

# Estrutura crustal da parte norte do Cratão do São Francisco

## Crustal structure of the northern part of the San Francisco Craton

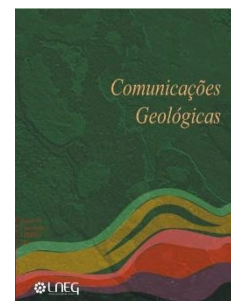
E. B. P. Chaves<sup>1\*</sup>, J. E. P. Soares<sup>1</sup>, C. H. S. P. Simões<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.34637/s39q-9q95>

Recebido em 11/08/2023 / Aceite em 25/01/2024

Publicado online em março de 2024

© 2024 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo curto  
Short article

**Resumo:** Este trabalho apresenta um modelo geofísico da parte norte do Cratão do São Francisco, com base na razão Vp/Vs média e espessura da crosta, obtidos a partir de dados de Função do Receptor (FR). Os dados foram adquiridos ao longo de um perfil W-E de aproximadamente 800 km de extensão. A inversão dos dados de FR mostra uma crosta com espessura entre 40-43 km, uma Vp/Vs de ~ 1,75 sob a Bacia do São Francisco e uma crosta com espessura de 38 km com Vp/Vs de 1,74 no Domínio Arqueano. Esses dois domínios estão em contato na região do Aulacógeno do Paramirim, onde a Moho apresenta mergulho para oeste e profundidades até 50 km. Os resultados obtidos neste trabalho em conjunto com o comportamento da topografia e da anomalia Bouguer permitiram identificar quatro domínios geofísicos que se relacionam com os domínios geológicos de superfície.

**Palavras-chave:** Cratão do São Francisco, Função do Receptor, Bacia do São Francisco, Moho.

**Abstract:** This work presents a geophysical model of the northern part of the São Francisco Craton, based on the average Vp/Vs ratio and crustal thickness, obtained from Receiver Function data acquired along a W-E profile approximately 800 km long. The inversion of RF data shows a crust with a thickness between 40-43 km, Vp/Vs of ~ 1.75 under the São Francisco Basin and a crust with a thickness of 38 km with Vp/Vs of 1.74 in the Archean Domain. These two domains are in contact in the Paramirim Aulacogen region, where the Moho dips westward and has depths up to 50 km. The results obtained in this work together with the topography behavior and the Bouguer anomaly allowed the identification of four geophysical domains in the North São Francisco Craton that are related to the surface geological domains.

**Keywords:** São Francisco Craton, Receiver Function, São Francisco Basin, Moho.

<sup>1</sup> Universidade de Brasília - UnB, Campos Darcy Ribeiro - Asa Norte, Instituto Central de Ciências – ICC Centro, 70.910-900 - Brasília, DF, Brasil.

\* Autor correspondente / Corresponding author: [ervelonbeuler@gmail.com](mailto:ervelonbeuler@gmail.com)

### 1. Introdução

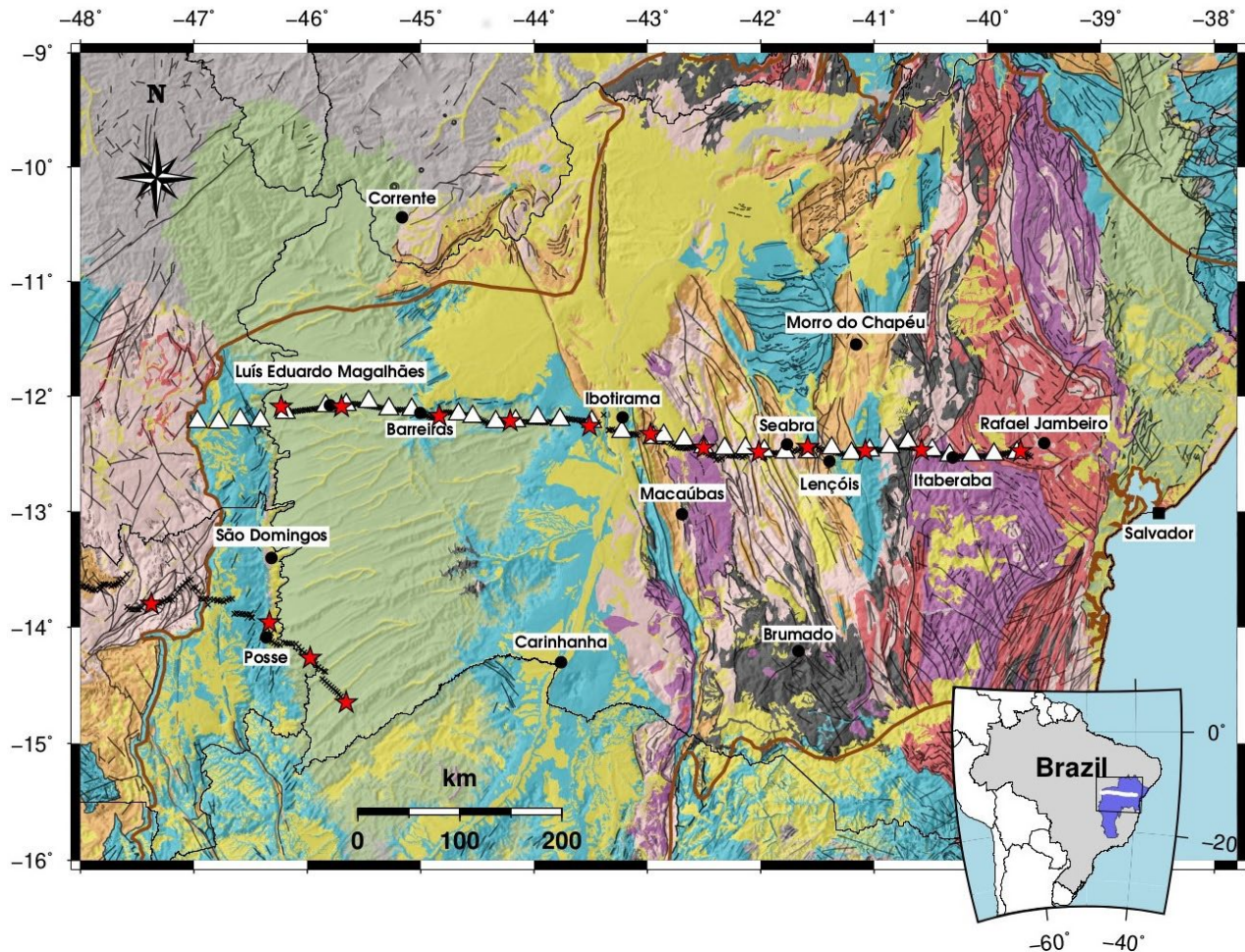
O Cratão do São Francisco (CSF) é a unidade tectônica mais exposta e bem conhecida geologicamente da Plataforma Sul-Americana (Almeida 1967, 1977). Seu embasamento é formado por domínios de alto grau metamórfico e idade arqueana-paleoproterozoica (> 1,8 Ga), em grande parte recoberto por metassedimentos mesoproterozoicos e coberturas sedimentares fanerozoicas. Além disso, apresenta rochas plutônicas com grande variedade composicional (Teixeira *et al.*, 2000; Barbosa e Sabaté, 2002; Alkmim e Martins-Neto, 2012).

Neste trabalho são apresentados resultados de função do receptor (Vp/Vs e espessura crustal) obtidos ao longo de perfil sísmológico E-W de 800 km de extensão (formado por 40 estações triaxiais espaçadas a cada 20 km), atravessando a parte norte do Cratão do São Francisco. De oeste para leste, o perfil tem início no domínio da Bacia do São Francisco (grupos Urucuia e Bambuí), passa pelo Aulacógeno do Paramirim na porção central e finaliza sobre a Faixa Itabuna-Salvador-Curaçá a leste (Fig. 1).

Os resultados são interpretados em conjunto com as curvas da anomalia de Bouguer (Bonvalot *et al.*, 2012 – WGM 2012) e topografia (Amante e Eakins, 2009 – ETOPO1), o que permitiu caracterizar os principais domínios geofísicos da parte norte do Cratão do São Francisco.

### 2. Contexto geológico

O Cratão do São Francisco é uma região interna e estável da Plataforma Sul Americana que, no final do Neoproterozoico, durante a formação do Gondwana Ocidental, estava unido ao Cratão do Congo e atuou como uma grande massa continental denominada paleocontinente São Francisco-Congo (Brito-Neves *et al.*, 1999; Campos-Neto, 2000; Alkmim e Martins-Neto, 2012). O embasamento do Cratão é formado por rochas com mais de 1,8 Ga de idade.



### Legend

<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></span> Cenozoic (< 65 Ma)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed;"></span> Seismographic stations
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black;"></span> Mesozoic (250 - 65 Ma)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; border-radius: 50%;"></span> Counties
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: grey; border: 1px solid black;"></span> Paleozoic (540 - 250 Ma)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black;"></span> Capital
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black;"></span> Neoproterozoic (1.0 Ga - 540 Ma)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border-radius: 50%;"></span> Shots
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span> Mesoproterozoic (1.6 - 1.0 Ga)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed;"></span> Refraction lines
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: pink; border: 1px solid black;"></span> Paleoproterozoic (2.5 - 1.6 Ga)	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border-bottom: 1px dashed black;"></span> CSF contour line
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> Neoproterozoic (2.8 - 2.5 Ga)	
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: purple; border: 1px solid black;"></span> Mesoarchean (3.2 - 2.8 Ga)	
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: darkgrey; border: 1px solid black;"></span> Paleoproterozoic (3.6 - 3.2 Ga)	

Figura 1. Mapa geocronológico da parte norte do Cratão do São Francisco mostrando as linhas de refração sísmica profunda do norte do Cratão do São Francisco e de Cavalcante (Soares *et al.*, 2006). Os triângulos em branco representam as estações sísmográficas instaladas a cada 20 km, a linha contínua preta, estações verticais instaladas a cada ~ 2 km e as estrelas em vermelho, os pontos de tiro, fontes sísmicas do perfil de refração.

Figure 1. Geochronological map of the northern part of the São Francisco Craton showing the deep seismic refraction lines of the northern São Francisco and Cavalcante Craton (Soares *et al.*, 2006). The triangles in white represent the seismographic stations (3 comp.-2Hz) installed every 20 km, the solid black line vertical stations (2Hz) installed every ~ 2 km and the stars in red the shooting points, seismic sources of the experiment of refraction.

Na parte sul (extremo sul do Cratão), o embasamento é formado por terrenos arqueanos com rochas tonalíticas-trondhjémíticas-granodioríticas (TTG), cercados por uma faixa móvel paleoproterozoica (2,1 Ga) identificada como Cinturão Mineiro.

Na parte norte (área de estudo - Fig. 1), encontram-se os sedimentos da Bacia do São Francisco a oeste e o embasamento

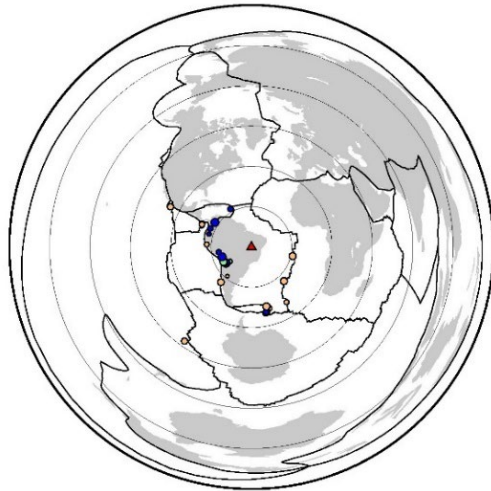
cratônico aflorando na porção nordeste, formado pelos Blocos Gavião-Sobradinho, Jequié, Serrinha e o Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá, todos constituintes do núcleo arqueano do CSF e maior expressão das colisões que deram origem aos cinturões paleoproterozoicos (Teixeira *et al.*, 2000; Barbosa e Sabaté, 2004). Estes cinturões provavelmente culminaram na estruturação do Cratão do São Francisco-Congo no Paleoproterozoico (Barbosa e Sabaté,

2004). Na parte central do domínio norte, ocorre um rifte iniciado no Paleoproterozoico, abortado e invertido no Neoproterozoico, denominado Aulacógeno do Paramirim.

### 3. Metodologia

A Função do Receptor (FR) é uma técnica implementada por Langston (1979) para o estudo da crosta continental e utiliza o tempo de chegada das ondas P geradas por telessismos que ao atingirem uma descontinuidade sob uma estação sismográfica têm parte da energia convertida em ondas S direta (Ps) e a outra parte em reverberações (reflexões múltiplas).

A FR fundamenta-se na desconvolução das componentes radial e tangencial de registros de um telessismo pela componente vertical, o que elimina os efeitos da fonte e percurso, bem como a resposta do instrumento. A componente vertical de registro representa a resposta da fonte e, ao desconvolvê-la da componente radial, as descontinuidades da Terra sob a estação sismográfica aparecem como pulsos (Ps) e conversões múltiplas (*spikes*) isoladas no tempo, que são gerados a partir da incidência da onda P no meio (Clayton e Wiggins, 1976; Langston, 1979; Ammon, 1991). O banco de dados deste trabalho é composto por 34 telessismos registrados em 40 estações sismográficas de período curto, operadas pelo Laboratório de Estudo da Litosfera da Universidade de Brasília (LabLitos/UnB), fornecidas pelo Pool de Equipamentos Geofísicos do Brasil (PEG-BR), do Observatório Nacional. Foram selecionados os telessismos registrados entre dezembro de 2014 e julho de 2015, com magnitude igual ou acima de 5,5 mb e distância epicentral entre 30° a 90° (Fig. 2).



34 Events				
● Depth 0–100 km	● Depth 100–300 km	● Depth > 300 km		
○ M 5	○ M 6	○ M 7	○ M 8	○ M 9

Figura 2. Localização epicentral dos 34 eventos ( $30^\circ < \text{dist.} < 90^\circ$  e  $\text{mb} > 5.5$ ) selecionados no período entre dezembro/2014 e julho/2015. As cores indicam a profundidade dos eventos.

Figure 2. Epicentral location of the 34 events ( $30^\circ < \text{dist.} < 90^\circ$  and  $\text{mb} > 5.5$ ) selected in the period between December/2014 and July/2015. The colours indicate the depth of the events.

### 4. Processamento de dados

O processamento dos dados seguiu as seguintes etapas: i) os dados foram transformados do formato original do equipamento (mseed) para formato SAC; ii) no programa

SAC (Seismic Analysis Code – Goldstein *et al.*, 1999), os arquivos foram cortados em janelas de 150s, considerando 60s antes da chegada da onda P (teórica) e 90s após a chegada da onda P; iii) os traços de função do receptor foram gerados no domínio da frequência, utilizando o pacote de Ammon (1991), com valor de nível d'água de 0,001 e fator de extensão do filtro Gaussiano igual a 4; iv) por inspeção visual, foram selecionados os traços de função do receptor com boa razão sinal-ruído; v) a espessura da crosta (H) e a razão ( $V_p/V_s$ ) foram obtidas com o programa Hk-stacking (Zu e Kanamori, 2000), considerando  $V_p$  de 6,4 km/s e pesos de 0,7 - 0,2 - 0,1 para as fases Ps (Moho) e múltiplas, respectivamente (Fig. 3).

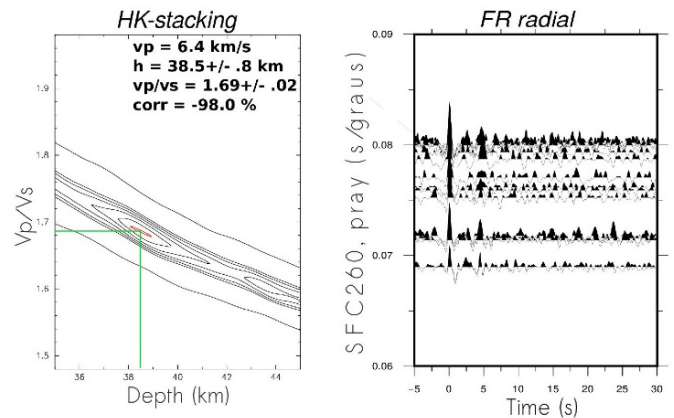


Figura 3. Resultado da estimativa de espessura crustal e razão  $V_p/V_s$  para a estação SFC260 do perfil sísmico.

Figure 3. Result of crustal thickness estimation and  $V_p/V_s$  ratio for the SFC260 station of the seismic profile.

### 5. Resultados

Os resultados de espessura e razão  $V_p/V_s$  obtidos (Hk-stacking) foram plotados ao longo do perfil, gerando um modelo da crosta da parte norte do CSF (Fig. 4).

O modelo mostra uma Moho irregular com profundidades entre 38-50 km, com espessura crustal e razão  $V_p/V_s$  variando segundo quatro domínios geofísicos principais: i) o primeiro domínio (cor amarela no modelo da Fig.4) vai de 0 a 85 km, e tem relação em superfície com a Calha do Bambuí, um bloco em forma de dedo com movimento vertical com relação aos domínios adjacentes (Soares *et al.*, 2006).

Este domínio apresenta valores de razão  $V_p/V_s$  de 1,70-1,71 e uma Moho com aproximadamente 43 km de profundidade; ii) O segundo domínio (cor azul) vai de 85 a 380 km, tem relação em superfície com o domínio das bacias Urucua-Bambuí, apresentam valores de razão  $V_p/V_s$  de 1,74-1,75 e profundidade da Moho de aproximadamente 40 km; iii) o terceiro domínio (cor amarela-vermelha) vai de 380 a 700 km, se relaciona com o Aulacógeno do Paramirim e apresenta valores de razão  $V_p/V_s < 1,70$ .

A descontinuidade de Moho mergulha para oeste, alcançando profundidades de até 50 km próximo aos 440 km; iv) o quarto domínio (cor esverdeada) vai de 700 a 800 km, apresenta razão  $V_p/V_s$  de 1,74, com valores pontuais de 1,71, e Moho regular com profundidade de 38 km.

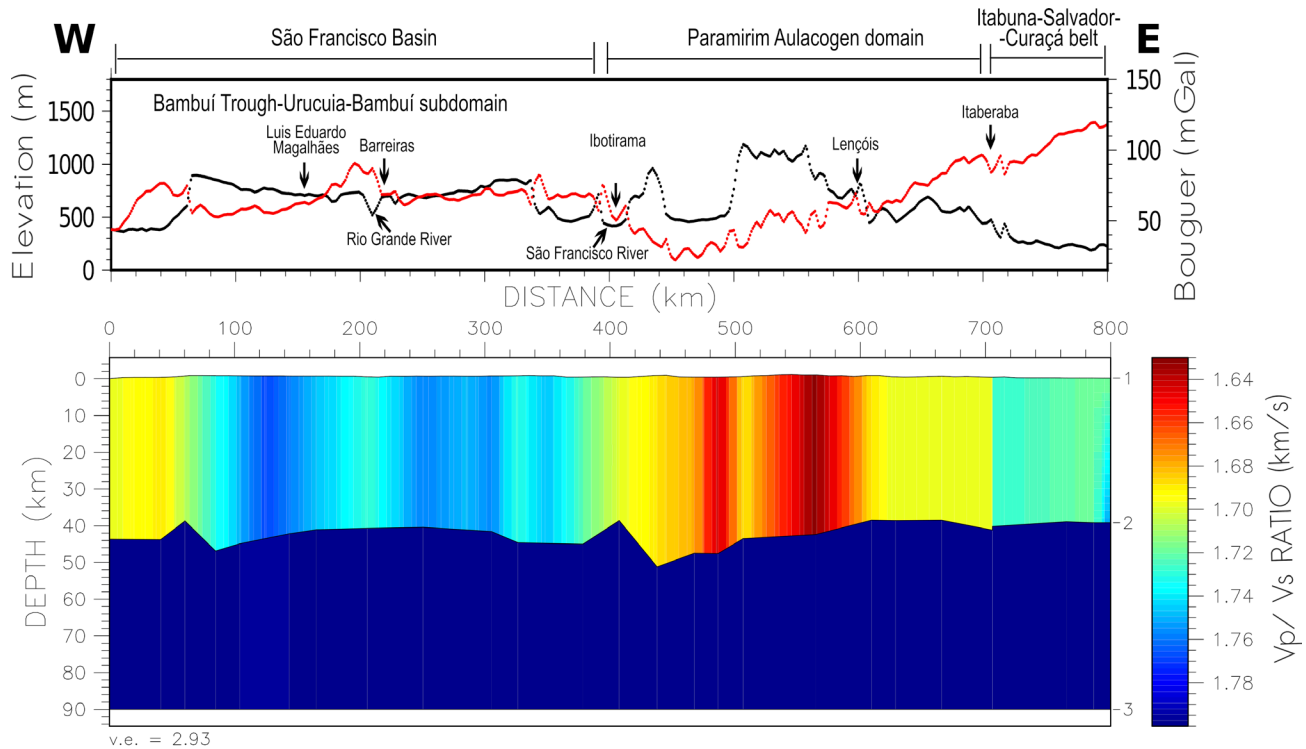


Figura 4. De cima para baixo: Topografia (linha preta), Anomalia Bouguer (linha vermelha) e Modelo de espessura crustal e razão  $V_p/V_s$  obtidos pelo *HK-stacking* para o perfil norte do Cratão do São Francisco.

Figure 4. From top to bottom: Topography (black line), Bouguer Anomaly (red line) and Crustal thickness model and  $V_p/V_s$  ratio obtained by *HK-stacking* for the north profile of the São Francisco Craton.

## 6. Discussões e Conclusão

Comparando o comportamento regional da curva da anomalia Bouguer com a curva da descontinuidade de Moho (Fig. 4) sob o perfil, observa-se uma concordância entre a geometria de ambas as curvas entre 85-600 km de distância. Até 400 km as curvas formam um patamar, e a partir de então, a curva da Anomalia Bouguer acompanha o mergulho da Moho. Isso mostra que nessa porção centro-oeste do perfil a anomalia Bouguer está compensada no contraste de densidade crosta-manto.

A partir dos 600 km, no entanto, essa lógica é rompida. Enquanto a descontinuidade de Moho é plana-horizonta com profundidade em torno de 38 km, a anomalia Bouguer continua aumentando de valor.

Essa mudança mostra variação lateral nas propriedades físicas médias da litosfera, muito provavelmente relacionada com o manto litosférico.

O comportamento da topografia em relação a anomalia Bouguer e a Moho também sofrem mudanças nos 600 km de distância, reforçando esse ponto como um limite litosférico.

De forma geral os resultados de FR mostram uma crosta a oeste com espessura de 40 km, relacionada à Bacia do São Francisco e outra a leste mais fina com espessura de 38 km, relacionada ao domínio Arqueano. Esses domínios estão em contato na região do Aulacógeno do Paramirim onde a crosta sofre um espessamento significativo.

Os resultados permitiram dividir o perfil em quatro domínios geofísicos que apresentam relação com os domínios geológicos de

superfície, quais sejam: de oeste para leste, i) Calha do Bambuí (0-85 km), ii) Urucua-Bambuí (85-380 km), iii) Aulacógeno do Paramirim (380-700 km) e iv) domínio Arqueano da porção norte do Cratão (700-800 km), que envolve a Faixa Itabuna-Salvador-Curaçá.

## Agradecimentos

À CAPES e à FAPDF pelo apoio financeiro, ao INCT para Estudos Tectônicos e ao LabLitos/IG/UnB pelo fornecimento dos dados para a realização da pesquisa. Em particular, nossos agradecimentos ao editor Dr. João Carvalho, ao revisor Dr. Nuno Afonso Dias e ao revisor anônimo, pelas sugestões e correções que enriqueceram e refinaram o manuscrito.

## Referências

- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, Eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **33**: 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>.
- Amante, C., Eakins, B. W., 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS, NGDC-24*: 19.
- Ammon, C. J., 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **81**(1991): 2504-2510. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810062504>.
- Almeida, F. F. M., 1977. O Cratão do São Francisco. *Rev. Bras. Geociências*, **7**: 349-364.
- Almeida, F. F. M., 1967. *Origem e evolução da plataforma brasileira*. Rio de Janeiro, DNPM-DGM, *Boletim*, 241.

- Barbosa J. S. F., Sabaté P., 2002. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: a synthesis. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, **74**(2): 343-359. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652002000200009>.
- Barbosa, J. S. F., Sabaté, P., 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research*, **133**: 127. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.03.001>.
- Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., Kuhn, M., Peyrefitte, A., Vales, N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F., Sarrailh M., 2012. *World Gravity Map, 1:50 000 000 map*. Eds.: BGI-CGMW-CNES-IRD, Commission for the Geological Map of the World, Paris.
- Brito-Neves, B., Campos-Neto, M., Fuck, R., 1999. From Rodinia to western Gondwana: an approach to the Brazilian Pan African cycle and orogenic collage. *Episodes*, **22**: 155-166. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1999/v22i3/002>.
- Cruz, S. C. P., Alkmim, F. F., 2007. A história de inversão do aulacógeno do Paramirim contada pela sinclinal de Ituaçu, extremo sul da Chapada Diamantina (BA). *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(4-suplemento): 92-110.
- Clayton, R. W., Wiggins, R. A., 1976. Source shape estimation and deconvolution of teleseismic bodywaves. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **47**(1): 151-177. <https://10.1111/j.1365-246X.1976.tb01267.x>.
- Campos-Neto, M., 2000. Orogenic systems from SW-Gondwana: an approach to Brazilian pan African cycle and orogenic collage in SE-Brazil. In: *Tectonic evolution of South America*, 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, **1**: 335-365.
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., 1999. SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers: UCRLJC-135963. Invited Contribution to the *IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*.
- Langston, C. A., 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, Wiley Online Library, **84**(B9): 4749-4762. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04749>.
- Soares, J. E. P., Berrocal, J. A., Fuck, R. A., Mooney, T., Ventura, D. B. R., 2006. Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: A deep seismic refraction study. *Journal Of Geophysical Research*, **111**: 302-333. <https://doi.org/10.1029/2005JB003769>.
- Teixeira, W., Sabaté, J. P., Barbosa, J., Noce, C. M., Carneiro, M. A., 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton. In: Cordani, U., et al. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*, 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, 101-137.
- Zhu, L., Kanamori, H., 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **105**(B2): 2969-2980. <https://doi.org/10.1029/1999JB900322>.