

## Sismicidade na Zona Sísmica Acaraú, região nordeste do Brasil, entre 2008 e 2018

Paulo Henrique Sousa de Oliveira<sup>1</sup>, Joaquim Mendes Ferreira<sup>2</sup>, Francisco Hilário Rego Bezerra<sup>2</sup>, Aderson Farias do Nascimento<sup>2</sup>

1-Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

2-Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica/Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

A Zona Sísmica Acaraú (ZSA) está localizada na margem noroeste da Província Borborema. Com relatos de eventos ocorridos no século XIX e a numerosa, intensa e recente sismicidade nos últimos 30 anos (1988-2018), a ZSA tornou-se uma das principais regiões com sismicidade ativa no Brasil. Em 2008, uma intensa atividade sísmica abalou a população de Sobral com um evento atingindo 4,2  $m_b$ . Em 2009, foi registrada outra grande atividade em Santana do Acaraú (54 km de Sobral). De 2015 até o momento, a cidade de Irauçuba (70 km de Sobral), vem sendo fortemente abalada. Com as redes sismográficas locais instaladas nestes locais, foi possível observar que a sismicidade na ZSA vem crescendo de forma intensa e numerosa nos últimos 10 anos e que não apresenta correlação com o lineamento transbrasiliiano, mas que em alguns locais, está correlacionada com estruturas locais em superfície.

### Introdução

A ZSA – Zona Sísmica Acaraú (Oliveira et al., 2015) é uma das principais áreas sísmicas ativas do Brasil e possui sismicidade intraplaca desde o século XIX (Ferreira & Assumpção, 1983), como mostrado na Figura 01. Além disso, está localizada na Província Borborema entre dois domínios geotectônicos: o Domínio Médio Coreá e o Domínio Ceará Central (Santos et al. 2008). Esses domínios possuem diversas unidades litoestratigráficas e várias zonas de cisalhamento com trend NE-SW, destacando-se o LT – Lineamento Transbrasiliiano (Figura 02), uma extensa faixa milonítica que se estende para nordeste, até a África Ocidental (falha de Kandi), e para sudoeste, até a região central do Brasil (Caby & Arthaud 1986).

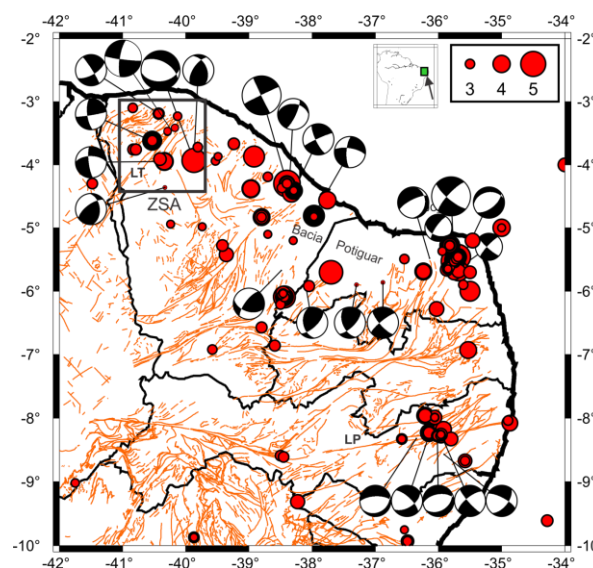


Figura 01 – Sismicidade na Província Borborema entre 1720 e 2013 com magnitudes acima de 2,5 mostrando a Zona Sísmica Acaraú (quadrado na parte superior esquerda). As “bolas de praia” representam mecanismos focais. LT e LP representam os Lineamentos Transbrasiliiano e Pernambuco, respectivamente. Os traços laranjas são falhas mapeadas (CPRM, 2009) e o quadrado indica a área de estudo. Fonte: Boletim Sísmico Brasileiro (USP, UFRN, UnB, IPT, UNESP).

Neste trabalho é mostrado como a sismicidade na ZSA vem ocorrendo nos últimos 10 anos através das redes sismográficas com estações digitais instaladas em três locais. Local 1: Serra da Meruoca, Sobral; Local 2: Santana do Acaraú e Local 3: Irauçuba (Menezes, 2017). Os melhores sismos foram selecionados para calcular parâmetros hipocentrais e de falhamento, possibilitando analisar como vem ocorrendo a sismicidade e possível correlação com feições geológicas locais.

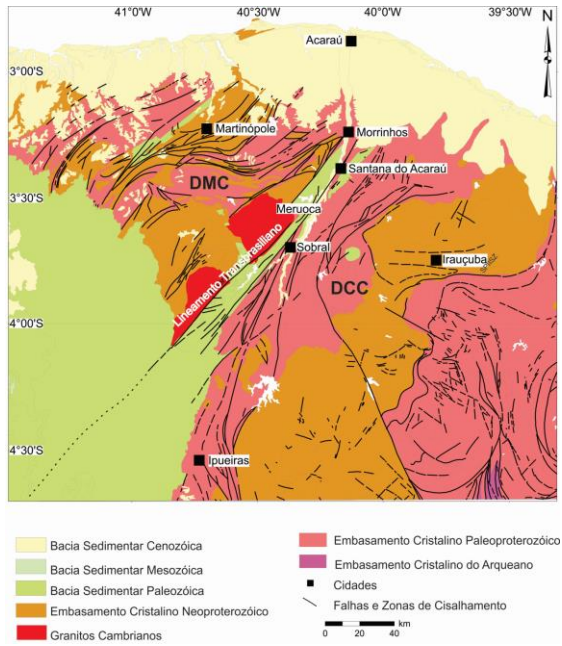


Figura 02 – Mapa geológico da área de estudo. DMC – Domínio Médio Coreau e DCC – Domínio Ceará Central. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo - Programa Geologia do Brasil, CPRM, Brasília, 2004.

### Metodologia

Os sismos analisados foram registrados, no mínimo, em três estações de cada rede sismográfica local. A leitura dos tempos de chegada e das polaridades das ondas P e S, foram realizadas com o auxílio do Programa SAC – Seismic Analysis Code (Tapley & Tull, 1991). Os epicentros, hipocentros e o modelo de velocidade foram determinados com o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975). Para determinar os parâmetros do modelo de crosta utilizado, inicialmente foi necessário encontrar um conjunto confiável de dados utilizando o diagrama de Wadati (Kissinger & Engdahl, 1973), de forma conjunta. Sobre tais parâmetros, adotamos que a velocidade da onda P ( $V_P$ ) e a razão  $k=V_P/V_S$  são consideradas constantes. As relocações hipocentrais foram realizadas com auxílio do programa HYPODD, com o objetivo de melhorar a precisão na localização hipocentral (Waldhauser & Ellsworth, 2000) e para os mecanismos focais, foi utilizado o programa PFFIT (Reasenberg & Oppenheimer 1985), considerando o primeiro movimento da onda P. Foram utilizadas somente as polaridades das ondas P com 100% de confiança e bem distribuídas (qualidade C1, como classificado por Assumpção et al., 2016). Como as estações sismográficas estão instaladas sobre embasamento Pré – Cambriano, constituído de rochas consolidadas e de baixa atenuação, observamos as chegadas das ondas P e S bem definidas nos sismogramas (Figura 03).

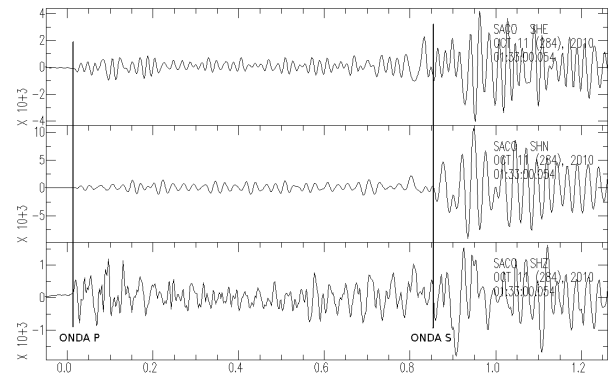


Figura 03 – Sismograma de um evento registrado na ZSA, mostrando as chegadas das ondas P e S bem claras. SHZ é a componente vertical, SHN a componente norte/sul e SHE a componente leste/oeste.

### Redes sismográficas

#### Local 1

Nesta rede foram utilizados equipamentos do Laboratório de Estudos Litosféricos da UnB e estações de período curto do Projeto do Milênio e foi constituída de equipamentos fabricados pela Geotech Instruments, LCC, com estações providas de sismômetros de período curto (short period, SP), modelo S13J (com componentes: vertical, N-S e E-W), e de sismômetros de banda larga (broadband, BB), modelo KS2000M, tri-axial. Os sinais foram digitalizados pelo registrador SMART-24 (R) com três canais e 24bits.

#### Local 2

Esta rede foi composta por 6 estações digitais, com equipamentos pertencentes ao Pool de Equipamentos Geofísicos do Brasil (PEGBr), sediado no Observatório Nacional e com financiamento da PETROBRAS. Cada estação era composta por um sensor triaxial de período curto L4A (Sercel) e um registrador DAS 130 (Reftek). Esta rede operou entre dezembro de 2009 e dezembro de 2010 e registrou arquivos em contínuo, com taxa de amostragem de 100 amostras/s, com cada registro possuindo uma hora de duração.

#### Local 3

A rede composta neste local foi composta de sensores S-13 com frequência natural de 1hz, com registrador SMART 24 de 3 canais e 24 bits e operou entre setembro de 2015 e março de 2016, registrando com taxa de amostragem de 500 amostras/s (Menezes, 2017).

### Resultados e Discussão

Para assegurar qualidade nos resultados e na determinação do modelo de velocidades local, foi escolhido dados consistentes de leituras das ondas P e S utilizando o diagrama de Wadati. Os modelos de velocidades obtidos foram: Local 1, com  $V_P=6,0$  km/s e  $V_P/V_S = 1,709 (\pm 0,001)$ ; Local 2 com  $V_P=6,0$  km/s e  $V_P/V_S$

= 1,701 ( $\pm 0,004$ ) e Local 3 com  $V_p=6,2$  km/s e  $V_p/V_s = 1,691$  ( $\pm 0,005$ ), conforme Menezes, 2017. Os sismos na ZSA estão confinados na crosta superior e raramente ultrapassam profundidades hipocentrais maiores que 10 km. Nos Locais 1 e 2, duas falhas sismogênicas foram identificadas: a Falha Riacho Fundo (FRF) e a Falha Santana (FS). Essas falhas surgiram através da liberação de esforços tectônicos orientados na direção NW-SE (SHmax) e na direção NE-SW (SHmin) e estão nas proximidades de uma importante feição geológica: o Lineamento Transbrasiliano e teve predominância de mecanismos com falhamentos tranccorrentes, sendo que este é o tipo de falhamento que predomina no Nordeste do Brasil (Ferreira et al., 1998). No Local 3, os hipocentros mais rasos estão a 8 km, os mais profundos a 9 km e o mecanismo focal mostrou falhamento normal (Menezes, 2017). A orientação da Falha Riacho coincide com as anomalias magnéticas no granito Meruoca e em seu embasamento (Moura et al., 2014). Há poucos casos como esse no mundo, como exemplo, na falha Hosgri, na costa central da Califórnia (Hardbeck, 2010) e na sismicidade de Caraíbas-Itacambi, em Minas Gerais (Chimpliganond et al., 2010). Este tipo de relação entre sismicidade intraplaca e anomalias magnéticas podem representar um indicador da possibilidade de ocorrência de atividade sísmica (Oliveira et al., 2015). Oliveira et al., 2015 calculou o esforço compressional máximo ( $\sigma_1$ ) para a ZSA e mostrou que ele está orientado na direção NW-SE e o esforço compressional mínimo ( $\sigma_3$ ) está na direção NE-SW, utilizando os mecanismos focais encontrados nos Locais 1 e 2. Esses resultados mostram como está o regime de esforços atual na Zona Sísmica Acaraú com  $\sigma_1$  orientado paralelamente à margem passiva e  $\sigma_3$  perpendicular à costa na parte noroeste da Província Borborema. Segundo Oliveira et al., 2015, os esforços nessas direções estão associados à superposição do esforço tectônico regional (devido à compressão da cordilheira meso-ocêânica e dos Andes) com esforços tectônicos locais (devido à margem continental passiva). É necessário calcular os novos parâmetros do esforço tectônico com o mecanismo focal encontrado para o Local 3.

## Conclusões

Através das análises detalhadas dos melhores eventos localizados na ZSA nos últimos dez anos, foi possível identificar falhas sismogênicas ativas. A sismicidade tem uma considerável proximidade do Lineamento Transbrasiliano, está confinada na crosta superior e raramente ultrapassa profundidades hipocentrais maiores que 10 km. Apesar dessa proximidade, não podemos afirmar que a sismicidade da ZSA nos últimos 10 anos, ocorreu devido à uma possível reativação do Lineamento Transbrasiliano. É muito difícil encontrar correlação entre sismicidade e reativações de zonas de cisalhamento, especialmente com o Lineamento Transbrasiliano (Oliveira et al., (2010); Moura et al., (2014)). Situação diferente é observada nas proximidades do Lineamento Pernambuco, pois Ferreira et al., 2008, Lima Neto et al., 2013 e Lopes et al., 2010 mostraram que a sismicidade ocorrida foi gerada pela a reativação dessa estrutura.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos do LabSIs pela instalação, operação e manutenção da rede de estações localizadas na Zona Sísmica Acaraú, ao INCT-ET pelos recursos financeiros e ao PEGBr pelos equipamentos de última geração utilizados.

## Referências

- ASSUMPTÃO, M., DIAS, F.L., ZEVALLOS, I & NALIBOFF, J.B., 2016. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms, *J. South. Am. Earth.*, 71, 278-295.
- BEZERRA, F.H.R., DO NASCIMENTO, A.F., FERREIRA, J.M., NOGUEIRA, F.C., FUCK, R.A., BRITO NEVES, B.B., SOUZA, M.O.L., 2011. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America — Integration of seismological and paleoseismological data, *Tectonophysics*.
- CABY, R. & ARTHAUD, M.H., 1986. Major Precambrian nappes of the Brazilian Belts, Ceará, Northeast Brazil. *Geol.*, 14, 871–874.
- CPRM (Brazilian Geological Survey), 2009. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará. Programa Geologia do Brasil (PGB). MME, SGM, 1, pp. 300.
- CHIMPLIGANOND, C., ASSUMPTÃO, M., VON HUELSEN, M. & FRANÇAS, G. S., 2010. The intracratonic Caraíbas-Itacambi earthquake of December 09, 2010 (4.9  $m_b$ ), Minas Gerais state, Brazil, *Tectonophys.*, 480, 48–56.
- FERREIRA, J.M. & ASSUMPTÃO, M., 1983. Sismicidade do Nordeste do Brasil, *Rev. Bras. Geof.*, 1, 67–88.
- FERREIRA, J.M., OLIVEIRA, R.T., TAKEYA, M.K. & ASSUMPTÃO, M., 1998. Superposition of local and regional stress in northeast Brazil: evidence from focal mechanism around the Potiguar marginal basin. *Geophys. J. Int.*, 134: 341-355.
- HARDEBECK, J.L., 2010. Seismotectonic and Fault Structure of the California Central Coast. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 1031–1050.
- KISSLINGER, C. & ENGDahl, E.R., 1973. The interpretation of the Wadati diagram with relaxed assumptions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 63: 1723-1736.
- LEE, W.H.K. & LAHR, J.C., 1975. HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 75-311, 114 pp.
- LEE, W.H.K., STEWART, S.W., 1981. Principles and Applications of Microearthquake Networks. Academic Press, Inc (London), LTD.
- LIMA NETO, H.C., FERREIRA, J.M., BEZERRA., F.H.R., ASSUMPTÃO, M., DO NASCIMENTO, A.F., SOUSA,

M.O.L. & MENEZES, E.A.S., 2013. Upper crustal earthquake swarms in São Caetano: Reactivation of the Pernambuco shear zone and trending branches in intraplate Brazil, *Tectonophys.*, 633, 211–220.

LIMA NETO, H.C., FERREIRA, J.M., BEZERRA., F.H.R., ASSUMPÇÃO, M., DO NASCIMENTO, A.F., SOUSA, M.O.L. & MENEZES, E.A.S., 2014. Earthquake sequences in the southern block of the Pernambuco Lineament, NE Brazil: Stress field and seismotectonic implications, *Tectonophys.*, 608, 804–811.

LOPES, A.E.V., ASSUMPÇÃO, M., DO NASCIMENTO, A.F., FERREIRA, J.M., MENEZES, E.A.S. & BARBOSA, J.R., 2010. Intraplate earthquake swarm in Belo Jardim, NE Brazil: reactivation of a major Neoproterozoic shear zone (Pernambuco Lineament), *Geophys. J. Int.*, 180, 1303–1312.

MENEZES, E.A.S., 2017. Estudo da atividade sísmica em Irauçuba – CE entre setembro de 2015 a março de 2016. Dissertação de mestrado. PPGG/UFRN. 76 p.

MOURA, A.C.A., OLIVEIRA, P.H.S., FERREIRA, J.M., BEZERRA, F.H.R., FUCK, R.A. & DO NASCIMENTO, A.F., 2014. Seismogenic faulting in the Meruoca granite, NE Brazil, consistent with a local weak fracture zone, *Annals of the Braz. Acad. of Sci.*, 86 (4), 1631–1639.

OLIVEIRA, P.H.S., FERREIRA, J.M., DO NASCIMENTO, A.F., BEZERRA, F.H.R., SOARES, J.E., FUCK, R.A., 2010. Estudo da Sismicidade na Região de Sobral – CE, NE do Brasil, em 2008. IV Simpósio da Sociedade Brasileira de Geofísica. Brasília – DF.

OLIVEIRA, P.H.S., FERREIRA, J.M., BEZERRA, F.H.R., ASSUMPÇÃO, M., DO NASCIMENTO, A.F., SOUSA, M.O.L. & MENEZES, E.A.S., 2015. Influence of the continental margin on the stress field and seismicity in the intraplate Acaraú Seismic Zone, NE Brazil. *Geophys. J. Int.*, 2015, 202 (3): 25-34.

REASENBERG, P. & D. OPPENHEIMER., 1985. FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, *U. S. Geol. Surv.*, 85–739.

SANTOS, T.J.S., FETTER, A.H, HACKSPACHER, P.C., NOGUEIRA NETO, J.A., 2008. Neoproterozoic Tectonic and Magmatic Episodes in the NW Sector of Borborema Province, NE Brazil, During Assembly of Western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*. 25: 271-284.

TAPLEY W.C. & TULL. J.E., 1991. SAC-Seismic Analysis Code, USER MANUAL. Livermore National Laboratory, 413 pp.

WALDHAUSER, F., ELLSWORTH, W.L., 2000. A Double – Difference Earthquakes Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletim of the Seismological Society of America*. v.90, n.6, pp.1353-1368.