



Estrutura Crustal na Região Central do Brasil: aplicação do método de Função do Receptor

Mônica M.M. Costa & Jesus Berrocal (muzzetti@iag.usp.br, berrocal@iag.usp.br)
Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Universidade de São Paulo

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent 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

This work intends contributing with more information to improve the already existent models about the crustal structure in the collision zone between Tocantins Province and São Francisco Craton, the two most important tectonic units of Central Brazilian geologic history.

Receiver Function (RF) method was chosen to carry on this study. RF uses the phases that are generated through the refraction of teleseismic P waves in Moho and other discontinuities of the crust. To isolate the information about the local effects of the recorded waveforms and get a function that only depends on the structure below the station, we use the deconvolution process, both in frequency and time domain, choosing the result that produced the best responses. Due to the smaller velocity of Ps phase compared with the refracted P, the difference between the arrival times of P and Ps refracted phases will measure the depth of the discontinuity where occurred the refraction. In the case of Moho, the result was the thickness of the crust beneath the recorder station.

At present, the receiver functions were already computed with teleseismic data of CV1B, CV2B and CV3B stations located in Cavalcante, GO, region, and preliminary results of crustal thickness beneath that region have been found. The results show the smaller thickness were gotten in the events with azimuths between 135° and 180° (SSE), which were related to an apparent anomalous region in the crust below of these stations, coinciding with the model considered by Soares *et al* (2004). In this region the crust, that generally presents a thickness among 41 to 43 km, started to have thickness of approximately 37 km. These values show an irregular Moho below Cavalcante, just waited because the complex geotectonic of the region. The improvements of these results are going to help in the construction of a refined model for the area.

Introdução

A estrutura crustal no território brasileiro ainda é pouco conhecida, apesar dos crescentes esforços que vêm sendo realizados atualmente, e seu estudo é indispensável para completar os conhecimentos sobre os aspectos tectônicos superficiais de nosso território. Na Região Central do Brasil, o estudo do comportamento da crosta e manto superior se torna ainda mais importante dada sua complexa história geotectônica.

A área em estudo (Fig. 1) está localizada em terrenos neoproterozóicos da zona externa da Faixa Brasília, na Província Tocantins, província esta determinada pela convergência de importantes blocos continentais (Cráton do São Francisco à leste, Cráton Amazônico à noroeste, Bacia do Parnaíba ao norte e Bacia do Paraná à sudoeste). Diversos autores já realizaram estudos geofísicos nessa região. A anomalia gravimétrica negativa, limitando a Bacia do Paraná, indicativa de uma zona de sutura, e os resultados obtidos por Soares *et al.* (2004), e Perosi (2000) através do método de refração sísmica profunda, denotam toda a complexidade geotectônica dessa região e tornam essencial o estudo detalhado da estrutura crustal.

Entre os métodos geofísicos empregados em estudos da crosta, os métodos sísmicos oferecem maior precisão. Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, novas técnicas, mais precisas, baratas e rápidas, começaram a ser implementadas e utilizadas com maior frequência. Dentre elas, o método de função do receptor (FR) se tornou uma das principais ferramentas na determinação da estrutura crustal.

O conceito básico do método é a incidência de uma onda P telessísmica em uma descontinuidade (como Moho) que produzirá uma P refratada e uma S convertida durante a refração (fase Ps). Devido a menor velocidade da fase Ps, a diferença entre os tempos de chegada dessas fases refratadas medirá a profundidade da descontinuidade, ao mesmo tempo em que a razão entre as amplitudes delas dependerá do contraste de seus parâmetros elásticos. Para tanto, o método utiliza o processo de deconvolução para isolar os efeitos locais das ondas P telessísmicas, resultando em uma função que depende somente da estrutura abaixo da estação.

O objetivo deste trabalho é relatar os resultados preliminares da pesquisa que tem por finalidade, através de novos dados, aprimorar os modelos já existentes da crosta na região de encontro da Província Tocantins e o Cráton do São Francisco, utilizando-se as informações vindas dos telessismos incidentes nas estações

sismográficas de Cavalcante, resultados esses obtidos através do método FR.

Até o momento, foram calculadas algumas respostas de função do receptor e foram encontrados resultados preliminares de espessura crustal na região de estudo. Os resultados obtidos mostram uma Moho irregular debaixo dessas estações, com profundidades variando de 36 a 43 km de acordo com o azimute do evento. Estes valores se mostraram compatíveis com os valores obtidos por outros autores na mesma região e seu estudo mais detalhado servirá de base para a obtenção de um modelo para a estrutura crustal da área.

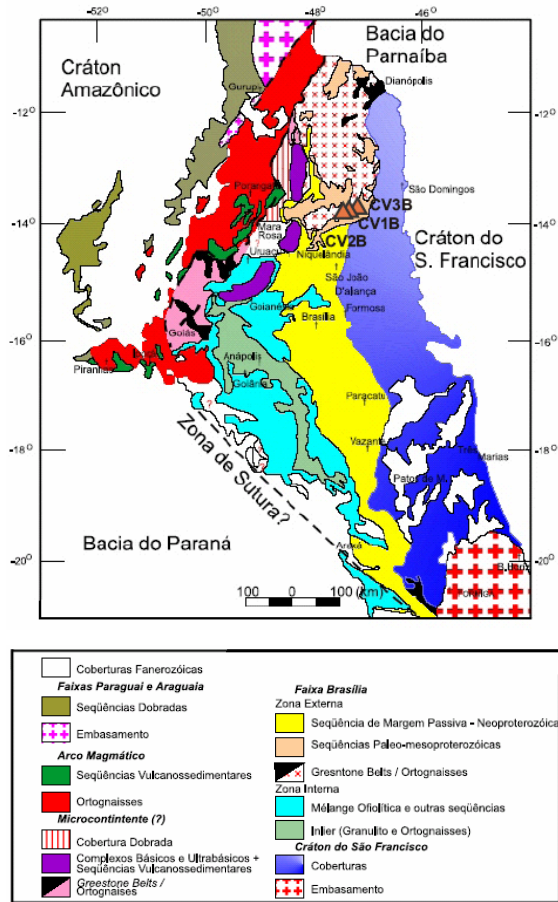


Figura 1: Mapa geológico da Província Tocantins (adaptado de Pimentel et al, 2000) e localização das estações sismográficas de Cavalcante (CV1B, CV2B e CV3B) nos triângulos pretos.

Função do Receptor

O funcionamento contínuo das três estações sismográficas de Cavalcante (CV1B, CV2B e CV3B) espaçadas em torno de 12 km uma da outra e instaladas pelo IAG/USP desde o mês de setembro de 2002, geraram uma boa quantidade de dados para efetuar estudos sismológicos. O fato de essas estações ter operado com geofones triaxiais e com registros digitais, permitiu separar vários desses eventos com distâncias telessísmicas para trabalhar com o trecho inicial dos sismogramas que contem as fases interessantes para o estudo da crosta abaixo de cada estação.

De acordo com o método FR, a onda P, ao incidir numa descontinuidade, se refratará dando origem às duas fases principais (P e Ps), simultaneamente para o mesmo ponto (ver Fig.2) e, devido a menor velocidade da fase Ps, a diferença entre os tempos de chegada dessas fases medirá a 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 , na porção da crosta que está sendo estudada.

A recomendação deste método para utilizar telessismos com distâncias epicentrais entre 30° e 90° , é para assegurar ângulos de incidência da onda P quase vertical (raio 1 na Fig. 2), o que permite que a fase Ps registrada na estação tenha sido convertida de outro raio da onda P incidente próximo do anterior (raio 2, na Fig. 2), garantindo a amostragem de aproximadamente o mesmo ponto da descontinuidade; com isso se consegue um erro mínimo provocado pela trajetória dessas fases no cálculo da profundidade. Com essas distâncias se consegue o afastamento da zona de triplicação de fases dos 20° . Outra recomendação é que a magnitude dos eventos seja acima de 5.0 mb a fim de estabelecer um bom nível entre sinal e ruído e garantir respostas RF mais claras.

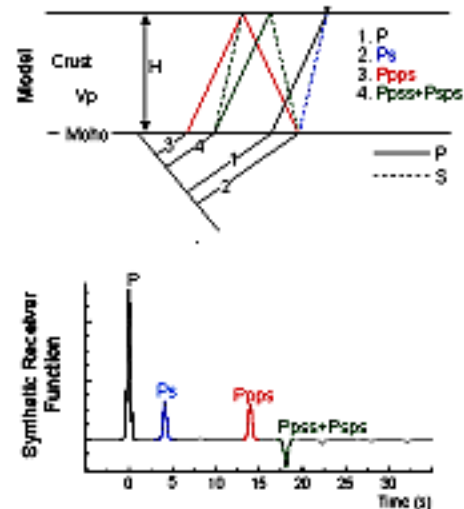


Figura 2: Em cima, diagrama esquemático das trajetórias das fases convertidas e das múltiplas reverberadas numa crosta homogênea acima de um manto homogêneo, a partir de uma frente de ondas P telessísmicas e, embaixo, a resposta correspondente obtida através do método FR. (Modificado de Bianchi, 2003).

Considerando um modelo de camadas horizontais, espera-se obter a mesma função do receptor, numa mesma estação, para eventos vindos de diferentes azimutes. Desse modo, para se identificar camadas inclinadas ou descontinuidades laterais, ou mesmo conferir a precisão do método, é necessário efetuar a comparação das respostas FR obtidas com sismos provenientes de diferentes azimutes. Além disso, dada a proximidade entre as três estações de Cavalcante e pelo fato delas terem funcionado concomitantemente durante

6 meses, foi possível obter três respostas para um mesmo evento, o que permitiu correlacionar os resultados e obter interpretações mais confiáveis do que se utilizando uma única estação.

Cabe também ressaltar a relação entre a distancia epicentral do evento e a faixa de freqüências que ele carrega, considerando a necessidade de se utilizar telessismos de fontes mais próximas (com mais altas freqüências), com distâncias menores que 30° , para se obter respostas de descontinuidades de menor espessura no interior da crosta.

Deconvoluções

Para os estudos de função do receptor é utilizado o processo de deconvolução, a partir do qual são obtidas as séries temporais onde as fases refratadas e convertidas podem ser identificadas e seus tempos lidos.

Para tanto, consideramos que a onda telessísmica registrada contém informações da fonte, da trajetória, da estrutura 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, utilizamos o processo de deconvolução para remover os efeitos da fonte, da trajetória e do instrumento e obter um sinal somente com a resposta da estrutura sob a estação.

A resposta no domínio do tempo de um deslocamento teórico para uma onda P telessísmica, de acordo com *Langston (1979)*, pode ser representada como:

$$\begin{aligned} D_V(t) &= I(t)*S(t)*E_V(t) \\ D_R(t) &= I(t)*S(t)*E_R(t) \\ D_T(t) &= I(t)*S(t)*E_T(t) \end{aligned} \quad (1)$$

onde $D_V(t)$, $D_R(t)$ e $D_T(t)$, são a componente 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 a resposta vertical, radial e transversal da estrutura abaixo da estação, onde (*) é o operador convolução, todos no domínio do tempo (t). No domínio da freqüência (w), a convolução é tratada como uma multiplicação espectral e as componentes das equações (1) ficam sendo:

$$\begin{aligned} D_V(w) &= I(w)S(w)E_V(w) \\ D_R(w) &= I(w)S(w)E_R(w) \\ D_T(w) &= I(w)S(w)E_T(w) \end{aligned} \quad (2)$$

No caso de eventos telessísmicos a onda P deve conter quase toda a energia em sua componente vertical, o que faz com que $E_V(t)$ se comporta como um delta de Dirac ($E_V \approx \delta(t)$) (*Langston, 1979*), logo a primeira equação de (1) pode ser representada por:

$$D_V(t) \approx I(t) * S(t) \quad (3)$$

Portanto, $D_V(t)$ contém as informações do instrumento $I(t)$ e da fonte e da trajetória dos raios sísmicos $S(t)$, fatores que se deseja remover para obter somente a resposta da estrutura sob a estação ($E_R(t)$ e $E_T(t)$).

Desse modo, 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 $D_V(t)$ pela horizontal ($D_R(t)$ ou $D_T(t)$).

O processo mais comumente empregado nesses estudos é o de deconvolução no domínio da freqüência (ver Fig. 3), no qual a resposta FR é obtida pela divisão espectral das componentes horizontais (radial e tangencial) do sismograma por sua componente vertical. Ao fazermos essa divisão no período da freqüência, as respostas do instrumento, da fonte sísmica e da trajetória são removidas, restando somente as informações da estrutura abaixo da estação (*Langston, 1979*). Como a deconvolução no domínio da freqüência é uma divisão espectral de séries temporais, a divisão por amplitudes muito pequenas pode causar instabilidade no processo. Para evitar isso *Ammon (1991)* usou o artifício do nível d'água, que é definido como uma fração elevada da amplitude do denominador, eliminando as amplitudes muito pequenas.

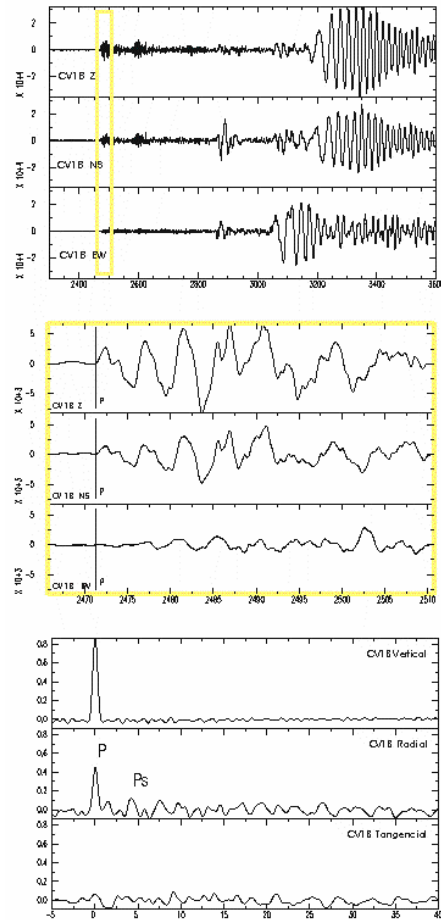


Figura 3: Função do receptor em CV1B de telessismo ocorrido em 15/11/2002, com epicentro na região da ilha Geórgia do Sul e magnitude 6,0 mb, janela temporal com a chegada da onda P e das ondas S refratadas e o resultado da deconvolução no

domínio da frequência para um nível d'água de 0,001 filtro gaussiano de 1,5 e janela temporal de 40 s.

Um segundo processo de deconvolução, a técnica de deconvolução interativa no domínio do tempo descrita por *Ligorria e Ammon (1999)*, também pode ser empregado para a obtenção da resposta RF. A técnica é baseada na minimização, pelo método de mínimos quadrados, da diferença entre o sinal da componente horizontal observada e o sinal estimado que é gerado pela convolução de um trem de ondas, atualizado interativamente, com o sismograma da componente vertical. A convolução desse sinal estimado com a componente vertical é, então, subtraída da componente radial, e esse processo é repetido a cada interação para estimar os intervalos de tempo e as amplitudes dos outros picos. Com a adição de mais picos na função do receptor, a discrepância entre o resultado obtido na convolução descrita acima e a componente radial observada é reduzida, sendo que o processo de interações somente pára quando essa discrepância se torna insignificante. Para se otimizar essa técnica e obter uma resposta de FR confiável no menor tempo computacional é necessário controlar o número máximo de interações ou o erro mínimo aceitável entre elas.

Finalmente, para controlar o intervalo de frequências com que se deseja trabalhar é empregado o filtro gaussiano, cuja função é suavizar o sinal RF, eliminando o ruído de alta frequência, tomando-se, porém, o cuidado para que sua utilização não corte as informações referentes a descontinuidades menores do interior da crosta, vistas preferencialmente por essas altas frequências.

Após a realização do processo de deconvolução, a resposta RF obtida mostra picos claros em aproximadamente 0 s, 5 s e 15 s, fases interpretadas como a P, Ps e PpPms, respectivamente. Também pode ser verificada nas respostas mais claras a fase PpSms+PsPms próximo aos 20 s. Ocasionalmente, fases observadas entre 0 s e 5 s e entre 5 s e 15 s podem ser interpretadas como as fases Ps e PpPhs, refratadas em descontinuidades intracrustais (*Juliá et al (2003)*). A resposta transversal obtida deve ser próxima a zero, sendo que sinais existentes neste caso, representam a existência de anisotropia no meio (*Peng et al., (1997)*).

Para o cálculo da espessura crustal é medida a diferença entre os tempos de percurso das fases P e Ps, refratadas na Moho, e quantificada através de:

$$h = \frac{t_{Ps} - t_P}{\left(\frac{1}{V_S^2} - \frac{1}{p^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{V_P^2} - \frac{1}{p^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad 4$$

onde t_{Ps} é o tempo de leitura da fase Ps na resposta FR obtida, t_P é o tempo da fase P, p é o parâmetro de raio da onda P incidente, V_P é a velocidade da onda P e V_S a velocidade da onda S, na camada estudada.

Neste trabalho foram realizadas deconvoluções nos domínios do tempo e da frequência para todos os telessismos utilizados e as melhores respostas obtidas

serviram de base para o cálculo da espessura da crosta sob Cavalcante. Um exemplo de comparação entre as respostas RF obtidas pelas duas técnicas de deconvolução e os resultados obtidos no trabalho é apresentado a seguir. A análise desses resultados, adicionalmente às informações já obtidas por outros autores em trabalhos realizados na região servirá para a obtenção de um modelo confiável de sua estrutura crustal.

Resultados obtidos

Para o cálculo da função do receptor foram efetuadas deconvoluções dos telessismos registrados pelas três estações sismográficas de Cavalcante (CV1B, CV2B e CV3B).

A seleção foi feita de acordo com as distâncias epicentrais e magnitudes dos eventos. Os parâmetros para definir o intervalo das distâncias ideais consideraram principalmente a incidência quase vertical dos raios sísmicos, a fim de garantir a amostragem de um mesmo ponto da descontinuidade, através da refração da fase P incidente em P e Ps num ponto próximo, e o afastamento máximo possível da zona de tipificação de fases. Desse modo, as distâncias epicentrais consideradas para a seleção dos eventos foram de 30° a 90° para eventos rasos ou entre 20° e 90° para eventos de maior profundidade. Foram selecionados neste projeto, sismos com $m_b > 5,0$.

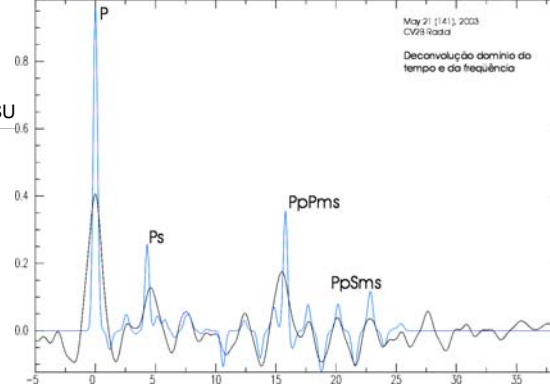
Foram realizadas deconvoluções nos domínios do tempo (deconvolução interativa) e da frequência. Para eventos com sinal de alta qualidade, com alta razão sinal ruído, a diferença entre os resultados obtidos com as essas duas técnicas de deconvolução se mostrou pequena, enquanto que para sinais ruidosos ou de baixa amplitude, ambas apresentaram dificuldades. A preferência por uma as técnicas se baseou, portanto, na comparação entre as respostas obtidas, priorizando aquela que melhor recuperasse as informações necessárias para a aplicação do método FR. Nesse caso, a deconvolução interativa no domínio do tempo se apresentou mais conveniente (*Ligorria e Ammon (1999)*).

Para exemplificar a comparação entre as duas técnicas, está mostrada, na Fig. 4, a deconvolução no domínio do tempo (em azul) e da frequência (em preto) do telessismo ocorrido em 21/05/03, com distância epicentral de 69,78°, profundidade de 10 km, azimute de 41,7° e magnitude 6,6 m_b . Ambas as deconvoluções foram realizadas em janelas temporais e 40 s e utilizando-se o parâmetro gaussiano de 4,0 (filtro passa baixo de aproximadamente 2.0). Na deconvolução no domínio da frequência foi utilizado nível d'água de 0,001 para sua estabilização. A deconvolução no domínio do tempo obteve 0,001%, em 140 interações.

Pelo fato do sinal ser de alta qualidade, devido à sua alta magnitude, ambas as respostas se mostraram claras, sendo que a resposta obtida na deconvolução no domínio do tempo se mostrou mais vantajosa por apresentar os picos das fases P, Ps e PpPms melhores definidos.

A partir das respostas com melhores FRs obtidas nas deconvoluções e dos valores calculados por Soares *et al.* (2004) de velocidade média da onda P na crosta (6,4 km/s) e a razão Vp/Vs (1,69), foram calculados os valores preliminares de espessura crustal para a região de Cavalcante. Os resultados obtidos variaram de um mínimo de 36 km a um máximo de 43 km, de acordo com o azimute de cada evento, o que indica a complexidade crustal dessa região. A análise por azimute mostra que, na faixa de 135° a 180° de azimute, a espessura da crosta é um pouco menor que a média esperada para essa região, com valores mínimos da ordem de 36 km. Nos outros azimutes a profundidade de Moho é aproximadamente entre 42 e 43 km. Esses resultados concordam em termos gerais com os obtidos por Soares *et al.* (2004).

Figura 4: Comparação entre duas respostas obtidas pelas técnicas de deconvolução no domínio do tempo (azul) e da frequência (preto) para um mesmo evento. As fases P, Ps e PpPms podem ser claramente verificadas na primeira.



Como as três estações (CV1B, CV2B e CV3B) funcionaram concomitantemente durante 6 meses, obteve-se nesse intervalo o registro de alguns tele-sismos em duas ou três dessas estações, o que significou a possibilidade de comparar as respostas obtidas. Os resultados médios obtidos neste caso mostram-se coerentes com os resultados individuais em cada estação, com exceção de um ou outro resultado, normalmente de sismos de menor magnitude.

As margens de erro, definidas de acordo com França (2003), correspondem a $\pm 0,01$ na razão Vp/Vs, que gera uma incerteza da ordem de $\pm 1,5$ km no valor da profundidade.

Conclusões

A utilização do método de função do receptor obteve resultados satisfatórios na determinação da espessura da crosta sob Cavalcante, GO, compatíveis com os valores obtidos por outros autores nessa região utilizando o método da refração sísmica profunda.

Os resultados de menor espessura, obtidos nos eventos de azimutes de valores entre 135° e 180°, identificaram uma aparente região anômala na crosta abaixo dessas estações, coincidindo com o modelo proposto por Soares *et al.* (2004). Nessa região a crosta, que geralmente apresenta uma espessura média entre 41 e 43 km, passa a ter espessuras de apenas 37 km, de acordo com esses autores.

Futuramente, com a continuidade do projeto, será possível conseguir valores suficientes para a modelagem e obtenção de um modelo confiável para a estrutura crustal sob a região de Cavalcante.

Agradecimentos

Agradeço à ELETRONUCLEAR pela ajuda financeira e à equipe do Laboratório de Sismologia do IAG/USP pela ajuda técnica e científica.

Referências

- Ammon, C.J. (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, pp. 2504-2510.
- Assumpção, M., An, M., Bianchi, M., França, G., Rocha, M., Barbosa, J.R., Berrocal, J. (2004). Seismic studies of the Brasília Fold Belt at the western border of the São Francisco Craton, Central Brazil, using receiver function, surface wave dispersion and teleseismic tomography. *Tectonophys., Seismix 2003 special issue*, submitted.
- Bianchi, M.B. (2003). Um estudo do empilhamento de função do receptor para determinação da razão Vp/Vs na crosta. Trabalho de Graduação. IAG/USP. Brasil.
- França, G.S. (2003). Estrutura da crosta no sudeste e centro-oeste do Brasil, usando a Função do Receptor. Tese de Doutorado. IAG/USP. Brasil.
- Juliá, J., Ammon, C.J., Herrmann, R. (2003). Lithospheric structure of the Arabian Shield from the joint inversion of receiver functions and surface-wave group velocities. *Tectonophys.* 371, pp. 1-21.
- Langston, C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journ. Geoph. Res.* 84, pp. 4749-4762.
- Ligorria, J.P., Ammon, C.J. (1999). Iterative deconvolution and receiver function estimation. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, pp. 1395-1400.
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Jost, H., Ferreira Filho, C.F., Araújo, S.M. (2000). The basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. Em Cordani, U. G., E. J. Milani, A. Thomaz Filho & D. A. Campos (coords)- Tectonic evolution of South American, Rio de Janeiro-RJ 31st International Geological Congress p.195-229.
- Peng, X. Humphreys, E. (1997). Moho dip and crustal anisotropy in Northwestern Nevada from teleseismic receiver functions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, pp. 745-754.
- Perosi, F. (2000). Refração sísmica profunda no setor sudeste da Província Tocantins. Dissertação de Mestrado. IAG/USP. Brasil.
- Soares, J.E.P., Berrocal, J., Fuck, R.A., França, G.S.A, Ventura, D.B.R. Crustal structures from deep refraction and receiver function data beneath Brasília Belt and western São Francisco Craton, Central Brazil. 32º International Geological Congress, Florença.