299.331 – GCARC 33.4689 – EVDP 119.8(m)

Figura 4.3: Figura com as FR de baixa frequência ($G=1$) na estação BEB15B para diversos filtros passa-alta (HP) indicado na figura. Note que a fase Ps (indicada na figura) desaparece à medida que o filtro aumenta. As características do sismo estão no cabeçalho da figura.

4.1.4. Empilhamento da Função do Receptor

Um problema encontrado ao se utilizar o catálogo do programa *SOD* foi a presença de muitos eventos repetidos. Alguns sismos do catálogo são listados mais de uma vez com hora de origem e hipocentos ligeiramente diferentes e, o principal efeito disso no cálculo da FR, é no processo de rotação das componentes: a obtenção da componente radial e transversal depende da localização do evento. Para abranger todas as opções as FRs foram calculadas para todas as “versões” desses eventos e, ao final, foi escolhida versão a que obteve melhor ajuste.

Nas estações de registro contínuo também foram considerados os sismos com distância menor que 20° registrados no canal de *trigger*. A abordagem adotada foi a mesma dos sismos repetidos: são calculadas todas as FRs e é escolhida a melhor. No caso das estações BB15B/BEB15B e BEB16/BB16B, que operaram no mesmo local, as FRs foram colocadas juntas.

A etapa seguinte foi o empilhamento das FRs. Elas foram agrupadas de acordo com a distância e o azimute (para que os eventos tenham realizado, na média, o mesmo percurso) e também foram descartadas as FRs que apresentaram um traço diferente da média do seu grupo. O número de grupos varia conforme a estação (figuras 4.4 a 4.6). Nas estações de banda larga (BEB4B, BB15B e BB16B) foi possível obter mais de um grupo enquanto nas demais estações somente o grupo de sismos com distância menor que 20° (grupo 00) foi formado.

Além da distância epicentral e azimute, outro fator a ser levado em conta no empilhamento é a diferença entre amostragens do sinal. Normalmente os registros do *trigger* possuem uma taxa de amostragem maior (por exemplo, 500 *aps*) do que o registro contínuo (normalmente a 40 *aps*), diferença essa que causa um problema no empilhamento das FRs obtidas de diferentes canais da estação. Para contornar esse efeito as FRs provenientes do *trigger* foram reamostradas no mesmo intervalo de discretização do canal contínuo.

A tabela 4.1 resume a etapa de cálculo da FR. As listas de eventos utilizados na FR estão no Anexo 1.

Figura 4.4: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BEB4B separados em grupos (quadriláteros pretos numerados). As estrelas vermelhas representam os eventos distantes. Em azul, os eventos com distância menor que 20°. As estrelas pretas são eventos descartados, com FR diferente da média do seu grupo. Note-se que foram descartados os grupos 4, 7 e 8 por apresentarem FR diferentes entre si. O triângulo simboliza a rede sismográfica de Bebedouro. As curvas pretas são isolinhas de distância e a curva vermelha demarca a $\Delta=95^\circ$.

Figura 4.5: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BB15B. A legenda é a mesma da anterior.

Figura 4.6: Mapa com os eventos utilizados na FR para a estação BB16B. A legenda é a mesma da figura 4.4.

Tabela 4.1: Lista das estações utilizadas na FR e o número de sismos registrados. No cabeçalho da tabela a letra *P* identifica eventos próximos a estação ($\Delta < 20^\circ$) e *L*, eventos longe [distantes] ($20^\circ < \Delta < 95^\circ$). NIP e NIL são os números de candidatas iniciais a FR. NPP e NPL são os registros onde foi possível identificar a onda *P*. FR85P e FR85L representam os eventos com ajuste maior que 85%. NFP e NFL são os números finais de FRs efetivamente utilizadas na inversão. (*) Registros no trigger das estações de banda larga. (**) As FRs foram embutidas nas estações de registro contínuo. As estações de banda larga estão em negrito.

Estação	NIP	NPP	FR85P	NFP	NIL	FR85L	NPL	NFL
beb4b	64	50	09	03	1149	142	297	69
beb4b*	37	27	5	**	-	-	-	-
bb15b	77	48	27	25	700	31	90	18
bb15b*	17	17	15	**	-	-	-	-
bb16b	43	43	31	28	811	141	300	66
bb16b*	22	22	18	**	-	-	-	-
beb1	90	69	25	24	-	-	-	-
beb2	14	14	03	02	-	-	-	-
beb3	07	07	02	00	-	-	-	-
beb4	36	25	02	01	-	-	-	-
beb4a	51	47	11	10	-	-	-	-
beb6	12	11	00	00	-	-	-	-
beb7	32	24	07	06	-	-	-	-
beb11	76	71	18	11	-	-	-	-
beb13	50	46	09	06	-	-	-	-
beb14	55	47	18	11	-	-	-	-
beb15	01	01	01	**	-	-	-	-
beb16	21	21	03	**	-	-	-	-
beb17	08	06	03	02	-	-	-	-
beb18	63	55	24	20	-	-	-	-
beb19	51	50	26	17	-	-	-	-
beb20	28	24	08	06	-	-	-	-
beb21	14	12	08	05	-	-	-	-
beb22	09	09	04	03	-	-	-	-

Algumas estações da rede sismográfica de Bebedouro não possuíam registro nas três componentes, portanto não foi possível calcular a FR. Essas estações são: BEB8, BEB9, BEB9A, BEB9B, BEB10 e BEB12. Nas estações BEB3 e BEB6

todas as FR foram descartadas na inspeção visual. Essas duas estações contaram com poucos dias de registro.

4.1.5. Inversão de dados

Os traços da FR foram invertidos com o método de inversão linearizada conjunta de Julià et al. (2000) e o pacote de programas sismológicos Herrmann (Herrmann & Ammon, 2004). Nesse pacote a inversão é feita por iterações, a cada etapa o programa procura o modelo que melhor se ajuste às curvas observadas.

A inversão da FR pode não ser única, ou seja, diferentes modelos podem apresentar a mesma FR (Ammon et al., 1990). Portanto são necessárias mais informações para a estabilização e redução da ambiguidade. Uma técnica muito utilizada é a inversão conjunta com ondas de superfície (e.g., Julià et al., 2000; Costa, 2006; Julià et al., 2008) uma vez que as FRs são mais dependentes do contraste de impedância entre as camadas do modelo, enquanto as ondas de superfície são mais sensíveis à média das velocidades da onda S.

Na inversão conjunta foram utilizadas outras informações, tais como:

- Velocidade de grupo de ondas de Love (20 - 70 s) e ondas Rayleigh (10 - 140 s) obtidas por tomografia continental (Feng et al., 2005; 2007). Foram usadas as velocidades médias de célula de 22° – 21°S e 49° – 48°W. Estes dados ajudam a controlar as velocidades médias da crosta e manto superior.

- Velocidade de grupo de ondas Rayleigh (0.4 – 2.0 s) obtidas por correlação de ruído ambiental entre as estações BEB4B-BB15B e BEB4B-BB16B. Este dado ajuda a controlar as velocidades médias de onda S no pacote sedimentar.

- Velocidade de fase de ondas Rayleigh (0.05 - 0.15 s) da análise espectral de ondas de superfície –SAWS– (Schumann & Prado, 2009). Este dado auxilia a controlar a inversão nos primeiros metros de profundidade.

- Dispersão de fase de ondas Rayleigh (1.5 - 2.0 s) de sismos locais (Souza et al., 2008). Este dado ajuda a controlar as velocidades médias de onda S no pacote sedimentar.

Foram testados diferentes pesos e suavidades durante o processo de inversão. A influência de cada conjunto de dados (FR e ondas de superfície), na in-

versão é determinada pelo peso, ou seja, é possível controlar o quanto o modelo final se ajusta a cada tipo de dado. O contraste de velocidades do modelo final é controlado pela suavidade. Portanto, uma inversão com maior suavidade resulta em um modelo com menos variação de velocidade entre as camadas.

Para as estações de banda larga foram invertidas as FRs de alta frequência (formadas pelo empilhamento dos sismos $\Delta < 20^\circ$) e as FR de baixa frequência dos vários grupos (figuras 4.4 a 4.6). Nessas funções do receptor foi usado o filtro de Gauss 3. Nas estações de período curto, além da FR de alta frequência, foi adicionada uma FR de $\Delta > 20^\circ$ da estação de banda larga que estivesse mais próxima. Essa adição tem como objetivo incluir uma FR que ajude a controlar a inversão em camadas mais profundas.

O número de curvas de dispersão de ondas de superfície varia de acordo com as informações disponíveis perto da estação. A figura 4.7 mostra a disponibilidade dos dados utilizados na inversão para cada estação.

Figura 4.7: Locais das estações sismográficas que operaram em Bebedouro. O destaque indica os grupos formados de acordo com os dados disponíveis.

Em todas as estações foram usados dados FR e ondas Love e Rayleigh de longo período (Feng et al., 2005; 2007). As informações adicionais variam conforme o destaque feito na figura 4.7:

- Em vermelho (A): ondas Rayleigh da correlação de ruído entre as estações BEB4B e BB16B.
- Em azul (B): ondas Rayleigh da correlação de ruído entre as estações BEB4B e BB15B e velocidade de fase de ondas Rayleigh (Souza et al., 2008).
- Em verde (C): nenhuma informação adicional.
- Em roxo (D): ondas Rayleigh da correlação de ruído entre as estações BEB4B e BB15B.

Nas estações BEB1, BEB4A, BEB7 e BEB11 foram realizados ensaios de refração sísmica (Schumann & Prado, 2009). Nessas estações também foi acrescentada a velocidade de fase de ondas Rayleigh obtidas com SASW.

4.1.6. Determinação da descontinuidade de Moho

Para se obter uma estimativa da espessura da crosta (H) e razão V_p/V_s (K) foi utilizado o método *HK* de Zhu & Kanamori (2000). Esse método procura o melhor modelo de espessura H e razão K que se ajusta aos traços de FR usando uma velocidade média conhecida da crosta. O método busca maximizar a função:

$$S(h, k) = \sum_{i=1}^n w_1 A_i(Ps) + w_2 A_i(PpPs) - w_3 A_i(PpSs + PsPs) \quad (4.1)$$

onde w_1 , w_2 e w_3 são, respectivamente, os pesos das fases Ps , $PpPs$, $PpSs+PsPs$ e A_i denota o valor de amplitude no traço da FR para os tempos correspondentes às conversões das fases do i -ésimo traço. O sinal de menos de w_3 leva em conta a amplitude negativa da fase $PpSs+PsPs$. Os pesos devem ser atribuídos de forma que $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$. Uma das principais vantagens desse método é que não há necessidade de se identificar as fases.

A parte mais delicada desse procedimento é a escolha dos pesos. Zhu & Kanamori (2000) sugerem pesos de 0.7, 0.2, 0.1. O maior peso é dado para a fase Ps que normalmente é a mais clara. Porém, usar somente a Ps não é suficiente para determinar a espessura e razão de velocidades da camada. Somente usando a fase Ps o que se obtém é um conjunto de pares H e K que explicam os dados. Com a inserção das outras múltiplas obtém-se o valor de H e o valor K que mais se aproxima do real.

A velocidade média utilizada para a crosta foi $V_p = 6,4$ km/s como indicado por trabalhos em função do receptor de Assumpção et al. (2002) e de França & Assumpção (2004).

O método *HK* utiliza, para o cálculo das incertezas dos parâmetros obtidos, o método *bootstrap* (Efron & Tibshirani, 1991). Basicamente esse método constitui-se em sortear aleatoriamente algumas FRs e aplicar o método *HK* em novos subconjuntos formados a partir do conjunto inicial. A média e o desvio padrão desses valores fornecem um valor médio e uma estimativa da incerteza associada à determinação.

4.1.7. Modelos iniciais

Em cada estação foram invertidos mais de 1800 modelos iniciais utilizando diferentes valores de peso e suavidade. No resultado final foram considerados os modelos que obtiveram melhor ajuste na FR e na dispersão.

Nas estações BEB1, BEB4A, BEB7 e BEB11 foram realizados ensaios de refração sísmica rasa (Schumann & Prado, 2009). Dessa forma as informações de velocidade P e S nas camadas mais rasas obtidas nesses ensaios foram utilizadas como vínculos na inversão da FR. As figuras 4.8 e 4.9 mostram a construção do modelo inicial para a estação BEB7:

Figura 4.8: Resultado tomográfico de onda P para BEB7 na refração sísmica rasa. Linha branca tracejada é a profundidade do basalto esperada, tendo como base os dados de poços tubulares da área (precisão de 5 a 10m). As velocidades da onda P estão em m/s.

A partir do modelo tomográfico de velocidade de onda P foi construído o perfil de velocidade de onda S. Esse perfil foi construído usando uma relação V_p/V_s de 2.0 para camada mais superficial (solo) e 1.73 para o arenito e basalto. O perfil de velocidade foi prolongado de maneira que o cálculo do modelo direto ajustasse o primeiro pico da FR e a dispersão do SASW (figura 4.9).

Figura 4.9: Perfil de velocidade S (linha vermelha) da estação BEB7 (C) construído a partir da tomografia sísmica (linha azul) da figura anterior. As linhas vermelhas em A e B são as curvas teóricas correspondentes ao modelo inicial C. Note que a camada de basalto tem início em aproximadamente 60 m ($V_s=2.2$ km/s). Em algumas estações a camada de basalto foi prolongada, até que se obtivesse um bom ajuste na FR de alta frequência (A) e no SASW (B).

A mesma metodologia foi aplicada às demais estações que possuíam dados de refração sísmica. Esse perfil superficial foi imposto a todos os modelos iniciais dessas estações e, na inversão, teve um peso maior para que não variasse muito durante o processo.

Os resultados do método *HK* também foram incorporados nos modelos iniciais. A profundidade da Moho foi fixada em aproximadamente 40 km e a razão V_p/V_s foi imposta a partir de 5 km. A espessura da crosta e a razão V_p/V_s são ligeiramente diferentes (tabela 5.1) nas estações onde foram determinadas (BEB4B, BB15B e BB16B), portanto decidiu-se utilizar nas estações de período curto o resultado da estação de banda-larga que estivesse mais próxima a ela.

4.2. Correlação de Ruído Ambiental

A figura abaixo resume o processamento da correlação de ruído ambiental.

Figura 4.10: Fluxograma do processo da correlação de ruído.

Na correlação de ruído foram usadas as estações de banda larga e registro contínuo BEB4B, BB15B e BB16B. Primeiramente os sismogramas com duração de uma hora são concatenados em dias. Foram considerados somente dias que possuíam mais de 80.000 s (por volta de 22h e 20min) de registro contínuo para evitar a presença de dados com “gaps” no processamento.

Posteriormente os dados foram filtrados com remoção de tendência e média e com um filtro passa-banda. A escolha da faixa desse filtro será discutida mais adiante. Nessa fase foram selecionados 620 dias na BEB4B, 237 na BB15B e 383 dias na BB16B.

4.2.1. Normalização no tempo e frequência

A presença de telessismos, sismos regionais e/ou locais no sismograma pode influir no resultado da correlação (Bensen et al., 2007). Para reduzir o efeito desses eventos é aplicada a normalização no domínio do tempo. Há várias maneiras realizar esse procedimento (Bensen et al., 2007), dentre elas está o método denominado *one-bit normalization* (eg., Larose et al., 2004; Shapiro & Camillo, 2004; Schimmel et al., 2011). A técnica *one-bit normalization* consiste em dividir cada amostra do dado pelo seu valor absoluto, ou seja, todas as amplitudes positivas são substituídas por 1 e as negativas por -1. Isso impede que a correlação seja governada, por exemplo, pelas grandes amplitudes de grandes terremotos, pois os detalhes de forma de onda e de diferenças de amplitude do sinal foram removidos do registro (Schimmel et al., 2011).

A etapa seguinte é a normalização no domínio da frequência também conhecida como *whitening*. O sinal no tempo é transformando para frequência e seu espectro de potência é normalizado um valor próximo de 1, tornando-o um espectro branco ($F(w) \cong 1$) e, então esse espectro normalizado convertido de volta ao domínio do tempo. O espectro de fase não sofre alteração.

A figura 4.11 ilustra os processos de normalização. O sismograma registrado na estação BB16B corresponde ao dia em que ocorreu o forte tremor do Chile de magnitude 8.8 Mw (27 de fevereiro de 2010). Abaixo, o mesmo sismograma processado com os filtros *one-bit normalization* e *whitening* onde a influência do terremoto é diluída.

No filtro *whitening* também são removidos os sinais no espectro de amplitude que se manifestam na forma de ruído de frequência localizada (Bersen et al., 2007). É o caso da do sinal que aparece aproximadamente no período de 26 s (figura 4.12) associado ao Golfo da Guiné (Holcomb, 1998; Shapiro et al., 2007).

Figura 4.11: Sismograma do dia 27 de fevereiro de 2010 (acima). Abaixo o sismograma após os filtros de normalização nos domínios do tempo e frequência.

Figura 4.12: Espectro de potência do registro de um dia na estação BB16B com normalização no tempo (one-bit normalization). É possível notar o pico do microsismo primário em ~ 0.065 Hz e o secundário ~ 0.12 Hz. O pico próximo de 0.04 Hz (~ 25 s) é originado no Golfo da Guiné.

4.2.2. Correlação Cruzada

Antes de efetuar a correlação é necessário sincronizar os sismogramas. Isto é necessário porque os registros não se iniciam no mesmo horário em todas as estações. O procedimento pode ser feito de duas formas: cortando-se os registros de forma que fiquem na mesma janela de dados ou simplesmente sincronizando-os usando o comando *synch* do SAC³. Nessa etapa foi aplicado novamente o mesmo filtro passa-banda usado antes da normalização no tempo e frequência.

³ http://www.iris.edu/manuals/sac/SAC_Home_Main.html (Acessado 11/01/2011)

A correlação de ruído exige que o relógio interno das estações sismográficas esteja correto. Um exemplo do problema com correlação de relógio é mostrado na figura abaixo.

Figura 4.13: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB15B. O dia da correlação é apontado no eixo das ordenadas (01-08 – janeiro de 2008). Cada sismograma representa um dia de correlação. As faixas cinza são dias sem dados em alguma das estações. Os diferentes padrões de picos são indicados na figura. Os “picos móveis” são causados por deriva do relógio de uma das estações (falta de correção do relógio do registrador). A escala de amplitude é relativa.

A figura 4.13 mostra o resultado da correlação entre as estações BEB4B e BB15B. A presença de distintos padrões de traços deve-se a diferentes fatores: 1) ps que possuem dois picos na mesma posição são aqueles não apresentam pro-

blema na correlação 2) padrões onde os picos mudam com o dia o traço são aqueles em que o GPS não estava operando corretamente em alguma estação e 3) os que não possuem picos correspondem à correlação de componentes com problema de registro em uma das estações sismográficas.

Os dados que apresentavam problemas de hora ou no registro foram removidos. Dessa forma foi possível executar a correlação entre as estações BEB4B e BB15B com 152 dias. Entre BEB4B e BB16B foi possível usar 325 dias de registro.

Os dias com telessismos não foram extraídos da correlação. A figura 4.14 mostra o resultado da correlação entre as estações BEB4B e BB16B para o dia do tremor do Chile (preto), para um dia sem grandes eventos telessísmicos (vermelho) e para o empilhamento final dos 325 dias (azul). Todos passaram pelo processo de normalização no tempo e frequência. O principal vestígio do terremoto é a alta amplitude próxima tempo zero de correlação. Esse pico no tempo negativo deve-se ao fato de o terremoto chegar primeiro na estação BB16B.

Figura 4.14: Correlação de ruído ambiental entre as estações BEB4B e BB16B. São mostradas as curvas para o dia do terremoto do Chile (preto), um dia sem registro de evento telessísmico (vermelho) e o resultado final de 325 dias de correlação (azul).

4.2.3. Empilhamento da correlação de ruído

Para empilhar os dados de correlação foi usado o método *time-frequency domain phase-weighted stack* (Schimmel & Paulssen, 1997; Schimmel & Gallart, 2005; 2007). Na técnica, conhecida como *tf-PWS*, cada amostra do empilhamento linear é ponderada pelo empilhamento de fase, descrito como:

$$c_{ps}(\tau, f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{S_j(\tau, f) e^{i2\pi f \tau}}{|S_j(\tau, f)|} \right|^\nu \quad (4.2)$$

onde $S_j(\tau, f)$ é a transformada S (Stockwell et al., 1996 *apud* Schimmel et al., 2011) do j-ésimo traço, f é a frequência, τ é o tempo e ν é um parâmetro de ajuste na coerência do sinal (se $\nu = 0$ é obtido o empilhamento linear).

Dessa forma a transformada S do *tf-PWS* é dada por:

$$S_{pws} = c_{ps}(\tau, f) S_{is}(\tau, f) \quad (4.3)$$

onde $c_{ps}(\tau, f)$ é dado pela equação 4.2 e $S_{is}(\tau, f)$ é a transformada S do empilhamento linear.

Figura 4.15: Empilhamento para as correlações entre as estações BEB4B e BB15B com diferentes quantidades de dias. As cores indicam a evolução do traço empilhado conforme são acrescentados mais dias. Quanto mais próximo ao roxo menos dias foram utilizados, o traço vermelho indica o empilhamento para os 152 dias.

No método *tf-PWS* os sinais fracos, mas coerentes, são realçados por terem um peso ($c_{ps}(\tau, f)$) maior. Isso faz com que um ruído incoerente de grande amplitude tenha pouca influência no sinal empilhado com o *tf-PWS*, diferente do

que aconteceria com o empilhamento linear. A figura 4.15 ilustra a diferença entre os empilhamentos linear e *tf-PWS*. No linear, as amplitudes dos sinais não coerentes são atenuadas ao se acrescentar mais dias na correlação já no *tf-PWS* o sinal incoerente é atenuado do empilhamento final restando apenas a onda que chega aproximadamente em 1.5 s. Esse pulso coerente fica bem definido com poucos dias de dados.

4.2.4. Pré-filtro antes da correlação de ruído e curvas de dispersão

Para avaliar a influência do filtro aplicado na correlação de ruído antes e depois da normalização no tempo e frequência foram realizados testes com 38 faixas de filtros diferentes variando entre as faixas de 0 – 20.0 Hz. A cada teste, o traço da correlação de ruído obtido através do empilhamento *tf-pws*, teve a sua dispersão de velocidade de grupo Rayleigh medida com o programa *do_mft* do pacote de Herrmann & Ammon (2002).

O programa utiliza um filtro gaussiano múltiplo para se obter a curva de dispersão. Filtros gaussianos são mais indicados para essa tarefa do que, por exemplo, filtros passa-banda. Isso se deve ao fato de que se a faixa do passa-banda for muito estreita, para se obter uma boa definição no período, a medição dos picos das ondas é imprecisa, pois se acaba isolando somente uma determinada frequência. Se a faixa for muito larga, os picos são melhores definidos, porém há grande incerteza na determinação do período.

A largura do filtro Gauss usado em todos os testes foi de 3. O programa usa o filtro *match* (Dziewonski et al., 1969 *apud* Herrmann & Ammon, 2002) para separar a curva de dispersão medida do traço original, em seguida, para se obter uma curva de dispersão mais suavizada e sem influência do sismograma original, costuma-se executar o *do_mft* novamente (Bhattacharya, 1983 *apud* Herrmann & Ammon, 2002).

A dispersão foi medida levando-se em conta o tempo negativo e o positivo da correlação. O traço original proveniente do empilhamento foi invertido no tempo (comando *reverse* do SAC). Um novo traço foi formado somando-se o original e o invertido no tempo. A ideia ao se realizar esse procedimento é considerar todas as fontes de microssismos na correlação. Portanto, a dispersão será medida nesse traço.

A figura 4.16 mostra as curvas de dispersão obtidas com os diferentes filtros para o par de estações BEB4B-BB16B. Em destaque azul as curvas que apresentam, aproximadamente, a mesma dispersão.

Figura 4.16: Dispersões entre as estações BEB4B-BB16B obtidas com diferentes filtros antes do processo de normalização no tempo e frequência. Em destaque azul as curvas que apresentam, aproximadamente, a mesma dispersão.

Entre as estações BEB4B-BB16B verificou-se é que é importante que o filtro cubra a banda de frequência entre 0.1 - 2.0 Hz.

Na correlação entre as estações BEB4B-BB15B (figura 4.17) as curvas de destaque são obtidas usando a banda de frequência 0.5 - 2.0 Hz. A curva de dispersão medida é diferente em faixas que, além de conterem essa banda, possuem também frequências mais baixas. Na figura 4.18 é mostrada a dispersão obtida com o traço de filtro passa-banda 0.1 - 10 Hz. Nota-se que a curva de dispersão associada a faixa de 0.5 - 2.0 Hz, não é a de maior energia.

Outros motivos para escolher a faixa de frequência 0.5 - 2.0 Hz no par de estações BEB4B-BB15B foram a curva de dispersão de velocidade de fase Rayleigh obtida por Souza et al. (2008) e o fato da curva de correlação obtida com a faixa 0.1 - 10 Hz apresentar chegada de onda no tempo zero.

Figura 4.17: Dispersões entre as estações BEB4B-BB15B obtidas com diferentes filtros antes do processo de normalização no tempo e frequência. Em destaque azul as curvas que apresentam, aproximadamente, a mesma dispersão.

Figura 4.18: **A)** Dispersão entre as estações BEB4B-BB15B usando o filtro de 0.1 - 10 Hz. As cores indicam a amplitude da envoltória para cada período. A curva associada à faixa 0.5 - 2.0 Hz não é, nesse caso, a curva de maior energia. **B)** Dispersão entre as estações BEB4B-BB15B usando o filtro de 0.5 - 2.0 Hz. Mostrando a mesma curva agora com a que possui a maior energia. O traço que gerou a dispersão é mostrado à direita de cada figura.

Souza et al. (2008) mediram a velocidade de fase para os períodos de 0.5 a 2.0 s aproximadamente constante em 2 km/s e, selecionar a curva de maior energia do filtro de 0.1-10 Hz (figura 4.18 A), implicaria em escolher uma velocidade de

grupo de aproximadamente 3.6 km/s, ou seja, quase o dobro da velocidade de fase.

Uma presença de onda no tempo zero da correlação pode ser interpretada como sendo uma onda P que chega ao mesmo tempo nas duas estações (Roux et al., 2005). Então escolhendo o filtro de 0.5-2.0 Hz estamos isolando melhor a ondas de superfície.

A última parte do processamento exige escolher até que período deve-se medir a curva de dispersão. Esse período depende do espaçamento entre as estações. No caso BEB4B-BB15B e BEB4B-BB16B distam, respectivamente, 5 e 10 km. Bensen et al. (2007) e Huang et al. (2010) sugerem que se tome a dispersão até o período de:

$$T_{max} = \frac{\Delta}{nc} \quad (4.4)$$

onde Δ é a distância das estações, c é a velocidade de fase e n é o número desejado de comprimentos de onda (λ) entre as estações. Os autores sugerem tomar pelo menos 3λ de onda para que a estrutura entre as estações fosse bem amostrada. Neste caso decidiu-se usar 2.5λ e com $c = 2km/s$ (Souza et al., 2008) temos que $T_{max} = 1s$ para o par BEB4B-BB15B e $T_{max} = 2s$ para BEB4B-BB16B.

5. Resultados

5.1. Correlação de Ruído Ambiental

A figura 5.1 mostra o resultado do empilhamento da correlação cruzada de 152 dias entre as estações BEB4B-BB15B (verde) e 325 dias entre BEB4B-BB16B (vermelha). A parte causal do sinal (tempo positivo) corresponde às ondas se propagando de BEB4B a BB15B e a anticausal de BB15B a BEB4B. O fato da energia do sinal concentrar-se praticamente na parte causal do dado deve-se à distribuição das fontes do ruído microssísmico. Os microssísmicos são gerados principalmente na interação do oceano com a costa litorânea, portanto, a disposição de energia no sinal nos indica que a estação BEB4B está mais próxima do oceano do que as estações BB15B e BB16B (figura 5.2). A correlação cruzada dos dias usados no empilhamento é mostrado no Anexo 2.

Figura 5.1: Empilhamento da correlação de ruído ambiental. São empilhados 152 dias para o par de estações BEB4-BB15B (curva verde) e 325 dias para o par de estações BEB4-BB16B (curva vermelha).

Figura 5.2: Mapa com as estações sismográficas usadas na correlação de ruído ambiental: Em azul BEB4B, em verde BB15B e em BB16B vermelho. A estação BEB4B está mais próxima do oceano (fonte de ruído).

Na figura 5.3, se observadas a dispersão da velocidade de fase (em azul) e da velocidade de grupo (em verde) nota-se que elas são incompatíveis (figura 5.3). De fato, se velocidade de fase é aproximadamente constante, a velocidade de grupo também é constante e igual à primeira (Stein & Wysession, 2008).

Figura 5.3: Curvas de dispersão de velocidade de ondas Rayleigh (círculos). Em verde a dispersão obtida com as estações BEB4B-BB15B e em vermelho, a dispersão para BEB4B-BB16B. Em azul temos a dispersão de velocidade de fase para a onda Rayleigh medida com sismos locais por Souza et al. (2008).

Essa diferença pode ser explicada pela forma com que as dispersões foram obtidas. Souza et al. (2008) utilizaram quatro eventos com epicentros próximos à estação BB16B e registrados nas estações BEB9B, BEB8, BEB1, BEB11, BEB12 e BEB4B. Assim sendo, a curva obtida mostra dispersão média entre esse grupo de estações, enquanto a dispersão da correlação de ruído representa a média entre as estações BEB4B e BB15B. A estação BB15B está sobre uma camada mais espessa de arenito (figura 5.4) do que as estações utilizadas por Souza et al. (2008), portanto é esperado que a curva de dispersão apresente velocidades menores.

Figura 5.4: Espessura sedimentar da Formação Adamantina em Bebedouro. São mostradas as estações utilizadas por Souza et al., (2008) na obtenção da curva de dispersão de fase de onda Rayleigh (BEB8, BEB1, BEB11, BEB9B, BE12 e BEB4B) e as estações utilizadas na correlação de ruído (BEB4B e BB15B). A estação BB15B está sobre um maior pacote sedimentar do que as estações usadas por Souza et al., (2008).

5.2. Função do Receptor

5.2.1. Determinação da descontinuidade da Moho

A tabela abaixo mostra a determinação da profundidade da descontinuidade de Moho (H) e razão V_p/V_s (K) da crosta com o método de Zhu & Kanamori, (2000). Foram dados dois conjuntos diferentes de pesos às fases Ps , $PpPs$, $PpSs+PsPs$: 0.7, 0.2 e 0.1 (721) e 0.6, 0.3 e 0.1 (631). Os eventos usados foram registrados a mais de 20° de distância das estações, pré-filtrados com passa-alta 0.1 Hz e a FR calculada com Gauss 1. O diagrama HK obtido com 205 FRs de todas estações de banda-larga (BEB4B, BB15B, BB16B) com os pesos 0.6, 0.3 e 0.1 é mostrado na figura 5.5.

Tabela 5.1. Resultados de H e K para cada uma das estações de banda larga de Bebedouro para o método HK (Zhu & Kanamori, 2000). Os pesos usados foram de 0.7, 0.2 e 0.1 (721) e 0.6, 0.3 e 0.1 (631). A quantidade de eventos usados varia conforme a estação.

Estação	Pesos	H (km)	K	Eventos
BEB4B	721	40.0 (1.1)	1,80 (0.03)	96
	631	40.0 (1.0)	1.80 (0.03)	
BB15B	721	38.2 (2.1)	1.81 (0.05)	27
	631	38.6 (2.0)	1,80 (0.04)	
BB16B	721	40.2 (1.0)	1.79 (0.02)	82
	631	40.2 (0.9)	1.79 (0.02)	
Todas	721	40.0 (1.3)	1.78 (0.03)	205
	631	40.0 (1.0)	1.78 (0.02)	

As incertezas obtidas com os pesos 631 foram pouco menores do que as obtidas com o peso 721, ou seja, os resultados com menor incerteza foram aqueles que se deu mais importância a fase $PpPs$. Entretanto os valores de H e K pouco diferem quando são utilizados diferentes pesos. A lista dos eventos utilizados se encontra no Anexo 3.

Assumpção et al., 2002 estimaram a espessura crustal em 44 km na região assumindo uma razão V_p/V_s de 1.73. No diagrama HK (figura 5.5), nota-se que uma espessura de 44 km é compatível com uma V_p/V_s de 1.73 (circulo preto), entretanto os valores de H 40 km e K 1.78 se ajustaram melhor às FRs de baixa frequência das estações de Bebedouro.

Os resultados do método *HK* também foram incorporados nos modelos iniciais conforme mostrado no capítulo 4.

Figura 5.5: Empilhamento *HK* com todos os eventos das estações *BEB4B*, *BB15B*, *BB16B* com os pesos 0.6, 0.3 e 0.1. A linha vermelha é a elipse de incerteza dos parâmetros. O círculo preto representa os valores de espessura crustal e razão V_p/V_s (44 km e 1.73) obtidas por Assumpção et al. (2002)

5.2.2. Pré-filtro na estação *BEB4B*

A estação mais afetada pelo pré-filtro usado antes do cálculo da FR de alta frequência foi a estação *BEB4B*, conforme foi mostrado no capítulo 4. Na figura 5.6 tem-se a FR para os pré-filtros passa-alta (hp) 2.0 Hz e 0.1 Hz. Também são apresentados os traços de FR que foram empilhados para gerar as FRs médias e o ajuste da FR nos sismogramas das estações (*Rep*). Em vermelho são as FR na radial e em azul a FR na transversal.

A FR com passa-alta 2.0 Hz possui amplitude maior do que a FR com passa-alta 0.1 Hz. Isso faz com que a estrutura modelada pelo segundo filtro tenda a velocidades menores do que o primeiro. O resultado da inversão das duas curvas de FR de alta frequência está na figura 5.7. A inversão foi feita usando as informações adicionais disponíveis para a estação *BEB4B* (figura 4.7).

Figura 5.6: FRs para a estação BEB4B com os pré-filtros passa-alta 2.0 Hz (esquerda) e 0.1 Hz (direita). O empilhamento das FRs na radial (vermelho) e na transversal (azul) é mostrado no quadro acima junto com a distância média (Δ_M) e back-azimute médio (BAZ_M) do traço empilhado. Abaixo são as FRs utilizadas no empilhamento com o respectivo índice ajuste (Rep). As FR estão na mesma escala.

A principal diferença entre os modelos obtidos é a presença de uma camada de alta velocidade por volta de 250 m na inversão da FR com 2.0 Hz que não é evidente na inversão da FR com 0.1 Hz.

Outra diferença é a relação de amplitude da FR na radial e na transversal. A FR na transversal dá uma ideia de possíveis variações laterais. Na ausência de ruído ou variação lateral, toda a energia da onda P deve estar contida somente na radial e vertical, fazendo com que a amplitude da FR transversal seja próxima de zero (Langston, 1977; Langston & Hammer, 2001; Harland et al., 2009).

A amplitude da FR transversal empilhada (traço azul) é aproximadamente metade da FR radial de pré-filtro de 0.1 Hz (figura 5.6), o que indica que FR não pode ser representada por uma estrutura 1D. Portanto foi considerado que a FR de pré-filtro de 2.0 Hz é melhor para se obter um modelo 1D na estação BEB4B.

Figura 5.7: Inversão das FRs para a estação BEB4B com os pré-filtros passa-alta 2.0 Hz (esquerda) e 0.1 Hz (direita). As cores indicam o ajuste: quanto mais próximo do vermelho melhor o ajuste do modelo à curva FR. A linha preta é o modelo médio. Os modelos são mostrados em duas escalas (0 – 1 km e 0 – 4 km). A seta indica a camada de alta velocidade que não é evidente na FR com pré-filtro 0.1 Hz.

5.2.3. Função do Receptor nas estações

Na figura 5.8 são apresentadas as FRs e os sismogramas na componente vertical e na radial da estação BB15B. As FRs de alta frequência das outras estações estão no Axeno 3.

Nota-se que a amplitude das FRs transversais (traços azuis) é bem atenuada no traço empilhado sugerindo que essa amplitude é devida mais à presença de ruído no sismograma do que às variações laterais na estrutura abaixo das estações (Harland et al., 2009). Nos sismogramas dos eventos é possível perceber que o traço da componente radial (azul) é parecido com o da vertical (preto) deslocado no tempo. Essa semelhança é que faz com que o primeiro pico da FR seja positivo e deslocado em relação ao zero.

Na figura 5.9 é mostrado o traço empilhado da FR em cada estação usada no presente trabalho. Ao todo foi possível obter FR de 17 estações.

Em todas as estações, a amplitude da FR transversal é bem menor que a da radial, o que indica que a estrutura logo abaixo das estações pode ser aproximada por um modelo 1D. O primeiro pico da FR (pico da P direta) é ligeiramente deslocado em relação ao zero em todas as FR, exceto na BB16B. Esse primeiro pico deslocado e mais alongado pode ser atribuído à presença dos sedimentos da bacia (Cassidy, 1992).

Outro fato que sugere que a estrutura não possui grandes variações laterais é a semelhança dos traços de FR em estações próximas entre si. O traço da FR nas estações BEB2, BEB21 e BEB17 são similares, assim como o traço da BEB7 e da BEB11. Os traços da BEB13, BEB14 e BB16B também são parecidos. Os traços com maiores amplitudes são os da BEB1, BEB18 e BEB4A. Essa diferença de amplitude irá gerar no modelo final de maior velocidade conforme será exposto mais adiante.

Figura 5.8

Figura 5.9: Traço da FR na radial (vermelho) e na transversal (azul) das estações utilizadas nesse estudo. A transversal possui amplitude bem menor do que a radial.

Figura 5.8: FRs para a estação BB15B. O empilhamento das FRs na radial (vermelho) e na transversal (azul) é mostrado no quadro acima junto com a distância média (Δ_M) e back-azimute médio (BAZ_M) do traço empilhado. Abaixo são as FRs utilizadas no empilhamento com o respectivo índice ajuste (Rep). São mostrados a hora de origem, a magnitude, o back-azimute (cruzes), a distância (pontos) e os sismogramas normalizados da componente radial (azul) e da vertical (preto) dos eventos sísmicos.

5.2.4. Escolha dos melhores modelos

Em cada estação foram invertidos mais de 1800 modelos iniciais. Cada modelo foi invertido usando diferentes valores de suavidade e peso para as FRs e ondas de superfície. Foram usados cinco conjuntos de suavidade e peso usados na inversão:

- suavidade 0.2 e peso 0.2;
- suavidade 0.2 e peso 0.8;
- suavidade 0.5 e peso 0.5;
- suavidade 0.8 e peso 0.2;
- suavidade 0.8 e peso 0.8.

Uma inversão com maior suavidade resulta em um modelo com menos variação de velocidade entre as camadas. O peso varia entre zero (ajusta somente as FRs) e um (ajusta somente as curvas de ondas de superfície).

Para o resultado final foram considerados os modelos que obtiveram melhor ajuste (menor resíduo médio quadrático) na FR de alta frequência e nas curvas de dispersão. As FRs de baixa frequência não foram consideradas nessa escolha. Os pesos foram de:

- 0.8 para a FR de alta frequência;
- 0.5 para a dispersão de fase de onda Rayleigh.
- 0.3 para a dispersão de grupo de onda Rayleigh com correlação de ruído ambiental e tomografia regional;
- 0.1 para a dispersão de grupo de onda Love (tomografia regional);
- 0.1 para a dispersão de grupo de onda Rayleigh somente com dados de tomografia regional.

Na construção do modelo médio foi levado em conta o ajuste de cada modelo final aos dados de FR e de dispersão. Modelos com melhor ajuste tiveram maior peso na construção do médio. Neste trabalho os modelos de melhor ajuste estão representados por uma cor mais próxima ao vermelho, e os de ajuste inferior com cor próximo ao roxo (figura 5.10). Como os modelos finais apresentavam camadas com espessura diferentes, eles foram “decimados” em modelos de cama-

das de 1 m (uma camada de 1 km é subdividida em 1000 camadas de 1 m). Dessa forma evita-se a sobreposição de camadas com espessuras diferentes.

Figura 5.10: Ajuste da FR na estação BEB11. As cores indicam o ajuste: quanto mais próximo do vermelho melhor o ajuste do modelo à curva FR e da dispersão de grupo e fase. À esquerda os modelos iniciais e à direita os finais. O modelo em preto é o modelo médio. Na figura são mostrados 6025 modelos. Na BEB11 houve ensaio de refração sísmica, portanto o início de todos os modelos iniciais (parte mais superficial) é o mesmo.

Em cada estação, a distribuição dos 50 melhores modelos ocorre conforme a suavidade e peso (figura 5.11). Os dados que foram invertidos em cada estação são mostrados no capítulo 4. Nas estações BEB4B e BEB11, os melhores modelos foram obtidos com maior peso nas ondas de superfície (peso 0.8) e maior suavidade (0.8). Nessas estações foram invertidas a curva de dispersão de fase e a

de correlação de ruído. As estações BEB1 e BEB11, onde foram adicionadas informações de SASW, a maioria dos melhores modelos obtidos com suavidade 0.8 e peso 0.8. Esses resultados mostram a importância da adição de dados com informação de camadas mais superficiais na inversão de FR.

Figura 5.11: Distribuição dos 50 melhores modelos conforme a suavidade e peso para algumas estações. No eixo da abscissa apresentam-se os cinco conjuntos de suavidade (s) e o peso (i). A estação é mostrada acima junto com o número de modelos. Por exemplo, na estação BEB4B, 50/43 indica que há 50 modelos no histograma e 43 modelos iniciais diferentes, ou seja, sete modelos tiveram bom ajuste usando diferentes suavidades e pesos.

Nas estações BEB15 e BEB16, embora fosse incluída a informação de correlação de ruído, os melhores modelos foram obtidos com o maior peso na FR (peso 0.2). Na estação BEB21, sem informações adicionais de estruturas rasas, os melhores modelos também foram obtidos com maior peso na FR (peso 0.2), entre-

tanto, nos melhores modelos da estação não convergiram primeiros metros, conforme se mostrado mais adiante.

A convergência das iterações a um bom modelo final depende bastante afetada pela escolha do peso e da suavidade. Nos histogramas de figura 5.11, nota-se, que o conjunto dos 50 melhores modelos é, essencialmente, formado por 50 modelos iniciais diferentes.

5.2.5. Estruturas e Perfis de Velocidade S

A coluna esquerda da figura 5.12 mostra os dados (FRs e curvas de dispersão) usados na inversão da estação BEB4B. As curvas em preto são o dado medido e em vermelho o dado modelado. RF-g00 é a FR de alta frequência (Gauss 20) obtida a partir de eventos com distância menor que 20°. RF-g01 a g06 são FRs de baixa frequência (Gauss 3) empilhadas para diferentes grupos de eventos a distâncias e azimutes diferentes, conforme mostrado na figura 4.4. .

Abaixo, na coluna da esquerda, é mostrada a dispersão de velocidade de grupo de ondas Rayleigh e Love (gráfico A). Os períodos de 10 s a 140 s obtidos são os da tomografia continental (Feng et al., 2007), períodos de até 1 s obtidos são os obtidos com correlação de ruído entre as estações BEB4B e BB15B. A dispersão de velocidade de fase das ondas com períodos entre 1s e 2s (gráfico B) são os dados de Souza et al., 2008.

A coluna da direita mostra o modelo inicial (azul) e o modelo final (vermelho) em diferentes escalas. No gráfico C, as setas indicam a camada de alta velocidade associada ao basalto Serra Geral com aproximadamente 300 m de espessura. No gráfico D é apontada outra região de velocidade alta (~700 m). O embasamento parece estar em torno de 3 km onde a velocidade passa de 3 km/s. Essas estruturas são definidas pela FR de alta frequência e dispersão de ondas com pequenos períodos.

No gráfico E é indicada a descontinuidade da Moho. O início da Moho é definido principalmente pela fase *Ps* das FRs de baixa frequência (*pico em 5 s*). No Anexo 4 é mostrado os dados de FRs e curvas de dispersão usados na inversão da estação BB15B e BB16B.

Figura 5.12: FR e curvas de dispersão para a estação BEB4B. RF-g00 é a FR de alta frequência e RF-g01 a g06 são as FR de baixa frequência. São mostradas a distância média (Δ_M) e o back-azimute médio (Baz_m) de cada. O gráfico A e B representam, respectivamente, a dispersão de velocidade de grupo de ondas Love e Rayleigh e a dispersão de velocidade de fase de onda Rayleigh. À direita estão os modelos de velocidade de onda S inicial (azul) e final (vermelho) em diferentes escalas. As setas indicam o basalto Serra Geral (gráfico C) com uma estrutura de alta velocidade em torno de 700 m (gráfico D) e o início da Moho (gráfico E). Acima da RF-g00 está informação sobre a inversão: nome da estação (sta), número do modelo inicial (m), suavidade (smth) e peso (infl) e número de iterações (ite).

A inversão conjunta foi realizada utilizando diversos modelos iniciais com parâmetros de suavidade e peso suavidades. Na figura 5.13 são mostrados os 16 melhores modelos para cada estação utilizada no presente trabalho. O ajuste de cada estação está no Anexo 5.

Observando os modelos ajustados e o modelo médio (preto) percebe-se que há estações onde os primeiros metros não convergiram. Nessas estações (BEB17, BEB20 e BEB21) não foi acrescentado nenhuma informação adicional de camadas rasas.

Em todas as estações é possível ver um aumento de velocidade, associado ao tipo do basalto, por volta de 100 m. A espessura do basalto será discutida mais adiante. Um aspecto interessante é a presença de camadas de baixa velocidade dentro da camada de basalto. Essa baixa velocidade ocorre bem nítida nas estações BEB4A, BEB4B, BEB22, BEB11, BEB7, BEB19 e BEB1 e pode ser associada à presença de fraturas no basalto, ou uma camada de basalto alterado amigdaloidal (Souza, 1982).

Nas estações BEB14 e BEB1, onde a zona de baixa velocidade é menos evidente, essa camada poderia ser interpretada como arenito *intertrap*. Na região do Distrito de Andes há presença de arenito intercalado no basalto Serra Geral nas cotas 410 a 440 metros em, ao menos, cinco poços e na cidade de Bebedouro na cota de 474 m (Yamabe et al., 2005).

Os traços de FR com maiores amplitude são os de BEB1, BEB18 e BEB4A. No modelo médio obtido para essas estações, a velocidade S na camada de basalto ultrapassou 3.3 km/s, o que pode indicar a presença de um basalto mais massivo. No caso as estações BEB1 e BEB4A esse basalto mais estaria abaixo da zona de baixa velocidade que foi discutida.

Outra região de alta velocidade é encontrada próxima a 1 km. Essa zona de alta velocidade aparece nas estações BB16B, BEB14, BEB13, BB15B, BEB11, BEB4B, BEB19, BEB17. Uma possível explicação para essa camada de alta velocidade é a presença de intrusões de diabásio. A presença de diabásio é identificada em poços em Ribeirão Preto, aproximadamente em 70 km de Bebedouro (Masoli, 2007; Monteiro, 2003). A estação BEB4 apresenta outra zona de alta velocidade com espessura menor (em torno de 100 m), entretanto a FR dessa estação

foi obtida somente com um evento, fazendo com que o seu modelo final não seja muito confiável.

Segundo Souza (1982) a velocidade da onda P no diabásio na Bacia do Paraná é de 5.4-6.2 km/s. Na inversão suavizada de FR, camadas onde há grandes saltos de velocidades tendem a ser modeladas como camadas mais espessas e de velocidade menor, o que explicaria porque a região de alta velocidade no perfil de velocidade indica uma estrutura de 0.5 a 1.0 km conforme a estação.

A Figura 5.14 mostra o modelo médio plotado em dois perfis. Um leste-oeste (A) com as estações BB16B, BEB14, BEB13, BEB18, BB15B, BEB17, BEB21 e BEB2 e outro Sul-Norte (B) com as estações BEB4B, BEB4A, BEB11, BEB7, BEB1 e BEB22. As estações BEB4 e BEB20 não foram usadas por apresentarem um perfil um pouco diferente das demais (figura 5.13). A linha branca representa a velocidade de 2.3 km/s, usada como indicativo do basalto.

O topo do basalto está em torno da cota de 500 m na região mais ao sul. Como esperado pelos poços da região (figura 2.4) Na parte mais a leste (estações BB16B e BB14B) essa camada está um pouco mais profunda, na cota de 450 m (figura 5.14 perfil A).

A camada de basalto parece ser mais espessa no perfil B. A cota da base do basalto é em torno de 100m, o que resulta em uma espessura de aproximadamente 400m. No perfil A a espessura do basalto é aproximadamente de 200m – 250 m, embora se apresente menos espesso (100 m) na estação BEB13.

Figura 5.13: Perfis de velocidade de onda S obtidos na região. A estação correspondente está indicada no perfil.

Figura 5.14: Perfis de velocidade de onda S obtidos com as estações sismográficas de Bebedouro. Em **A** é apresentado o perfil W-E e **B** o perfil S-N. A linha branca representa a velocidade de 2.3 km/s. Estações ordenadas sem escala.

O embasamento cristalino da Bacia foi definido onde a velocidade da onda S atinge de 3.0 – 3.2 km/s. A figura 5.15 mostra o embasamento definido pela linha de contorno de 3.0 e 3.2 km/s resultando em um topo entre as cotas de -2.0 e -2.5 km, o que corresponde a aproximadamente a uma profundidade 2.5 km a 3.0 km.

Figura 5.15: Perfis de velocidade de onda S obtidos com as estações sismográficas de Bebedouro. A linha branca representa as velocidades de onda S de 3.0 e 3.2 km/s.

Uma profundidade do embasamento em torno de 2.5 km é esperada para a região. A figura 5.16 mostra a profundidade do embasamento na Bacia do Paraná baseada em poços profundos da Paulipreto e Petrobrás. Nota-se que um poço profundo próximo a Bebedouro (triângulo) com 2.5 km de profundidade do embasamento.

Figura 5.16: Profundidade do embasamento na Bacia do Paraná baseada em poços profundos da Paulipreto e Petrobrás. O triângulo representa a rede sismográfica de Bebedouro. Adaptado de Meijian & Assumpção (2004).

5.2.6. Relação com a sismicidade

Como já foi mencionado, um aspecto interessante é a presença de camadas de baixa velocidade dentro da camada de basalto. Essa baixa velocidade ocorre bem nítida nas estações BEB4A, BEB4B, BEB22, BEB11, BEB7, BEB19 e BEB1. Essa zona de baixa velocidade pode ser interpretada como devido à presença de fraturas no basalto ou uma camada de basalto mais alterado.

A figura 5.17 mostra os epicentros de sismos ocorridos em Andes com melhor localização epicentral (mínimo de oito leituras de fase de ondas com rms inferior a 0.02). As estações que apresentam a camada mais fraturada são mostradas em azul no mapa.

Nas áreas sismicamente ativas, como aquelas próximas às estações 1, 7 e 11, há presença da zona de baixa velocidade. Nessas áreas também existem poços de grande vazão (círculos amarelos). Esse resultado ajuda na ideia de que os

tremores estariam associados à exploração dos poços e aumento de pressão de poro em zona de aquífero fraturado dentro do pacote de basalto (Assumpção et al., 2010).

Figura 5.17: Epicentros de sismos ocorridos em Andes com excelente localização epicentral. Em azul as estações que apresentam uma zona de baixa velocidade na camada de basalto. Triângulos brancos são estações onde o basalto parece mais compacto sem zona de baixa velocidade.

6. Conclusões e Perspectivas

Com o trabalho desenvolvido nessa dissertação foi possível determinar a espessura da camada de basalto Serra Geral no Distrito Andes (variando de 200 a 400m), bem como identificar possíveis zonas de fratura dessa camada ou basalto alterado. Também foi possível identificar o embasamento em 2.5-3.0 km bem como a espessura e razão V_p/V_s crustal em 40 km e 1.78.

Esses resultados demonstram que a Função do Receptor é uma importante ferramenta no estudo de bacia sedimentares mostrando-se um método viável na identificação tanto de feições mais profundas (FR de baixa frequência) quanto de estruturas mais rasas (FR de alta frequência) como a espessura da camada de basalto e a profundidade do embasamento não haviam sido atingidas com sísmica de refração rasa. No entanto, para ter resultados mais confiáveis, a análise das FRs precisa ser acompanhada de outras informações como dispersão de ondas de superfície em várias faixas de frequência.

A correlação de ruído se mostrou um bom método para a determinação da curva de dispersão principalmente de períodos menores. Essa informação é muito útil na identificação de camadas mais superficiais durante a inversão conjunta. Também é importante ressaltar que a correlação é obtida do registro contínuo das estações, dado que não é usado normalmente.

Uma importante relação entre as estações que apresentaram zonas de baixa velocidade dentro do basalto e a disposição dos epicentros foi identificada. Esse resultado é consistente com a ideia de que os tremores estariam associados à exploração dos poços de água e estruturas do aquífero fraturado dentro do basalto.

Brevemente será possível comparar os resultados obtidos com a FR com o método TDEM (estágio final de processamento) na delimitação da espessura da camada de basalto e com o método MT (em processamento) na determinação da interface de profundidade do embasamento.

7. Referências Bibliográficas

- Ammon, C., Randall, G., Zandt, G., 1990. On the non-uniqueness of receiver function inversions. *J. Geophys. Res.*, 95, 15303-15318.
- Ammon, C., 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 81, p. 2504 – 2510.
- An, M., Assumpção, M., 2004. Multi-objective inversion of surface waves and receiver functions by competent genetic algorithm applied to the crustal structure of the Paraná Basin, SE Brazil. *Geophysical Research Letters*, USA, v. 31, n. 5, p. L05615.
- Assumpção, M., James, D., Snoke, A., 2002. Crustal thicknesses in SE Brazilian shield with receiver function: implications for isostatic compensation. *Journal of Geophysical Research*, Estados Unidos, v. 107, n. B1, p. 2-1-2 14.
- Assumpção, M., T.H. Yamabe, J.R. Barbosa, A.E.V. Lopes, & L. Balancin, 2007. Atividade sísmica no distrito de Andes, Bebedouro, 2005-2006 e sua relação com a perfuração de poços tubulares. Relatório Circunstanciado de março de 2007. Disponível em www.geo.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro. (Não publicado)
- Assumpção, M., Yamabe, T. H., Barbosa, J. R., Hamza, V., Lopes, A. E. V., Balancin, L., Bianchi, M. B., 2010. Seismic activity triggered by water wells in the Paraná Basin, Brazil. *Water Resources Research*, v. 46, p. W07527
- Barmin, M.P., A.L. Levshin, Y. Yang, M.H., 2011. Ritzwoller. Epicentral location based on Rayleigh wave empirical Green's functions from ambient seismic noise, *Geophys. J. Int.*, 184 (2), 869-884
- Bensen, G. D., Ritzwoller M. H., Barmin M. P., Levshin A. L., Lin F., Moschetti M. P., Shapiro N. M., Yang Y., 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys. J. Int.* 169: 1239–1260.
- Bhattacharya, S. N. (1983). Higher order accuracy in multiple filter technique, *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1395-1406.

- Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M., Gonçalves J. H. (Editores) 2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 692p.
- Bormann, P, 2002. New Manual of Seismological I observatory practice, *Geoforschungs Zentrum Potsdam*, vol. 1.
- Bromirski, P. D, 2009. Earth Vibration. *Science*, 324, 1026 – 1027.
- Campillo, M., Paul, A. 2003. Long-Range Correlations in the Difuse Seismic Coda. *Science*, 299, 547-549.
- Cassidy, J. F., 1992. Numerical experiments in broadband receiver function analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1453-1474.
- Cordani U.G., Brito Neves B.B., Fuck R.A., Porto R., Thomaz Filho A., Cunha F.M.B, 1984. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Boletim Ciência Técnica Petróleo*, Seção Exploração de Petróleo, n.15, 70 p.
- Costa, T.N., 2006. Estudo de Espessura Sedimentar na bacia do Paraná com função do receptor de alta frequência. Dissertação Mestrado em Geofísica - *Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- Crotwell, H. P., Owens, T. J., 2005. Automated Receiver Function Processing *Seismological Research Letters* 76: 702-709.
- CPRM, 2001. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapas na escala 1:2.500.000 = Geology, Tectonics and Mineral Resources of Brazil: Geographic Information System - GIS and Maps at the 1:2.500.000 scale / Luiz Augusto Bizzi, Carlos Schobbenhaus, João Henrique Gonçalves, Franciscus Jacobus Baars, Inácio de Medeiros Delgado, Máisa Bastos Abram, Reginaldo Leão Neto, Gerson Manoel Muniz de Matos, João Orestes Schneider Santos - Brasília : CPRM, 2001. 4 CD-Rom.
- Dziewonski, A., Bloch, S., Landisman, M., (1969). A technique for analysis of transient seismic signals, *Bull. Seism. Soc. Am.* 59, 427-444.
- Efron, B., Tibshirani R., 1991. Statistical data analysis in the computer age. *Science* 253, 390–395.

- Feng, M., Assumpção, M., Van Der Lee S., 2005. Group-velocity tomography and lithospheric S-velocity structure of the South American continent. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 147, n. 4, p. 315-331.
- Feng, M., Van der Lee S., Assumpção, M., 2007. Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental-mode group velocities of Rayleigh waves. *J. Geophys. Res.*, 112.
- França, G., Assumpção, M., 2004. Crustal structure of the Ribeira fold belt, SE Brazil, derived from receiver functions. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, n. 8, p. 743-758.
- Gerstoft P., Sabra, K. G., Roux P., Kuperman W. A., Fehler M. C, 2006. Green's functions extraction and surface wave tomography from microseisms in Southern California. *Geophysics*, 71, SI23-SI31.
- Harland, K. E., White, R. S., Soosalu, H., 2009. Crustal structure beneath the Faroe Islands from teleseismic receiver functions. *Geophysical Journal International*, 177 (1). pp. 115-124.
- Herrmann, R.B., Ammon, C.J, 2002. *Computer Programs in Seismology*, vol. IV, St. Louis University, Missouri.
- Hoffmann, H., Winterflood, J., Cheng, Y., Blair, D.G., 2002. Cross-correlation studies with seismic noise. *Class. Quantum Grav.*, vol. 19, p. 1709–1716.
- Holcomb, L.G., 1998. Spectral structure in the Earth's microseismic background between 20 and 40 seconds. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88(3), 744–757.
- Huang, Y. C., Yao, H., Huang, B. S., van der Hilst, R. D., Wen, K. L., Huang, W. G., Chen, C. H., 2010. Phase Velocity Variation at Periods of 0.5-3.0 Seconds in the Taipei Basin of Taiwan from Correlation of Ambient Seismic Noise, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(5A), 2250-2263.
- Julià J., Ammon, C.J., Herrmann, R.B., Correig, A. M., 2000. Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations. *Geophys. J. Int.*, 143, 99-112.
- Julià, J., Herrmann, R., Ammon, C., Akinci, A., 2004. Evaluation of deep sediment velocity structure in the New Madrid zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 94, p. 334 – 340.

- Julià, J., Assumpção, M., Rocha, M. P., 2008. 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, p. B08318.
- Langston, C. A., 1977. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, 1029-1050.
- Langston, C. A., 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.* 84, 4749 – 4762.
- Langston, C. A., Hammer J. K., 2001. The vertical component P-wave receiver function, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1805–1819.
- Larose, E., Derode, A., Campillo, M. & Fink, M., 2004. Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse wavefields, *J. Appl. Phys.*, 95, 8393–399.
- Leite, L. W. B. *Introdução a Análise Espectral em Geofísica*. FADESP. Belém, Pará, 1998.
- Ligorria, J.P., Ammon, C., 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 1395-1400.
- Massoli, M., 2007. Caracterização litofaciológica das Formações Pirambóia e Botucatu, em subsuperfície, no município de Ribeirão Preto (SP), e sua aplicação na prospecção de águas subterrâneas, Tese de doutorado, *Universidade Estadual Paulista*.
- Milani E.J., Ramos V.A., 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28:473-484.
- Milani, E. J., 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: V. Mantesso Neto; A. Bartorelli; C. D. R. Carneiro; B. B. B. Neves (Organizadores.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, São Paulo, p. 265-279.
- Milani, E.J.; Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A. e França, A. B., 2007 Bacia do Paraná. In *Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobrás v.15. n.2*.

- Monteiro, R.C, 2003. Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do sistema aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto, Brasil, Tese de doutorado, *Universidade Estadual Paulista*.
- Oldenburg, D. W., 1981. A comprehensive solution to the linear deconvolution problem, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 65, 331-357.
- Owens T J, Zandt G, Steven R T. 1984. Seismic evidence for an ancient rife beneath the Cumberland plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms. *J Geophys Res*, 89: 7783-7795.
- Prieto, G. A., Lawrence J. F., Chung, A. I, Kohler, A. I., 2010. Impulse Response of Civil Structures from Ambient Noise Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100 (5A), pp. 2322-2328.
- Rosa, A., Tassini, J., Backus M., 1892. Seismic Data Quality in a Basalt Covered Basin. In: *SEG MEETING*, 62. SEG Expanded Abstracts 1.
- Roux, P., Sabra K. G, Gerstoft P., Kuperman W. A., Fehler M. C., 2005. P-waves from cross-correlation of seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, 3.
- Shapiro N.M., Campillo M., 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, vol 31, L07614.
- Shapiro, N., Campillo, M., Stehly, L., Ritzwoller M., 2005. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, vol. 307, p. 1615 – 1618.
- Schimmel M., and J. Gallart., 2005. The inverse S Transform in filters with time-frequency localization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53 (11), 4417 – 4422.
- Schimmel M., and J. Gallart, 2007. Author's reply to comments on the inverse S-transform in filters with time-frequency localization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55, 5120-5121.
- Schimmel, M., Stutzmann, E., Gallart, J., 2011. Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale, *Geophys. J. Int.*, 184, 494-506.
- Schumann, F.B., Prado, R. L, 2009. O uso dos métodos de sísmica de refração e de ondas superficiais visando à caracterização da subsuperfície. In: *11th In-*

- ter. Congr. SBGf, 2009, Salvador/BA. 11th Inter. Congr. SBGf, 2009. v. CD-ROM.
- Silva, G.R., Vianna, R.B., 1982. Aplicabilidade do Método de Reflexão Sísmica na Bacia do Paraná. In: Consórcio CESP/IPT. *Geologia da Bacia do Paraná. Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. São Paulo.
- Souza, J., 1982 Transmission of seismic energy through the Brazilian Paraná Basin Layered Basalt Stack. In: *SEG MEETING*, 62. SEG Expanded Abstracts 1.
- Souza, L. M.; Silva, J. A.; Assumpção, M.; Prado, R.; Schumann, F.; Julia, J., 2008. Use of High-Frequency Teleseismic Receiver Function to Determine Basalt Thickness and Basement Depth in the Intracratonic Parana Basin, Brazil. *American Geophysical Union*, Spring Meeting 2008,
- Stehly, L., Campillo, M., Shapiro, N. M, 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *Journal of Geophysical Research*, B10306, p. 1-12.
- Stein, S., Wysession, M. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing. 498p.
- Stockwell, R.G., Mansinha, L., Lowe, R.P., 1996. Localization of the complex spectrum: the S transform, *IEEE Trans. Signal Process.*, 44(4), 998–1001.
- Stutzmann, E., Schimmel, M., Patau, G., Maggi, A., 2010. Global climate imprint on seismic noise. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10.
- Wapenaar, K., 2004. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation: *Physical Review Letters*, 93, 254301-1 - 254301-4.
- Weaver, R. L., Lobkis, O. I., 2001. Ultrasonics without a Source: Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies. *Phys. Rev. Lett.*, 87(13).
- Wilson, D., Aster, R., 2003. Imaging crust and upper mantle seismic structure in the southwestern United States using teleseismic receiver functions. *The Leading Edge*, 22(3), 232-237.
- Yamabe, T.H., Assumpção, M., Lopes, A.E.V., Barbosa, J.R., Bianchi, M., Galhardo, L., Schramm, D., 2005. Atividade Sísmica de Bebedouro, Norte do Es-

- tado de São Paulo - Outro Caso de Sismicidade Induzida por Poços Tubulares?, *II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste*, Ribeirão Preto-SP, 19p.
- Yang, Y., Ritzwoller M.H., Levshin., A.L., Shapiro, N.M., 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophys. J. Int.*, 168(1), page 259.
- Yang, Y., Ritzwoller M.H., 2008. The characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography, *Geochem., Geophys., Geosys.*, 9(2),
- Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C., Marques, A., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., 1990. Bacia do Paraná. In: *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro. p. 135 - 164.
- Zevallos, I., Assumpção, M., Padilha, A. L., 2009. Inversion of teleseismic receiver function and magnetotelluric sounding to determine basement depth in the Paraná Basin, SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*. Volume 68, Issue 2, June 2009, Pages 231-242.
- Zhang, J., P. Gerstoft, Shearer, P. M., 2010. Resolving P-wave travel-time anomalies using seismic array observations of oceanic storms, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 292, 419-42.
- Zhu, L., Kanamori, H., 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 2969 – 2980.

A. ANEXO 1 – Lista de eventos usados na inversão FR

Tabela A.1: Eventos nas estações sismográficas de período curto. Dec. refere-se ao ajuste na deconvolução.

BEB1B					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2005-078-01:35:58	-68,6259	-20,4149	0,00	5,1Mb	93,80
2005-084-03:54:26	-68,8999	-20,2999	96,00	5,2Mb	94,30
2005-164-22:44:30	-69,3279	-20,0539	114,90	7,9MI	97,40
2005-164-22:44:58	-65,0481	-13,7700	30,00	6,45Mb	97,30
2005-172-05:11:18	-68,6435	-18,9789	89,30	5,0Mb	94,80
2005-178-00:53:42	-69,5949	-19,4749	37,00	5,1Mb	95,20
2005-179-06:10:30	-69,3009	-19,9059	106,10	5,0MI	98,50
2005-226-02:39:37	-69,0329	-19,7139	97,00	5,1Ms	98,70
2005-296-04:49:18	-68,4357	-21,0429	126,70	5,1Mb	89,60
2005-321-19:26:54	-67,9420	-22,3675	161,70	6,8Mb	86,90
2005-354-20:37:11	-68,5425	-21,3825	109,20	5,0Mb	86,50
2006-004-13:01:33	-66,2682	-22,8813	246,40	5,0Mb	86,70
2006-074-08:06:06	-68,8999	-19,5999	112,00	5,2Mb	98,10
2006-176-04:15:19	-66,1999	-22,9999	222,00	5,0Mb	86,70
2006-178-02:07:28	-68,4584	-22,4290	77,50	5,27Mb	86,20
2006-263-04:12:06	-69,3822	-18,5449	90,00	5,0Mb	92,70
2006-290-04:02:36	-68,3080	-21,0103	140,70	5,29Mb	91,00
2006-308-18:54:32	-68,9639	-19,1359	107,00	5,1Mb	96,10
2006-311-13:25:35	-68,2362	-21,7242	124,60	5,48Mb	92,40
2007-036-03:17:01	-68,5999	-19,7999	35,00	5,2Ms	96,10
2007-055-13:33:03	-68,3199	-21,9699	127,00	5,3Mb	88,50
2007-102-02:59:27	-68,4229	-19,0319	33,00	5,6Mb	91,10
2007-108-01:08:06	-66,7059	-23,9669	162,00	5,3Mb	90,50
2007-121-03:52:19	-68,5562	-21,3782	121,10	5,26Mb	97,90
BEB2B					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2005-078-01:35:59	-69,5399	-20,5299	111,00	5,5Mb	87,6
2005-084-03:54:26	-68,8999	-20,2999	96,00	5,2Mb	92,4
BEB4					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2005-164-23:26:39	-68,9917	-19,8798	107,2	5,3Ms	85,4
BEB4A					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2006-178-11:24:36	-69,3039	-21,5259	120,00	5,4MI	88,50
2006-184-16:07:13	-66,4969	-27,8959	160,00	5,0Mb	87,40
2006-276-00:33:38	-69,0999	-19,1999	82,00	5,1Mb	87,40
2006-286-10:28:41	-69,3299	-18,0619	108,00	5,2Mb	89,40
2006-317-01:26:33	-63,2209	-26,0409	552,00	5,8Mb	85,00

continua...

2007-036-03:17:01	-68,5999	-19,7999	35,00	5,2Ms	87,20
2007-038-18:55:10	-68,7999	-16,8899	65,40	5,7Mb	85,70
2007-144-19:25:00	-67,2839	-17,2819	33,00	5,0Mb	86,50
2007-241-16:18:09	-68,3886	-21,0269	134,50	5,06Mb	86,40
2007-241-16:19:00	-67,1599	-23,0399	516,00	5,0Mb	86,40
BEB7					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2005-164-22:44:30	-69,3279	-20,0539	114,90	7,9MI	93,30
2005-164-22:44:58	-65,0481	-13,77	30,00	6,45Mb	92,30
2005-172-05:11:16	-68,8793	-19,9524	103,40	5,26Mb	91,30
2005-173-19:22:54	-68,6999	-19,6999	150,00	5,3Mb	87,80
2005-179-06:10:30	-69,3009	-19,9059	106,10	5,0MI	93,00
2005-226-02:39:37	-69,0329	-19,7139	97,00	5,1Ms	93,50
BEB11					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2006-049-18:24:03	-66,4697	-20,3059	231,20	5,0Mb	87,80
2006-074-08:06:06	-68,8999	-19,5999	112,00	5,2Mb	93,00
2006-184-16:07:13	-66,4969	-27,8959	160,00	5,0Mb	86,70
2006-197-23:20:38	-68,8999	-20,0999	98,00	5,1Mb	90,10
2006-207-02:17:30	-68,0799	-20,6599	125,00	5,0Mb	85,20
2006-280-08:20:57	-69,2289	-23,1689	100,90	5,5Mb	85,00
2006-290-04:02:36	-68,308	-21,0103	140,70	5,29Mb	87,30
2007-036-03:17:01	-68,5999	-19,7999	35,00	5,2Ms	93,90
2007-038-18:55:10	-68,7999	-16,8899	65,40	5,7Mb	86,20
2007-073-21:34:00	-69,0759	-19,4879	100,00	5,1Mb	87,30
2007-144-19:25:07	-69,2999	-17,6999	123,00	5,2Mb	87,60
BEB13					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2007-121-03:52:20	-68,4699	-21,3399	0,00	5,4Mb	85,50
2007-138-19:31:45	-67,0799	-24,5799	94,00	5,1Mb	91,00
2007-216-17:56:53	-67,8199	-22,9399	10,00	5,1Mb	86,40
2007-232-21:01:28	-66,5379	-19,6499	232,00	5,4Mb	85,10
2007-267-18:31:34	-67,1999	-20,7999	186,00	5,2Mb	88,90
2007-322-05:40:19	-65,7599	-23,3299	278,00	5,9Mw	96,00
BEB14					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2007-029-21:42:21	-66,6999	-27,8999	165,000	5,2Mb	86,70
2007-036-03:17:01	-68,5999	-19,7999	35,000	5,2Ms	91,70
2007-108-01:08:06	-66,7059	-23,9669	162,000	5,3Mb	92,00
2007-121-03:52:20	-68,4699	-21,3399	0,000	5,4Mb	90,50
2007-202-15:34:49	-66,3209	-23,0249	280,000	5,0Ms	92,80
2007-298-08:35:16	-68,7019	-20,3889	96,000	5,5Mb	91,20
2007-322-05:40:09	-65,9399	-21,7849	231,400	5,4Mb	90,60
2007-325-12:54:57	-68,2499	-25,4499	10,000	6,34Mw	92,30

continua...

2008-247-11:25:14	-63,225	-26,736	569,600	5,9Mb	90,60
2008-255-17:11:34	-69,052	-19,649	106,200	5,1Mb	89,20
2009-132-01:03:58	-66,809	-22,318	174,900	5,2Mb	93,20
BEB17					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2009-086-17:26:42	-69,213	-19,08	114,8	5,4Mb	89,40
2009-132-05:07:06	-68,909	-20,057	103,7	5,1Mb	85,20
BEB18					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2008-035-17:01:46	-66,2439	-17,8859	33,00	6,2Ms	93,60
2008-047-14:45:01	-68,3199	-21,6199	10,00	5,9Mb	87,50
2008-149-17:35:27	-68,7169	-21,7339	125,00	5,5Mb	93,30
2008-160-15:05:13	-65,3399	-17,1399	33,00	5,1Mb	90,80
2008-207-07:48:08	-68,2946	-22,0279	100,00	5,2Mb	86,60
2008-255-17:11:34	-69,052	-19,649	106,20	5,1Mb	93,50
2008-259-23:36:52	-66,799	-24,166	152,10	5,1Mb	90,70
2008-260-21:56:40	-68,615	-20,389	114,80	5,0Mb	88,80
2008-280-00:18:28	-68,931	-18,398	135,10	5,0Mb	86,40
2008-286-20:55:41	-64,971	-20,123	352,70	6,0Mb	87,60
2009-024-19:30:18	-67,708	-18,919	183,10	5,1Mb	87,70
2009-042-20:45:32	-68,794	-20,249	109,00	5,3Mb	87,10
2009-108-15:29:19	-68,296	-23,286	115,70	5,1Mw	88,10
2009-132-01:03:58	-66,809	-22,318	174,90	5,2Mb	90,60
2009-147-23:22:24	-67,723	-23,634	111,50	5,2Mb	86,80
2009-196-15:21:27	-68,927	-20,353	112,10	5,3Mb	92,30
2009-206-04:17:11	-66,594	-24,008	185,00	5,1Mb	86,40
2009-318-19:44:29	-66,641	-22,965	220,40	5,8Mb	91,50
2010-038-17:09:47	-66,564	-23,225	238,90	5,4Mb	86,80
2010-063-22:39:26	-68,328	-22,227	114,00	6,3Mb	94,40
BEB19					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2008-047-14:45:01	-68,3199	-21,6199	10,00	5,9Mb	90,60
2008-084-20:39:04	-69,354	-19,5399	100,00	5,5Mb	96,10
2008-122-15:16:51	-68,8999	-23,0999	83,00	5,3Ms	92,70
2008-166-22:11:18	-68,2999	-21,5999	112,00	5,1Mb	86,70
2008-207-07:48:08	-68,2946	-22,0279	100,00	5,2Mb	87,10
2008-247-11:25:14	-63,225	-26,736	569,60	5,9Mb	89,70
2008-255-17:11:34	-69,052	-19,649	106,20	5,1Mb	97,50
2008-280-00:18:28	-68,931	-18,398	135,10	5,0Mb	93,70
2009-132-05:07:06	-68,909	-20,057	103,70	5,1Mb	89,70
2009-206-04:17:11	-66,594	-24,008	185,00	5,1Mb	92,10
2009-317-07:27:13	-64,095	-17,917	608,00	5,3Mb	89,50
2009-318-19:44:29	-66,641	-22,965	220,40	5,8Mb	85,70
2010-063-22:39:26	-68,328	-22,227	114,00	6,3Mb	91,20

continua...

2010-095-22:36:57	-68,842	-19,86	94,20	5,8Mb	95,80
2010-121-21:01:35	-68,385	-21,032	117,00	5,0Mb	93,10
2010-124-16:12:55	-68,235	-21,867	92,00	5,4Mb	90,70
2010-164-02:20:23	-66,639	-17,836	269,00	5,0Mb	92,60
BEB20					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2008-255-17:11:34	-69,052	-19,649	106,20	5,1Mb	94,10
2008-280-00:18:28	-68,931	-18,398	135,10	5,0Mb	95,40
2008-286-20:55:41	-64,971	-20,123	352,70	6,0Mb	94,20
2009-024-19:30:18	-67,708	-18,919	183,10	5,1Mb	95,60
2009-031-16:29:36	-69,065	-19,41	102,30	5,4Mb	94,50
2009-086-17:26:42	-69,213	-19,08	114,80	5,4Mb	93,70
BEB21					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2009-196-15:21:27	-68,927	-20,353	112,10	5,3Mb	88,90
2009-208-10:58:15	-66,592	-23,962	184,10	5,1Mb	92,60
2009-237-21:35:00	-68,837	-21,177	138,00	5,1Mb	88,10
2009-317-07:27:13	-64,095	-17,917	608,00	5,3Mb	92,60
2009-333-17:05:30	-65,717	-21,968	275,80	5,2Mb	86,90
BEB22					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2010-063-22:39:26	-68,328	-22,227	114,00	6,3Mb	92,80
2010-095-22:36:57	-68,842	-19,86	94,20	5,8Mb	93,40
2010-121-21:01:35	-68,385	-21,032	117,00	5,0Mb	88,10

Tabela A. 2: *Eventos nas estações sismográficas de período longo. Dec. refere-se ao ajuste na deconvolução e a coluna Grupo indica o grupo em que os eventos foram encaixados.*

BEB4B						
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.	Grupo
2008-006-05:14:15	22,861	36,615	75,00	5,9Mb	93,70	06
2008-006-05:14:45	22,640	37,210	35,00	6,3MI	93,80	06
2008-039-09:38:12	-41,910	10,720	10,00	7,0Ms	98,80	05
2008-039-09:38:57	-41,020	10,880	358,00	5,8Mb	98,80	05
2008-043-12:50:10	-94,313	16,207	33,00	5,9Ms	97,40	01
2008-043-12:50:27	-92,300	18,082	44,00	5,9Ms	97,40	01
2008-045-10:09:35	22,890	35,740	59,50	6,4Mb	90,00	06
2008-045-10:10:11	19,832	39,826	30,00	5,8Ms	91,80	06
2008-144-19:35:34	-34,897	7,313	8,00	6,0Mb	99,50	05
2008-179-05:08:11	-62,413	11,148	147,60	5,2Mw	87,30	01
2008-190-09:13:07	-71,748	-15,986	123,00	5,8Mb	94,00	02
2008-290-19:41:25	-92,364	14,423	24,00	6,1Mb	98,90	01

continua...

2009-128-13:44:53	-69,678	-32,057	111,90	5,6Mb	90,40	03
2009-132-05:07:06	-68,909	-20,057	103,70	5,1Mb	84,30	00
2009-138-14:01:04	-74,838	-15,658	22,70	5,3Mb	92,50	02
2009-145-05:10:13	-71,321	-28,519	48,80	5,4Mb	96,40	03
2009-148-08:24:46	-86,217	16,731	19,00	6,7Mb	99,40	01
2009-164-20:10:52	-70,804	-17,360	61,40	5,1Mb	90,30	02
2009-166-13:04:36	-76,133	-13,563	42,20	5,4Mb	89,20	02
2009-170-10:36:22	-68,898	-21,078	111,20	5,3Mb	85,40	00
2009-317-03:05:57	-70,321	-19,394	27,00	6,2Mb	98,40	02
2009-317-07:27:13	-64,095	-17,917	608,00	5,3Mb	90,10	00
2009-326-22:07:47	-74,972	-39,636	4,00	5,8Mb	95,00	03
2009-358-14:01:58	-73,978	-15,766	59,10	5,7Mb	93,70	02
2010-012-21:53:10	-72,571	18,443	13,00	6,8Mb	98,30	01
2010-018-15:40:26	-90,132	13,728	54,70	5,4Mb	93,50	01
2010-043-12:03:38	-68,789	-33,622	148,40	5,6Mb	95,60	03
2010-058-06:34:14	-72,730	-35,909	35,00	8,5Ms	99,70	03
2010-058-07:37:18	-72,652	-36,847	35,00	6,0Mb	86,30	03
2010-058-08:01:23	-75,133	-37,728	38,00	6,9Mb	99,10	03
2010-058-09:59:20	-73,591	-38,120	35,00	5,8Mb	93,30	03
2010-058-10:30:30	-72,949	-34,139	35,00	6,0Mb	96,10	03
2010-058-11:45:03	-73,190	-36,233	35,00	5,4Mb	93,00	03
2010-058-14:40:53	-74,550	-31,320	35,00	5,0M	91,30	03
2010-058-14:41:51	-72,521	-35,678	35,00	5,1Mb	92,60	03
2010-059-00:00:49	-73,273	-36,591	35,00	5,3Mb	91,90	03
2010-059-02:38:30	-73,529	-38,223	30,00	5,4Mb	94,60	03
2010-059-11:25:36	-71,569	-34,864	46,00	6,2Mb	97,90	03
2010-059-15:46:24	-72,165	-35,330	29,00	5,2Mb	84,40	03
2010-060-02:44:42	-72,491	-35,049	23,00	5,9Mb	99,10	03
2010-060-14:36:29	-73,432	-34,359	30,00	5,3Mb	96,70	03
2010-061-06:10:54	-72,555	-34,392	35,00	5,5Mb	95,50	03
2010-061-19:12:56	-72,112	-34,253	41,00	5,1Mb	93,50	03
2010-062-17:44:25	-73,078	-36,454	19,00	6,1Mb	98,90	03
2010-063-01:59:50	-72,101	-33,164	36,00	5,9Ms	95,20	03
2010-064-03:34:28	-71,850	-34,546	8,50	5,7Mb	87,70	03
2010-064-09:19:36	-73,223	-36,631	29,90	5,9Mb	94,50	03
2010-064-11:47:06	-73,373	-36,665	18,00	6,1Mb	98,90	03
2010-066-15:59:44	-73,300	-37,990	26,80	5,5Mb	94,10	03
2010-069-02:41:49	-72,670	-36,966	45,40	5,4Mb	93,90	03
2010-070-14:39:43	-71,891	-34,290	11,00	6,7Mb	99,50	03
2010-070-19:28:06	-71,976	-34,346	33,20	5,4Mb	91,30	03
2010-070-20:11:20	-71,979	-34,381	8,00	5,7Mb	94,10	03
2010-070-22:34:03	-73,651	-37,705	24,50	5,5Mb	88,50	03
2010-071-06:56:39	-71,887	-34,301	25,00	5,1Mb	90,80	03
2010-072-03:15:03	-73,197	-36,597	35,00	5,1Mb	89,40	03
2010-072-03:19:09	-73,044	-36,490	35,00	5,3Mb	91,10	03

continua...

2010-073-20:04:54	-73,512	-38,383	5,00	5,6Mb	93,70	03
2010-075-03:04:39	-73,007	-36,377	37,00	5,5Mb	95,00	03
2010-078-08:54:49	-72,827	-35,461	28,00	5,4Mb	98,10	03
2010-078-14:20:48	-72,003	-33,147	35,00	5,0Mb	87,20	03
2010-081-01:00:38	-69,454	-16,169	167,00	5,1MI	93,50	02
2010-084-11:10:39	-72,935	-35,869	10,00	5,2Mb	94,90	03
2010-087-21:38:28	-73,385	-35,387	30,00	5,9MI	97,20	03
2010-106-22:41:37	-73,423	-37,288	17,00	5,4Mb	96,00	03
2010-106-23:15:37	-73,501	-37,338	19,00	5,5Mb	96,50	03
2010-122-14:52:43	-71,864	-34,213	35,00	5,8Mb	99,70	03
2010-125-15:24:12	-72,730	-35,470	35,00	5,0M	92,50	03
2010-126-02:42:44	-70,490	-17,990	11,00	6,4M	97,90	02
2010-136-05:16:10	-67,070	18,400	113,00	5,4Mb	90,90	01
2010-143-22:46:52	-74,352	-13,928	101,40	6,3Mb	99,40	02
2010-145-13:09:26	-72,852	-37,617	34,80	5,1Mb	92,90	03
2010-180-01:40:00	-73,622	-37,883	25,00	6,1MI	91,10	03
BB15B						
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.	Grupo
2007-281-21:52:35	-67,389	-28,010	114,00	5,0Mb	92,8	00
2007-298-08:35:16	-68,702	-20,389	96,00	5,5Mb	93,6	00
2007-303-17:58:00	-67,720	-21,260	10,00	5,2Mb	87,3	00
2007-320-03:12:40	-77,244	-3,702	48,90	5,6Mb	95,7	02
2007-321-03:07:29	-70,441	-22,207	10,00	5,4Mb	90,2	04
2007-322-05:40:09	-65,940	-21,785	231,40	5,4Mb	97,1	00
2007-322-07:02:39	-69,470	-18,570	75,00	5,8Ms	90,6	00
2007-322-12:15:37	-70,764	-23,080	37,40	5,5MI	98,2	04
2007-323-23:30:29	-70,612	-21,942	10,00	5,6Mb	95,6	04
2008-005-07:29:26	-68,050	-23,080	10,00	5,8Mb	90,7	00
2008-009-00:51:47	-67,628	-23,852	201,70	5,0MI	90,1	00
2008-078-00:46:56	-67,457	-23,937	207,40	5,0MI	87,7	00
2008-093-14:55:10	-66,738	-22,644	262,70	5,0MI	85,3	00
2008-144-19:35:34	-34,897	7,313	8,00	6,0Mb	97,6	06
2008-190-15:54:20	-67,232	-22,875	230,90	5,6MI	88,8	00
2008-207-07:48:11	-68,171	-22,329	118,30	5,0Mb	92,1	00
2008-214-06:18:38	-66,632	-22,362	212,30	5,0Mb	96,9	00
2008-231-20:28:16	-68,392	-22,143	122,60	5,0Mw	89,3	00
2008-247-11:25:14	-63,225	-26,736	569,60	5,9Mb	89,7	00
2008-254-13:08:14	-38,705	8,093	9,00	6,3Mb	94,5	06
2008-254-16:12:04	-69,224	-20,262	37,70	5,6Mb	95,8	00
2008-255-17:11:34	-69,052	-19,649	106,20	5,1Mb	98,1	00
2008-259-23:36:52	-66,799	-24,166	152,10	5,1Mb	95,2	00
2008-260-21:56:40	-68,615	-20,389	114,80	5,0Mb	92,5	00
2008-280-00:18:28	-68,931	-18,398	135,10	5,0Mb	93,8	00
2008-286-20:55:41	-64,971	-20,123	352,70	6,0Mb	94,1	00
2008-290-19:41:25	-92,364	14,423	24,00	6,1Mb	98,6	01

continua...

2008-339-16:47:09	-68,288	-21,389	115,30	5,5Mb	91,9	00
2008-353-21:19:28	-71,726	-32,458	18,00	5,8Mb	98,4	05
2008-353-21:50:28	-72,051	-32,473	25,00	5,8Mb	97,3	05
2008-354-09:36:04	-71,949	-32,458	32,20	5,5Mb	96,2	05
2008-354-13:57:30	-71,852	-32,584	13,80	5,1Mb	91,7	05
2008-356-06:48:14	-67,967	-22,875	106,10	5,2Mw	92,9	00
2009-008-19:21:35	-84,197	10,165	14,00	5,7Mb	93,8	01
2009-009-22:43:30	-70,805	-23,039	19,80	5,0Mb	95	04
2009-023-12:56:08	-70,810	-36,386	126,60	5,2Mw	87,2	05
2009-024-19:30:18	-67,708	-18,919	183,10	5,1Mb	94	00
2009-031-16:29:36	-69,065	-19,410	102,30	5,4Mb	93,7	00
2009-037-02:58:35	-71,104	-27,987	52,20	5,5Mb	93,1	04
2009-040-14:09:02	-81,150	-6,567	15,00	5,5Mb	96,1	02
2009-042-20:45:32	-68,794	-20,249	109,00	5,3Mb	88	00
2009-046-10:04:49	-80,891	-5,854	21,00	5,8Mb	96,8	02
2009-047-02:22:50	-69,807	-29,134	75,00	5,7Mb	90,1	04
BB16B						
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.	Grupo
2009-074-08:19:05	-70,365	-14,452	189,70	5,1Mb	95,30	04
2009-074-13:50:38	-65,396	-30,987	179,20	5,1Mb	91,30	00
2009-085-17:35:14	-81,338	-5,720	10,00	5,6Mb	94,10	04
2009-093-17:54:50	-66,593	-27,842	174,20	5,3Mb	92,10	00
2009-106-14:57:06	-26,858	-60,203	20,00	6,2Mb	97,70	06
2009-107-02:08:08	-70,483	-19,584	25,00	5,8Mb	96,40	04
2009-108-15:29:19	-68,296	-23,286	115,70	5,1Mw	89,50	00
2009-132-01:03:58	-66,809	-22,318	174,90	5,2Mb	95,10	00
2009-132-05:07:06	-68,909	-20,057	103,70	5,1Mb	87,40	00
2009-138-14:01:04	-74,838	-15,658	22,70	5,3Mb	95,40	04
2009-146-06:38:38	-75,983	-14,417	14,80	5,2Mb	89,90	04
2009-148-08:24:46	-86,217	16,731	19,00	6,7Mb	99,40	01
2009-166-13:04:36	-76,133	-13,563	42,20	5,4Mb	91,30	04
2009-195-18:38:08	-67,087	-21,822	175,60	5,4Mb	95,00	00
2009-196-15:21:27	-68,927	-20,353	112,10	5,3Mb	91,10	00
2009-206-04:17:11	-66,594	-24,008	185,00	5,1Mb	88,10	00
2009-208-10:58:15	-66,592	-23,962	184,10	5,1Mb	90,60	00
2009-224-18:00:52	-66,672	-27,893	173,50	5,3Mb	91,90	00
2009-237-21:35:00	-68,837	-21,177	138,00	5,1Mb	90,70	00
2009-317-03:05:57	-70,321	-19,394	27,00	6,2Mb	98,50	04
2009-317-07:27:13	-64,095	-17,917	608,00	5,3Mb	96,10	00
2009-318-19:44:29	-66,641	-22,965	220,40	5,8Mb	90,60	00
2009-330-19:08:11	-89,907	13,514	56,80	5,7Mb	93,30	01
2009-333-17:05:30	-65,717	-21,968	275,80	5,2Mb	87,30	00
2009-358-14:01:58	-73,978	-15,766	59,10	5,7Mb	97,70	04
2010-005-04:55:38	-14,696	-58,173	10,00	6,2Mb	98,00	06
2010-018-12:28:34	-68,599	-31,355	94,10	5,5Mb	85,60	05

continua...

2010-018-15:40:26	-90,132	13,728	54,70	5,4Mb	93,40	01
2010-019-14:23:38	-80,804	19,004	10,00	5,7Mb	94,40	01
2010-028-08:04:14	-66,712	-23,357	208,40	5,8Mb	95,60	00
2010-038-17:09:47	-66,564	-23,225	238,90	5,4Mb	87,20	00
2010-043-12:03:38	-68,789	-33,622	148,40	5,6Mb	94,60	05
2010-049-20:56:33	-68,514	-23,067	114,70	5,0Mb	86,90	00
2010-058-06:34:14	-72,730	-35,909	35,00	8,5Ms	99,60	05
2010-058-08:01:23	-75,133	-37,728	38,00	6,9Mb	98,20	05
2010-058-10:30:30	-72,949	-34,139	35,00	6,0Mb	95,80	05
2010-058-11:45:03	-73,190	-36,233	35,00	5,4Mb	91,70	05
2010-058-14:41:51	-72,521	-35,678	35,00	5,1Mb	95,20	05
2010-058-15:45:36	-65,410	-24,665	10,00	6,3Mb	93,10	00
2010-058-16:27:57	-73,404	-37,820	35,00	5,5Mb	86,70	05
2010-058-17:11:49	-71,792	-33,982	35,00	5,5Mb	95,40	05
2010-058-17:24:30	-73,160	-36,314	19,00	5,6Mb	91,70	05
2010-058-18:15:23	-73,696	-37,527	21,00	5,6Mb	97,50	05
2010-058-22:20:03	-72,712	-35,094	35,00	5,1Mb	89,70	05
2010-059-00:00:49	-73,273	-36,591	35,00	5,3Mb	90,40	05
2010-059-01:08:23	-71,943	-34,148	31,00	5,5Mb	98,00	05
2010-059-01:58:49	-72,557	-34,857	32,00	5,2Mb	85,80	05
2010-059-11:25:36	-71,569	-34,864	46,00	6,2Mb	96,30	05
2010-060-02:44:42	-72,491	-35,049	23,00	5,9Mb	97,70	05
2010-060-14:36:29	-73,432	-34,359	30,00	5,3Mb	94,60	05
2010-061-04:09:28	-73,502	-35,884	35,00	5,1Mb	95,80	05
2010-061-19:12:56	-72,112	-34,253	41,00	5,1Mb	95,20	05
2010-062-06:16:22	-71,959	-33,620	35,00	5,1Mb	90,70	05
2010-062-17:44:25	-73,078	-36,454	19,00	6,1Mb	98,70	05
2010-062-19:58:29	-71,824	-33,463	29,00	5,5Mb	97,80	05
2010-063-01:59:50	-72,101	-33,164	36,00	5,9Ms	96,20	05
2010-063-22:39:26	-68,328	-22,227	114,00	6,3Mb	94,00	00
2010-064-03:34:28	-71,850	-34,546	8,50	5,7Mb	92,70	05
2010-064-09:19:36	-73,223	-36,631	29,90	5,9Mb	94,90	05
2010-064-11:47:06	-73,373	-36,665	18,00	6,1Mb	99,20	05
2010-066-15:59:44	-73,300	-37,990	26,80	5,5Mb	94,40	05
2010-066-18:36:00	-71,906	-34,608	35,00	5,1Mb	93,00	05
2010-066-23:46:57	-73,042	-36,156	24,90	5,4Mb	89,10	05
2010-070-14:39:43	-71,891	-34,290	11,00	6,7Mb	99,60	05
2010-070-16:56:33	-71,802	-34,392	39,80	5,3Mb	88,90	05
2010-070-20:11:20	-71,979	-34,381	8,00	5,7Mb	86,60	05
2010-072-03:15:03	-73,197	-36,597	35,00	5,1Mb	87,40	05
2010-072-15:22:39	-71,378	-34,410	35,00	5,1Mb	91,40	05
2010-075-03:04:39	-73,007	-36,377	37,00	5,5Mb	90,60	05
2010-078-08:54:49	-72,827	-35,461	28,00	5,4Mb	97,10	05
2010-079-21:21:14	-71,749	-34,470	26,00	5,1Mb	85,80	05
2010-082-20:19:23	-74,559	-15,317	41,00	5,2Mb	89,00	04

continua...

2010-084-11:10:39	-72,935	-35,869	10,00	5,2Mb	96,80	05
2010-087-21:38:28	-73,385	-35,387	30,00	5,9MI	98,50	05
2010-091-19:43:01	-71,951	-34,119	20,00	5,0Mb	89,80	05
2010-095-22:36:57	-68,842	-19,860	94,20	5,8Mb	94,30	00
2010-106-23:15:37	-73,501	-37,338	19,00	5,5Mb	90,70	05
2010-108-01:49:38	-73,766	-37,159	31,00	5,6MI	91,60	05
2010-121-21:01:35	-68,385	-21,032	117,00	5,0Mb	94,00	00
2010-122-14:52:43	-71,864	-34,213	35,00	5,8Mb	99,50	05
2010-123-23:09:45	-73,650	-38,110	20,60	6,4M	99,40	05
2010-124-16:12:55	-68,230	-21,900	91,40	5,5M	89,40	00
2010-126-02:42:44	-70,490	-17,990	11,00	6,4M	97,20	04
2010-143-22:46:52	-74,352	-13,928	101,40	6,3Mb	98,20	04
2010-163-03:51:53	-71,345	-28,383	34,00	5,1Mb	85,30	05
2010-180-01:40:00	-73,622	-37,883	25,00	6,1MI	90,60	05
2010-184-00:05:06	-71,473	-34,713	47,00	5,1Mb	89,80	05
2010-193-00:11:22	-68,181	-22,073	120,00	6,2Mb	95,30	00
2010-196-00:36:02	-72,303	-34,153	9,00	5,5MI	85,60	05
2010-198-06:07:43	-69,819	-24,691	49,00	5,7Mb	87,40	00
2010-207-17:31:31	-67,033	-24,194	192,00	5,3Mb	98,10	00
2010-216-04:24:33	-66,521	-23,827	149,00	5,3Mb	91,70	00
2010-234-08:06:31	-67,234	-21,106	145,00	5,1Mb	88,40	00
2010-237-12:02:38	-68,756	-22,529	73,00	5,1Mb	90,90	00

B. ANEXO 2 – Correlação Ruído

Figura B.1: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB15B (152 dias) com filtro passa-banda de 0.5-2.0 Hz.

Figura B.2: Correlação cruzada entre as estações BEB4B e BB16B (325 dias) com filtro passa-banda de 0.1-10 Hz.

C. ANEXO 3 – Eventos usados na determinação da Moho

Tabela C.1: Eventos usados na determinação da Moho.

BEB4B					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2007-365-10:39:53	-74,1109	-13,4139	33,00	5,6Mb	90,80
2008-006-05:14:15	22,8610	36,6150	75,00	5,9Mb	92,10
2008-006-05:14:45	22,6400	37,2100	35,00	6,3MI	92,30
2008-034-07:34:11	28,7600	-1,4799	10,00	6,0Ms	89,80
2008-039-09:38:12	-41,9099	10,7200	10,00	7,0Ms	98,80
2008-039-09:38:57	-41,0199	10,8800	358,00	5,8Mb	98,90
2008-041-12:21:58	-25,5999	-60,7999	8,00	6,6Ms	98,20
2008-043-12:50:16	-94,3869	16,3980	192,50	5,6MD	98,40
2008-043-12:50:20	-95,3599	17,4800	82,00	6,2Mb	98,30
2008-043-12:50:27	-92,2999	18,0820	44,00	5,9Ms	98,50
2008-144-19:35:34	-34,8970	7,3130	8,00	6,0Mb	98,80
2008-145-19:20:42	-73,7640	4,3300	8,90	5,6Mb	88,20
2008-169-17:42:09	-82,6520	5,0080	10,00	5,6Mb	88,80
2008-182-06:17:43	-22,0990	-58,2270	8,00	6,1Mb	97,20
2008-185-06:34:53	-60,4420	10,2810	33,90	5,7Mb	92,60
2008-190-09:13:07	-71,7480	-15,9860	123,00	5,8Mb	95,00
2008-239-21:00:36	-74,3770	-7,6410	154,00	6,0Mb	95,00
2008-241-15:22:18	-17,6260	-0,1340	10,00	5,2Mb	95,90
2008-254-13:08:14	-38,7050	8,0930	9,00	6,3Mb	97,90
2008-264-14:43:05	-73,6300	-16,1250	40,50	5,4Mb	94,80
2008-290-19:41:25	-92,3640	14,4230	24,00	6,1Mb	98,60
2008-304-01:32:40	-70,1050	-24,0340	18,00	5,3Mb	94,70
2009-138-14:01:04	-74,8380	-15,6580	22,70	5,3Mb	90,00
2009-148-08:24:46	-86,2170	16,7310	19,00	6,7Mb	99,70
2009-157-20:33:28	-46,1050	23,8640	14,00	6,0Mb	93,80
2009-161-23:13:21	-83,9950	-41,7160	10,00	5,7Mb	89,00
2009-164-20:10:52	-70,8040	-17,3600	61,40	5,1Mb	92,80
2009-166-13:04:36	-76,1330	-13,5630	42,20	5,4Mb	90,90
2009-188-16:46:15	-71,1260	-29,3640	48,90	5,3Mb	94,60
2009-189-19:23:37	-102,6860	-36,0040	12,00	5,4Mb	97,20
2009-288-17:48:21	-103,8230	3,2720	10,00	5,9Mb	95,00
2009-295-00:51:39	-82,5790	6,7290	18,00	5,5Mb	94,20
2009-300-00:04:46	-65,1630	-59,9550	10,00	6,0Mb	95,10
2009-317-03:05:57	-70,3210	-19,3940	27,00	6,2Mb	98,40
2009-326-22:07:47	-74,9720	-39,6360	4,00	5,8Mb	95,90
2009-342-03:08:57	33,8780	-9,9480	8,00	5,9Mb	86,50
2009-353-23:19:15	33,8180	-10,1080	6,00	6,0Mb	88,50
2009-358-14:01:58	-73,9780	-15,7660	59,10	5,7Mb	94,60
2009-362-00:57:16	-70,1310	-22,5010	33,90	5,4Mb	91,90

continua...

2010-005-04:55:38	-14,6960	-58,1730	10,00	6,2Mb	97,20
2010-012-21:53:10	-72,5710	18,4430	13,00	6,8Mb	98,20
2010-018-15:40:26	-90,1320	13,7280	54,70	5,4Mb	95,90
2010-019-14:23:38	-80,8040	19,0040	10,00	5,7Mb	97,50
2010-020-11:03:43	-72,8230	18,4230	10,50	5,9Mb	85,20
2010-027-17:42:45	-14,5540	-14,1000	10,00	6,0Mb	97,30
2010-043-12:03:38	-68,7890	-33,6220	148,40	5,6Mb	95,10
2010-058-06:34:14	-72,7300	-35,9090	35,00	8,5Ms	99,80
2010-058-08:01:23	-75,1330	-37,7280	38,00	6,9Mb	98,40
2010-058-09:59:20	-73,5910	-38,1200	35,00	5,8Mb	95,80
2010-058-10:30:30	-72,9490	-34,1390	35,00	6,0Mb	98,10
2010-058-16:27:57	-73,4040	-37,8200	35,00	5,5Mb	89,80
2010-058-18:15:23	-73,6960	-37,5270	21,00	5,6Mb	96,20
2010-059-00:00:49	-73,2730	-36,5910	35,00	5,3Mb	90,60
2010-059-01:08:23	-71,9430	-34,1480	31,00	5,5Mb	94,50
2010-059-02:38:30	-73,5290	-38,2230	30,00	5,4Mb	88,10
2010-059-11:25:36	-71,5690	-34,8640	46,00	6,2Mb	98,30
2010-060-02:44:42	-72,4910	-35,0490	23,00	5,9Mb	98,40
2010-060-14:36:29	-73,4320	-34,3590	30,00	5,3Mb	92,00
2010-061-04:09:28	-73,5020	-35,8840	35,00	5,1Mb	86,40
2010-061-06:10:54	-72,5550	-34,3920	35,00	5,5Mb	96,00
2010-061-19:12:56	-72,1120	-34,2530	41,00	5,1Mb	94,20
2010-062-17:44:25	-73,0780	-36,4540	19,00	6,1Mb	99,30
2010-062-19:58:29	-71,8240	-33,4630	29,00	5,5Mb	98,60
2010-063-01:59:50	-72,1010	-33,1640	36,00	5,9Ms	94,20
2010-064-03:34:28	-71,8500	-34,5460	8,50	5,7Mb	87,90
2010-064-09:19:36	-73,2230	-36,6310	29,90	5,9Mb	96,20
2010-064-11:47:06	-73,3730	-36,6650	18,00	6,1Mb	99,30
2010-066-15:59:44	-73,3000	-37,9900	26,80	5,5Mb	95,20
2010-069-12:20:58	-72,2980	-33,5620	35,00	5,5Mb	95,00
2010-070-14:39:43	-71,8910	-34,2900	11,00	6,7Mb	99,80
2010-070-20:11:20	-71,9790	-34,3810	8,00	5,7Mb	88,50
2010-070-22:34:03	-73,6510	-37,7050	24,50	5,5Mb	88,20
2010-072-03:15:03	-73,1970	-36,5970	35,00	5,1Mb	90,10
2010-072-10:34:43	-73,4360	-37,5620	35,00	5,5Ms	94,70
2010-072-15:22:39	-71,3780	-34,4100	35,00	5,1Mb	89,50
2010-072-20:20:26	-73,6550	-36,8130	38,00	5,0Mb	85,10
2010-073-07:31:25	-71,7620	-34,2090	35,00	5,5Mb	86,10
2010-073-13:52:24	-73,6150	-38,4450	35,00	5,4Mb	86,10
2010-073-20:04:54	-73,5120	-38,3830	5,00	5,6Mb	91,50
2010-075-03:04:39	-73,0070	-36,3770	37,00	5,5Mb	90,30
2010-078-08:54:49	-72,8270	-35,4610	28,00	5,4Mb	96,50
2010-078-14:20:48	-72,0030	-33,1470	35,00	5,0Mb	86,30
2010-081-01:00:38	-69,4540	-16,1690	167,00	5,1Mb	90,60
2010-082-20:19:23	-74,5590	-15,3170	41,00	5,2Mb	85,30

continua...

2010-084-11:10:39	-72,9350	-35,8690	10,00	5,2Mb	95,50
2010-087-21:38:28	-73,3850	-35,3870	30,00	5,9MI	98,50
2010-106-22:41:37	-73,4230	-37,2880	17,00	5,4Mb	98,00
2010-106-23:15:37	-73,5010	-37,3380	19,00	5,5Mb	94,20
2010-122-14:52:43	-71,8640	-34,2130	35,00	5,8Mb	99,70
2010-123-23:09:45	-73,6500	-38,1100	20,60	6,4M	99,30
2010-125-15:24:12	-72,7300	-35,4700	35,00	5,0M	95,60
2010-126-02:42:44	-70,4900	-17,9900	11,00	6,4M	99,00
2010-136-05:16:10	-67,0700	18,4000	113,00	5,4Mb	92,20
2010-143-22:46:52	-74,3520	-13,9280	101,40	6,3Mb	98,60
2010-145-13:09:26	-72,8520	-37,6170	34,80	5,1Mb	85,90
2010-180-01:40:00	-73,6220	-37,8830	25,00	6,1MI	90,10
BB15B					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2007-293-19:56:18	-73,530	-36,770	26,0	5,1Ms	92,20
2007-293-19:56:53	-72,280	-37,520	269,0	5,1Mb	92,10
2007-320-03:12:40	-77,244	-3,702	48,9	5,6Mb	97,80
2007-321-03:07:29	-70,441	-22,207	10,0	5,4Mb	93,30
2007-322-12:15:37	-70,764	-23,080	37,4	5,5MI	98,70
2007-323-23:30:29	-70,612	-21,942	10,0	5,6Mb	97,90
2008-006-05:14:09	22,423	37,051	33,0	5,1Mb	90,10
2008-070-09:42:54	-69,100	-28,450	15,0	6,2Mb	96,80
2008-144-19:35:34	-34,897	7,313	8,0	6,0Mb	99,00
2008-182-06:17:43	-22,099	-58,227	8,0	6,1Mb	98,40
2008-185-06:34:53	-60,442	10,281	33,9	5,7Mb	89,20
2008-190-09:13:07	-71,748	-15,986	123,0	5,8Mb	96,70
2008-239-21:00:36	-74,377	-7,641	154,0	6,0Mb	95,20
2008-254-13:08:14	-38,705	8,093	9,0	6,3Mb	98,20
2008-290-19:41:25	-92,364	14,423	24,0	6,1Mb	99,20
2008-353-21:50:28	-72,051	-32,473	25,0	5,8Mb	98,20
2008-354-09:36:04	-71,949	-32,458	32,2	5,5Mb	97,70
2008-354-13:57:30	-71,852	-32,584	13,8	5,1Mb	91,70
2008-355-11:29:37	-71,917	-32,501	39,2	5,0Mb	87,20
2009-008-19:21:35	-84,197	10,165	14,0	5,7Mb	96,80
2009-009-22:43:30	-70,805	-23,039	19,8	5,0Mb	97,60
2009-023-12:56:08	-70,810	-36,386	126,6	5,2Mw	92,80
2009-033-17:53:21	-76,558	-13,582	21,0	5,6Mb	95,30
2009-037-02:58:35	-71,104	-27,987	52,2	5,5Mb	94,20
2009-040-14:09:02	-81,150	-6,567	15,0	5,5Mb	97,10
2009-046-10:04:49	-80,891	-5,854	21,0	5,8Mb	98,20
2009-047-02:22:50	-69,807	-29,134	75,0	5,7Mb	85,50
BB16B					
Origem	Long.	Lat.	Prof (m)	Mag	Dec.
2009-071-02:05:38	-66,367	19,070	15,0	5,1Mb	93,0
2009-071-23:23:34	-82,767	5,686	9,0	6,1Mb	88,2

continua...

2009-074-08:19:05	-70,365	-14,452	189,7	5,1Mb	87,4
2009-106-14:57:06	-26,858	-60,203	20,0	6,2Mb	98,1
2009-107-02:08:08	-70,483	-19,584	25,0	5,8Mb	99,2
2009-121-00:34:10	-77,306	-1,548	191,2	5,1Mw	90,0
2009-138-14:01:04	-74,838	-15,658	22,7	5,3Mb	92,9
2009-145-05:10:13	-71,321	-28,519	48,8	5,4Mb	91,8
2009-148-08:24:46	-86,217	16,731	19,0	6,7Mb	99,8
2009-157-20:33:28	-46,105	23,864	14,0	6,0Mb	90,3
2009-161-23:13:21	-83,995	-41,716	10,0	5,7Mb	86,6
2009-164-20:10:52	-70,804	-17,360	61,4	5,1Mb	91,6
2009-164-21:22:06	-71,631	-30,647	28,1	5,3Mb	90,7
2009-166-13:04:36	-76,133	-13,563	42,2	5,4Mb	87,8
2009-185-06:49:35	-78,966	9,590	38,0	6,0Mb	88,8
2009-188-16:46:15	-71,126	-29,364	48,9	5,3Mb	94,0
2009-189-19:23:37	-102,686	-36,004	12,0	5,4Mb	89,4
2009-248-03:58:39	-70,248	-15,121	210,2	5,2Mb	93,7
2009-255-20:06:24	-67,920	10,705	10,0	6,3Mb	94,1
2009-260-23:21:38	-112,267	-29,144	10,0	5,7Mb	95,8
2009-288-17:48:21	-103,823	3,272	10,0	5,9Mb	93,0
2009-295-00:51:39	-82,579	6,729	18,0	5,5Mb	89,3
2009-300-00:04:46	-65,163	-59,955	10,0	6,0Mb	93,4
2009-317-03:05:57	-70,321	-19,394	27,0	6,2Mb	97,3
2009-326-22:07:47	-74,972	-39,636	4,0	5,8Mb	96,9
2009-353-23:19:15	33,818	-10,108	6,0	6,0Mb	93,5
2009-358-14:01:58	-73,978	-15,766	59,1	5,7Mb	97,6
2009-362-00:57:16	-70,131	-22,501	33,9	5,4Mb	94,2
2010-003-20:39:12	-77,718	-8,802	116,8	5,9Mb	86,3
2010-005-04:55:38	-14,696	-58,173	10,0	6,2Mb	97,3
2010-012-21:53:10	-72,571	18,443	13,0	6,8Mb	97,4
2010-018-15:40:26	-90,132	13,728	54,7	5,4Mb	96,0
2010-019-14:23:38	-80,804	19,004	10,0	5,7Mb	95,5
2010-027-17:42:45	-14,554	-14,100	10,0	6,0Mb	93,2
2010-043-12:03:38	-68,789	-33,622	148,4	5,6Mb	89,9
2010-058-06:34:14	-72,730	-35,909	35,0	8,5Ms	99,6
2010-058-10:30:30	-72,949	-34,139	35,0	6,0Mb	98,0
2010-058-14:41:51	-72,521	-35,678	35,0	5,1Mb	91,1
2010-058-17:11:49	-71,792	-33,982	35,0	5,5Mb	90,2
2010-058-18:15:23	-73,696	-37,527	21,0	5,6Mb	97,9
2010-058-22:20:03	-72,712	-35,094	35,0	5,1Mb	90,0
2010-059-01:08:23	-71,943	-34,148	31,0	5,5Mb	98,9
2010-059-11:25:36	-71,569	-34,864	46,0	6,2Mb	98,3
2010-060-01:10:58	-71,704	-35,163	43,0	5,4Mb	91,8
2010-060-02:44:42	-72,491	-35,049	23,0	5,9Mb	98,4
2010-060-14:36:29	-73,432	-34,359	30,0	5,3Mb	91,0
2010-061-04:09:28	-73,502	-35,884	35,0	5,1Mb	94,6

continua...

2010-061-19:12:56	-72,112	-34,253	41,0	5,1Mb	96,2
2010-062-06:16:22	-71,959	-33,620	35,0	5,1Mb	93,4
2010-062-17:44:25	-73,078	-36,454	19,0	6,1MI	99,0
2010-062-19:58:29	-71,824	-33,463	29,0	5,5MI	97,4
2010-063-01:59:50	-72,101	-33,164	36,0	5,9Ms	98,7
2010-064-03:34:28	-71,850	-34,546	8,5	5,7Mb	93,0
2010-064-09:19:36	-73,223	-36,631	29,9	5,9Mb	96,7
2010-064-11:47:06	-73,373	-36,665	18,0	6,1Mb	99,1
2010-066-15:59:44	-73,300	-37,990	26,8	5,5Mb	96,9
2010-069-12:20:58	-72,298	-33,562	35,0	5,5Mb	86,3
2010-070-10:51:38	-71,866	-34,329	35,0	5,1Mb	86,1
2010-070-14:39:43	-71,891	-34,290	11,0	6,7Mb	99,8
2010-071-06:56:39	-71,887	-34,301	25,0	5,1MI	93,0
2010-072-10:34:43	-73,436	-37,562	35,0	5,5Ms	88,8
2010-072-15:22:39	-71,378	-34,410	35,0	5,1Mb	87,6
2010-073-13:52:24	-73,615	-38,445	35,0	5,4Mb	91,5
2010-073-20:04:54	-73,512	-38,383	5,0	5,6Mb	93,8
2010-075-03:04:39	-73,007	-36,377	37,0	5,5Mb	89,8
2010-078-08:54:49	-72,827	-35,461	28,0	5,4Mb	97,4
2010-081-01:00:38	-69,454	-16,169	167,0	5,1MI	88,5
2010-083-11:30:12	-73,495	-36,517	35,0	5,1MI	87,9
2010-084-11:10:39	-72,935	-35,869	10,0	5,2Mb	93,4
2010-087-21:38:28	-73,385	-35,387	30,0	5,9MI	99,0
2010-091-19:43:01	-71,951	-34,119	20,0	5,0Mb	89,3
2010-106-22:41:37	-73,423	-37,288	17,0	5,4Mb	93,2
2010-106-23:15:37	-73,501	-37,338	19,0	5,5Mb	94,1
2010-108-01:49:38	-73,766	-37,159	31,0	5,6MI	89,8
2010-122-14:52:43	-71,864	-34,213	35,0	5,8Mb	99,2
2010-123-23:09:45	-73,650	-38,110	20,6	6,4M	99,6
2010-126-02:42:44	-70,490	-17,990	11,0	6,4M	98,1
2010-141-18:52:06	-71,969	-34,640	7,3	5,7Mb	90,4
2010-143-22:46:52	-74,352	-13,928	101,4	6,3Mb	96,9
2010-180-01:40:00	-73,622	-37,883	25,0	6,1MI	91,0
2010-195-15:05:50	-73,195	-38,150	35,0	5,5Ms	86,3
2010-217-06:01:47	-73,268	-37,428	18,0	6,1MI	94,3

D. ANEXO 4 – FRs e curvas de dispersão para as estações BB15B e BB16B

Figura D.1: FR e curvas de dispersão para a estação BB16B.

Figura D.2: FR e curvas de dispersão para a estação BB15B.

E. ANEXO 5 – 16 melhores modelos para cada estação

Figura E.1: Estação BEB1.

Figura E.2: Estação BEB2.

Figura E.3: Estação BEB4.

Figura E.4: Estação BEB4A.

Figura E.5: Estação BEB4B.

Figura E.6: Estação BEB7.

Figura E.7: Estação BEB11.

Figura E.8: Estação BEB13.

Figura E.9: Estação BEB14.

Figura E.10: Estação BB15B.

Figura E.11: Estação BB16B.

Figura E.12: Estação BEB17.

Figura E.13: Estação BEB18.

Figura E.14: Estação BEB19.

Figura E.15: Estação BEB20.

Figura E.16: Estação BEB21.

Figura E.17: Estação BEB22.