

Estrutura da crosta em Goiás, usando a função do receptor, e mapa preliminar de espessuras crustais no SE e centro-oeste do Brasil.

George Sand França* e Marcelo Assumpção IAG/USP Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The central area of Brazil is composed by folds belts, massif and magmatic arcs that suffered tectonic processes of the Brasiliano cycle. The information of crustal velocities was obtained through seismic profiles. We used the receiver function to estimate the ratio V_p/V_s and the crustal thickness under each station. The stations PAZB, BDFB and GNSB have average ratio of 1,69. The stations BAMB, CORB and IGPB show a high velocity ratio, and the stations NP4B, PORB and SLMB they are medium ratio. The central stations BDFB and GNSB have average thickness of 42 km, and the station SLMB has the smallest crustal thickness (32 km). The station NP4B presents larger lateral variation. The velocity of the P wave and V_p/V_s ratio for some stations can infer probable average compositions for crust. With those estimates we plot an initial map of the Moho thickness for area.

Introdução

A estrutura da crosta vem sendo amplamente estudada e a função do receptor tornou-se o importante nesse estudo. No Brasil, James *et al.* (1993) estimou, através da inversão da função do receptor, a espessura da Moho na região SE do Brasil sobre três estações para auxiliar nos estudos de ondas superficiais. Em seguida, Assumpção *et al.* (2002) fizeram as primeiras estimativas, usando a função do receptor para região SE do Brasil. França e Assumpção (2003) usaram as informações da fase múltipla para estimar a razão V_p/V_s e a espessura crustal na Faixa Ribeira.

O objetivo desse trabalho é estimar a razão V_p/V_s e espessura crustal sob cada estação na região central, adicionando essas estimativas com a da literatura que possibilitará um mapa de espessura crustal inicial para o Sudeste e Centro-oeste do Brasil.

A figura 1 mostra as estações e os perfis de refração sísmica de Perosi (2000) e Soares *et al.* (2001; 2002). Triângulos vermelhos são estações pertencentes ao IAG/USP usadas nesse estudo, triângulos azuis são pertencentes à rede mundial e à UnB e os triângulos escuros são as estações analisadas por Assumpção *et al.* (2002). Linhas sólidas são limites geológicos e linhas pontilhadas são limites de estados.

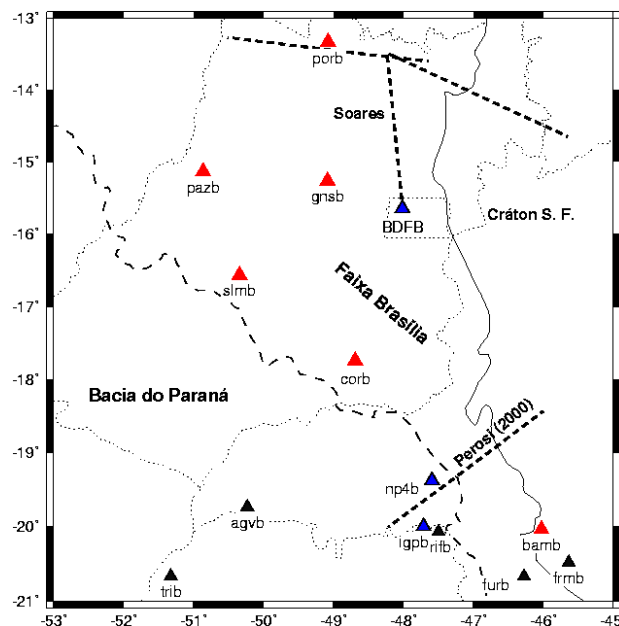


Figura 1 - Estações na parte central do Brasil (Faixa Brasília). As linhas tracejadas são perfis de refração sísmica de Perosi (2000) e Soares *et al.* (2001; 2002), triângulos vermelhos são estações do IAG/USP usadas nesse estudo, triângulos azuis são da rede mundial e da UnB, e os triângulos escuros são as estações analisadas por Assumpção *et al.* (2002). Linhas sólidas são limites geológicos e linhas pontilhadas são limites de estados.

Função do Receptor

A função do receptor é uma forma de onda gerada pela deconvolução da componente radial pela vertical para isolar as conversões da onda P para S que ocorrem em descontinuidades, tais como a descontinuidade da Moho. A forma de onda da função do receptor é uma resposta da estrutura da crosta sob cada estação, em que toda a energia da onda P é somada ao pico principal denominado de P direta ou ponto-zero de referência, seguida por picos menores, que são fases convertidas e reverberadas na descontinuidade. A figura 2 mostra o registro da função do receptor para apenas um contraste de velocidade (descontinuidade de velocidade).

Para estimativa da razão V_p/V_s , a diferença temporal entre P direta e P_s ($t_{Ps}-t_P$) e a diferença temporal entre a P_s e $PpPms$ ($t_{PpPms}-t_{Ps}$) são necessárias (Zandt *et al.*, 1995).

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

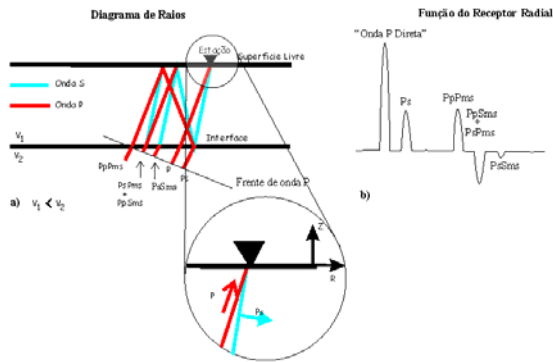


Figura 2 – Diagrama de raio da função do receptor. (a) Diagrama de raio simplificado mostrando as principais conversões da onda P em onda S que compreende a função do receptor para um semi-espaço. (b) Forma de onda da função do receptor radial correspondente às reflexões do diagrama em (a).

Em que p é o parâmetro de raio e V_p é a velocidade média da onda P.

Com a razão V_p/V_s , podemos estimar a espessura da crosta usando a equação abaixo.

$$h = \frac{t_{Ps} - t_P}{(V_s^{-2} - p^2)^{1/2} - (V_p^{-2} - p^2)^{1/2}}$$

Com a equação da razão V_p/V_s , uma incerteza de $\pm 0,2$ km/s na velocidade média da onda P corresponde a uma incerteza de $\pm 0,01$ na razão V_p/V_s . Na espessura crustal a incerteza é da ordem de $\pm 1,5$ km.

Resultados

As estações BDFB, CORB, GNSB, PAZB, PORB e SLMB estão dentro da Província Tocantins onde predomina a Faixa Brasília (Figura 1). As estações na borda da Bacia do Paraná (IGPB e NP4B) e no Cráton do São Francisco (BAMB) foram também usadas nesse estudo. No sudeste, Perosi (2000) estimou uma V_p média para crosta de 6,4 km/s com espessura crustal de 40 km. No nordeste, Soares *et al.* (2001) realizaram três linhas de refração: a primeira cortando a estação PORB com V_p média de 6,25 km/s e espessura de 36 km, a segunda em direção a BDFB com V_p média de 6,3 km/s e espessura de 42 km, e a terceira, linha Cavalcante, com espessura de 43 km e V_p média de 6,3 km/s. Esses valores de V_p servirão de base na estimativa da razão V_p/V_s e na espessura crustal.

Calculamos a função do receptor usando o filtro gaussiano [$\exp(-w^2/4a^2)$] com parâmetro $a = 2$ e 4. Para cada traço, o melhor nível de água foi escolhido entre 0,01 e 0,001. Cada função de receptor tem janela de registro de acordo com cauda da onda P (entre 30 e 100 s). As funções foram calculadas usando rotinas fornecidas por Charles J. Ammon.

As funções do receptor foram empilhadas de acordo com os azimutes e as distâncias. A figura 3 mostra as funções do receptor radial (FRR) e tangencial (FRT) para estação

BDFB ordenadas por distâncias. O número de traços empilhados está indicado entre parêntese, ao lado do intervalo de distância. A seta na figura 3 indica a leitura da chegada da onda Ps. A componente transversal indica o grau de variabilidade lateral. Para estruturas puramente homogêneas, a componente transversal seria zero.

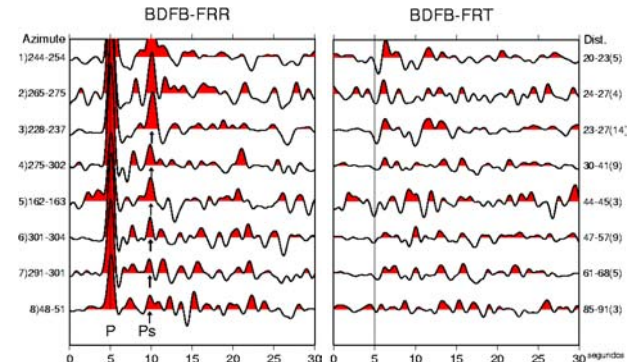


Figura 3 – Funções do receptor radial (FRR) e tangencial (FRT) na estação BDFB ordenadas de acordo com a distância. O azimute de cada traço está no lado esquerdo, e a distância no lado direito. O número entre parênteses ao lado da distância refere-se ao número de funções empilhadas.

As funções mostraram a fase Ps clara para todos os traços, exceto em BAMB. Em algumas estações, é possível visualizar a fase PpPms, entretanto não podemos estimar do mesmo modo que fizemos para fase Ps. Desta forma usamos o empilhamento inclinado usando a fase do sinal analítico como peso (Schimmel & Paulssen, 1997), denominado de PWS (*Phase Weight stack*), para estimativa da fase PpPms e também da fase Ps. França e Assumpção (2003) mostraram que o PWS é uma ferramenta útil para estimativa das fases Ps e PpPms.

A figura 4 mostra os contornos de amplitudes para três estações. O contorno de amplitudes que realça a fase PpPms recebe a letra A, como por exemplo, a estação BDFB. Quando a amplitude do pico da PpPms é pequena ou sua inclinação difere do esperado, sua qualidade é B, como por exemplo, a estação PORB. Nos casos em que os contornos são ruidosos com vários picos próximos, a qualidade é C, como por exemplo, a estação CORB.

Com os tempos de chegada das fases Ps e PpPms, calculamos a razão V_p/V_s para crosta com velocidade média da onda P igual 6,4 km/s para as estações IGPB, NP4B e BAMB seguindo o perfil de Perosi (2000). Para as demais estações usamos uma velocidade média igual 6,3 km/s baseado nos perfis de refração sísmica realizado por Soares *et al.* (2002). A tabela 1 mostra as razões com suas respectivas qualidades para $a=2$.

Com a razão para cada estação, calculamos a espessura crustal com os V_p de crosta média utilizados para razão V_p/V_s . As funções foram corrigidas por NMO em cada estação em relação à fase Ps (Figura 5) obtendo assim a espessura descrita na tabela 2. As estações PAZB, BDFB e GNSB têm uma razão média de 1,69. As estações BAMB, CORB e IGPB apresentam uma alta razão de velocidade, e as estações NP4B, PORB e

SLMB têm razões médias. As estações centrais BDFB e GNSB têm espessura média de 42 km, e a estação SLMB tem a menor espessura crustal (32 km). A estação NP4B apresenta maior variação lateral.

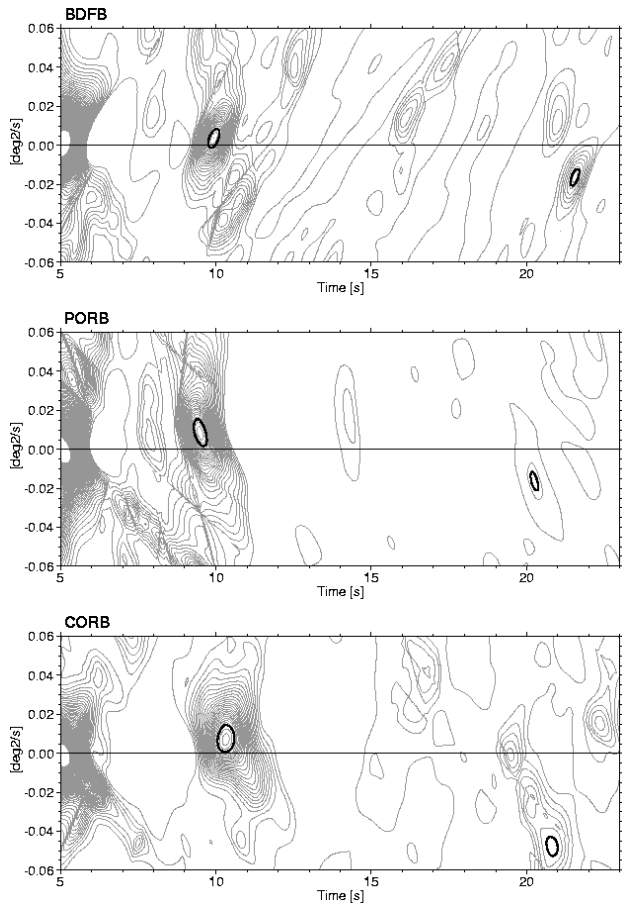


Figura 4 – Contorno de amplitudes para empilhamento inclinado usando a fase do sinal analítico como peso. Os círculos escuros representam a máxima coerência dos picos das fases Ps e PpPms.

Tabela 1 – Valores da diferença temporal Ps-P e PpPms-P determinados usando o empilhamento inclinado (e a fase do sinal analítico como peso) e a razão Vp/Vs. p é o parâmetro de raio de referência e Q é a qualidade na estimativa da diferença PpPms (A = Bom, B = Média e C= Ruidosa) para a=2.

Estação	p(s ²)	Q	Ps-P	PpPms-P	Vp/Vs
BAMB	7,92	C	5,78	16,76	1,88
BDFB	8,63	A	4,94	16,54	1,69
CORB	7,93	C	5,32	15,82	1,85
GNSB	7,86	C	5,06	17,18	1,70
IGPB	7,12	A	4,86	14,80	1,85
NP4B	8,27	A	5,24	16,38	1,77
PAZB	6,82	B	4,06	14,62	1,68
PORB	6,78	B	4,50	15,24	1,74
SLMB	7,36	C	4,14	13,56	1,76

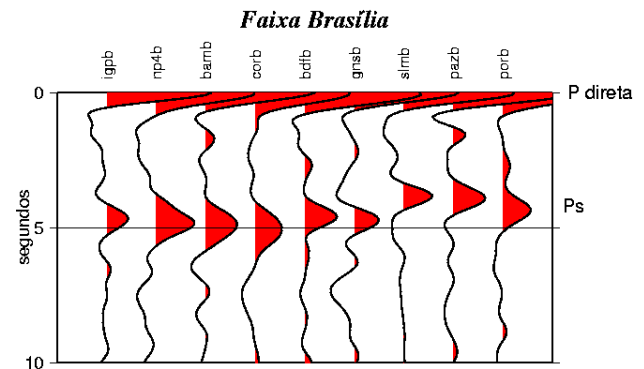


Figura 5 – Seção das funções do receptor empilhadas. Para cada estação, todos os traços são empilhados após a correção NMO da fase Ps para simular uma incidência vertical.

Tabela 2 – Valores de espessura crustal (h) com função do receptor usando Vp=6,4 km/s para as estações BAMB, NP4B e IGPB, e Vp=6,3 km/s para as demais. (Ps-P)₀ é a extrapolação da diferença temporal Ps-P para incidência vertical. O parâmetro gaussiano usado nessa estimativa é igual a 2. Desvio padrão indica o grau de variação lateral na crosta sob cada estação (estrutura puramente horizontal teria desvio padrão igual a zero). É bom lembrar que não incluímos as incertezas de velocidade média da onda P e da estimativa Vp/Vs, o que poderia aumentar a incerteza.

Estação	h(km)	(Ps-P) ₀	Elevação (km)
BAMB	36,7 ± 2,2	5,07 ± 0,31	0,7
BDFB	42,4 ± 0,5	4,63 ± 0,05	1,19
CORB	37,2 ± 1,7	5,04 ± 0,23	0,95
GNSB	42,3 ± 0,9	4,72 ± 0,10	1,10
IGPB	35,4 ± 2,1	4,71 ± 0,28	0,63
NP4B	38,3 ± 2,9	4,63 ± 0,34	0,91
PAZB	36,3 ± 1,4	3,90 ± 0,15	0,41
PORB	36,5 ± 1,1	4,29 ± 0,12	0,36
SLMB	31,7 ± 0,5	3,82 ± 0,06	0,70

Modelagem da função do receptor

Com o objetivo de mostrar a correlação do modelo de espessura com os dados observados calculamos a FR sintética. Devido à não unicidade da inversão da função do receptor (Ammon *et al.*, 1990), e a provável presença de fase gerada por espalhamento nos registros da função do receptor, não tentamos ajustar todos os picos e vales na inversão. Buscamos ajustar as principais características usando um modelo simples de camada. Nosso objetivo é mostrar que as estimativas da espessura da crosta e a razão Vp/Vs são consistentes com a função observada.

A figura 5 mostra a inversão da função do receptor na estação BDFB para um modelo inicial de 4 camadas. Nos sismogramas, a linha vermelha é o traço observado, e a

linha azul é o resultado da inversão. Na estrutura de velocidade, a linha vermelha é o modelo inicial, e a linha azul o modelo que ajusta os dados. As inversões foram feitas para as estações BDFB, CORB, PAZB, PORB e SLMB. As demais estações não foram invertidas devido ao pequeno número de funções e/ou complexidade da função tangencial.

Discussões e Conclusões

A região de estudo é separada em duas partes: Central, com as estações BDFB, CORB, GNSB, PAZB, PORB e SLMB, e sul, com as estações BAMB, IGPB e NP4B.

CENTRAL

De acordo com Soares *et al.* (2001), velocidade da onda P para a crosta inferior é cerca de 7,1 km/s para o arco magmático e maciço de Goiás (perfil Porangantu), e 6,7 km/s para Faixa Brasília (perfil Cavalcante).

As espessuras crustais diminuem em direção ao Oeste. A figura 6 mostra o mapa de anomalia Bouguer com as espessuras crustais, em que a baixa anomalia corresponde à elevação maior (figura 7a). Os resultados são isostaticamente coerentes (exceto SLMB) com estações de maior elevação tendo maior espessura crustal (figura 7b e 8). A espessura estimada para PORB (36 km) é consistente com o obtido por Soares *et al.* (2001).

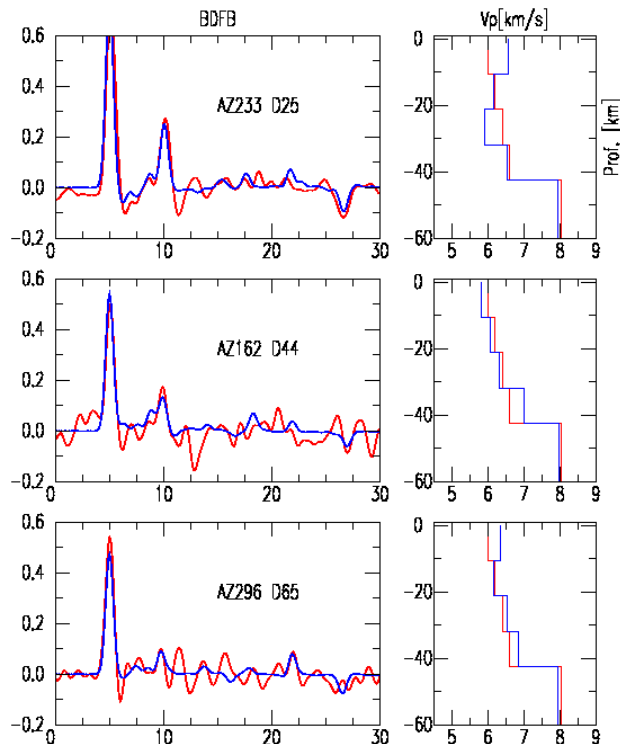


Figura 5 – Inversões e estrutura de velocidades para o melhor ajuste da função do receptor em BDFB. À esquerda, linha vermelha a função do receptor observada, e linha azul a inversão. À direita, a linha vermelha é o modelo inicial usado na inversão, e linha azul é a estrutura de inversão.

A razão V_p/V_s na estação PORB é de 1,74 e a velocidade da onda P para crosta inferior de 7,1 km/s indicam composição máfica (Musacchio *et al.*, 1997). Para BDFB, temos uma razão de 1,69 e V_p para crosta inferior de 6,8 km/s (supondo que as velocidades para linha Cavalcante sejam as mesmas sob BDFB), indicando uma crosta inferior provavelmente félsica.

Embora CORB apresente uma qualidade ruim, a alta razão V_p/V_s e uma possível V_p igual a 6,8 km/s poderia indicar uma crosta inferior de composição anortosítica (Musacchio *et al.*, 1997). A pequena espessura (37 km) para CORB, comparada às demais estações, parece inconsistente com a anomalia Bouguer muito negativa (-140 mGal). No entanto, rochas anortosíticas têm densidade muito baixa (2.730 kg/m³), o que poderia explicar essa anomalia Bouguer.

Para as demais estações é difícil sugerir uma provável composição pela ausência de determinações V_p próximas às estações e pela baixa qualidade das razões V_p/V_s .

SUL

A espessura crustal é média de 37 km e razão varia entre 1,75 e 1,88. As velocidades da crosta inferior não são bem conhecidas. Dados de Perosi (2000) parecem indicar V_p em torno de 6,7 km/s similar à Faixa Brasília. A alta razão V_p/V_s e baixa anomalia Bouguer sugerem interpretação de predominância de rochas anortosíticas, como na estação CORB.

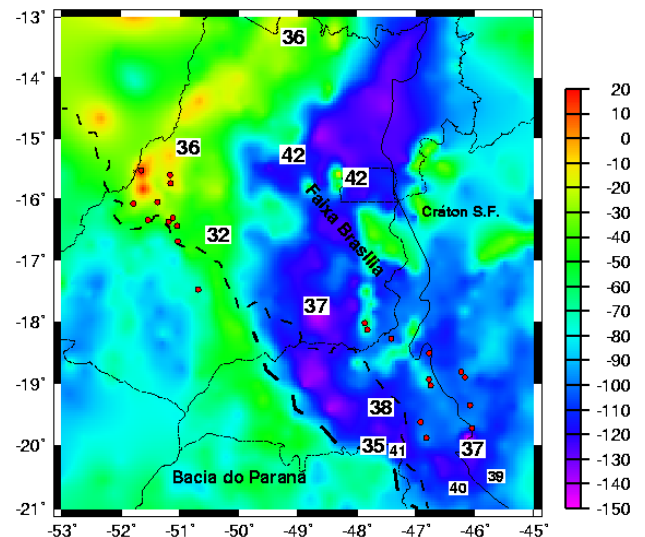


Figura 6 – Valores de espessura crustal estimada usando a função do receptor. Números grandes referem-se as estações analisadas neste trabalho. Números pequenos são espessuras crustais determinadas por Assumpção *et al.* (2002). Cores indicam anomalia Bouguer em mGal (dados IAG-USP). Círculos vermelhos são sítios vulcanos alcalinos do Cretáceo.

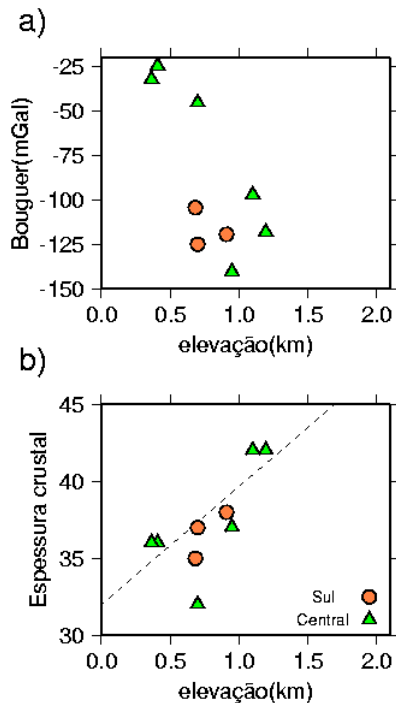


Figura 7 – (a) Variação da Anomalia Bouguer com Elevação da estação. (b) Variação da espessura crustal com a elevação da estação. A linha tracejada é a relação espessura crustal usando isostasia de Airy, e supondo uma espessura crustal de 32 km de referência para elevação zero.

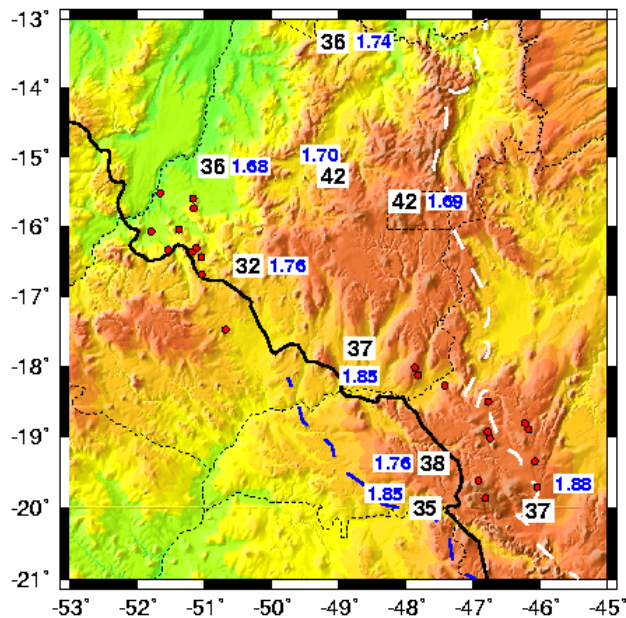


Figura 8 – Mapa topográfico da Faixa Brasília com valores de espessura crustal e razão V_p/V_s . Círculos vermelhos são sítios vulcanos-alcálinos do Cretáceo.

Mapa de espessura crustal para Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

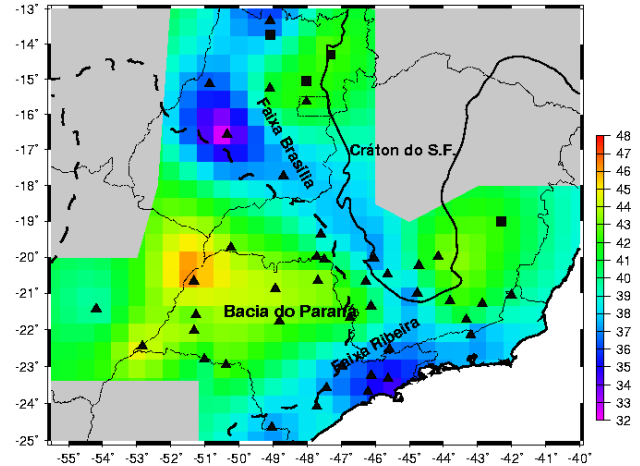


Figura 9 – Mapa preliminar das espessuras crustais no SE e Centro-Oeste, usando somente dados de função do receptor (triângulos) e perfis sísmicos (quadrados que representam a média dos perfis.).

A figura 9 mostra o mapa de espessura crustal baseado nos resultados deste trabalho e de Assumpção *et al.* (2002), França e Assumpção (2003), França (2003). Vale lembrar que nossos resultados têm incertezas de $\pm 1-2$ km. Observamos que nas Faixas de Dobramentos (Ribeira e Brasília) uma espessura menor que na Bacia do Paraná.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio do CNPq e da Fapesp, ao técnico José Roberto Barbosa (IAG) pelo apoio de campo, ao Prof. Lucas Barros do Observatório Sismológico-UnB por ter cedido os dados das estações IGPB e NP4B. Ao IRIS pelos dados da estação BDFB, a Charles Ammon pelos programas, ao Prof. Eder Molina pelos dados de gravimetria. Os mapas foram feitos usando o GMT.

References

Ammom, C. J., G. E. Randall & G. Zandt, 1990. On the nonuniqueness of receiver functions inversions, *J. Geophys. Res.*, **95**, 15303-15318.

Assumpção, M., D. James & J. A. Snoke, 2002. Crustal Thicknesses in SE Brazilian shield with receiver function: Implications for isostatic compensation, *J. Geophys. Res.*, **107**, B1, doi:10.1029/2001JB000422, ESE2-11.

França, G. S. & M. Assumpção, 2003. Crustal structure of the Ribeira fold belt, SE Brazil, derived from receiver functions. Submitted to *J. S. Am. Earth Sc.*

França, G. S., 2003. Estrutura da crosta no sudeste e centro-oeste do Brasil, usando a função do receptor. Tese de Doutorado, *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/USP* (São Paulo, SP, Brasil), 143p.

James, D., M. Assumpção, A. Snoke, L.C. Ribotta & R. Kuehnel, 1993. Seismic studies of continental lithosphere beneath SE Brazil, *An. Acad. Bras. Ci.*, **65** (Supl. 2), 227-250.

Musacchio G., W. D. Mooney, J. H. Luetgert & N. I. Christensen, 1997. Composition of the crust in the Grenville and Appalachian provinces of North America inferred from Vp/Vs ratios, *J. Geophys. Res.*, **102**, 15225-15241.

Perosi, F. A., 2000. Refração sísmica profunda no Setor Sudeste da Província Tocantins, Dissertação de Mestrado, *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/USP* (São Paulo, SP, Brasil), 120p.

Schimmel M. & H. Paulssen, 1997. Noise Reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks, *Geophys. J. Int.*, **130**, 497-505.

Soares, J. E. P., Berrocal, J. & Antunes, J. A., 2001. The Cavalcante and Minaçu-Brasília deep seismic refraction lines: a travel time interpretation of crustal structure in Central Brazil. CD-ROM Resumos expandidos do 7º Congresso Internacional da SBGf, Salvador, sessão PS5, 1341-1344.

Soares J. E. P, 2002. Em Berrocal, J., M. Assumpção, N. C. Sá, Y. Marangoni, R. A. Fuck, M. M. Pimental & L. J. H. D'el-Rey Silva, 2002. Estudos geofísicos e modelo tectônico dos setores central e sudeste da Província Tocantins, Brasil Central. Projeto Temático-Processo FAPESP N.º 96/1566-0, *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/USP* (São Paulo, SP, Brasil) 132p.

Zandt, G., S. C. Myers & T. C. Wallace, 1995. Crust and mantle structure across the Basin and Range-Colorado Plateau boundary at 37° latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism, *J. Geophys. Res.*, **100**, B6, 10529-10548.

* Atualmente no Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, orgsand@hotmail.com.