

Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilística de ameaça sísmica

Marlon Pirchiner

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À
ESCOLA DE MATEMÁTICA APLICADA DA
FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS-RJ
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM CIÊNCIAS

Programa: Modelagem Matemática de Informação

Orientador: Prof. Dr. Vincent Guigues

Coorientador: Prof. Dr. Stephane Drouet

Rio de Janeiro, maio de 2014

Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilistica de ameaça sísmica

Esta é a versão original da dissertação elaborada pelo candidato Marlon Pirchiner, tal como submetida à Comissão Julgadora.

Agradecimentos

A todos do Grupo de Sismologia (e também a todo pessoal) do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) por todo apoio e suporte de sempre e durante o tempo em que estive entre o curso de mestrado e o trabalho.

Aos companheiros e professores pelas conversas e discussões ao longo do curso.

Aos meus amigos e familiares pela benevolência de sempre.

Resumo

PIRCHINER, M. **Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilística de ameaça sísmica.** 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Matemática Aplicada, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2014.

Elemento obrigatório, constituído de uma sequência de frases concisas e objetivas, em forma de texto. Deve apresentar os objetivos, métodos empregados, resultados e conclusões. O resumo deve ser redigido em parágrafo único, conter no máximo 500 palavras e ser seguido dos termos representativos do conteúdo do trabalho (palavras-chave).

Palavras-chave: smoothing, zoneless, seismic hazard, earthquake engineering.

Abstract

PIRCHINER, M. **Long-term non-parametric probabilistic seismic hazard analysis for Brazil.** 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Matemática Aplicada, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2014.

Elemento obrigatório, elaborado com as mesmas características do resumo em língua portuguesa. De acordo com o Regimento da Pós- Graduação da USP (Artigo 99), deve ser redigido em inglês para fins de divulgação.

Keywords: keyword1, keyword2, keyword3.

Sumário

Lista de Abreviaturas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Considerações Preliminares	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Contribuições	2
1.4 Organização do Trabalho	2
2 Contexto Teórico	3
2.1 Tectônica	3
2.1.1 Teoria tectônica das placas	4
2.1.2 Sismotectônica	5
2.2 Sismicidade	5
2.2.1 Ocorrência	6
2.2.2 Magnitude (da ruptura)	6
2.2.3 Catálogos	8
2.2.4 Distribuição de Frequência e Magnitude	9
2.3 Taxa de Sismicidade	11
2.4 Risco Sísmico	12
2.5 Ameaça Sísmica	13
2.5.1 Projeção da Ocorrência de Rupturas	13
2.6 Análise Probabilística de Ameaça Sísmica	14
2.6.1 Caracterização de Fontes Sísmicas	14
2.6.2 Caracterização	14
2.6.3 Predição do Movimento do Chão	15
2.6.4 Cálculo da Curvas de Ameaça	15

3 Região de Estudo	17
3.1 Contexto Tectônico Sul-Americanano	17
3.1.1 Sismicidade Sul Americana	17
3.2 Contexto Tectônico Brasileiro	17
3.3 Sismicidade Brasileira	17
3.3.1 Nordeste	18
3.3.2 Sul, Sudeste e Litoral Leste	18
3.3.3 Centro-Norte	18
3.3.4 Mato-Grosso	18
3.3.5 Extremo Oeste	18
3.4 Extremo Oeste	18
4 Metodologia	19
4.1 Apresentação	19
4.2 Técnicas de suavização	19
4.2.1 Frankel, 1995	19
4.2.2 Woo, 1996	19
4.2.3 Helmstetter, 2012	20
5 Processamento	21
5.1 Conjunto de Dados	21
5.1.1 Fonte e Disponibilidade de Dados	21
5.2 Ferramentas	21
5.2.1 Programas	21
5.2.2 Linguagens	22
5.2.3 Bibliotecas	22
5.2.4 Implementações	22
5.3 Pré-Processamento	22
5.3.1 Checagem de Qualidade	22
5.3.2 Remoção de agrupamentos	22
5.3.3 Conversão de Magnitudes	22
5.3.4 Análise da Completude	23
5.4 Frankel, 1995	23
5.5 Woo, 1996	23
5.6 Helmstetter, 2012	23
5.7 Pós-Processamento	23
5.7.1 Cálculo da Ameaça Sísmica	23
5.7.2 Cálculo da Desagregação	23

6 Resultados	25
6.1 Resultados Anteriores	25
6.1.1 GSHAP	25
6.1.2 Zoneamento Sísmico	25
6.2 Suavização da Sismicidade	25
6.2.1 Frankel, 1995	27
6.2.2 Woo, 1996	27
6.2.3 Helmstetter, 2012	28
7 Conclusões	31
7.1 Considerações Finais	31
7.2 Sugestões para Pesquisas Futuras	31
A Sequências	33
Referências Bibliográficas	35
Glossário	37
Índice Remissivo	39

Lista de Abreviaturas

PSHA Probabilistic Seismic Hazard Analysis. 15

Listas de Símbolos

A área afetada. 7

M_0 momento sísmico. 7

M_W magnitude de momento sísmico. 7

μ_{rig} coeficiente de rigidez da rocha. 7

\tilde{D} deslocamento médio. 7

m magnitude. 6

r lugar no espaço. 6

t tempo. 6, 7

km kilometros. 4

Listas de Figuras

2.1	Mapa Mundial de Epicentros 1963-1998	3
2.2	Cartografia das placas litosféricas	4
2.3	Diferentes tipos de interações entre placas litosféricas em suas bordas	5
2.4	Ilustração da área de ruptura em um falhamento geológico	6
2.5	Distribuições de frequência e magnitude	11
6.1	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Dourado, 2014, Crisis-2007]	26
6.2	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Dourado, 20014] OpenQuake-Engine . .	26
6.3	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Frankel, 1995]	27
6.4	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Frankel, 1995]	28
6.5	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Woo, 1996]	29
6.6	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Woo, 1996]	29
6.7	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Helmstetter, 2012]	30
6.8	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Helmstetter2012]	30

Lista de Tabelas

2.1 Escala simplificada de intensidade sísmica, modificada em 1956 a partir da escala original de Giuseppe Mercalli de 1902	8
A.1 Exemplo de tabela.	34

Capítulo 1

Introdução

Um elemento primordial na análise de *risco* sísmico é a análise da *ameaça* sísmica, onde a identificação e caracterização das fontes sismogênicas (causadoras de movimento do chão, fundamentalmente tremores de terra) é a primeira das etapas.

Considera-se nessa fase, principalmente as falhas geológicas, o acúmulo de tensão medido através o movimento relativo da crosta terrestre, a neotecnônica da crosta, o possível acoplamento entre placas, os tremores (falhamentos) já registrados anteriormente, enfim, todo conhecimento geológico disponível, para caracterizar (a) a geometria espacial da feição geológica e provável fonte sísmica e (b) o número de ocorrência - taxa - dos tremores conforme a proporção em energia liberada - magnitude.

No Brasil, onde a ocorrência de tremores não é desprezível mas menor que a de outras partes do planeta, o processo de identificação das fontes sísmicas é executado geralmente através da opinião de especialistas que fazem o zoneamento sísmico segundo as informações técnicas e a experiência que dispõem.

Para cada uma dessas zonas sísmicas, que serão consideradas como tendo atividade sísmica uniforme, é calculada a distribuição da ocorrência de tremores em função da magnitude de cada tremor (e normalizada pela área?!).

Existem entretanto diversas propostas metodológicas envolvendo a suavização através de estimativas da taxa de sismicidade por funções de núcleo, entre outras, a de Frankel (1995), a de Woo (1996) e a de Helmstetter e Werner (2012) abordadas, aqui, com maior detalhe.

O que todas elas possuem em comum é o objetivo de caracterizar a taxa de sismicidade (ocorrência de tremores) em uma malha sobre a região de interesse através da soma da contribuição de funções de núcleo - gaussianas, leis de potência, entre outros - em cada nó dessa malha. O pressuposto central dessa idéia é que os sismos (principalmente os grandes, com menor evidência, pois aconteram menos fenômenos observáveis desse tipo) tendem a ocorrer no entorno de onde já ocorreram antes outros tremores (menores e mais frequentes).

Fundamentalmente, o que os diferencia é a forma de escolher a largura dessas funções de núcleo associadas à cada tremor do catálogo.

O que se pretende aqui é observar um pouco mais detalhadamente o comportamento desses diferentes métodos num ambiente com baixa e esparsa sismicidade.

Perifericamente, aproveitou-se a oportunidade para avaliar um recente conjunto de programas de computador disponibilizado com código livre voltado à esse segmento.

Modos de citação:

indesejável: (Andrew e Foster, 1983) introduziram o algoritmo ótimo.

certo : Andrew e Foster introduziram o algoritmo ótimo (Andrew e Foster, 1983).

1.1 Considerações Preliminares

Considerações preliminares. Texto texto.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desenvolvido ao longo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade das técnicas suavização (das antigas às mais recentes) para a caracterização da ocorrência de sismos no Brasil.

Secundariamente, aproveita-se a oportunidade para testar o uso de um conjunto recente de programas de computador disponível livremente, o *OpenQuake*.

1.3 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Dispôr sobre métodos alternativos para a caracterização de fontes sismogênicas, a primeira das etapas da análise probabilística de risco sísmico.
- Compreender parte o *OpenQuake*, um conjunto de programas de computador desenvolvido recentemente e oferecido com código livre pela Fundação GEM¹.
- Implementar parte dos métodos utilizados no contexto do *OpenQuake*, ampliando os recursos oferecidos e deixando-os disponíveis para uso futuro de forma integrada.

1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 2, apresentamos os conceitos ... Finalmente, no Capítulo 7 discutimos algumas conclusões obtidas neste trabalho. Analisamos as vantagens e desvantagens do método proposto ...

As sequências testadas no trabalho estão disponíveis no Apêndice A.

¹Global Earthquake Modeling, Pavia, Italia.

Capítulo 2

Contexto Teórico

Este capítulo apresenta, um a um, os conceitos mais elementares, e tenta harmonizar a terminologia empregada no decorrer do texto.

2.1 Tectônica

A **tectônica** é disciplina científica focada nos processos responsáveis pela criação e transformação das estruturas geológicas da Terra e de outros planetas..

Uma das principais evidências das transformações geológicas do planeta são os **terremotos**. A figura 2.1 ([Lowman Jr. e Montgomery, 1998](#)) é um mapa global com a ocorrência geográfica dos tremores. Nele é possível notar que os sismos não são distribuídos uniformemente pelo globo.

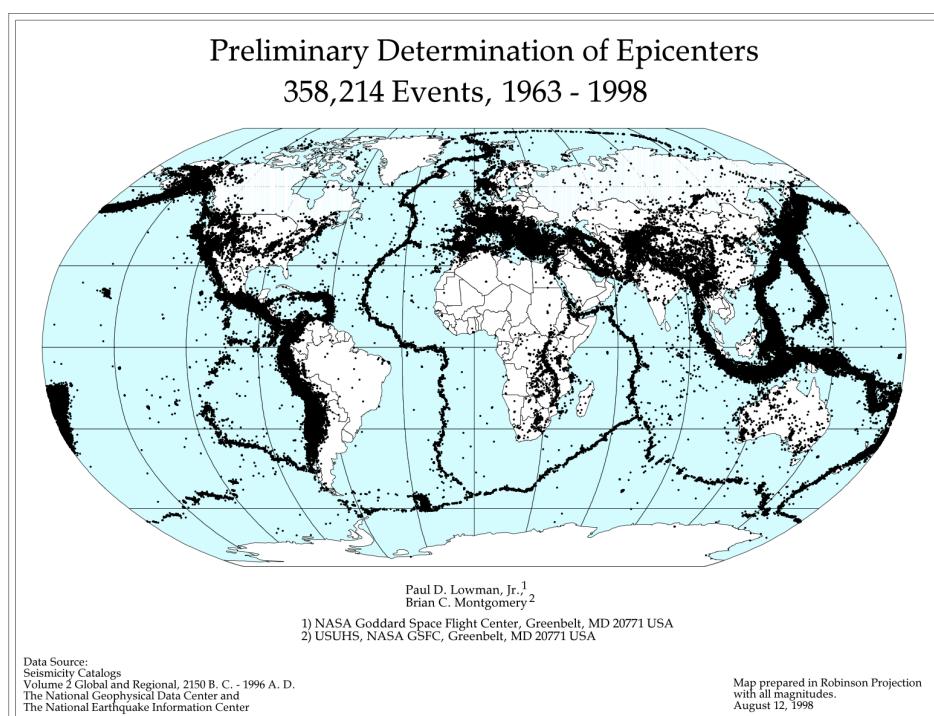


Figura 2.1: Mapa Mundial de Epicentros 1963-1998¹

¹[Lowman Jr. e Montgomery \(1998\)](#)

O padrão apresentado pela **atividade sísmica** global foi essencial para o desenvolvimento posterior da teoria tectônica das placas.

2.1.1 Teoria tectônica das placas

A teoria tectônica das placas, desenvolvida na segunda metade do século XX, cartografava na superfície do globo as **placas litosféricas**.

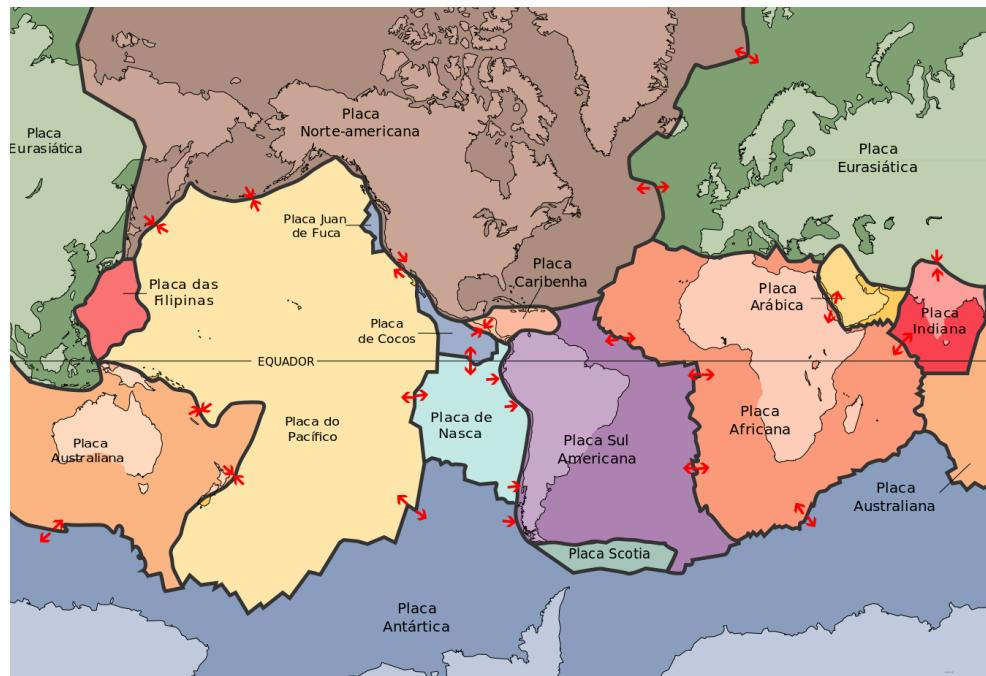


Figura 2.2: Cartografia das placas litosféricas²

As **placas litosféricas**, como pode ser visto na figura 2.2, e o conceito de **astenosfera** (região dúctil entre a litosfera e o manto terrestre, com profundidades que variam de 60 a 700km) surgem para conformar uma teoria capaz de explicar uma série de fenômenos tectônicos já observados e ainda não bem explicados na época de seu desenvolvimento.

Bordas

Nas bordas das **placas litosféricas**, a tectônica é mais intensa, provocando uma enorme diversidade de fenômenos geológicos de acordo com o tipo de interação, como ilustrado na figura 2.3.

²USGS (1996)

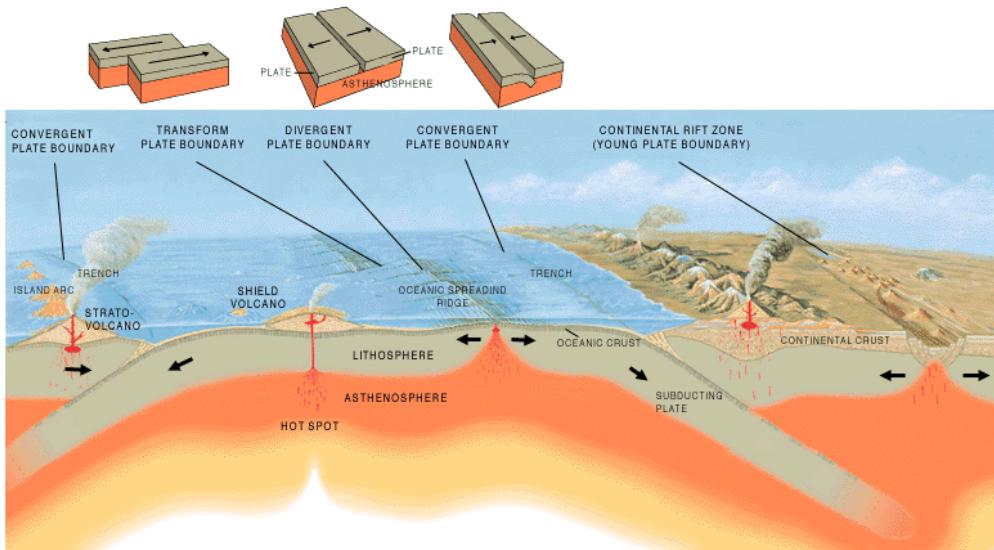


Figura 2.3: Diferentes tipos de interações entre placas litosféricas em suas bordas³

Na figura 2.3 estão ilustrados os diferentes tipos de interação entre as placas litosféricas nas suas bordas, que causam, como já se sabe, a maior parte dos terremotos e vulcanismo.

Só na borda das placas é liberada cerca de 95% da quantidade total da energia disseminada na forma de terremotos no globo.

Interior

A dificuldade maior é explicar, com maior detalhe, porque e como são liberados os outros 5% do total de energia em terremotos, mais raros, no interior das placas litosféricas.

Não há pleno consenso nem um modelo geral para a explicação do mecanismo de ocorrência dos sismos no interior das placas, embora sejam conhecidas diversas zonas sísmicas em regiões no interior de placas, como em Nova Madrid, nos Estados Unidos e também em locais da China e da Austrália para citar alguns.

2.1.2 Sismotectônica

A **sismotectônica** é o estudo das relações entre os terremotos e a tectônica recente de uma região. Procuram compreender exatamente quais mecanismos de ruptura da geologia são responsáveis pela **atividade sísmica** em uma certa área, analisando, de forma combinada, registros recentes de tectonismo regional e considerando também evidências históricas e geomorfológicas.

Na prática consiste por um lado, num esforço de compreensão dos processos geológicos através da observação dos tremores e analogamente, compreender os tremores através da observação de processos geológicos mensuráveis.

É fácil notar, portanto, a contribuição dessa disciplina para a análise de sismicidade.

2.2 Sismicidade

A sismicidade é o estudo da ocorrência de dos tremores. Quando, onde, como, de que tamanho?!

³Vigil (1997)

É sabido que sismos menores são muito mais frequentes que os grandes tremores de terra catastróficos.

Tremores de terra, abalos, [terremotos](#), sismos são a ocorrência de fenômenos geológicos de ruptura, instantânea, por certo mecanismo, de certa dimensão, na crosta terrestre.

2.2.1 Ocorrência

Os tremores acontecem por uma ruptura geológica (figura 2.4) num tempo t , num lugar r e cada um com seu tamanho m .

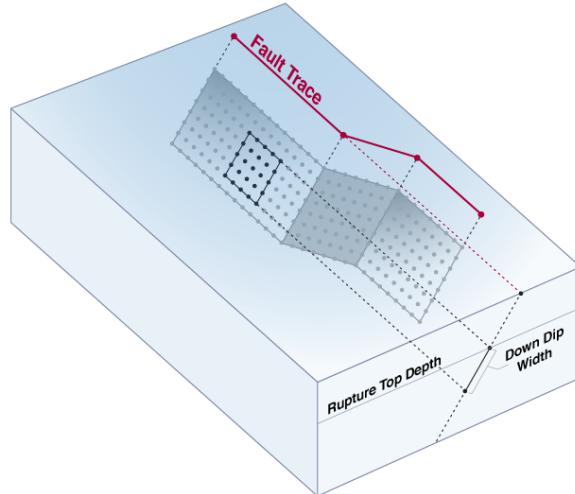


Figura 2.4: Ilustração da área de ruptura em um falhamento geológico⁴

O local em que se iniciou a ruptura que deu origem ao tremor é um [hipocentro](#), enquanto sua projeção na superfície, desconsiderando-se a profundidade, é o [epicentro](#).

Processo de Poisson

Definição do processo...

Críticas...

2.2.2 Magnitude (da ruptura)

A magnitude de um tremor de terra é um valor medido numa escala que versa sobre a energia liberada pelo sismo, que é proporcional a área rompida e ao deslocamento geológico relativo entre as partes rompidas.

O desenvolvimento experimental de escalas de magnitude, para medir o tamanho dos tremores, é marcado pelo trabalho do sismólogo Charles Richter ([Richter, 1935](#)).

Existem, entretanto, uma série de diferentes escalas de magnitude, baseadas em diversos tipos de medidas.

A escolha de qual usar fica a critério de cada operador de sismógrafo e de cada rede sismográfica, que geralmente usam escalas diferentes para avaliar a magnitude dos tremos, ou até mesmo divulgam mais de um tipo para um mesmo evento.

As escalas são calibradas para fornecerem valores similares, de acordo com o intervalo de utilidade para o qual foram desenvolvidas, mas apresentam diferenças consideráveis para um

⁴[team \(2010\)](#)

mesmo evento, podendo comprometer as análises estatísticas baseadas num catálogo cuja magnitude não tenha sido calculada de maneira uniforme.

Magnitude Richter

As escalas de magnitude mais comuns são as que derivam da definição de Richter (Richter, 1935) que se baseia na relação empírica entre o logarítmo da amplitude do registro das ondas sísmicas e a distância onde foram registradas. Em 1935, Richter notou que:

$$\log \hat{A} = 3.37 - 3 \log \hat{d} \quad (2.2.1)$$

onde \hat{A} é amplitude no sismômetro Wood-Anderson e \hat{d} é distância de 100 km do tremor.

A amplitude máxima de sua escala foi definida pela amplitude máxima observada em um sismômetro Wood-Anderson, com período de 0.8s, registrando a 100km do tremor.

Na prática existem algumas incertezas e correções que deveriam ser feitas, principalmente pelo fato da escala estar intimamente relacionada a um determinado equipamento, hoje obsoleto, e porque os sismos locais (a menos de 100km) têm sua magnitude melhor calculada usando frequências mais altas que as registráveis pelo sismômetro da época.

Outras escalas foram desenvolvidas a partir da medida da amplitude máxima de determinadas fases (diferentes tipos de onda sísmica) e apresentam bons resultados para a maior parte dos sismos. Não refletem, porém, com precisão, o tamanho dos maiores e mais destrutivos eventos, com magnitude acima de 7 ou 8.

Magnitude de Momento Sísmico

O evento de natureza sismológica ocorre num instante t liberando uma certa quantidade de energia na forma de momento sísmico M_0 proporcional à magnitude de momento sísmico M_W desse evento.

O momento sísmico é apresentado na equação 2.2.2:

$$M_0 = \mu_{rig} A \tilde{D} \quad (2.2.2)$$

onde μ_{rig} é coeficiente de rigidez da rocha, A é área afetada e \tilde{D} é deslocamento médio. Tem unidades de energia [N.m].

O momento sísmico é estimado geralmente pela inversão duplamente acoplada de um tensor de momento aos registros em forma de onda do movimento do chão causado pelo terremoto. Ou, em casos de tremores muito bem registrados, ele pode ser estimado a partir de algum modelo numérico para a ruptura.

A magnitude de momento sísmico M_W (?) é baseada no logarítmo do momento sísmico M_0 , e não se satura no caso de grandes eventos. Sua definição é dada pela equação 2.2.3

$$M_W = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (2.2.3)$$

onde M_0 é momento sísmico em [N.m].

Intensidade Macrossísmica

A intensidade macrossísmica é uma escala para medir, não a energia proporcional à ruptura que originou o tremor de terra, mas para retratar a percepção humana do movimento do chão onde quer este tenha produzido seus efeitos.

Uma das mais difundidas é a escala Modificada de Mercalli ([Richter, 1958](#)) apresentada em sua versão simplificada na tabela 2.1:

Categoría	Sensação	Efeitos
I	Imperceptível	Não sentido. Apenas registado pelos sismógrafos.
II	Muito fraco	Sentido por um muito reduzido número de pessoas em repouso, em especial pelas que habitam em andares elevados.
III	Fraco	Sentido por um pequeno número de pessoas. Bem sentido nos andares elevados.
IV	Moderado	Sentido dentro das habitações, podendo despertar do sono um pequeno número de pessoas. Nota-se a vibração de portas e janelas e das loiças dentro dos armários.
V	Forte	Praticamente sentido por toda a população, fazendo acordar muita gente. Há queda de alguns objectos menos estáveis e param os pêndulos dos relógios. Abrem-se pequenas fendas nos estuques das paredes.
VI	Bastante forte	Provoca início de pânico nas populações. Produzem-se leves danos nas habitações, caindo algumas chaminés. O mobiliário menos pesado é deslocado.
VII	Muito forte	Caem muitas chaminés. Há estragos limitados em edifícios de boa construção, mas importantes e generalizados nas construções mais frágeis. Facilmente perceptível pelos condutores de veículos automóveis em trânsito. Desencadeia pânico geral nas populações.
VIII	Ruinoso	Danos acentuados em construções sólidas. Os edifícios de muito boa construção sofrem alguns danos. Caem campanários e chaminés de fábricas.
IX	Desastroso	Desmoronamento de alguns edifícios. Há danos consideráveis em construções muito sólidas.
X	Destruidor	Abrem-se fendas no solo. Há cortes nas canalizações, torção nas vias de caminho de ferro e empolamentos e fissuração nas estradas.
XI	Catastrófico	Destrução da quase totalidade dos edifícios, mesmo os mais sólidos. Caem pontes, diques e barragens. Destrução das redes de canalização e das vias de comunicação. Formam-se grandes fendas no terreno, acompanhadas de desligamento. Há grandes escorregamentos de terrenos.
XII	Cataclismo	Destrução total. Modificação da topografia. Nunca foi presenciado no período histórico.

Tabela 2.1: Escala simplificada de intensidade sísmica, modificada em 1956 a partir da escala original de Giuseppe Mercalli de 1902

Existem estudos ([Bakun e Wentworth, 1999](#)) que propõem a inferência sobre o tamanho da ruptura, e sua magnitude, a partir de observações macrossísmicas, ou dos efeitos relatados pela escala de intensidade, georreferenciados.

2.2.3 Catálogos

Os catálogos podem ser vistos como uma coleção de parâmetros sobre os tremores. Podem ser classificados em três categorias ([Woessner et al., 2010](#)) enumeradas a seguir:

- Pré-históricos: baseados na coleta de dados feitas por geólogos estruturais em trincheiras ou campos de subsidência. Podem conter registros de tremores que ocorreram há milhares de anos.
- Históricos: catálogos formados a partir de relatos históricos e inferência de valores de intensidade (seção 2.2.2), de análises de forma de onda com instrumentos antigos (registros em papel), eventualmente digitalizados. Cobrem o período das primeiras descrições humanas até os catálogos instrumentais.
- Instrumentais: são os catálogos de sismicidade definidos por dados produzidos por uma rede sismográfica bem estabelecida gerando localizações continuamente (que começam a existir a partir de 1970).

Os catálogos instrumentais são uma listagem onde se espera que encontrar para cada evento as seguintes informações:

- algum identificador,
- a localização ([hipocentro](#)) do evento em algum sistema de referência (longitude, latitude, profundidade),

- o tempo de origem: data e hora com precisão de pelo menos décimos de segundo e
- uma ou várias informações de **magnitude**.

Adicionalmente, embora não seja muito frequente, podem ser fornecidas informações adicionais obtidas pela análise das formas de onda, como:

- incertezas sobre as magnitudes,
- incertezas sobre a localização (erro padrão, elipses de erro, cobertura dos sismogramas em diversas distâncias, cobertura dos sismogramas em vários ângulos azimutais, acurácia do modelo de velocidades utilizado, para enumerar alguns),
- intensidade máxima,
- intensidade no epicentro,
- número de, e as vezes as próprias, informações usadas para a determinação do hipocentro e hora de origem,
- sobre o mecanismo (alinhamento, mergulho e sentido do deslocamento na falha geológica) focal, entre outras.

Mas é importante salientar (Woessner *et al.*, 2010) que cada um dos parâmetros determinados é fruto de uma série de decisões e etapas de processamento.

Começam pela escolha dos sismômetros a serem instalados e onde para registrar as formas de onda. Sinais acima do nível de ruído são associados à chegadas de fases quando registradas em mais de uma estação.

A localização e o tempo de origem são determinados juntando-se os tempos de chegadas das fases a um modelo de velocidade das ondas ao longo de camadas da crosta (ao qual a localização é extremamente dependente).

As magnitudes são computadas a partir das amplitudes e/ou da duração do sinal, dependendo profundamente da calibração dos instrumentos.

2.2.4 Distribuição de Frequência e Magnitude

Observa-se que os sismos menores são muito mais freqüentes. Entretanto, os maiores e mais raros são os que trazem a maior ameaça e os que causam as maiores perdas.

Uma análise conveniente seria explorar como se dá essa distribuição de magnitudes.

Distribuição de Frequência e Magnitude (MFD) de Gutenberg-Richter

Gutenberg e Richter (Gutenberg e Richter, 1954) observaram empiricamente que a distribuição da frequência de ocorrência dos tremores e das magnitudes seguiam uma distribuição cuja versão clássica é apresentada na equação 2.2.4 a seguir:

$$\log N(m, m + dm) = a - bm \quad (2.2.4)$$

onde $N(m, m + dm)$ é o número de eventos com magnitude entre m e $m + dm$, a é o valor-a (corresponde à um índice de produtividade), b é o valor-b (corresponde à proporção de sismos pequenos e grandes, geralmente em torno de 1).

Com uma simples transformação de variáveis ($\alpha = 10^a$ e $\beta = b \ln 10$), observa-se que o número de sismos que ocorrem com magnitudes dentro de um pequeno intervalo $[m, m+dm]$ tem distribuição exponencial:

$$\begin{aligned} N(m, m+dm) &= 10^{a-bm} \\ &= \alpha e^{-\beta m} \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

A distribuição cumulativa, ou seja, o número de eventos com magnitude maior que um certo valor m_{min} também segue uma distribuição exponencial e é apresentada na equação 2.2.6:

$$\begin{aligned} N(m > m_{min}) &= \alpha \int_{m_{min}}^{\infty} e^{-\beta m} dm \\ &= \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta m} \\ &= \alpha_{cum} e^{-\beta m} \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

onde $\alpha_{cum} = \alpha/\beta$ é o valor cumulativo da atividade sísmica.

Entretanto, a distribuição clássica de Gutenberg-Richter (GR) não impunha restrições sobre um limite inferior m_{min} ou superior m_{max} à validade da distribuição.

A figura 2.5 apresenta um comparativo de algumas distribuições. Para ilustração, há também um histograma de um catálogo de uma pequena região do norte do Chile, onde se pode observar que tanto a porção inferior (em torno de $m = 5$), como a porção posterior ($m > 7$) do histograma não seguem perfeitamente a distribuição. Há essencialmente duas zonas críticas em que é preciso estar atento à física do problema: (a) na parte inferior, muitos sismos de magnitude pequena não são registrados, pois não tem energia suficiente para sensibilizar um conjunto razoável de estações que permita determinar suas localizações; (b) a parte superior, por sua vez, é crítica por se acoplar diretamente aos limites físicos do tamanho da maior ruptura possível, relacionada diretamente ao limite de liberação de energia na forma de momento sísmico M_0 .

MFD Truncada

Variações da distribuição clássica de GR foram propostas em vista de melhor representar as MFD estudadas à partir de catálogos de diversas regiões.

A equação 2.2.7 versão incremental truncada com um limite superior m_{max} :

$$N(m, m+dm) = \frac{e^{-\beta m}}{1 - e^{-\beta m_{max}}}, m \leq m_{max} \quad (2.2.7)$$

Na equação 2.2.8 versão incremental duplamente truncada com um limite inferior m_{min} e superior m_{max} :

$$N(m, m+dm) = \frac{e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}}, m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (2.2.8)$$

A figura 2.5 ilustra essas distribuições.

MFD Limitada

Outra possibilidade, é limitar suavemente a parte final da curva (ver figura 2.5). A equação 2.2.9 apresenta a distribuição:

$$N(m, m + dm) = \alpha [e^{-\beta(m - m_{min})} - e^{-\beta(m_{max} - m_{min})}], m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (2.2.9)$$

MFD com decaimento exponencial

Yan Kagan (Kagan, 2002) propôs uma distribuição de magnitude mais adequada e acoplada à energia liberada pelos sismos, que pode ser descrita como na equação 2.2.10:

$$N(m, m + dm) = [\beta_p + \frac{m}{m_{min}}] m_{min}^{\beta_p} m_{corner}^{-1-\beta_p} e^{\frac{m_{min}-m}{m_{corner}}}, m_{min} \leq m < \infty \quad (2.2.10)$$

onde $\beta_p = \frac{2}{3}b$, é o beta da distribuição de Pareto e m_{corner} valor de magnitude responsável por controlar o decaimento da Kagan-MFD

A figura 2.5 mostra a diferença entre algumas dessas distribuições

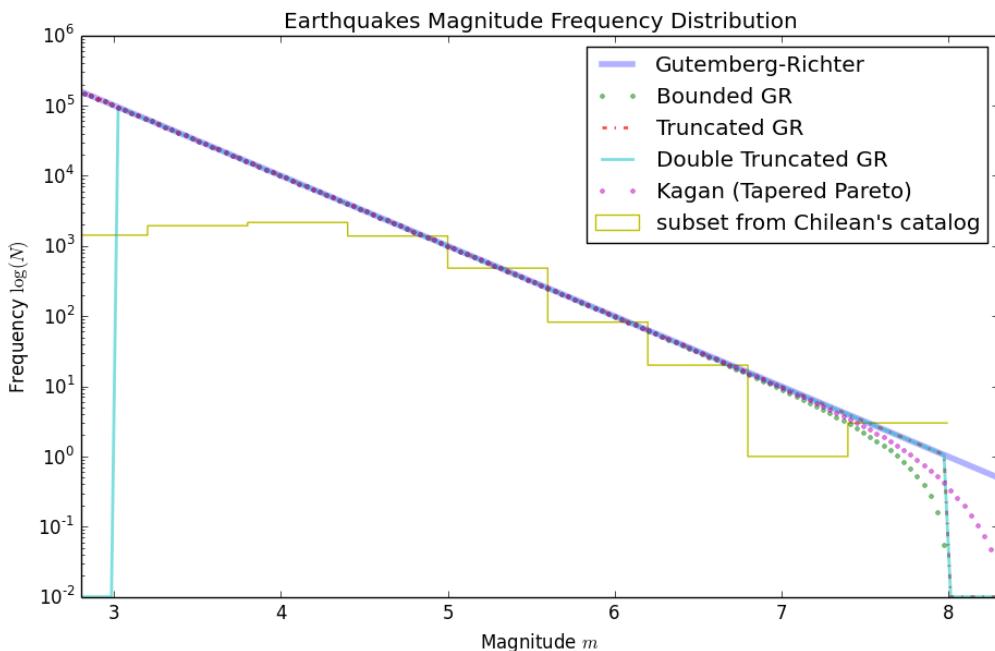


Figura 2.5: Distribuições de frequência e magnitude

2.3 Taxa de Sismicidade

Magnitude de Completude

A magnitude de completude...

texto texto

GRAFICO FORMULA

Valor-b

Valor-a

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

2.4 Risco Sísmico

-> risk = (hazard, exposition, vulnerability)

A redução do risco sísmico é um problema complexo, que envolve geralmente muitas pessoas, informações, decisões e ações.

A palavra risco, ao pé da letra, significa a exposição à possibilidade de injúria ou perda. E geralmente é usada como sinônimo de ameaça. Na literatura acerca do tema risco, inclusive, as palavras são usadas com certa confusão.

No glossário da EERI (EERI Committee on Seismic Risk, 1984) a definição de risco sísmico é a probabilidade de que perdas sociais ou econômicas aconteçam como decorrência de tremores superem limiares estabelecidos para determinado local ou região durante um certo período de exposição.

A ameaça sísmica, por outro lado, é qualquer fenômeno físico (oscilação, falhamento) associado à terremotos que possam produzir efeitos adversos às atividades humanas. Na prática são avaliados por dadas probabilidades de ocorrência.

Do que se pode deduzir que o risco sísmico é um produto da ameaça sísmica:

$$\text{Seismic Risk} = \text{Seismic Hazard} \times \text{Vulnerability} \quad \text{Value (1.1)}$$

where vulnerability is the amount of damage induced by a given degree of hazard and expressed as a fraction of the value of the damaged item under consideration. The symbols in Eq. (1.1) do not represent multiplication, in fact, how seismic hazard, vulnerability and value are to be combined depends on how they are expressed. Different ways to do so have been adopted in the numerous procedures proposed in the literature (Dowrick, 2003). To better understand the meaning of Eq. (1.1) it is worth considering an example. One of the most complete risk assessment frameworks recently proposed is the PEER's performance based earthquake engineering methodology (Porter, 2003).

The principal outputs of PEER's approach are system-level performance measures: probabilistic estimates of repair costs, casualties, and loss-of-use duration (“dollars, deaths, and downtime”). The objective of the methodology is to estimate the frequency with which a particular performance metric will exceed various levels for a given design at a given location. These can be used to create probability distributions of the performance measures during any planning period of interest. From the frequency and probability distributions can be extracted simple point performance metrics that are meaningful to facility stakeholders, such as an upper-bound economic loss during the owner-investor’s planning period. Figure 1.1 illustrates the PEER methodology. As it shows, PEER’s PBEE approach involves four

stages: hazard analysis, structural analysis, damage analysis, and loss analysis. In the figure, the expression $p[X|Y]$ refers to the probability density of X conditioned on knowledge of Y , and $g[X|Y]$ refers to the occurrence frequency of X given Y (equivalent to the negative first derivative of the frequency with which X is exceeded, given Y). Eq. (1.2) frames the PEER methodology mathematically. Note that Figure 1.1 omits conditioning on D after the hazard analysis for brevity, but it is nonetheless implicit.

Eq. (1.2) can be considered as a specialization of Eq. (1.1): hazard maintains the same meaning, vulnerability is expressed as the combination of the results of two stages, structural analysis and fragility analysis, and value is evaluated by the loss analysis. Within this framework the symbol \ast represents convolution. Seismic fragility and vulnerability of structures will be described in greater detail in the second part of this dissertation, while this part is focused on seismic hazard assessment and on defining input for structural analysis in terms of accelerograms. For design or risk assessment purposes the assessment of seismic hazard consists of the following basic steps: definition of the nature and location of earthquake sources magnitude-frequency relationships for the sources attenuation of ground motion with distance from source determination of ground motions at the site having the required probability of exceedance.

Because seismic risk and hazard statements are essentially forecasts of future situations, they are inherently uncertain. Seismic hazard assessment attempts to forecast the likely future seismic activity rate and strengths, based on knowledge of the past and present, and significant uncertainties arise partly because the processes involved are not fully understood and partly because relevant data are generally scarce and variable in quality. For reasonable credibility considerable knowledge of both historical seismicity and geology need to be used, together with an appropriate analysis of uncertainties. Where available other geophysical or seismological knowledge, such as crustal strain studies, may also be helpful, particularly in evaluating regional seismic activity patterns.

The present chapter introduces the basis of the procedures that may be used to assess seismic hazard, giving particular relevance to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Some of the concepts described here (e.g. hazard curve, xattenuation relationship, disaggregation) will be widely used in the following chapters of the present work.

2.5 Ameaça Sísmica

-> hazard = seismic sources, rupture occurrence, ground motion prediction

2.5.1 Projeção da Ocorrência de Rupturas

As projeções (*forecasting*) são feitas para se estimar a ocorrência de futuros tremores, principalmente dos maiores, com grandes chances de provocar perdas.

Nas de curto prazo, estimam-se os próximos tremores numa escala de dias ou horas considerando uma taxa de sismicidade variável com o tempo como no caso dos pré e pós-abalos, ou de quando acontece um enxame sísmico, período de maior atividade numa região. Sua principal aplicação são para tomada de decisões de curto período, como evacuação de edifícios.

Nas de longo prazo, foco desse texto, a principal consideração feita é de que a [taxa de sismicidade](#) não varie ao longo do tempo, servindo para estimar as acelerações provovadas por tremores que possam ocorrer, mesmo que muito raramente, de grandes proporções. Suas aplicações fazem sentido quando se deseja saber o nível de segurança e resistência estrutural

que devem ser impostos às edificações em geral, ou o valor de um contrato de resseguro de plataformas de petróleo, ou outros grandes investimentos industriais, como usinas nucleares.

2.6 Análise Probabilistica de Ameaça Sísmica

cornell, mcguire ?!?

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

2.6.1 Caracterização de Fontes Sísmicas

cornell, mcguire ?!?

Tipologia e Representação Geométrica

Falha Complexa

Falha Simples

Área

Pontos

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

2.6.2 Caracterização

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

Ocorrência de Sismicidade

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

Ocorrência de Sismicidade

Caracterização de Fontes Sísmicas

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

2.6.3 Predição do Movimento do Chão

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

2.6.4 Cálculo da Curvas de Ameaça

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto

Capítulo 3

Região de Estudo

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto.

3.1 Contexto Tectônico Sul-Americano

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto.

3.1.1 Sismicidade Sul Americana

3.2 Contexto Tectônico Brasileiro

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto.

3.3 Sismicidade Brasileira

3.3.1 Nordeste

3.3.2 Sul, Sudeste e Litoral Leste

3.3.3 Centro-Norte

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto.

3.3.4 Mato-Grosso

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto.

3.3.5 Extremo Oeste

3.4 Extremo Oeste

Capítulo 4

Metodología

4.1 Apresentação

Neste capítulo apresenta-se a formalização das metodologias aplicadas na fase processamento 5. Essencialmente das técnicas de suavização empregadas.

4.2 Técnicas de suavização

As técnicas de suavização em geral, permitem extrair feições importantes do conjunto de dados.

Quando aplicadas à caracterização das fontes sísmicas em Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), permitem gerar um conjunto de fontes sísmicas pontuais caracterizadas pela determinação suavizada das taxas de sismicidade nos pontos de uma malha regular.

Na prática, a essência da técnica é aplicar uma função de kernel como na equação 4.2.1

K(x) (4.2.1)

bla bla (?) ...

4.2.1 Frankel, 1995

4.2.2 Woo, 1996

4.2.3 Helmstetter, 2012

Capítulo 5

Processamento

5.1 Conjunto de Dados

5.1.1 Fonte e Disponibilidade de Dados

5.2 Ferramentas

5.2.1 Programas

5.2.2 Linguagens

5.2.3 Bibliotecas

5.2.4 Implementações

5.3 Pré-Processamento

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

5.3.1 Checagem de Qualidade

5.3.2 Remoção de agrupamentos

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto.

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto.

5.3.3 Conversão de Magnitudes

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto.

5.3.4 Análise da Completude

5.4 Frankel, 1995

5.5 Woo, 1996

5.6 Helmstetter, 2012

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto.

5.7 Pós-Processamento

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

5.7.1 Cálculo da Ameaça Sísmica

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto
texto texto texto texto texto texto texto.

5.7.2 Cálculo da Desagregação

Capítulo 6

Resultados

Os resultados obtidos através do processamento metodológico serão enumerados a seguir.

6.1 Resultados Anteriores

6.1.1 GSHAP

6.1.2 Zoneamento Sísmico

Cornell & McGuire !?!

Dourado, 2014

Na Figura 6.1 a ameaça sísmica calculada com o programa Crisis-v2007.

Os valores em gal [cm/s^2]) foram convertidos para unidades de g [m/s^2].

Na Figura 6.2 é apresentado o resultado do zoneamento sísmico feito por Dourado, 2014, calculado com o oq-engine.

Podemos observar que...

6.2 Suavização da Sismicidade

Dentre os métodos de suavização que foram investigados, são apresentados os seguintes resultados.

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

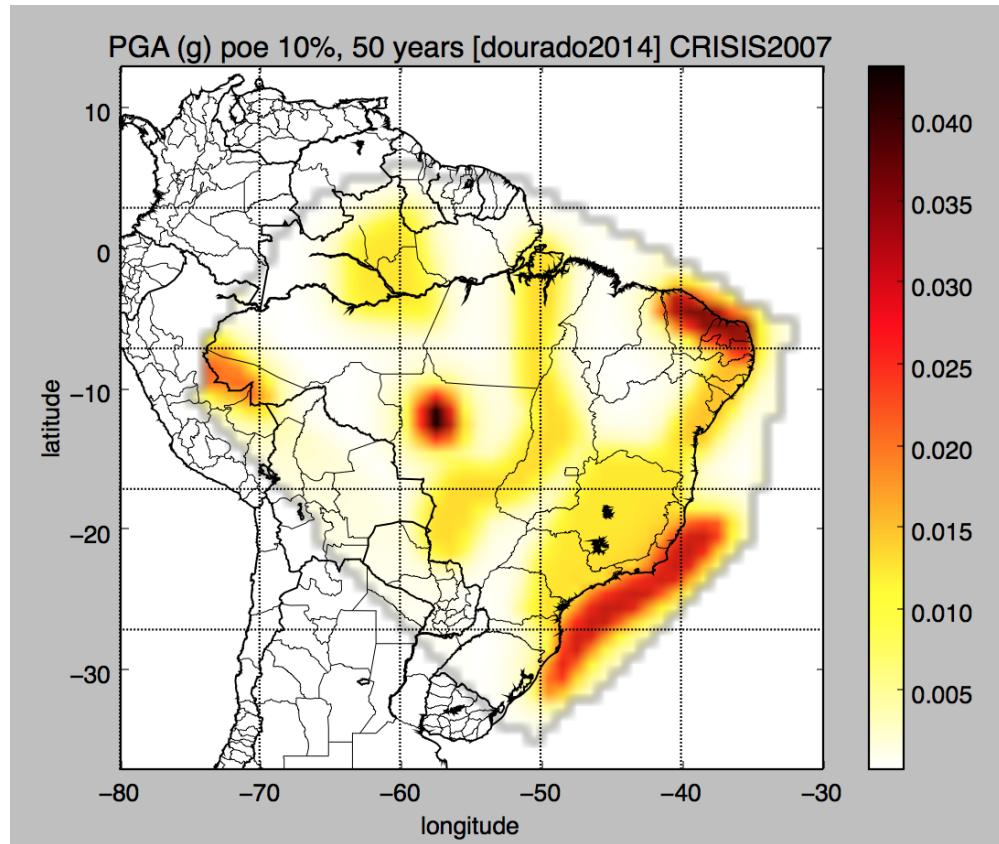


Figura 6.1: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Dourado, 2014, Crisis-2007]

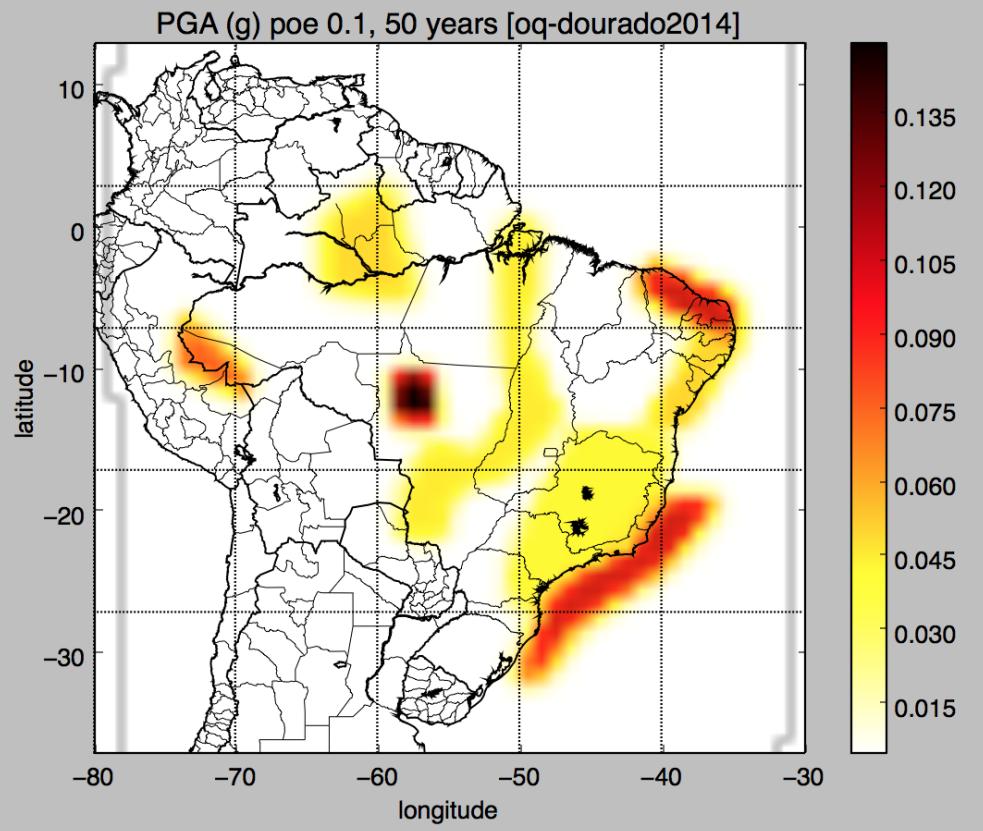


Figura 6.2: Seismic Hazard: $PGA(poe 0.1, 50y)$ [Dourado, 2014] OpenQuake-Engine

6.2.1 Frankel, 1995

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

O método de suavização proposto por Frankel, 1995, resultou na seguinte taxa de sismicidade observada na figura 6.3.

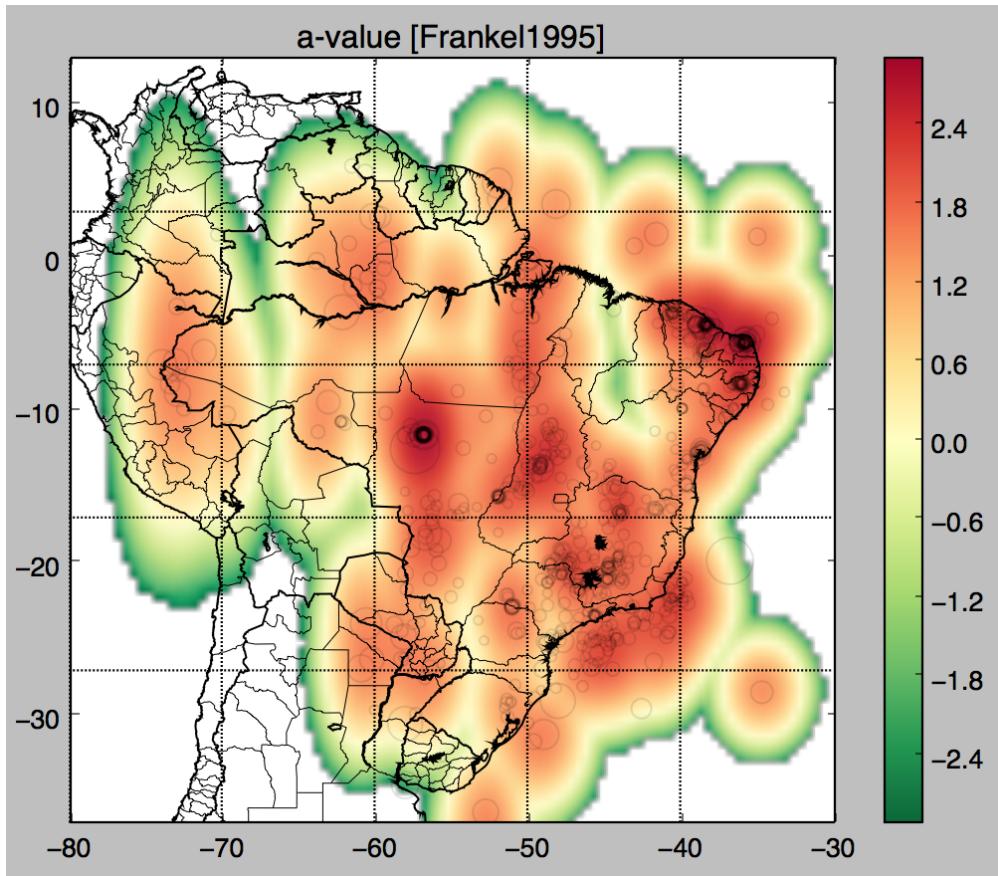


Figura 6.3: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Frankel, 1995]

Em seguida, na figura 6.4, se pode observar os valores da ameaça sísmica.

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

Os resultados...

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

6.2.2 Woo, 1996

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

Aplicando o método de Woo, na Figura 6.5 temos:

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

A ameaça pode ser vista na figura 6.6:

Podemos observar...

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal.

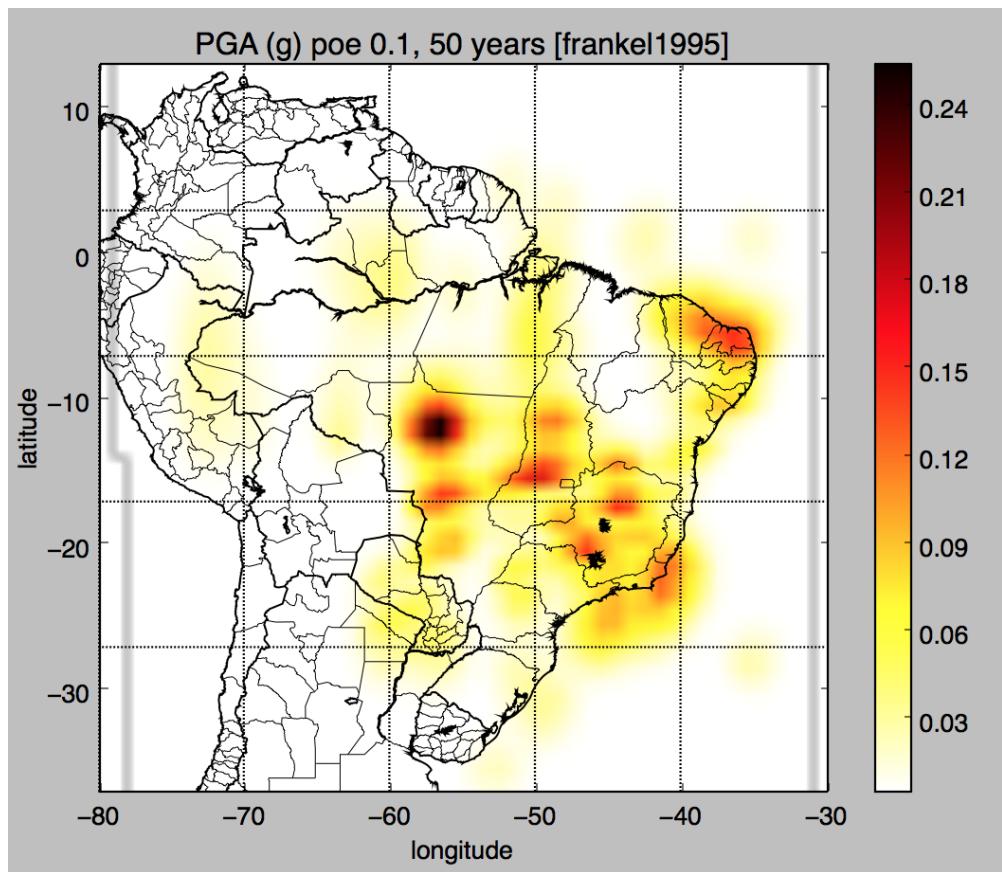


Figura 6.4: *Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Frankel, 1995]*

6.2.3 Helmstetter, 2012

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal.

Usando o método proposto por Helmstetter para a taxa de sismicidade de longo-prazo temos na figura 6.7 a seguinte taxa de sismicidade:

bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal. bla bla bla bla bal.

E, na figura 6.8 o respectivo mapa de ameaça:

Podemos observar que...

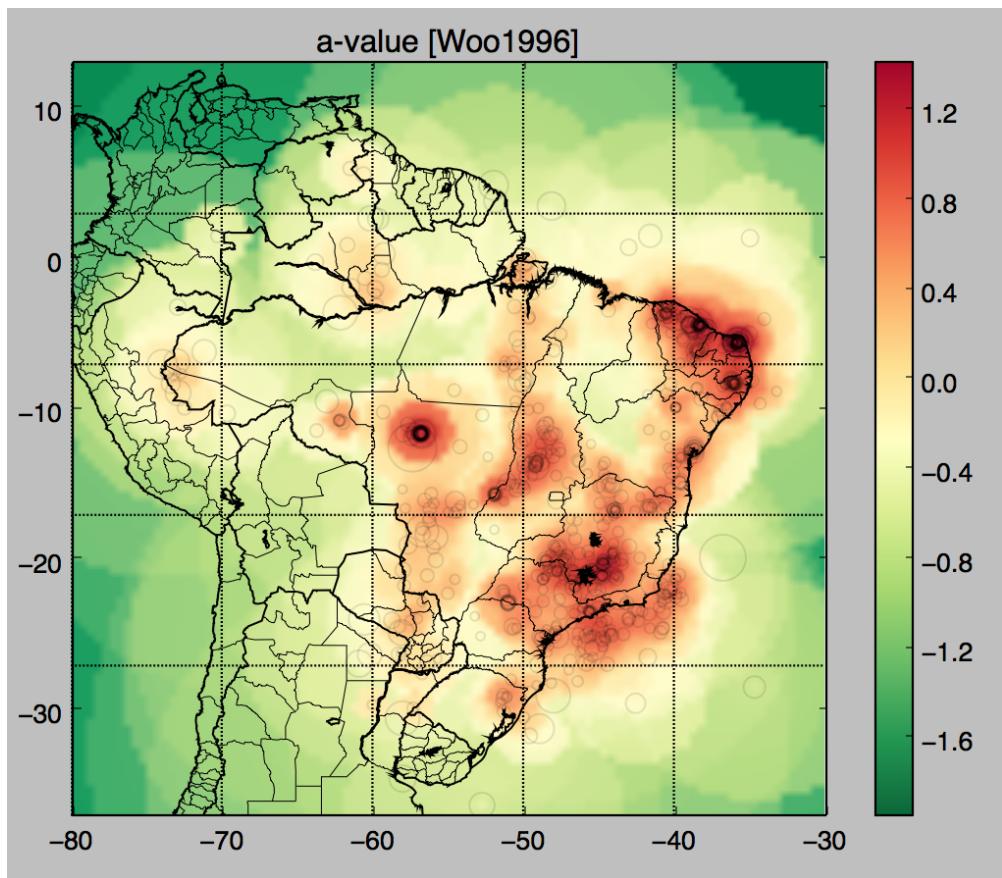


Figura 6.5: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Woo, 1996]

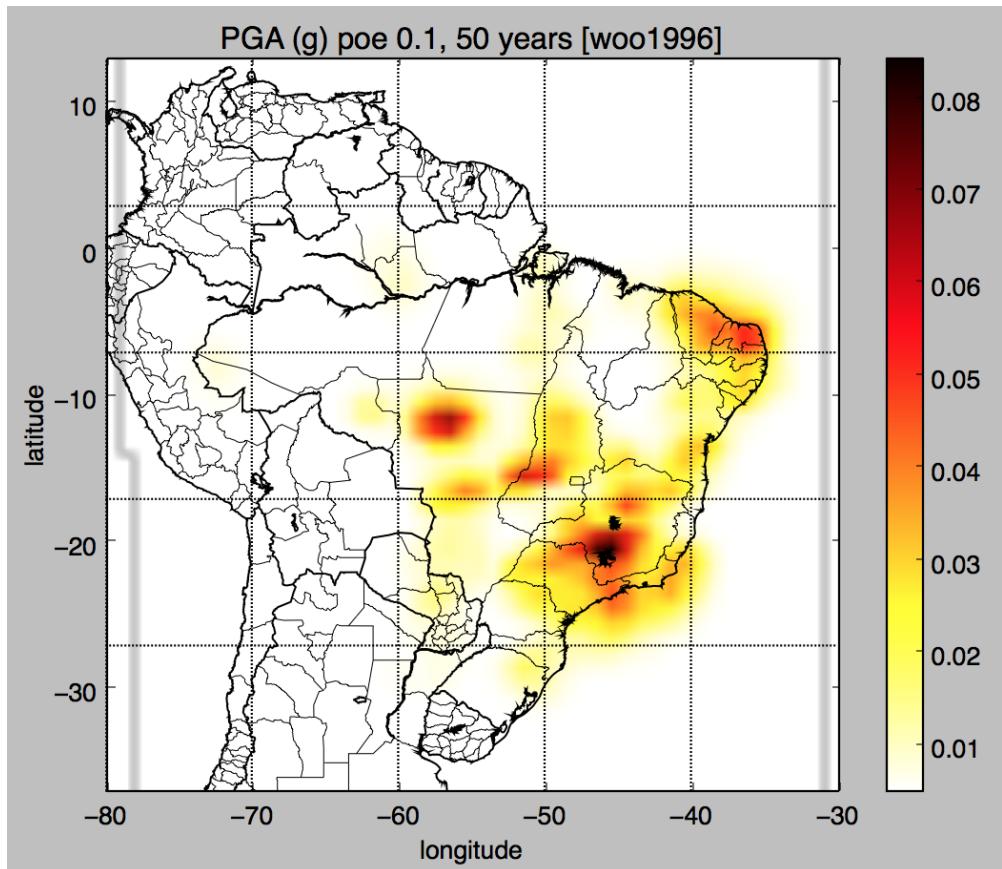


Figura 6.6: Seismic Hazard: $PGA(poe\ 0.1,\ 50y)$ [Woo, 1996]

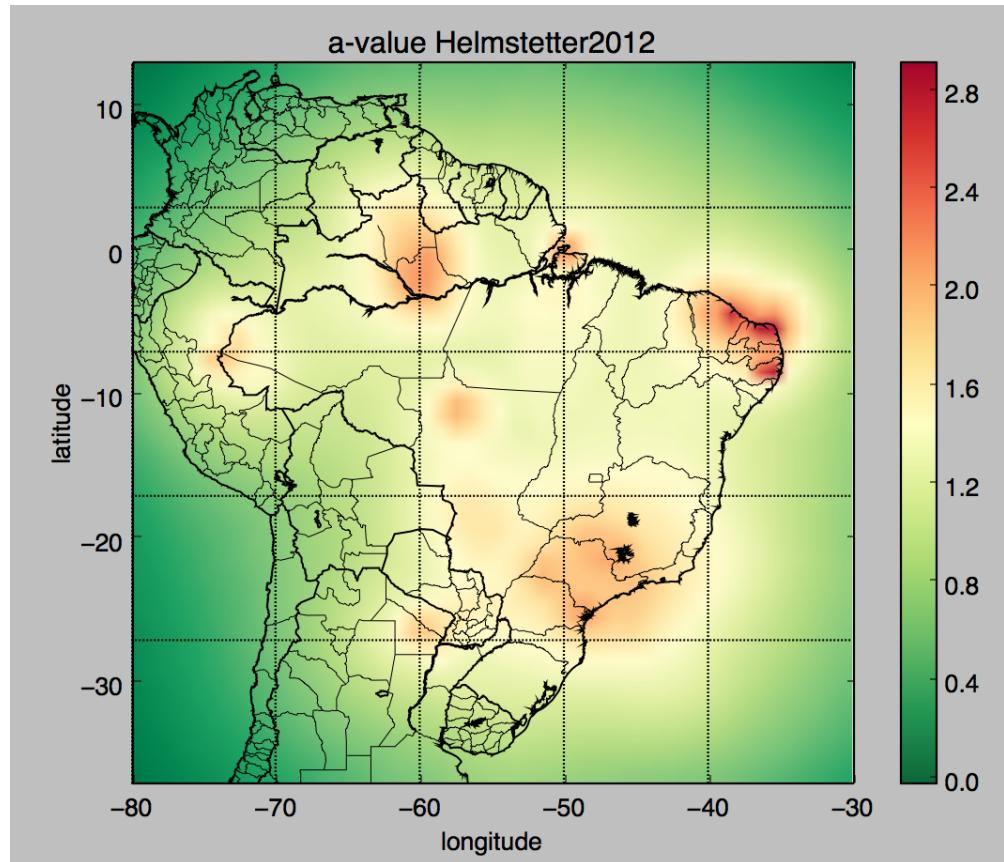


Figura 6.7: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Helmstetter, 2012]

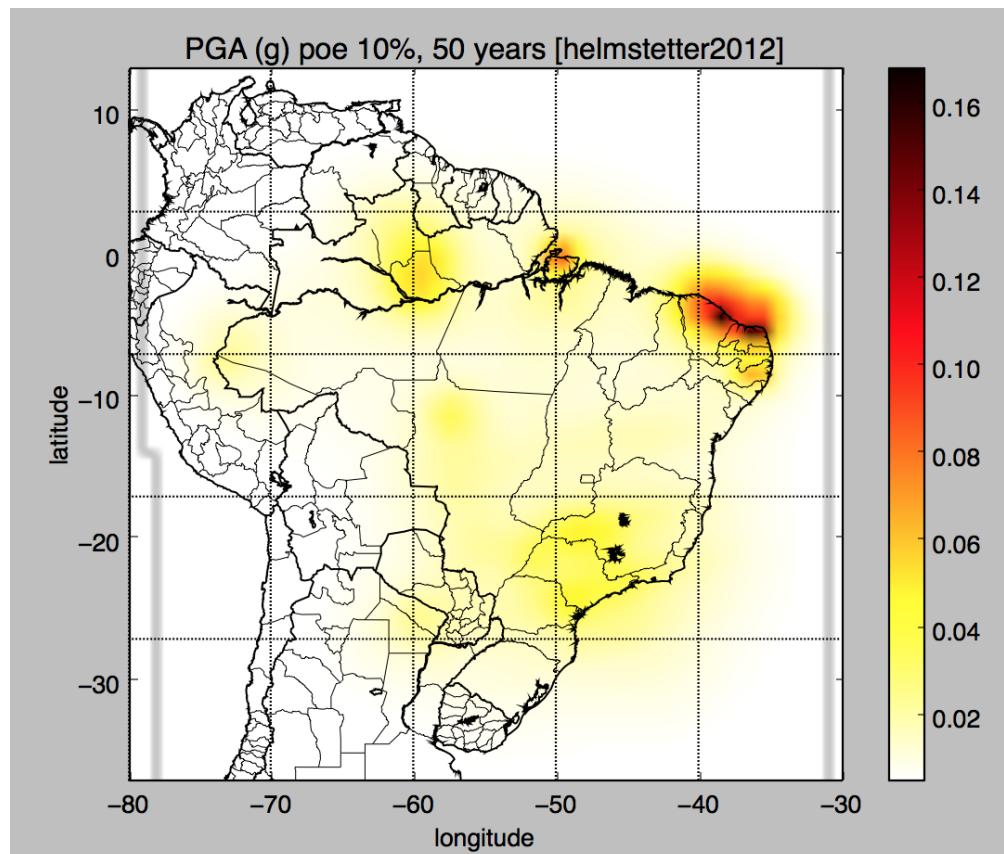


Figura 6.8: Seismic Hazard: $PGA(poe 0.1, 50y)$ [Helmstetter 2012]

Capítulo 7

Conclusões

Texto texto¹.

7.1 Considerações Finais

Texto texto.

7.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Texto texto.

Finalmente, leia o trabalho de [Alon \(2009\)](#) no qual apresenta-se uma reflexão sobre a utilização da Lei de Pareto para tentar definir/escolher problemas para as diferentes fases da vida acadêmica. A direção dos novos passos para a continuidade da vida acadêmica deveriam ser discutidos com seu orientador.

¹Exemplo de referência para página Web: www.vision.ime.usp.br/~jmena/stuff/tese-exemplo

Apêndice A

Sequências

Texto texto.

Limiar	MGWT			AMI			Spectrum de Fourier			Características espetrais		
	<i>Sn</i>	<i>Sp</i>	<i>AC</i>	<i>Sn</i>	<i>Sp</i>	<i>AC</i>	<i>Sn</i>	<i>Sp</i>	<i>AC</i>	<i>Sn</i>	<i>Sp</i>	<i>AC</i>
1	1.00	0.16	0.08	1.00	0.16	0.08	1.00	0.16	0.08	1.00	0.16	0.08
2	1.00	0.16	0.09	1.00	0.16	0.09	1.00	0.16	0.09	1.00	0.16	0.09
2	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10
4	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10	1.00	0.16	0.10
5	1.00	0.16	0.11	1.00	0.16	0.11	1.00	0.16	0.11	1.00	0.16	0.11
6	1.00	0.16	0.12	1.00	0.16	0.12	1.00	0.16	0.12	1.00	0.16	0.12
7	1.00	0.17	0.12	1.00	0.17	0.12	1.00	0.17	0.12	1.00	0.17	0.13
8	1.00	0.17	0.13	1.00	0.17	0.13	1.00	0.17	0.13	1.00	0.17	0.13
9	1.00	0.17	0.14	1.00	0.17	0.14	1.00	0.17	0.14	1.00	0.17	0.14
10	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15
11	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15	1.00	0.17	0.15
12	1.00	0.18	0.16	1.00	0.18	0.16	1.00	0.18	0.16	1.00	0.18	0.16
13	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17
14	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17	1.00	0.18	0.17
15	1.00	0.18	0.18	1.00	0.18	0.18	1.00	0.18	0.18	1.00	0.18	0.18
16	1.00	0.18	0.19	1.00	0.18	0.19	1.00	0.18	0.19	1.00	0.18	0.19
17	1.00	0.19	0.19	1.00	0.19	0.19	1.00	0.19	0.19	1.00	0.19	0.19
17	1.00	0.19	0.20	1.00	0.19	0.20	1.00	0.19	0.20	1.00	0.19	0.20
19	1.00	0.19	0.21	1.00	0.19	0.21	1.00	0.19	0.21	1.00	0.19	0.21
20	1.00	0.19	0.22	1.00	0.19	0.22	1.00	0.19	0.22	1.00	0.19	0.22

Tabela A.1: Exemplo de tabela.

Referências Bibliográficas

Alon (2009) Uri Alon. How To Choose a Good Scientific Problem. *Molecular Cell*, 35(6): 726–728. doi: 10.1016/j.molcel.2009.09.013. Citado na pág. 31

Bakun e Wentworth (1999) W. H. Bakun e C. M. Wentworth. Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2):557–557. URL <http://www.bssaonline.org/content/89/2/557.short>. Citado na pág. 8

Frankel (1995) Arthur Frankel. Mapping seismic hazard in the central and eastern united states. *Seismological Research Letters*, 66(4):8–21. URL <http://srl.geoscienceworld.org/content/66/4/8.short>. Citado na pág. 1

Gutenberg e Richter (1954) Beno Gutenberg e Charles F. Richter. *Seismicity of the Earth and associated phenomena*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2nd ed. Citado na pág. 9

Helmstetter e Werner (2012) Agnès Helmstetter e Maximilian J. Werner. Adaptive spatiotemporal smoothing of seismicity for long-term earthquake forecasts in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6):2518–2529. URL <http://www.bssaonline.org/content/102/6/2518.short>. Citado na pág. 1

Kagan (2002) Yan Y. Kagan. Seismic moment distribution revisited: I. statistical results. *Geophysical Journal International*, 148(3):520–541. ISSN 1365-246X. doi: 10.1046/j.1365-246x.2002.01594.x. URL <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01594.x>. Citado na pág. 11

Lowman Jr. e Montgomery (1998) Paul Lowman Jr. e Brian Montgomery. Digital world tectonic activity map (dtam), 1998. URL <http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/seismic/>. Citado na pág. 3

Richter (1958) C. Richter. *Elementary Seismology*. A Series of books in geology. W. H. Freeman. URL <http://books.google.com.br/books?id=rtYSAQAAIAAJ>. Citado na pág. 8

Richter (1935) Charles F. Richter. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1):1–32. URL <http://www.bssaonline.org/content/25/1/1.short>. Citado na pág. 6, 7

team (2010) OpenSHA team. Área de ruptura em um falhamento geológico., 2010. URL http://www.opensha.org/sites/opensha.org/files/rupture_surface_lg.png. Citado na pág. 6

USGS (1996) USGS. Lithospheric plates cartography illustration, 1996. URL http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Placas_tect2_pt_BR.svg. Citado na pág. 4

Vigil (1997) Jose Vigil. A cross section illustrating the main types of plate boundaries., 1997. URL <http://pubs.usgs.gov/gip/earthq1/fig13.gif>. Wall map produced jointly by USGS, the Smithsonian Institution, and the U.S. Naval Research Laboratory. Citado na pág. 5

Woessner *et al.* (2010) J. Woessner, J. Hardebeck e E. Hauksson. What is an instrumental seismicity catalog. doi: 10.5078/corssa-38784307. URL http://www.corssa.ethz.ch/articles/themeiv/woessner_et_al/woessner_et_al.pdf. Citado na pág. 8, 9

Woo (1996) Gordon Woo. Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2):353–362. URL <http://www.bssaonline.org/content/86/2/353.short>. Citado na pág. 1

Glossário

astenosfera região dúctil entre a **litosfera** e o **manto terrestre**, com profundidades que variam de 60 a 700km. [4](#)

atividade sísmica frequêcia de ocorrência de **terremotos**. [4, 5](#)

epicentro projeção ortogonal sobre a superfície do **hipocentro**. [6](#)

fonte sísmica estrutura geológica capaz de produzir tremores de terra. [15](#)

fonte sísmica pontual representação geométrica por um ponto, de uma fonte sísmica. [15](#)

função de kernel funções n-dimensionais, cuja integral em todo o domínio resulta em 1, podendo ser usadas como estimativas para funções de densidade de probabilidade. [15](#)

hipocentro representação geométrica do ponto no espaço e no tempo, onde se iniciou o **processo de ruptura** da **crosta terrestre**. [6](#)

litosfera região rúptil, mais externa do planeta, formada pela **crosta terrestre** (continental e oceânica) e parte do **manto terrestre** superior, com aproximadamente 60km de profundidade. [4](#)

manto terrestre material da porção intermediária do planeta, fluido em tempo geológico. [4](#)

placa litosférica placa de material da **litosfera**. [4, 5](#)

sismicidade ocorrência dos tremores. [33](#)

sismotectônica o estudo das relações entre os **terremotos** e a **tectônica** recente de uma região. procuram entender quais mecanismo das rupturas na geologia são responsáveis pela **atividade sísmica** em uma certa área, analisando de forma combinada, registros recentes de tectonismo regional e considerando também evidências históricas e geomorfológicas. [5, 33](#)

taxa de sismicidade taxa com que terremotos são produzidos por determinada **fonte sísmica**. [6, 15](#)

tectônica ramo da ciência que estuda os processos responsáveis pela criação e transformação dos planetas, especialmente a Terra. [3, 5, 33](#)

teoria tectônica das placas foi uma teoria revolucionária para a **tectônica**, propondo que a **crosta terrestre** terrestre estivesse dividida em placas à deriva sobre o **manto terrestre**. [4, 33](#)

terremoto ruptura de alguma estrutura geológica. 3, 5, 6, 33

Índice Remissivo

Teoria tectônica das placas

bordas, 4

interior, 5

Tectônica

Teoria tectônica das placas, 4

ácido

nucléico, 14, 15, 19–22

área do trabalho

fundamentos, 11–14, 17, 18, 21–23,
25, 27, 28

terremoto

ocorrência, 6

tectônica, 3

sismotectônica, 5

América do Sul, 17

sismicidade, 17

catálogos, 8

curvas ameaça, 15

Equação de Predição do Movimento do

Chão, 15

genoma

projetos, 2

gmpe, 15

Gutenberg-Richter MFD, 9

instensidade macrossísmica, 7

magnitude, 6

momento sísmico, 7

Richter, 7

MFD, 9

MFD com decaimento exponencial, 11

MFD Limitada, 11

MFD Truncada, 10

nucleotídeos, 14, 15, 19–22

processo de Poisson, 6

sismicidade, 5

suavização

fundamentos, metodologia, 19