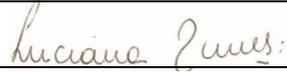


PROJETO BÁSICO AMBIENTAL UHE TELES PIRES

P.06 – Programa de Monitoramento da Sismicidade

Relatório Semestral (Fase de Operação)

EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL PELO DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES DO PROGRAMA			
INTEGRANTES	CONSELHO DE CLASSE	CTF IBAMA	ASSINATURA
Luciana Cabral Nunes Geóloga, M.Sc.	CREA- 50629926484	5287039	
Afonso E. de Vasconcelos Lopes Geofísico, Sismólogo, D.Sc.	-	5286995	
Rhobysson B. da Silva Técnico de Meio Ambiente	-	5545778	
Felipe de Almeida Geofísico	CREA- 5063849978	5493534	

Janeiro – 2016

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	02
2. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	02
3. FUNCIONAMENTO DAS ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS	04
4. METODOLOGIA	04
4.1 DETERMINAÇÃO EPICENTRAL	04
4.2 DETERMINAÇÃO DA MAGNITUDE COM A DURAÇÃO DO SISMO (m_D)	05
5. EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS ENTRE JULHO E DEZEMBRO DE 2015	07
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	08
REFERÊNCIAS	10

1. INTRODUÇÃO

O serviço “Monitoramento Sismográfico na Região do Futuro Reservatório da UHE Teles Pires” está sendo executado pela empresa **VERACRUZ Soluções Geofísicas e Geológicas Ltda**, e atende ao previsto no P.06 - Programa de Monitoramento da Sismicidade do Projeto Básico Ambiental (PBA). Este programa tem por finalidade auscultar a sismicidade existente na região de influência sísmica da futura barragem da UHE Teles Pires, em um raio de 320 km (200 milhas) com centro na posição de sua barragem, a qual está localizada nas coordenadas 9°21’04”S e 56°46’39” O, no rio Teles Pires, na divisa entre os estados do Mato Grosso e Pará.

Neste relatório semestral são documentados os principais resultados obtidos nas estações sismográficas STP1 e STP2 entre os dias 1 de julho e 31 de dezembro de 2015.

2. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

Entre os meses de julho a dezembro de 2015 o programa de monitoramento sismográfico continuou, com o registro e análise dos dados coletados pela estação STP2.

No dia 16 de novembro de 2015 foi iniciada a reinstalação em um novo local da estação sismográfica STP1, que havia sido furtada e avariada por raio em abril de 2015. O local selecionado está situado nas coordenadas 9°30’57,02”S e 56°27’15,10”W (**Figura 1**), em área mais segura e nas proximidades de uma moradia. Nesse primeiro momento, foi instalado o cercado da estação, sendo que no dia 13 de dezembro de 2015 a reinstalação foi concluída, com a inserção do abrigo e do sismógrafo recuperado. O processo de conserto do equipamento demandou um período considerável de tempo, pois envolveu o envio do instrumento ao fabricante no Canadá e todos os trâmites de exportação e importação de mercadorias.

A partir do problema verificado na estação sismográfica STP1, e através dos estudos da VERACRUZ na região Amazônica, vem sendo constatado que a utilização de antenas de satélite, celular e internet junto a estações sismográficas aumenta a possibilidade da estação apresentar problemas, o que na maioria das vezes ocorre pela influência de raios em tempestades, os quais tem efeito propagado através de cabos eletrônicos longos vindo das antenas de transmissão de dados.

No caso de estações sismográficas usadas para o estudo de atividade sísmica regional, como as estações da Universidade de São Paulo, o uso da transmissão de dados em tempo real é um item prioritário, visto que essas estações monitoram todo o Brasil, ao contrário de estações locais como as da UHE Teles Pires. No caso do estudo de atividade sísmica natural e induzida por reservatórios, a transmissão em tempo real não é um item prioritário, visto a falta de necessidade de uma resposta imediata na maior parte do

P. 06 - Programa de Monitoramento da Sismicidade

tempo, já que para esse tipo de estudo não há interesse em eventos ocorridos a centenas de quilômetros da estação, como é o caso das estações de monitoramento regional.

Levando em conta que a prioridade do estudo sismológico no entorno da UHE Teles Pires é o conhecimento da atividade sísmica natural, e eventualmente induzida pelo reservatório, a prioridade maior é o acúmulo e análise dos dados sismográficos. Por outro lado, como a UHE Teles Pires conta com apenas duas estações sismográficas de monitoramento, sugere-se a desinstalação do sistema de transmissão de dados, o qual amplia significativamente a chance de problemas técnicos que poderão provocar a perda de dados importantes ao monitoramento.

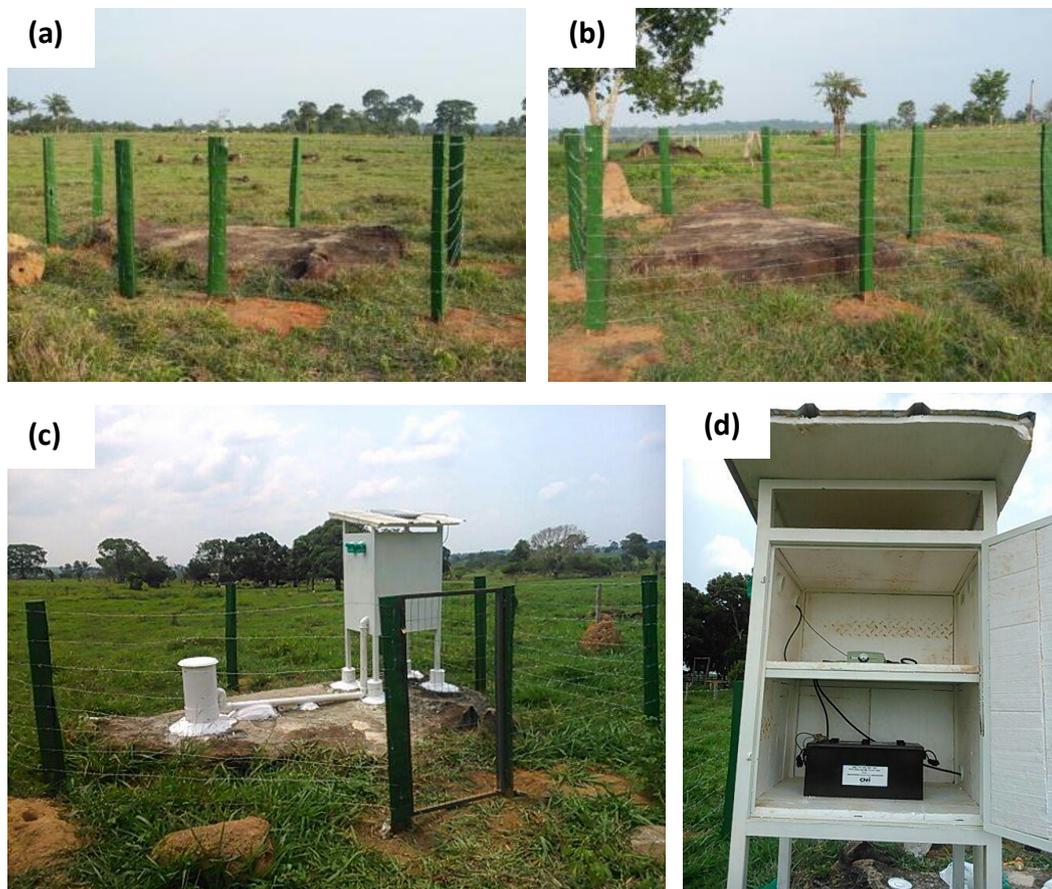


Figura 1. (a) e (b) Instalação do cercado da estação sismográfica STP1 no dia 16 de novembro de 2015; (c) e (d) Conclusão da Instalação com a instalação de todos os equipamentos que compõem a estação sismográfica.

Os dados registrados são analisados trimestralmente, sendo que seus resultados são apresentados nos relatórios periódicos.

3. FUNCIONAMENTO DAS ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS

A estação SPT2 funcionou de forma plena entre os meses de julho e dezembro de 2015, enquanto que a estação STP1 esteve desativada no período, devido aos atos de vandalismo, e as avarias provocadas pela queda de raios no primeiro semestre do ano de 2015.

Conforme detalhado no item 2 deste relatório, o funcionamento da estação STP1 foi reestabelecido no dia 13 de dezembro de 2015.

4. METODOLOGIA

4.1 Determinação Epicentral

Considerando que um sismo tenha uma profundidade focal pequena (que possa ser negligenciada com relação a distância epicentral do mesmo) e que as primeiras ondas P e S que chegam à estação são ondas diretas, podemos estimar a distância epicentral (neste caso, igual à distância hipocentral) utilizando a diferença de tempo entre as chegadas das ondas P e S. Como a velocidade da onda P (V_P) é maior que a da onda S (V_S), quanto maior à distância epicentral, maior a distância entre essas duas ondas (**Figura 1**), de forma que existe uma relação direta entre a distância hipocentral (neste caso igual a distância epicentral) e o valor $S-P = t_P - t_S$.

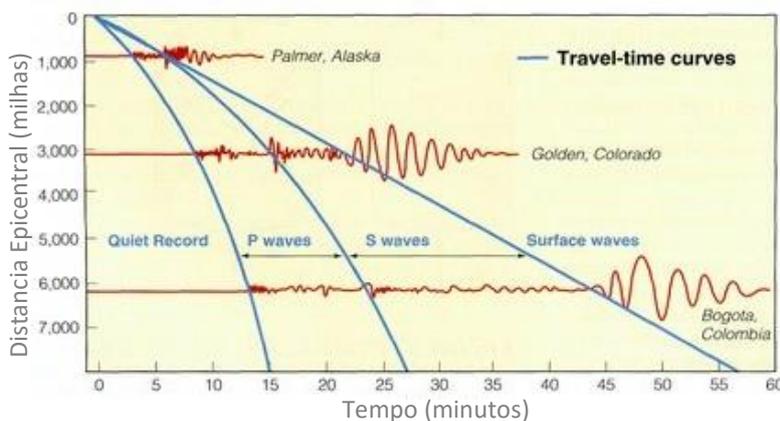


Figura 1 – Seção sísmica ilustrando que o valor de S-P aumenta com a distância epicentral. No nosso caso iremos estudar apenas a parte linear das curvas, para distâncias hipocentrais menores que 500 km.

Como as ondas P e S percorrem a mesma distância hipocentral (Δ), podemos escrever que:

$$\Delta_P = \Delta_S \quad (4.1)$$

No caso de ondas P e S diretas, geradas por um sismo raso, temos:

$$V_P = \frac{\Delta_P}{t_P - t_0} \rightarrow \Delta_P = V_P (t_P - t_0) \quad (4.2)$$

$$V_S = \frac{\Delta_S}{t_S - t_0} \rightarrow \Delta_S = V_S (t_S - t_0) \quad (4.3)$$

P. 06 - Programa de Monitoramento da Sismicidade

Substituindo as Equações (4.2) e (4.3) na equação (4.1), temos:

$$V_P (t_P - t_0) = V_S (t_S - t_0) \quad (4.4)$$

Com isso, o primeiro item a ser determinado é qual é a hora de origem do sismo (t_0), dada por:

$$t_0 = \frac{V_S t_S - V_P t_P}{V_S - V_P} \quad (4.5)$$

Substituindo a Equação (4.5) na Equação (4.2), temos:

$$\Delta = \Delta_P = V_P (t_P - t_0) = V_P \left(t_P - \frac{V_S t_S - V_P t_P}{V_S - V_P} \right) = V_P \left(\frac{V_S t_P - V_P t_P - V_S t_S + V_P t_P}{V_S - V_P} \right) \quad (4.6)$$

$$\Delta = V_P \left(\frac{V_S t_P - V_S t_S}{V_S - V_P} \right) = \left(\frac{V_P V_S}{V_S - V_P} \right) t_P - t_S \quad (4.7)$$

Como um dos parâmetros que conhecemos bem nas rochas é a razão V_P/V_S (em geral perto do valor 1,73), divide-se a equação (4.7) por V_S para que possamos reescrevê-la da seguinte forma:

$$\Delta = \left(\frac{V_P}{1 - \frac{V_P}{V_S}} \right) t_P - t_S = C_E * (S - P) \quad (4.8)$$

Note que enquanto as ondas P e S forem diretas, C_E será um valor constante que depende apenas da velocidade da onda P (V_P) e da razão V_P/V_S .

Com base nos dados geológicos disponíveis, adotamos os seguintes valores de C_E para a região do AHE Teles Pires:

$$C_E = 5,5 \quad \text{para } (S - P) < 3 \text{ seg.} \quad (4.9)$$

$$C_E = 7,1 \quad \text{para } 3 \text{ seg.} \leq (S - P) < 6 \text{ seg.} \quad (4.10)$$

$$C_E = 8,13 \quad \text{para } 6 \text{ seg.} \leq (S - P) < 12 \text{ seg.} \quad (4.11)$$

$$C_E = 11,2 \quad \text{para } (S - P) \geq 12 \text{ seg.} \quad (4.12)$$

A profundidade focal não pode ser estimada com apenas uma estação sismográfica, mas a existência ou não de ondas de superfície pode ajudar a indicar o valor máximo da profundidade focal, que deve ser menor que 10% da distância epicentral.

4.2 Determinação da Magnitude com a duração do Sismo (M_D)

A magnitude de um sismo é utilizada para comparar a amplitude do movimento do chão produzida por diferentes sismos, porém, algumas relações empíricas mostram que esse parâmetro também pode ser relacionado com a energia liberada pelo evento sísmico. O princípio básico da escala magnitude é que seus valores dependem do logaritmo da

P. 06 - Programa de Monitoramento da Sismicidade

amplitude do movimento do chão, de maneira que o aumento de um ponto na escala de magnitude corresponde a um aumento de 10 vezes nas amplitudes do movimento do chão.

A primeira escala de magnitude de sismos (M_L) foi desenvolvida por Richter e se aplicava apenas para sismos do Sul da Califórnia. Posteriormente, a escala de magnitude foi desenvolvida para outras distâncias para aplicação mundial, sendo que as duas principais escalas são as m_b (medida com a onda P) e M_s (medida com as ondas de superfície). Embora a sismologia tenha evoluído muito na determinação da magnitude dos sismos, ainda hoje há uma grande dificuldade em se determinar a magnitude de sismos locais.

Uma alternativa para o estudo de sismos locais é a utilização da magnitude M_D , que é determinada com a duração (D) do sismo, indo desde a chegada da onda P até o final das ondas de cauda. Essa escala de magnitude é baseada no conceito de retro-espalhamento (*backscattering*) proposto por **Aki (1969)** e demonstrado com dados experimentais por **Aki & Chouet (1975)**. Esses autores propõem que a duração dos sismos locais, com menos de 100 km de distância epicentral, é praticamente independente da distância epicentral e do azimute do sismo. Essa característica permite usar a duração dos sismos (D) como um parâmetro eficiente para estimar a magnitude de eventos sísmicos locais com a relação proposta por **Bath (1981)** para a magnitude M_D de sismos rasos de pequenas magnitudes:

$$M_D = a \log D + c \quad (4.13)$$

Em que, D é a duração do sinal em segundos e a e c são constantes ajustadas para a rede sismográfica local. Neste ponto é importante salientar que um dos maiores problemas da escala de magnitude M_D é que a mesma depende da geologia local, e por isso essa magnitude deve ser calibrada para cada estação sismográfica.

Para calibrar a escala de magnitude M_D é necessário que ocorra um sismo forte, registrado simultaneamente por uma estação sismográfica local e por uma estação sismográfica regional, porém, para isso em geral é necessário um longo período de registros sismográficos. Desta forma, devido à falta de informação para calibração da escala de magnitude M_D , inicialmente iremos adotar para a região do AHE Teles Pires os parâmetros determinados por **Berrocal et al. (1993)** para a região de Angra dos Reis-RJ, permitindo definir a magnitude M_D com as seguintes equações:

$$M_D = 1.71(\pm 0.06) \log D - 0.73(\pm 0.07) \quad \text{Quando } D > 10 \text{ seg.} \quad (4.14)$$

$$M_D = 0.7 \log D + 0.5 \quad \text{Quando } D \leq 10 \text{ seg.} \quad (4.15)$$

5. EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS ENTRE JULHO E DEZEMBRO DE 2015

As estações sismográficas STP1 e STP2 registraram eventos sísmicos locais, regionais e telessismos distantes, sendo que apenas uma fração dos eventos até agora possui possível origem natural, e a maioria são explosões em pedreiras próximas.

Os eventos sísmicos identificados, processados e analisados foram divididos em eventos sísmicos locais (distância epicentral menor ou igual a 100 km) e regionais (distância epicentral maior que 100 km e menor que 1000 km).

O monitoramento da atividade sísmica da região do entorno da UHE Teles Pires resultou na identificação de 12 eventos sísmicos regionais, localizados entre 100 e 1000 km do empreendimento, possivelmente de origem natural, porém de baixa magnitude. Também foram identificados eventos sísmicos locais, com distâncias epicentrais inferiores a 100 km, porém, em decorrência da baixa intensidade de seu sinal, os mesmos podem ser confundidos com ruído sísmico no local e foram descartados do resultado final.

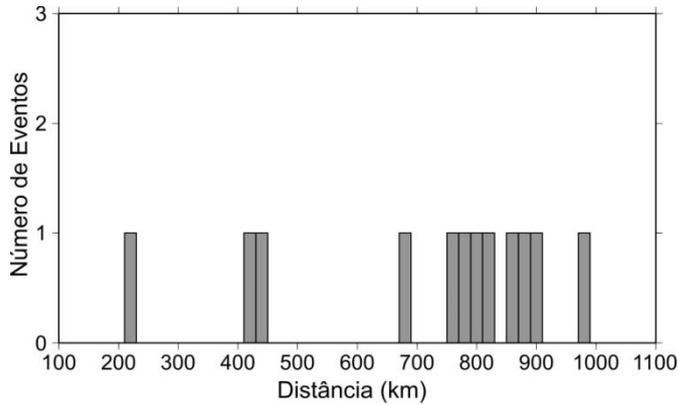
Na **Tabela 1** estão apresentados detalhadamente os 12 eventos sísmicos registrados pela estação, com informações do dia e horário de ocorrência do evento (sempre em horário GMT), magnitude do evento e a localização geográfica do mesmo, incluindo aí as suas coordenadas geográficas e a distância epicentral (distância em relação a estação) do evento.

Tabela 1: Eventos regionais registrados.

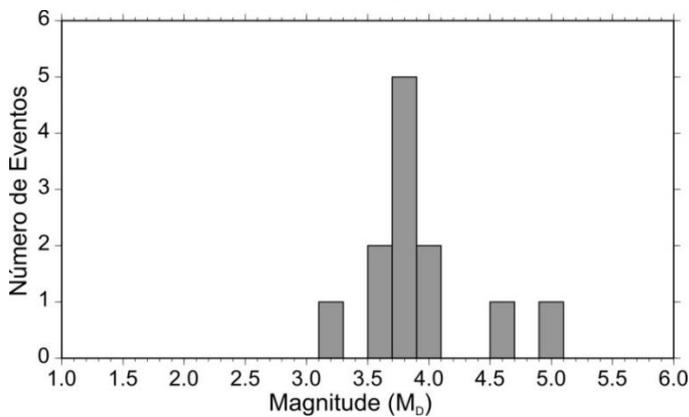
	DATA	HORÁRIO ORIGEM (UT)	DISTÂNCIA (km)	MAGNITUDE (M_D)	LATITUDE DO EVENTO (GRAUS DECIMAIS)	LONGITUDE DO EVENTO (GRAUS DECIMAIS).
1	26/07/2015	07:21:29	424.7	4.9	-12.50	-54.67
2	03/08/2015	14:15:57	433.2	4.5	-11.83	-60.01
3	14/08/2015	23:38:18	793.8	3.9	-6.17	-50.57
4	15/09/2015	21:27:03	893.4	4.1	-14.54	-50.73
5	27/09/2015	17:41:59	677.4	3.6	-13.79	-52.68
6	02/10/2015	17:34:29	851.8	3.7	-6.32	-49.92
7	08/10/2015	19:59:42	827.1	3.6	-6.18	-50.23
8	09/11/2015	17:49:34	985.6	3.7	-14.22	-49.47
9	07/12/2015	21:08:03	227.4	3.7	-10.62	-55.28
10	13/12/2015	17:46:19	754.1	4.0	-8.08	-50.28
11	16/12/2015	17:02:15	772.9	3.9	-6.29	-50.72
12	16/12/2015	18:59:30	885.2	3.1	-14.65	-50.92

Na **Figura 2** estão apresentados três gráficos contendo informações estatísticas dos eventos registrados, contendo os histogramas das distancias epicentrais, da magnitude e do horário de origem dos eventos sísmicos (em GMT).

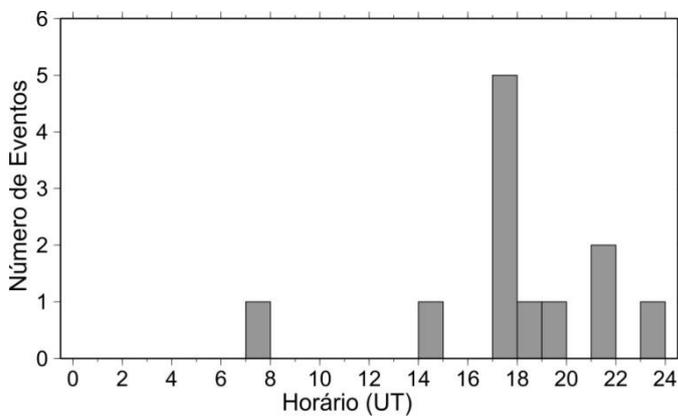
P. 06 - Programa de Monitoramento da Sismicidade



(a) Histogramas das distâncias epicentrais, dos eventos sísmicos.



(b) Histogramas da magnitude dos eventos sísmicos



(c) Histogramas dos horários de origem (UT, *Universal Time*) dos eventos sísmicos.

Figura 2: Gráficos com as estatísticas dos eventos registrados.

O monitoramento da atividade sísmica do entorno da região da UHE Teles Pires é realizado através dos dados registrados pelas estações STP1 e STP2, de propriedade da UHE Teles Pires, e também pela estação sismográfica UHE São Manoel, distante 22 km da barragem da UHE Teles Pires, caracterizando de modo completo a atividade sísmica da região.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aquisição de dados sismográficos do monitoramento sismológico da região da futura UHE Teles Pires continuou durante os meses de julho a dezembro de 2015 de forma ininterrupta, apesar da desativação temporária da estação STP1.

Os dados evidenciaram novamente uma atividade sísmica regional abaixo do esperado, principalmente devido à proximidade da região de estudo da Zona Sismogênica de Porto dos Gaúchos. Poucos eventos regionais podem ser locais, e nenhum em especial chamou atenção dentro da Zona de Influência Sísmica do empreendimento, definida pela distância máxima de 100 milhas ou 320 km.

Com relação aos eventos sísmicos locais, a totalidade dos eventos é referente a explosões em pedreiras ou garimpos realizadas no entorno da UHE Teles Pires, com intensidades muito baixas, próximas a do ruído do equipamento, sendo assim optamos por desconsiderar tais eventos. Foram registrados pouco mais de uma dezena de eventos sísmicos regionais, com distâncias entre 100 e 1000 km, evidenciando o bom funcionamento das estações.

Nenhum evento sísmico registrado representa riscos para a operação da usina, sendo que todos os eventos próximos ao empreendimento apresentaram baixa magnitude. Desta forma, até o presente momento não foi detectada atividade sísmica induzida pelo enchimento do reservatório.

As atividades previstas para o presente monitoramento se encontram em dia e dentro dos prazos estabelecidos. Caso haja a ocorrência de algum sismo importante, ou seja, sentido pela população, a equipe da comunicação social do UHE Teles Pires em conjunto com a VERACRUZ, deverá prestar esclarecimento para a população com palestras e distribuição de um material explicativo em escolas.

REFERÊNCIAS

- Aki, K. (1969), *Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves*, J. Geophys. Res., 74, 615-631.
- Aki, K. & Chouet, B. (1975), *Origing of coda waves: source, attenuation, and svattering effects*, J. Geophys. Res., 80, 3322-3342.
- Bath, M. (1981), *Earthquake magnitude – recent research and current trends*, Earth Sci. Rev., 17, 315-398.
- Berrocal, J.; Fernandes, C.; Bueno, A.; Seixas, N. & Bassini, A. (1993), *Seismic activity in Monsuaba (state of Rio de Janeiro), Brazil, between 1988 December and 1989 February*, Geophys. J. Int., 113, 73-82.