



Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

DETERMINAÇÃO DE UMA RELAÇÃO PRELIMINAR DE ATENUAÇÃO SÍSMICA PARA A PROVÍNCIA BORBOREMA (NORDESTE DO BRASIL)

Aluno: Danilo de Oliveira Domingos
Orientador: Prof. Dr. Jesus Berrocal

05/07/2010

Estrutura da apresentação

- Objetivos
- Introdução
 - Rede Sismográfica
 - Aspectos Tectônicos
 - Conceito de Atenuação
- Metodologia
- Resultados
- Discussão
- Conclusão

Motivação

QUAL É A UTILIDADE DE UMA RELAÇÃO DE ATENUAÇÃO?

Relações de atenuação tem um uso importante na análise de **risco sísmico**.

DE QUE FORMA É UTILIZADA?

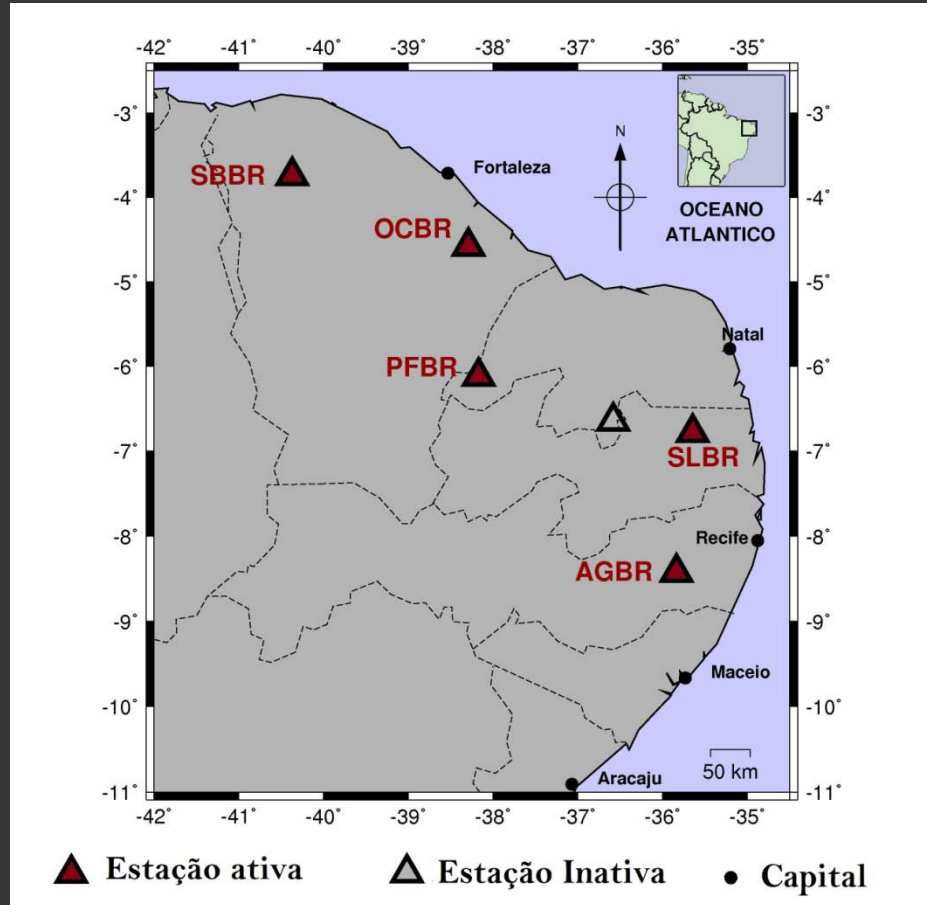
São utilizadas com o intuito de **prever**, com base na curva de atenuação, qual será a **aceleração** (ou velocidade) **máxima** que o **solo será submetido** na passagem das ondas de um **terremoto**.

Introdução

- A distribuição espacial de eventos no mundo é bem conhecida;
- Os eventos do interior do Brasil têm sua importância;
- Possibilitam estudos de comportamento de antigas falhas, risco sísmico, perigo sísmico, distribuição espacial e temporal de eventos, **atenuação sísmica**.

Etapa preliminar da RSB

A Rede Sismográfica Borborema



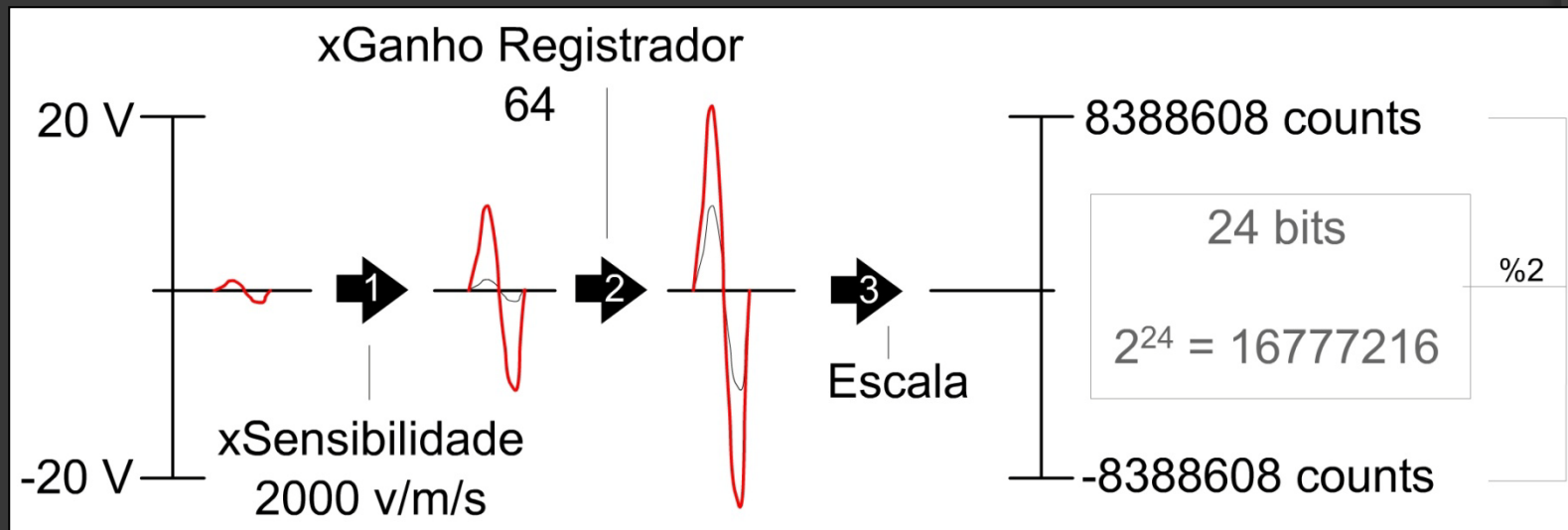
Estação	Localização	Início de operação
AGBR	Agrestina - PE	13/05/2007
OCBR	Ocara — CE	02/07/2007
SLBR	Solânea - PB	11/07/2007
PABR	Parelhas - RN	--
SBBR	Sobral - CE	23/05/2007
PFBR	Pau dos Ferros - RN	26/08/2007

Sismógrafos utilizados e características

Equipamentos:

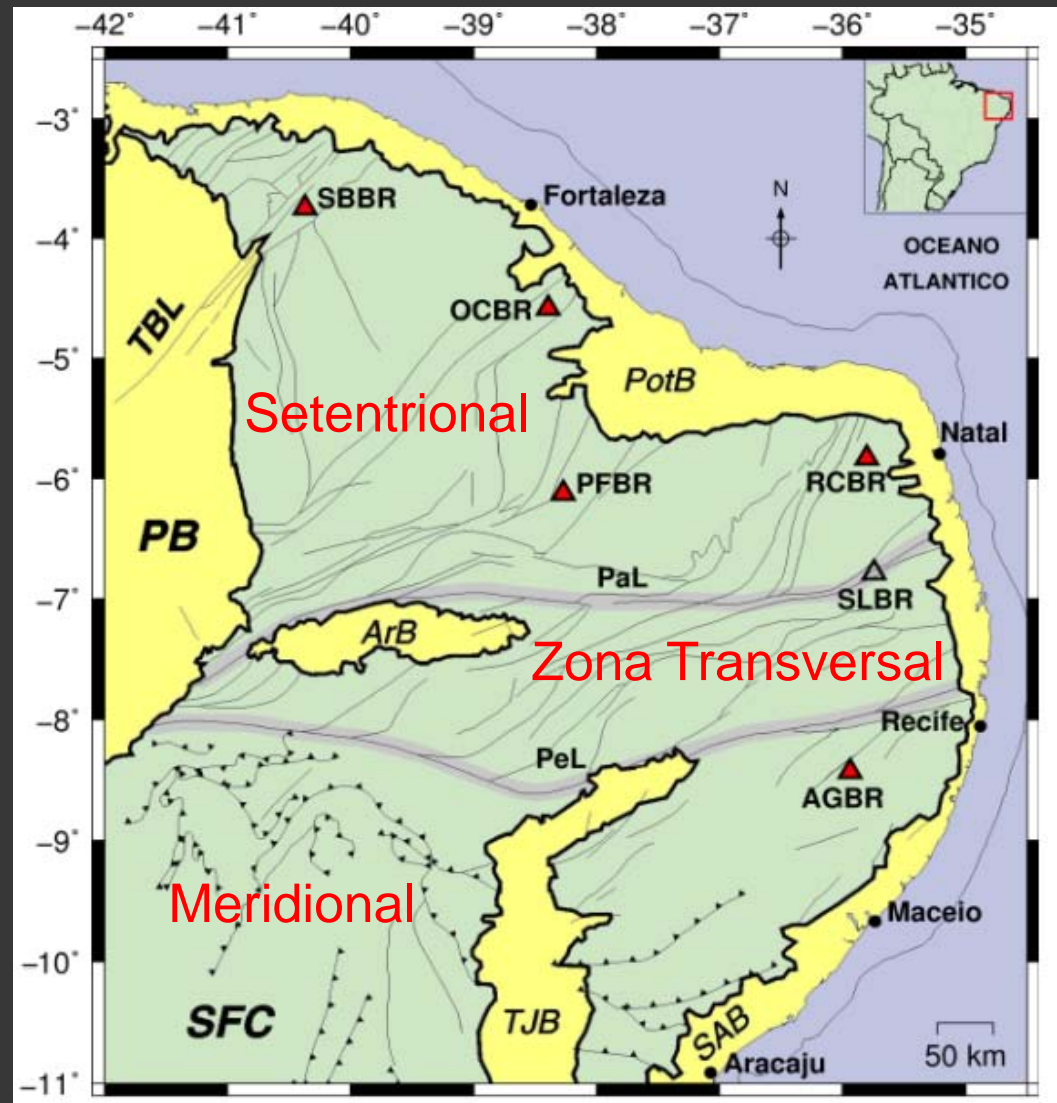
- Sismometro KS-2000;
- Registrador SMART-24R;

Fabricados pela empresa Geotech instruments, com as seguintes características:



O sismometro trabalha no intervalo de 120 s até 50 Hz de frequência. O registrador trabalha com 50 amostras por segundo.

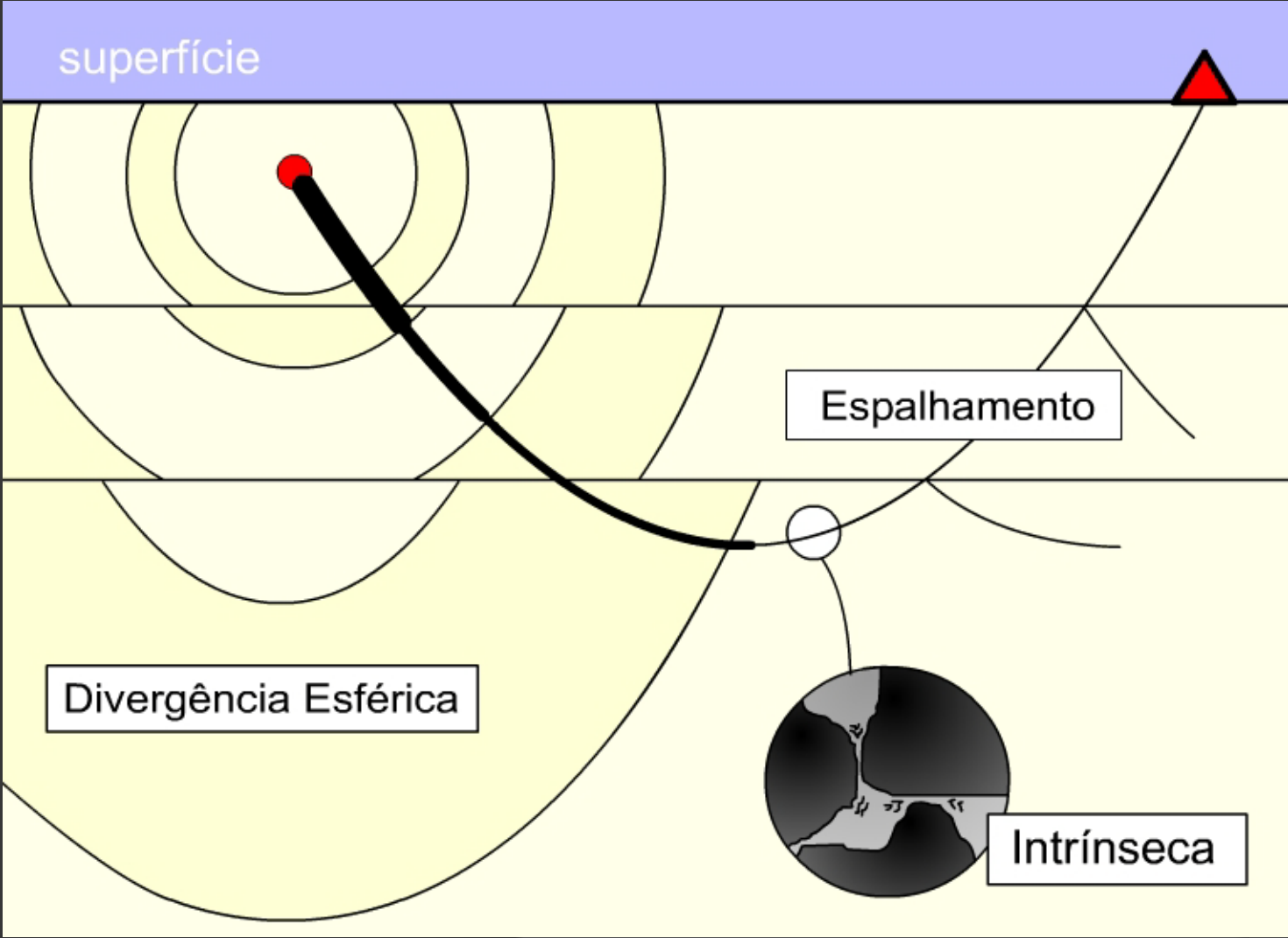
Aspectos tectônicos da P. Borborema



- Área de 450.000 km²
- Rochas de 543 Ma
- Feições de 500 Ma

	Zonas de Cisalhamento
	Lineamentos
	PaL - Lineamento de Patos
	PeL - Lineamento de Pernambuco
	Bacias Sedimentares

Conceito de atenuação

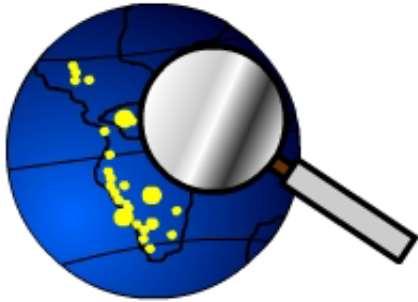


Estrutura da apresentação

- **Objetivos**
- **Introdução**
 - Rede Sismográfica
 - Aspectos Tectônicos
 - Conceito de Atenuação
- **Metodologia**
- Resultados
- Discussão
- Conclusão

Metodologia – Visão Geral

1) Região de Estudo



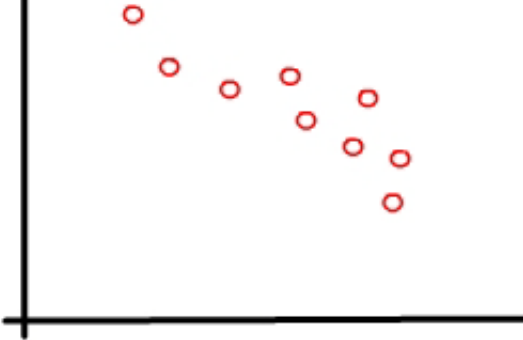
2) Modelo de Atenuação

$$Y(D, M, Z) = ?$$

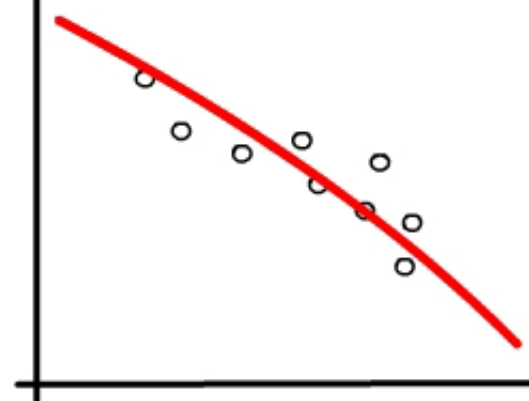
$$Y(D, M) = ?$$

$$Y(D, M, X, T) = ?$$

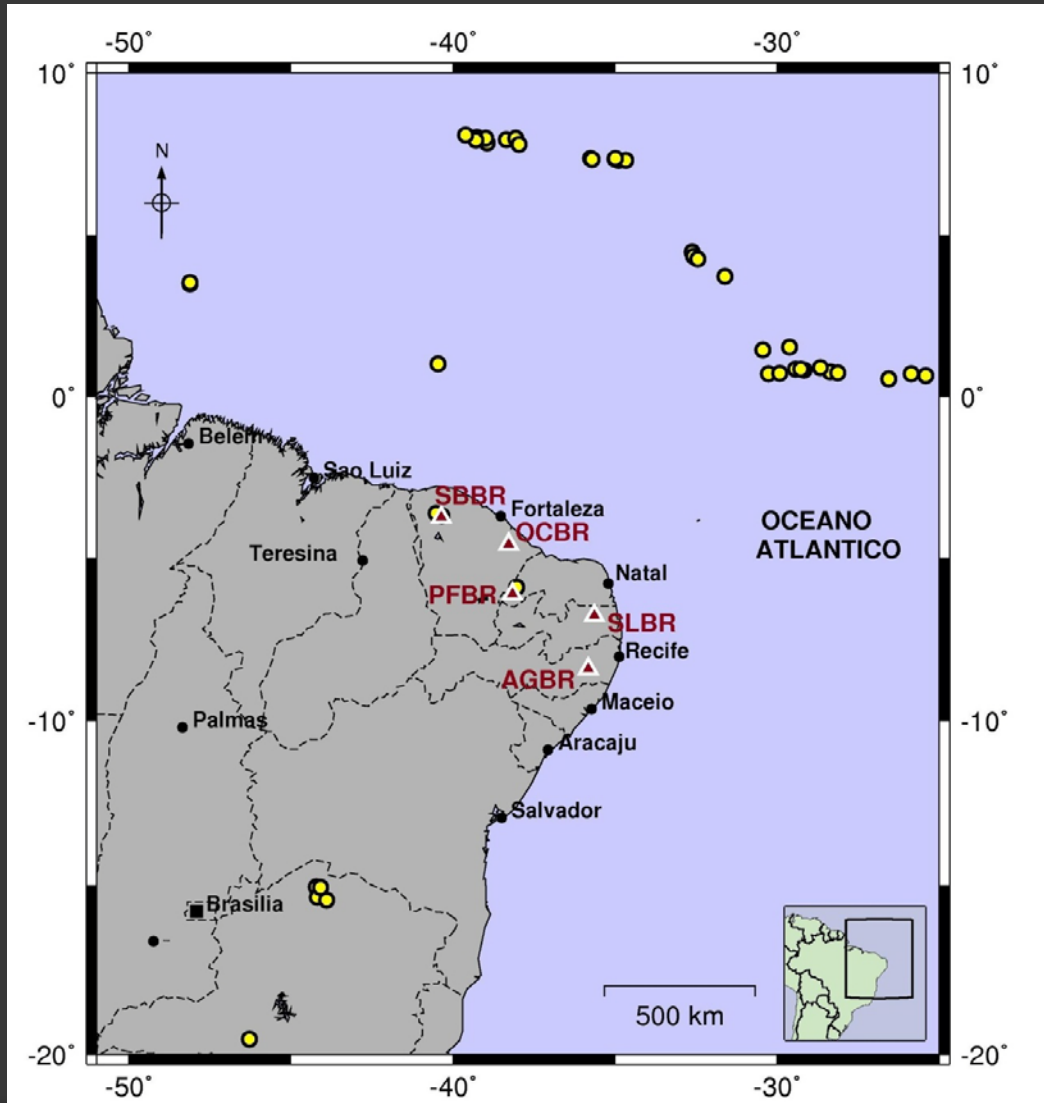
3) Determinação das Variáveis do Modelo



4) Ajuste da Relação



Região de Estudo



➤ Cerca de 3330 km por 2800 km

➤ Eventos encontrados:

- Neic
- BSB
- Hora a hora

Area de estudos Inicial. Eventos retirados do *National Earthquake Information Center (NEIC)* e BSB.

Relação de atenuação

Uma função de atenuação é uma equação matemática que relaciona as vibrações sensíveis a que o solo é submetido com parâmetros relacionados aos terremotos, e tem a seguinte forma geral:

$$\log Y = C_1 + C_2 M - C_3 \log R - C_4 R + \varepsilon$$

Exemplos:

$$\ln Y = 2,07 + 1,2 (M - 6) + 1,28 \log R - 0,05 \max[\ln (R / 100), 0] - 0,0018 R + \varepsilon_e + \varepsilon_a$$

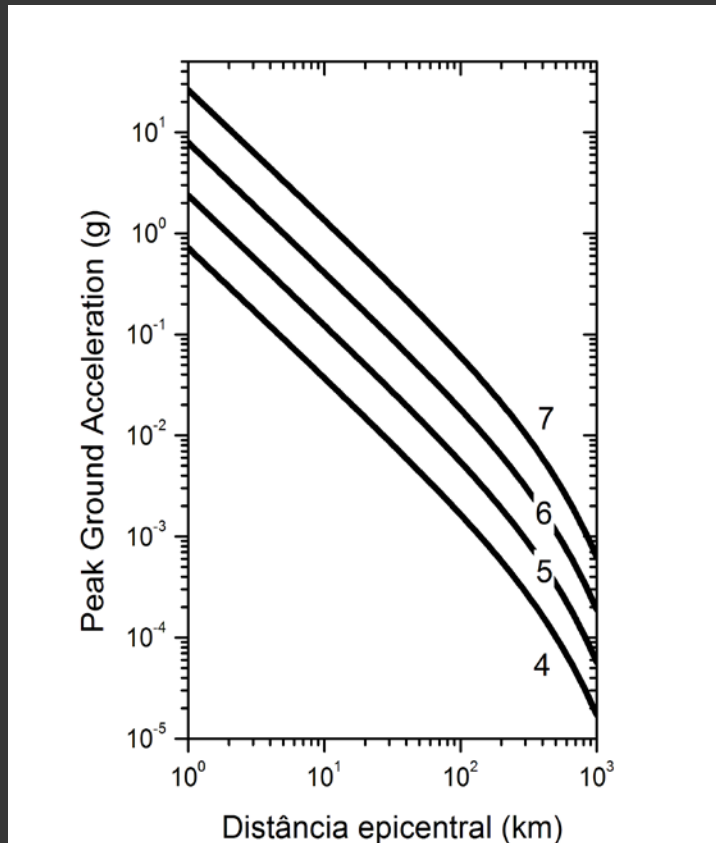
$$\log Y = -2,7809 + 0,5344 M_w - \log (R + 0,0183 \times 10^{0,4537 M_w}) - 0,0015 R$$

$$\ln Y = C_1 \ln (R + C_2) + C_3 R + C_4 M + C_5 + \varepsilon$$

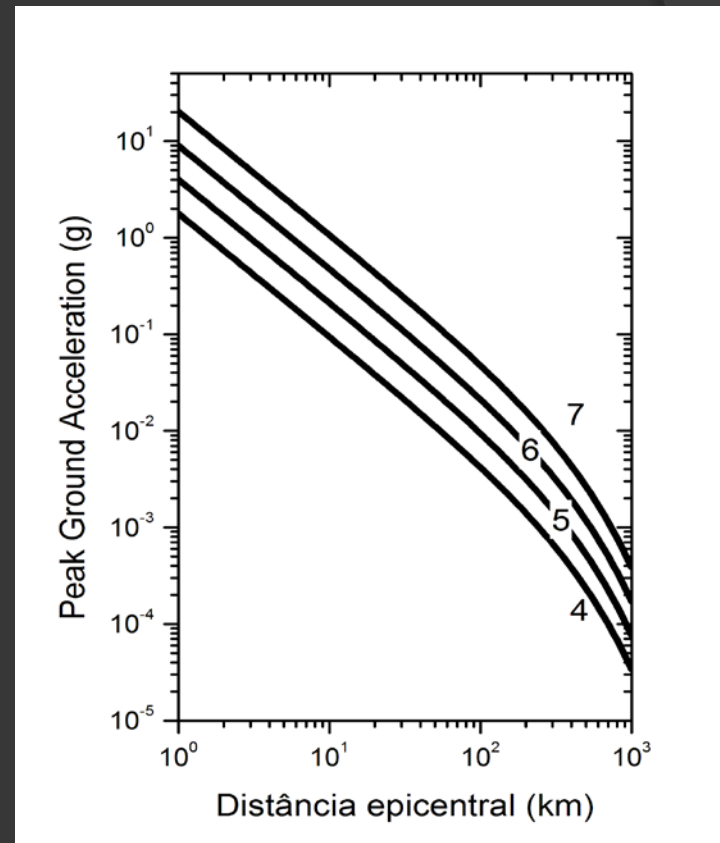
$$\log_{10} (Y) = - 2,08 \log_{10} R - 0,0431 M^2 + 1,21 M - 2,96$$

Relação de atenuação

Exemplo gráfico:



Região intra-continental, utilizando escala Lg de magnitude (TORO et al., 1997)



Região intra-continental, utilizando escala de momento de magnitude (TORO et al., 1997)

Relação de atenuação

Relação de atenuação apresentada por Toro et al.(1997):

$$\ln Y = \underline{C_1} + \underline{C_2}(M-6) + \underline{C_3}(M-6)^2 - \underline{C_4} \log R - (\underline{C_5} - \underline{C_4}) \max[\ln(R/100), 0] - \underline{C_6}R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

Onde:

Y – Peak Ground Acceleration (PGA)

M – Magnitude

R – Distância Hipocentral

ε_a – Incerteza Aleatória

ε_e - Incerteza Epistêmica

C_1 até C_6 – Parâmetros que dependem do ajuste empírico da equação

Modelo da Relação de atenuação (TORO et al., 1997)

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

Esta relação baseia-se em um *modelo* estocástico de excitação da fonte, de efeitos da trajetória que considera uma onda de raios múltiplos e de camadas horizontais da crosta.

Alguns parâmetros levados em consideração:

- **Profundidade focal;**
- **Estrutura de velocidade crustal;**
- **Atenuação inelástica crustal.**

* O intervalo de distâncias hipocentrais do modelo é de 1 até 500 km.

Relação de atenuação

Peak Ground Acceleration, PGA:

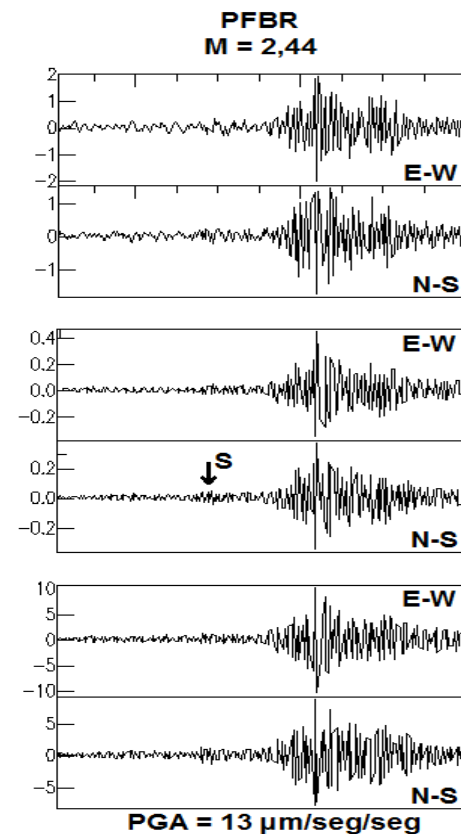
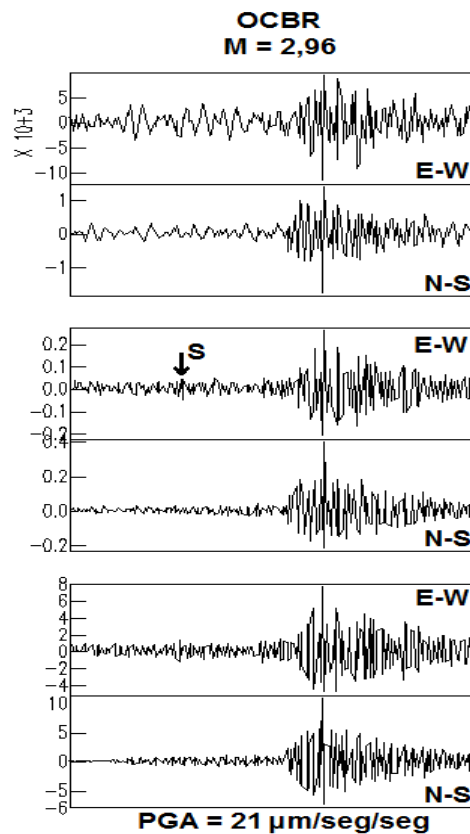
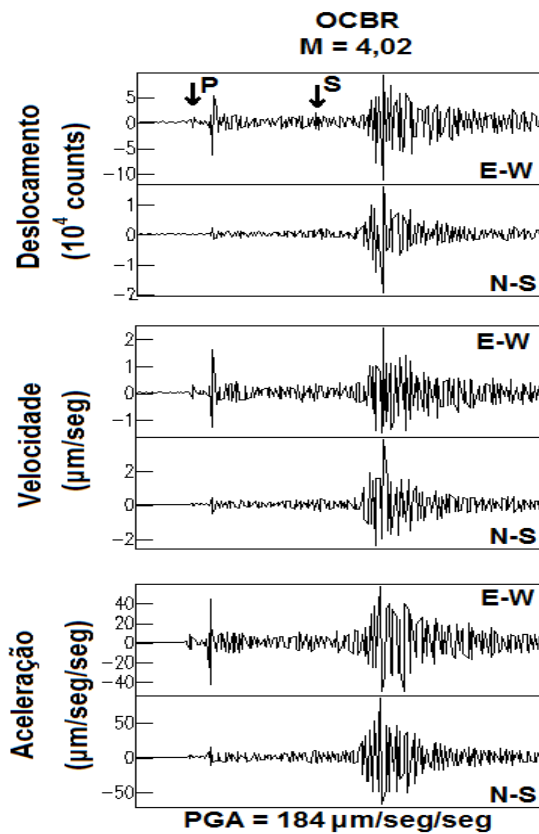
$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

- É a forma de quantificar o movimento máximo que o solo sofreu no momento da passagem das ondas sísmicas.
- Esta quantificação poderia ser feita também em velocidade ou deslocamento
- É representado em unidades de g (cm/seg/seg).

Relação de atenuação

Peak Ground Acceleration, PGA:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$



Exemplo de funcionamento do programa SAC (Seismic Analysis Code)

Relação de atenuação

Magnitude:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

➤ A escala de magnitudes utilizada neste trabalho foi a escala regional de magnitudes (ASSUMPÇÃO, 1983):

$$m_R = \log V + 2,3 \log D - 2,28$$

Onde:

m_R : magnitude com dados regionais para o Brasil, correspondente a m_b ;

V : $2\pi A/T$;

A : amplitude máxima do movimento real do solo em micrômetros (μm);

T : período em segundos, correspondente a A ;

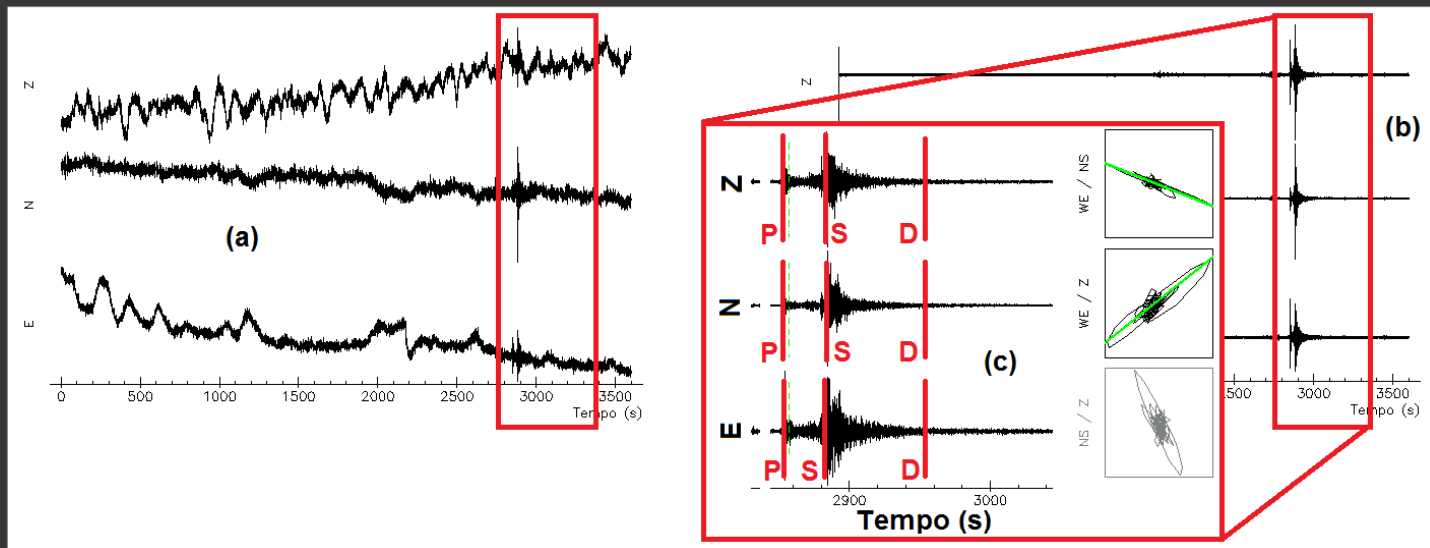
D : distância epicentral em quilômetros ($200 < D < 1500 \text{ km}$);

Relação de atenuação

Distância Hipocentral:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

$$t_s - t_p = \Delta \frac{(V_p - V_s)}{(V_p V_s)}$$

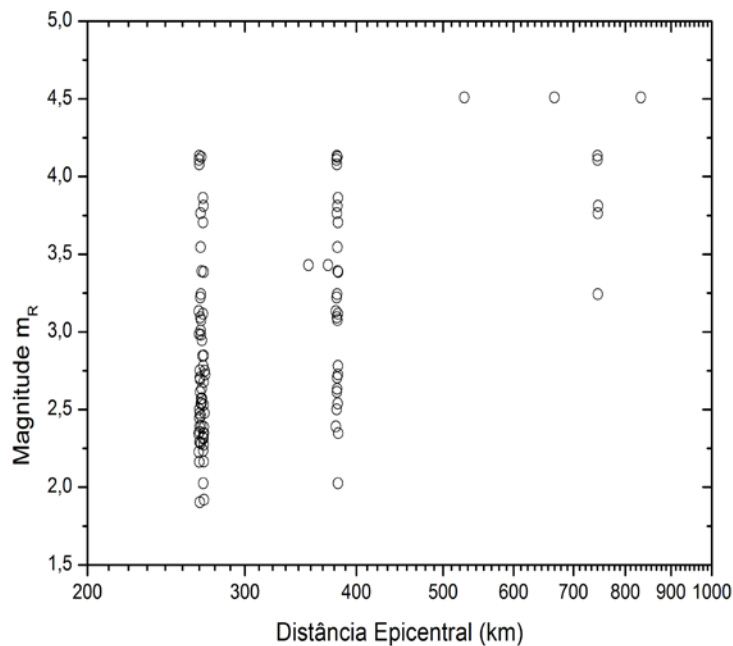


Exemplo de funcionamento do programa WAP (Wave Analysis Program)

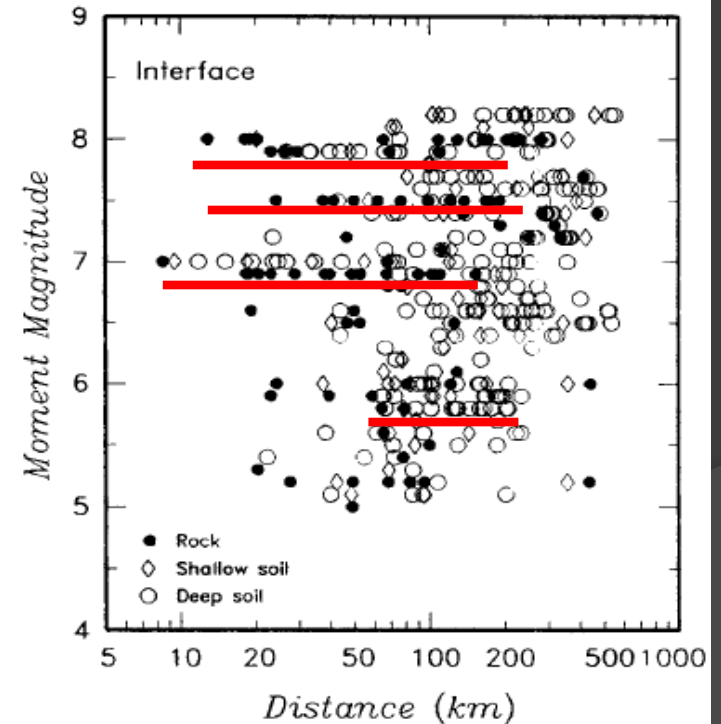
Relação de atenuação

Distância Hipocentral:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$



Distribuição de Magnitude por distância epicentral (Este trabalho).



Distribuição de Magnitude por distância epicentral (Youngs et al., 1997).

Relação de atenuação

Incertezas, epistêmica e aleatória:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

Incerteza epistêmica (ε_e): Incerteza que é devida ao conhecimento e dados incompletos a respeito da física envolvida na ocorrência do terremoto. Quantifica a distribuição log-normal de PGA.

Incerteza aleatória (ε_a): Incerteza inerente a natureza imprevisível de futuros eventos. Quantifica também a incerteza na obtenção das medidas empíricas.

Relação de atenuação

Incertezas, epistêmica e aleatória:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

$$\sigma_e(M) = 0,34 + 0,07 (M-6)$$

$$\sigma_a(M,R) = (\sigma_a(M)^2 + \sigma_a(R)^2)^{0,5}$$

Valores da Incerteza Aleatória dependente da Magnitude

M	5	6	7,5
σ	0,58	0,58	0,44

Valores da Incerteza Aleatória dependente da Distância

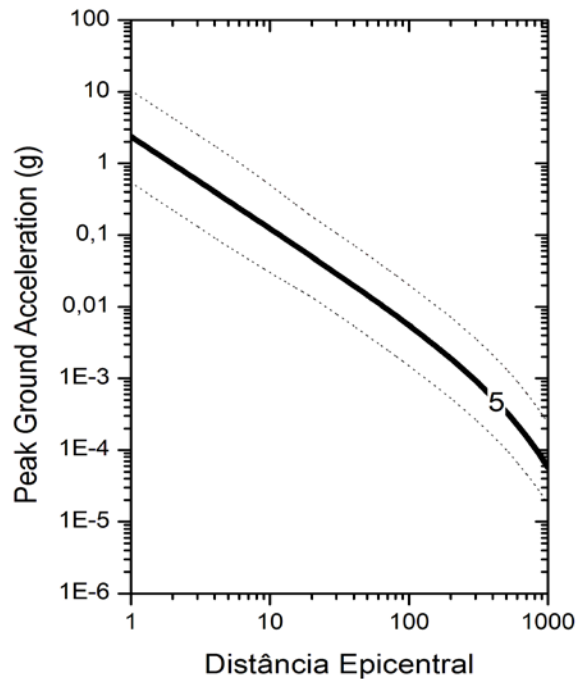
D	< 5 km	> 20 km
σ	0,54	0,20

Relação de atenuação

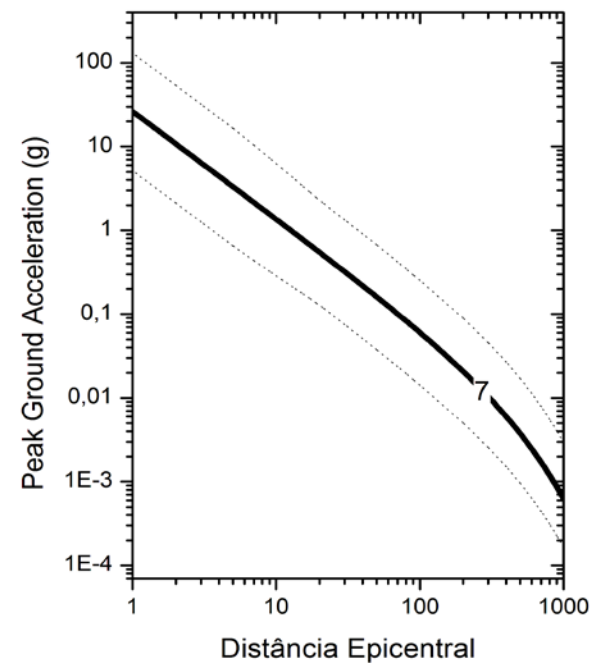
Incertezas, epistêmica e aleatória:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

M = 5.0



M = 7.0



Exemplos gráficos das curvas com as devidas incertezas (TORO et al., 1997)

Relação de atenuação

Observações sobre o modelo:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

- O intervalo de distância hipocentral do modelo é de 1 até 500 km;
- Toro et al. (1997) fornece os valores numéricos das constantes:

$$C_1 = 2,07$$

$$C_2 = 1,2$$

$$C_3 = 0,00000$$

$$C_4 = 1,28$$

$$C_5 = 1,23$$

$$C_6 = 0,0018$$

- As relações de atenuação podem ser divididas por região, se necessário
- É um modelo que se aproxima das condições tectônicas da região NW Da Província Borborema

Nova região de estudo

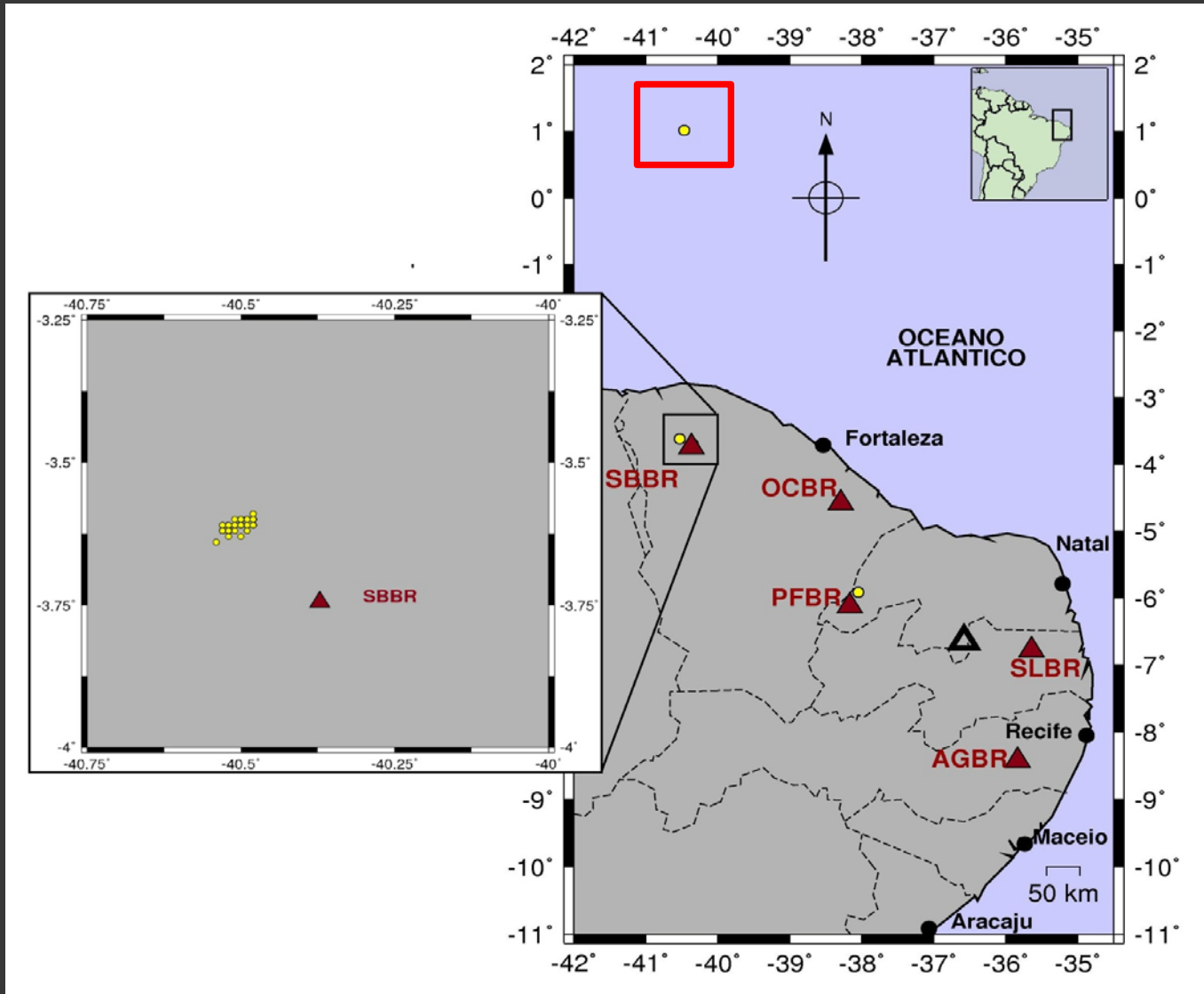
Região

Modelo

Variáveis

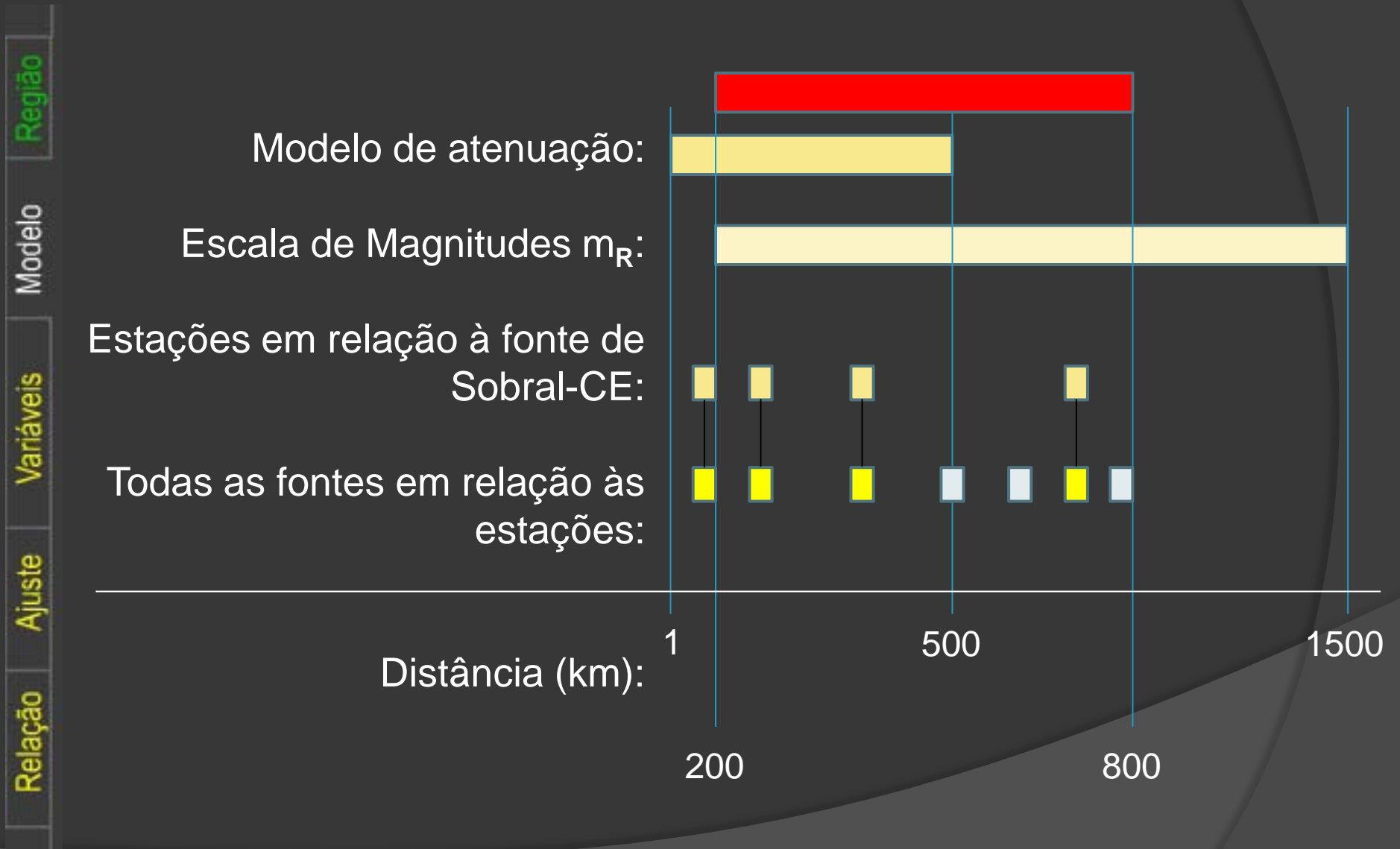
Ajuste

Relação



Qual é, então, a região definitiva de estudo?

Intervalos funcionais

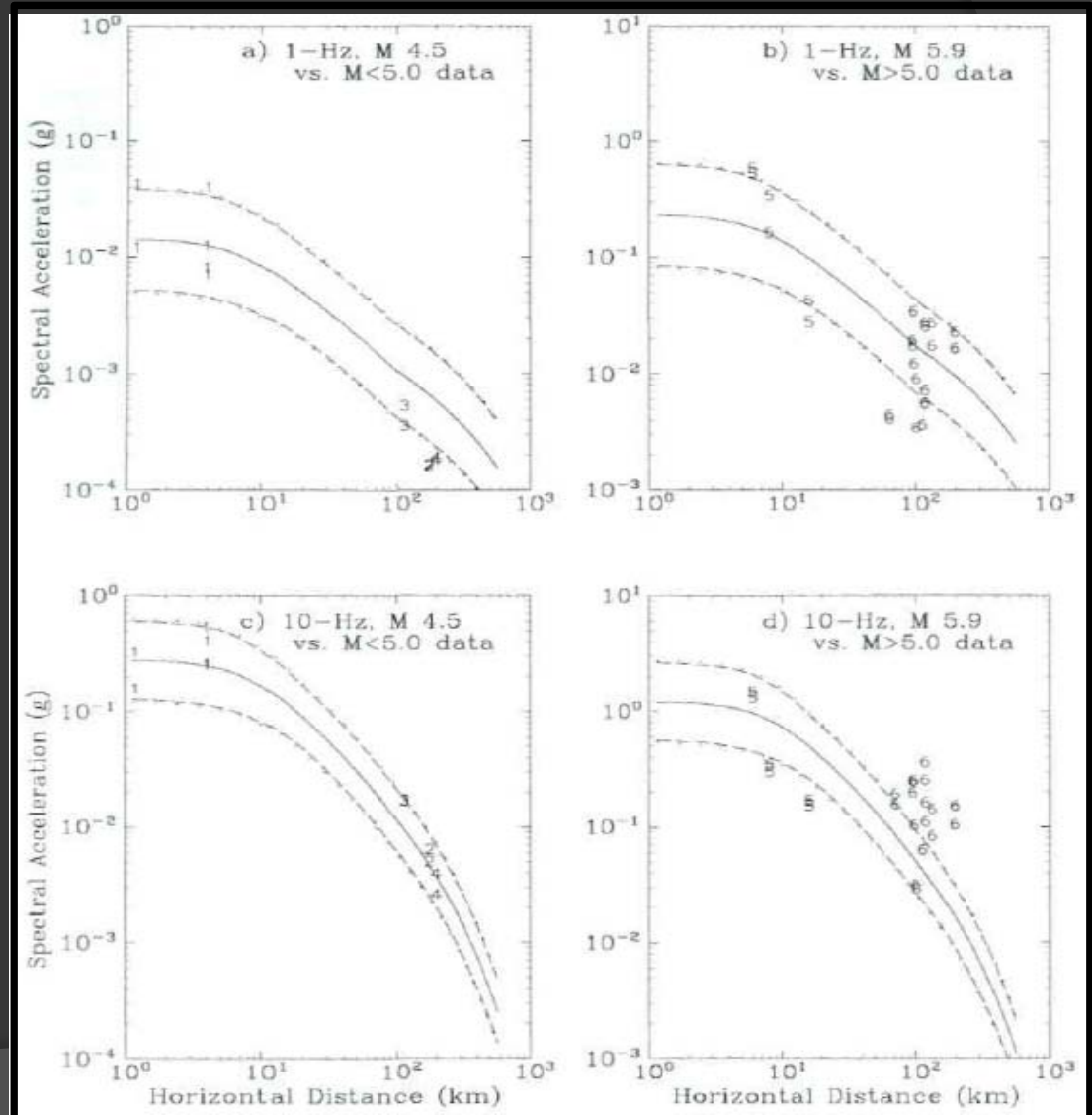


Relação de atenuação

ENTÃO, O QUE É ESPERADO?

Pontos de aceleração exibidos graficamente seguidos do ajuste da curva a estes pontos.

(TORO et al., 1997)



Base de dados

Região

Modelo

Variáveis

Ajuste

Relação

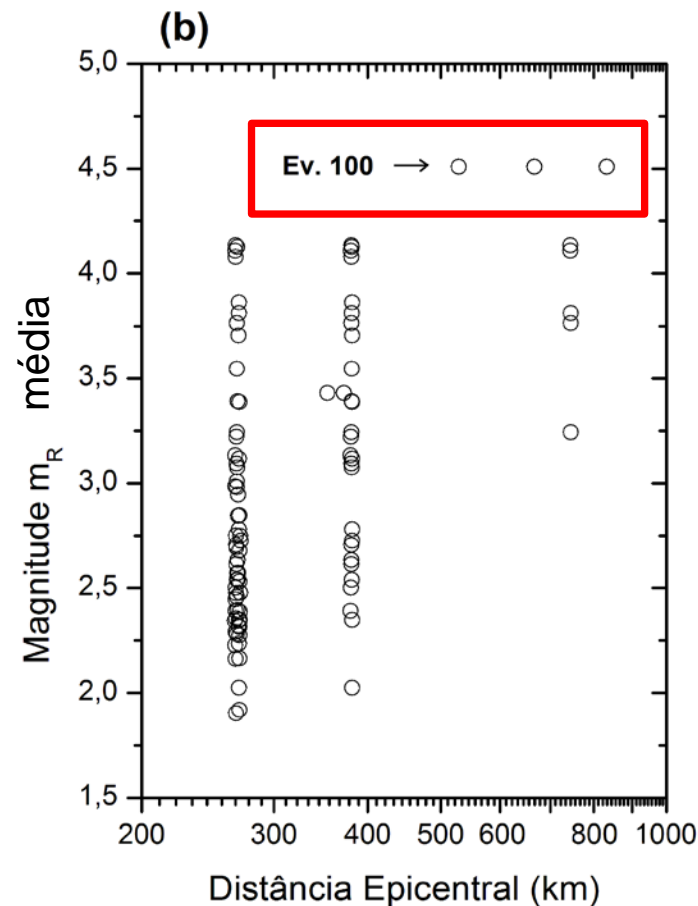
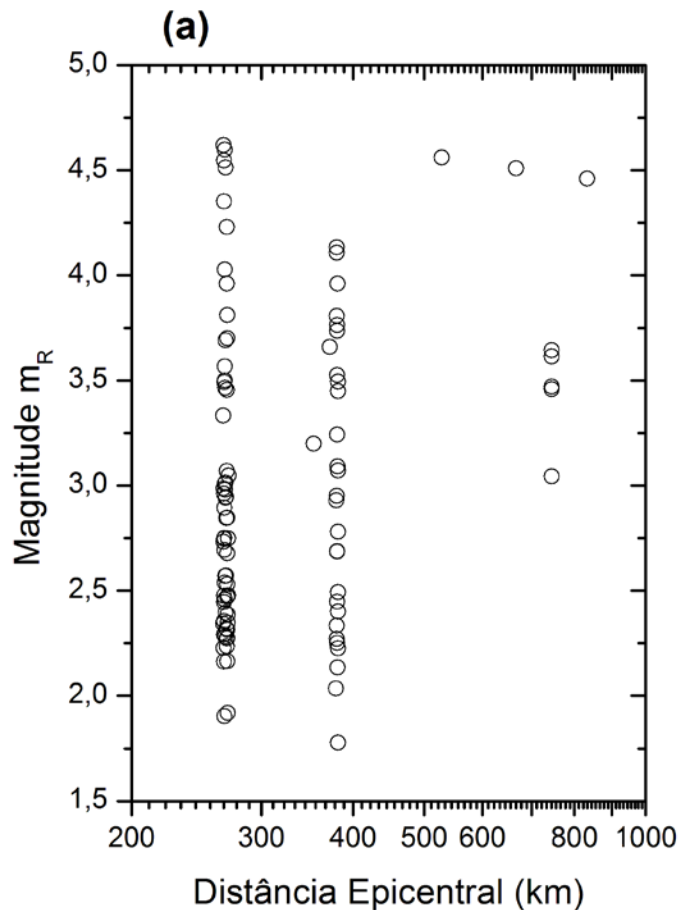
- 100 eventos
- Variando de 1,77 mb até 4,56 mb
- Originados, em sua maioria, na fonte sismogênica de Sobral

Estrutura da apresentação

- **Objetivos**
- **Introdução**
 - Rede Sismográfica
 - Aspectos Tectônicos
 - Conceito de Atenuação
- **Metodologia**
- **Resultados**
- **Discussão**
- **Conclusão**

Resultados

Determinação da magnitudes dos eventos



Distribuição de magnitude por distância epicentral.

Resultados

Determinação dos PGA's dos eventos

Nº Agrupamento	Intervalo Magnitudes	Nº Dados	Intervalo Distância (km)	Intervalo PGA (cm/seg/seg)
1	4,08~4,50	11	266,63~744,86	$1,10 \times 10^{-06} \sim 8,84 \times 10^{-05}$
2	3,71~3,86	10	267,73~745,57	$7,76 \times 10^{-06} \sim 1,25 \times 10^{-04}$
3	3,22~3,55	11	267,51~745,30	$1,75 \times 10^{-06} \sim 1,89 \times 10^{-05}$
4	3,01~3,13	9	266,45~381,51	$1,60 \times 10^{-06} \sim 6,67 \times 10^{-06}$
5	2,70~2,99	13	266,57~381,53	$4,04 \times 10^{-07} \sim 2,61 \times 10^{-06}$
6	2,48~2,69	16	266,82~281,21	$3,34 \times 10^{-07} \sim 1,56 \times 10^{-06}$
7	2,31~2,46	14	266,29~381,62	$2,19 \times 10^{-07} \sim 7,92 \times 10^{-07}$
8	1,90~2,29	12	266,54~381,53	$1,11 \times 10^{-07} \sim 8,65 \times 10^{-07}$
8	1,90~4,13	96	266,29~745,57	$1,11 \times 10^{-07} \sim 1,25 \times 10^{-04}$

Região

Modelo

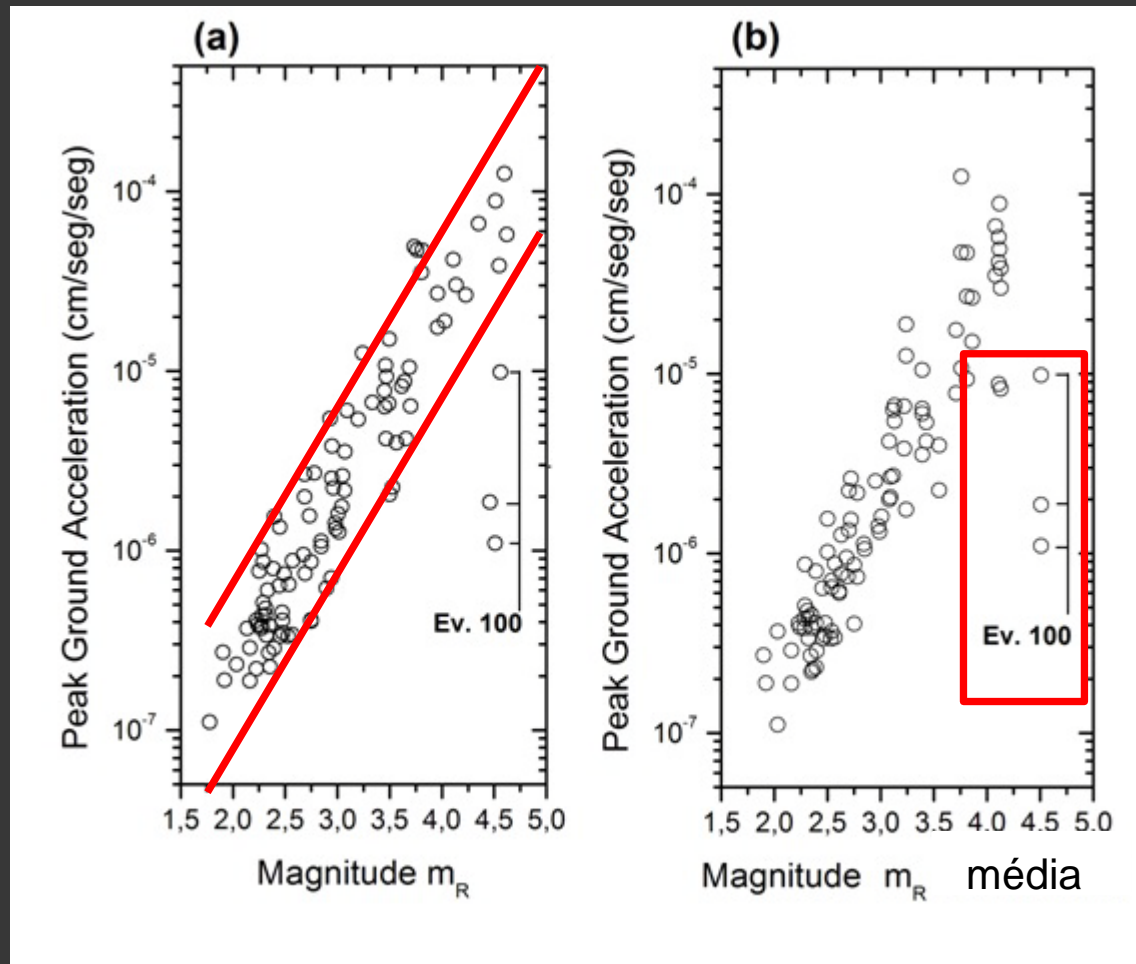
Variáveis

Ajuste

Relação

Resultados

Variação do PGA com a magnitude

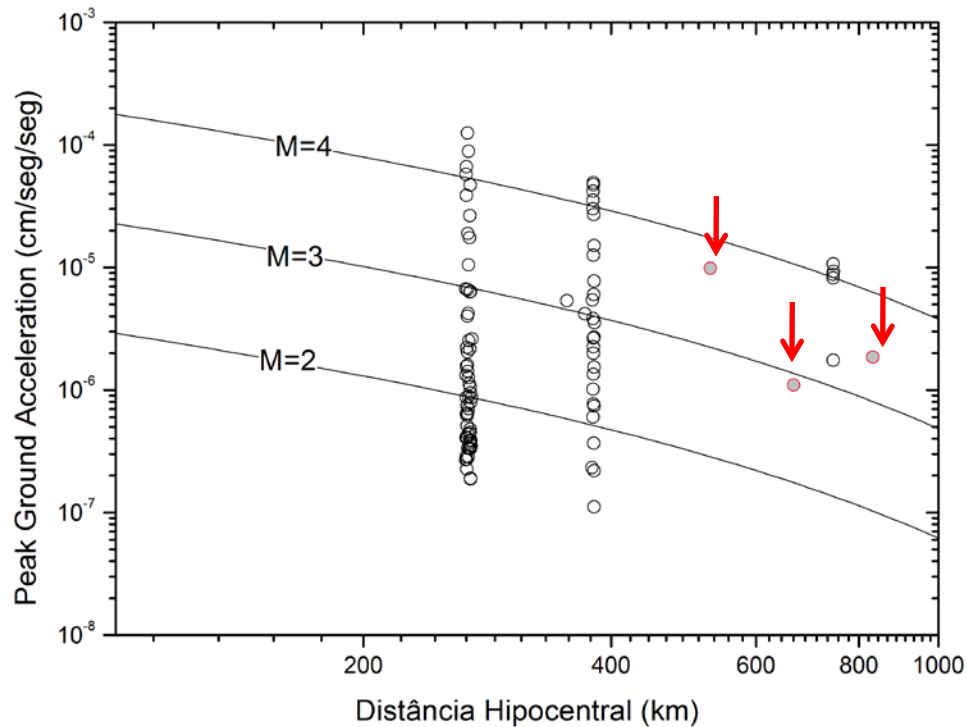


Variação do PGA com a magnitude.

Resultados

Lembrando:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$



$$\begin{aligned} C_1 &= 1,82769 \\ C_2 &= 2,05647 \\ C_3 &= 0,00000 \\ C_4 &= 1,33367 \\ C_5 &= 0,85952 \\ C_6 &= 0,00208 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 2,07 \\ C_2 &= 1,2 \\ C_3 &= 0,00000 \\ C_4 &= 1,28 \\ C_5 &= 1,23 \\ C_6 &= 0,0018 \end{aligned}$$

Resultado da regressão não-linear

Resultados

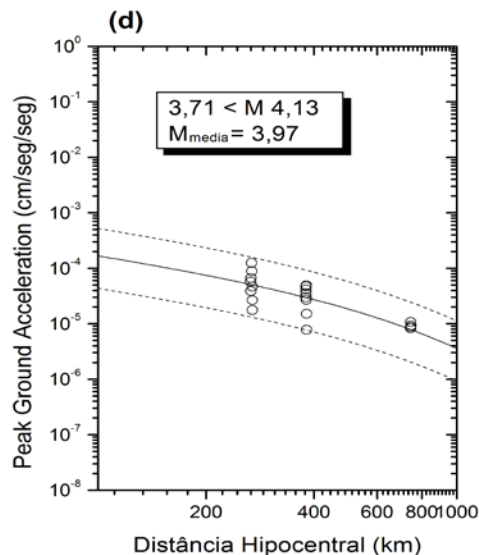
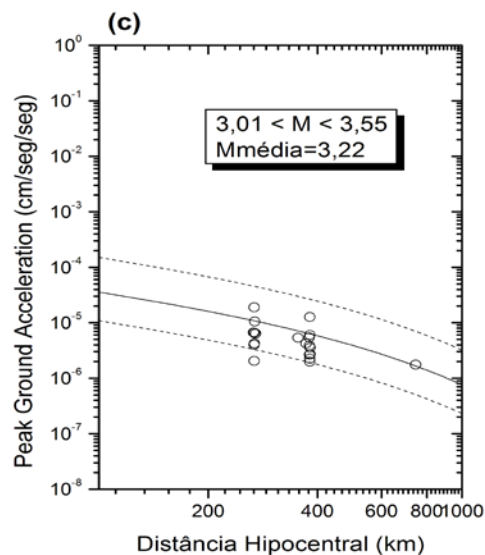
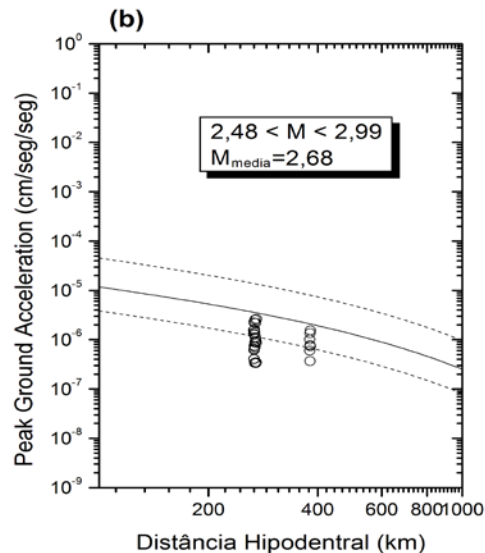
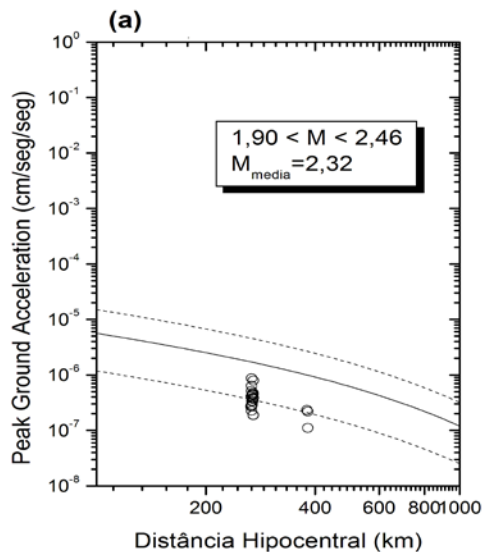
Lembrando:

$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \log R - (C_5 - C_4) \max[\ln(R/100), 0] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

Relação preliminar obtida:

$$\ln Y = 1,82769 + 2,05647(M-6) - 1,33367 \log R - (0,85952 - 1,33367) [\ln(R/100)] - C_6 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e$$

Resultados



Curvas para avaliação da relação obtida:

(a) $M = 2,32$

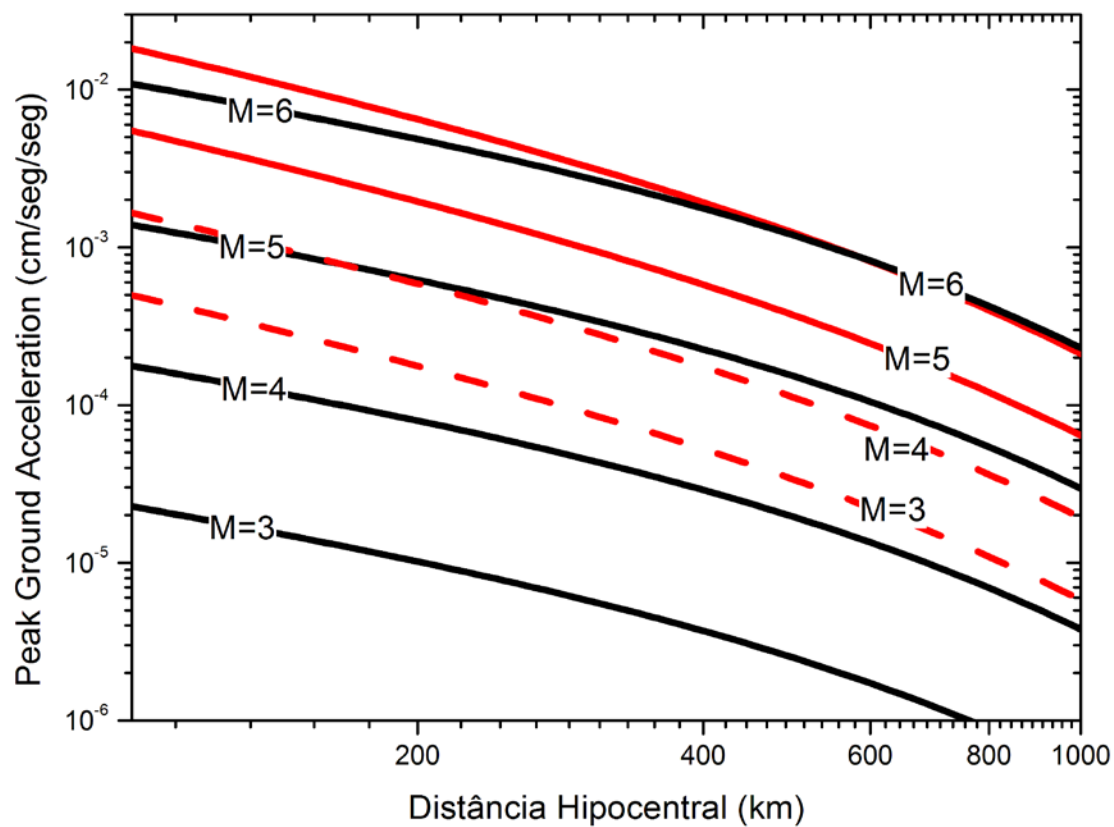
(b) $M = 2,68$

(c) $M = 3,22$

(d) $M = 3,97$

Resultados

Comparação com curvas sugeridas por Toro et al. (1997)



Em vermelho: Toro et al. (1997); Em preto: este trabalho

Conclusão

- O objetivo de adequar a relação de atenuação proposta por Toro et al. (1997) realizado com sucesso;
- Maior confiança da relação preliminar de atenuação obtida para eventos de magnitude maior que 3,5 mR;
 - Intervalo de Toro et al. (1997) de 5,0 até 8,0 de magnitude Lg.
 - Intervalo deste trabalho de 1,7 até 4,5 mR.
- Evento 100, possível divisão de dados e curvas;
- O número de estações da RSB é um fator limitante na determinação da relação;
- Uma das contribuições deste trabalho é a metodologia utilizada, que poderá ser utilizada por outros autores;
- Futuros trabalhos sugeridos:
 - Desenvolvimento de um modelo para a região
 - Determinação de uma relação mais completa, com mais estações
 - Análise espectral do *Peak Ground Acceleration*

Agradecimentos

A todos os professores doutores membros da banca de avaliação;

Ao Orientador Prof. Dr. Jesus Berrocal;

Aos funcionários da empresa Berrocal&Associados;

À CNPq pela bolsa RHAE concedida;

Aos amigos do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas;

À minha família.

Referências Bibliográficas

ASSUMPÇÃO, M. A regional magnitude scale for Brazil. **Bulletin of Seismological Society of America**, Estados Unidos, v. 73, n. 1, p. 237-246, 1983.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas & SIG. **CPRM – Serviço Geológico do Brasil**, p. 264-274, 2003.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. Tectonic Evolution of South America. **INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS**, 31., 2000, Rio de Janeiro. p. 151-182.

LIU, K; TSAI, Y. Attenuation Relationships of Peak Ground Acceleration and velocity for Crustal Earthquakes in Taiwan. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 95, n. 3, p. 1045–1058, 2005.

Referências Bibliográficas

PÉTURSSON, G. G.; VOGFJÖRÐ, K. S. Attenuation relations for near- and farfield peak ground motion (PGV, PGA) and new magnitude estimates for large earthquakes in SW-Iceland. Icelandic Meteorological Office, 2009.

TORO, G.R.; ABRAHAMSON, N. A.; SCHNEIDER, J.F. A Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties. **Seismological Research Letters**, v. 68, n. 1, p. 41-57, 1997.

ULUTAS, E; OZER, M. F. Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for Eastern Marmara region in Turkey. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 35, n. 1A, p. 187-203, 2010.

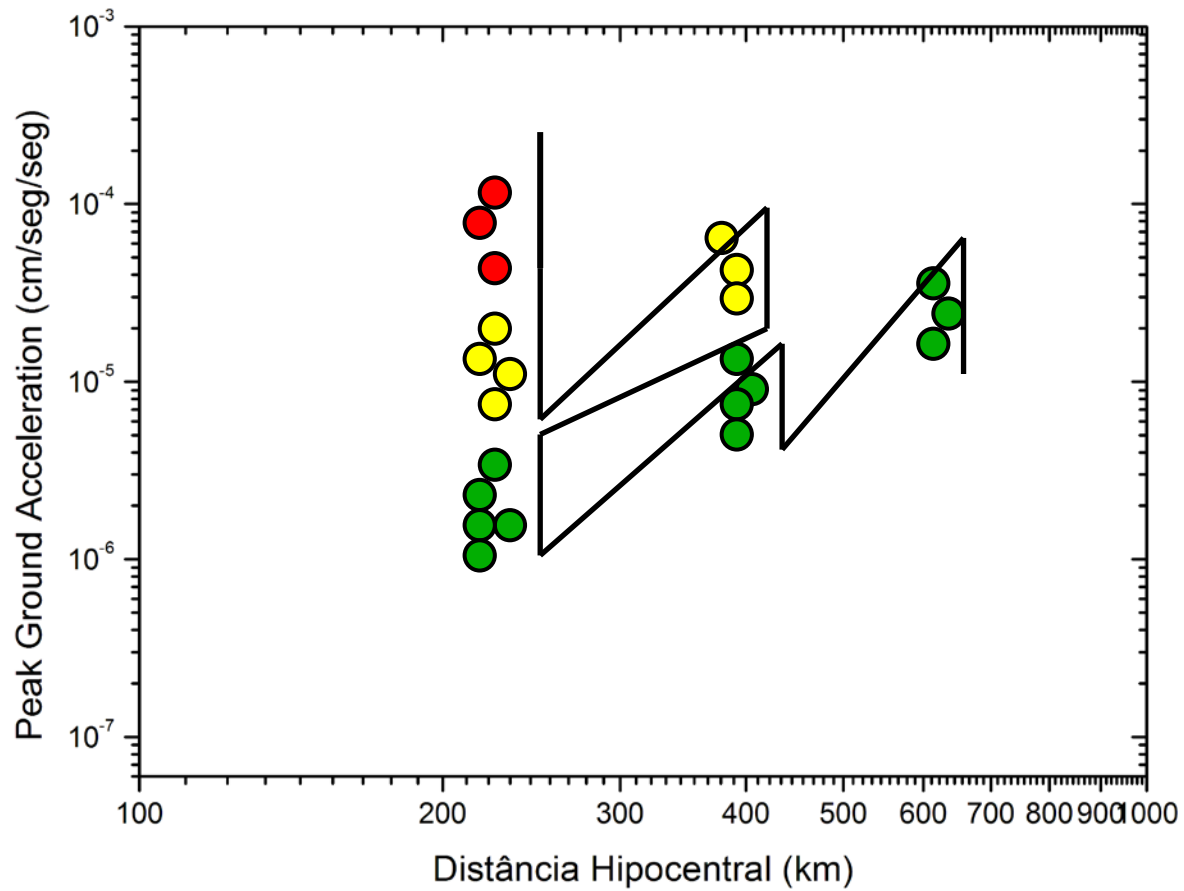
YOUNGS, R. R.; SILVA, W. J.; HUMPHREY, J. R. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. **Seismological Research Letters**, v. 68, n. 1, p. 58-73, 1997.

OBRIGADO PELA ATENÇÃO!!

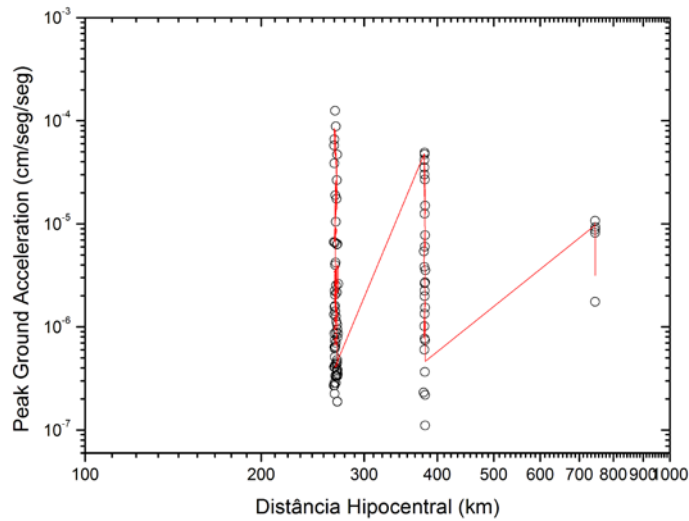
ORDEM E PROGRESSO



Anexos

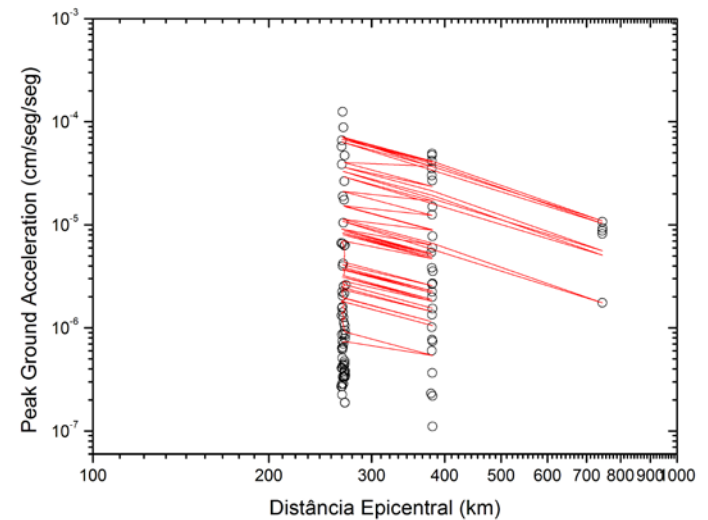


Anexos

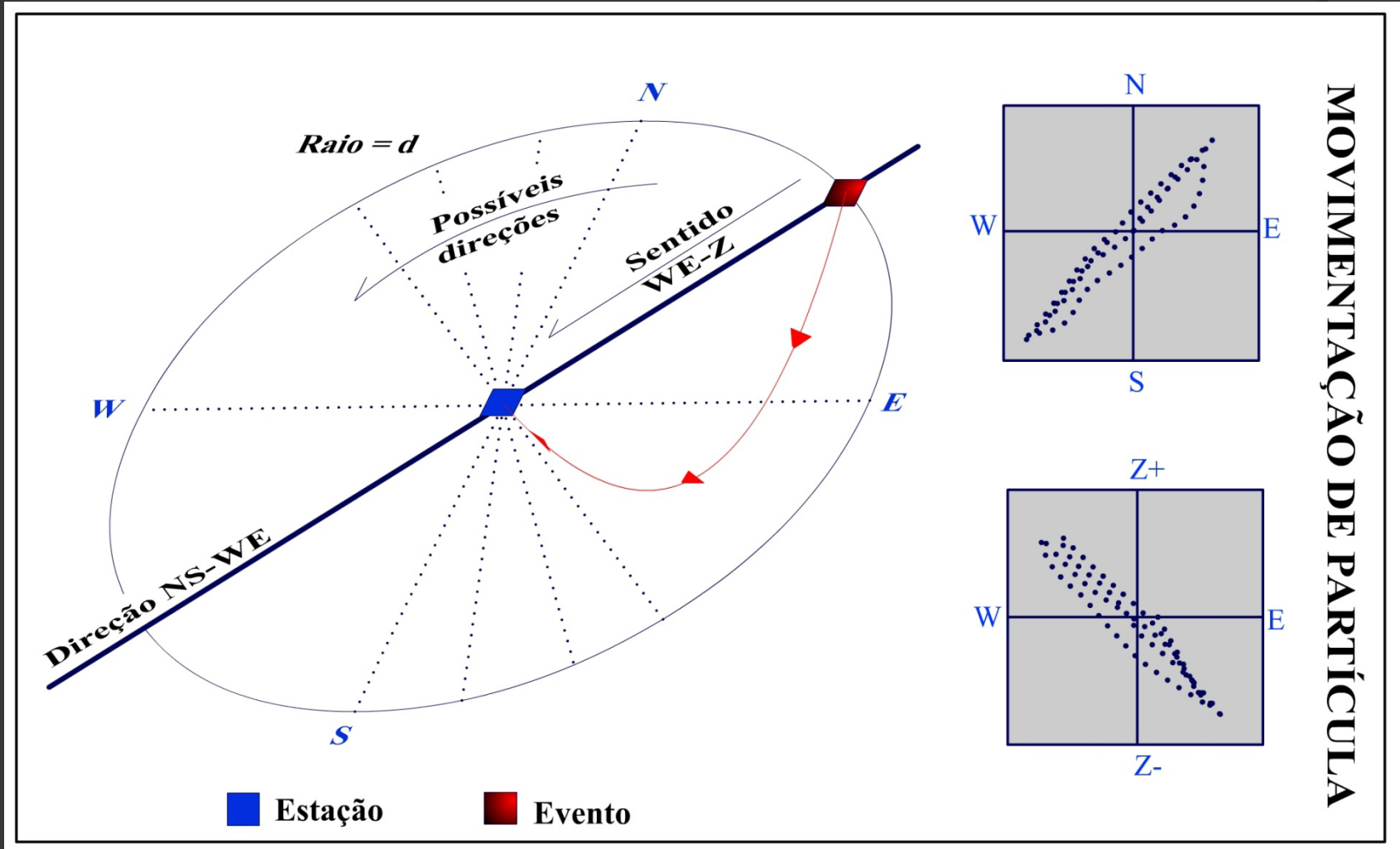


Algoritmo de regressão SEM
normalização de magnitudes.

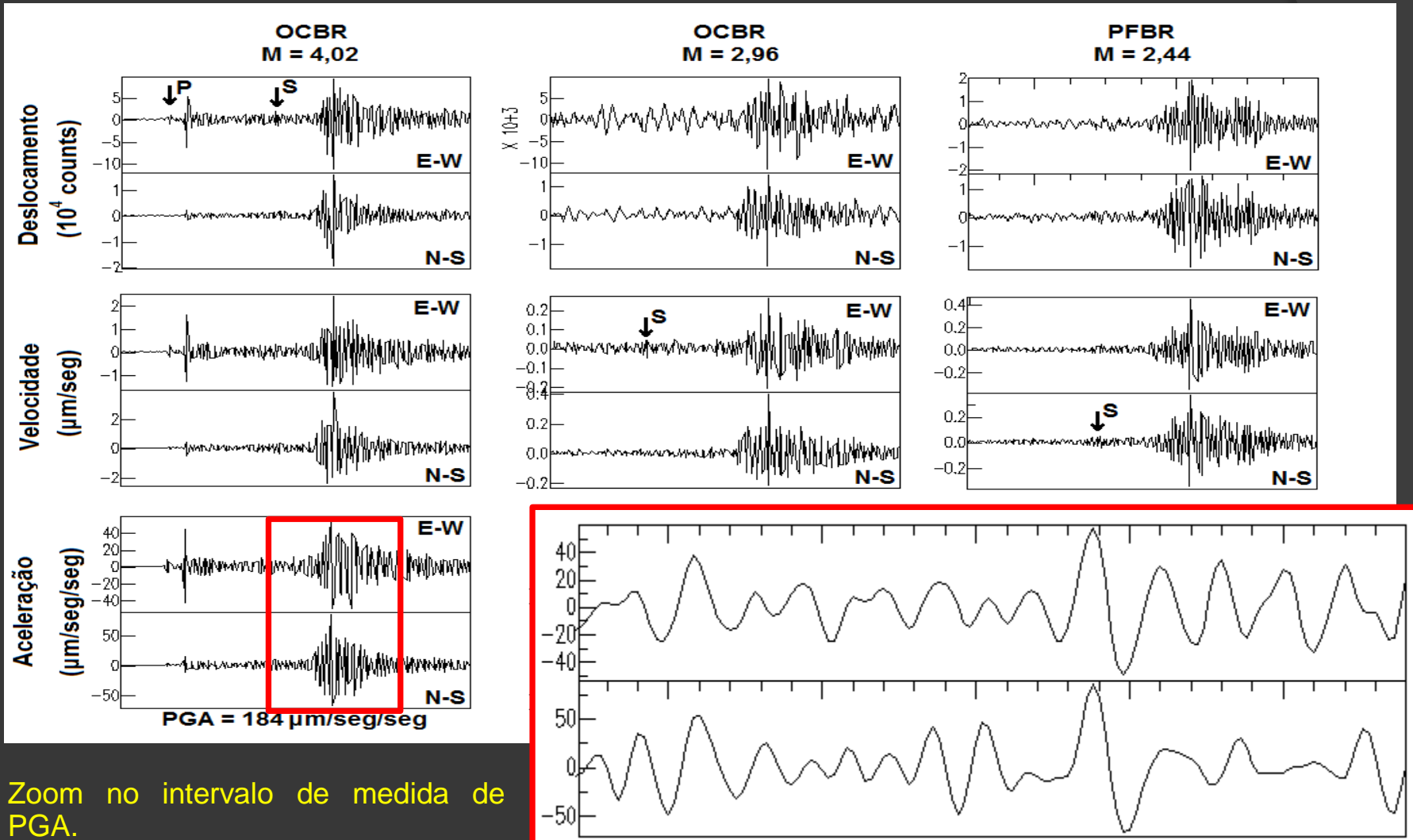
Algoritmo de regressão COM
normalização de magnitudes.



Anexos

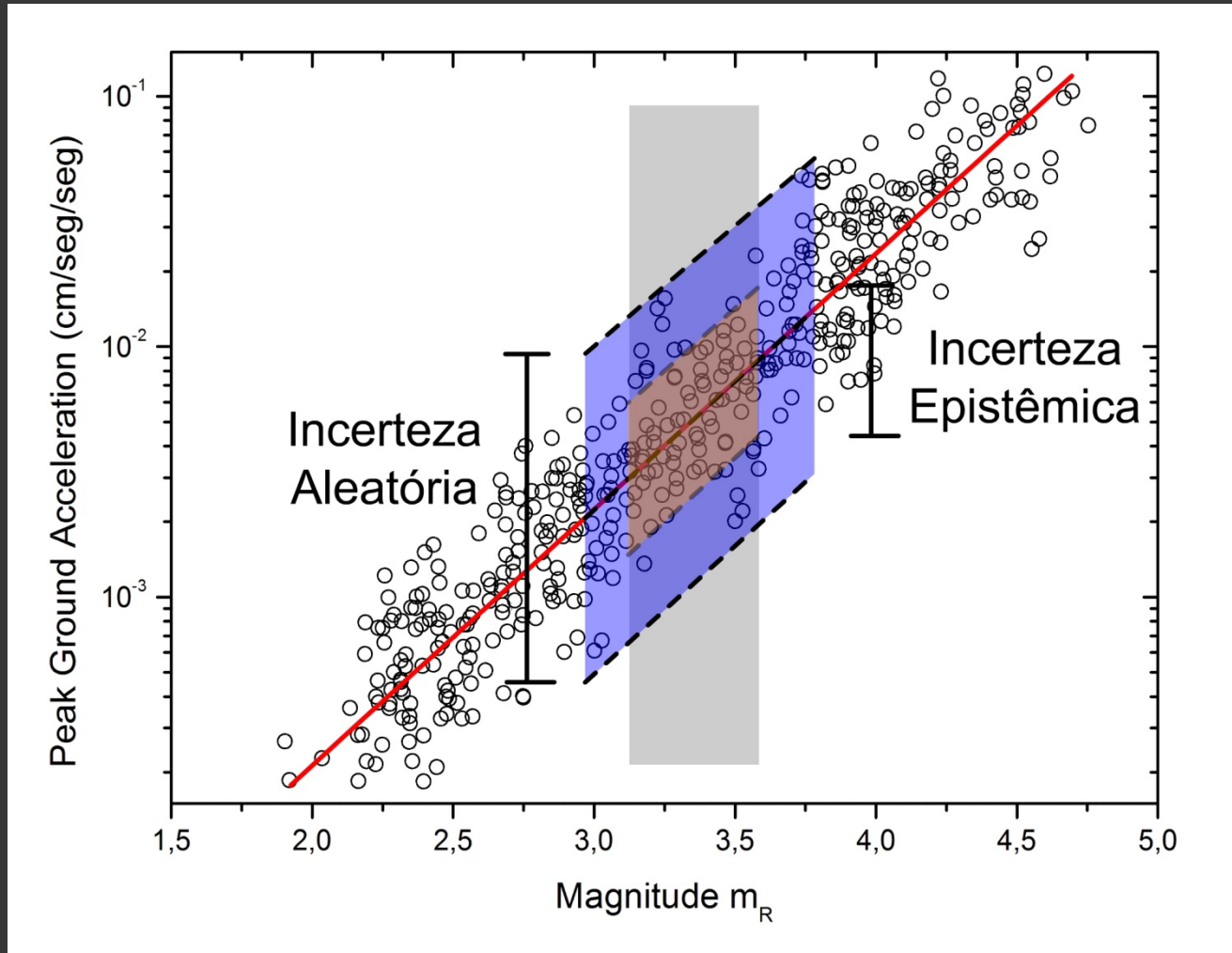


Anexos



Zoom no intervalo de medida de PGA.

Anexos



Representação hipotética da relação das incertezas com os valores de PGA