

Tomografia sísmica de tempo de percurso com ondas *P* aplicada ao estudo do manto superior sob a Província Borborema

¹Cleudilene Silva Rufino, ²Paulo Araújo de Azevedo, ³Marcelo Peres Rocha, ⁴Eliaquim Monteiro Ramos e ⁵Marcio Rentes Borges, ^{1,2}UFOPA, ³UNB, ^{4,5}LNCC.

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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.

Resumo

A Província Borborema (PB) é considerada, dentre as regiões do Brasil, que apresenta a maior atividade sísmica intraplaca. Neste contexto, utilizou-se a tomografia sísmica de tempo de percurso com as ondas *P* aplicada ao manto superior sob a PB, bem como o método de aprendizagem de máquina *K-means*, para identificar as regiões que apresentam maiores frequências de atividades sísmicas. Os dados utilizados na análise tomográfica são de eventos telessísmicos ocorridos no período de 2007 - 2017, com magnitude a partir de 5.4mb. Para a análise de sismicidade, adotou-se os eventos ocorridos na PB nos anos de 1992 - 2018, com magnitude superior a 2.0mb. Os resultados mostraram que a sismicidade da área de estudo está relacionada com o afinamento litosférico da PB. Nas regiões norte e nordeste desta área encontram-se as bacias sedimentares da margem costeira, as quais apresentam maiores probabilidades de ocorrência de eventos sísmicos.

Introdução

O Brasil localiza-se no meio de uma região continental estável, mas isto não o torna livre de abalos sísmicos. Segundo Bezerra et al. (2011) e Almeida et al. (2015), os maiores sismos em regiões continentais estáveis ocorrem preferencialmente nas áreas em que a crosta continental sofreu afinamento por tração relativamente recente, como no caso da PB, que desenvolveu tal característica no período Proterozóico.

Neste sentido, o conhecimento de esforços que ocorrem em sua litosfera é de fundamental importância, não apenas para entender a sismicidade intraplaca, mas também para compreender a dinâmica das forças responsáveis pela movimentação e deformação das estruturas desta província (ZOBACK M. L. & ZOBACK, 2015). A Figura 1 apresenta a atividade sísmica na região da Borborema em um período de 26 anos, na qual tem-se aproximadamente 407 eventos.

Ferreira et al. (1998) mostraram que os abalos nesta área estão confinados nos primeiros 10–12km da crosta superior, e um campo de esforços de cisalhamento atua

nessa região com compressão paralela e extensão perpendicular à costa, fazendo com que a região seja propícia a ter afinamento litosférico.

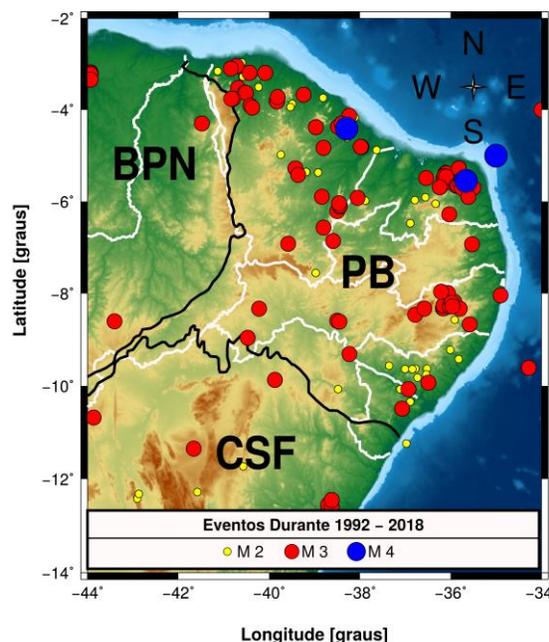


Figura 1 – Mapa da área de estudo com a distribuição dos sismos ocorridos na região. A PB está delimitada pela linha preta, as linhas brancas representam os limites dos estados da região nordeste. PB= Província Borborema, CSF= Cráton São Francisco, BPN= Bacia do Parnaíba.

Segundo Berrocal et al. (1984) as relações entre sismos e estruturas geológicas em regiões intraplacas são estudos complexos. Esta premissa também é defendida por Assumpção et al. (2014) e Oliveira et al. (2015), que afirmam que a maioria dos tremores de terra no Brasil, ocorrem sem nenhuma relação direta com feições mapeáveis em superfície.

Para Neto (2018), a PB apresenta certa característica relacionada à velocidade da onda *P*, em profundidade litosférica, sendo a região separada em duas áreas, a área norte com baixa velocidade, e a sul com alta velocidade. A anomalia de velocidade rápida é especialmente bem desenvolvida no sul do planalto da Borborema, confirmando sugestões de que esta região poderia constituir um bloco tectônico reologicamente forte em escala crustal (LUZ et al., 2015). Tais informações

podem estar relacionadas à dinâmica litosférica, bem como ligadas a possibilidade de ocorrência de sismos.

Assim, verifica-se a necessidade de relacionar os resultados do método de tomografia sísmica por tempo de percurso sob o manto superior com o método de agrupamento de dados *K-means*, a fim de compreender melhor as características litosféricas e a sismicidade da área de estudo.

Métodos

Os dados utilizados neste trabalho são da rede de estações sísmográficas permanentes e temporárias, instaladas na região nordeste do Brasil, sob a responsabilidade do Laboratório de Sismologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, colaboradora da Rede Sísmográfica Brasileira.

O período de aquisição dos dados referente às estações permanentes correspondem aos anos de 2007, 2013 - 2017. Já as estações temporárias possuem um período de aquisição de 2007, 2009 - 2011. No total foram utilizadas 32 estações sísmográficas, sendo 9 anos de aquisição de dados. A Figura 2 apresenta o mapa com a localização das estações na PB.

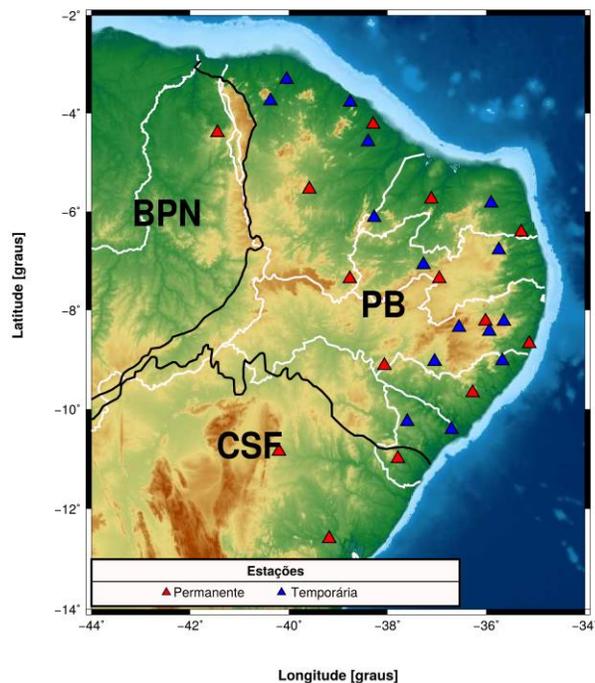


Figura 2 – Área de estudo com a distribuição das estações sísmográficas. Os triângulos vermelhos são as estações permanentes, os triângulos azuis representam as estações temporárias. A linha preta delimita a área da PB.

A seleção dos eventos foi baseada em dois critérios: distância epicentral e a magnitude do evento. Para a magnitude da fase *P* e *PKIKP* utilizamos os valores a

partir de 5.4mb. Considerando estes valores obtemos sinais com amplitudes maiores e mais nítidos para a marcação das fases no sismograma.

As distâncias epicentrais em relação à área de estudo utilizadas foram de 30° a 95° para a onda *P*, enquanto que para a *PKIKP* as distâncias adotadas foram de 150° a 180°. Desta forma, evitamos a zona de sombra e a triplicação de fase, que representa as múltiplas chegadas de ondas ocasionadas pela zona de transição. Para a obtenção dos resultados foram utilizadas 7483 chegadas e 919 eventos da fase *P*, e na fase *PKIKP*, 1968 chegadas e 222 eventos. A Figura 3 ilustra a distância epicentral dos eventos *P* e *PKIKP* em relação à área de estudo.

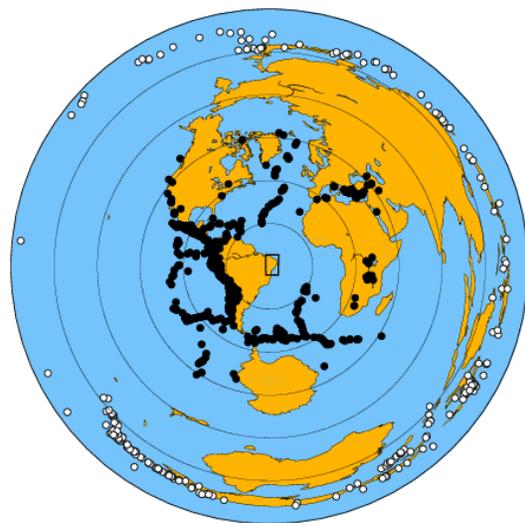


Figura 3 – Distribuição epicentral dos eventos utilizados neste trabalho. Os pontos pretos representam os eventos de ondas *P*, os brancos os das fases *PKIKP*, o retângulo de linha preta é a área de estudo, os círculos concêntricos marcam intervalos de distâncias a cada 30°.

Para a parametrização dos dados foi utilizado a interpolação usando *splines* sob tensão em um método tomográfico desenvolvido e implementado por Cline (1981). A Figura 4 apresenta o modelo utilizado na inversão. Tal modelo possui uma grade com 40 nós em profundidade, 75 em latitude e 55 em longitude, atingindo uma profundidade de 700 km.

Esta grade possui nós com densidades e espaçamentos diferentes, que tendem a aumentar em direção à borda e em profundidade. Segundo Rocha (2008), isto possibilita amortecer suavemente as perturbações tridimensionais de vagarosidade e suas derivadas até zero nas extremidades do modelo, a partir disso obtém-se a estabilidade no traçamento tridimensional de raios.

A parametrização do modelo estende-se para fora da área das estações, a fim de minimizar o mapeamento de ruído e inconsistências, como estruturas irrealistas para o centro da área. Os valores de inversão utilizados foram

baseados nos mesmos parâmetros utilizados em estudos anteriores (VANDECAR, 1991; ESCALANTE, 2002; ROCHA, 2003; ROCHA, 2008; AZEVEDO, 2013; ROCHA et al., 2016; AZEVEDO, 2017). De acordo com a curva *Root Mean Square* (RMS), definimos a oitava iteração para os nossos resultados finais, pois a partir desta iteração não obtivemos resultados com mudanças significativas no ajuste do modelo final.

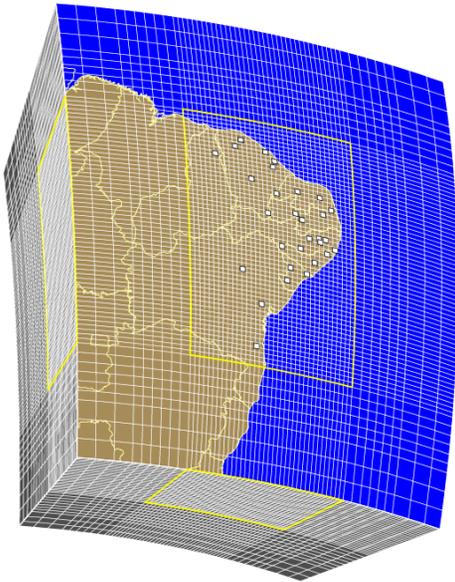


Figura 4 – Modelo parametrizado utilizado na inversão. Os quadrados brancos representam as estações utilizadas. O retângulo amarelo delimita a área de melhor resolução.

Resultados

As perturbações de velocidade encontradas são baseadas no modelo médio de velocidade da Terra IASP91 (KENNETT; ENGDahl, 1991; ENGDahl; HILST; BERROCAL, 1995), sendo apresentadas em mapas horizontais e perfis verticais com profundidade de 75km até 700km. Na Figura 5 é apresentada a tomografia para a profundidade de 200km. As linhas retas brancas representam os perfis verticais $x - x'$ e $w - w'$, as cores em azul representam anomalias de baixa velocidade, e as vermelhas representam as de alta velocidade.

A Figura 6 apresenta o perfil vertical $x - x'$, que corta a região da Borborema no sentido sul – nordeste, passando pelas anomalias de alta velocidade no sul da PB e pela anomalia de baixa velocidade no centro da PB, ilustrado na Figura 5. O perfil compreende uma profundidade de 75km até 700km. Neste observamos três anomalias de forma clara, sendo que as anomalias que estão dentro da região da PB possuem maior nitidez.

Neste perfil, a anomalia de baixa velocidade estende-se até uma profundidade de 300km. Já as anomalias de alta velocidade dentro da PB compreende uma extensão mais

profunda, atingindo 400km de extensão, ambientes que coincidem em superfície com o embasamento da PB e CSF (OLIVEIRA, 2008; AZEVEDO, 2017).

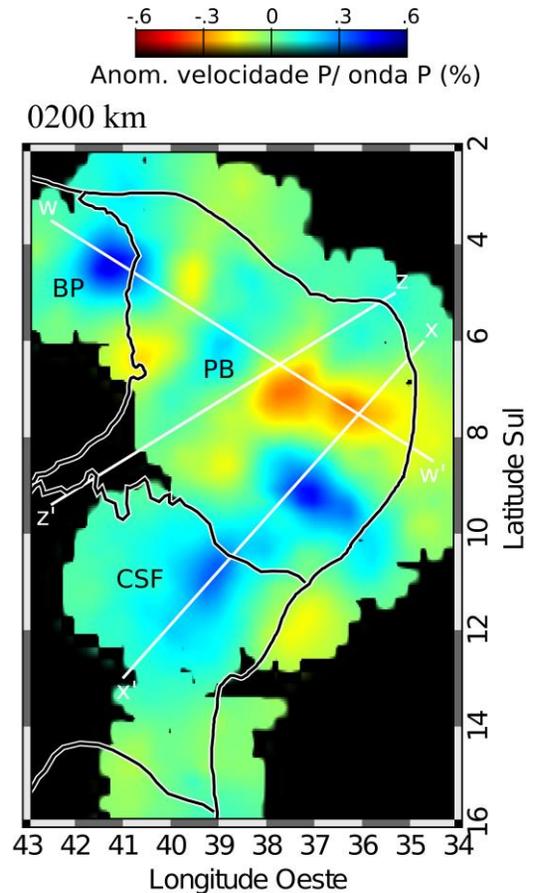


Figura 5 - Imagem tomográfica horizontal com uma profundidade de 200km. As linhas retas brancas representam os perfis verticais apresentados nas Figuras 6 e 7.

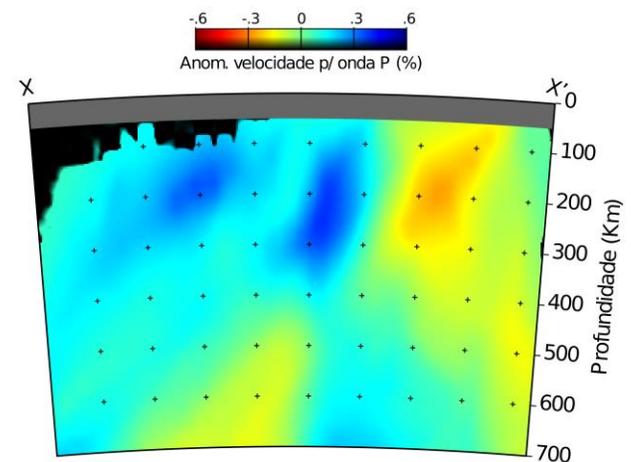


Figura 6 – Perfil vertical $x - x'$, indicado na Figura 5. As anomalias de alta velocidade são representadas pela cor azul e as anomalias de baixa velocidade pela cor amarela.

O perfil $w - w'$ apresentado na Figura 7, corta a PB no sentido sudeste – noroeste, passando pela anomalia de baixa velocidade no centro da PB e pela anomalia de alta velocidade que faz limite com a PB e a BPN. Neste perfil vertical obtemos uma imagem nítida, apresentando duas anomalias de baixa velocidade na PB que parecem ser bem próximas e com geometria horizontal bem definida. As estruturas estendem-se de 75km até 350km em profundidade.

Nossos resultados em relação a estas estruturas foram melhores delimitados em comparação com os resultados de Azevedo (2017). Estas anomalias coincidem em superfície com a localização do Planalto da Borborema.

A anomalia de alta velocidade no noroeste é bem clara em toda a sua extensão, iniciando em 75km até 700km que é o limite do nosso perfil, encontrando-se dentro dos limites da BPN. Esta anomalia também coincide com ambientes de embasamento na PB e BPN, mostrando que nossos resultados encontram-se coerentes com os trabalhos de Oliveira (2008), Azevedo (2017) e Neto (2018).

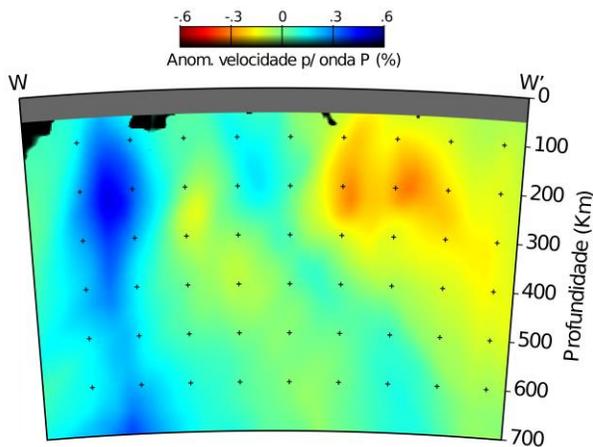


Figura 7 – Perfil vertical $w - w'$, indicado na Figura 5. As anomalias de alta velocidade estão representadas pela cor azul e as anomalias de baixa velocidade pela cor amarela.

Para realizarmos uma análise quantitativa das regiões em que ocorreram as maiores quantidades de sismos, utilizou-se o método de agrupamento *K-means* (STUART, 1982). Este método particiona um conjunto de dados em *k*-grupos com base em uma medida de similaridade. Neste trabalho, adotou-se a quantidade de *clusters* igual 4. A partir da aplicação deste método de aprendizagem de máquina sobre o conjunto de dados, obtemos o resultado que indica as regiões em que ocorreram as maiores quantidades de sismos, conforme mostrado na Figura 8. O agrupamento dos sismos em regiões foi efetuado por meio da associação dos sismos aos centróides mais próximos. Uma vez formado os agrupamentos, calcula-se os centróides dentre os sismos de sua própria região, e os sismos são alocados para o centróide mais próximo. Este procedimento é repetido até que não haja mais alterações nas regiões.

A Figura 8 mostra a área de estudo com a distribuição dos sismos ocorridos no período de 1992 - 2018, obtida por meio da aplicação do método *K-means* com *k* igual a 4. O modelo obtido visa resumir a interpretação da distribuição dos sismos, que aparentemente mostra-se com uma disposição homogênea dentro da área de estudo. A partir do resultado, verifica-se que há quatro regiões com maiores probabilidades de ocorrências de sismos, determinados pela cor verde com 168 eventos, lilás com 141 eventos, a amarela apresenta em seu grupo 74 sismos e a azul com 24 eventos.

A região com sismos em amarelo encontra-se na porção sudeste da PB, os quais concentram-se principalmente na região litorânea. Os sismos em verdes estão concentrados na porção nordeste da Província, que representa a área com maior número de eventos registrados. Dentre estes, destacam-se os três de maiores magnitudes catalogados na Província. Na porção norte da PB, destaca-se a região com o segundo maior número de eventos catalogados. Na porção sul da PB temos os sismos em azul com menor concentração, e mostrando-se distribuídos de forma dispersa dentro da PB e do Cráton são Francisco.

Vale destacar que os três ambientes com maiores concentrações de sismos (verde, lilás e amarelo) são ambientes que segundo Neto (2018) e Luz et al. (2015) são áreas que possuem os menores valores de espessura da crosta continental, e que também apresentam afinamento litosférico por tração expressiva da crosta ocorridos no período Proterozóico.

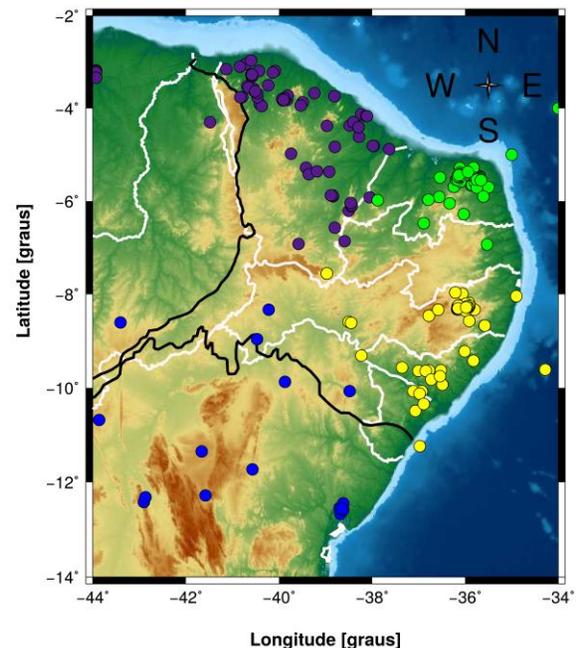


Figura 8 – Sismos agrupados pelo método *K-means*, sismos verde, lilás, amarelo e azul, com 168, 141, 74 e 24 eventos respectivamente. O catálogo de dados utilizado foi o do Centro Sismológico da Universidade de São Paulo.

Comparando os dados obtidos pelo método *K-means* com os resultados de tomografia temos a região com distribuição de sismos em lilás o Lineamento Transbrasiliiano, uma zona sísmica ativa, e que em profundidade apresenta uma anomalia de alta velocidade.

Na região com sismos verdes e amarelos temos áreas que apresentam uma relação direta com os resultados do trabalho de Hamza e Muñoz (1996), ambientes que em profundidade apresentam altos valores de fluxo térmico, que se comparado com nossos resultados tomográficos apresentam anomalias de baixa velocidade, além de estarem localizadas em porção litorânea com características de afinamento da crosta continental e da litosfera.

Conclusão

Na parte central, sul e norte da área de estudo, as tomografias indicam diferentes tipos de estruturas. As anomalias encontradas possuem boa correlação com estruturas presentes na crosta superior e inferior da PB, como apresentado por Luz et al., (2015). As anomalias de baixa velocidade no centro da PB apresentam-se como duas estruturas próximas e distintas, pois acreditava-se tratar de uma única estrutura. Com isso, este trabalho apresenta um melhor resultado em relação à Azevedo (2017) e corrobora os resultados apresentados por Neto (2018).

Uma importante contribuição deste trabalho está na forma de realizar o agrupamento dos eventos sísmicos por meio do método *K-means*. Os resultados mostraram que a Província possuem três áreas com maiores probabilidade de ocorrência de sismos, sendo portanto as regiões litorâneas. Estas áreas estão relacionadas com ambientes que possuem tração expressiva da crosta, ou seja, é a região da PB que possui a crosta mais fina em relação às demais áreas da Província. Outra característica desta área é o alto fluxo térmico em profundidade litosférica.

Vale destacar que as áreas de *clusters* estão entre as estruturas tomográficas de alta e baixa velocidade, desta forma acreditamos que as dinâmicas ocorridas na litosfera e conseqüentemente refletidas na crosta podem ser fatores ligados aos sismos ocorridos na PB, além das características de crosta e fluxo térmico. Para trabalhos futuros, pretende-se realizar testes sintéticos a fim de testar a geometria das estruturas, bem como utilizar o método de agrupamento *X-means* para realizar a partição dos sismos em regiões.

Agradecimentos

Agradeço a Sociedade Brasileira de Geofísica pela bolsa de iniciação científica concedida.

A Rede Sismográfica Brasileira, pela disponibilização dos dados.

Ao Laboratório de Estudos Sísmicos e Sismológicos da Amazônia (LESSAM), pelo espaço concedido para a realização deste trabalho.

A Pró-Reitoria de Ensino de Graduação pela bolsa de mobilidade acadêmica temporária nacional concedida, sendo de fundamental importância para a conclusão de parte deste trabalho.

Referências

ALMEIDA, Y. B.; JULIÁ, J.; FRASSETTO, A. Crustal architecture of the Borborema province, ne brazil, from receiver function ccp stacks: Implications for mesozoic stretching and cenozoic uplift. *Tectonophysics*, v. 25, n. 649, p. 68–80, 2015.

ASSUMPÇÃO, M. et al. *Intraplate Seismicity in Brazil*. In: P. Talwani (ed.) *Intraplate Earthquakes*. Intraplate earthquakes. Cambridge U.P.: Cambridge, 2014. 50-71 p. ISBN 978-1-107-04038-0.

AZEVEDO, P. A. de. *Estudo do manto superior sob o Brasil Central utilizando tomografia sísmica de tempo de percurso*. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) — Instituto de Geociências - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

AZEVEDO, P. A. de. *Estudo do manto superior sob o Brasil utilizando tomografia sísmica de tempo de percurso com ondas P*. 130 f. Tese (Doutorado em Geociências) — Instituto de Geociências - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

BERROCAL, J. et al. Sismicidade do brasil. *IAG/USP-CNEM*, n. 320, 1984.

BEZERRA, F. H. R. et al. O evento cariris velhos na província borborema: Integração de dados, implicações e perspectivas. *Tectonophysics*, n. 510, p. 269–290, 2011.

CLINE, A. K. Fitpack - sac availability for the iris community, incorporated institutions for seismology data management center electronic newsletter. Department of Computer Sciences, University of Texas, Austin, 1981.

ESCALANTE, C. *Tomografia sísmica do manto superior sob o sudeste e centro oeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Geofísica) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, SP, 2002.

ENGDAHL, E.; HILST, R. D. Van-der; BERROCAL, J. Imaging of subducted lithosphere beneath south america. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 22, n. 16, p. 2317–2320, 1995.

FERREIRA, J. M. et al. Superposition of local and regional stresses in ne brazil: Evidences from local mechanisms around the potiguar marginal basin. *Geophysical Journal International*, v. 134, n. 2, p. 341–355, Aug 1998. ISSN 0956-540X.

HAMZA, V. M.; MUÑOZ, M. Heat flow map of south america. *Geothermics*, n. 25, p. 599–646, 1996. ISSN 0375-6505.

KENNETT, B. L. N.; ENGDAHL, E. R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press, v. 105, n. 2, p. 429–465, 1991.

Luz R.; Julià J.; Nascimento A. F. Crustal structure of the eastern Borborema Province, NE Brazil, from the joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion: Implications for plateau uplift, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, vol. 120, p. 3848.

NETO, F. de L. S. *Estrutura do manto superior sob a Província Borborema através de tomografia telessísmica de onda P: implicações para o soerguimento, vulcanismo intraplaca e abertura do Atlântico Equatorial*. 174 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, RN, 2018.

OLIVEIRA, P. H. S. et al. Influence of the continental margin on the stress field and seismicity in the intraplate acaráú seismic zone, ne brazil. *Geophysical Journal International*, v. 202, n. 3, p. 25–34, 2015.

OLIVEIRA, R. G. de. *Arcabouço Geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)*. 415 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, RN, 2008.

ROCHA, M. P. et al. Causes of intraplate seismicity in central brazil from travel time seismic tomography. *Tectonophysics*, n. 680, p. 1–7, 2016.

ROCHA, M. P. *Tomografia sísmica com ondas P e S para o estudo do manto superior do Brasil*. 00 f. Tese (Doutorado em Geofísica) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, SP, 2008.

ROCHA, M. P.; ASSUMPÇÃO, M. Tomografia sísmica do manto superior no se do brasil utilizando ondas p. In: *8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. 2003.

STUART P. L. Least squares quantization in pcm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28:129-137, 1982.

VANDECAR, J. *Upper mantle structure of the Cascadia subduction zone from nonlinear teleseismic travel time inversion*. 165 f. Tese (PhD) — Carnegie Institution for Science Department of Terrestrial Magnetism, University of Washington, 1991.

ZOBACK M. L. & ZOBACK, M. *Lithosphere Stress and Deformation*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 255-271 p.