



Contribuições para estudos de sismicidade na Região Sudeste do Brasil

Sabrina Pierobou*, Jesus Berrocal & Celia Fernandes, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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 project studies with detail earthquakes occurred in Southeastern Brazilian Region with the aim of improving the precision of hypocentral location and adding new very small magnitude seismic events to the catalogue published in the *Boletim Sísmico Brasileiro (BSB)*. It is described the methodology to relocate the BSB epicenters and to locate the epicenters of small local earthquakes recorded in at least one triaxial seismograph.

Another important aspect of this project is the exercise to demonstrate the possibility of using seismic velocity data recorded in digital format, to obtain acceleration spectra to develop an attenuation function for Southeastern Region of Brazil. To do this there were used earthquakes occurred in Tocantins Province in Central Brazil recorded in broad band stations installed in the Goiás state.

Introdução

A Região Sudeste do Brasil está localizada na porção oriental do continente sul-americano, com preendendo as latitudes 18° a 26° S e longitudes 39° a 52° W, formando uma margem passiva com o oceano Atlântico. Por esta razão, a região de estudo apresenta atividade sísmica relativamente baixa, se comparada com regiões de borde de placa, como a região Andina e a Falha de Santo André na Califórnia. Apesar de relativa estabilidade do ponto de vista sísmico, a região apresenta atividade sísmica considerável, incluindo sismos com magnitude m_b 6,3 (no ano de 1955) ou até próxima de 7,0, conforme sugerido por Berrocal et al. (2003) e sismos com magnitude m_b menores que 4,0, mais constantes. (Assumpção et al, 1980; Berrocal et al, 1984; Berrocal et al, 1996).

A auscultação instrumental da atividade sísmica na Região Sudeste começou na década de 1970, com a instalação de sismógrafos na região, sendo que os dados sobre sismos anteriores foram obtidos através de relatos dos locais atingidos em notícias de jornais, razão pela qual esses sismos têm localização epicentral imprecisa. São poucos os sismos relatados no período anterior à segunda metade do século XIX, crescendo o número de eventos registrados lentamente até o final da década de 1960, quando é possível notar um aumento evidente no número de sismos detectados devido à instalação de aparelhos sismográficos em Brasília. Podemos assim dizer que a partir da década de 1970 foi dado início à

compilação de um catálogo sísmico para tornar possível estudos da sismicidade da Região Sudeste.

A auscultação sismográfica instrumental da Região Sudeste, nos últimos anos, é feita através de cerca de trinta estações entre as quais algumas permanentes e outras temporárias. Entre as permanentes estão a Rede Sismográfica da Universidade de São Paulo (RESUSP) instalada em 1980, a Rede Sismográfica da Bacia de Campos (RSBC) a partir de 1996, e a Estação Sismográfica de Angra dos Reis (ESAR) desde 2002.

A RSBC possui estações fixas nas cidades de Macaé-RJ, (CAM1), Guarapari-ES, (CAM3), Pico da Caledônia-RJ, (CAM4) e, RESUSP possui estações em Socorro (VAO2), Bom Sucesso (VAO3), e Valinhos (VAO), esta última com três componentes, todas em São Paulo. Essas estações operam com sismômetros de período curto ($T_0=1.0s$) e registram os dados digitais com 100 aps. A estação ESAR opera com sismômetro triaxial de banda larga (0,01 a 50 Hz), registro em formato contínuo com 100 aps.

As estações temporárias operam em diferentes pontos da região, desde 1992 sendo que algumas atualmente estão localizadas em Três Marias (TRMB) e Bambuí (BAMB), ambas em Minas Gerais e; outras duas em São Paulo: Nuporanga (NUPO) e Pacaembu (PACB). Existem registros de outras estações que operaram na região de sismos com magnitude maior que 3,5 m_b , que podem ser utilizados para o presente projeto.

Esta pesquisa procura estudar os sismos ocorridos na Região Sudeste do Brasil, tentando melhorar a localização epicentral utilizando dados adicionais e novas leituras, aumentar o número de eventos conhecidos; e também definir alguns parâmetros que são utilizados no estudo de sismicidade, como a função de atenuação de energia sísmica própria da região.

Metodologia

As determinações epicentrais do Boletim Sísmico Brasileiro são efetuadas através de leituras das ondas sísmicas P e S, utilizando os programa PQL e HYPO71 (Lee & Lahr, 1978). Porém, nem sempre é possível utilizar todos os dados disponíveis no IAG, devido aos registros e/ou dados de algumas estações não estarem disponíveis quando esses epicentros são determinados. Os epicentros de sismos de pequena magnitude, registrados em menos de três estações, não são determinados pelo Boletim Sísmico Brasileiro. Nesse caso é possível efetuar uma determinação aproximada do epicentro se o evento for registrado numa estação triaxial.

Para alcançar os objetivos desta pesquisa serão efetuadas as atividades que são descritas a seguir:

Determinação de epicentros de sismos locais de pequena magnitude

Os registros digitais da ESAR mostrados na Fig. 1, correspondem a um sismo regional ocorrido em Igaratá SP, em março de 2002. ESAR opera nas componentes vertical (Z) e horizontais (NS e EW). Os tempos de chegada das ondas P e S, mostrados nesta figura, permitem calcular a distância epicentral (Δ).

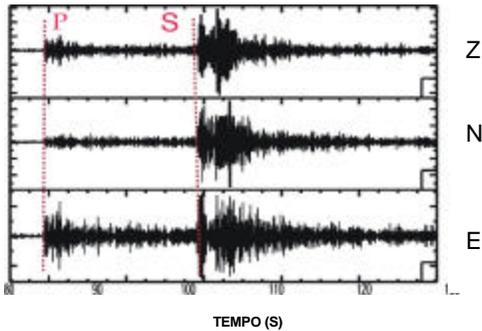


Figura 1. Sismogramas de ESAR do sismo ocorrido em 17.03.2002 em Igaratá, SP

Para determinar o epicentro com uma estação triaxial, além de Δ , precisamos calcular o azimute (Az), que é o ângulo de chegada da frente das ondas sísmicas na estação. Esse ângulo é medido na direção horária, entre o meridiano que passa pela estação e a linha entre a estação e o epicentro, medido de 0 a 360°. O cálculo deste ângulo é efetuado através das amplitudes das primeiras fases da onda P medidas nas componentes horizontais e da polaridade dessas fases na componente vertical. A Fig. 2 mostra uma ampliação das primeiras fases dos registros da figura anterior e a coerência entre essas fases nas três componentes.

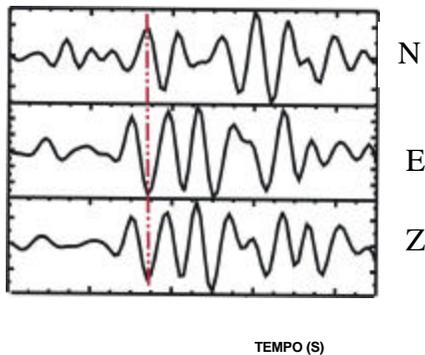


Figura 2 ampliação das primeiras fases dos registros anteriores.

Com Δ e Az é possível determinar as coordenadas do epicentro conhecendo as coordenadas da estação. O epicentro do sismo de Igaratá foi determinado com este método e mostrado no mapa da Fig. 3 (círculo) junto com ESAR (triângulo). O epicentro deste evento determinado

com dados da RESUSP e RSBC fica próximo do determinado pelo método Δ e Az.

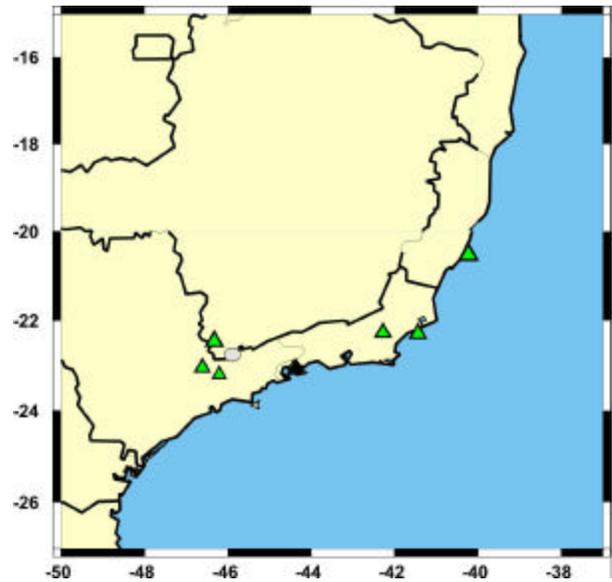


Figura 3. Mapa ilustrando o sismo de Igaratá (círculo), ESAR (triângulo preto), e as estações da RESUSP e RSBC (triângulos verdes).

Utilizando o método Δ e Az foram determinados os epicentros de vários sismos locais de pequena magnitude registrados na ESAR. No mapa da Fig.4 são apresentados os epicentros desses eventos. Esses eventos (mostrados como círculos vermelhos), ocorreram no intervalo fevereiro-março de 2002. Nesse intervalo o Boletim Sísmico Brasileiro determinou os epicentros de sismos ocorridos na região de estudo, que são mostrados como quadrados azuis na Fig. 4, com dados da (RESUSP) e (RSBC).

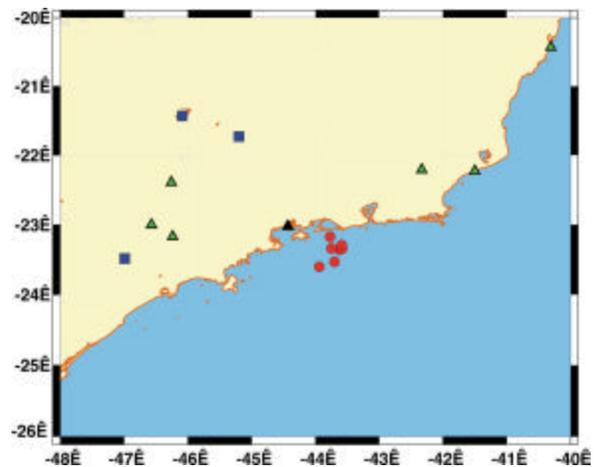


Figura 4. Mapa mostrando os epicentros de sismos registrados unicamente na ESAR (círculos vermelhos) determinados com o método Δ e Az, e epicentros de sismos determinados com o método Δ e Az, e epicentros de sismos determinados com o método Δ e Az, e epicentros de sismos determinados com o método Δ e Az.

sismos publicados no Boletim Sísmico Brasileiro (quadrados azuis) entre fevereiro e março de 2002.

Re-localização de epicentros

As determinações epicentrais do Boletim Sísmico Brasileiro são efetuadas através de leituras das ondas sísmicas, utilizando o programa PQL, e do programa HYPO71. Na presente pesquisa pretende-se utilizar o programa SAC para análise e leitura dos dados sísmicos e, quando disponíveis, dados de um número maior de estações que as utilizadas para o Boletim Sísmico Brasileiro.

A vantagem de utilizar o programa SAC é que este programa foi desenvolvido para uma análise mais elaborada de dados sísmicos digitais que o programa PQL, normalmente utilizado para uma análise preliminar rápida.

Para ilustrar essas vantagens foram utilizados os dados das estações mostradas no mapa da Fig. 5 para re-localizar o sismo ocorrido na Plataforma Continental no dia 04.06.2002.

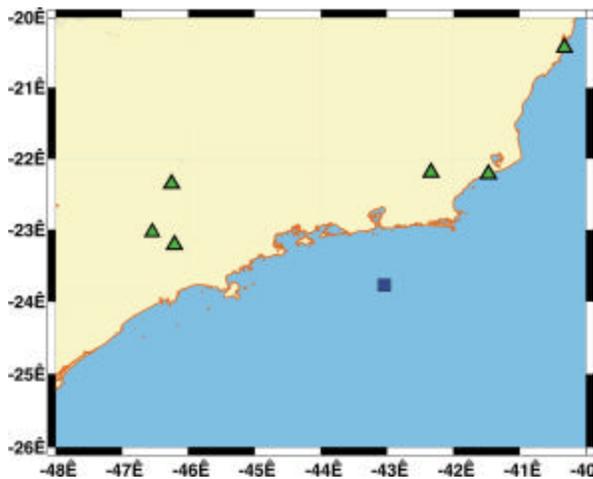


Figura 5. Mapa mostrando o sismo re-localizado (em azul) e parte das estações utilizadas (em verde).

Na Tabela 1 são apresentados os dados obtidos neste exercício, comparados com os dados publicados no Boletim Sísmico Brasileiro (BSB) utilizando o programa PQL. Na segunda coluna da Tabela 1 se apresenta o epicentro obtido pelo BSB com leituras no PQL, na terceira coluna, os resultados obtidos neste trabalho com leituras no SAC, ambas utilizando as mesmas estações (oito estações digitais, seis das quais são mostradas na Fig. 4) e na última coluna os resultados obtidos nesse trabalho utilizando onze estações da região de estudo e regiões vizinhas.

As respostas para a hora de origem e latitude dessas determinações (Tabela 1) são praticamente as mesmas nas três colunas. A longitude tem uma pequena variação de quase um minuto (~1,8 km) com relação a solução obtida com os dados lidos no PQL, assim como o valor de RMS (raiz média quadrática dos resíduos em tempo) que é ligeiramente maior na determinação do BSB. A maior diferença, entretanto é a determinação da

profundidade focal deste sismo que foi conseguida unicamente com os dados lidos no SAC. Os resultados das duas determinações com o SAC (oito e onze estações) são praticamente iguais. Os resíduos espaciais do hipocentro, horizontal (ERH) e vertical (ERZ) são ligeiramente maiores nas determinações com dados lidos no SAC, porém eles são significativos, considerando o fato de ter conseguido um valor para a profundidade focal e a coerência das respostas para as duas determinações utilizando o programa SAC, independente do número de estações utilizadas.

Tabela 1. Parâmetros hipocentrais e indicadores de precisão, obtidos utilizando a determinação efetuada para o Boletim Sísmico Brasileiro (BSB) e as determinações propostas neste trabalho.

| Dados | BSB | SAC | SAC +2 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Data | 04 06 2002 | 04 06 2002 | 04 06 2002 |
| Hora de origem | 23 27 12.26 | 23 27 12.54 | 23 27 12.63 |
| Latitude S | 25-02.4 | 25-02.4 | 25-02.4 |
| Longitude W | 45-49.83 | 45-50.98 | 45-50.76 |
| Profundidade | | 4,79 km | 4,86 km |
| RMS | 0.48 | 0.30 | 0.35 |
| ERH | 3.4 | 4.9 | 5.2 |
| ERZ | 3.6 | 4.3 | 4.3 |

Atenuação da energia sísmica

Um objetivo importante desta pesquisa é a determinação de parâmetros próprios da sismicidade da região de estudo que ainda não são conhecidos, como por exemplo, a função de atenuação da energia sísmica com a distância. Este parâmetro é normalmente definido utilizando registros de sismos de grande magnitude em sismógrafos apropriados conhecidos como *strong motion seismograph*, que normalmente registram as acelerações das partículas do solo provocadas pelas vibrações sísmicas, por este motivo esses aparelhos são conhecidos também como acelerógrafos.

No Brasil não ocorrem sismos de grande magnitude, por esse motivo não é possível obter dados sobre atenuação de energia sísmica com base em registros de aceleração. Para suprir essa falta, podemos utilizar os sismogramas de sismos locais e regionais, que estão sendo registrados nos sismógrafos triaxiais com registro digital, com amostragem de 100 aps. Os sismogramas originais dessas estações, que registram as velocidades das partículas, são convertidos em acelerações, depois da transformação dos registros no domínio de tempo para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier.

Para efeito de ilustrar o método a ser empregado nesta pesquisa para obtenção da função de atenuação da energia sísmica, foram utilizados sismogramas de sismos ocorridos no Estado de Goiás e que foram registrados nas estações instaladas durante o Projeto Temático da Província Tocantins, entre 1999 e 2002 (Berrocal et al. 2003, Lopes et al., 2003). Para determinar a função de

atenuação da energia sísmica na região Sudeste, que é um dos objetivos desta pesquisa, serão utilizados registros de sismos ocorridos nessa região no período de 1992 a 2003 obtidos nas estações triaxiais do projeto BLSP (Brazilian Lithospheric Seismic Project) (Assumpção et al., 2002, França e Assumpção, 2003), na RESUSP, na RSBC e na ESAR, registrados com pelo menos 100 aps.

Os epicentros dos sismos de Goiás utilizados no teste antes mencionado, juntamente com as estações sismográficas utilizadas, estão mostrados no mapa da Fig. 6

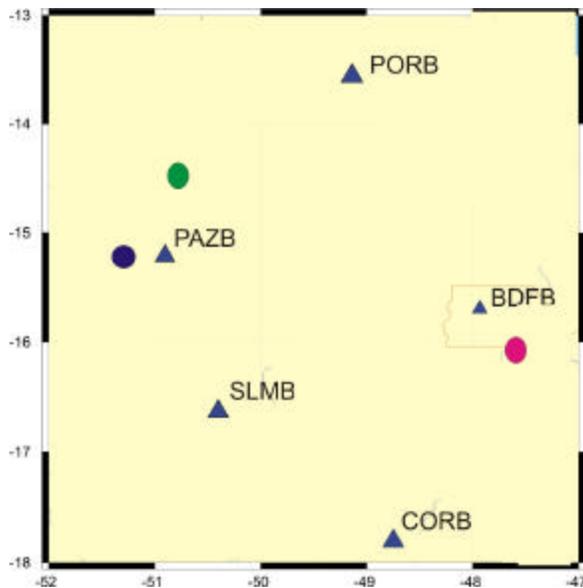


Figura 6. Mapa com a localização dos sismos ocorridos em Goiás e as estações utilizadas na análise de espectros.

A seguir são apresentadas algumas amostras de espectros de amplitude correspondentes às acelerações das vibrações sísmicas registradas nas estações PAZB, PORB, SLMB, CORB (triângulos azuis na Fig. 6) e que operaram na Província Tocantins entre 1999 e 2002. Os sismos utilizados ocorreram em 20.11.2000 com epicentro nas proximidades de Brasília e com magnitude m_b 4.0 (círculo rosa na Fig. 6), em 24.10.2001 com epicentro nas proximidades de Aruanã-GO e magnitude m_b 2,7 (círculo azul na Fig. 6) e o sismo de 02.11.2001 ocorrido próximo à Morzalândia-GO e magnitude m_b 2,2 (círculo verde na Fig. 6).

Como podemos observar na Fig. 7, o sismo de Brasília encontra-se a distâncias das estações maiores que 200 km. Esses espectros, na faixa entre 2 e 22 Hz, apresentam uma forte atenuação das altas frequências da ordem de até 100 vezes. Nota-se também que o espectro da estação mais próxima (CORB-213 km) apresenta as amplitudes maiores em quase todas as frequências, entretanto, o espectro da estação mais distante (PAZB-358 km) apresenta uma amplitude maior que a estação PORB (323 km) a qual tem um espectro de amplitudes mais atenuadas que o da estação mais próxima, como era de se esperar.

O fato do espectro da estação PAZB apresentar amplitudes maiores que as da estação PORB, que tem uma distância epicentral menor (inclusive amplitudes iguais na faixa entre 2 e 8 Hz que as da estação mais próxima) pode ser explicado por um possível efeito da fonte que teria liberado uma quantidade maior de energia na direção WNW, onde se encontra a estação PAZB, conforme sugerido de forma tênue pelo mapa de isossistas desse sismo, publicado em Marza et al. (2001) (ver Fig. 8).

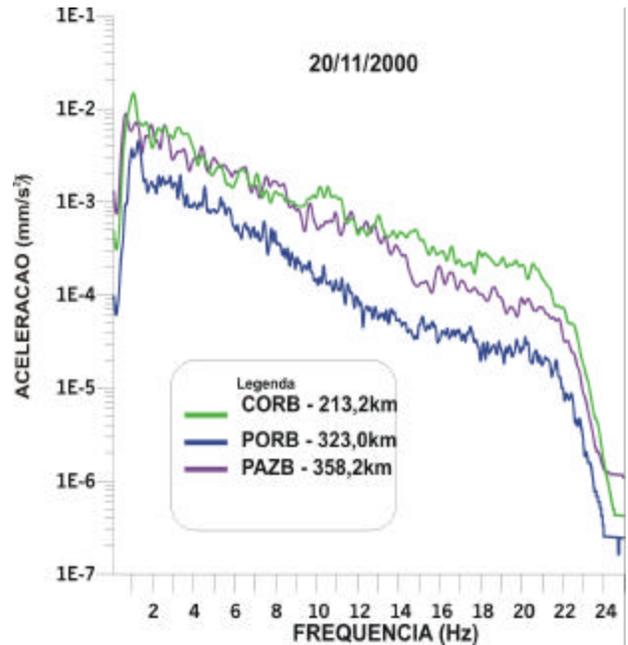


Figura 7. Espectro de aceleração no domínio da frequência do sismo ocorrido em 20/11/2000.

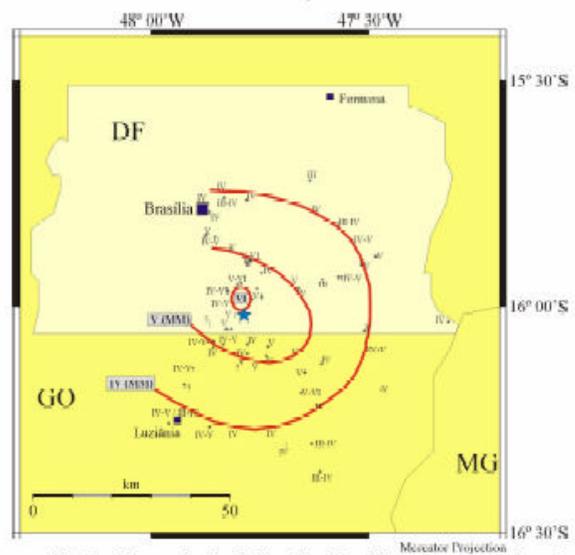


Figura 8. Mapa de isossistas do sismo de Brasília ocorrido em 20.11.2000 (Marza et al., 2001).

O sismo de 27.10.2001 apresenta dois comportamentos diferentes nos espectros de aceleração. Para distâncias mais próximas (34 e 181km) a energia se mantém praticamente constante em toda a faixa de frequência pesquisada, mas para distâncias maiores (195 e 392km) a curva de atenuação de energia sísmica aponta uma queda mais acentuada nas altas frequências como no caso anterior. O nível das amplitudes dos espectros das quatro estações mantém a proporcionalidade com a distância epicentral.

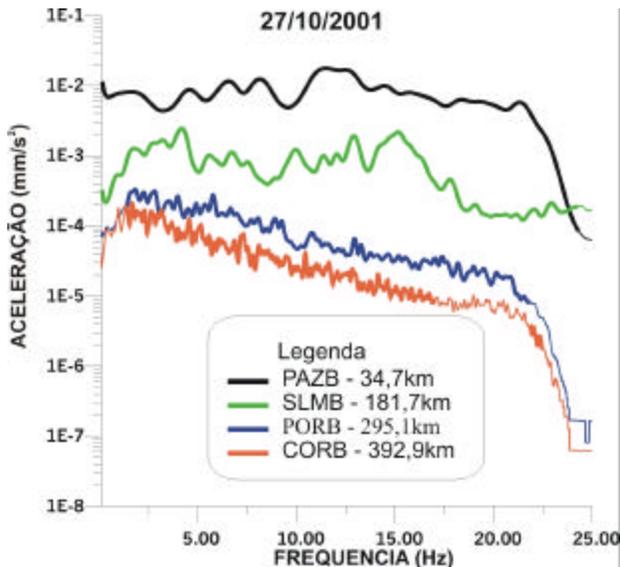


Figura 9. Espectro de aceleração no domínio da frequência do sismo ocorrido em 27.10.2001, na região de Aruanã-GO.

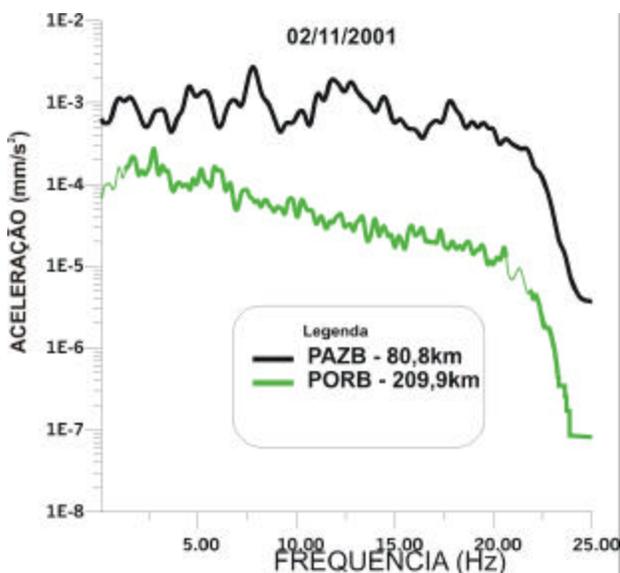


Figura 10. Espectros de aceleração do sismo ocorrido em Mozarlândia-GO, em 02.11.2001.

Na Fig. 10 se apresentam os espectros do sismo ocorrido em 02.11.2001, mostrando as mesmas características

que os espectros de sismos anteriores. O espectro da estação PAZB (80 km) é uniforme na faixa da frequência entre 2 e 22 Hz, porém o espectro da estação PORB, que é mais distante (209 km) apresenta uma atenuação notória nas altas frequências, num nível inferior de amplitudes proporcional à distância.

Comparando os espectros dos três sismos para distâncias equivalentes podemos observar que o pico do espectro do sismo de Brasília (m_b 4,0), registrado em CORB (213 km) é aproximadamente 100 vezes maior que o pico correspondente do sismo de Mozarlândia (m_b 2,2) do espectro registrado na estação PORB (210 km). Outro aspecto interessante é que até distâncias próximas a 200 km (pelo menos 180 km) não existe notória atenuação das amplitudes dos espectros nas altas frequências, como ocorre para os sismos com distâncias maiores que 210km.

Discussão dos resultados

Na localização de epicentros, utilizando dados da rede sismográfica regional, concluímos que a utilização do programa SAC produz um resultado mais eficiente em relação ao programa PQL, uma vez que o programa SAC foi desenvolvido para uma análise mais detalhada dos registros sísmicos no formato digital que o programa PQL que normalmente é utilizado para uma inspeção rápida dos registros sísmicos. Além disso, o programa SAC interage diretamente com o programa HYPO71 de forma automática. O processamento posterior das localizações efetuadas para o BSB, permite, normalmente, a utilização de dados adicionais, produzindo realocações mais confiáveis. Esta vantagem é mais conveniente para sismos de pequena magnitude ($m_b < 3,0$) que corresponde à maioria de eventos na região de estudo.

A utilização de estações sismográficas triaxiais, como a ESAR, é de grande importância na localização epicentral de sismos locais muito pequenos, com magnitude $m_b < 2,0$, os quais normalmente não são registrados por várias estações, motivo pelo qual não seriam incluídos no Boletim Sísmico Brasileiro. Este fato foi constatado com os registros da ESAR, recuperando vários eventos locais de pequena magnitude como se mostra na Fig. 4.

Para obtenção da função de atenuação da energia sísmica, foi constatado que é possível utilizar dados obtidos nos sismógrafos que registram a velocidade das partículas durante a passagem das ondas sísmicas, para convertê-las em acelerações. Esta conversão é efetuada através da transformada rápida de Fourier que permite a conversão da velocidade das partículas em aceleração.

Nos espectros analisados no trabalho foi observado que existe uma relação inversa entre atenuação de energia sísmica e a distância e uma relação direta com a magnitude. Essas diferenças no nível de aceleração com a distância e com a magnitude permitirão elaborar a função de atenuação de energia sísmica na região de estudo. Isso será possível depois de acumular um número de registros sísmicos representativo, com características que permitam obter esses espectros, ou seja, sismógrafos de período curto ou de banda larga, com registro digital, e amostragem de pelo menos 100 aps.

Referências:

Assumpção, M., Dias Neto, C.M., Berrocal, J., Antezana, R., França, H. & Ortega, R., 1980. Sismicidade do Sudeste do Brasil. Na. 31º Congr. Bras. Geol., **2**: 1075-1092.

Berrocal, J., Assumpção, M., Antezana, R., Dias Neto, C.M., Ortega, R., França, H. & Veloso, J.A.V., 1984. Sismicidade do Brasil. Inst. Astronôm. e Geofís., 320p. São Paulo.

Berrocal, J., Fernandes, C., Bassini, A. & Barbosa, J., 1996. Earthquake hazard assessment in the Southeastern Brazil. *Geofísica Internacional*, **35**: 257-272.

Assumpção, M., D. James & J. A. Snoke, 2002. Crustal Thicknesses in SE Brazilian shield with receiver function: Implications for isostatic compensation, *J. Geophys. Res.*, **107**, B1, doi:10.1029/2001JB000422, ESE2-11.

França, G.S. & Assumpção, M., 2003. Estrutura da crosta em Goiás, usando a função do receptor, e mapa preliminar de espessuras crustais no SE e centro-oeste do Brasil 8th International Congress of the Geophysical Society, Rio de Janeiro.

Berrocal, J., Marangoni, Y., Sá, N.C., Fuck, R., Pimentel, M., Assumpção, M., Soares, J.E.P., Fernandes C., Perosi F., França G. S. & An, M., 2003. Crustal structure and tectonic deformation in Tocantins Province, Central Brazil. 8th International Congress of the Geophysical Society, Rio de Janeiro.

França, G. S (2003) Estudo da Estrutura Crustal no Sudeste e Centro-Oeste usando a Função do Receptor, Tese de Doutorado, IAG-USP, 200pp.

Lee, W.H.K. & Lahr, J.C. (1978) HYPO71 (Revised): A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude and First Motion Pattern of Local Earthquakes, USGS Open File Report 75-311, 488pp.

Lopes, A., Assumpção, M., & Barbosa, J., 2003. Modelagem da Estrutura Média em Goiás com Algoritmo Genético, 8th International Congress of the Geophysical Society, Rio de Janeiro.

Marza, Vasile, Barros, Lucas, Chimpliganond, Cristiano & Caixeta, Daniel, 2001. Brasília (DF) Earthquake of Nov. 20, 2000: In Quest of Unravelling. 7th International Congress of the Geophysical Society, Salvador BA, CD of abstracts.

Agradecimentos:

Agradecemos ao Sr. José Barbosa pela ajuda na procura dos dados utilizados neste trabalho e por fornecer as localizações epicentrais efetuadas com o programa PQL, e aos técnicos do Laboratório de Instrumentação Sismológica do IAG pela colaboração na transferência de dados sísmicos e o fornecimento de outros dados.

Um agradecimento especial à FUSP pelo fornecimento de bolsa de iniciação científica.