

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 Conceitos	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
2.2.5 Valor-b	11
2.2.6 Taxa de Sismicidade	12
2.2.7 Valor-a	12
2.2.8 Magnitude de Completude	12
2.3 Risco Sísmico	13
2.4 Ameaça Sísmica	13
2.4.1 Projeção da Ocorrência de Rupturas	14
2.5 Análise Probabilística de Ameaça Sísmica	14
2.5.1 Identificação das fontes sísmicas	15
2.5.2 Caracterização da Distribuição de Frequência e Magnitude (MFD) . .	16

2.5.3	Caracterização da Distribuição de Distâncias	16
2.5.4	Predição do Movimento do Chão	16
2.5.5	Combinação de Incertezas e Avaliação da Ameaça Sísmica	16
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	Contexto Teórico	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	Metodologia e Processamento	23
5.1	Conjunto de Dados	23
5.1.1	Fonte e Disponibilidade de Dados	23
5.2	Ferramentas	23
5.2.1	Programas	23
5.2.2	Linguagens	24
5.2.3	Bibliotecas	24
5.2.4	Implementações	24
5.3	Pré-Processamento	24
5.3.1	Checagem de Qualidade	24
5.3.2	Remoção de agrupamentos	24
5.3.3	Conversão de Magnitudes	24
5.3.4	Análise da Completude	25
5.4	Frankel, 1995	25
5.5	Woo, 1996	25
5.6	Helmstetter, 2012	26
5.7	Pós-Processamento	26
5.7.1	Cálculo da Ameaça Sísmica	26

5.7.2 Cálculo da Desagregação	26
6 Resultados	27
6.1 Resultados Anteriores	27
6.1.1 GSHAP	27
6.1.2 Zoneamento Sísmico	27
6.2 Suavização da Sismicidade	27
6.2.1 Frankel, 1995	29
6.2.2 Woo, 1996	29
6.2.3 Helmstetter, 2012	30
7 Conclusões	33
7.1 Considerações Finais	33
7.2 Sugestões para Pesquisas Futuras	33
A Sequências	35
Referências Bibliográficas	37
Glossário	39
Índice Remissivo	41

Listas de Abreviaturas

DSHA Análise Determinística de Ameaça Sísmica. 13, 14

GR Gutenberg-Richter. 10

MFD Distribuição de Frequência e Magnitude. 9, 12, 16, 39

PSHA Análise Probabilística de Ameaça Sísmica. 13–15, 19, 39

Lista de Símbolos

$M_c(\mathbf{r}, t)$ magnitude de completude na localização \mathbf{r} , e no instante t . 20

w_i peso associado ao tremor i . 20

A área afetada. 7

G ganho de probabilidade por cada tremor no catálogo-alvo sobre um modelo espacialmente uniforme de Poisson.. 20

$K_1\left(\frac{t-t_i}{h_i}\right)$ kernel na dimensão do tempo, onde t_i é a localização temporal do tremor i e h_i é a largura de banda temporal do tremor i . 20

L_u máxima verossimilhança de um modelo uniforme. 20, 21

L log da máxima verossimilhança. 20

M_0 momento sísmico. 7

M_W magnitude de momento sísmico. 7

M_d valor mínimo de magnitude no catálogo. 20

$N(m, m + dm)$ número de eventos com magnitude entre m e $m + dm$. 9–11

$N_p(i_x, i_y)$ taxa de sismicidade de longo-prazo. xii, 20

N_t número de eventos no catálogo-alvo. 20

$R(\mathbf{r}, t)$ taxa de sismicidade na localização \mathbf{r} , e no instante t . 20

R_{min} mínima taxa de sismicidade. 20

β_p $\beta_p = \frac{2}{3}b$, é o beta da distribuição de Pareto. 11

\mathbf{r}_i localização espacial do tremor i . 20

\mathbf{r} lugar no espaço. xi, 6, 20

\hat{A} amplitude no sismômetro Wood-Anderson. 7

\hat{d} distância de 100 km do tremor. 7

λ taxa de ocorrência. 12

μ_{rig} coeficiente de rigidez da rocha. 7

\tilde{D} deslocamento médio. 7

a_{cnn} acoplamento espaço-temporal. 20

a valor-a (corresponde à um índice de produtividade). 9, 10

b valor-b (corresponde à proporção de sismos pequenos e grandes, geralmente em torno de 1). xi, 9–11, 20

d_i largura de banda espacial do tremor i . 20

d_k $\max \{d_j\}, j = 1..k_{cnn}$. 20

h_i largura de banda temporal do tremor i . xi, 20

h_k $\max \{h_j\}, j = 1..k_{cnn}$. 20

k_{cnn} k^{th} vizinho mais próximo. 20

m_{corner} valor de magnitude responsável por controlar o decaimento da Kagan-MFD. 11

m magnitude. 6, 9, 10

$n(i_x, i_y)$ número de eventos em (i_x, i_y) . 20, 21

$p(N_p, n)$ probabilidade de se observar n eventos com probabilidade . 20

t_i localização temporal do tremor i . xi, 20

t tempo. xi, 6, 7, 20

km kilometros. 4, 37

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
2.6	Distribuição incremental e cumulativa de frequencia e magnitude dos sismos presentes no catálogo ISC-GEM para a América do Sul unido com o BSB2013	12
5.1	ajuste da largura de banda para o método de Woo1996	25
6.1	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Dourado, 2014, Crisis-2007]	28
6.2	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Dourado, 20014] OpenQuake-Engine	28
6.3	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Frankel, 1995]	29
6.4	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Frankel, 1995]	30
6.5	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Woo, 1996]	31
6.6	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Woo, 1996]	31
6.7	Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Helmstetter, 2012]	32
6.8	Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Helmstetter2012]	32

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.	36

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

Conceitos

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.

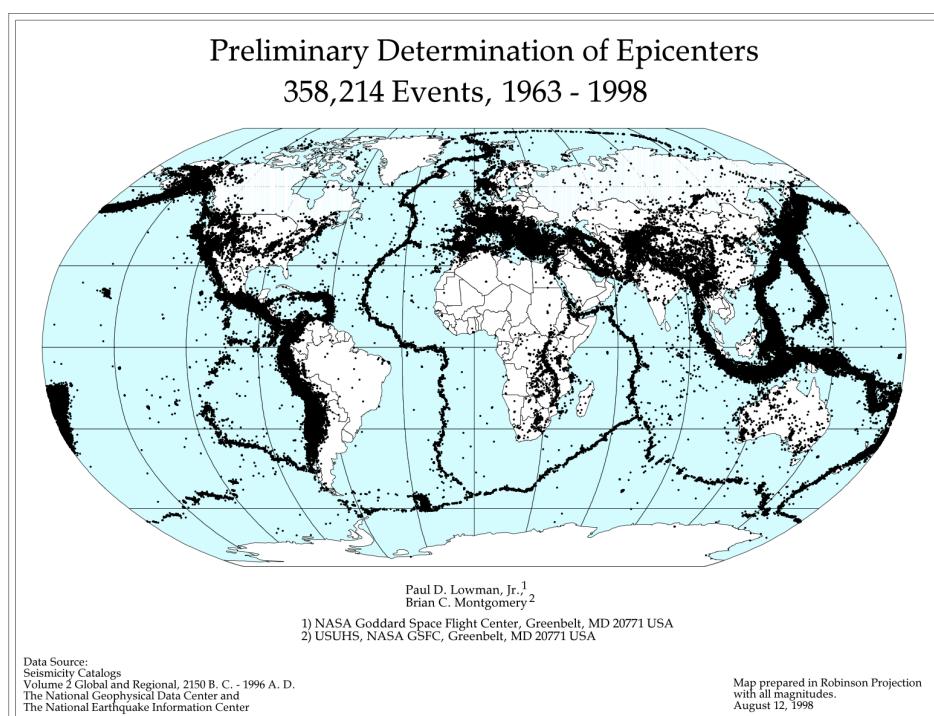


Figura 2.1: Mapa Mundial de Epicentros 1963-1998¹

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**.

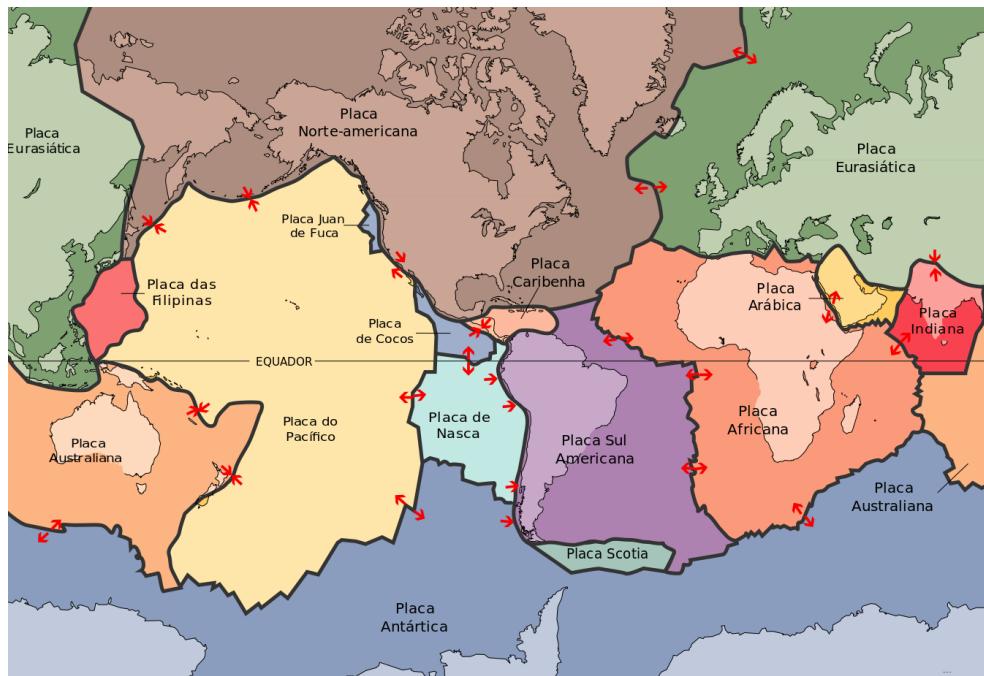


Figura 2.2: Cartografia das placas litosféricas²

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)

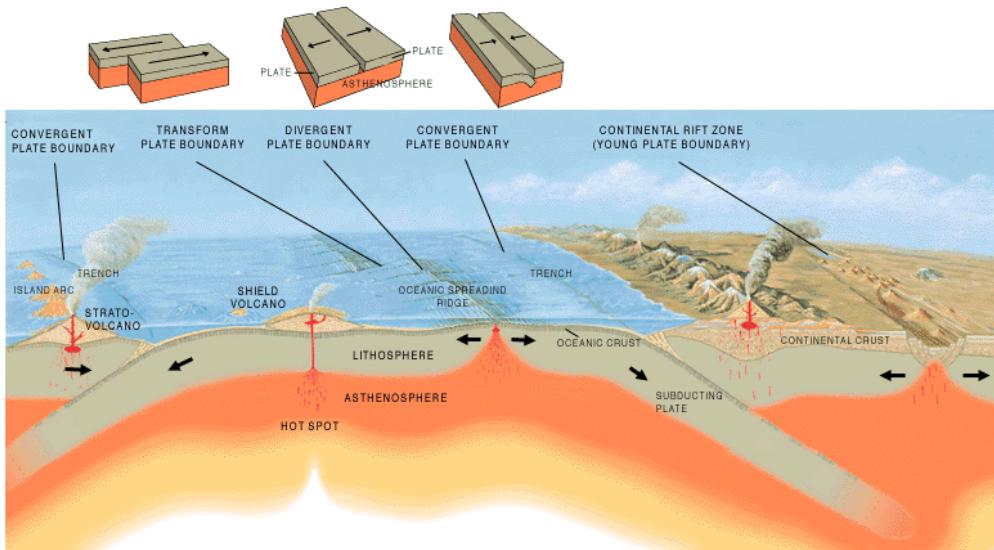


Figura 2.3: Diferentes tipos de interações entre placas litosféricas em suas bordas³

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 .

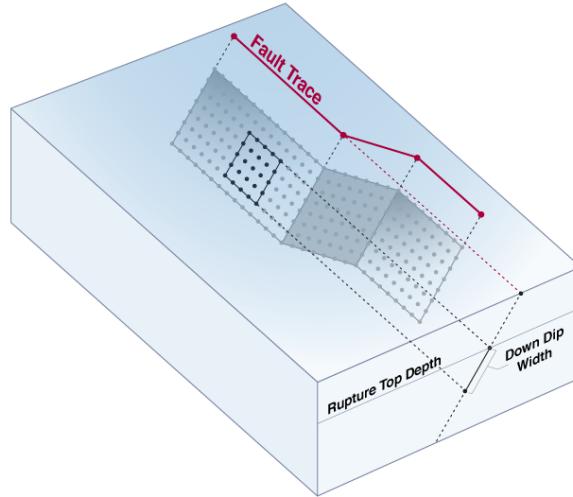


Figura 2.4: Ilustração da área de ruptura em um falhamento geológico⁴

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.

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.

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

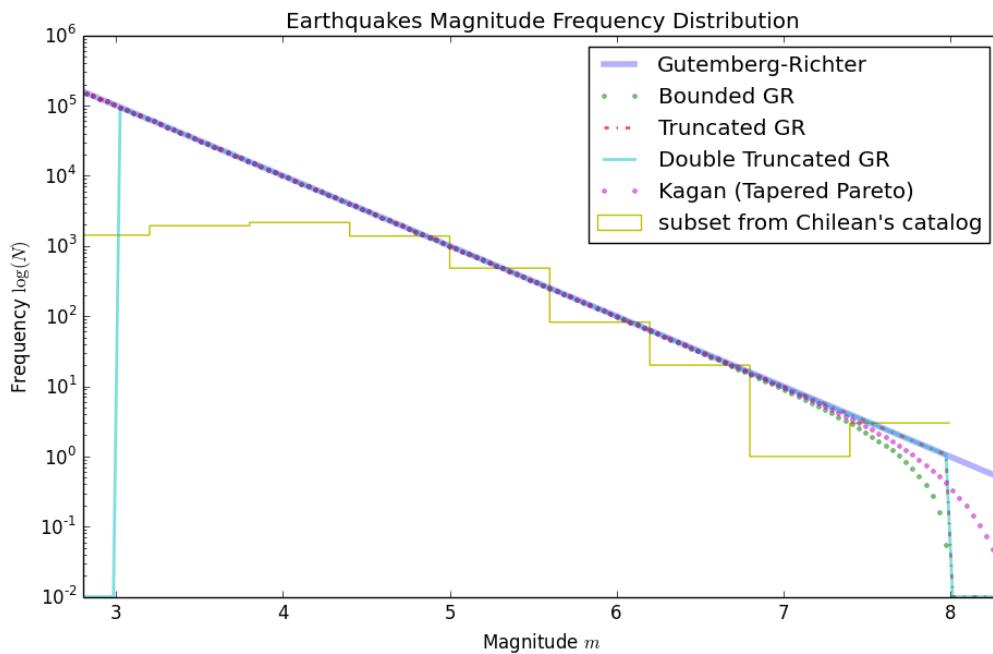


Figura 2.5: Distribuições de frequência e magnitude

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: (i) na parte inferior, muitos sismos de magnitude pequena não são registrados, seja por não terem energia suficiente para sensibilizar um conjunto razoável de estações que permitam determinar suas localizações, seja porque o número de estações é insuficiente na região onde os pequenos tremores ocorrem; (ii) 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 .

Nas distribuições de magnitude e frequência é importante que se possa reconhecer claramente alguns parâmetros fundamentais.

2.2.5 Valor-b

O *valor-b* foi apresentado nesta seção como a inclinação da reta que representa a parte plana descendente da distribuição. Representa a proporção de sismos pequenos e catastró-

ficos que uma determinada fonte sísmica é capaz de produzir.

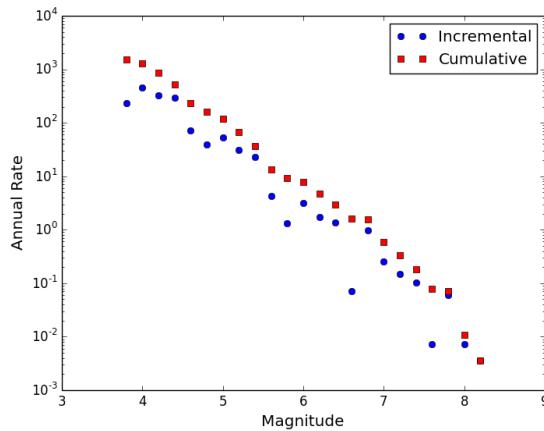


Figura 2.6: Distribuição incremental e cumulativa de frequencia e magnitude dos sismos presentes no catálogo ISC-GEM para a América do Sul unido com o BSB2013

2.2.6 Taxa de Sismicidade

A taxa de sismicidade é a medida da ocorrência dos tremores por uma determinada unidade de tempo (geralmente anos). Representa para cada magnitude, a frequência média de ocorrência (λ do processo de Poisson).

2.2.7 Valor-a

O *valor-a* é a projeção da MFD no eixo das frequências e representa o nível geral de sismos que as fontes observadas pelo catálogo são capazes de produzir.

Costuma ser confundido pela forma de representação adotadas para a distribuição (incremental e/ou cumulativa) e pelos truncamentos onde por vezes se apresenta o valor-a como a taxa de sismicidade da magnitude mínima ou de completude do catálogo.

No presente trabalho o valor-a significará sempre o valor-a da distribuição cumulativa de sismos por unidade de tempo com magnitudes positivas.

2.2.8 Magnitude de Completude

A magnitude de completude é o valor mínimo para o qual a distribuição é capaz de observar o conjunto completo dos sismos. Em outras palavras representa o limite de observação completa do catálogo.

Sua identificação é bem simples quando se observa a distribuição incremental de magnitudes. É facilmente notado o valor de magnitude na porção inferior na qual o número de sismos registrados começa a divergir da tendência geral da distribuição.

Seu mapeamento é importante uma vez que os métodos de ajuste e determinação dos parâmetros da distribuição baseados na máxima verossimilhança (REFERENCIA) dependem fundamentalmente desse valor mínimo.

FIGURA SouthAm ISC-GEM

2.3 Risco Sísmico

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 risco e ameaça 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 por superarem 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 uma combinação da ameaça sísmica com outros fatores:

$$\text{SeismicRisk} = \text{SeismicHazard} * \text{Vulnerability} * \text{ExposedValue} \quad (2.3.1)$$

onde a vulnerabilidade é a quantidade de danos induzidos por um dado grau de ameaça e expressa como uma fração do valor exposto ao dano e varia de acordo com o modelo proposto.

Frequentemente, o fator vulnerabilidade advém das análises das (ii) respostas das estruturas edificadas ao espectro de acelerações produzidos pela (i) provável ameaça sísmica e da análise de possíveis (iii) danos estruturais à edificação.

A decisão de alterar ou não o desenho estrutural das edificações é feito a partir da análise dos (iv) prejuízos (quantidade de moeda, mortes, tempo inoperante) causados caso as estruturas sejam danificadas conforme as análises anteriores.

2.4 Ameaça Sísmica

A ameaça sísmica poderia ser definida de modo geral como a possibilidade de ocorrer efeitos potencialmente destrutivos de um terremoto em uma particular localização. Com exceção de *tsunamis* ou falhamentos geológicos superficiais, todos os efeitos destrutivos de um tremor de terra estão diretamente relacionados ao movimento do chão induzido pela passagem das ondas sísmicas. Existem, entretanto, diferenças de abordagem para a avaliação da ameaça sísmica.

A **Análise Probabilística de Ameaça Sísmica (PSHA)** foi introduzida por Cornell (1968) e se tornou técnica mais amplamente usada para a avaliação da ameaça sísmica, mas também se pode fazer a avaliação através de cenários determinísticos definidos pelo espectro de movimento forte do chão que pode ser caudado pela ocorrência de um determinado tremor de terra em certa localização e de certa magnitude. O possível movimento forte no local de interesse é avaliado através de relações de atenuação ou **GMPE**.

Os mecanismos da **PSHA** são menos óbvios do que os da **Análise Determinística de Ameaça Sísmica (DSHA)** e em essência significam identificar todos os possíveis tremores que podem afetar o local de interesse, incluindo todas as possíveis combinações de distâncias e caracterizar a frequência de ocorrência das diferentes magnitudes através de relações de recorrência. As equações de atenuação são utilizadas para calcular os parâmetros do movimento do chão no local de interesse devido a esses tremores e consequentemente a taxa com

que diferentes níveis de movimento do chão ocorram no local de interesse.

Seus resultados também apresentam certa distinção. Se por um lado a **PSHA** traz consigo o aspecto temporal, ou a taxa com que diferentes níveis de aceleração excederão determinado limiar em determinado local de interesse, por outro, a **DSHA** apresenta o movimento do chão esperado quando ocorra determinado evento de controle.

TODO: (Cornell, 1968) DSHA (Reiter, 1990; Kramer, 1996; Krinitzsky, 2002)

(Cornell, 1968; Bazzurro and Cornell, 1999; Abrahamson, 2000b; Hanks and Cornell, 2001; Abrahamson, 2006)

differences bommer, 1998

2.4.1 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 é a auxiliar na 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.

2.5 Análise Probabilística de Ameaça Sísmica

Na **PSHA** são considerados todos os possíveis tremores, as rupturas que os originaram e os movimentos do chão resultantes conjuntamente com suas probabilidades de ocorrência associadas de modo a encontrar o nível de movimento do chão que será excedido com uma determinada baixa tolerância (BAKER)

Se por um lado Cornell foi um dos pioneiros em desenvolver e apresentar a metodologia da **PSHA**, McGuire (1976) introduziu importantes elementos com seu software EQRISK. Mas fundamentalmente o método consiste de dois pilares, o primeiro é a definição de zonas sismogênicas como áreas ou linhas em cuja sismicidade deveria ser considerada espacialmente uniforme. O segundo é o pressuposto de que a sismicidade pode ser representada por um processo de Poisson. Os dois têm sido de uma maneira ou outra questionados e pesquisadores ainda propõem alternativas.

Uma **PSHA** pode ser separada em cinco passos para uma melhor compreensão:

- Identificar todas as fontes sísmicas capazes de produzir movimentos do chão potencialmente danosos.
- Caracterizar a distribuição de magnitudes (taxa de esperada de ocorrência para cada magnitude possível de tremor).
- Caracterizar a distribuição de distâncias dos tremores ao local de interesse associada com cada potencial fonte sísmica.

- Prever a distribuição resultante da intensidade do movimento do chão devido à distância do tremor, à magnitude, às condições geológicas do local de interesse, etc.
- Combinar as incertezas das prováveis locais de origem, das prováveis magnitudes e dos prováveis movimentos do chão causados pelos tremores de terra usando o teorema da probabilidade total.

Os diferentes métodos de **PSHA** variam propondo alterações em uma ou mais dessas etapas detalhadas a seguir.

2.5.1 Identificação das fontes sísmicas

Para identificar fontes sísmicas são utilizados desde registros históricos de sismicidade à evidências geológicas de falhamentos/rupturas datados com deslocamento e magnitudes inferidos e busca-se aproveitar de toda informação relevante disponível, como a medida secular de deslocamento relativo entre observações geodésicas contínuas ou mesmo da sismicidade recente.

Tipologia e Representação Geométrica

Quando se identifica uma fonte sísmica é comum representá-la segundo uma forma geométrica mais consistente com o conjunto das observações disponíveis para descrever as possíveis rupturas.

Ponto

Se apenas se conhece a localização isolada de um tremor antigo, com magnitude e com mecanismo de falhamento conhecido, é possível representá-lo como uma fonte sísmica de tipo pontual. Nesse tipo de fonte são definidos os limites superior e inferior da ruptura, sua orientação e tipo de falhamento (quando disponíveis) e o epicentro é definido a partir do centro de cada ruptura.

Área

Quando o conhecimento sobre a geologia, a tectônica, ou mesmo a correlação espacial dos tremores no catálogo, permitam o delineamento de zonas com características sísmicas comuns, se costuma representar como áreas com forma poligonal onde por fim serão discretizadas como um conjunto de fontes sísmicas de característica pontual distribuída uniformemente por toda área.

Falha Simples

Muitas vezes os parâmetros de um falhamento ativo são claramente conhecidos e monitorados. Isso permite uma maior especificidade na representação da fonte sísmica, diminuindo, por exemplo, as incertezas na orientação das rupturas. Nesse caso a geometria da falha se caracteriza pela projeção do traço de falha na superfície e pelos limites superior e inferior da ruptura no plano de mergulho.

Falha Complexa

Casos de sismicidade mais complexa como zonas de subdução ou encontro de placas, tem uma sismicidade mais complexa, gerada por estruturas maiores e mais profundas que apresentam geralmente variações laterais de mergulho, acúmulo de esforços, orientação, etc. Fontes sísmicas em situações como essa são modeladas por como múltiplos segmentos simples e unidos de forma suave.

2.5.2 Caracterização da MFD

Conhecida a fonte sísmica e sua representação geométrica, é preciso caracterizar sua capacidade sismogênica determinando uma (ou mais) possíveis MFD a que se ajustam as observações. Isso inclui a forma da distribuição, a taxa geral de sismicidade (valor-a) e frequentemente as magnitudes mínima e máxima.

2.5.3 Caracterização da Distribuição de Distâncias

Dados um local de interesse e uma provável ruptura em uma fonte sísmica, é necessário calcular a distribuição das distâncias da fonte ao local de interesse.

É necessário calcular a distribuição da distância das possíveis rupturas em uma fonte sísmica à um determinado local de interesse.

2.5.4 Predição do Movimento do Chão

Para se estimar os possíveis níveis de movimento do chão causados por eventos de uma determinada magnitude à uma certa distância do local de interesse são utilizadas as GMPEs.

forma geral da gmpe

Exemplo de modelagem de gmpe

2.5.5 Combinação de Incertezas e Avaliação da Ameaça Sísmica

Integral do Hazard. . . .

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

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.

3.3.2 Sul, Sudeste e Litoral Leste

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.

3.3.3 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

3.3.5 Extremo Oeste

3.4 Extremo Oeste

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.

Capítulo 4

Contexto Teórico

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 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

$$K(x) \quad (4.2.1)$$

bla bla (?) ...

4.2.1 Frankel, 1995

4.2.2 Woo, 1996

texto texto texto texto texto texto

$$R(\mathbf{r}, m) = \sum_{i=1}^N \frac{K(m, \mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{T(\mathbf{r}_i)} \quad (4.2.2)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$K(\mathbf{r}, m) = \frac{a_W - 1}{\pi h(m)^2} \left(1 + \frac{\mathbf{r}^2}{h(m)^2} \right)^{-a_W} \quad (4.2.3)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$K(\mathbf{r}, m) = \begin{cases} \frac{D_W}{2\pi h(m)^2} \left(\frac{h(m)}{\mathbf{r}} \right)^{2-D_W} & r \leq h(m) \\ 0 & r > h(m) \end{cases} \quad (4.2.4)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$h(m) = ce^{dm} \quad (4.2.5)$$

onde c e d são determinados por regressão entre a distância média h de cada tremor ao vizinho mais próximo em cada faixa de magnitude m .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

4.2.3 Helmstetter, 2012

Texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$R(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_i d_i^2} K_1\left(\frac{t - t_i}{h_i}\right) K_2\left(\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i\|}{d_i}\right) \quad (4.2.6)$$

onde $R(\mathbf{r}, t)$ é taxa de sismicidade na localização \mathbf{r} , e no instante t , K_1 é o kernel na dimensão do tempo, onde t_i é a localização temporal do tremor i e h_i é a largura de banda temporal do tremor i , K_2 é o kernel na dimensão do espaço, onde \mathbf{r}_i é a localização espacial do tremor i e d_i é a largura de banda espacial do tremor i .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$R(\mathbf{r}, t) = R_{min} + \sum_{t_i < t} \frac{2}{h_i d_i^2} K_1\left(\frac{t - t_i}{h_i}\right) K_2\left(\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i\|}{d_i}\right) \quad (4.2.7)$$

onde R_{min} é a mínima taxa de sismicidade.

texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$w_i = 10^{b(M_c(\mathbf{r}, t) - M_d)} \quad (4.2.8)$$

onde w_i é o peso associado ao tremor i , b é o valor-b (corresponde à proporção de sismos pequenos e grandes, geralmente em torno de 1), $M_c(\mathbf{r}, t)$ é a magnitude de completude na localização \mathbf{r} , e no instante t , M_d é a valor mínimo de magnitude no catálogo.

texto texto

$$\arg \min_{d_i \geq d_k} [s(h_i, d_i | k_{cnn}, a_{cnn}) := h_i + a_{cnn} d_i] \quad (4.2.9)$$

onde k_{cnn} é k^{th} vizinho mais próximo, a_{cnn} é acoplamento espaço-temporal, d_k é $\max\{d_j\}$, $j = 1..k_{cnn}$ e h_k é $\max\{h_j\}$, $j = 1..k_{cnn}$.

texto texto

$$L = \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_y=1}^{N_y} \log p[N_p(i_x, i_y), n(i_x, i_y)] \quad (4.2.10)$$

onde

texto texto

$$p(N_p, n) = \frac{N_p^n e^{-N_p}}{n!} \quad (4.2.11)$$

onde

texto texto

$$G = e^{\frac{L - L_u}{N_t}} \quad (4.2.12)$$

onde

texto texto

$$L_u = -N_t + \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_y=1}^{N_y} n(i_x, i_y) \log N_u - \log [n(i_x, i_y)!] \quad (4.2.13)$$

onde

texto texto

$$\begin{aligned} L - L_u &= \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_y=1}^{N_y} n(i_x, i_y) \log \left[\frac{N_p(i_x, i_y)}{N_u} \right] \\ &= \sum_{i=1}^{N_t} \log \left[\frac{N_p(i)}{N_u} \right] \end{aligned} \quad (4.2.14)$$

onde

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$G = e^{\sum_{i=1}^{N_t} \frac{\log[\mathcal{N}_p(i)/\mathcal{N}_u]}{N_t}} = \langle \mathcal{N}_p(i)/\mathcal{N}_u \rangle_{geom} \quad (4.2.15)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$I(A, B) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \log \left[\frac{N_A(i)}{N_B(i)} \right] \quad (4.2.16)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$\sigma^2(x_i) = \frac{1}{N_t - 1} \left(\sum_{i=1}^{N_t} x_i^2 \right) - \frac{1}{{N_t}^2 - N_t} \left(\sum_{i=1}^{N_t} x_i \right)^2 \quad (4.2.17)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

$$T = \frac{I\sqrt{N_t}}{\sigma} \quad (4.2.18)$$

onde . . .

texto
texto texto texto texto texto texto texto texto texto texto

Capítulo 5

Metodologia e Processamento

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.

5.1 Conjunto de Dados

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.

5.1.1 Fonte e Disponibilidade de Dados

5.2 Ferramentas

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.

5.2.1 Programas

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 texto texto texto.

5.7.2 Cálculo da Desagregação

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.

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.

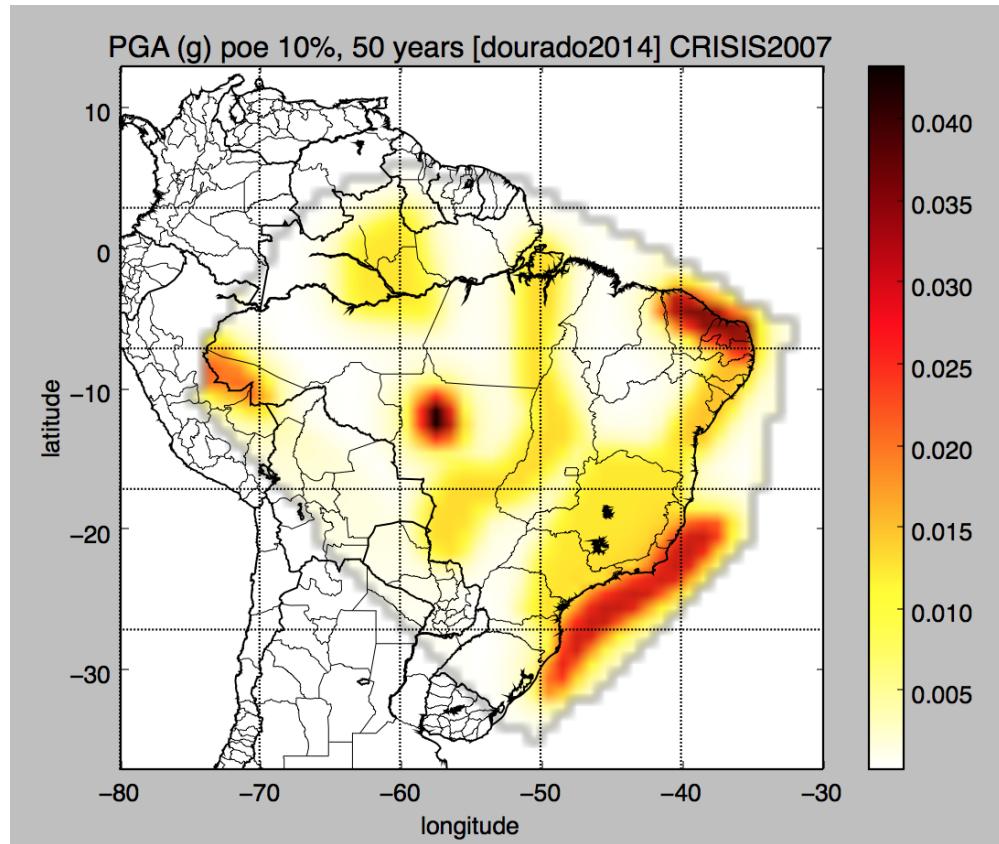


Figura 6.1: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Dourado, 2014, Crisis-2007]

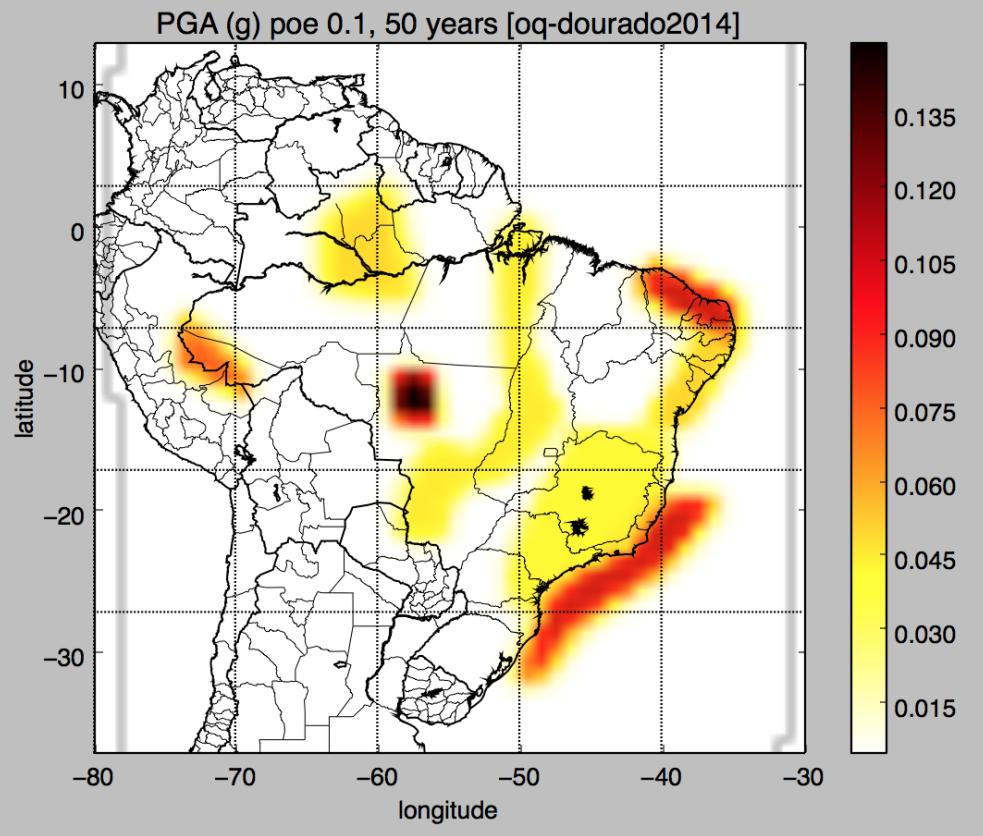


Figura 6.2: Seismic Hazard: $PGA(poe 0.1, 50y)$ [Dourado, 2014] OpenQuake-Engine

6.2.1 Frankel, 1995

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

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

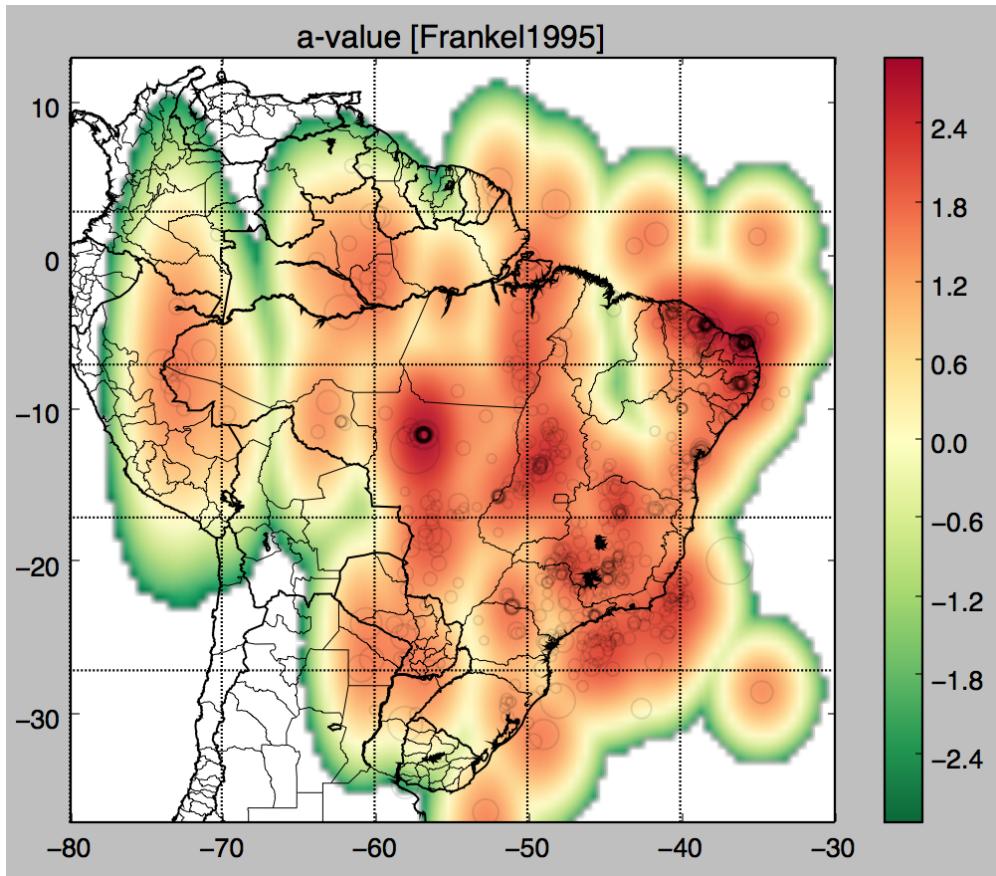


Figura 6.3: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Frankel, 1995]

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

bla bla bla bla 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.

Os resultados...

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

6.2.2 Woo, 1996

bla bla bla bla bla bal. 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.

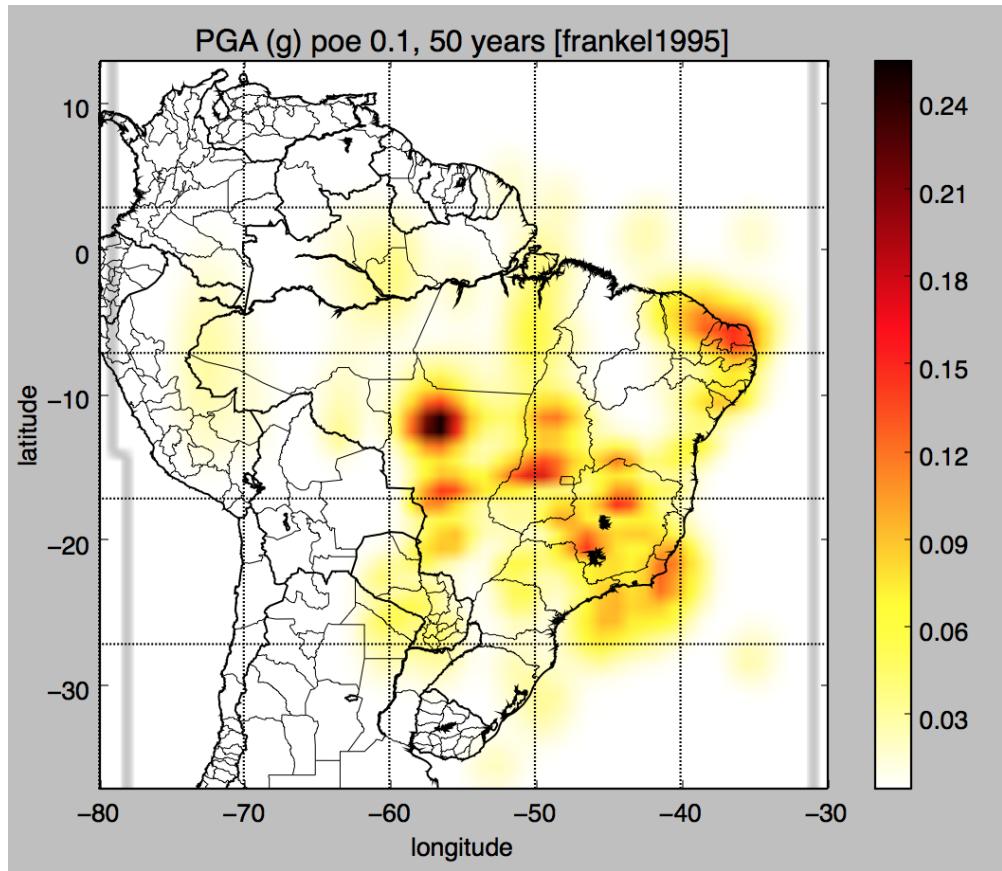


Figura 6.4: *Seismic Hazard: PGA(poe 0.1, 50y)[Frankel, 1995]*

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...

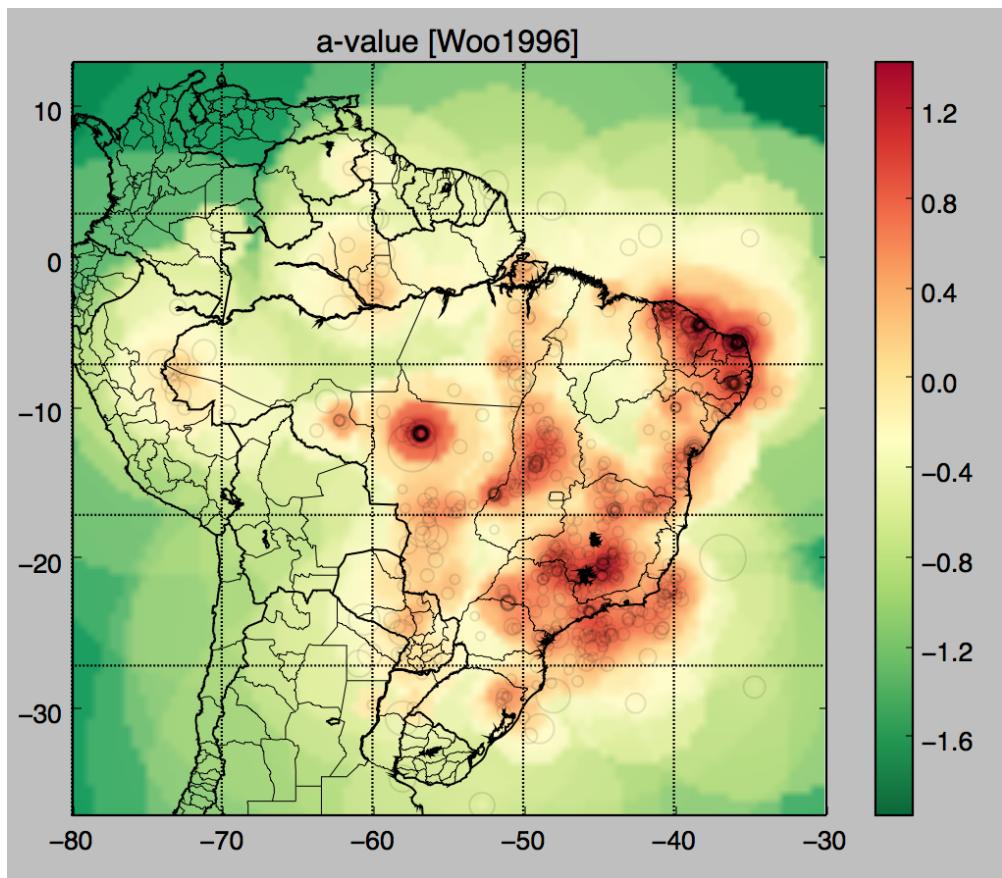


Figura 6.5: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Woo, 1996]

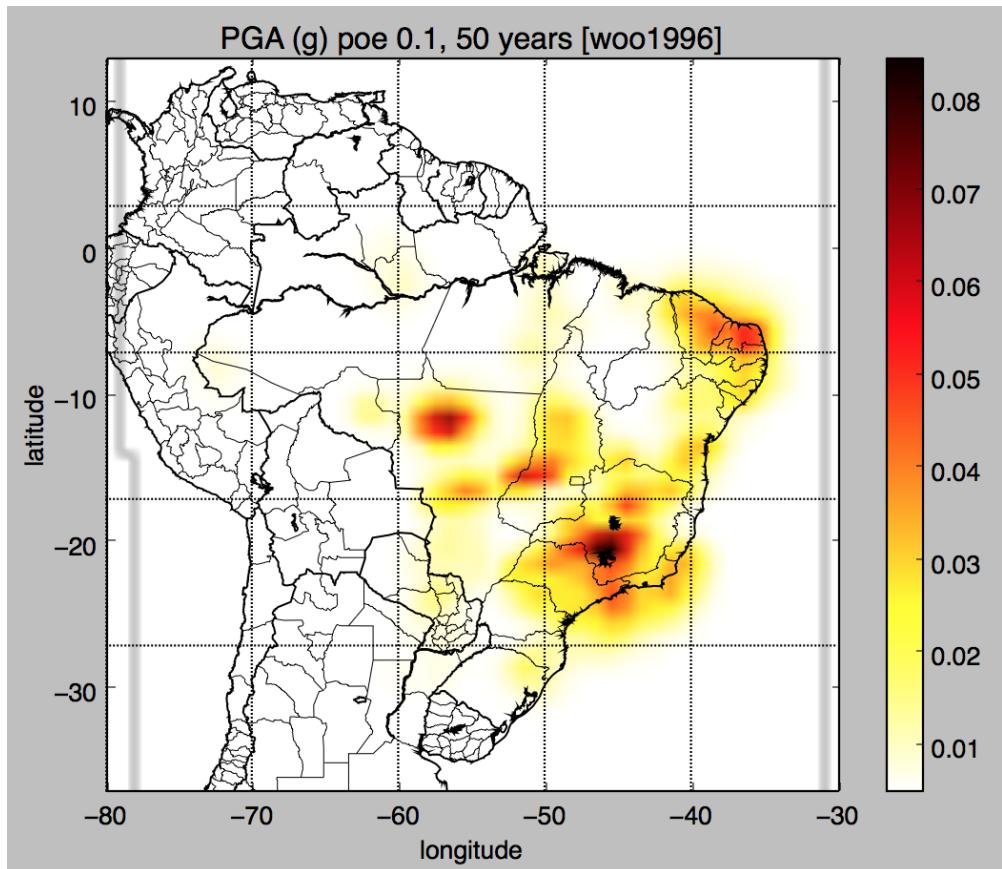


Figura 6.6: Seismic Hazard: $PGA(poe\ 0.1,\ 50y)$ [Woo, 1996]

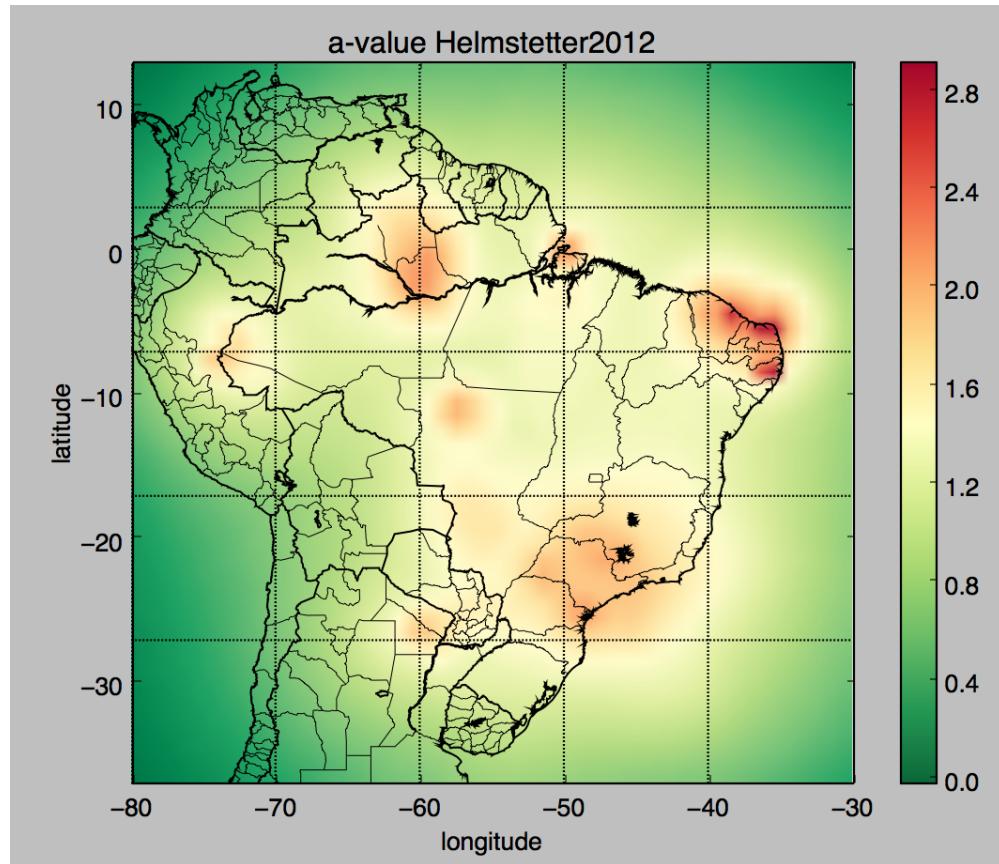


Figura 6.7: Seismic Rate: $a(m > M_{min} = 0)$ [Helmstetter, 2012]

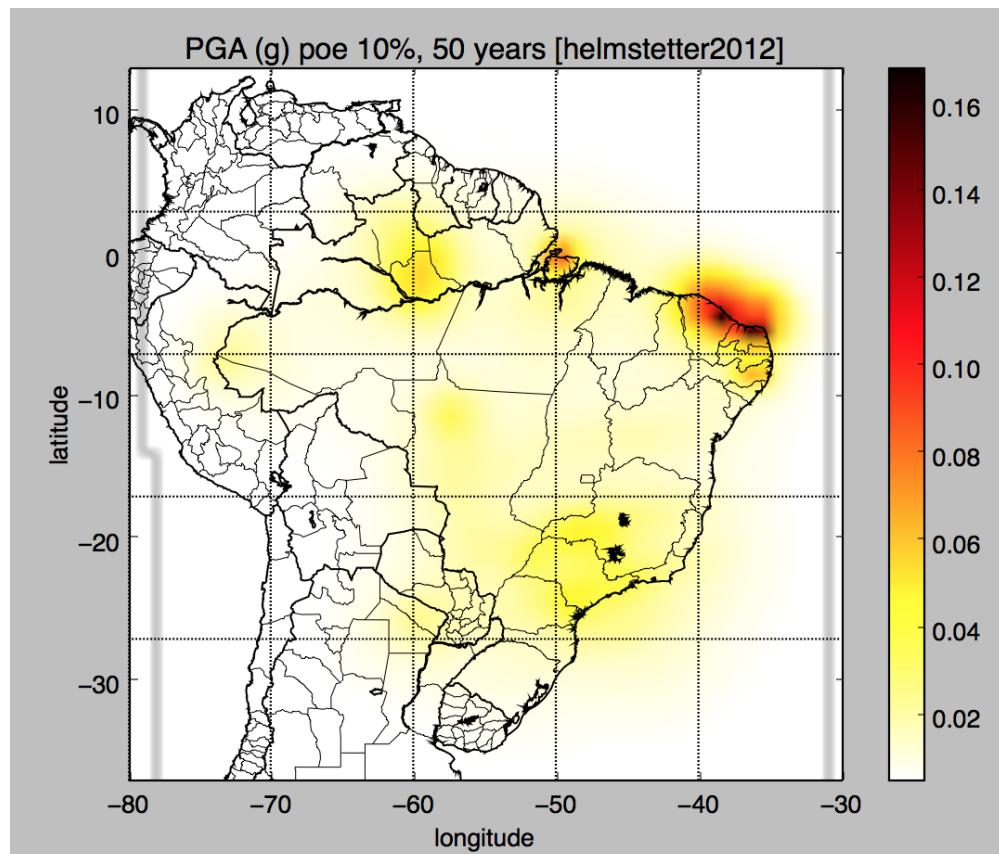


Figura 6.8: Seismic Hazard: $PGA(poe 0.1, 50y)$ [Helmstetter 2012]

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. 33

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, 37](#)

crosta terrestre parte superficial, rígida e mais externa do planeta Terra. [37, 38](#)

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

fonte sísmica estrutura geológica capaz de produzir tremores de terra. [19, 38](#)

fonte sísmica pontual representação geométrica por um ponto, de uma fonte sísmica. [19](#)

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. [19](#)

GMPE Equação de predição do movimento do chão. [13, 16](#)

hipocentro representação geométrica do ponto no espaço, onde se iniciou o processo de ruptura da **crosta terrestre**. [6, 8, 37](#)

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, 37](#)

manto terrestre material da porção intermediária do planeta, fluido em tempo geológico. [4, 37, 38](#)

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

processo de ruptura processo que envolve o rompimento de uma região da crosta, o deslocamento relativo entre essas regiões, e consequantemente, a liberação de uma grande quantidade de energia, de forma praticamente instantânea, tomando-se como referênciia o **tempo geológico**. [37](#)

sismicidade ocorrência dos tremores. [39](#)

sismotectônica 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. [5, 39](#)

taxa de sismicidade taxa com que terremotos são produzidos por determinada [fonte sísmica](#). [14, 19](#)

tectônica disciplina científica focada nos processos responsáveis pela criação e transformação das estruturas geológicas da Terra e de outros planetas.. [3, 5, 37–39](#)

tempo geológico escala de tempo que vai desde a formação do universo até os tempos atuais, englobando a formação do planeta e as transformações ocorridas desde então. [37](#)

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, 39](#)

terremoto ruptura de alguma estrutura geológica. [3, 5, 6, 37, 39](#)

Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilística de ameaça sísmica. [i–iii](#)

técnicas de suavização consiste em capturar importantes feições do conjunto de dados, eliminando ruídos e outras estruturas de curto comprimento de onda presentes nos dados. [19](#)

Índice Remissivo

- Teoria tectônica das placas**
bordas, 4
interior, 5
- Tectônica**
Teoria tectônica das placas, 4
ácido
nucléico, 19, 23, 24
área do trabalho
fundamentos, 17, 18, 23–27, 29, 30
- terremoto**
ocorrência, 6
- PSHA**
identificação das fontes, 15
tectônica, 3
sismotectônica, 5
América do Sul, 17
sismicidade, 17

ameaça sísmica, 13

cálculo da ameaça, 16
caracterização da MFD, 16
caracterização da distribuição de distâncias, 16
catálogos, 8

fonte sísmica
área, 15
falha complexa, 16
falha simples, 15
ponto, 15

genoma
- projetos, 2
Gutenberg-Richter MFD, 9
hemlstetter, 2012, 20
instensidade macrossísmica, 7
magnitude, 6
momento sísmico, 7
Richter, 7
magnitude de completude, 12
MFD, 9
MFD com decaimento exponencial, 11
MFD Limitada, 10
MFD Truncada, 10

nucleotídeos, 19, 23, 24

predição do movimento do chão, 16
processo de Poisson, 6
projeção de ocorrência de rupturas, 14
PSHA, Análise Probabilística de Ameaça Sísmica, 14

Risco Sísmico, 13

sismicidade, 5
suavização
fundamentos, metodologia, 19

taxa de sismicidade, 12
Tipologia e Representação Geométrica, 15

valor-a, 12
valor-b, 11