

Análise de escalas de magnitude para eventos sísmicos de estação única: um estudo do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Guilherme Weber Sampaio de Melo¹, Aderson Farias do Nascimento²

¹ Departamento de Física Teórica e Experimental – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

² Departamento de Geofísica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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.

Abstract

The seismic events of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) are recorded by a single station, which presents challenges for a more precise analysis of the events. In this work two scales are used in the analysis of the seismic event of the archipelago: The new IASPEI standard (ML) and the magnitude measured by surface-wave in broadband equipment (M_s_{BB}). A comparative study shows how these two scales are suitable for use in the measurement of the events that occur in the archipelago.

Introdução

A estação sismográfica instalada em 2011 no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPPSP) tem registrado a atividade sísmica decorrente do tectonismo que ocorre entre a placa Sul-americana e a Africana, na região do Atlântico Equatorial. O ASPPSP está localizado nas coordenadas 00° 55.1' N, 29° 20.7' W e é constituído por pequenas ilhas rochosas compostas por peridotitos do manto abissal, que totalizam uma área total de aproximadamente 17.000m², conforme mostra a Figura 01. (Motoki et al., 2009)

A Estação sismográfica é composta por um sensor banda larga e de um acelerômetro e foram adquiridos através de recursos da Marinha do Brasil. Aqui, apresentamos novos resultados do uso de duas escalas de magnitude e comparamos com magnitudes utilizadas pelo NEIC (National Earthquake Information Centre) utilizando 18 eventos. Depois, calculamos a magnitude e a localização epicentral de 189 eventos entre Junho de 2011 e Dezembro de 2014.

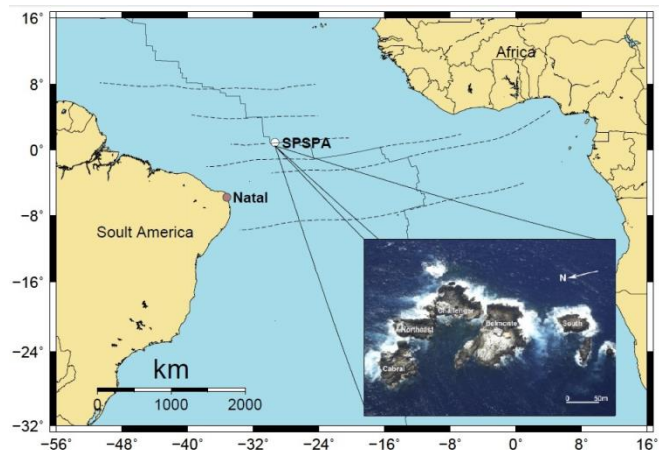


Figura 01 - Na figura é possível visualizar a localização das ilhas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, como também a extensão de algumas falhas transformantes localizadas na crosta oceânica do Atlântico.

Determinação epicentral

A distância entre o evento sísmico e a estação é uma importante característica para o uso na sua localização e também no cálculo da magnitude. Assim, para ser possível identificar a distância epicentral de eventos com focos sísmicos próximos à superfície, como também para calcular a distância hipocentral de eventos mais profundos, adota-se a seguinte equação (Bath, 1979; Havskov e Ottemöller, 2010; Bormann e Wendt, 2012):

$$D = (t_s - t_p) \frac{V_p V_s}{V_p - V_s} \quad (1)$$

Para a obtenção de melhores resultados na localização dos eventos, foram usadas as mesmas velocidades das ondas P e S identificadas por Foulter et al. (2003) para a crosta oceânica do Atlântico Norte, onde $V_p = 6,5$ km/s e $V_s = 3,7$ km/s. Com isso, a equação (1) fica:

$$D = (t_{sg} - t_{pg}) * 8.59 \quad (2)$$

Cuja razão de Poisson $V_p/V_s = 1,757$.

Magnitudes

A magnitude é um importante parâmetro que fornece uma medida da energia liberada em um terremoto. Existem diversas escalas de magnitude e para cada uma delas são necessárias parâmetros específicos, como exemplo a distância epicentral, o tipo onda usada na medição da amplitude e o tipo do aparelho da estação (digital ou analógico). Para o caso do ASPSP, o uso de apenas uma estação não permite fazer uma calibração de magnitude local baseado na atenuação das ondas. Logo, a escolha de uma magnitude apropriada para uso nos sismos locais deve obedecer as seguintes condições:

I – Conter parâmetros para eventos superficiais com curtas distâncias epicentrais, em sua maior parte, entre 10-50km;

II – Ser possível aplica-la em registros de estação digital (banda larga).

A primeira equação a ser aplicada é a magnitude local padrão do IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior), dada por:

$$ML = \log(A) + 1.11 \log(R) + 0.00189 \cdot R - 2.09 \quad (3)$$

em que A é a amplitude do evento em nm medido pelo componente horizontal de um instrumento que seja filtrado para os novos parâmetros de sensor Wood-Anderson (Uhrhammer e Collins, 1990), e R é a distância hipocentral dos eventos, com $R < 1000$ km. (Hutton e Boore, 1987; Bormann, 2012; Bormann e Dewey 2013). Pelo fato dos atuais sismógrafos de banda larga dividirem os registros em três componentes (N-S, E-W e Z), tomamos a média entre os componentes N-S e E-W (Lay e Wallace, 1995) para poder fazer a medição da magnitude com o componente horizontal em apenas uma estação:

$$ML(H) = [ML(E) + ML(N)]/2 \quad (4)$$

sendo ML(E) calculado com o uso da amplitude do componente E-W, e a ML(N) usando o componente N-S.

Uma outra escala de magnitude que pode ser adotada é a chamada Ms_BB, medida pela onda de superfície a partir de equipamentos de banda larga. Apesar de em alguns casos a rede global NEIC usar o Ms_20 para alguns eventos acima de 20° de distância epicentral, e a amplitude máxima com período entre 02 e 20 segundos, a IASPEI adotou uma nova calibração para eventos com distâncias regionais (Vaněk et al., 1992; Bormann and Dewey, 2013). A equação da Ms_BB é dada por:

$$Ms_BB = \log(V_{max}/2\pi) + 1.66 \log_{10}\Delta + 0.3 \quad (5)$$

onde V_{max} é a velocidade do solo em nm/s na ondas S, registrado no componente vertical, com períodos entre 3 e 60 segundos e Δ é a distância epicentral em graus (2°

$< \Delta < 160^\circ$). Essa magnitude foi definida para eventos com profundidade hipocentral menores que 60 km.

Análises e resultados

Uma lista com 18 eventos com mb (body-wave magnitude) entre 4 e 6, ocorridos nas proximidades do arquipélago foi usada para fazer as análises nas medidas. Estes eventos foram registrados tanto na estação ASPSP como também pelo NEIC. A lista completa é apresentada na Tabela 01. A Figura 02 mostra os detalhes do trecho de um sismograma de um desses eventos.

Data	Hora (UTC)	Latitude	Longitude	Magnitude(mb)
23/05/12	17:50:27,000	0.849°N	27.607°W	5,2
09/07/12	15:40:20,000	0.819°N	29.125°W	4,8
28/07/12	16:01:44,000	4.548°N	32.667°W	5,4
28/07/12	16:18:47,000	4.508°N	32.638°W	4,8
09/08/12	08:59:24,000	1.064°S	24.110°W	4,9
31/08/12	00:35:36,000	3.807°N	32.155°W	5,3
03/11/12	12:58:12,000	7.048°N	34.073°W	5,6
11/11/12	08:02:29,000	3.263°N	31.430°W	4,7
03/04/13	05:31:21,000	0.732°N	27.135°W	4,9
15/06/13	20:37:47,000	0.664°N	28.161°W	4,6
14/04/14	07:47:32,000	4.040°N	31.808°W	5,4
24/05/14	08:49:26,000	0.686°N	26.323°W	5,9
01/07/14	20:49:26,000	0.781°N	27.751°W	5,0
07/08/14	19:01:47,000	0.825°N	26.895°W	4,6
08/08/14	00:06:46,000	0.720°N	25.850°W	4,9
10/08/14	12:12:29,000	0.829°N	26.134°W	5,0
13/08/14	13:07:28,000	0.892°N	26.622°W	5,4
15/08/14	16:43:24,000	0.661°N	29.571°W	4,3

Tabela 01 – Na tabela são demonstrados todos os dados referentes a cada um dos 18 eventos usados na pesquisa.

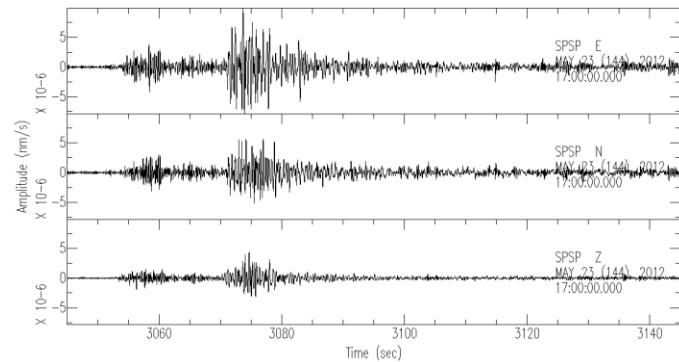


Figura 02 – Sismograma de um forte tremor de mb 5.2 ocorrido dia 23/05/2012. O registro foi feito pela estação do ASPSP a 202,81 Km de distância do epicentro.

➔ Epicentros

Os dados referentes aos eventos da estação do ASPSP foram analisados através do programa SAC (Seismic Analysis Code, (Tapley e Tull, 1991)), onde foram calculados os azimutes e as distâncias epicentrais aplicando os valores de, 9,49 e 8,59 na equação 01. O valor de 9,49 vinha sendo anteriormente utilizado para análise de rotina dos eventos sísmicos e foi obtido de Chulik et al (2013). O valor de 8,59 foi obtido de Fouler et al (2003). A média da distância entre o epicentro calculado e o informado pela NEIC foi de $34,6 \pm 19,5$ km, utilizando 9,49 na equação. Já para as

localizações com 8,59, a média foi de $7,04 \pm 4,40$ km. Ambas as estimativas de localização são mostradas na Figura 03, juntamente com as localizações fornecidas pelo NEIC.

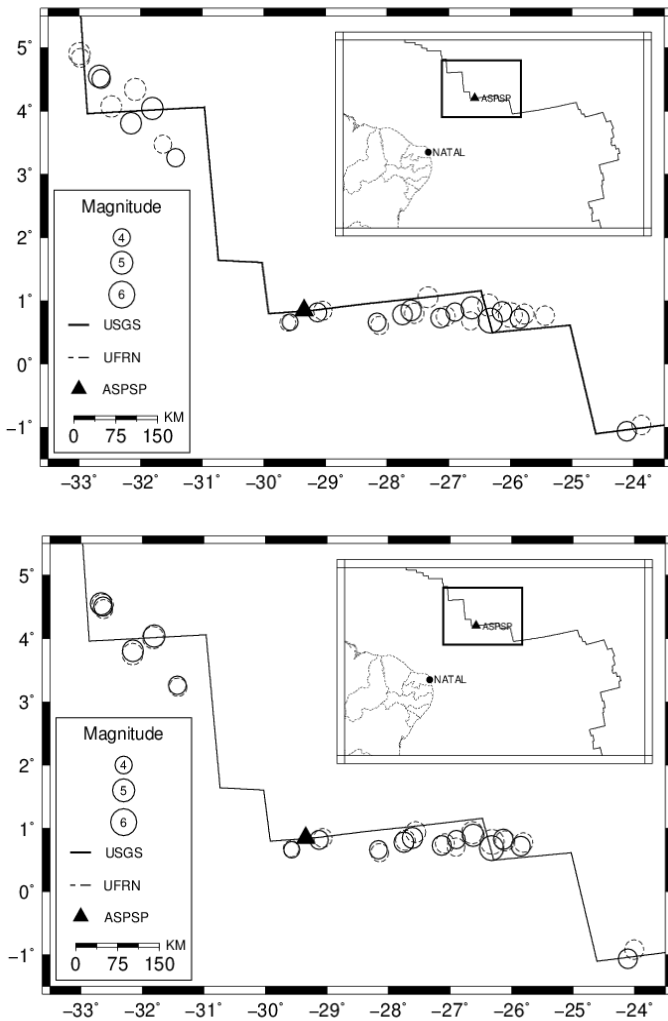


Figura 03 – É possível comparar os 18 eventos entre o registro da rede NEIC como também da estação do ASPSP. No primeiro painel, é mostrado usando a distância epicentral com $K = 1,86$, e no de baixo $K = 1,75$.

➔ Cálculo de ML

As magnitudes dos eventos foram calculadas usando as duas escalas descritas anteriormente com o objetivo de compará-las para avaliar qual mais se adequa aos registros do ASPSP. Para iniciar, com a aplicação da escala ML (Bormann, 2012) no próprio software SAC, foram aplicados os novos parâmetros IASPEI do filtro Wood-Anderson, mostrados na Tabela 02.

Sismógrafo	Zeros	Polos
IASPEI WA	(0,0, 0,0)	(-5.49779, -5.60886)
	(0,0, 0,0)	(-5.49779, 5.60886)

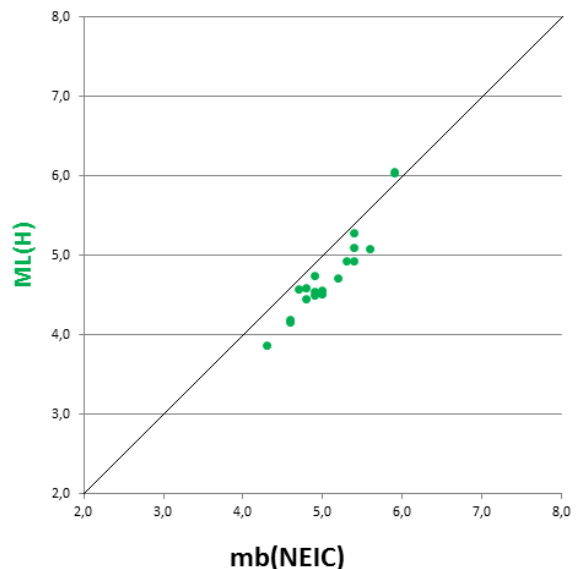
Tabela 02 – A tabela demonstra os novos parâmetros de filtro Wood-Anderson descritos por Uhrhammer and Collins (1990) e Bormann, P (2012)

Assim, ao aplicar os novos valores das amplitudes dos componentes horizontais (Leste-Oeste e Norte-Sul) de cada evento baseados no uso do filtro WA da equação 03 foram geradas magnitudes com valores aproximados aos registrados pela rede NEIC na escala mb, mostrados na Tabela 03.

mb(NEIC)	ML(H)(ASPSP)	Ms_BB(ASPSP)	Ms_BB(NBPV)
5,2	4,7	5,1	5,4
4,8	4,7	4,2	
5,4	5,4	5,5	5,4
4,8	4,6	5,1	4,8
4,9	4,7	5,0	5,0
5,3	4,9	5,0	5,5
5,6	5,1	5,1	5,4
4,7	4,6	4,9	4,7
4,9	4,5	4,6	4,7
4,6	4,2	4,6	4,6
5,4	4,9	5,1	5,6
5,9	6,0	6,2	5,7
5,0	4,5	4,9	5,2
4,6	4,2	4,7	4,9
4,9	4,5	4,7	5,1
5,0	4,5	5,1	5,0
5,4	5,1	5,1	5,5
4,3	4,1	3,6	

Tabela 03 – Os valores calculados tanto em ML como em Ms_BB, na estação do ASPSP e NBPV, são demonstrados na tabela. Os dois em branco os que tenham distância abaixo de 100 kms.

Agora é possível fazer uma comparação entre as duas magnitudes locais e a mb definida pela rede NEIC. Bormann (2012) descreve que dado que os equipamentos atuais possuem registros divididos nos três componentes a ML pode ser definida a partir de qualquer uma das duas componentes horizontais, ou a partir da média entre elas, sendo possível escolher a de melhor resultado. Elas podem ser comparadas como é apresentado na Figura 04. Esta figura mostra dois diferentes gráficos entre ML e mb, sendo um de ML usando a média da Equação 04 (ML(H)), e o outro com a ML dos componentes horizontais separados (ML(E) e ML(N)). Em cada um é exibido uma linha de orientação 1:1 com uma boa aproximação dos valores obtidos nessa escala em relação ao valores da NEIC.



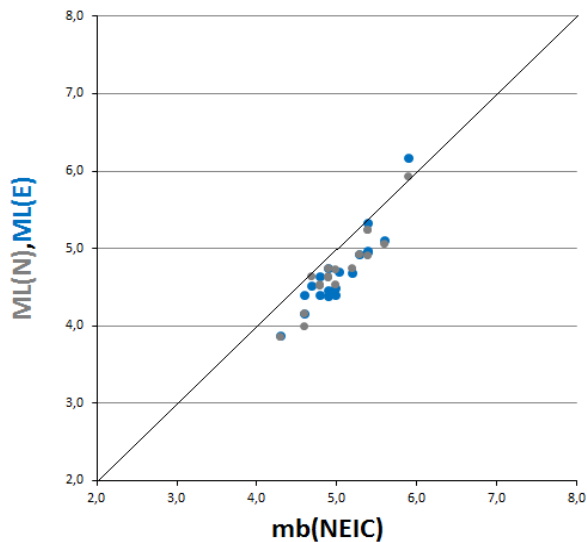


Figura 04 – No primeiro gráfico, de cima para baixo, é possível observar os resultados referentes ao cálculo da ML, baseado na equação (4), onde a média diferencial foi de $\pm 0,3$, sendo a maior parte deles abaixo do valor informado na NEIC. No segundo gráfico, pode-se observar uma comparação entre a magnitude calculada pelo componente Leste-Oeste e o Norte-Sul, sendo praticamente imperceptível.

→ Cálculo de Ms_BB

Para avaliar o uso da Ms_BB, a Equação 05 foi aplicada a todos os 18 registros da Tabela 01 muito embora alguns dos eventos possuem distância epicentral ligeiramente menor que 2° . É importante relatar que para os dois eventos com distância menor que 100 kms, as diferenças entre os resultados das magnitudes calculadas chegavam a ser $>0,5$ entre a Ms_BB e a mb. Ao usar a escala ML para esses eventos, as diferenças nos valores ficaram entre 0,1 e 0,2. Desta maneira, foi feita uma comparação entre as três escalas: Ms_BB, mb da rede global NEIC e ML mostrada anteriormente. Essa diferenciação é apresentada na Figura 05 onde é possível notar que para esses eventos, as magnitudes obtidas com a Equação 05 apresentaram boas aproximações na relação Ms_BB/mb. Excluindo os dois eventos mais próximos, a diferença foi de $\pm 0,2$.

Uma avaliação do uso da escala Ms_BB de 16 registros de eventos do ASPSP foi realizada usando agora a estação NBPV localizada no continente, na latitude e longitude -6.417502 , e -35.290550 , próximo à cidade de Natal. Ao ler as amplitudes dos eventos estudados a partir da estação NBPV, foi verificado que os resultados das magnitudes ficaram mais aproximados aos valores de mb, com diferenciações que na maior parte é igual ou inferior a 0,1. Uma comparação é mostrada na Figura 06, onde é possível identificar que para esse caso a aplicação da magnitude desempenhou-se melhor em relação à linha de orientação 1:1.

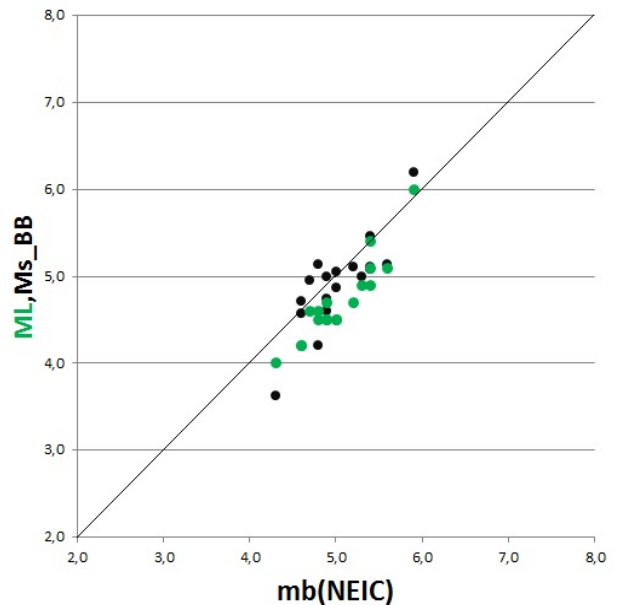


Figura 05 – Em relação ao uso da Ms_BB, os resultados mostram valores cujas diferenças foram ± 0.2 . Os dois eventos Ms_BB nas quais estão ainda menores que ML, onde as distancias eram menos de 100 kms.

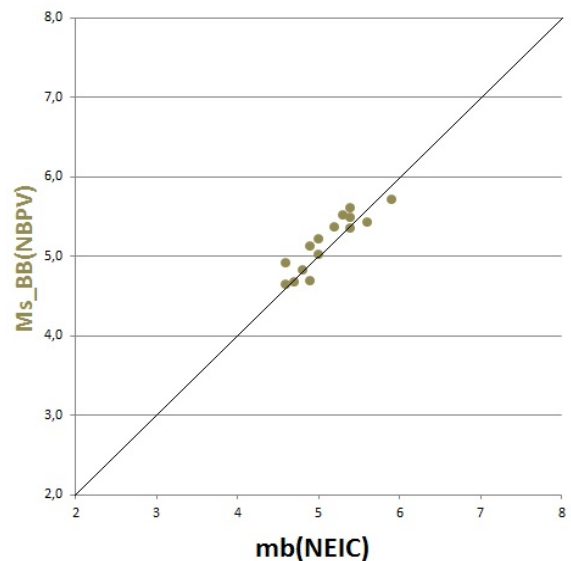


Figura 06 – Observando a figura é possível identificar que na aplicação da Ms_BB para registros da estação NBPV, a média da diferença foi ainda menor comparada do as do ASPSP, sendo de apenas $\pm 0,1$.

Conclusões

Após os estudos aqui apresentados, pode-se verificar que a escolha de qual escala é mais apropriada para esses eventos do Atlântico Central registrados na estação do ASPSP, como em relação as velocidade de ondas adotadas para ele:

1. Através da comparação entre os dois mapas da Figura 04 foi possível verificar que as novas velocidades de P e S mostraram melhores

ajustes em relação às localizações. É possível observar esse resultado pela diferenciação média entre os registros, onde foi de $7,04 \pm 4,40$ km, na qual é comum erros de localizações epicentrais abaixo de 10km.

2. Em relação à escala M_L , foi identificado que apesar de mostrar diferenças de $\pm 0,3$ comparando com a $m_b(\text{NEIC})$, essas diferenças para os eventos com curtas distâncias são menores que as encontradas por M_s_{BB} , nas quais chegam a $\pm 0,5$. Além disso, também foi possível notar que entre os dois componentes horizontais o que mais se adequa nesse caso é o Norte-Sul, já que nele as diferenças foram de $\pm 0,3$, ou seja, 0,1 a menos que o outro componente.
3. O uso de M_s_{BB} ficou adequado para eventos com distâncias próximas ou maiores que 2° do arquipélago, já que na aplicação desta equação para a lista de eventos descrita, a maior parte das diferenças nas magnitudes comparadas com a NEIC foi de apenas 0,2 ou 0,1.
4. Além disso, na medição feita pela estação do continente mostrou-se apropriada para os regionais eventos do Atlântico que foram registrados, como também, para uso nos eventos não detectados pelo NEIC. Como a equação de M_s_{BB} foi utilizada dentro do limite de distância recomendado por Bormann e Dewey (2013), as diferenças encontradas foram de no máximo 0,1.

Agradecimentos

GWSM agradece a bolsa de Iniciação Científica do Programa PIBIC. AFdN agradece ao CNPq por sua bolsa de produtividade e ao Projeto SISMOMAR (CNPq, processo 402274/2013-0) e à Marinha da Brasil.

Ao Prof. Peter Bormann (in memoriam), pelos seus grandes incentivos, ensinamentos e sugestões durante as pesquisas deste trabalho enquanto manteve-se em Natal. Seus legados ficaram conosco para sempre.

Referências

Báth, M. (1979). Introduction to seismology. Birkhauser Verlag, Basel, 428 pp.

Bormann, P. (Ed) (2012). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2; <http://nmsop.gfz-potsdam.de>

Bormann, P. and Dewey, J. W. (2013). IS 3.3: The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. In P. Bormann (Ed.) (2012), <http://nmsop.gfz-potsdam.de>, 35 pp.

Bormann, P., and Wendt, S. (2012). EX 11.2: Earthquake location at teleseismic distances from 3-component records (Tutorial with exercise by hand). 18 pp.; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_11.2.

Chulick, G., Detweiler, S and Mooney, W. D. (2013). Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins. Journal of South American Earth Sciences, vol.42: 260-276.

Folger, G. R., Duz, Z., and Julians, B. R. (2003) . Islandic-type crust. Geophys. J. Int. 155, 567–590.

Havskov, J., and Ottemöller, L. (2010). Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software, Springer (May 25, 2010), ISBN-10: 904818696X, ISBN-13: 978-9048186969.

Hutton, L. K., and Boore, D. M. (1987). The M_L scale in southern California. Bull. Seism. Soc. Am., 77, 2074-2094.

Lay, T., and Wallace, T. C. (1995). Modern global seismology. ISBN 0-12-732870-X, Academic Press, 521 pp.

Melo, G. W. S., Nascimento, A. F., Ferreira, J. M., Spinelli, R., Menezes, E. A., da Costa, N. P. (2014). A sismicidade da falha transformante de São Paulo, no Atlântico Equatorial, e a consistência com o soerguimento do Arquipélago de S. Pedro e S. Paulo. In: V Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2014, Porto Alegre. RS, 2014.

Motoki, A., Sichel, S. E., Campos., T. F. C., Srivastava., N. K and Soares, R. (2009). Taxa de soerguimento atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial. Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, Brasil, vol. 62: 331-342.

Tapley W.C. and Tull, J.E. (1991). SAC - Seismic Analysis Code. USER MANUAL, Livermore National Laboratory, 413 pp.

Uhrhammer, R. A, and Collins, E. R. (1990). Synthesis of Wood-Anderson seismograms from broadband digital records Bull. Seism. Soc. Am., 80, 702-716 .

Vaněk, J., Zapotek, A., Karnik, V., Kondorskaya, N.V., Riznichenko, Yu.V., Savarensky, E.F., Solov'yov, S.L., and Shebalin, N.V. (1962). Standardization of magnitude scales. *Izvestiya Akad. SSSR., Ser. Geofiz.*, 2, 153-158 (108-111 in the English translation).