

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DEL VALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

Evaluación de metodologías determinística y  
probabilística para estimación de aceleraciones  
sísmicas en la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Ana Valeria Sosa  
Ibáñez para optar al grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Civil

Guatemala

2020



Evaluación de metodologías determinística y  
probabilística para estimación de aceleraciones  
sísmicas en la Ciudad de Guatemala



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DEL VALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

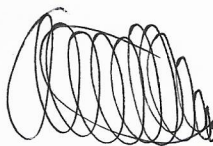
Evaluación de metodologías determinística y  
probabilística para estimación de aceleraciones  
sísmicas en la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Ana Valeria Sosa  
Ibáñez para optar al grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Civil

Guatemala

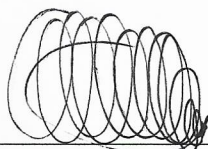
2020

Vo. Bo. :

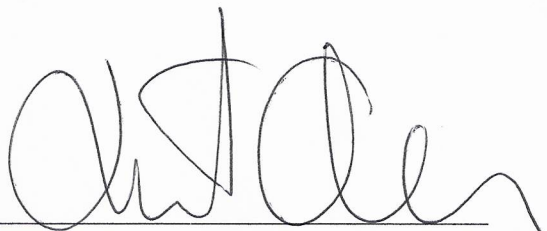
(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Álvaro Rubio


Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Álvaro Rubio

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Roberto Godo Levensen

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Omar Flores

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de diciembre del 2020.



## **Prefacio**

Principalmente el trabajo busca realizar el desarrollo de un panorama sísmico para la región metropolitana. Tomando en consideración las características esenciales como: geología y ubicación del punto de estudio. Se dividirá en cuatro fases esenciales; La primera fase, se basa en la recopilación informática, buscando el entorno sismológico y geológico de Guatemala. Identificando de igual manera las fallas activas en el territorio guatemalteco.

La segunda fase, consistió en el procesamiento de la información obtenida, donde se clasifican por magnitud y fuente de liberación, los eventos sísmicos obtenidos, para procesar una cuantificación de los eventos, obteniendo el tiempo de recurrencia de los eventos por magnitud de la fuente proveniente. Es esencial puesto que da el comportamiento de las fallas en el país, y la magnitud máxima de sismo que puede generar una falla.

La tercera fase, se comenzó a realizar ambos espectros de aceleración por medio de ambas metodologías. El análisis determinístico implica el desarrollo de un escenario sísmico particular en el que se basa la evaluación del peligro del movimiento del suelo. El escenario consiste en la ocurrencia postulada de un terremoto de un tamaño específico que ocurre en una ubicación. Mientras el análisis probabilístico proporciona un marco sísmico, en el que la incertidumbre del evento sísmico puede ser cuantificada por medio de las leyes de probabilidad. Ambos pueden dar resultados diferentes a causa del riesgo que se desea tomar.

Para la última parte, se observan los resultados de las aceleraciones sísmicas por medio de los dos métodos de cálculo de aceleraciones sísmicas, ambos resultados varían, lo cual es la razón del estudio, se logró concluir las fallas críticas para ambas metodologías evaluadas para la Ciudad de Guatemala y realizar recomendaciones para una mejor base de datos de los espectros.

# Índice

Prefacio .....	viii
Lista de ilustraciones.....	i
Lista de tablas.....	ii
Resumen.....	iii
I. Introducción .....	1
II. Objetivos .....	2
A. Objetivo general.....	2
B. Objetivos específicos.....	2
III. Antecedentes .....	3
A. Una nueva evaluación del peligro sísmico para la región de América Central-.....	3
Proyecto Resis II .....	3
B. AGIES: NSE 2 – 2018 Demandas estructurales y condiciones de sitio.....	3
1. Capítulo 4 – Aspectos sísmicos.....	3
IV. Marco teórico .....	7
A. Movimiento de placas tectónicas .....	7
B. Fallas geológicas .....	8
1. Geometría de una falla .....	8
C. Sismología.....	9
1. Sismos .....	9
D. Parámetros sísmicos .....	12
1. Intensidad .....	12
2. Magnitud .....	12
3. Energía liberada.....	12
4. Recurrencia .....	12
5. Velocidad de onda de corte .....	13
E. Escalas sísmicas .....	13
1. Mercalli modificada .....	13
2. Richter.....	14
3. Magnitud de momento .....	14
F. Espectro de respuesta .....	15
1. Aceleración máxima.....	17
2. Velocidad máxima.....	17
3. Desplazamiento máximo .....	18
G. Relaciones de atenuación .....	18
1. Campbell – Bozorgnia.....	18
2. Boore – Stewart – Seyhan – Atkinson.....	18

3.	Chiou – Young .....	19
H.	Geología de Guatemala .....	20
1.	Geología local de la Ciudad de Guatemala .....	22
I.	Fallas geológicas en Guatemala .....	24
1.	Sistema de fallas transcurrentes .....	24
2.	Zona de subducción.....	25
3.	Geomorfología del graben de la Ciudad de Guatemala.....	26
V.	Análisis determinístico de riesgo sísmico .....	28
VI.	Resultados del análisis determinístico de riesgo sísmico .....	30
VII.	Análisis probabilístico de riesgo sísmico .....	34
1.	Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter.....	35
VIII.	Resultados del análisis probabilístico de riesgo sísmico.....	37
IX.	Comparación de espectros.....	44
X.	Conclusiones y Recomendaciones .....	46
A.	Conclusiones .....	46
B.	Recomendaciones.....	47
XI.	Bibliografía .....	48
XII.	Glosario.....	49
A.	Amplitud .....	49
B.	Atenuación .....	49
C.	Flujo convectivo.....	49
D.	Morfología.....	49
E.	Percentil.....	49
F.	Promedio geométrico .....	49
G.	Tipos de fallas geológicas .....	50
H.	Falla transformante.....	50
I.	Falla convergente .....	50
J.	Falla divergente.....	51
K.	Subducción.....	51

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Mapa de zonificación sísmica de Guatemala .....	5
Ilustración 2 Las placas tectónicas principales, oceánicas medias, trincheras y fallas de transformantes. Las flechas indican las direcciones de los movimientos de los lugares.....	7
Ilustración 3 Descripción de la notación geométrica de la orientación de un plano de falla .....	9
Ilustración 4 Diagrama ilustrativo de un sismo.....	9
Ilustración 5 Diagrama descriptivo de la localización de un sismo .....	10
Ilustración 6 Deformaciones producidas por ondas: (a) ondas P; (b) ondas S.....	11
Ilustración 7 Deformaciones producidas por ondas: (a) ondas R; (b) ondas L .....	11
Ilustración 8 Escala de Richter.....	14
Ilustración 9 Historias de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de los componentes E-W de los registros de movimiento fuerte de Gilroy N° 1 (roca) y Gilroy N° 2 (suelo).....	16
Ilustración 10 Mapa geológico de Guatemala.....	21
Ilustración 11 Mapa geológico detallado de la Ciudad de Guatemala .....	22
Ilustración 12 Descripción detallada de los estratos cuaternarios y terciario.....	22
Ilustración 13 Columna estratigráfica de los eventos piroclásticos en la Ciudad de Guatemala .....	23
Ilustración 14 Mapa de localización de fallas y pequeños terremotos dañinos.....	24
Ilustración 15 Location of the different regions of the subduction zone.....	25
Ilustración 16 Mapa geológico, basado en el mapa geológico de Guatemala (escala 1:250 000). Se muestra el modelo tectónico que interpreta la estructura del valle de Guatemala como un graben, limitado al este por la falla de Pinula y al oeste por la falla de Mixco.....	26
Ilustración 17 Sección transversal esquemática del Valle de Guatemala.....	27
Ilustración 18 Cuatro pasos de un análisis determinístico del peligro sísmico. ....	29
Ilustración 19 Espectro promedio para el sistema de fallas locales .....	31
Ilustración 20 Espectro promedio para la falla de Jalpatagua .....	31
Ilustración 21 Espectro promedio para la falla del Motagua.....	32
Ilustración 22 Espectro promedio para la zona de subducción .....	32
Ilustración 23 Espectro específico de sitio para la Ciudad de Guatemala.....	33
Ilustración 24 Cuatro pasos de un análisis probabilístico de riesgo sísmico.....	35
Ilustración 25 a) Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, que muestra el significado de a y b; b) aplicación de la ley de Gutenberg-Richter a los datos sobre la sismicidad en todo el mundo. ....	36
Ilustración 26 Portal de base de datos de eventos sísmicos USGS .....	37
Ilustración 27 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.01s .....	38
Ilustración 28 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.1s .....	38
Ilustración 29 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.2s.....	39
Ilustración 30 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.3s.....	39
Ilustración 31 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.5s.....	40
Ilustración 32 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.7s.....	40
Ilustración 33 Gráfica de riesgo total para el periodo de 1.0s.....	41
Ilustración 34 Gráfica de riesgo total para el periodo de 2.0s.....	41
Ilustración 35 Gráfica de riesgo total para el periodo de 3.0s.....	42
Ilustración 36 Espectros sísmicos generados con diferentes probabilidades de excedencia para la Ciudad de Guatemala. ....	42
Ilustración 37 Comparación de espectros de respuesta. ....	44
Ilustración 38 Mosaico de las placas rígidas que constituyen la envuelta externa de la Tierra .....	50
Ilustración 39 Esquemización de la falla de subducción.....	51

## Lista de tablas

Tabla 1 Escala de Mercalli modificada .....	13
Tabla 2 Definiciones de las clases de sitio para Boore y otros (1993) Relación de Atenuación .....	19
Tabla 3 Coeficientes para Boore y otros (1993) Relación de Atenuación .....	19
Tabla 4 Sismos seleccionados para el sistema de fallas locales.....	30
Tabla 5 Sismos seleccionados para la falla de Jalpatagua.....	30
Tabla 6 Sismos seleccionados para la falla del Motagua .....	30
Tabla 7 Sismos seleccionados para la zona de subducción.....	30
Tabla 8 Valores PGA para varias probabilidades de excedencia .....	43
Tabla 9 Valores PGA obtenidos por cada metodología .....	44

## Resumen

El presente trabajo de investigación, el cual lleva como título *Evaluación de metodologías determinística y probabilística para la estimación de aceleraciones sísmicas para el área metropolitana de Guatemala*, realiza un análisis de utilidad y aplicación sobre los métodos seleccionados con el propósito de generar espectros de aceleraciones sísmicas. Tomar los esfuerzos internos de la estructura, que provocan las aceleraciones sísmicas del suelo, es primordial para el diseño estructural, debido a que el área territorial de Guatemala es altamente sísmica.

Para principiar el trabajo, se realizó una recopilación de la historia sismológica y geológica de Guatemala, debido al papel importante que juegan, puesto a que afectan directamente en la recurrencia de los eventos sísmicos y como el tipo de suelo propaga las ondas sísmicas. Con esa información podemos obtener el origen de los sismos (hipocentro), la magnitud máxima de sismo que produce cada falla y la recurrencia de los eventos por tipo de falla. Es preciso clasificar los eventos sísmicos por la falla generada, pues que el movimiento que tiene diferentes características.

El método determinístico implica el desarrollo de un determinado escenario sísmico en el que se basa la evaluación del peligro del movimiento del suelo. El escenario consiste en la ocurrencia postulada de un terremoto de un tamaño específico que ocurra en una ubicación específica. Para ello se identifican y caracterizan todas las fuentes sísmicas capaces de producir un movimiento significativo en la tierra del sitio, se selecciona un parámetro de distancia falla-sitio para cada zona de falla.

A diferencia del método mencionado, el método probabilístico proporciona un marco en el que las incertidumbres, como magnitud, ubicación y tasa de recurrencia de los terremotos, pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas en una forma racional para proporcionar una imagen más completa del riesgo sísmico. Al tomar en cuenta el tiempo de recurrencia de los sucesos, se obtienen una gráfica de estimación de aceleraciones sísmicas dependiente del nivel de riesgo.

Cada metodología da un punto de vista diferente, ya que toman diferentes criterios para la estimación de las aceleraciones. No obstante, también se deben tomar en cuenta la clase de obra, nivel de protección sísmica y ubicación del proyecto, puesto que será información importante que ayudará al ingeniero estructural a la hora de diseñar. Con la finalidad de seleccionar el espectro óptimo y efectivo, reduciendo la probabilidad de sobre dimensionamiento la estructura y proporcionando seguridad ante los futuros eventos sísmicos.

## I. Introducción

Guatemala es considerado un país sísmico, debido a la convergencia de tres placas tectónicas en su área territorial; siendo estas la placa de Cocos, placa de Norteamérica y placa del Caribe, al colindar entre ellas generan rupturas en el suelo llamadas fallas, provocando la liberación de energía por medio de movimiento en la corteza terrestre, ósea un evento sísmico.

Al momento del sismo, se generan aceleraciones sísmicas que varían dependiendo del periodo de cada estructura, al tener la masa de la estructura expuesta a una aceleración, generan una fuerza lateral que se transforma en esfuerzos internos en la estructura que se deben considerar a la hora de realizar el diseño. A pesar de la información proporcionada por instituciones académicas internacionales y entidades profesionales nacionales, aún se encuentran limitantes para la estimación de aceleraciones sísmicas en Guatemala.

Realizar un análisis de criterios de aplicación sobre las metodologías determinística y probabilística, es necesario para optimizar los cálculos sísmicos en estructuras y contenciones. Puesto que se puede obtener las aceleraciones óptimas para una región.

La metodología determinística, toma en consideración una magnitud de momento crítica a una distancia establecida, y con ello se obtiene el espectro sísmico de ese evento sísmico en específico. Entretanto la metodología probabilística toma en consideración la magnitud de momento de varios eventos, las distancias a las que se encuentran las fallas y la recurrencia de los eventos, obteniendo varios espectros sísmicos con diferentes niveles de riesgo, así el ingeniero civil tome una decisión a criterio propio, para una estructura en particular.

Ambas metodologías pueden ser aplicadas a un país como Guatemala, por su geología y geomorfología. El estudio Resis II " Una nueva evaluación del peligro sísmico para la región de América Central", realizado por la Universidad Politécnica de Madrid, considera que Guatemala puede ser afectada por aceleraciones mayores a las que se encuentran en el código NSE 2-1 de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, el motivo de la diferencia de aceleraciones se debe a la aplicación de diferentes metodologías. El estudio emplea la metodología probabilística para la región de toda Centro América, mientras que AGIES considera solamente la extensión territorial de Guatemala, calculando sus aceleraciones por medio de la metodología determinística.

Las aceleraciones sísmicas afectan directamente a todo el entorno de construcción, el no tomar en consideración los esfuerzos que general en las estructuras, puede generar grandes pérdidas monetarias, pero más importante aún, pérdidas humanas; independientemente de la etapa en la que se encuentre la obra, ya sea de construcción o de servicio. El fin de optimizar la generación de los espectros es alcanzar una estructura óptima económicamente y segura.

## **II. Objetivos**

### **A. Objetivo general**

- Comparar las ventajas y desventajas de las metodologías determinística y probabilística para las aceleraciones sísmicas en la región metropolitana de Guatemala, y evaluar la factibilidad de su aplicación.

### **B. Objetivos específicos**

- Definir las fuentes sísmicas relevantes de la región de la Ciudad de Guatemala.
- Identificar los posibles eventos sísmicos relevantes para el cálculo de aceleraciones sísmicas en la región metropolitana de Guatemala.
- Emplear la metodología determinística y probabilística para calcular las aceleraciones sísmicas en el área metropolitana.
- Comparar los resultados de aceleraciones sísmicas de ambas metodologías.

### III. Antecedentes

#### A. Una nueva evaluación del peligro sísmico para la región de América Central- Proyecto Resis II

Es una nueva evaluación del peligro sísmico en la región de América Central, en el marco del proyecto de la cooperación RESIS II, financiado por el Organismo de Cooperación de Noruega (NORAD). Diferentes expertos en el riesgo sísmico de Costa Rica, Guatemala, Nicaragua, El Salvador, Noruega y España participaron en el estudio. El proyecto tenía como objetivo principal obtener resultados adecuados para fines de diseño sísmico.

El análisis comenzó con una exhaustiva revisión de los catálogos sísmicos de cada país a partir de los cuales se ha configurado un catálogo global para CA y homogeneizado en la magnitud del momento, Mw. Se revisaron los modelos sísmo tectónicos propuestos para la región, proponiendo una zonificación regional, tomando en cuenta los datos sísmo tectónicos, la sismicidad, los mecanismos focales, observaciones con GPS y otras evidencias útiles para definir las fuentes sísmicas.

Paralelamente, los modelos de atenuación para la subducción y las zonas de la corteza volcánica fueron revisadas y los modelos más adecuados fueron calibrados con datos de movimientos fuertes. Tomando las aportaciones anteriores, el análisis de riesgo sísmico se desarrolló en términos de la aceleración máxima del terreno, PGA y aceleraciones espectrales SA (T) para períodos de 0,1, 0,5, 1 y 2 segundos, mediante la metodología PSHA (Evaluación Probabilística del Riesgo Sísmico).

Como resultado, se obtuvieron diferentes mapas de peligrosidad para los parámetros citados, juntos con espectros de peligro uniformes (UHS) en las principales poblaciones de América Central. Este es el primer estudio desarrollado a escala regional después de los últimos terremotos que han ocurrido en la región y como resultado la nueva generación de los mapas será útil en la revisión de los códigos sísmicos de la zona.

(Universidad Politécnica de Madrid, 2012)

#### B. AGIES: NSE 2 – 2018 Demandas estructurales y condiciones de sitio

##### 1. Capítulo 4 – Aspectos sísmicos

###### *i. Índice de sismicidad*

- a) Incide sobre el nivel de protección sísmica que se hace necesario para diseñar la obra o edificación e incide en la selección del espectro sísmico de diseño.
- b) Para efecto de esta norma, el territorio de Guatemala se divide en macro-zonas de amenaza sísmica caracterizadas por su índice de sismicidad que varía desde  $I_0 = 2$  a  $I_0 = 4$ .

###### *ii. NPS (Nivel de Protección Sísmica)*

- a) El Nivel de Protección Sísmica necesario para alcanzar los objetivos de la Sección 1.4.1 de la norma NSE 1 se establece en la Tabla 4.2.2-1 en función del Índice de Sismicidad  $I_0$  y la Clasificación de Obra.
- b) Puede aplicarse cualquier requerimiento que corresponda a un nivel de protección más alto que el nivel mínimo especificado en la Tabla 4.2.2-1:

**Tabla 4.2.2-1 — Nivel de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño**

Índice de Sismicidad <sup>[b]</sup>	Clase de obra <sup>[a]</sup>			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
$I_0 = 4$	E	D	D	C
$I_0 = 3$	D	C	C	B
$I_0 = 2$	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño <sup>[c]</sup>	5% en 50 años <sup>[d]</sup>	5% en 50 años <sup>[d]</sup>	10% en 50 años	Sismo mínimo <sup>[e]</sup>

[a] Ver clasificación de obra en NSE 1 Capítulo 3.

[b] Ver índice de sismicidad en Sección 4.2.1.

[c] Ver Sección 4.4 para selección de espectro sísmico de diseño según probabilidad de excederlo.

[d] A las obras "Esenciales" e "Importantes" les corresponde un sismo con la misma probabilidad de excedencia – se diferencian en detalles del Nivel de Protección y en las deformaciones laterales permitidas.

[e] Ver Sección 4.4.2 (d).

### iii. *Definiciones*

- Se define como "sismo básico" al que tiene un 10% de probabilidad nominal de ser excedido en un período de 50 años. Se utilizará para diseño estructural de Obra Ordinaria o donde lo permitan las disposiciones en las normas NSE 3, NSE 4, NSE 5 y NSE 7 u otras normas NSE.
- Se define como "sismo severo" al que tiene un 5% de probabilidad nominal de ser excedido en un período de 50 años. Se utilizará para diseño estructural de Obra Importante y de Obra Esencial o donde así lo indiquen las disposiciones en las normas NSE 3, NSE 5 y NSE 7 u otras normas NSE. Es electivo utilizarlo en lugar del Sismo Básico si el desarrollador del proyecto lo prefiere.
- Se define como "sismo extremo" al que tiene un 2% de probabilidad nominal de ser excedido en un período de 50 años. Este sismo es la base para el mapa de zonificación sísmica.
- Se denomina "sismo mínimo" a una reducción del sismo básico que se permite únicamente en los casos de excepción específicamente indicados en estas normas, que incluyen obra utilitaria y algunos casos de readecuación sísmica de obra existente.

### iv. *Espectros genéricos para diseño*

#### v. *Parámetros básicos:*

Son los parámetros  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  cuyos valores para el territorio de Guatemala están especificados en el Listado de Amenaza Sísmica por Municipios en Anexo A.

#### vi. *Ajuste por clase de sitio:*

- La Clase de Sitio se establecerá conforme la Sección 4.3 según el perfil del suelo que cubra al basamento en el sitio. El valor de  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  estipulado en la Sección 4.5.1 deberá

ser ajustado conforme a la Clase de Sitio y lo indicado en esta sección. Excepto por lo estipulado o lo permitido en la Sección 4.4.1 esto se hará en la forma genérica siguiente:

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a$$

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v$$

donde:

- **S<sub>cs</sub>** es la ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración corto;
- **S<sub>1s</sub>** es la ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 segundo; ambos para un amortiguamiento nominal de 5% del crítico;
- **F<sub>a</sub>** es el coeficiente de sitio para períodos de vibración cortos y se obtiene de la Tabla 4.5-1;
- **F<sub>v</sub>** es el coeficiente de sitio para períodos largos y se obtiene de la Tabla 4.5-2.

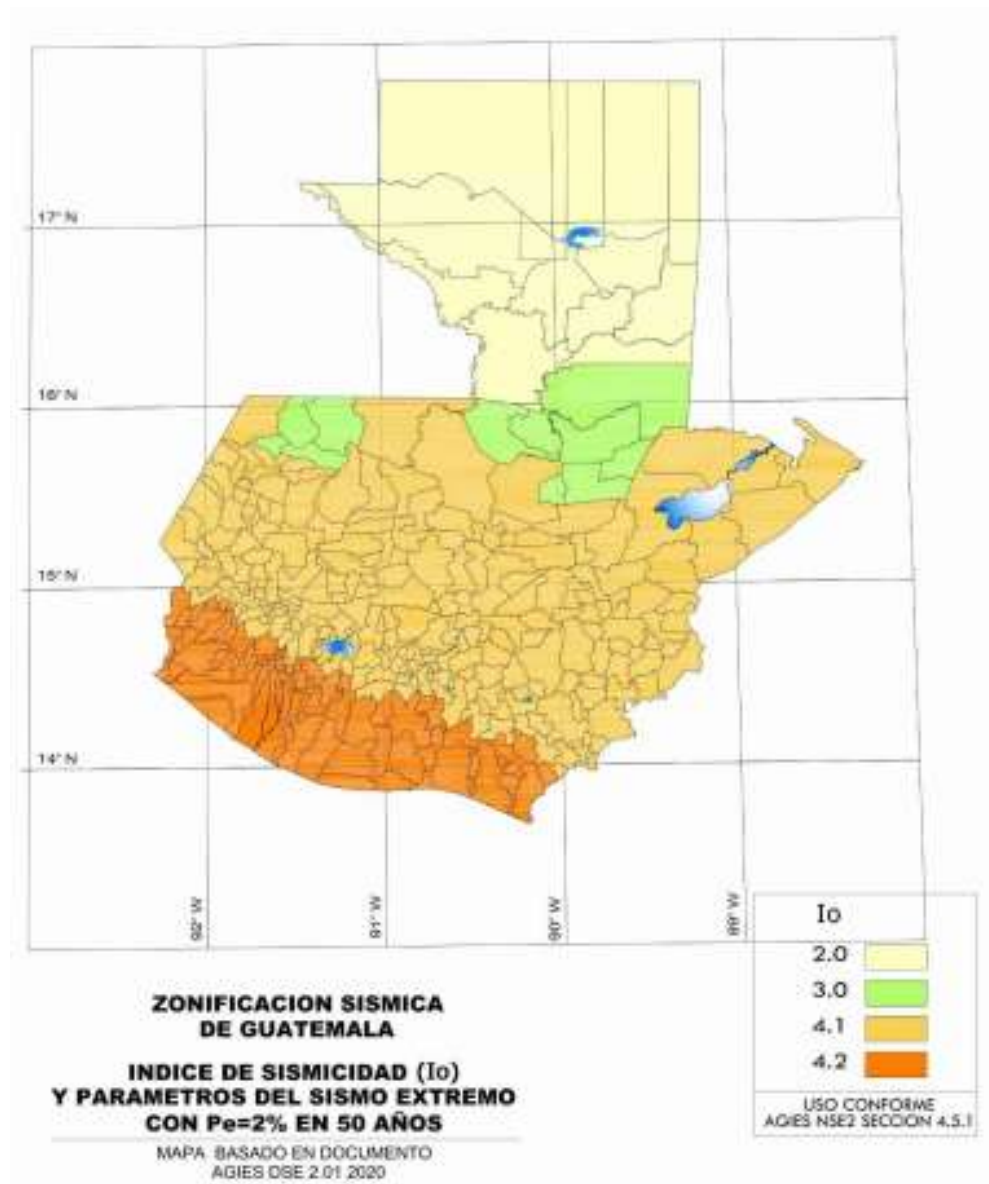


Ilustración 1 Mapa de zonificación sísmica de Guatemala

**vii. Espectros de sitio con base en un análisis de amenaza sísmica**

Se podrá utilizar como guía de criterio la Sección 21.2 del documento ASCE/SEI 7-10, donde se requiere efectuar un análisis de amenaza sísmica de un sitio basándose en modelos sismotectónicos aplicables a la región de interés de acuerdo con prácticas de análisis reconocidas.

- a) Espectro probabilístico — Para obtener un espectro de “sismo extremo” se utilizarán relaciones de atenuación para aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento; los valores serán atenuados desde los modelos de fuentes sísmicas hasta el sitio de interés y se utilizarán los resultados que correspondan a una probabilidad de excedencia de 2% en un período de 50 años.
- b) Espectro determinístico — Se obtiene con base en la envolvente de las aceleraciones espectrales producidas por un sismo con “magnitud máxima considerada” Los valores de aceleración espectral son atenuados desde la distancia más desfavorable a modelos de las fallas regionales relevantes para el sitio. Las magnitudes “máximas consideradas” podrán basarse en criterios que utilicen “magnitudes características” para las fallas de interés. Se utilizarán las atenuaciones medias o medianas multiplicadas por 1.5 o bien las medias más una desviación estándar. El espectro así calculado se considerará un “sismo extremo determinístico”.

(Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y sísmica, 2018)

## IV. Marco teórico

Para comprender la importancia de las aceleraciones sísmicas para un país vulnerable a desastres naturales, principalmente la exposición sísmica alta del país se considera como un riesgo principal que se debe tomar en cuenta en el área de la construcción. Por ese motivo, a continuación, se desarrollarán brevemente los temas claves que aportan directamente al cálculo de espectros sísmicos. Tomando en cuenta el aspecto geológico, sísmico y una explicación de los dos métodos a evaluar.

### A. Movimiento de placas tectónicas

El movimiento de placas influye directamente, a causa de la actividad de la falla, ocurren mayores desplazamientos, volviendo así las áreas sísmicas. Debido a que al estar en constante movimiento existe una liberación constante de energía entre el roce de las placas tectónicas, la liberación se produce por medio de las fallas. (Fowler, 1990)

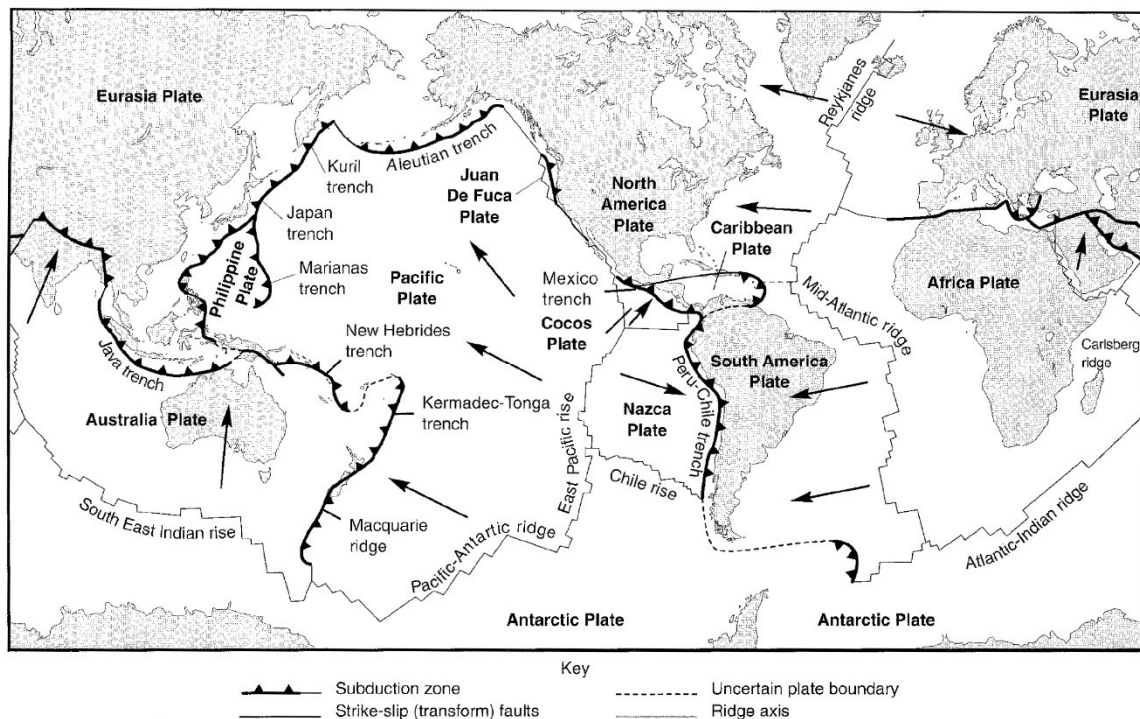


Ilustración 2 Las placas tectónicas principales, oceánicas medias, trincheras y fallas de transformantes. Las flechas indican las direcciones de los movimientos de los lugares.

(Fowler, 1990)

“Se han utilizado algunos métodos para establecer la dirección y la velocidad del movimiento de las placas. Como se ha comentado antes, las «huellas» de los puntos calientes como los de la cadena de islas Hawaii-Emperador marcan la dirección del movimiento de la placa del Pacífico en relación con el manto subyacente. Además, midiendo la longitud de esta cadena volcánica y el intervalo de tiempo entre la formación de la estructura más antigua (el monte submarino Suiko) y la estructura más joven (Hawaii), se puede calcular una velocidad media del movimiento de la placa.

En este caso, la cadena volcánica mide unos 3.000 kilómetros de longitud y se formó durante los últimos 65 millones de años: el cálculo de la velocidad media de movimiento da como resultado unos 9 centímetros al año. La exactitud de este cálculo depende de la posición fija del punto caliente en el manto.” (Tarbuck & Lutgens, 1999)

## **B. Fallas geológicas**

En un principio necesitamos conocer las delimitaciones de las placas litosféricas, las cuales están distribuidas alrededor de toda la corteza terrestre como oceánica. A esas delimitaciones se le nombran fallas geológicas, debido a que consisten en múltiples planos de fracturación, aproximadamente verticales y orientados más o menos perpendicularmente a las dorsales oceánicas. Constantemente producen desplazamientos laterales de una parte sobre la otra, para permitir cerrar el espacio que ocupa cada placa. (Varela, 2014)

“En la actualidad se están evaluando tres modelos básicos para la convección del manto. Los mecanismos que contribuyen al flujo convectivo son la fuerza de arrastre de la placa, la fuerza de empuje de la dorsal y las plumas del manto. La fuerza de arrastre de la placa se produce cuando la litosfera oceánica fría y densa es subducida y tira de la litosfera. La fuerza de empuje de la dorsal tiene lugar cuando la gravedad pone en movimiento las placas elevadas a ambos lados de las dorsales oceánicas. Las plumas del manto, calientes y flotantes, son consideradas las ramas de corriente ascendente de la convección del manto.

“Un modelo sugiere que la convección del manto se produce en dos capas separadas a una profundidad de 660 kilómetros. Otro modelo propone una convección de todo el manto que afectaría a todo el manto rocoso de 2.900 kilómetros de grosor. Y un último modelo sugiere que el tercio inferior del manto se abomba de manera gradual hacia arriba en algunas zonas y se hunde en otras sin una mezcla apreciable.” (Tarbuck & Lutgens, 1999)

### **1. Geometría de una falla**

Aunque la superficie de una gran falla puede ser más irregular, normalmente se puede aproximar, al menos en distancias cortas, como un plano. La orientación del plano de la falla se describe por su golpe y buzamiento. El golpe de una falla es la línea horizontal producida por la intersección del plano de la falla y un plano horizontal como se muestra en la Ilustración 3. El acimut del golpe se utiliza para describir la orientación de la falla con respecto al norte debido. la inclinación hacia abajo del plano de la falla se describe por el ángulo de buzamiento, que es el ángulo entre el plano de la falla y el plano horizontal medido perpendicularmente al golpe. Una falla vertical tendría un ángulo de buzamiento de 90° (Kramer, 1996).

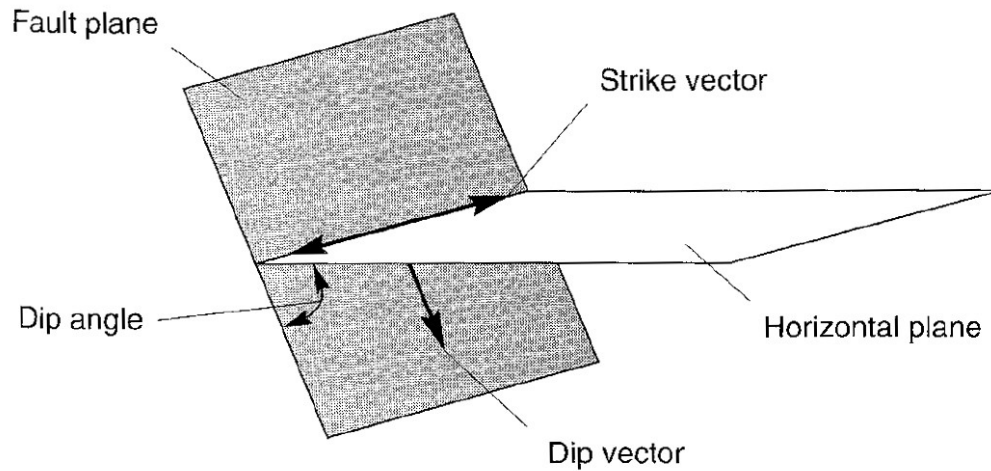


Ilustración 3 Descripción de la notación geométrica de la orientación de un plano de falla

(Kramer, 1996)

### C. Sismología

Una vez comprendido el origen de la liberación de energía, surge la curiosidad del humano, al querer investigar que genera esas liberaciones de energía, por ese motivo surge la sismología. El propósito de la sismología es la investigación del interior terrestre por medio del estudio de las ondas de energía producidas por los terremotos o sismos. (Tarbuck & Lutgens, 1999)

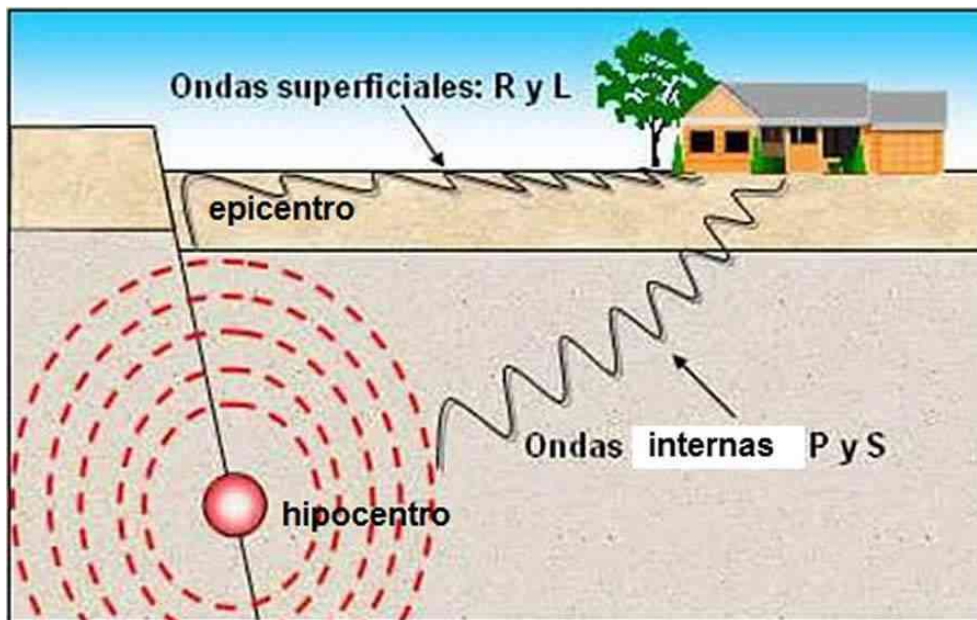
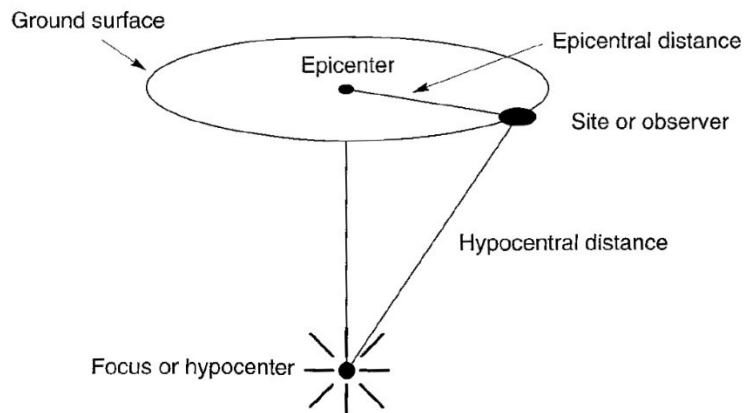


Ilustración 4 Diagrama ilustrativo de un sismo

(Varela, 2014)

#### 1. Sismos

A esos eventos de ruptura de una masa rocosa se le denominaron, sismos, que se producen al superarse la resistencia a los esfuerzos aplicados. Se producen desde la superficie terrestre hasta profundidades de unos 700 km. El sismo este compuesto por las siguientes partes (Varela, 2014):



*Ilustración 5 Diagrama descriptivo de la localización de un sismo*

*(Kramer, 1996).*

**i. Hipocentro**

Es el sitio originario de liberación de energía producida por la ruptura en el interior terrestre.

**ii. Ondas primarias (P)**

“Las ondas P son compresionales, producen la vibración de las partículas materiales en la misma dirección en la que se propagan y son las más veloces y primeras en arribar a una determinada estación registradora.”

**iii. Ondas secundarias (S)**

“Las ondas S son ondas de corte (cizalla), producen vibración de la materia a 90° de la dirección de propagación y arriban con cierto retardo a la misma estación sismológica.”

(Varela, 2014)

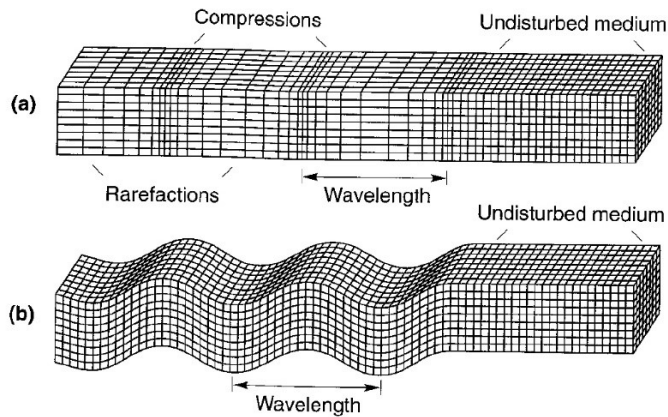


Ilustración 6 Deformaciones producidas por ondas: (a) ondas P; (b) ondas S

(Kramer, 1996).

**iv. Epicentro**

“El epicentro es la proyección a superficie del hipocentro o lugar donde se produce la ruptura de los materiales que originan el fenómeno.”

**v. Ondas Love (L)**

“Las ondas L son de gran longitud de onda, se desplazan superficialmente alrededor de la Tierra, son las más lentas y producen grandes daños en las construcciones del hombre.”

**vi. Ondas Rayleigh (R)**

“Las ondas R, Tienen un movimiento vertical similar al de las olas de mar, se desplazan superficialmente al igual que las ondas L, sin embargo, su velocidad es menor.”

(Varela, 2014)

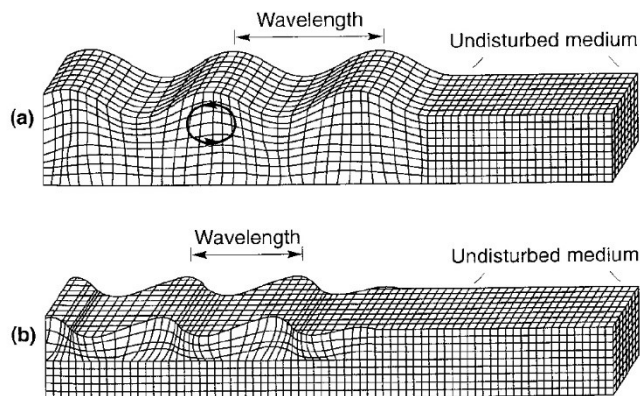


Ilustración 7 Deformaciones producidas por ondas: (a) ondas R; (b) ondas L

(Kramer, 1996).

## **D. Parámetros sísmicos**

“Para evaluar el riesgo sísmico de una zona, se debe conocer previamente la sismicidad de esta. La sismicidad viene definida por los parámetros que caracterizan los fenómenos sísmicos.”

“Los parámetros que se manejan, comúnmente, en los estudios de riesgo sísmico son de localización y tamaño; los de localización son esenciales para definir las fuentes sísmicas, como veremos más adelante. Los parámetros que relacionan el tamaño y la destructividad de un terremoto son: magnitud de momento, intensidad, aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo.”

“La magnitud y el momento sísmico están relacionados con la energía liberada en el foco del terremoto, mientras que la intensidad y la aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo lo están con la energía recibida en un punto cualquiera de la superficie. La intensidad del área epicentral, también, se toma como medida del tamaño del terremoto ya que, aunque no mide la energía liberada y en su valor influye la profundidad a la que se encuentra el foco y el tipo de fractura que da lugar al terremoto, es el único parámetro que nos da una idea del tamaño para la época no instrumental, de la que no se cuenta con valores de magnitud.” (Muñoz, 1989)

### **1. Intensidad**

La intensidad se considera como la primera medida de tamaño de un sismo. En si se considera una descripción cualitativa de la percepción del evento sísmico dependiendo de la ubicación, respaldado por medio de daños de infraestructura y/o reacciones humanas en la locación. Esta medida se utilizó para la estimación de magnitudes de sismos previos a la invención de instrumentos sísmicos (Kramer, 1996).

### **2. Magnitud**

Es una medida cuantitativa del tamaño de un sismo con base a la medición de aceleraciones sísmicas del suelo por medio de instrumentos. Existen diferentes instrumentos de medición de aceleraciones sísmicas, por lo que también existen diferentes escalas de medición de magnitud. (Kramer, 1996)

### **3. Energía liberada**

La energía sísmica total liberada durante un evento sísmico a menudo se estima a partir de la ecuación (Gutenberg & Richter, 1956)

$$\log E = 11.80 + 1.5 M_G$$

Donde E se expresa en Ergs. Implica que un cambio de unidad de magnitud corresponde a un  $10^{1.5}$  o un aumento de 32 veces en la energía sísmica. (Kramer, 1996)

### **4. Recurrencia**

La teoría del rebote elástico implica que la ocurrencia de terremotos aliviará la tensión a lo largo de la porción de una falla en la que se produce la ruptura, y que la ruptura subsiguiente no se

producirá en ese segmento hasta que las tensiones hayan tenido tiempo de acumularse de nuevo. Por lo tanto, las posibilidades de que ocurra un terremoto en un segmento de falla en particular deberían estar relacionadas de alguna manera con el tiempo que ha transcurrido desde el último terremoto, y quizás, con la cantidad de energía que se liberó (Kramer, 1996).

## 5. Velocidad de onda de corte

La onda de corte es una onda transversal que se produce en un medio elástico cuando se somete a un cizallamiento periódico. El cizallamiento es el cambio de forma, sin cambio de volumen, de una capa de suelo, producido por un par de fuerzas iguales que actúan en direcciones opuestas a lo largo de las dos caras de la capa. Si el medio es elástico, la capa recuperará su forma original después del cizallamiento, las capas adyacentes sufrirán un cizallamiento y el cambio se propagará como una onda.

$$v_s = \sqrt{\frac{Q}{\rho}}$$

Donde  $v_s$  es la velocidad de la onda de cizallamiento, es igual a la raíz cuadrada de la relación del módulo de corte,  $G$ , partido  $\rho$ , la densidad del suelo (Kramer, 1996).

## E. Escalas sísmicas

Es la medida que describe la fuerza o impacto de un evento sísmico, existen diferentes escalas que miden intensidad o magnitud, se han ido afinando con el transcurso del tiempo y la invención de instrumentos de medición de aceleraciones sísmicas. Cada escala tiene diferentes límites y niveles de clasificación. A continuación, se muestra una comparativa entre escalas y se dará una pequeña descripción de las más usadas (Kramer, 1996).

### 1. Mercalli modificada

La escala de Mercalli fue desarrollada por el sismólogo italiano Mercalli y modificada en 1931 para que cumpliera con las condiciones de California (Richter, 1958). La escala de Mercalli mide la intensidad del sismo por medio de sensaciones humanas y daños en las infraestructuras.

*Tabla 1 Escala de Mercalli modificada*

Grado	Descripción
I	Detectado solo por instrumentos
II	Percibido por personas en reposo
III	Percibido dentro de edificios
IV	Percibido en el exterior
V	La mayoría lo percibe, movimiento de algunos objetos
VI	Daños leves, todos lo perciben
VII	Daño moderado a las estructuras
VIII	Daño considerable
IX	Daño grave, pánico general
X	Destrucción seria de edificios bien construidos
XI	Casi nada queda en pie, grietas en el suelo
XII	Destrucción total

(Kramer, 1996)

## 2. Richter

En 1935, Charles Richter utilizó un sismómetro Wood-Anderson para definir una escala de Magnitud para los terremotos locales poco profundos (distancias epicentrales inferiores a unos 600 km) en el sur de California. Richter definió lo que ahora se conoce como la magnitud local como el logaritmo (base 10) de la máxima amplitud de traza (en micrómetros) registrada en un sismómetro Wood-Anderson situado a 100 km del epicentro del terremoto. (Kramer, 1996)

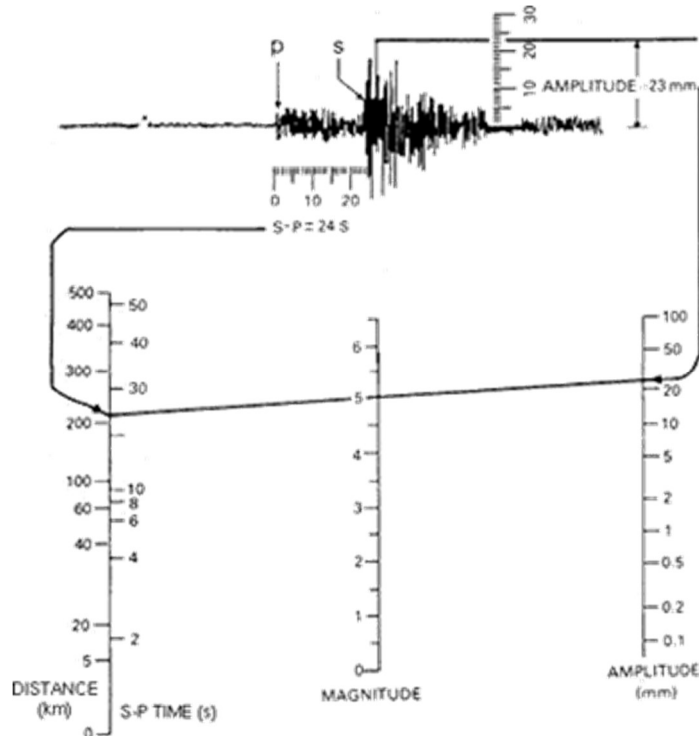


Ilustración 8 Escala de Richter

(Richter, 1958)

## 3. Magnitud de momento

Es importante darse cuenta de que las escalas de magnitud descritas anteriormente son empíricas cantidades basadas en diversas mediciones instrumentales de las características de los temblores de tierra. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad total de energía liberada durante un terremoto, Las características de los movimientos de tierra no aumentan necesariamente a la misma velocidad.

Para los fuertes terremotos, las características de los temblores medidos se vuelven menos sensibles al tamaño del terremoto que para los terremotos más pequeños. Este fenómeno se conoce como saturación; la onda corporal y las magnitudes locales de Richter se saturan en magnitudes de 6 a 7 y la magnitud de la onda de superficie se satura en aproximadamente  $M_w = 8$ .

Para describir el tamaño de los terremotos muy grandes, se requiere una escala de magnitud que no depende de los niveles de movimiento del suelo, y por consiguiente no se satura. La única

escala de magnitud que no está sujeta a la saturación es la magnitud del momento (Kanamori, 1977) ya que es basado en el momento sísmico, una medida directa de los factores que producen la ruptura a lo largo de la falla. La magnitud del momento viene dada por:

$$M_W = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.7$$

Donde  $M_0$  es el momento sísmico en dyne-ern.

## F. Espectro de respuesta

La respuesta de la estructura dependerá de las características de masa, rigidez y amortiguación de la estructura y sobre las características del movimiento de la base. El espectro de respuesta describe la respuesta máxima de un sistema de un solo grado de libertad a un movimiento de entrada particular como una función de la frecuencia (o período natural) y el coeficiente de amortiguación del sistema de un solo grado de libertad (Chopra, 1995). Los valores máximos de aceleración, velocidad y se denominan aceleración espectral ( $S_a$ ), velocidad espectral ( $S_v$ ), y desplazamiento espectral ( $S_d$ ), respectivamente.

$$\begin{aligned} S_d &= |u|_{max} \\ S_v &= |\dot{u}|_{max} \approx \omega_0 S_d = PSV \\ S_a &= |\ddot{u}|_{max} \approx \omega_0^2 S_d = \omega_0 \cdot PSV = PSA \end{aligned}$$

donde  $u$  y  $\omega_0$  son el desplazamiento y la frecuencia natural del sistema de un solo grado de libertad, PSV es la velocidad pseudoespectral, y el PSA es la aceleración pseudoespectral. Aunque el PSV y el PSA no son los verdaderos valores máximos de velocidad y aceleración, normalmente son muy cerca de los máximos para los movimientos fuertes de tierra registrados (Kramer, 1996).

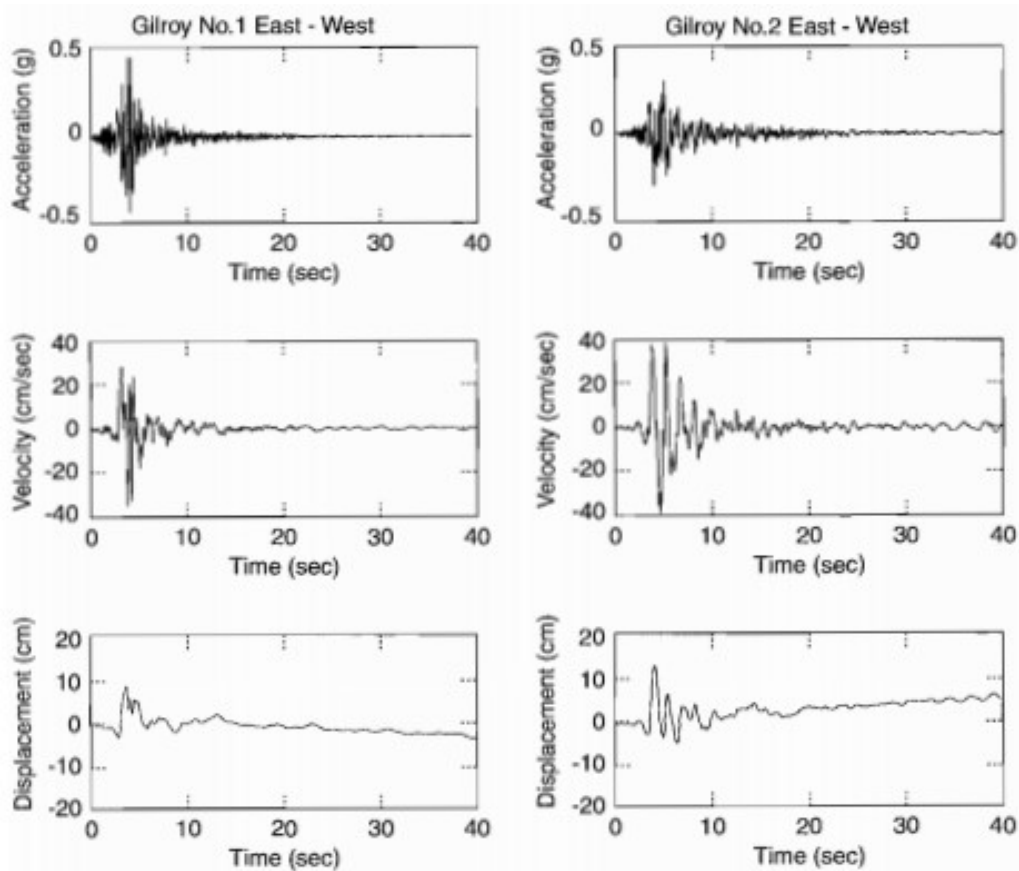


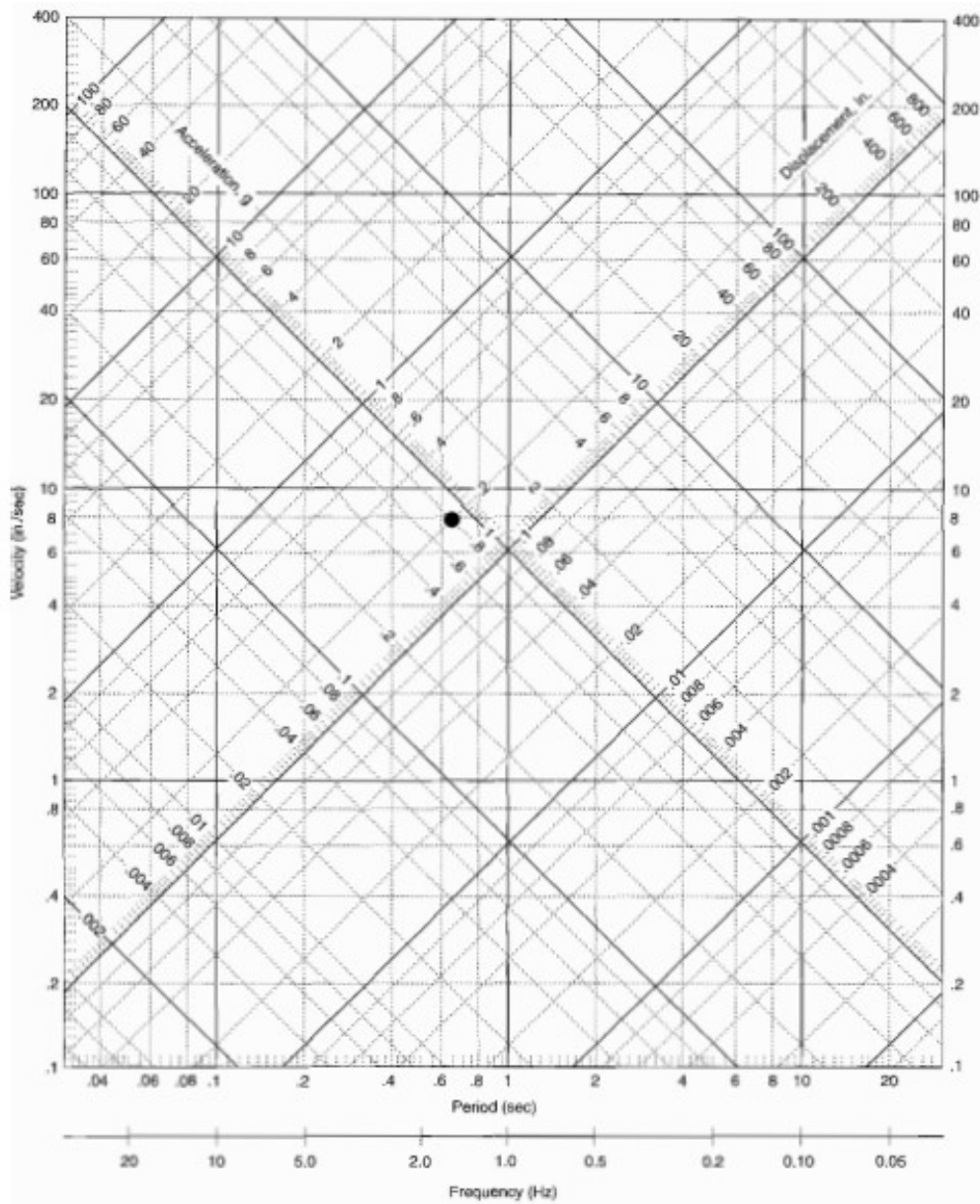
Ilustración 9 Historias de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de los componentes E-W de los registros de movimiento fuerte de Gilroy N° 1 (roca) y Gilroy N° 2 (suelo)

(Kramer, 1996).

Los espectros de respuesta pueden trazarse individualmente a escalas aritméticas, o pueden combinarse, en diagramas tripartitos (ver Ilustración 9). El gráfico tripartito muestra la velocidad espectral en el eje vertical, la frecuencia natural (o período) en el eje horizontal, y la aceleración y el desplazamiento en los ejes inclinados.

Los ejes de aceleración y desplazamiento se invierten cuando los valores espectrales se trazan contra período natural en lugar de la frecuencia natural. Las formas de los espectros de respuesta típica indican que los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral están asociados a diferentes frecuencias (o períodos). En las frecuencias bajas el promedio del desplazamiento espectral es casi constante; a altas frecuencias la aceleración espectral media es bastante constante. En entre ellas se encuentra un rango de velocidad espectral casi constante.

Debido a este comportamiento, la respuesta Los espectros se dividen a menudo en controlados por aceleración (alta frecuencia), controlados por velocidad (frecuencia intermedia), y las porciones controladas por desplazamiento (baja frecuencia) (Kramer, 1996).



## 1. Aceleración máxima

La medida más comúnmente utilizada de la amplitud de un movimiento de tierra en particular es la aceleración horizontal máxima (AHM). La AHM para un determinado componente del movimiento es simplemente el mayor valor (absoluto) de la aceleración horizontal obtenida del acelerograma de ese componente. Tomando la suma vectorial de dos componentes ortogonales, el máximo AH; resultante (cuya dirección normalmente no coincidirá con ninguna de las medidas componentes) puede obtenerse. (Campbell, 1985)

## 2. Velocidad máxima

La velocidad horizontal máxima (VHM) es otro parámetro útil para la caracterización de la amplitud del movimiento del suelo. Dado que la velocidad es menos sensible a la alta frecuencia

componentes del movimiento del suelo, el VHM es más probable que el AHM para caracterizar la amplitud del movimiento de la tierra con precisión en frecuencias intermedias. Como se puede observar en la ilustración (Campbell, 1985)

### 3. Desplazamiento máximo

Los desplazamientos máximos se asocian generalmente con los componentes de baja frecuencia de un movimiento de terremoto. Sin embargo, a menudo son difíciles de determinar con precisión, debido a errores de procesamiento de la señal en el filtrado e integración de los acelerogramas y debido al ruido de largo período. Como resultado, el desplazamiento máximo se utiliza menos comúnmente como medida del movimiento del suelo que la aceleración o la velocidad máxima (Campbell, 1985)

## G. Relaciones de atenuación

Relaciones predictivas para los parámetros que disminuyen con el aumento de la distancia (como aceleración y velocidad máxima) se denominan a menudo como relaciones de atenuación. También se debe tomar en cuenta que dependiendo del tipo de falla se usaran diferentes relaciones de atenuación.

### 1. Campbell – Bozorgnia

In 1994, Campbell and Bozorgnia (1994) used worldwide accelerograms from earthquakes of moment magnitude ranging from 4.7 to 8.1 to develop the attenuation relationship:

$$\ln PHA(gals) = -3.512 + 0.904M_w - 1.328 \ln \sqrt{R^2 + [0.149 \exp(0.647M_w)]^2} \\ + (1.125 - 0.112 \ln R - 0.0957M_w)F + (0.440 \\ - 0.171 \ln R)S_{SR} + (0.405 - 0.222 \ln R)S_{HR}$$

$$\sigma_{\ln PHA} = \begin{cases} 0.889 - 0.0691M & M \leq 7.4 \\ 0.38 & M > 7.4 \end{cases}$$

donde R es la distancia más cercana ( $\leq 60$  km) a la ruptura sísmica en kilómetros (con un mínimo de 0.3, 0.5, 0.8, 1.5, y 3.0 km para magnitudes de 5.0, 5.5, 6.0, y 6.5, respectivamente); El término fuente, F, toma valores de 0 para golpe-deslizamiento y falla normal, y 1 para reversa, inversa-obligatoria, y fallas de empuje;  $S_{SR} = 1$  para sitios de roca blanda (depósitos sedimentarios de edad Terciaria),  $S_{HR} = 1$  para sitios de roca dura (principalmente depósitos sedimentarios más antiguos, metamórficos y roca cristalina), y  $S_{SR} = S_{HR} = 0$  para los sitios de aluvión.

(Kramer, 1996)

### 2. Boore – Stewart – Seyhan – Atkinson

Boore y otros (1993) utilizaron datos de los terremotos de magnitud del oeste de América del Norte 5.0 a 7.7 a distancias dentro de los 100 km de la proyección de la superficie de la falla a desarrollar la relación de predicción:

$$\log \text{PHA}(g) = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_4R + b_5 \log R + b_6G_B + b_7G_C$$

donde  $R = \sqrt{d^2 + h^2}$ ,  $d$  es la distancia más cercana a la proyección de la superficie de la falla en kilómetros, y

$$G_B = \begin{cases} 0 & \text{para sitio clase A} \\ 1 & \text{para sitio clase B} \\ 0 & \text{para sitio clase C} \end{cases} \quad G_C = \begin{cases} 0 & \text{para sitio clase A} \\ 0 & \text{para sitio clase B} \\ 1 & \text{para sitio clase C} \end{cases}$$

La relación de atenuación de Boore y otros (1993) se expresa en términos del logaritmo común (base 10) en lugar del logaritmo natural. Las clases de sitios se definen en la base de la velocidad media de la onda de cizallamiento en los 30 m superiores (100 pies) (Tabla 3-5). Los coeficientes de la relación de atenuación de Boore y otros (1993) se desarrollaron para dos medidas de la aceleración máxima: el componente orientado al azar y el componente horizontal mayor (el primero considera dos registros horizontales ortogonales en un lugar determinado como eventos separados y el último considera sólo el más grande de los dos).

Tabla 2 Definiciones de las clases de sitio para Boore y otros (1993) Relación de Atenuación

Site Class	$\bar{v}_s$ in Upper 30 m (100 ft)
A	> 750 m/sec (2500 ft/sec)
B	360–750 m/sec (1200–2500 ft/sec)
C	180–360 m/sec (600–1200 ft/sec)

Tabla 3 Coeficientes para Boore y otros (1993) Relación de Atenuación

	Component							$h$	$\sigma_{\log \text{PHA}}$
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$		
Random	-0.105	0.229	0.0	0.0	-0.778	0.162	0.251	5.57	0.230
Larger	-0.038	0.216	0.0	0.0	-0.777	0.158	0.254	5.48	0.205

(Kramer, 1996)

### 3. Chiou – Young

Los terremotos de zonas de subducción generalmente ocurren a mayores profundidades hipocentrales que los terremotos que ocurren en fallas de transformación. Por consiguiente, las ondas sísmicas que emanan de los terremotos de la zona de subducción siguen caminos diferentes a los de las fallas de transformación. Youngs *et al.* (1988) utilizaron mediciones de movimiento fuerte obtenidas en roca de 60 terremotos y simulaciones numéricas de  $M_w \geq 8$  terremotos para desarrollar una relación de atenuación de la zona de subducción:

$$\ln PHA(g) = 19.16 + 1.045M_w - 4.738 \ln[R + 205.5 \exp(0.0968M_w)] + 0.54Z_t$$

$$\sigma_{\ln PHA} = 1.55 - 0.125M_w$$

donde R es la distancia más cercana a la zona de ruptura en kilómetros y  $Z_t$  es la mencionada interfaz y 1 para eventos en el laboratorio.

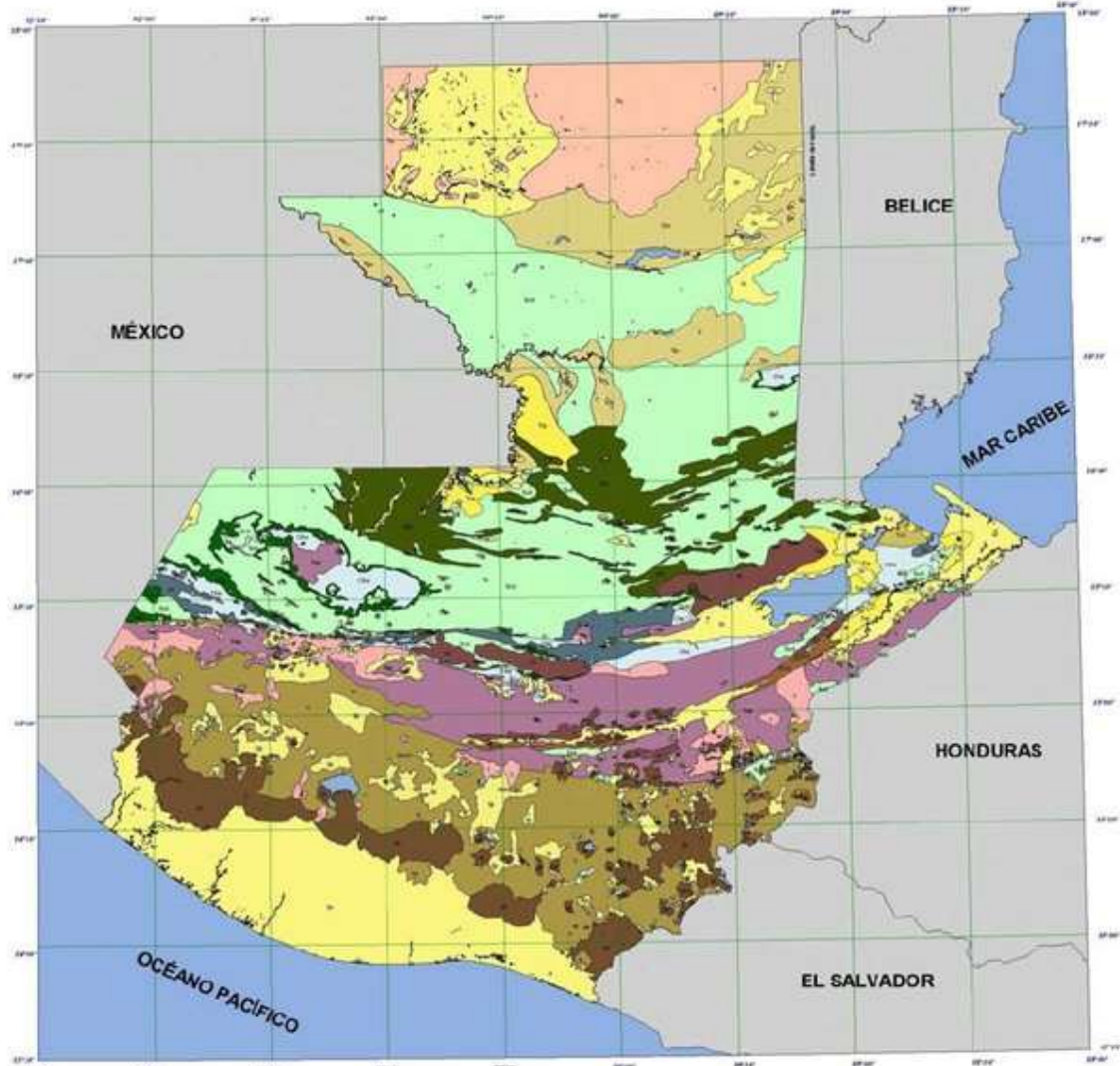
(Kramer, 1996)

## **H. Geología de Guatemala**

Guatemala cuenta con una complejidad geológica y tectónica, eso se debe al encuentro de tres placas tectónicas Cocos, Caribe y Norteamérica. Produciendo formaciones desde las planicies aluviales en la zona de subducción del pacífico, la cadena volcánica pasando, las planicies centrales de depósitos volcánicos profundos y zonas de meteorización en los sistemas de fallas transcurrentes Polochic-Motagua hasta las planicies de Peten basadas en calizas. (Pérez, 2009)

N° 10

# Mapa Geológico República de Guatemala



<p><b>Q</b> <b>CUARCUARAT</b> Cuarcuarat (Cuarcarat) Formación Cuarcuarat Cuarcarat, Peten</p> <p><b>Q1</b> <b>CUARCUARAT</b> Cuarcuarat (Cuarcarat) Formación Cuarcuarat Cuarcarat, Peten</p> <p><b>Q2</b> <b>CUARCUARAT</b> Cuarcuarat (Cuarcarat) Formación Cuarcuarat Cuarcarat, Peten</p> <p><b>Q3</b> <b>CUARCUARAT</b> Cuarcuarat (Cuarcarat) Formación Cuarcuarat Cuarcarat, Peten</p>	<p><b>T</b> <b>TERTIARIO</b> Terciario Formación Terciaria Tercera, Peten</p> <p><b>T1</b> <b>TERTIARIO</b> Terciario (Tercera) Formación Terciaria Tercera, Peten</p> <p><b>T2</b> <b>TERTIARIO</b> Terciario (Tercera) Formación Terciaria Tercera, Peten</p> <p><b>T3</b> <b>TERTIARIO</b> Terciario (Tercera) Formación Terciaria Tercera, Peten</p>	<p><b>C</b> <b>CRETACEO</b> Cretácico Formación Cretácica Cretácica, Peten</p> <p><b>C1</b> <b>CRETACEO</b> Cretácico (Cretácica) Formación Cretácica Cretácica, Peten</p> <p><b>C2</b> <b>CRETACEO</b> Cretácico (Cretácica) Formación Cretácica Cretácica, Peten</p> <p><b>C3</b> <b>CRETACEO</b> Cretácico (Cretácica) Formación Cretácica Cretácica, Peten</p>	<p><b>J</b> <b>JURASICO</b> Jurásico Formación Jurásica Jurásica, Peten</p> <p><b>J1</b> <b>JURASICO</b> Jurásico (Jurásica) Formación Jurásica Jurásica, Peten</p> <p><b>J2</b> <b>JURASICO</b> Jurásico (Jurásica) Formación Jurásica Jurásica, Peten</p> <p><b>J3</b> <b>JURASICO</b> Jurásico (Jurásica) Formación Jurásica Jurásica, Peten</p>	<p><b>P</b> <b>PERMIANO</b> Permiano Formación Permiana Permiana, Peten</p> <p><b>P1</b> <b>PERMIANO</b> Permiano (Permiana) Formación Permiana Permiana, Peten</p> <p><b>P2</b> <b>PERMIANO</b> Permiano (Permiana) Formación Permiana Permiana, Peten</p> <p><b>P3</b> <b>PERMIANO</b> Permiano (Permiana) Formación Permiana Permiana, Peten</p>	<p><b>S</b> <b>SILURIANO</b> Siluriano Formación Siluriana Siluriana, Peten</p> <p><b>S1</b> <b>SILURIANO</b> Siluriano (Siluriana) Formación Siluriana Siluriana, Peten</p> <p><b>S2</b> <b>SILURIANO</b> Siluriano (Siluriana) Formación Siluriana Siluriana, Peten</p> <p><b>S3</b> <b>SILURIANO</b> Siluriano (Siluriana) Formación Siluriana Siluriana, Peten</p>
--	--	--	---	---	--

Escala 1 : 1,000,000  
0 50 100 Kilómetros

Proyección del mapa digital: UTM, zona "5, DATUM NAD 82".  
Proyección del mapa impreso: Coordenadas Geográficas, Esteroide de Clarke 1866.

Fuente: Mapa Geológico de la República de Guatemala.  
Instituto Geográfico Nacional, Esc. 1:500,000.  
Compilado por ICAFITL, 1978.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).  
Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE).  
Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN).  
Guatemala, Marzo 2001.

Ilustración 10 Mapa geológico de Guatemala

(IGN, MAGA, 2001)

## 1. Geología local de la Ciudad de Guatemala

El graben se encuentra delimitado en el norte por rocas intrusivas y metamórficas del Cretácico, al sur de la falla del Motagua; al sur lo limita la cordillera volcánica del Cuaternario (Qp), específicamente por los volcanes de Agua y Pacaya. Que por su actividad han provocado la depresión tectónica que se ha rellenado por materiales procedentes de una serie de eventos de flujos de piroclastos. El graben se encuentra delimitado en el norte por rocas intrusivas y metamórficas del Cretácico, al sur de la falla del Motagua; al sur lo limita la cordillera volcánica del Cuaternario, específicamente por los volcanes de Agua y Pacaya.” (Pérez, 2009)

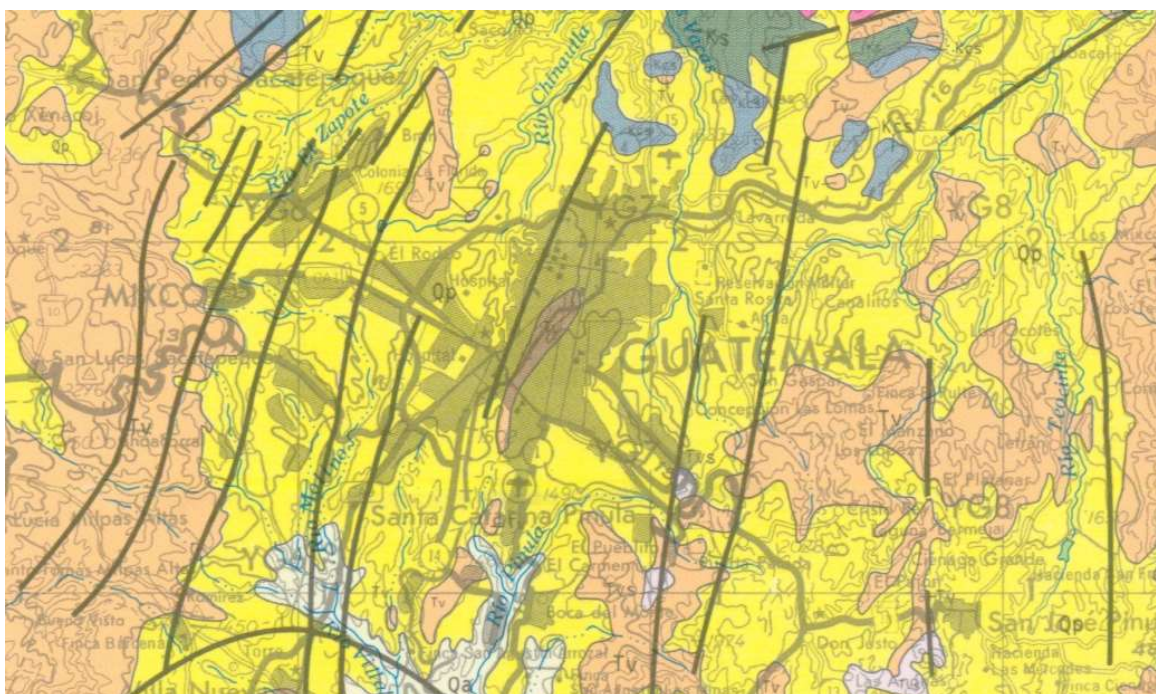


Ilustración 11 Mapa geológico detallado de la Ciudad de Guatemala

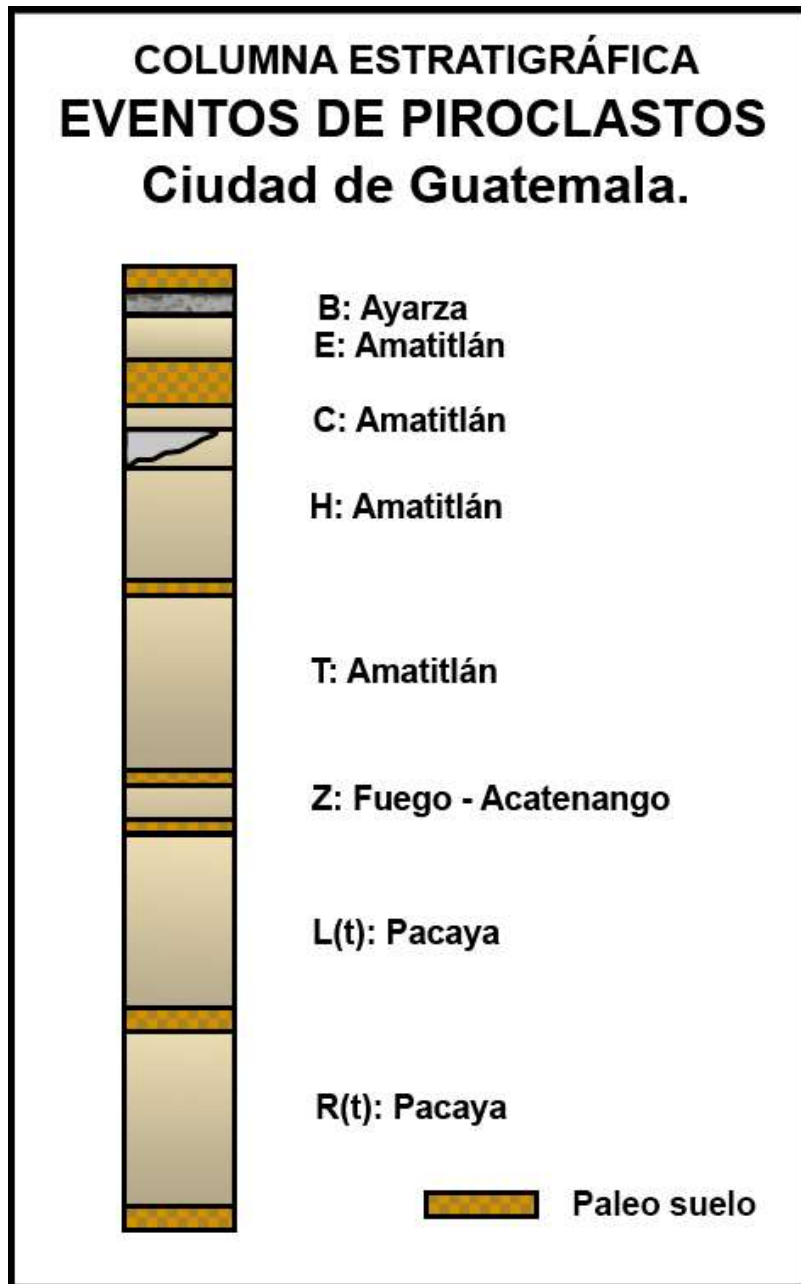
(IGM, 1991)

ROCAS ÍGNEAS Y METAMORFICAS		IGNEOUS AND METAMORPHIC ROCKS	
Qp	CUATERNARIO	Rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso	QUATERNARY
		Thick pumice fills and mantles of diverse origin	
Qv	CUATERNARIO	Rocas volcánicas. Incluye coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos	QUATERNARY
		Volcanic rocks. Includes lava flows, laharc deposits, tuffs, cones and domes	
Tv	TERCIARIO	Rocas volcánicas sin dividir. Predominantemente Mio-Plioceno. Incluye tobas, coladas de lava, material lahárico, y sedimentos volcánicos	TERTIARY
		Undivided Tertiary volcanic rocks. Mainly Mio-Pliocene. Includes tuffs, lava flows, laharc deposits, and volcanic sediments	

Ilustración 12 Descripción detallada de los estratos cuaternarios y terciario

(IGN, 1970)

En la Ciudad de Guatemala, es común encontrar una sucesión de depósitos cuaternarios de materiales piroclásticos, de origen pumítico. El estado de los depósitos puede variar desde un estado no consolidado a consolidado, dependiendo la profundidad que se encuentre el depósito. Algunos de los depósitos piroclásticos demuestran diferentes grados de meteorización en la superficie precedente a la siguiente capa de depósito. Explicando de esa manera, la estratigrafía característica del Valle, que está conformada de una alternación de capas de Arena, Arenas Limosas, Limos Arenosos, Limos Arcillosos y Arcillas Limosas. En la Ilustración 3 se puede observar un perfil estratigráfico simplificado de los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el Valle de Guatemala (Koch & Mclean, 1975)



*Ilustración 13 Columna estratigráfica de los eventos piroclásticos en la Ciudad de Guatemala*

*(Koch y McLean, 1975)*

## I. Fallas geológicas en Guatemala

Cabe destacar que cada placa tiene un movimiento distinto; lo que provoca diferentes tipos de fallas creando diferentes desplazamientos en la corteza, generando la fracturación de la corteza en diferentes direcciones. Las fallas por tomar en consideración para el análisis sísmico a realizar son: Falla del Motagua, Falla Chixoy Polochic, Falla de Jalpatagua, Falla de Jocotán, Falla de San Catarina Pinula, Sistema de fallas de Mixco y la Zona de subducción. Estas son las fallas más estudiadas de Guatemala y con mayor actividad.

### 1. Sistema de fallas transcurrentes

Los períodos de actividad sísmica parecen ser determinados por la mayor la ruptura de las fallas de Chixoy-Polochic o Motagua, las dos fallas principales sub-paralelas que forman el límite de la placa de transformación en Guatemala.

El primer período activo se establece con la ruptura en dos partes de la porción oriental (M 7.3 a 7.5) de la falla de Chixoy-Polochic en 1785 y la porción occidental (M 7.5 a 7.7) en 1816, seguido por 5 años de réplicas regionales.

El segundo período activo probablemente ha culminado con la ruptura de 1976 (Mw 7.5) de la falla del Motagua. Los siguientes 6 En los últimos años se han producido 3 terremotos dañinos que pueden ser réplicas regionales, y, de ser así, puede estar terminando una etapa activa comparativamente abreviada.

La falla de Jalpatagua es una falla que atraviesa el sudeste de Guatemala y continúa hasta El Salvador. A causa de la interacción entre la Placa de Cocos y la Placa del Caribe. Su periodo activo ce de 1855 a 1930 con eventos que van desde Mw 5.5 a 6.9.

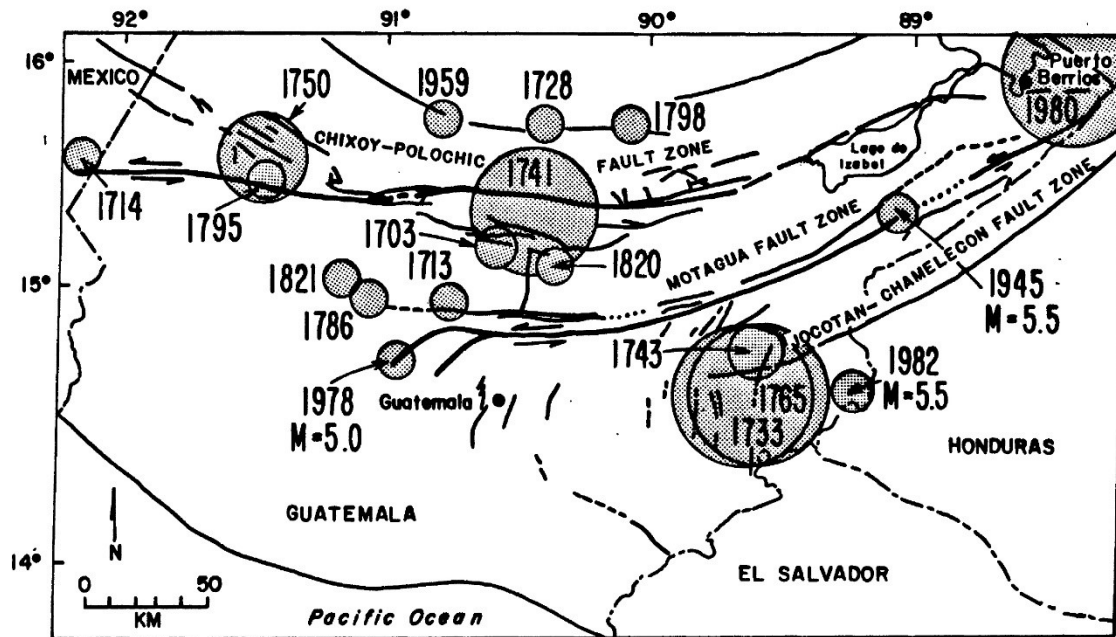


Ilustración 14 Mapa de localización de fallas y pequeños terremotos dañinos.

(White, 1984)

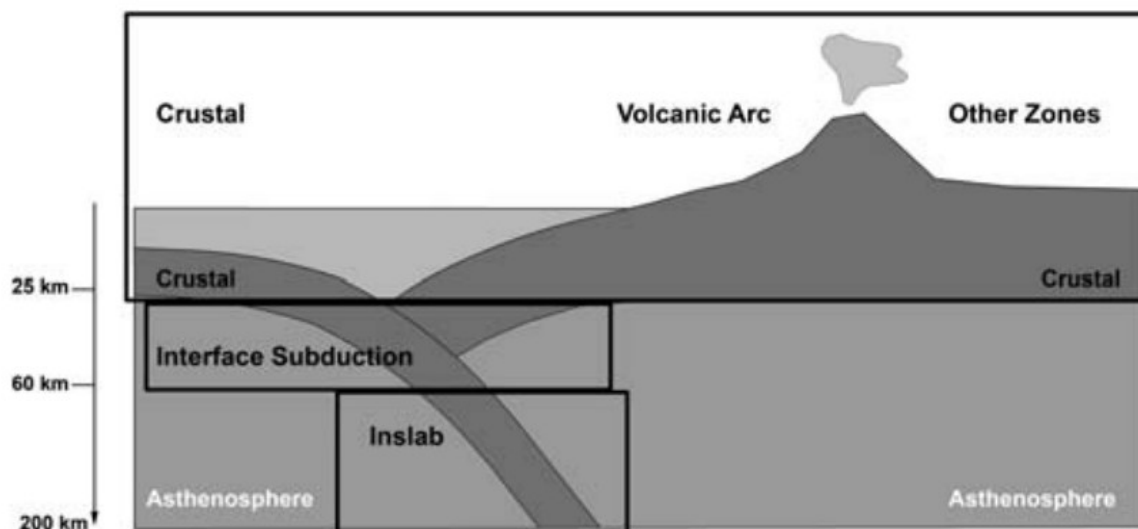
## 2. Zona de subducción

América Central limita con el Océano Pacífico en el sur. La Placa Oceánica del Coco se subduce por debajo de la Placa del Caribe, formando una zona de subducción y un arco volcánico. Esta zona de subducción genera una importante actividad sísmica en las costas de Guatemala y El Salvador.

La zona de subducción se divide en la Zona de Subducción Occidental, que abarca la mayor parte de la costa de Guatemala, y la Zona de Subducción Oriental, que abarca el litoral del sureste de Guatemala y de El Salvador.

La Zona de Subducción también se divide en tres zonas diferentes según la profundidad: la Zona de Zanja, de hasta 25 km de profundidad, la Zona de Interfase, de entre 25 y 60 km de profundidad y la Zona de Intraface, de más de 60 km de profundidad. En las secciones siguientes se ofrece una descripción más detallada de cada zona. La ubicación de las diferentes regiones de la zona de subducción se muestra en la Ilustración 15.

(Universidad Politecnica de Madrid, 2012)



*Ilustración 15 Location of the different regions of the subduction zone*

(Universidad Politecnica de Madrid, 2012)

### *i. Corteza*

La zona de la corteza es la parte superficial de la zona de subducción, donde la placa oceánica comienza a subducirse debajo de la placa continental. Los mayores terremotos registrados en esta zona son el de 1902 (Mw 7.4) en la costa de Guatemala y el de 1929 (Mw 6.9) en la costa de El Salvador. Se considera que esta zona puede generar terremotos de hasta Mw 7.5.

### *ii. Intreplaca*

La zona de interplaca comienza frente a las costas de Guatemala y El Salvador y se sumerge en el continente a medida que se hace más profunda. Los mayores terremotos registrados en esta zona

son el de 1942 (Mw 7.7) en la costa de Guatemala y el de 2012 (Mw 7.3) en la costa de El Salvador. Se considera que esta zona puede generar terremotos de hasta Mw 7.9.

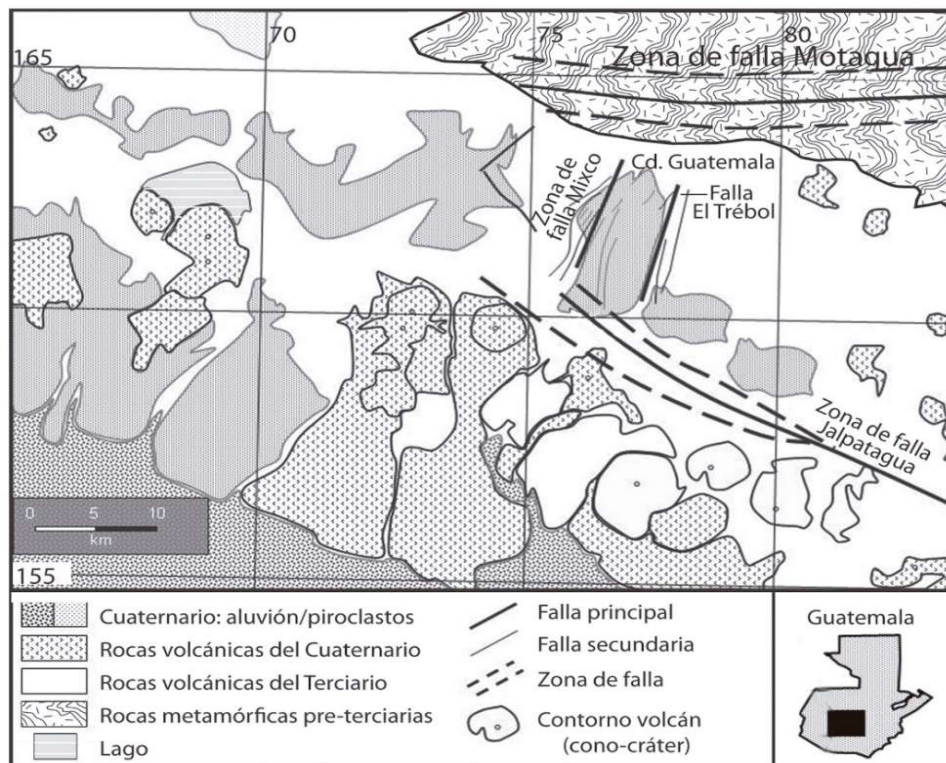
### iii. *Intraplaca*

La zona de la Intraplaca es donde el material comienza a fundirse en magma y la corteza se vuelve blanda. También es la región donde se producen los terremotos más fuertes. Comienza cerca de la costa de Guatemala y El Salvador y se sumerge en el continente a medida que se hace más profunda. Los mayores terremotos registrados en esta zona son el de 1950 (Mw 7.2) en la costa de Guatemala y el de 2001 (Mw 7.7) en la costa de El Salvador. Se considera que esta zona puede generar terremotos de hasta Mw 7.9.

(White, Ligorria, & Cifuentes, 2004)

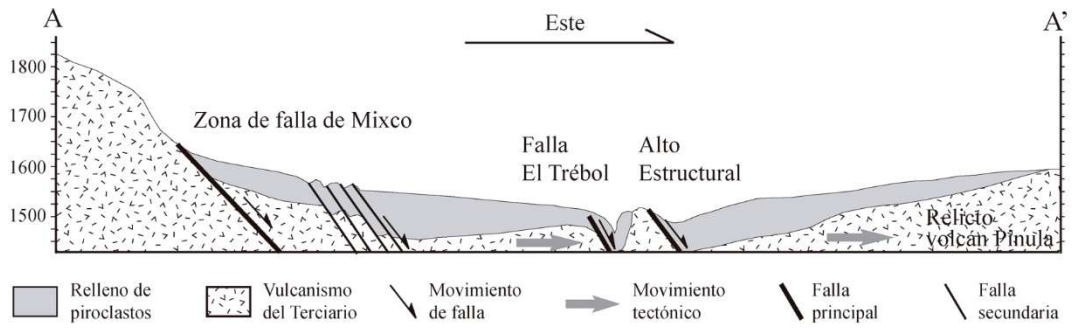
### 3. Geomorfología del graben de la Ciudad de Guatemala

“La interpretación estructural, aceptada por la comunidad geo científica (Weyl 1980; Plafker, 1978; Bonis, 1978; Bonis, 1993), del graben de la Ciudad de Guatemala, indica que las fallas de Mixco y Pinula son fallas normales de gran ángulo, aproximadamente paralelas de 20 km de largo, con una orientación norte a noreste (Ilustración 14), que por su actividad han provocado la depresión tectónica que se ha rellenado por materiales procedentes de una serie de eventos de flujos de piroclastos.” (Pérez, 2009)



Ilustraci3n 16 Mapa geol3gico, basado en el mapa geol3gico de Guatemala (escala 1:250 000). Se muestra el modelo tect3nico que interpreta la estructura del valle de Guatemala como un graben, limitado al este por la falla de Pinula y al oeste por la falla de Mixco

(P3rez, 2009)



*Ilustración 17 Sección transversal esquemática del Valle de Guatemala*

(Pérez, 2009)

## V. Análisis determinístico de riesgo sísmico

En los primeros años de la ingeniería geotécnica de los terremotos, ha utilizado el análisis determinístico de riesgos sísmicos era frecuente. El análisis implica el desarrollo de un escenario sísmico particular basado en la evaluación del riesgo de aceleraciones sísmicas. El escenario consiste en la ocurrencia postulada de un terremoto de un tamaño específico que ocurre en una ubicación.

- a) Identificación y caracterización de todas las fuentes de terremotos capaces de producir un movimiento significativo del suelo en el lugar. La caracterización de la fuente incluye la definición de la geometría de cada fuente (la zona de la fuente) y el potencial sísmico.
- b) Selección de un parámetro de distancia fuente-sitio para cada zona fuente. En la mayoría de los análisis determinísticos, la distancia más corta entre la zona de origen y el sitio de interés es seleccionado. La distancia puede expresarse como una distancia epicentral o hipo central, dependiendo de la medida de la distancia de la(s) relación(es) predictiva(s) utilizada(s) en el siguiente paso.
- c) Selección del terremoto de control (es decir, el terremoto que se espera que produzca el nivel más fuerte de sacudida), generalmente expresado en términos de algún terreno parámetro de movimiento, en el sitio. La selección se hace comparando los niveles de sacudidas producidas por los terremotos (identificados en el paso 1) que se supone que ocurren a las distancias identificadas en el paso c). El terremoto que lo controla se describe en términos de su tamaño (normalmente expresado como magnitud) y la distancia del lugar.
- d) El peligro en el sitio se define generalmente en términos de los movimientos del suelo producidos en el sitio por el terremoto de control. Sus características suelen ser descrito por uno o más parámetros de movimiento del suelo obtenidos a partir de relaciones predictivas de los tipos presentados en el capítulo 3. La aceleración máxima, la velocidad máxima y Las ordenadas del espectro de respuesta se utilizan comúnmente para caracterizar el peligro sísmico.

(Kramer, 1996)

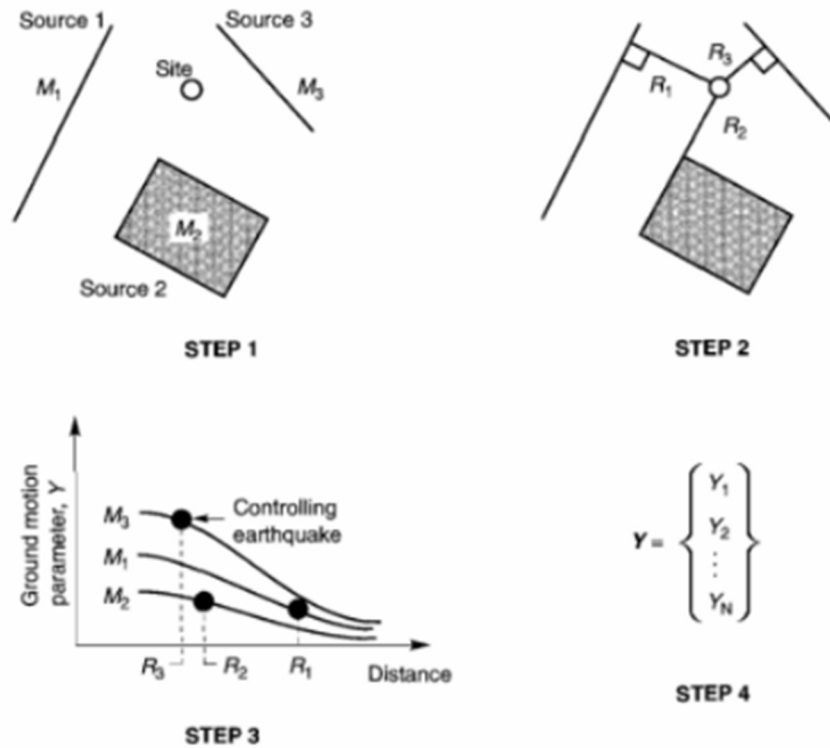


Ilustración 18 Cuatro pasos de un análisis determinístico del peligro sísmico.

Cuando se aplica a estructuras cuya falla podría tener consecuencias catastróficas, como centrales nucleares y grandes presas, el DSHA proporciona un marco sencillo para evaluación de los movimientos de tierra en el peor de los casos. Sin embargo, no proporciona información sobre la probabilidad de que ocurra el terremoto de control, la probabilidad de que ocurra donde se supone que ocurre, el nivel de sacudida que podría esperarse durante un período finito de tiempo (como la vida útil de una estructura o instalación particular), o los efectos de las incertidumbres en los diversos pasos necesarios para calcular las características del movimiento del suelo resultantes (Kramer, 1996).

## VI. Resultados del análisis determinístico de riesgo sísmico

Las fuentes sísmicas críticas para la ubicación del punto de estudio son: Las fallas locales, falla del Motagua, falla de Jalpatagua y la zona de subducción. Cumpliendo con el primer paso de la metodología. Así dando el espacio a la selección de sismos, que cumplan con el rango de Magnitud de momento máxima (Mw) que se pueda generar, la distancia más cercana a la superficie de ruptura (Rrup), obteniendo un factor de escala (SF) para la ajustar el acelerograma de la base de datos a nuestro acelerograma calculado. Se debe realizar una búsqueda por cada falla crítica seleccionada, tabulándolo de la siguiente manera.

*Tabla 4 Sismos seleccionados para el sistema de fallas locales*

Evento	Mw	Rrup	SF	Fecha
Morgan Hill	6.19	0.53	1.07	1984
Parkfield	6	2.99	1.17	2004
Managua 72	6.24	4.06	0.39	1972
Christchurch 11	6.2	3.36	0.61	2011
San Salvador 86	5.8	6.3	2.53	1986

*Tabla 5 Sismos seleccionados para la falla de Jalpatagua*

Evento	Mw	Rrup	SF	Fecha
Landers 92	7.28	27.05	2.23	1992
Turquia 99	7.14	23.41	4.55	1999
Irpinia 01	6.9	21.26	1.59	1980
Darfield 10	7	24.47	0.16	2010
Loma Prieta 89	6.93	20.26	1.04	1989

*Tabla 6 Sismos seleccionados para la falla del Motagua*

Evento	Mw	Rrup	SF	Fecha
Landers 92	7.28	27.05	2.34	1992
Turquia 99	7.51	30.73	1.40	1999
Chichi 99	7.62	28.91	1.77	1999
Darfield 10	7	30.63	1.85	2010
El Mayor 10	7.2	32.22	2.78	2010

*Tabla 7 Sismos seleccionados para la zona de subducción*

Evento	Mw	Rrup	SF	Fecha
México SM 17	8.2	201.6	3.1	2017
México QTZ 17	8.2	232.8	2.2	2017
Salvador 0101c	7.7	99.3	2.3	2001
México 85	8.1	120.0	2.6	1985
Salvador 0101	7.7	78.9	1.9	2001

La información sobre los sismos seleccionados fue obtenida de la base de datos NGA-West2, generada por Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), obteniendo un factor de escala, recomendado por ellos, con forme a las ecuaciones de predicción de aceleraciones sísmicas para cada sismo que puede generar cada una de las fallas críticas. Una vez obtenidos los espectros escalados de cada sismo seleccionado se genera un espectro en base al promedio geométrico de los sismos seleccionados

### Espectros seleccionados para el sistema de fallas locales

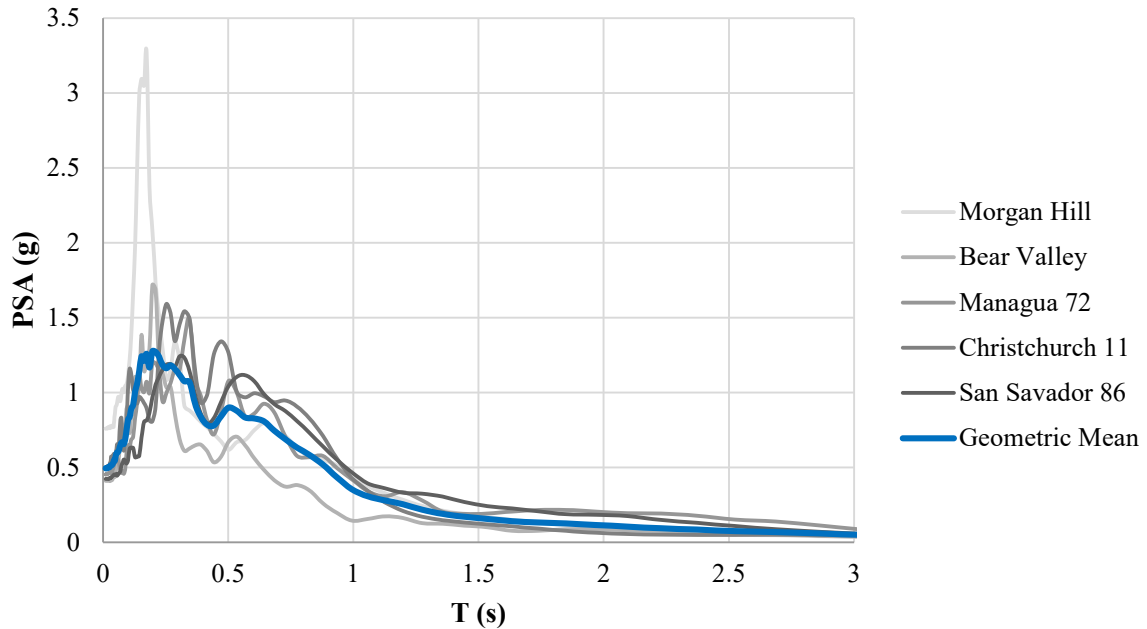


Ilustración 19 Espectro promedio para el sistema de fallas locales

### Espectros seleccionados para la falla de Jalpatagua

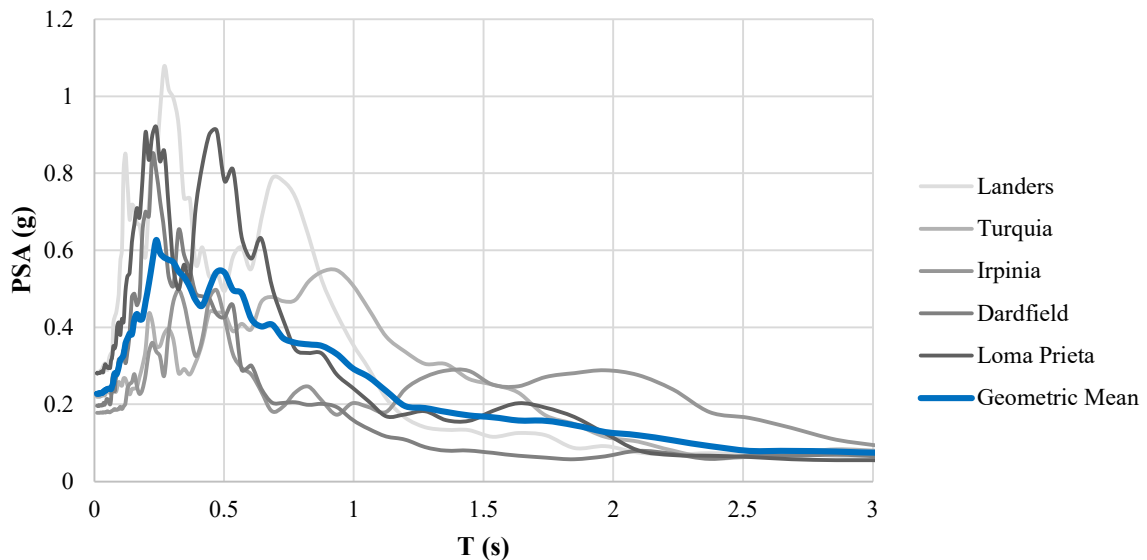


Ilustración 20 Espectro promedio para la falla de Jalpatagua

### Espectros seleccionados para la falla del Motagua

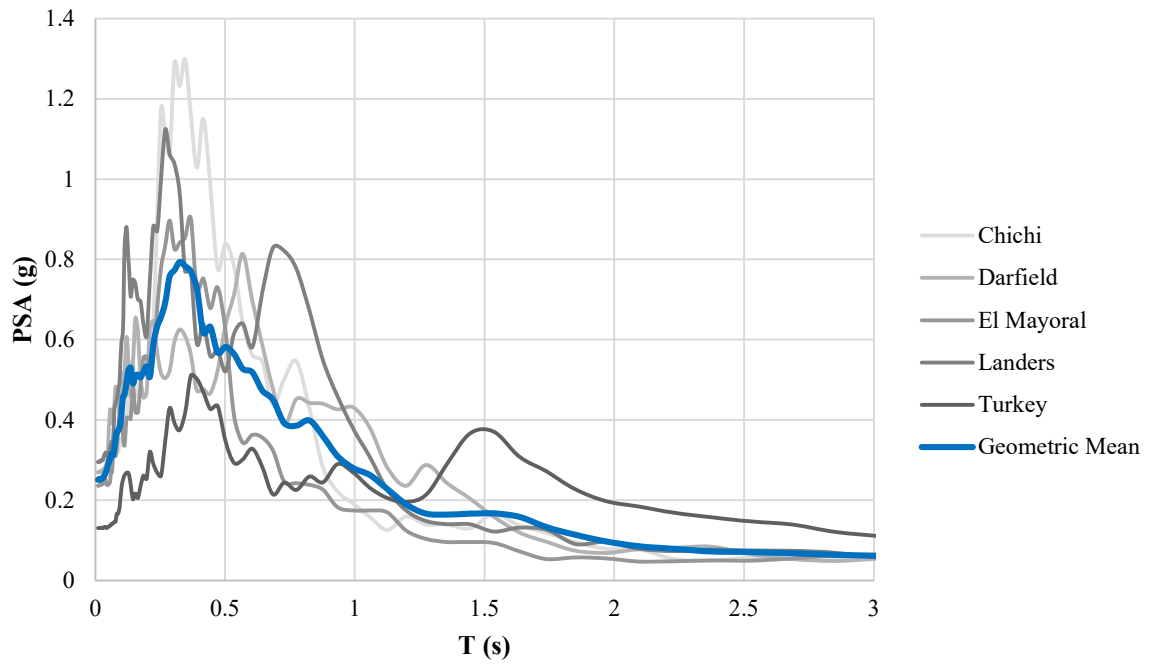


Ilustración 21 Espectro promedio para la falla del Motagua

### Espectros seleccionados para la zona de subducción

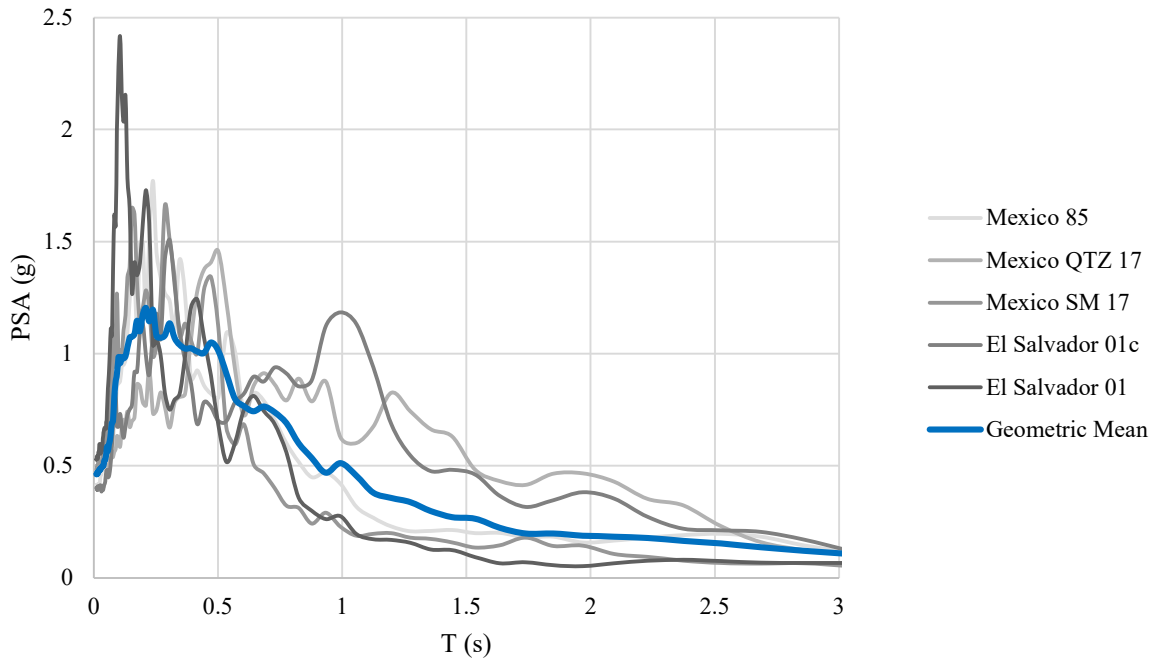
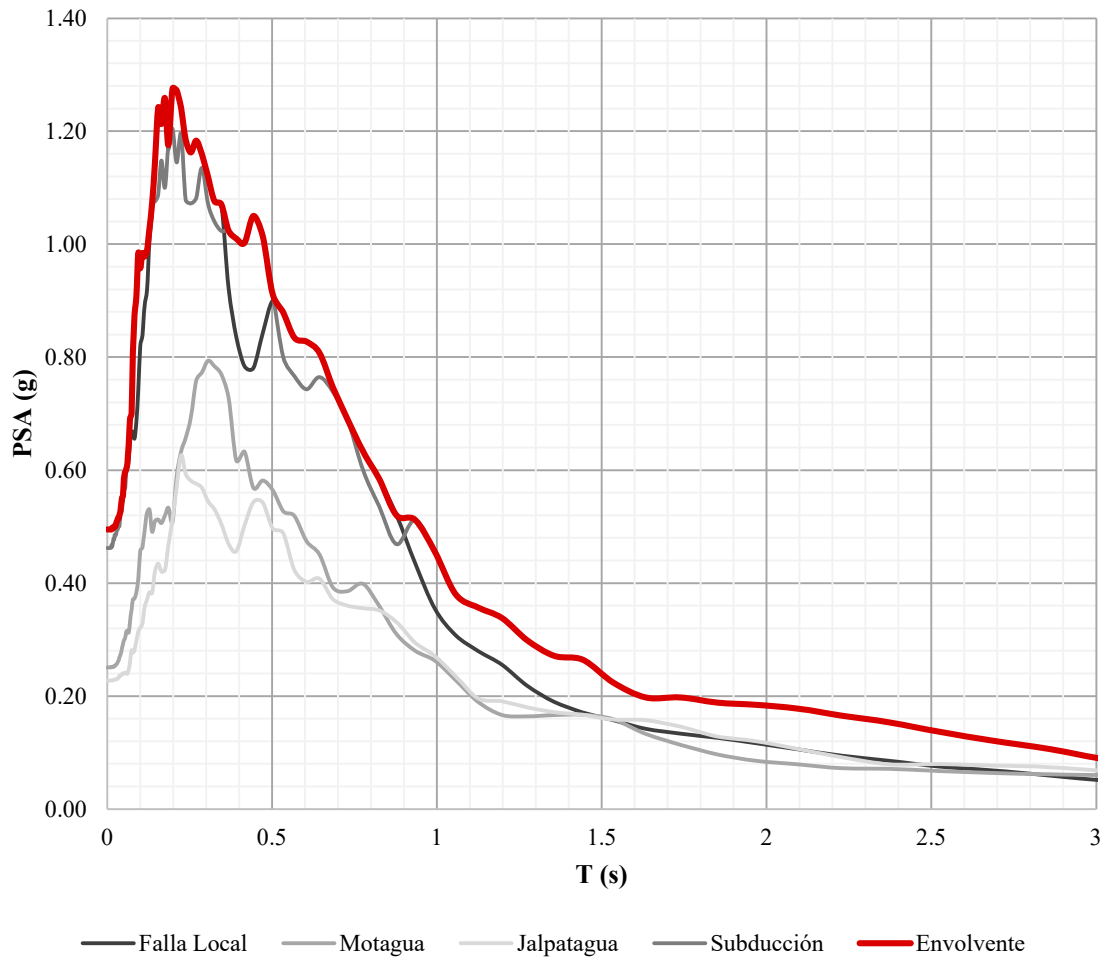


Ilustración 22 Espectro promedio para la zona de subducción

## Espectro determinístico de sitio



*Ilustración 23 Espectro específico de sitio para la Ciudad de Guatemala*

La envolvente toma las aceleraciones máximas que genera cada promedio geométrico calculado por cada falla tomada en consideración, siendo así dominante para períodos cortos las fallas locales y para períodos largos la falla de subducción. Eso se debe a que los factores críticos en esta metodología son la cercanía de la falla y la magnitud máxima que puede generar la falla. La aceleración pico (PGA) obtenida es de 0.49g. Principalmente las fallas del Graben de Guatemala dominan los periodos cortos, mientras que para los per

Con los resultados obtenemos podemos discutir la aplicación de la metodología. La metodología es apta para zonas con varias fallas geológicas cercanas, se utiliza el 84 percentil por seguridad, lo que en otras palabras significa que estamos utilizando una desviación estándar arriba del espectro estimado para cada falla.

## VII. Análisis probabilístico de riesgo sísmico

En los últimos 20 a 30 años el uso de conceptos probabilísticos ha permitido que las incertidumbres en la tamaño, ubicación y tasa de recurrencia de los terremotos y en la variación del movimiento del suelo características con el tamaño y la ubicación del terremoto que se considerarán explícitamente en la evaluación de las amenazas sísmicas.

El análisis probabilístico de amenazas sísmicas proporciona un marco en el que estas incertidumbres pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas en una para proporcionar una imagen más completa del peligro sísmico. La comprensión de los conceptos y la mecánica de la PSHA requiere la familiaridad con la terminología y los conceptos básicos de la teoría de la probabilidad. (Kramer, 1996)

El análisis probabilístico también puede describirse como un procedimiento de cuatro pasos (Reiter, 1990) cada uno de ellos que tienen cierto grado de similitud con los pasos del procedimiento del Análisis Determinístico.

- a) El primer paso, la identificación y caracterización de las fuentes de los terremotos, es idéntico a el primer paso del análisis determinístico, excepto que la distribución de probabilidad de ruptura potencial. También se deben caracterizar las ubicaciones dentro de la fuente. En la mayoría de los casos, se asignan distribuciones de probabilidad uniformes a cada zona fuente, lo que implica que los terremotos son es igualmente probable que ocurra en cualquier punto dentro de la zona de origen. Estas distribuciones son y luego se combina con la geometría de la fuente para obtener la correspondiente distribución de probabilidad de la distancia entre la fuente y el lugar. El análisis determinístico, por otra parte, asume implícitamente que la probabilidad de ocurrencia es de 1 en los puntos de cada zona de origen más cercanos a la y cero en otros lugares.
- b) A continuación, se debe caracterizar la sismicidad o distribución temporal de la recurrencia del terremoto. Una relación de recurrencia, que especifica la tasa promedio a la que un terremoto de algún tamaño será superado, se utiliza para caracterizar la sismicidad de cada zona de origen. La relación de recurrencia puede acomodar el tamaño máximo, pero no limita la consideración a ese terremoto, como lo hacen a menudo el análisis determinístico.
- c) El movimiento de tierra producido en el lugar por terremotos de cualquier tamaño que ocurran en cualquier punto posible de cada zona de origen debe determinarse con el uso de relaciones de predicción. La incertidumbre inherente a la relación de predicción también se considera en un PSHA.
- d) Finalmente, las incertidumbres en la localización de los terremotos, el tamaño de estos y el movimiento del suelo se combinan para obtener la probabilidad de que el movimiento del suelo se superará durante un período de tiempo determinado.

(Kramer, 1996)

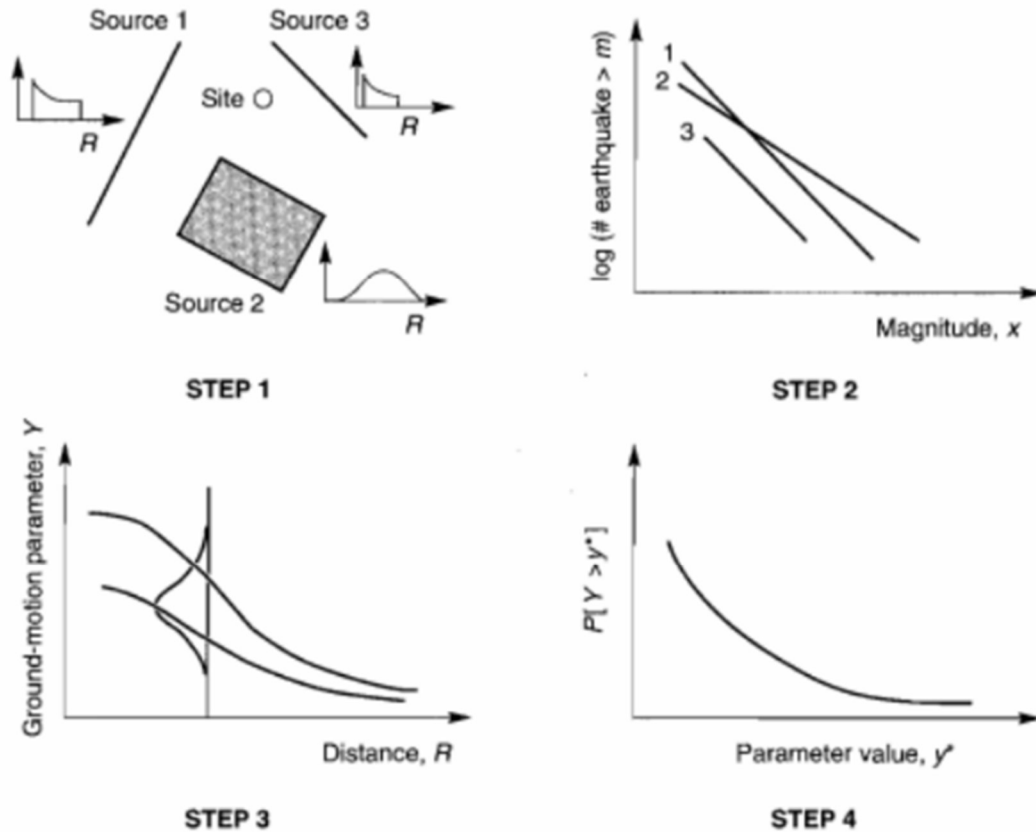


Ilustración 24 Cuatro pasos de un análisis probabilístico de riesgo sísmico

(Kramer, 1996).

El correcto funcionamiento de un PSHA requiere una cuidadosa atención a los problemas de la caracterización de la fuente y la predicción de los parámetros de movimiento del suelo y a la mecánica de los cálculos de probabilidad (Kramer, 1996).

## 1. Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter.

Gutenberg y Richter (1944) reunieron datos sobre los terremotos del sur de California durante un período de muchos años y organizó los datos según el número de terremotos que superaron las diferentes magnitudes durante ese período de tiempo. Dividieron el número de excesos de cada magnitud por la duración del período de tiempo para definir una tasa media anual de superación,  $\lambda_m$  de un terremoto de magnitud  $m$ .

Como era de esperar, la tasa media anual de superación de los pequeños terremotos es mayor que la de los grandes terremotos. El recíproco de la tasa anual de superación para una magnitud determinada se denomina comúnmente período de retorno de los terremotos que excede esa magnitud. Cuando el logaritmo de la tasa anual de superación del sur. Los terremotos de California fueron trazados en función de la magnitud del terremoto, una relación lineal fue observado. El resultado de la ley Gutenberg-Richter para la recurrencia de los terremotos se expresó como

$$\log \lambda_m = a - bm$$

donde  $\lambda_m$  es la tasa media anual de superación de la magnitud  $m$ ,  $10^a$  es la media anual número de terremotos de magnitud mayor o igual a cero, y  $b$  (el valor  $b$ ) describe la probabilidad relativa de los terremotos grandes y pequeños.

La ley se ilustra esquemáticamente en la ilustración 11a. A medida que el valor  $b$  aumenta, el número de los terremotos de mayor magnitud disminuyen en comparación con los de menor magnitud. La ley de Gutenberg-Richter no se limita al uso de la magnitud como descriptor del tamaño del terremoto; también se ha utilizado la intensidad epicentral. Los datos de recurrencia mundial se muestran en ilustración 11b (Kramer, 1996).

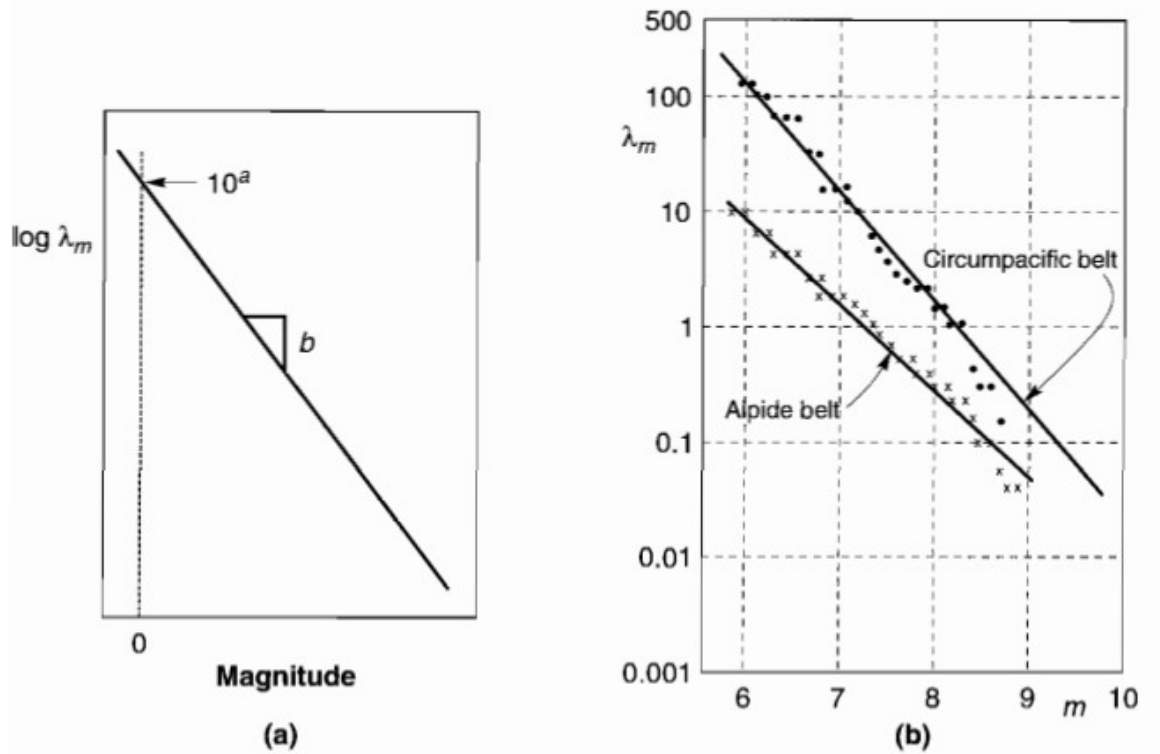


Ilustración 25 a) Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, que muestra el significado de  $a$  y  $b$ ; b) aplicación de la ley de Gutenberg-Richter a los datos sobre la sismicidad en todo el mundo.

## VIII. Resultados del análisis probabilístico de riesgo sísmico

Como se explicó con anterioridad, existen tres tipos de fuentes que representan un peligro sísmico para la Ciudad de Guatemala: las fallas transcurrentes, la zona de subducción y el graben de la Ciudad de Guatemala. Se utilizó la base de datos de USGS y los catálogos sísmicos regionales para estimar la actividad de cada una de las fuentes, así como la longitud, anchura, buzamiento y geometría de la fuente.

“The United States of America Geological Survey (USGS) fue creado por una ley del Congreso de Estados Unidos de América en 1879, ha evolucionado a lo largo de los 125 años siguientes, adaptando su talento y sus conocimientos al progreso de la ciencia y la tecnología. Como la mayor agencia de cartografía civil y de ciencias biológicas, terrestres y del agua de la nación, USGS recopila, monitoriza, analiza y proporciona ciencia sobre las condiciones, asuntos y problemas de los recursos naturales. Su diversa experiencia les permite llevar a cabo investigaciones multidisciplinarias a gran escala y proporcionar información científica imparcial a los administradores de recursos, planificadores y otros clientes.” (U.S. Geological Survey , s.f.)

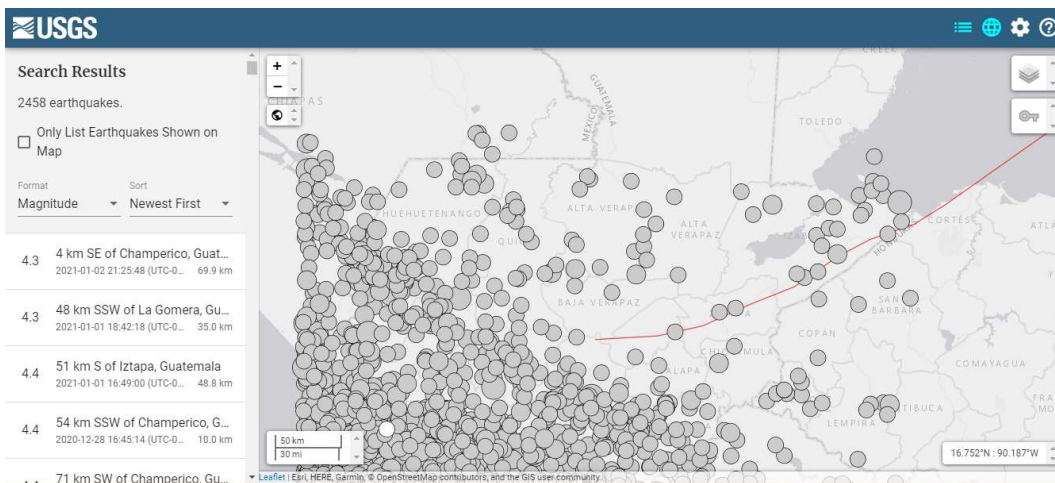


Ilustración 26 Portal de base de datos de eventos sísmicos USGS

(USGS, 2020).

Se utilizaron dos criterios para el cálculo de la magnitud máxima: La magnitud máxima registrada históricamente y el evento sísmico máximo posible estimado en base a la geometría y tamaño de la fuente. La ubicación de las fuentes está basada en los mapas geológicos locales, la información geológica y los catálogos de USGS.

Las curvas de riesgo se desarrollaron para todas las fuentes, descritas en los capítulos anteriores. Los periodos seleccionados para graficar el espectro fueron: 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 y 3.0 segundos. De la ilustración 25 hasta la ilustración 33, se muestran las curvas de riesgo total del punto de estudio de cada periodo.

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

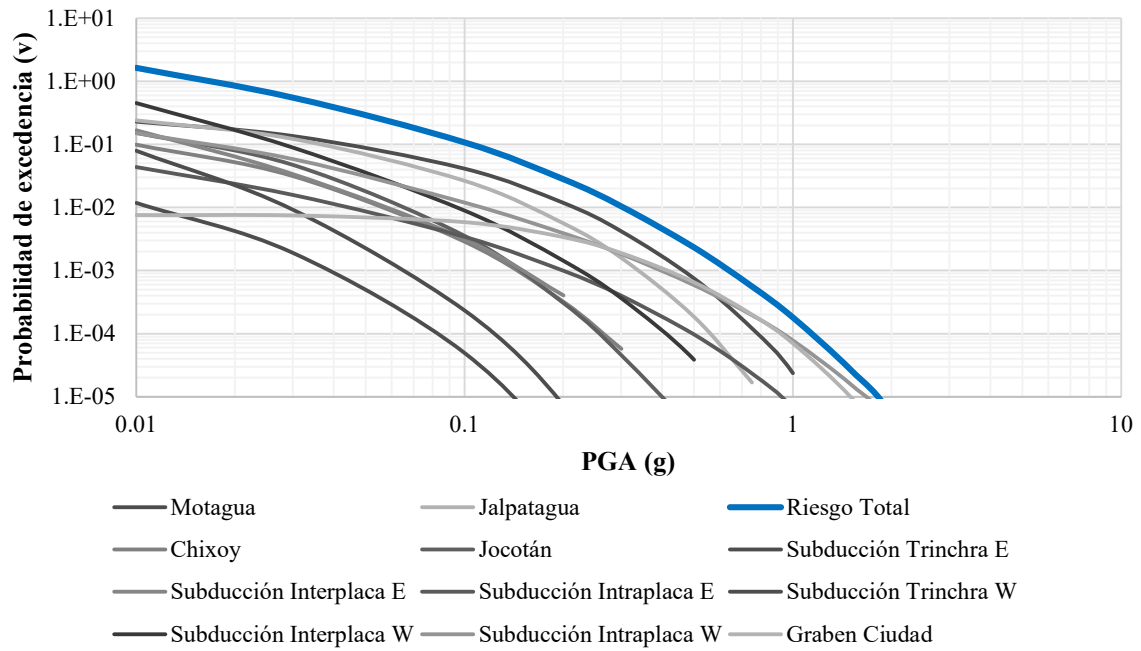


Ilustración 27 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.01s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

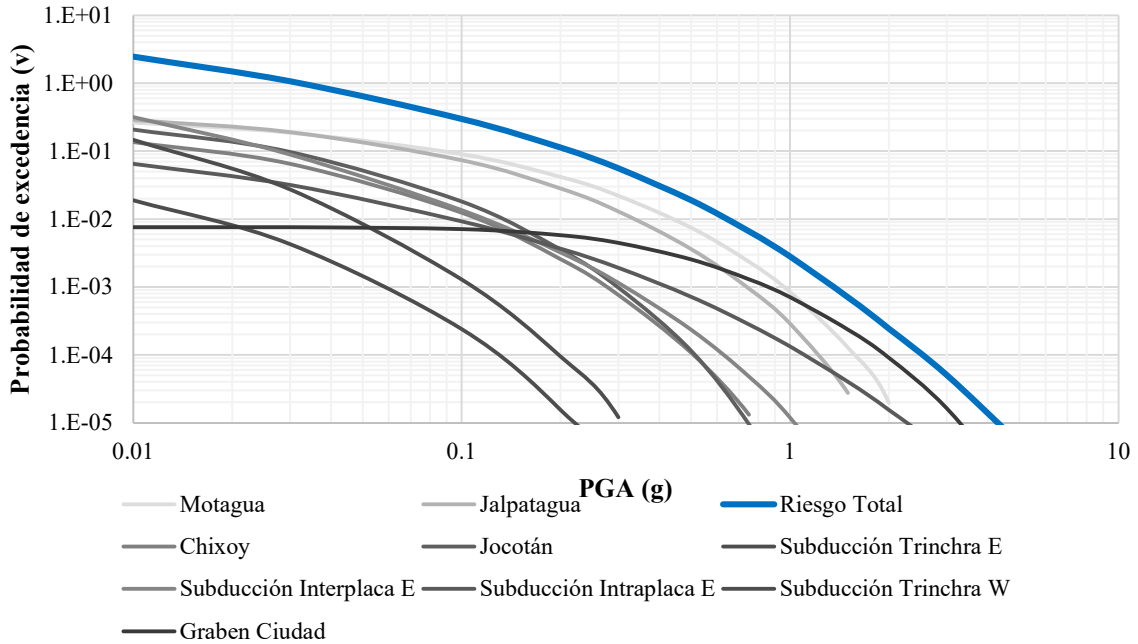


Ilustración 28 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.1s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

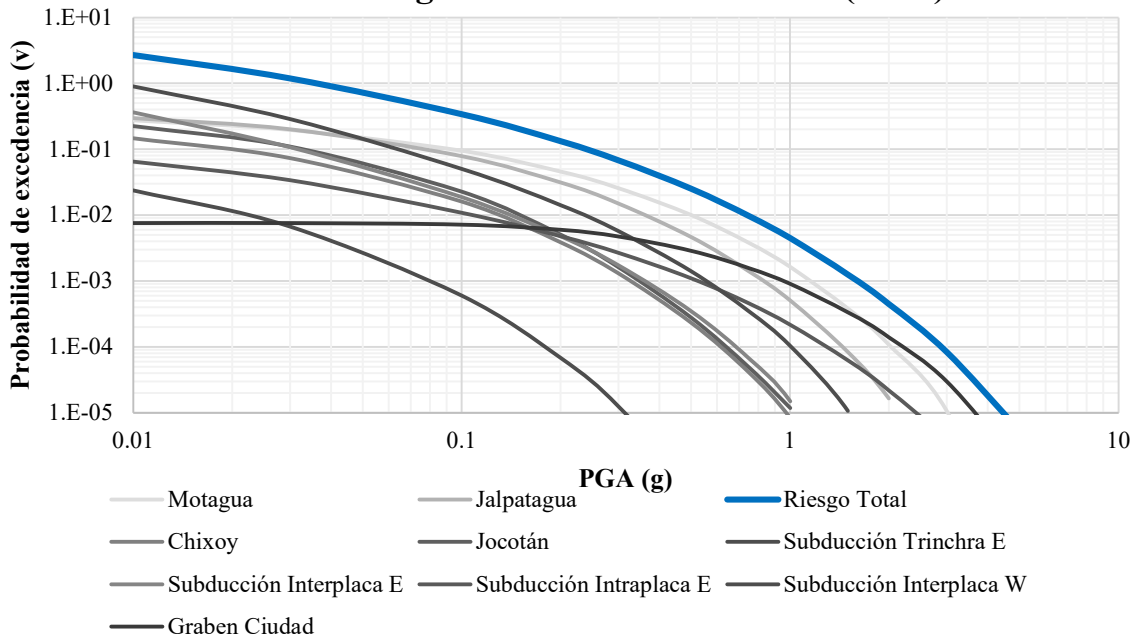


Ilustración 29 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.2s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

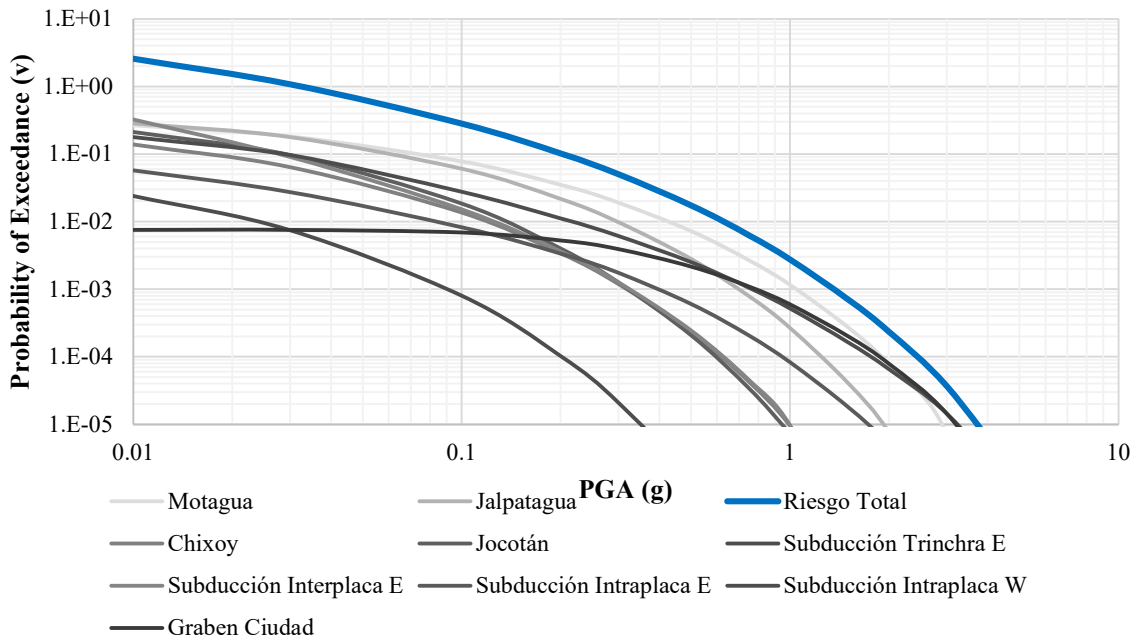


Ilustración 30 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.3s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

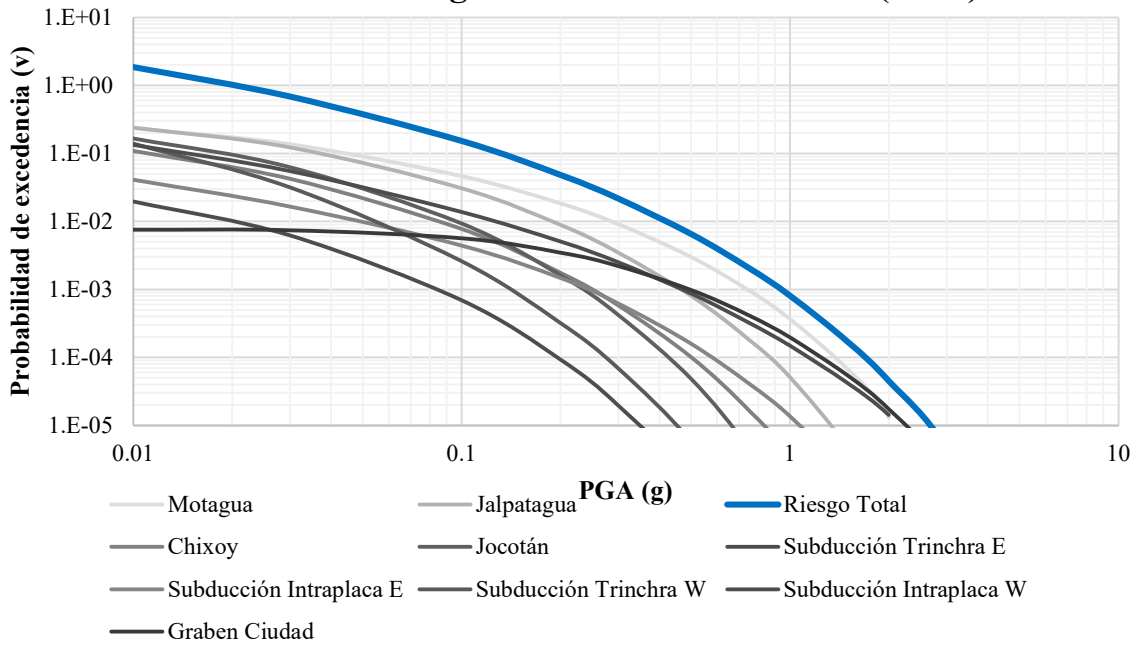


Ilustración 31 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.5s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

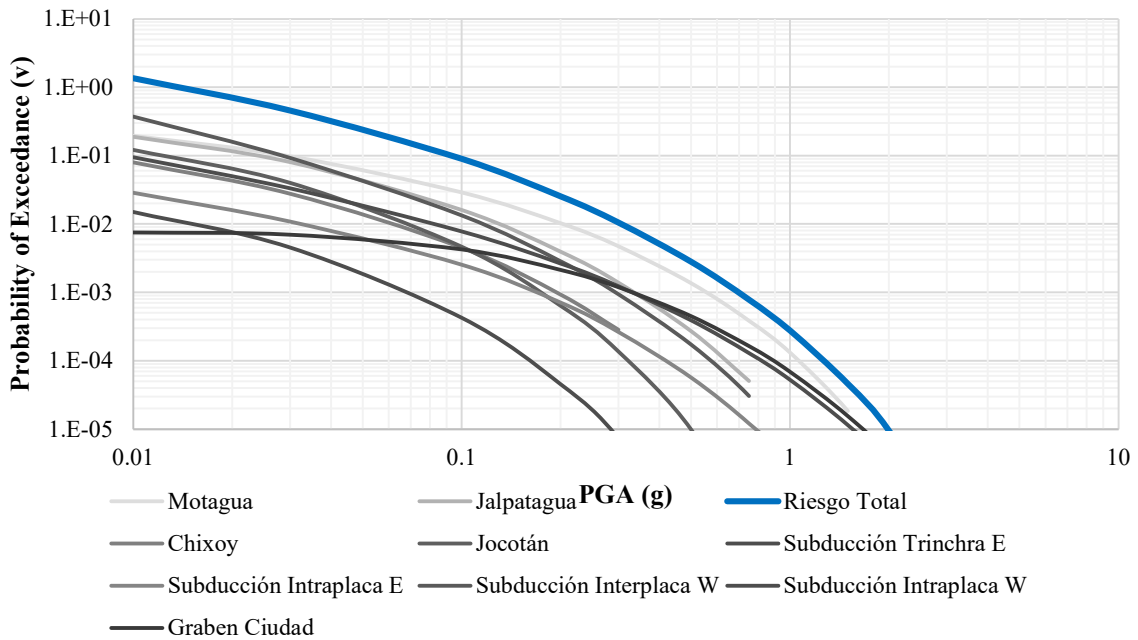


Ilustración 32 Gráfica de riesgo total para el periodo de 0.7s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

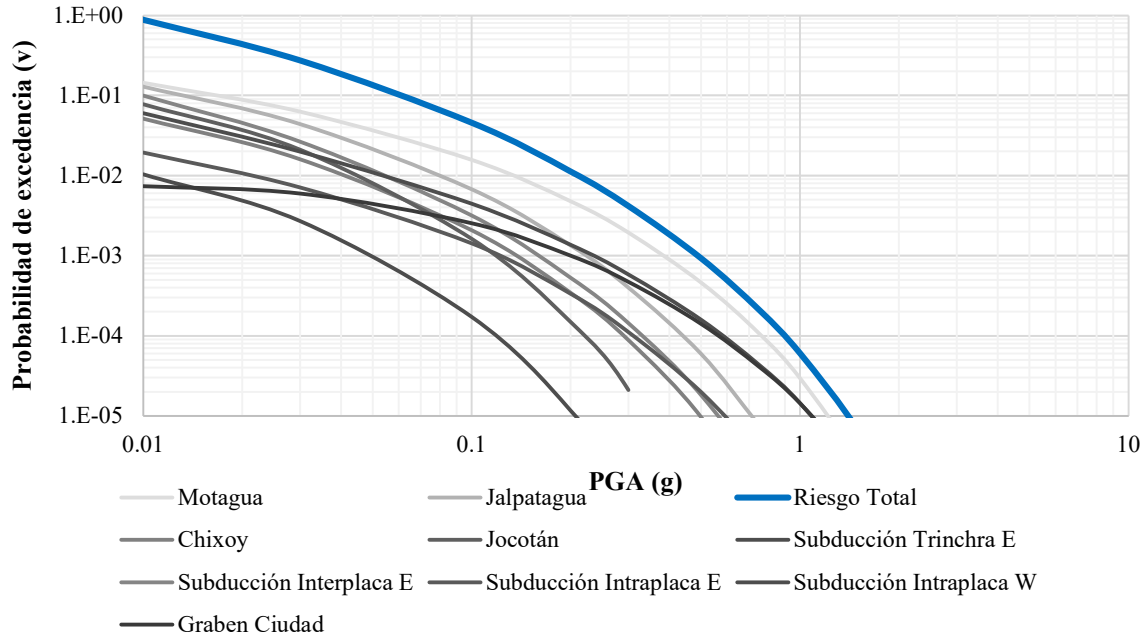


Ilustración 33 Gráfica de riesgo total para el periodo de 1.0s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

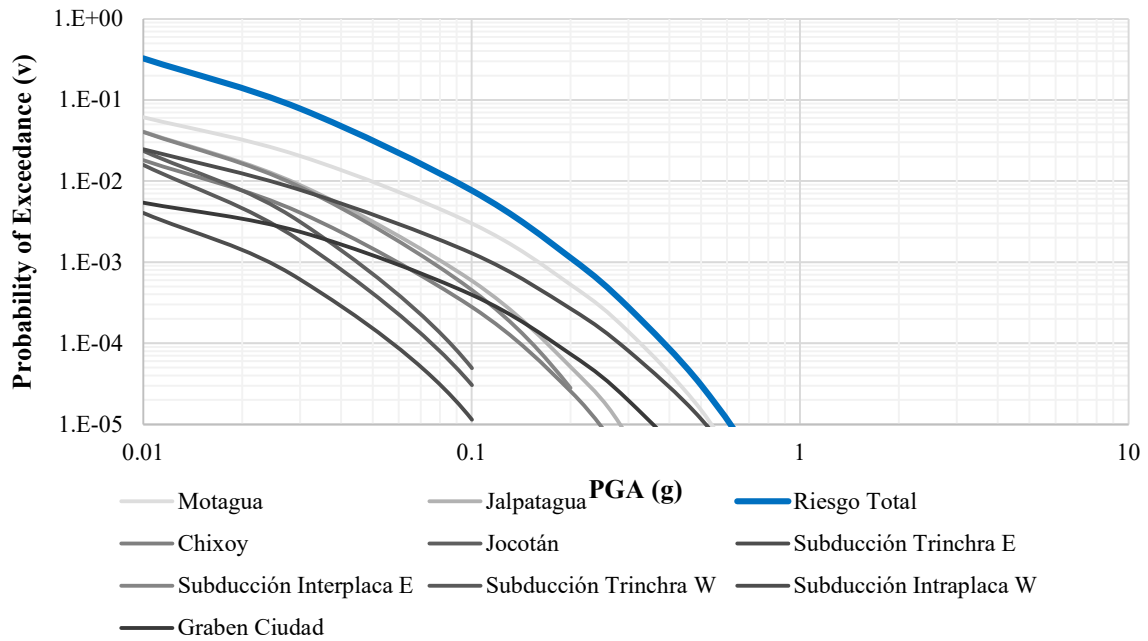


Ilustración 34 Gráfica de riesgo total para el periodo de 2.0s

### Análisis de riesgo - Ciudad de Guatemala (PGA)

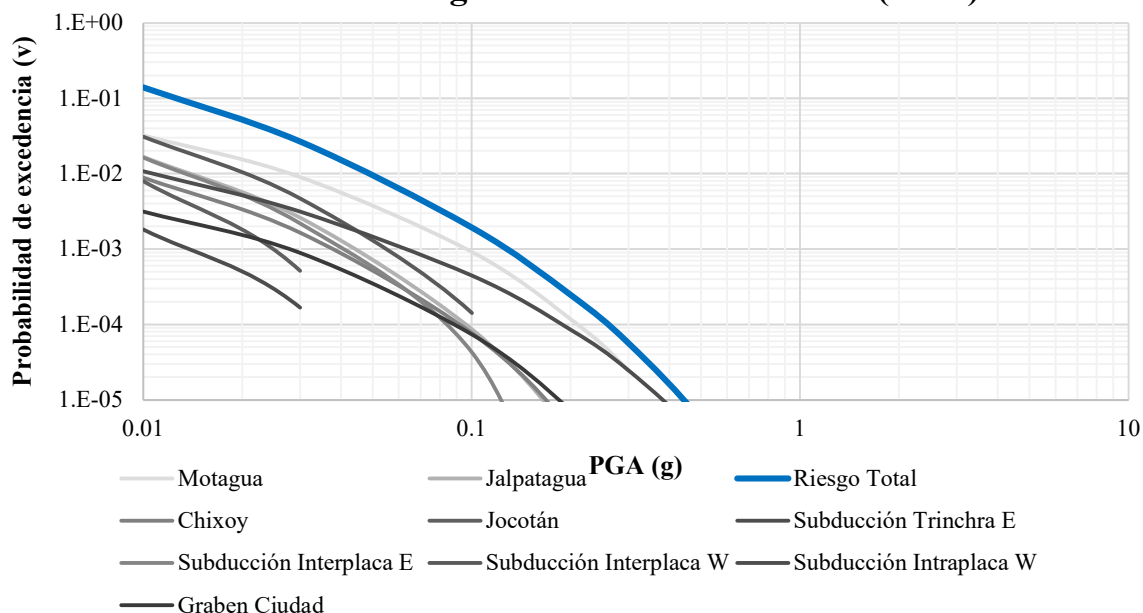


Ilustración 35 Gráfica de riesgo total para el periodo de 3.0s

Para la generación de espectros se tomaron las probabilidades de excedencia de: 2.0% en 50 años, 5.0% en 50 años y 10.0% en 50 años. Se tomó la decisión de utilizar esas probabilidades debido que son las probabilidades establecidas en la NSE 2 2018 de AGIES.

### Espectro probabilístico de sitio

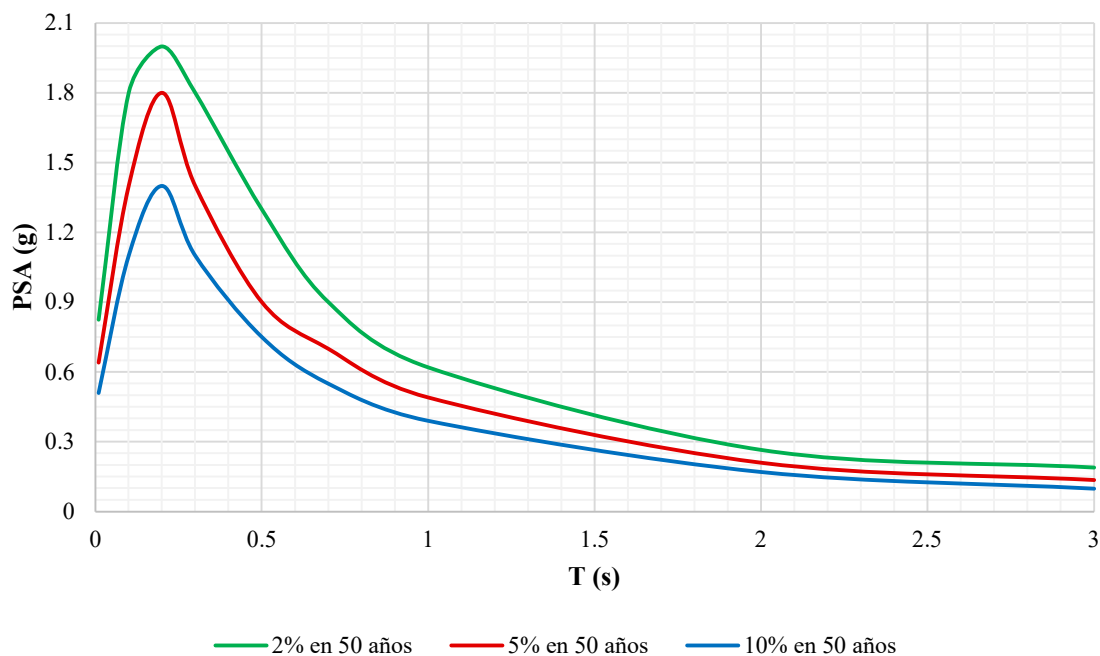


Ilustración 36 Espectros sísmicos generados con diferentes probabilidades de excedencia para la Ciudad de Guatemala.

Nuestras aceleraciones pico varían dependiendo del tiempo de recurrencia siendo descritas en el siguiente cuadro:

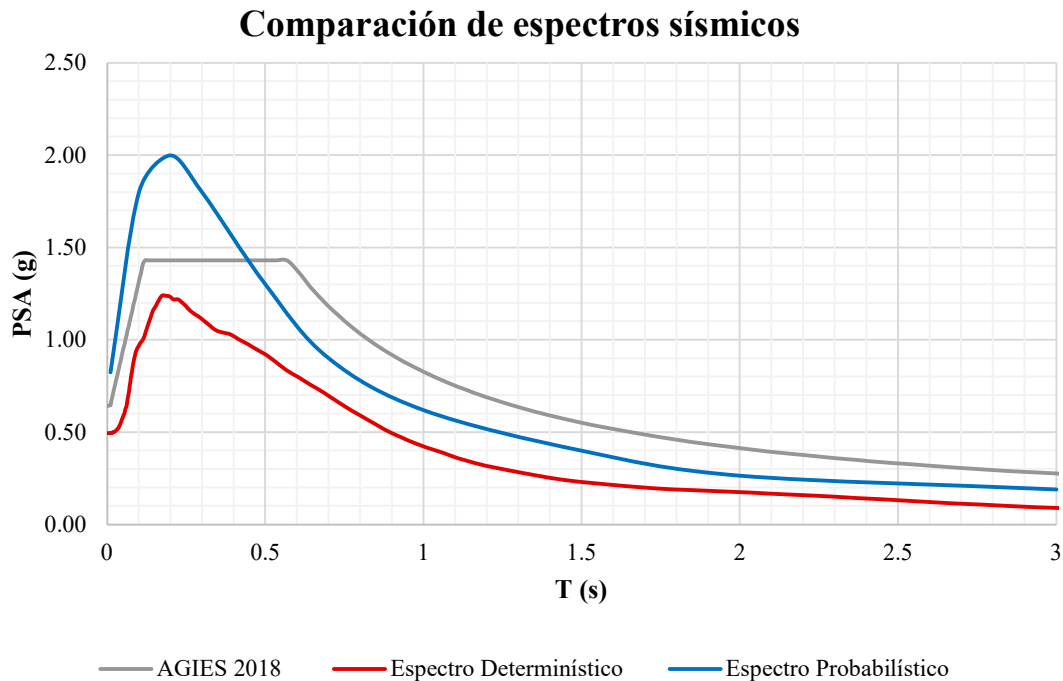
*Tabla 8 Valores PGA para varias probabilidades de excedencia*

Probabilidad de excedencia	Tiempo de retorno	PGA
2% en 50 años	2475 años	0.825 g
5% en 50 años	975 años	0.64 g
10% en 50 años	475 años	0.51g

Destacando nuevamente la diferencia principal del método probabilístico con respecto al método determinístico, es el tiempo de recurrencia. Este factor genera el aumento o disminución de las aceleraciones, tomando en cuenta todas las fallas del territorio guatemalteco. Las fallas locales de graben de la Ciudad de Guatemala afectan a los periodos cortos, y la falla de subducción, La Intraplaca para ser más específicos, domina los periodos altos. Si se quisiera afinar más el espectro, se deberá correr el análisis para más periodos e investigar a fondo la actividad sísmica y tasa de corrimiento de cada falla.

## IX. Comparación de espectros

Realizar una comparación de las metodologías empleadas para el cálculo de aceleraciones es compleja, a razón de que en el análisis determinístico no utiliza una probabilidad de excedencia, sin embargo, se utiliza una desviación estándar de la media por seguridad.



*Ilustración 37 Comparación de espectros de respuesta.*

En la Ilustración 37, se puede observar que el espectro determinístico tiene menores aceleraciones, eso sucede a consecuencia de que el análisis determinístico utiliza únicamente las aceleraciones del 84 percentil que genera cada falla. En cambio, del análisis probabilístico se obtiene una curva de riesgo total para un periodo determinado, que es la suma de las curvas de riesgo de cada falla, las aceleraciones se obtienen definiendo una probabilidad de excedencia. En la Tabla 9 se enlistan las aceleraciones pico obtenidas por cada metodología, demostrando que la aceleración pico alta es de la metodología probabilística. Directamente no es posible realizar una comparación entre ambas metodologías, puesto que la metodología determinística no utiliza el tiempo de recurrencia de los eventos sísmicos, por lo que carecemos de una probabilidad de excedencia.

*Tabla 9 Valores PGA obtenidos por cada metodología*

Metodología	Probabilidad de excedencia	PGA
Probabilística	2% en 50 años	0.825 g
NSE 2 2018 AGIES	2% en 50 años	0.64 g
Determinística	-	0.49g

Al momento de elegir que metodología usar dependerá del criterio de diseño del ingeniero, debido a que debe tener en cuenta la clase de obra, el nivel de protección sísmica y ubicación geográfica. Visto que ambas metodologías pueden ser aplicadas en la Ciudad de Guatemala. La

metodología probabilística es una metodología más completa, dado que considera el tiempo de recurrencia y tasas de corrimiento. Esto también implica una base de datos más completa y homogénea, para su calibración. La metodología determinística requiere menos información que la metodología probabilística, ya que es dominada por las fallas críticas, las cuales son las más estudiadas de la región. Sin embargo, las aceleraciones calculadas no cuentan con un tiempo de recurrencia definido.

## **X. Conclusiones y Recomendaciones**

### **A. Conclusiones**

- Se observó en el Análisis Determinístico las fuentes sísmicas más relevantes para la Ciudad de Guatemala son la Zona de subducción para estructuras con periodos largos y las fallas del Graben de la Ciudad de Guatemala para las estructuras con periodos cortos.
- La aceleración pico (PGA) para el espectro determinístico es de 0.49g.
- Se observó en el Análisis Probabilístico las fuentes sísmicas más relevantes para la Ciudad de Guatemala son la Zona de subducción y el Graben de la Ciudad de Guatemala. Sin embargo, para periodos de retorno más cortos la Falla de Jalpatagua y la Falla del Motagua también influyen en el riego total de la curva.
- La aceleración pico (PGA) para el espectro probabilístico son: 0.825g para una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años; 0.64g para una probabilidad de excedencia de 5% en 50 años y 0.51g para una probabilidad de excedencia de del 10% en 50 años.
- En ambos espectros, la Intraplaca de la Zona de subducción influye altamente en las aceleraciones de periodos largos, mientras que para los periodos cortos son las Fallas del Graben de la Ciudad de Guatemala.
- AGIES define probabilidades de excedencia para utilizar en la Norma NSE 2 – Demandas estructurales y condiciones de sitio, siendo más crítica el 2% en 50 años. La aceleración pico del suelo (PGA) calculada por la metodología probabilística es mayor a la aceleración pico del suelo del espectro genérico de AGIES. Sin embargo, para períodos de vibración largos el espectro genérico de AGIES tiene mayores aceleraciones.
- Para la Ciudad de Guatemala, el análisis probabilístico da mayores aceleraciones sísmicas que el análisis determinístico. Esto probablemente se deba a que la metodología probabilística toma el riesgo de todas las fallas, por el contrario, la metodología determinística selecciona las fallas críticas cercanas al proyecto de manera individual.

## **B. Recomendaciones**

- Es recomendable para el área de investigación, homogenizar las bases de datos sísmicos con acceso público, al hacerlo se facilitará la implementación de ambas metodologías. De esta manera se estará manejando la misma información entre profesionales, facilitando el desarrollo de esta rama de investigación.
- Para una mejor calibración del análisis probabilístico, se necesitan más estudios que respalden las tasas de corrimiento de las fallas dentro del territorio guatemalteco, existen fallas que carecen de información. Por lo que se le recomienda las instituciones académicas realizar estudios más detallados de las diferentes fuentes sísmicas que existen en el país.
- Para las universidades, deben tomar en consideración ampliar dentro de su pensum temas como el cálculo de aceleraciones sísmicas y elaboración de espectros sísmicos. El entendimiento de estos temas es esencial para desarrollar correctamente el diseño sismo resistente en el campo estructural.
- Para los diseñadores, deben tener presente las diferentes metodologías para la estimación de las aceleraciones sísmicas para obtener un criterio más razonable sobre la elección de espectros a utilizar y como afectarían a la edificación.
- Para los entes reguladores (como AGIES, CONRED, municipalidades, etc.) se recomienda examinar ambas metodologías para actualizar y seguir desarrollando mapas de microzonificación sísmica más detallados.
- Para los estudiantes y universidades, se recomienda realizar estudios similares tomando en cuenta diferentes ubicaciones dentro del territorio nacional, en especial lugares donde se tengan un riesgo sísmico elevado y con planes de desarrollo a futuro, por ejemplo, en las ciudades intermedias.
- Para las instituciones de investigación, se recomienda generar una base de datos más completa de manera de poder realizar estudios más fiables y completos en la rama de la ingeniería sísmica.

## XI. Bibliografía

- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y sísmica. (2018). Demandas estructurales y condiciones de sitio. *Normas de seguridad Estructural para Guatemala*, Capítulo 4.
- Campbell, K. (1985). Strong ground motions attenuation relationships: A ten-year perspective. *Earthquake Spectra*, 759-804.
- Chopra, A. (1995). *Dynamics of structures*. San Francisco, California: Pearson Hall.
- Fowler, R. (1990). The solid earth. An introduction to global geophysics. *Cambridge University Press*, p. 472.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104-145.
- Kanamori, H. (1977). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 185-199.
- Koch, A., & Mclean, H. (1975). Pleistocene Tephra and Ash - Flow deposits in the volcanic Highlands of Guatemala. *Geological Society of America*, 529-541.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. In *Física de la Tierra 1*.
- Pérez, C. (2009). ESTRUCTURA GEOLÓGICA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA INTERPRETADA MEDIANTE UN MODELO DE. *Revista Geológica de América Central*, 71-78.
- Reiter, L. (1990). Earthquake Hazard Analysis- Issues and Insights. *Columbia University Press*, 254.
- Richter, C. (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Madrid, España: Pearson Education SA.
- U.S. Geological Survey . (s.f.). *Earthquake Glossary*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=amplitude>
- Universidad Politécnica de Madrid. (2012). Una nueva evaluación del peligro sísmico para la región de América Central - Proyecto Resis II. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102.
- Universidad San Carlos de Guatemala. (2011). Manual de estadística descriptiva. Guatemala, Guatemala.
- Varela, R. (2014). *Manual de Geología*. Consejo nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- Webster, A. (2000). *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. Colombia: Editorial McGraw-Hill.
- White, R. (1984). *CATALOG OF HISTORIC SEISMICITY IN THE VICINITY OF THE CHIXOY-POLOCHIC AND MOTAGUA FAULTS, GUATEMALA*. Guatemala City, Guatemala: El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología, e Hidrología .
- White, R., Ligorria, J., & Cifuentes, I. (2004). Seismic history of the Middle Americas subduction zone along El Salvador, Guatemala and Chiapas, Mexico: 1526-2000. *Geological Society of America*, 379-396.

## **XII. Glosario**

### **A. Amplitud**

La amplitud es el tamaño de los movimientos en una grabación de un terremoto (U.S. Geological Survey , s.f.).

### **B. Atenuación**

Es la disminución en el tamaño, o amplitud, de las ondas. Las ondas sísmicas también se atenúan a medida que se alejan de la fuente del terremoto (U.S. Geological Survey , s.f.)

### **C. Flujo convectivo**

Circulación de la masa de un fluido durante un proceso de transferencia de calor por convección, de importancia en sistemas pasivos de refrigeración de reactores de agua ligera (Tarbuck & Lutgens, 1999).

### **D. Morfología**

Es el estudio del carácter y el origen de las formas terrestres, como montañas, valles, etc. (U.S. Geological Survey , s.f.)

### **E. Percentil**

El percentil es un valor estadístico para comparar un conjunto de datos. Para resumir de forma sencilla, el percentil nos indica la comparación de datos en rangos establecidos se encuentran dentro de la media (Universidad San Carlos de Guatemala, 2011)

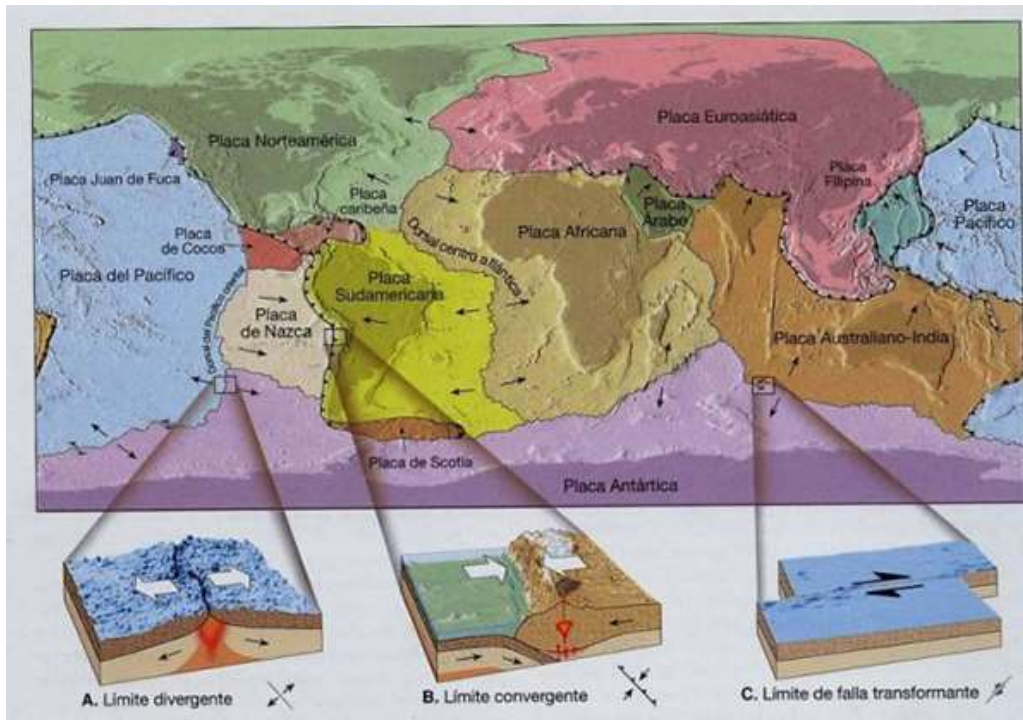
### **F. Promedio geométrico**

Es una medida de tendencia central que puede utilizarse para mostrar los cambios porcentuales en una serie de números positivos. Como tal, tiene una amplia aplicación en los negocios y en la economía, debido a que con frecuencia se está interesado en establecer el cambio porcentual en las ventas en el producto interno bruto o en cualquier serie económica. Se define como la raíz índice n del producto de n términos (Webster, 2000)

$$MG = \sqrt[n]{X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n}$$

## G. Tipos de fallas geológicas

Debido a los diferentes movimientos de placas, se generan diferentes tipos de fallas geológicas con características diferentes.



*Ilustración 38 Mosaico de las placas rígidas que constituyen la envuelta externa de la Tierra*

*(Tarbuck & Lutgens, 1999)*

## H. Falla transformante

“Los bordes (pasivos) de falla transformante se localizan donde las placas se desplazan una con respecto a la otra sin producción ni destrucción de litosfera. La mayoría de las fallas transformantes une dos segmentos de dorsal oceánica. Otras conectan centros de expansión con zonas de subducción y facilitan así el transporte de la corteza oceánica creada en la cresta de una dorsal a su lugar de destrucción, una fosa submarina. Aún otras, como la falla de San Andrés, atraviesan la corteza continental.” (Tarbuck & Lutgens, 1999)

## I. Falla convergente

“Los bordes de placa convergentes aparecen donde las placas colisionan, provocando la subducción (consumo) de la litosfera oceánica en el manto a lo largo de una fosa submarina. La convergencia entre un bloque oceánico y uno continental provoca la subducción de la placa oceánica y la formación de un arco volcánico continental como el de los Andes de Sudamérica. La convergencia océano-océano produce una cadena en forma de arco de islas volcánicas denominada arco de islas volcánicas. Cuando dos placas que transportan corteza continental convergen, las dos placas tienen demasiada capacidad de flotación como para subducir. El resultado es una «colisión» que provoca la formación de una cadena montañosa como la del Himalaya.” (Tarbuck & Lutgens, 1999)

## J. Falla divergente

“Los bordes de placa divergentes aparecen donde las placas se separan, provocando el ascenso de material desde el manto para crear nuevo fondo oceánico. La mayoría de los bordes divergentes se localiza a lo largo del eje del sistema de dorsales oceánicas y está asociada con la expansión del fondo oceánico, que se produce a velocidades de 2 a 15 centímetros al año. Dentro de un continente pueden formarse nuevos bordes divergentes (por ejemplo, los valles de rift del este de África), donde pueden fragmentar las masas continentales y desarrollar una nueva cuenca oceánica.” (Tarbuck & Lutgens, 1999)

## K. Subducción

Deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre por debajo del borde de otra (Kramer, 1996).

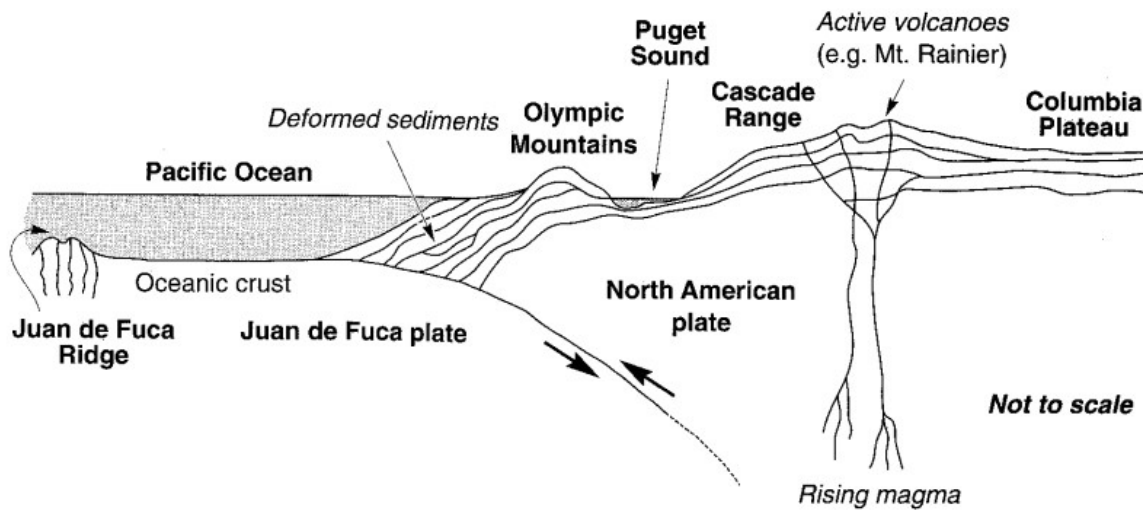


Ilustración 39 Esquematización de la falla de subducción

(Kramer, 1996)