

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Modelación de peligro sísmico usando como herramienta el programa
HAZ45.2 (segunda parte)**

AUTOR:

Ramírez Carvajal, Christian Marcelo

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Luque Nuques, Roberto Xavier, PhD

Guayaquil, Ecuador

12 de septiembre del 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Ramírez Carvajal, Christian Marcelo** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____

Ing. Luque Nuques, Roberto Xavier, PhD

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, MSc

Guayaquil, a los 12 del mes de septiembre del año 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Ramírez Carvajal, Christian Marcelo**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Modelación de peligro sísmico usando como herramienta el programa HAZ45.2 (segunda parte)** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 12 del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR

f. _____

Ramírez Carvajal, Christian Marcelo



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ramírez Carvajal, Christian Marcelo**

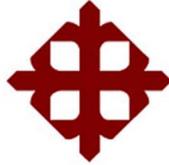
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Modelación de peligro sísmico usando como herramienta el programa HAZ45.2 (segunda parte)**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 12 del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR:

f. _____

Ramírez Carvajal, Christian Marcelo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

Ing. Roberto Xavier Luque Nuques, PhD

TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas, MSc

DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

Ing. Claudio Luque Rivas, MSc.

COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Ing. Oswaldo Francisco Ripalda Nuques

OPONENTE

REPORTE DE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO DE TITULO Christian Ramírez.pdf (D41236108)
Submitted: 9/7/2018 1:24:00 AM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 6 %

Sources included in the report:

<https://vdocuments.site/estudio-general-de-amenaza-sismica-de-colombia-2009lowres.html>
<https://www.csn.es/documents/10182/103228/DID-16-08+Proyecto+Expel+-+Sistema+experto+de+an%C3%A1lisis+probabilista+de+la+peligrosidad+s%C3%ADsmica>

Instances where selected sources appear:

17

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a mis padres: a Pablo Ramírez por ser mi inspiración para seguir esta carrera, mi apoyo incondicional y mi más grande maestro, y a María Cristina Carvajal quien siempre ha estado conmigo dándome sabio consejo y ejemplo de vida, no hay palabras suficientes para expresar la inmensa gratitud que merecen pero les agradezco a ambos por la fe depositada en mí, por todas las lecciones enseñadas, por respaldarme en las decisiones que debía tomar y por siempre motivarme a ser mejor, este logro es para ustedes.

A mis hermanos José Andrés, Pablo Javier y Cristina, por haberme apoyado de muchas formas a lo largo de todo este proceso con ánimos, consejos y estando siempre para darme la mano en los malos momentos. Aquí debo reconocer a otro miembro de mi familia Bryan Zamora quien ha sido mi amigo desde la infancia, gracias por tu amistad, respaldo y consejos para crecer como persona.

A Nathalya Ramírez González por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos, por siempre impulsarme a ser mejor, por tomarme de la mano para recorrer juntos este largo y difícil camino, sin tu apoyo no lo hubiera podido lograr.

A mis queridos amigos, quienes son hermanos que la vida me dio, agradezco por todos los momentos gratos y experiencias que juntos compartimos, por su amistad incondicional y por su apoyo cada vez que lo necesité, juntos hicimos más grata la experiencia de cursar la universidad.

A mi tutor Ing. Roberto Luque Nuques, Ph. D. y oponente Ing. Oswaldo Ripalda, M.Sc. por siempre estar dispuestos a guiarme con paciencia a lo largo del desarrollo de este trabajo y por todas las lecciones aprendidas de la práctica profesional de la ingeniería durante las pasantías realizadas. También debo agradecer al Ing. Guillermo Ponce Vásquez por las valiosas lecciones enseñadas dentro y fuera de la universidad y por todas las oportunidades brindadas a lo largo de la carrera.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a toda mi familia, en especial a mis padres, por todo su sacrificio, su respaldo, por haberme guiado a través de este largo camino, espero ser digno profesional y corresponder todo el esfuerzo que han hecho para que yo cumpla esta meta.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

Ing. Roberto Xavier Luque Nuques, PhD
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas, MSc
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

Ing. Claudio Luque Rivas, MSc
COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Ing. Oswaldo Francisco Ripalda Nuques

ÍNDICE

1 CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo General.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 Alcance.....	3
1.3 Metodología.....	3
2 CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Análisis de peligro Sísmico.....	5
2.1.1 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico.....	6
2.2 Caracterización de fuentes sísmicas para PSHA.....	11
2.2.1 Modelación geométrica de las fuentes sísmicas	12
2.2.2 Caracterización de la sismicidad de la fuente.....	14
2.2.3. Modelos de predicción de movimiento sísmico	24
2.2.4 Manejo de incertidumbre en metodología PSHA.....	25
2.3 Fuentes sísmicas de la costa de Ecuador.....	26
2.4 Modelación e implementación de Fuentes sísmicas en HAZ 45.2	30
3 CAPÍTULO 3- CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS	32
3.1 Caracterización de fallas corticales.....	32
3.1.1 Caracterización de fallas corticales no segmentadas	34
3.1.2 Caracterización de fuentes corticales segmentadas.....	39
3.2 Caracterización de zona de subducción	45
3.4 Modelos de predicción de movimiento sísmico.....	51
3.5 Implementación de fuentes en programa HAZ45.2.....	54
3.5.1. Archivos de Fuente	54
3.5.2. Archivo de Ingreso	56

4 CAPÍTULO 4- RESULTADOS	59
4.1. Fuentes sísmicas corticales no segmentadas.....	59
4.2. Fuentes sísmicas corticales segmentadas.....	65
4.3. Zona de subducción	69
4.4. Resultados totales	71
5 CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
6 CAPÍTULO 6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
7 CAPÍTULO 7- ANEXOS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Caracterización de fuentes.....	8
Figura 2 Ecuación de predicción de intensidad sísmica.....	10
Figura 3 Sensibilidad en resultados de la aceleración espectral Horizontal para distintas leyes de atenuación	10
Figura 4 Probabilidad de excedencia de la intensidad sísmica "y"	11
Figura 5 Tipos de fuentes sísmicas alrededor de un sitio	13
Figura 6 Vista en corte de falla inversa con ángulo de inmersión 60°	14
Figura 7 Árbol lógico usado para tomar en cuenta distintos modelos de ruptura posibles en un sistema de fallas.....	17
Figura 8 Ley Gutenberg-Richter para área fuente del Pacífico	19
Figura 9 Comparación de las diferentes magnitudes pdfs usadas en PSHA	21
Figura 10 Comparación entre modelo de predicción de aceleraciones pico de Nueva Zelanda con el modelo global de Abrahamson y Silva (1997). Las curvas muestran magnitudes de 5.5, 6.5 y 7.5	25
Figura 11 Fallas del territorio costero ecuatoriano	28
Figura 12 Clasificación de fallas activas según su ambiente tectónico	29
Figura 13 Fallas corticales de zonas Costera y Andina a caracterizar	34
Figura 14 Ubicación del sistema Colonche en el Ecuador, mapa elaborado por Eguez (2003).....	41
Figura 15 Ubicación del sistema Girón en el Ecuador, mapa elaborado por Eguez (2003).....	44

Figura 16 Ubicación de la dorsal Carnegie con referencia a Ecuador	47
Figura 17 Ilustración de los ángulos de inmersión de las tres zonas de subducción consideradas, se observan de derecha a izquierda las zonas: sur, central y norte.	48
Figura 18 Distribución de la profundidad a la que se encuentra la placa de Nazca con respecto a la superficie de la placa Sudamericana	50
Figura 19 Modelos de predicción de movimiento sísmico para fuentes corticales y zona de subducción	53
Figura 20 Archivo fuente de la falla Naranjal previo a su implementación en el programa HAZ45.2 para análisis probabilístico de peligro sísmico.	56
Figura 21 Archivo de ingreso implementación en el programa HAZ45.2 de fuentes corticales para análisis probabilístico de peligro sísmico.	57
Figura 22 Imagen satelital de Facultad de Ingeniería de Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	58
Figura 23 Archivo de fuente falla La Toma.....	80
Figura 24 Archivo de fuente falla Guayaquil-Babahoyo	81
Figura 25 Archivo de fuente falla Carrizal	82
Figura 26 Archivo de fuente falla Posorja.....	83
Figura 27 Archivo de fuente falla Chanduy	84
Figura 28 Archivo de fuente falla La Cruz	85
Figura 29 Archivo de fuente falla Tarqui.....	86
Figura 30 Archivo de fuente falla Naranjal	87
Figura 31 Archivo de fuente falla Jambelí	88
Figura 32 Archivo de fuente falla Ponce Enriquez	89

Figura 33 Archivo de fuente falla Piqueros.....	90
Figura 34 Archivo de fuente falla Tenguel.....	91
Figura 35 Archivo de fuente falla Zambapala-Lechuza	92
Figura 36 Archivo de fuente falla Macará.....	93
Figura 37 Archivo de fuente falla Célica.....	94
Figura 38 Archivo de fuente falla Girón noroeste	95
Figura 39 Archivo de fuente falla Girón sureste	96
Figura 40 Archivo de fuente falla Colonche sur.....	97
Figura 41 Archivo de fuente falla Colonche central	98
Figura 42 Archivo de fuente falla Colonche norte	99
Figura 43 Archivo de fuente falla Colonche noroeste.....	100
Figura 44 Archivo de fuente zona megathrust norte	101
Figura 45 Archivo de fuente zona megathrust central	102
Figura 46 Archivo de fuente zona megathrust sur.....	103
Figura 47 Archivo de ingreso para fallas corticales segmentadas y no segmentadas	104
Figura 48 Archivo de ingreso para zonas de subducción.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relaciones magnitud-área para fallas corticales	16
Tabla 2 Datos de sismicidad de fuentes seleccionadas	30
Tabla 3 Coordenadas de Sitio de estudio	31
Tabla 4 Parámetros de las fuentes sísmicas corticales no segmentadas	36
Tabla 5 Coordenadas de fuentes sísmicas corticales no segmentadas.....	38
Tabla 6 Parámetros geométricos y sísmicos del sistema Colonche y formas de ruptura tomadas en cuenta para el modelamiento en HAZ45.2	42
Tabla 7 Coordenadas de fallas que componen el sistema Colonche.....	43
Tabla 8 Parámetros geométricos y sísmicos del sistema Girón y formas de ruptura tomadas en cuenta para el modelamiento en HAZ45.2	44
Tabla 9 Coordenadas de fallas que componen sistema Girón.....	45
Tabla 10 Parámetros geométricos y sísmicos tomados en cuenta para modelamiento de zona de subducción en	48
Tabla 11 Coordenadas de inicio y fin de las diferentes zonas de megathrust incluidas en el modelo HAZ45.2.....	49
Tabla 12 Coordenadas de zona intraslab incluida en el modelo en HAZ45.2	51
Tabla 13 Modelos de predicción de movimiento sísmicos y sus códigos de identificación en el programa HAZ45.2.....	54
Tabla 14 Características geométricas y sísmicas de la falla Naranjal.....	55
Tabla 15 Coordenadas falla Naranjal	55
Tabla 16 Coordenadas de sitio de estudio considerado para implementación de PSHA en programa HAZ45.2.....	58

Tabla 17 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas (1) en HAZ45.2.....	60
Tabla 18 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas (2) en HAZ45.2.....	60
Tabla 19 Tasa anual de excedencia y períodos de retorno para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas en HAZ45.2	61
Tabla 20 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento del sistema de fallas Girón en HAZ45.2 considerando distintos modelos de ruptura	66
Tabla 21 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento del sistema de fallas Colonche en HAZ45.2 considerando distintos modelos de ruptura	66
Tabla 22 Tasa anual de excedencia total para las fuentes sísmicas corticales segmentadas obtenidas a través del modelamiento de las fuentes en HAZ45.2	67
Tabla 23 Tasa anual de excedencia y período de retorno para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de las zonas de subducción Norte, Central y Sur en HAZ45.2	69
Tabla 24 Resumen de tasas anuales de excedencia para cada intensidad evaluada de todas las fuentes sísmicas implementadas en el programa HAZ45.2	71
Tabla 25 Tasa de anual de excedencia y período de retorno total obtenidas a través del modelamiento de fuentes corticales y de subducción y su respectiva implementación en el programa HAZ45.2	72

Tabla 26 Niveles de amenaza sísmica en función del período de retornos especificados en NEC-15	74
Tabla 27 PGAs esperados para cada nivel de amenaza sísmica encontradas a través del modelamiento e implementación en HAZ45.2 de fuentes corticales y de subducción para el sitio de estudio evaluado.....	76

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Curvas de Peligro individuales para fuentes seleccionadas	31
Gráfica 2 Curvas de peligro sísmico individual y total obtenidas a partir del modelamiento de fuentes sísmicas corticales no segmentadas en HAZ45.2.....	62
Gráfica 3 Curvas de peligro sísmico para cada una de los modelos de predicción de movimiento sísmico considerados junto con la curva de peligro sísmico total.....	63
Gráfica 4 Curvas de peligro sísmico en términos de período de retorno para cada una de los modelos de predicción de movimiento sísmico considerados junto con la curva de peligro sísmico total.....	64
Gráfica 5 Curvas de peligro sísmico total e individuales obtenidas a partir del modelamiento de los sistemas de fallas Girón y Colonche en HAZ45.2	68
Gráfica 6 Curvas de peligro sísmico individual y total obtenidas a partir del modelamiento de zonas de subducción en HAZ45.2	70
Gráfica 7 Curvas de peligro sísmico total obtenida a partir del modelamiento de fuentes corticales y de subducción y su respectiva implementación en el programa HAZ45.2 .	73
Gráfica 8 Curva de peligro sísmico en términos de período de retorno para el sitio de estudio elegido con los respectivos niveles amenaza sísmica detallados en NEC-15..	75

RESUMEN

Los sismos son el fenómeno natural de mayor importancia para la práctica de la ingeniería civil debido a su alto poder destructivo y su incidencia directa en los proyectos de infraestructura. Ecuador se encuentra dentro de la zona conocida como “anillo de fuego del Pacífico” por lo que es un país en donde se vuelve primordial estudiar y aproximar los niveles de peligro sísmico a los que los proyectos de ingeniería podrían estar expuestos en su vida útil, para este efecto el análisis probabilístico de peligro sísmico se ha vuelto la principal herramienta para evaluar los niveles de intensidad esperados en una zona en función de la actividad de las fuentes sísmicas circundantes. El programa HAZ45.2 desarrollado por el Dr. Normam Abrahamson es un software de libre acceso que permite modelar las fuentes sísmicas con sus respectivas características geométricas y sísmicas para implementar análisis probabilístico de peligro sísmico en un sitio cualquiera, este programa aparte de tener la ventaja de ser de libre acceso también ha sido validado con respecto a otros softwares comerciales del mercado que tienen considerables montos de adquisición. Es intención del presente trabajo de titulación continuar con lo hecho por Eduardo Mora y modelar distintas fuentes sísmicas relevantes en la zona del Litoral ecuatoriano para poder generar resultados de peligro sísmico cada vez más aproximados para esta zona del país y adicionalmente generar resultados de peligro sísmico para la Facultad de Ingeniería de la UCSG en función de las fuentes modeladas.

Palabras Claves: Modelo Sísmico, HAZ 45.2, Caracterización de fuentes sísmicas corticales y de subducción, Peligro sísmico Facultad de ingeniería UCSG, Coordenadas de fuentes sísmicas, Período de retorno.

ABSTRACT

Earthquakes are the most important natural phenomenon for the practice of civil engineering due to their high destructive power and their direct impact on infrastructure projects. Ecuador is located within the area known as the "ring of fire of the Pacific" so it is a country where it becomes essential to study and approximate the levels of seismic hazard to which engineering projects could be exposed in their useful life, For this purpose, the probabilistic seismic hazard analysis has become the main tool for assessing the intensity levels expected in an area based on the activity of the surrounding seismic sources. The program HAZ45.2 developed by Dr. Normam Abrahamson is an open access software that allows you to model the seismic sources with their respective geometrical and seismic characteristics to implement probabilistic analysis of seismic hazard in any site, this program apart from having the advantage of being freely available, it has also been validated with respect to other commercial software of the market that have considerable amounts of acquisition. It is the intention of the present title work to continue with what was done by Eduardo Mora and to model different relevant seismic sources in the Ecuadorian Litoral zone in order to generate seismic hazard results more and more approximate for this area of the country and additionally generate seismic hazard results for the Faculty of Engineering of the UCSG based on the modeled sources.

Key words: Seismic model, HAZ 45.2, Characterization of crustal sources and subduction sources, Seismic hazard UCSG Engineering Faculty, Coordinates of seismic sources, Return

1 CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN

Los sismos son, tal vez, el fenómeno natural de mayor importancia para la ingeniería civil, su poder es capaz de destruir edificaciones, dejar inutilizables carreteras, hacer que el suelo de cimentación pierda su resistencia de manera súbita y de dejar saldo de destrucción y pérdidas humanas a su paso, por esto es necesario conocer, comprender y caracterizar los posibles eventos sísmicos que pueden afectar un sitio, para poder de esta manera tomar medidas que minimicen o controlen los efectos producidos por los movimientos sísmicos en las obras de ingeniería.

Esta necesidad de los ingenieros de conocer los niveles de amenaza sísmica al que está expuesto un sitio determinado ha llevado al desarrollo de varias metodologías para poder determinar estos peligros asociados a la actividad sísmica de las fallas geológicas circundantes. El análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA) se ha convertido en la principal metodología para la identificación de estos niveles de amenaza, ya que toma en cuenta todas las fallas que podrían ser productoras de eventos sísmicos, y conjuga variables como: magnitud de sismo, distancia del origen de la ruptura de la falla al sitio, modelos de predicción de movimiento sísmico, entre otros parámetros, para entregarnos la probabilidad de que un movimiento sísmico sea igualado o excedido en un período de tiempo, esta es la definición de peligro sísmico en el PSHA.

Un análisis probabilístico de peligro sísmico se vuelve muy extenso y complejo, ya que como se mencionó antes, conjuga muchas variables de cada fuente sísmica y las combina entre sí para poder generar un resultado, por lo que el desarrollo de softwares especializados ha hecho aplicable este proceso para la práctica común de la ingeniería civil. Por lo tanto, para el desarrollo del presente trabajo se usará el programa HAZ 45.2 que se encuentra de manera gratuita y que ha sido verificado por ensayos de validación PEER.

En el Ecuador ya se ha realizado un trabajo de modelación de fuentes sísmicas, desarrollado por el Ing. Eduardo Mora (2018) denominado *“Implementación de fuentes sísmicas del Ecuador en programa HAZ 45.2”*, es intención del autor del presente trabajo

de titulación continuar con lo hecho por el Ing. Mora e ingresar más fuentes sísmicas del Ecuador al archivo ya existente para poder generar resultados más completos y que abarquen mayor territorio nacional.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Obtener curvas de peligro sísmico para cualquier punto de la región Costa del Ecuador implementando programa HAZ 45.2.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar, caracterizar y modelar las diferentes fallas conocidas en la región Costa en el Ecuador.
- Ingresar las características de cada falla en el programa HAZ 45.2.
- Implementar en HAZ 45.2 fuentes sísmicas para fallas de subducción, corticales y zonales.
- Revisión de literatura para adoptar parámetros de caracterización de las fuentes sísmicas.
- Presentar resultados de peligro sísmico para un sitio en Guayaquil.

1.2 Alcance

Este trabajo de titulación presenta la caracterización, modelación e implementación de las principales fallas corticales de la zona costera del centro y sur del país, así como la zona de subducción que se encuentra frente a la costa ecuatoriana.

1.3 Metodología

La metodología aplicada para encontrar los resultados anexados en este trabajo de titulación fue, primero, la caracterización de las fuentes sísmicas que se añadieron a la base de datos del modelo sísmico ya existente lo que implicó: considerar sus características geométricas y físicas de las fuentes, así como la generación de parámetros estadísticos requeridos para poder aplicar el análisis probabilístico de peligro sísmico.

Luego se recurrió al programa HAZ 45.2 para ingresar el modelo de las fuentes consideradas, para que este pueda generar las curvas de peligro sísmico para un sitio determinado en función de ubicación su relativa a cada fuente que el programa está considerando.

2 CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Análisis de peligro Sísmico

Un análisis de peligro sísmico es la evaluación de los posibles escenarios sísmicos que pudieran afectar a un sitio en particular, además busca caracterizar estos eventos con un parámetro de intensidad de movimiento del terreno que sea cuantificable y medible.

La descripción cuantitativa del movimiento del terreno puede ser en términos de valores escalares como aceleración, velocidad, desplazamiento pico o puede ser en términos de historia tiempo de velocidad, aceleración o desplazamiento. (Abrahamson, 2013)

Estas aproximaciones podrían hacerse tomando en cuenta los registros de anteriores sismos que hayan ocurrido y que sean provenientes de la fuente sísmicas circundantes, para poder así estimar las características del sismo esperado, pero como difícilmente se encuentra información completa y con alto nivel de credibilidad, o en ocasiones a la falta absoluta de información, se recurre a escoger valores tomando en cuenta parámetros de otras zonas de interés que si hayan sido debidamente estudiadas y que presenten similitud con nuestro caso de estudio.

Existen 2 metodologías que aproximan este nivel de peligro inherente en un sitio, el primero es el análisis determinístico de peligro sísmico (DSHA), en donde se asigna una ubicación, una magnitud y se utiliza una ley de atenuación para poder calcular el nivel de intensidad en el sitio, caracterizada por un parámetro específico, que se puede esperar bajo un sismo de las características propuestas.

No es intención del presente trabajo ahondar mucho en el desarrollo del DSHA, pero se lo describe de manera sintetizada ya que el análisis probabilístico de peligro sísmico es compuesto por procesos similares a los hechos en el DSHA.

2.1.1 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico

Como se mencionó anteriormente el DSHA, toma como punto de partida un evento único por cada fuente, con magnitud y distancia al sitio “fijas”, he aquí la diferencia con el PSHA. La incertidumbre acerca de en qué parte de la fuente se producirá la ruptura, que magnitud producirá y que tan bien el modelo de predicción de movimiento sísmico predice la intensidad del movimiento esperado en el sitio de estudio (caracterizada por las desviaciones estándar que son tomadas en cuenta, típicamente 1 por sobre y debajo de la media en el DSHA), llevo a los ingenieros a desarrollar una metodología alternativa que conjuge todas las posibles combinaciones de magnitud, distancia y tome en cuenta varios valores de desviaciones estándar, para entregar un resultado que cubra de alguna manera las incertidumbres inherentes.

“En la aproximación probabilística, todos los escenarios determinísticos posibles y relevantes (todas las posibles combinación de magnitudes y ubicaciones), son considerados así como todos los niveles probables de intensidad de movimiento (un rango de desviaciones estándar sobre y bajo la media).” (Krammer, 1996)

La formulación matemática que conjuga estas 3 variables se puede resumir en la siguiente forma:

$$v(Sa > z) = N_i(M_{min}) \int_{r=0}^{\infty} \int_{M_{min}}^{M_{max}} f_{mi}(M) f_r(r) P(Sa > z|M, r) dr dM$$

En donde:

$v(Sa > z)$: Es la tasa anual en la que un parámetro de intensidad de movimiento Sa supera el nivel z en el sitio, también llamada tasa anual de excedencia.

$N_i(M_{min})$: Tasa de actividad anual de sismos iguales o mayores a Mmin.

$f_{mi}(M)$: Función de densidad probabilística de magnitudes.

$f_r(r)$: Función de densidad probabilística de distancia de ruptura hasta el sitio.

$P(Sa > z|M, r)$: Es la condición probabilística de observar un parámetro de movimiento Sa que exceda z dado una magnitud y una distancia.

A simple vista el número de desviaciones estándar no lucen, como si lo hace la magnitud y la distancia, he aquí unos de principales desconocimientos del PSHA, ya que esta se encuentra implícita en la condición de probabilidad de la siguiente manera:

$$P(Sa > z|M, r) = \int_z^{\infty} f_{Sa}(Sa, M, r) dSa$$

En donde $f_{Sa}(Sa, M, r)$ es la función de densidad probabilística de la intensidad de movimiento del terreno definida por el modelo de predicción del movimiento (GMPE). Generalmente este modelo de predicción da la intensidad de movimiento muestra el valor medio y sigue una distribución lognormal. Por lo que se podría re escribir la ecuación anterior como:

$$P(Sa > z|M, r) = \int_{\varepsilon^*(M, r, z)}^{\infty} f_{\varepsilon}(\varepsilon) d\varepsilon$$

Así que el uso de esta metodología puede abarcar mayores escenarios posibles, y entregarnos resultados más completos, sin desmerecer al DSHA, ya que el PSHA es ahora posible gracias a las grandes capacidades de procesamiento de las computadoras actuales, debido a que esta metodología podría generar millones de escenarios determinísticos haciéndolo muy poco práctico en la actividad profesional sin las computadoras con las que se cuenta actualmente.

Se puede describir a la metodología PSHA en cuatro grandes pasos (Reiter, 1990):

1.- Identificación y caracterización de las fuentes relevantes de sismos próximas al sitio, aquí se deben generar parámetros geométricos, geológicos, estadísticos, entre otros, que servirán como base del análisis. Por ejemplo, si la fuente es una falla, geoméricamente estará caracterizada por su longitud y su ancho, así como su ángulo de inmersión, de los parámetros geológicos podríamos definir si la falla es normal, inversa, oblicua, etc., y de parámetros estadísticos podríamos citar a la distribución de magnitudes generadas en la falla y a la distribución de distancias al sitio.

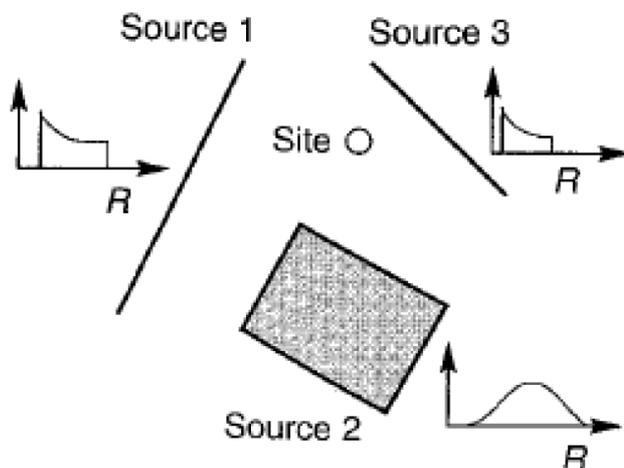


Figura 1 Caracterización de fuentes

Fuente: (Krammer, 1996)

Como se ve en la ilustración para el sitio, se han tomado en cuenta 3 fuentes sísmicas, la 1 y la 3 son fuentes de falla y la 2 es una fuente de área, luego se describirán más detalladamente las características de cada una de los tipos de fuentes, a lado de cada fuente está graficada la distribución de la distancia de los sismos al sitio, como se nota es una distribución uniforme, es decir, el evento tiene la misma probabilidad de ocurrir en cualquier punto dentro de la zona de la fuente.

2.- El segundo paso es la caracterización de la sismicidad de la fuente. Usando modelos de distribuciones de magnitudes, y estimando la tasa de actividad de la fuente para cada magnitud considerada, se puede llegar la magnitud de recurrencia, que se podría definir como la tasa anual con la que un evento de magnitud M es igualado o superado.

3. Luego de haber determinado la tasa anual con la que una magnitud M es igualada o superada en la fuente se debe evaluar la severidad del movimiento del suelo en el sitio de estudio producido para cada evento que tiene una magnitud M y una distancia al sitio R , para esto es necesario el uso de modelos predicción de movimiento del suelo (GME). Estos modelos relacionan la magnitud, la distancia y otros parámetros propios de la

fuelle y del sitio mismo para encontrar la intensidad de movimiento del suelo con la que el sitio de estudio se vería afectado, esta intensidad puede ser descrito con distintos parámetros como el PGA (aceleración pico en roca, por sus siglas en inglés), desplazamiento horizontal del terreno, magnitudes de intensidad en escala Mercalli modificada, etc., evidentemente para cada uno de estos parámetros la ecuación de predicción de movimiento será diferente.

Debe decirse que existe mucha incertidumbre en este paso, ya que generalmente se escogen modelos empíricos que han sido desarrollados para sitios específicos o con datos de diferentes partes del mundo con modelos globales, que si bien pueden guardar muchas semejanzas con el caso de estudio propio esto no nos garantiza que la ecuación prediga con alto grado de confianza la intensidad esperada en nuestro sitio y tampoco es posible saber en qué grado de error se está incurriendo. Observaciones han demostrado que la intensidad del movimiento sigue una distribución lognormal y que la ecuación de predicción de movimiento nos muestra la intensidad de movimiento media y la desviación estándar en unidades logarítmicas. (Krammer, 1996).



Figura 2 Ecuación de predicción de intensidad sísmica

Fuente: (Krammer, 1996)

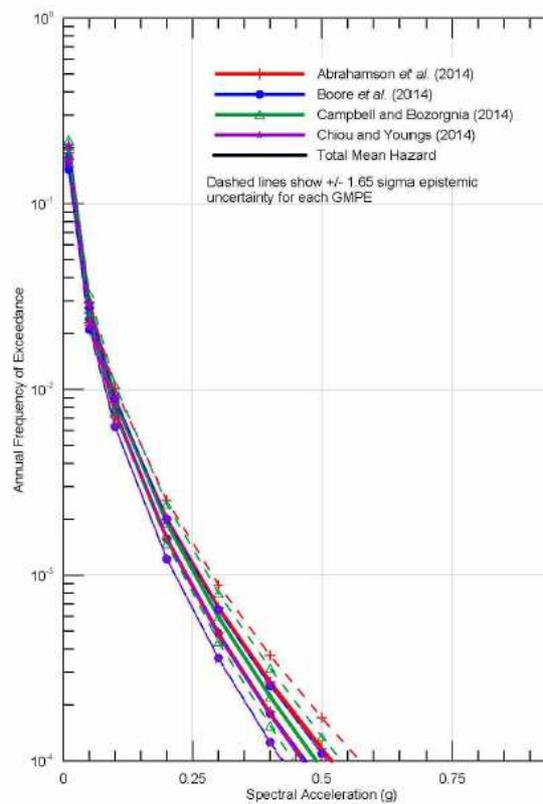


Figura 3 Sensibilidad en resultados de la aceleración espectral Horizontal para distintas leyes de atenuación

Fuente: (Geosísmica, 2017)

4. Como último paso todas las incertidumbres y variables inherentes son combinadas para obtener la probabilidad existe de que una intensidad “y” sea igualada o superada en un período de tiempo, esto es llamado probabilidad de excedencia, es necesario decir que el inverso de la probabilidad de excedencia es el período de retorno de la intensidad evaluada.

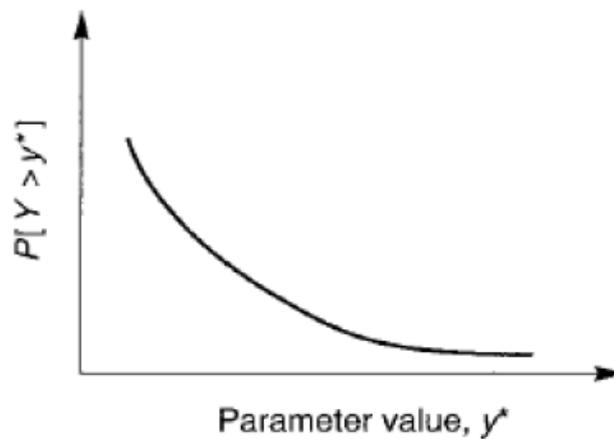


Figura 4 Probabilidad de excedencia de la intensidad sísmica "y"

Fuente: (Krammer, 1996)

A continuación se detallará un poco lo comprendido en estos cuatro pasos descritos anteriormente para poder dar una mejor idea del proceso que se lleva a cabo para poder generar los parámetros necesarios que requiere un PSHA.

2.2 Caracterización de fuentes sísmicas para PSHA

La caracterización de la fuente es definir básicamente la geometría de la fuente y la sismicidad de la misma. Solo una vez que hayan sido identificados estos dos grupos de parámetros es posible generar un conjunto de posibles escenarios con su respectiva magnitud, dimensión de ruptura y ubicación con respecto al sitio de estudio, y calcular la tasa con la que este evento ocurre. (Krammer, 1996)

Por lo que este paso se vuelve esencialmente importante para el desarrollo entero del PSHA, se debe identificar las fuentes sísmicas relevantes, este punto es relativamente sencillo, luego viene la definición de los parámetros que caracterizan la tasa de actividad de la fuente, he aquí un punto de gran incertidumbre, ya que, muchos de estos parámetros para ser definidos de manera confiable deberían ser resultado de una evaluación de lo que ha estado sucediendo con la fuente a través de la historia, o basarnos en algún estudio particular que nos entregue información de cómo la fuente se está comportando. En el país no existe mucha bibliografía sobre este tema, por lo que adoptar valores que concuerden con fuentes que sí hayan sido caracterizadas y que guarden similitud con la fuente de estudio propia se vuelve casi que la única opción.

Entre 1970 y 1990 la caracterización de fuentes sísmicas estaba típicamente basada en los datos sismicidad histórica usando áreas fuentes o sismogénicas, en algunas partes del mundo sigue siendo un estándar de práctica. (Abrahamson, 2013)

2.2.1 Modelación geométrica de las fuentes sísmicas

2.2.1.1 Fuentes de área y fuentes tipo falla

Las fuentes de área son básicamente un volumen, que se dispone en zonas donde se quiere caracterizar la sismicidad pero no se tiene información de una falla en particular o se desconoce la existencia de fallas. Existen casos prácticos en donde se incluyen fuentes de área cuando se quiere modelar también algún sismo que pueda ocurrir fuera de una falla o sistema de fallas.

Por otro lado, un sistema de fallas es modelado básicamente como una fuente de varias líneas, generalmente la ruptura se produce en el plano de falla. Usualmente la ruptura está distribuida uniformemente a lo largo de la falla. Este tipo de fuentes están caracterizadas por su longitud y ancho, estas propiedades geométricas también serán de gran importancia para calcular propiedades de la sismicidad de la fuente como se discutirá más adelante.

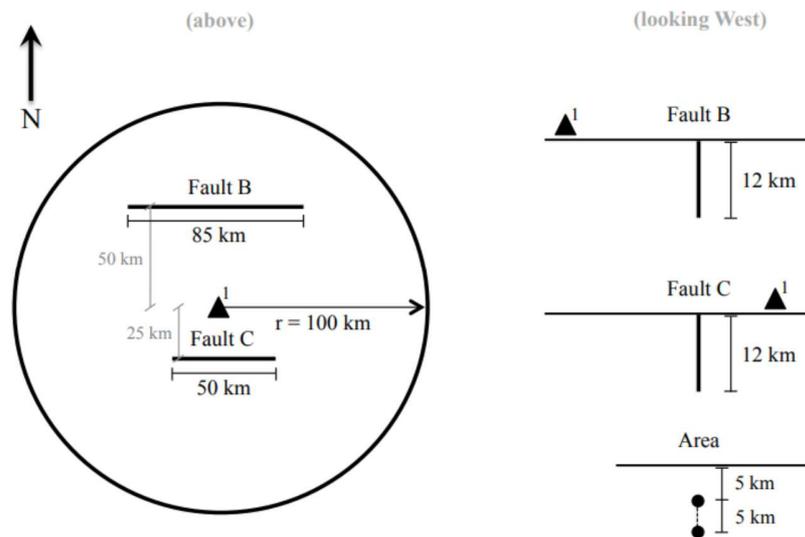


Figura 5 Tipos de fuentes sísmicas alrededor de un sitio

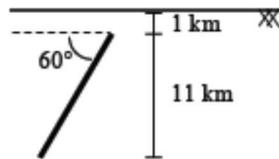
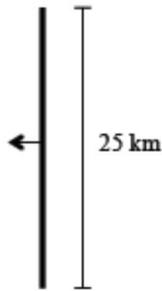
Fuente: (Hale, 2017)

En la Figura 5 se muestran tres fuentes sísmicas que han sido consideradas para un PSHA alrededor de un sitio 1, las fuentes B y C son fuentes de tipo falla, se observa la longitud de cada una y su ancho. La fuente de área también es modelada, esta se ha considerado como una circunferencia de radio 100 km, su ancho es de 5 km y ha sido colocada 5 km debajo de la superficie.

2.2.1.2 Ángulo de inmersión de fallas

El ángulo de inmersión para una falla dada es el ángulo que forma el plano de falla con respecto a la horizontal.

FAULT 2



Fault Type: Reverse
Dip: 60 degrees west
Fault Plane Depths: 1 – 12 km

Figura 6 Vista en corte de falla inversa con ángulo de inmersión 60°

Fuente: (Hale, 2017)

2.2.2 Caracterización de la sismicidad de la fuente

2.2.2.1 Momento de un terremoto y magnitud de momento (M_w)

Es la medida del tamaño del terremoto relacionado con la liberación de fuerzas en el área de la falla, normalmente es expresado en dinas-cm o N-m. El momento sísmico M_o es definido por la ecuación:

$$M_o = \mu AD$$

En donde μ es el módulo de corte de la falla, A es el área de ruptura y D es el desplazamiento medio de la superficie de ruptura en centímetros.

La magnitud de momento (M_w) fue definida por Hanks y Kanamor (1979) y fue un importante avance en la sismología, ya que a diferencia de la magnitud Richter esta

relacionaba la magnitud del sismo con las propiedades sísmicas del mismo. La magnitud momento de un terremoto es definida por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{2}{3} \log_{10}(M_o) - 10.7$$

Como se ve existe una relación entre la magnitud del sismo con el área de la ruptura, generalmente si el esfuerzo liberado estático es constante, la magnitud estará dada por el logaritmo del área de ruptura con una pendiente de 1.0 más un valor constante, esta ecuación es:

$$M = \log(A) + b$$

Donde b es una constante que depende del esfuerzo medio liberado. Para sismos individuales existirá una variabilidad aleatoria sobre la magnitud media mostrada por la ecuación.

Evaluaciones empíricas de datos históricos han encontrado que la escala de esfuerzo medio es consistente con lo observado, la relación magnitud-área de Wells y Coppersmith (1994) para todo tipo de fallas es:

$$M = 0.98 \log(A) + 4.07$$

Esta relación presenta una desviación estándar de 0.24 unidades de magnitud. La pendiente 0.98 puede ser aproximada a 1.0 sin mayor impacto en el resultado final de la ecuación.

Otras relaciones de magnitud-área han sido propuestas a lo largo del tiempo, a continuación se muestra relaciones magnitud-área para fallas corticales.

Tabla 1 Relaciones magnitud-área para fallas corticales

	Mean Magnitude	Standard Deviation
Wells and Coppersmith (1994) all fault types	$M = 0.98 \text{ Log}(A) + 4.07$	$\sigma_m=0.24$
Wells and Coppersmith (1994) strike-slip	$M = 1.02 \text{ Log}(A) + 3.98$	$\sigma_m=0.23$
Wells and Coppersmith (1994) reverse	$M = 0.90 \text{ Log}(A) + 4.33$	$\sigma_m=0.25$
Ellsworth (2001) strike-slip for $A > 500 \text{ km}^2$	$M = \log(A) + 4.1$ (lower range: 2.5 th percentile) $M = \log(A) + 4.2$ (best estimate) $M = \log(A) + 4.3$ (upper range: 97.5 th percentile)	$\sigma_m=0.12$
Hanks and Bakun (2001) strike-slip	$M = \log(A) + 3.98$ for $A < 468 \text{ km}^2$ $M = 4/3 \text{ Log}(A) + 3.09$ for $A > 468 \text{ km}^2$	$\sigma_m=0.12$
Somerville et al (1999)	$M = \log(A) + 3.95$	

Fuente: (Krammer, 1996)

Se observa que estas relaciones están muy cerca a:

$$M = \log(A) + 4.00$$

Esta simplificación es muchas veces usada en caso prácticos, aunque para modelos en los que se requiere precisión como en un PSHA no debe ser usada y se debe optar por relaciones más precisas.

2.2.2.2 Máxima Magnitud

La máxima magnitud esperada en una fuente sísmica dependerá si es una fuente de área o una fuente tipo falla y de sus propiedades.

En una fuente de área la magnitud máxima esperada es calculada, casi siempre, basándose en la sismicidad histórica del lugar y adicionándole un valor (generalmente la mitad de una unidad de magnitud) para considerar la variabilidad de este parámetro.

Para fuente de tipo falla la máxima magnitud es calculada en función de las propiedades geométricas de la falla (longitud y área) usando una relación magnitud-área. En los últimos años se ha considerado la segmentación de los sistemas de fallas para

considerar la máxima dimensión de la ruptura, esta segmentación de la falla definirá la “magnitud característica” de este tipo de fuentes. (Krammer, 1996)

2.2.2.3 Análisis de fallas segmentadas

Aquellas fallas que puedan ser consideradas como parte un sistema completo pero que se encuentran separadas por espacios de segmentación, como el sistema Colonche, deben ser modeladas considerando varios escenarios que integren de alguna manera la incertidumbre asociada al modo de falla que se podría presentar.

Para ejemplificar lo antes dicho si se considera un sistema que a su vez es compuesto por dos fallas diferentes, se debe considerar dos posibilidades diferentes, la primera será de que el sistema se comporte como solo una falla y se rompa en toda su longitud, ocasionando una magnitud más grande debido a que el área de ruptura será más grande. El segundo modelo será considerar que las fallas que componen el sistema puedan romperse de manera individual como fuentes separadas. Estos dos modelos alternativos deben ser considerados paralelamente, cada caso debe ser ponderado según un criterio experto.

En su publicación Abrahamson (2013) representa estos modelos alternativos mediante el uso de árboles lógicos, en donde son consideradas todas las posibilidades de rupturas y son ponderadas para obtener una tasa anual de excedencia de un sistema de fallas. A continuación en la Figura 7 se presenta el árbol lógico que esquematiza lo antes dicho para un sistema conformado por el segmento “1” y segmento “2”.

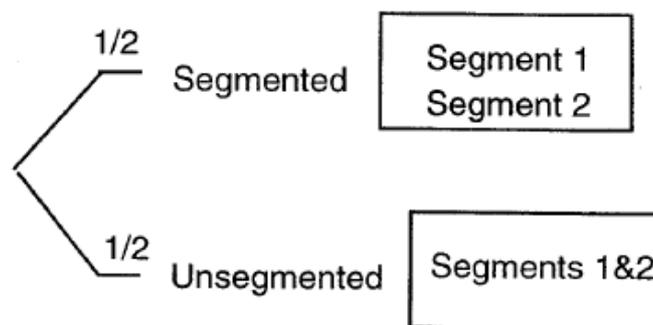


Figura 7 Árbol lógico usado para tomar en cuenta distintos modelos de ruptura posibles en un sistema de fallas

Fuente: (Abrahamson , 2003)

2.2.2.4 Distribución de magnitudes

Una fuente sísmica cualquiera será capaz de generar un rango considerable de magnitudes sísmicas, por lo que, por lo que existe una variabilidad aleatoria en la producción de magnitudes de una falla.

Para modelar esto son usadas las funciones de densidad probabilística (pdf), también llamadas función de distribución de magnitudes, la misma que para el PSHA se denota $f_m(m)$, esta función describe el número relativo de sismos de pequeña, moderada y gran intensidad que ocurren en una fuente. (Abrahamson, 2013)

Se han usado típicamente dos tipos de distribuciones de magnitudes para los análisis de peligro sísmicos, el modelo exponencial truncado y el modelo de magnitud característica.

2.2.2.4.1 Modelo exponencial truncado (TE)

Este modelo ha sido desarrollado en función de la ley de magnitud de recurrencia Gutenberg-Ritcher. Esta conocida ley se denota de la siguiente manera:

$$\log N_{(M)} = a - bM$$

En donde $N_{(M)}$ es el número acumulado de sismos que superan la magnitud M , el valor a es el logaritmo del número de magnitudes que superan la magnitud 0 y el valor b es una pendiente semilogarítmica de la gráfica.

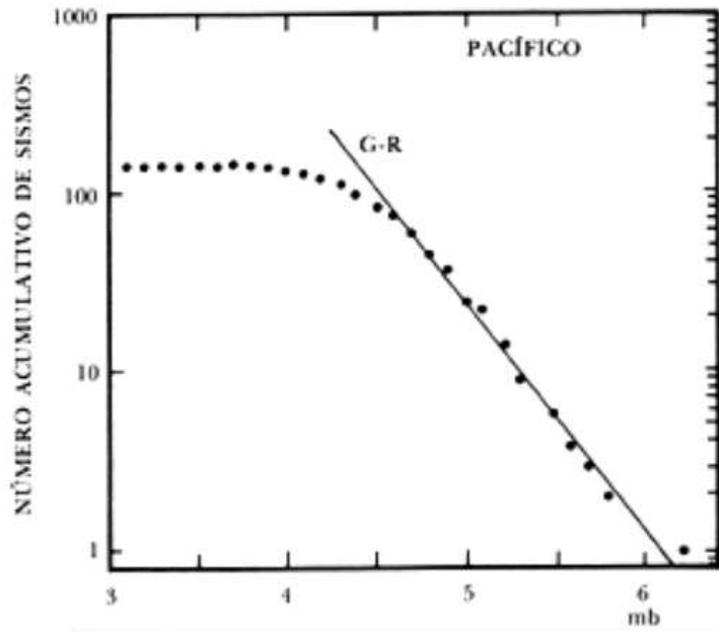


Figura 8 Ley Gutenberg-Richter para área fuente del Pacífico

Fuente: (Argudo, 2001)

Usando la ley de Gutenberg-Richter se puede llegar a una función de distribución de magnitudes, ya que esta distribución es un modelo exponencial truncado en M_{min} y $M_{máx}$, por lo que la magnitud pdf es dada por:

$$f_m^{TE}(m) = \frac{\beta \exp(-\beta(m - M_{min}))}{1 - \exp(-\beta(M_{max} - M_{min}))}$$

En donde β es aproximadamente 2.30 veces el valor b de la ley de Gutenberg-Richter.

Este modelo generalmente funciona bastante bien para grandes regiones fuentes, pero en la mayoría de los casos no lo hace para las fuentes de falla (Young y Coppersmith, 1985).

2.2.2.4.2 Modelo de magnitud característica

Mientras las tasas de recurrencia en áreas fuentes de grandes proporciones se asemejan a un comportamiento exponencial, fuentes individuales tienden a liberar energía en sismos de una magnitud preferida, que va de acuerdo con la geometría de la fuente.

Esto llevó al desarrollo de un nuevo modelo para la distribución de magnitudes conocido con el nombre de modelo de sismo característico.

Este modelo considera que la fuente libera toda su energía en sismos característicos, también llamada “máxima magnitud”, este modelo no admite que en la fuente se generen sismos de magnitudes moderadas. (Krammer, 1996)

Realmente este sismo característico no posee un valor único de magnitud ya que las relaciones magnitud-área posee una variabilidad aleatoria que puede ser representada por su desviación estándar, por lo que esta distribución es generalmente truncada en $nsig_{max}$ desviaciones estándar. La función de distribución de magnitudes para este modelo es definida como:

$$f_m^{TN} = \left\langle \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} * \frac{1}{\Phi nsig_{max}} \exp\left(-\frac{(M - M_{car})^2}{2\sigma_m^2}\right) \right\rangle \quad \text{para } \left| \frac{M - M_{car}}{\sigma_m} \right| < nsig_{max}$$

$$f_m^{TN} = 0 \text{ para otros casos}$$

2.2.2.4.3 Modelos compuestos

Ya que los modelos de magnitud característica no incorporan sismos pequeños y moderados y los modelos exponenciales truncados no describen bien la distribución para fuente tipo falla se han propuesto modelos que incorporen de alguna manera ambos modelos, estos han sido llamados modelos característicos.

El usado como base para el presente trabajo de titulación ser el modelo de Young y Coppersmith (1985), que se compone de una distribución uniforme en grandes magnitudes y una rama exponencial para pequeñas magnitudes. Este modelo compuesto viene definido como:

$$f_m^{YC}(m) = \frac{1}{1 + c_2} * \frac{\beta \exp(-\beta(M_{car} - M_{min} - 1.25))}{1 - \exp(-\beta(M_{car} - M_{min} - 0.25))} \quad M_{car} - 0.25 < M \leq M_{car} + 0.25$$

$$f_m^{YC}(m) = \frac{1}{1 + c_2} * \frac{\beta \exp(-\beta(M - M_{min}))}{1 - \exp(-\beta(M_{car} - M_{min} - 0.25))} \quad M_{min} < M \leq M_{car} - 0.25$$

En donde c_2 viene dado por la siguiente ecuación:

$$c_2 = \frac{0.5\beta \exp(-\beta(M_{car} - M_{min} - 1.25))}{1 - \exp(-\beta(M_{car} - M_{min} - 0.25))}$$

A continuación en la Figura 9 se muestra una comparación tanto del modelo exponencial truncado, de magnitud característica y de Young y Coppersmith.

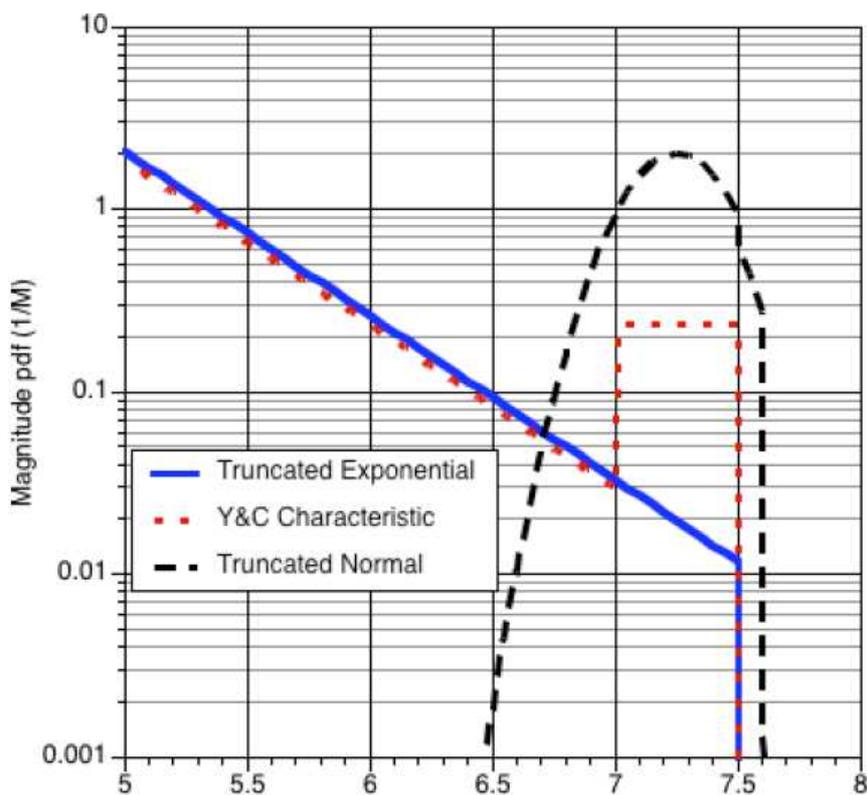


Figura 9 Comparación de las diferentes magnitudes pdfs usadas en PSHA

Fuente: (Krammer, 1996)

Como se ve en la figura 8, el modelo exponencial truncado subestima la magnitud pdf para grandes magnitudes, mientras que un modelo característico junta las propiedades de los modelos de magnitud característica y exponencial truncado. En lo que concierne a este trabajo de titulación se ha escogido el modelo característico, usando valores b para cada tipo de ambiente tectónico y magnitudes características en función de la geometría de la fuente (largo y ancho).

2.2.2.5 Tasa de actividad en función de la tasa de deslizamiento medio

La tasa de actividad sísmica puede ser calculada a través de la tasa de deslizamiento medio de la fuente si se iguala el momento sísmico acumulado al momento sísmico liberado en terremotos de una magnitud M .

Como ya se discutió anteriormente el momento sísmico acumulado en una fuente viene dado por:

$$M_o = \mu AD$$

Si a esta ecuación la ponemos en términos de su tasa de deslizamiento anual en cm/año, obtendremos evidentemente el momento acumulado en un año. La tasa de deslizamiento anual es denotada como S , por lo que:

$$M_o = \mu AS$$

Por otro lado el momento sísmico liberado durante un terremoto de magnitud M es dado por la ecuación:

$$\log M_o = 1.5M + 16.05$$

El momento sísmico liberado para una magnitud específica puede ser escrito entonces como:

$$\frac{M_o}{eqk} = 10^{1.5M + 16.05}$$

Por lo tanto la tasa relativa de terremotos, N , es la relación de la tasa anual acumulación de momento y el momento liberado en cada terremoto.

$$N = \frac{\mu AS}{\left(\frac{M_o}{eqk}\right)}$$

Aplicando este concepto a las magnitudes pdf, la tasa de sismos sobre una magnitud específica. $N(M_{min})$, es dada por la relación de la tasa de acumulación de momento sísmico sobre el momento medio liberado por terremoto con magnitud mayor a M_{min} , que viene dado por la siguiente ecuación:

$$\text{medio}\left(\frac{M_o}{eqk}\right) = \int_{M_{min}}^{M_{max}} 10^{1.5M+16.05} f_m(M) dM$$

Entonces la tasa de actividad es dada por:

$$N_{min} = \frac{\mu AS}{\text{medio}\left(\frac{M_o}{eqk}\right)}$$

2.2.2.6 Relación de magnitud de recurrencia

Aquí es donde se junta tanto la distribución de magnitudes con la tasa de actividad sísmica de la fuente. La magnitud de recurrencia se puede definir como la tasa con la cual sismos de magnitud mayor a M ocurren en una fuente. Esta relación de magnitud de recurrencia se obtiene integrando la función de densidad de magnitudes y multiplicándola por la tasa de actividad de la fuente, a continuación se muestra la expresión matemática que define la relación de magnitud de recurrencia:

$$N(M) = N(M_{min}) \int_{m=M}^{M_{max}} f_m(m) dm$$

En donde $N(M)$ es la magnitud de recurrencia de un sismo de magnitud M .

2.2.2.7 Función de densidad probabilística de distancia de ruptura al sitio

Esta es la parte final de la caracterización de la fuente, la distribución de distancias de ruptura hasta al sitio depende del tipo de fuente sísmica, para una fuente plana es

usada una distribución uniforme, pero también podrían ser usadas distribuciones triangulares o lognormal para las zonas de inmersión de la fuente.

2.2.3. Modelos de predicción de movimiento sísmico

Como se ha discutido anteriormente los modelos de predicción de movimiento sísmico describe el nivel de intensidad sísmica con la que se verá afectada un sitio como función de parámetros del sismo (magnitud), distancia al sitio donde se requiere conocer la intensidad, ambiente tectónico (cortical, subducción), entre otros. (Abrahamson, 2013). Estos modelos son aproximaciones probabilísticas que proveen ecuaciones para las intensidades de movimiento medias y las desviaciones estándar en unidades logarítmicas. Entonces se puede decir que los modelos de predicción de movimiento sísmico agrupan 3 grupos de parámetros, el primero es el grupo de parámetros de fuente (magnitud, ambiente tectónico, tipo de falla, entre otros), el segundo grupo son los parámetros de ruta (distancia al sitio) y el tercer grupo son los parámetros de sitio (tipo de suelo)

Estos modelos también son dependientes de otros parámetros como el tipo de suelo, la regionalización, amortiguamiento, refracción de la onda, tipo de falla, etc., y han sido desarrollados para lugares con amplios registros sísmicos aplicando regresión estadística, por lo que cada modelo propuesto es confiable para el sitio para el cual ha sido desarrollado, pero también es posible usarlos para otras zonas con características sismo-tectónicas similares, pero por su puesto su nivel de confiabilidad baja y se convierte en una incertidumbre el que tan bien funcionan los distintos modelos de predicción al aplicarlos en otra latitud terrestre.

Existen también modelos globales que han sido desarrollados con datos de diferentes partes del mundo, es decir que se han agrupado registros de sismos con características definidas, estas se han compaginado con los parámetros tanto de fuente, ruta y sitio y con las intensidades reportadas para cada sismo en particular en diferentes sitios. Usando esto se desarrollaron varios modelos globales de predicción de movimiento sísmico, que han sido utilizados como base por la mayoría de países para estudios de riesgo sísmico, mientras que otros países como Nueva Zelanda han afinado estos modelos globales para que estos representen de mejor manera lo que estaría

sucediendo en su territorio en particular. Una comparación entre el modelo global desarrollado por Abrahamson y Silva (1997) y el modelo de Nueva Zelanda es mostrada a continuación en la Figura 10.

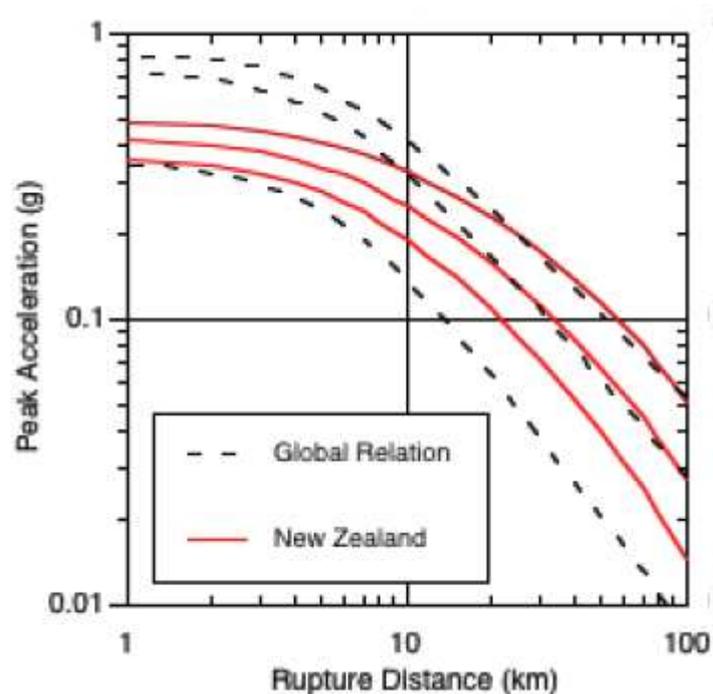


Figura 10 Comparación entre modelo de predicción de aceleraciones pico de Nueva Zelanda con el modelo global de Abrahamson y Silva (1997). Las curvas muestran magnitudes de 5.5, 6.5 y 7.5

Fuente: (Krammer, 1996)

En el presente trabajo de titulación se ha tenido la necesidad de incorporar modelos de predicción desarrollados en otras partes del mundo, con sismicidad y con tipos de suelo (roca) similares al de las costas ecuatorianas, pero se sabe que estos modelos podrían no describir de buena manera la intensidad esperada en el sitio de estudio, por lo que para cada régimen tectónico se ha tomado en cuenta un grupo de modelos y se les ha dado una ponderación para poder obtener un promedio ponderado de las intensidades esperadas.

2.2.4 Manejo de incertidumbre en metodología PSHA

Como ya se ha dicho uno de los principios fundamentales de la metodología PSHA es lidiar con todas las incertidumbres ligadas a la ocurrencia de un evento sísmico para poder entregar la probabilidad de que un evento sea igualado o excedido en un período

de tiempo, ya se ha discutido cómo se comportan las variables: magnitud, distancia al sitio y ecuaciones de predicción, todas estas variables han sido modeladas en base distribuciones estadísticas que han sido largamente estudiadas por lo que las probabilidades asociadas a estas variables puede ser obtenida a través de cada una de sus distribuciones respectivas, pero hasta ahora no se ha lidiado con la poca información existente para las fuente sísmicas.

Ya que generalmente los parámetros usados para caracterizar las fuentes como: ángulo de inmersión, deslizamiento medio anual, entre otros, han sido poco estudiados en el territorio nacional es necesario incluir valores posibles alternativos para cada parámetro de acuerdo a lo expuesto por la metodología.

Como se dijo esto se hace para tomar en cuenta el poco conocimiento de la fuente como tal, ya que para el territorio nacional se han caracterizado las fallas dándole valores estimados a sus parámetros, en algunos casos no existen estudios acerca de ellas, por lo que este factor de incertidumbre hace necesario incluir en aquellas fuentes una serie de valores dándole una ponderación a cada uno según un criterio experto, estos valores deben ser escogidos en base a las observaciones hechas en fallas que guarden similitud tanto tectónica como geométrica, dándosele más peso a aquellos valores que podrían considerarse más cerca del caso real de estudio.

Para cada combinación de los distintos modelos alternativos el peligro debe calcularse dando lugar a una serie de curvas de peligro alternativas las cuales deberán ser promediadas según su ponderación. Es común en la metodología PSHA aplicar árboles lógicos para manejar esta incertidumbre epistémica. (Krammer, 1996)

Esta metodología también se puede aplicar para los modelos de predicción de movimiento, se ha tomado en cuenta una gama de ecuaciones y se las ha ponderado de acuerdo a que tan aplicable sea esta ecuación para el caso de estudio.

2.3 Fuentes sísmicas de la costa de Ecuador

Para poder desarrollar este trabajo de grado se debió buscar bibliografía sobre las distintas fuentes sísmicas que serían de interés al momento de hacer un PSHA. Las fuentes sísmicas ecuatorianas han sido estudiadas con anterioridad por muchos autores

nacionales y extranjeros. Como principal trabajo acerca de este tema tenemos el elaborada por Eguez y otros (2003) denominado "*Base de datos y mapa de fallas y plegamientos del Cuaternario en el Ecuador y su zona costera*", este estudio compila 3 años de investigación geológica de los autores y nos entrega información tanto geométrica como de la sismicidad de las fallas identificadas.

En este estudio pueden ser encontradas características como: longitud de la falla, ángulo de inmersión promedio, sentido del movimiento (tipo de falla), intervalos de recurrencia, tasa de deslizamiento, entre otras, pero también existen otras fallas que no pudieron ser caracterizadas de forma completa y el estudio reconoce el desconocimiento de algunos parámetros de las fallas. A continuación se muestra un mapa con las fallas detalladas por el estudio para la costa de Ecuador, cada falla muestra un código que lo caracteriza en todo el estudio. La Figura 11 muestra el mapa generado en el estudio de Eguez (2003) en donde ubica en el territorio ecuatoriano todas las fallas detalladas en su estudio.

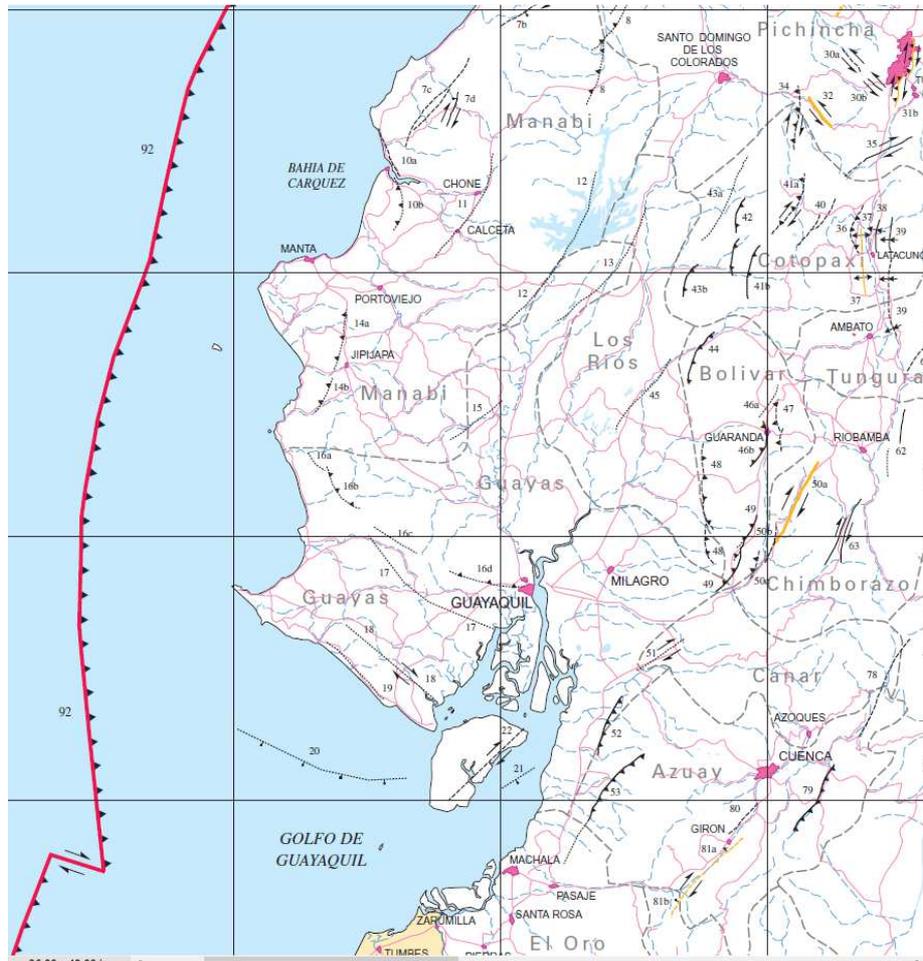


Figura 11 Fallas del territorio costero ecuatoriano

Fuente: (Eguez y otros, 2003)

En vista de que en el citado estudio no existen parámetros sin definir para algunas fallas fue necesario recurrir a otros estudios que provean información un poco más completa acerca de los parámetros físicos y de la sismicidad de las fuentes que se quieren incluir en el presente trabajo de titulación.

La consultora GeoSismica en su estudio *“Site-specific Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Site response analysis for Puerto Bolivar, Machala, Ecuador”*, resume las fuentes y sus parámetros usados para generar el PSHA para la locación de Puerto Bolívar, así también como los criterios usados para manejar los grados de incertidumbre respecto a ciertos aspectos del PSHA. Cabe recalcar que la consultora GeoSísmica se

basa en el estudio realizado por Eguez (2003) para seleccionar las fuentes sísmicas que posteriormente incluyeron en su análisis, pero también fue necesario incluir algunas fallas que se caracterizaron después, como la falla Piqueros, de estudios como el de Dumont (2005) y Yepes (2013).

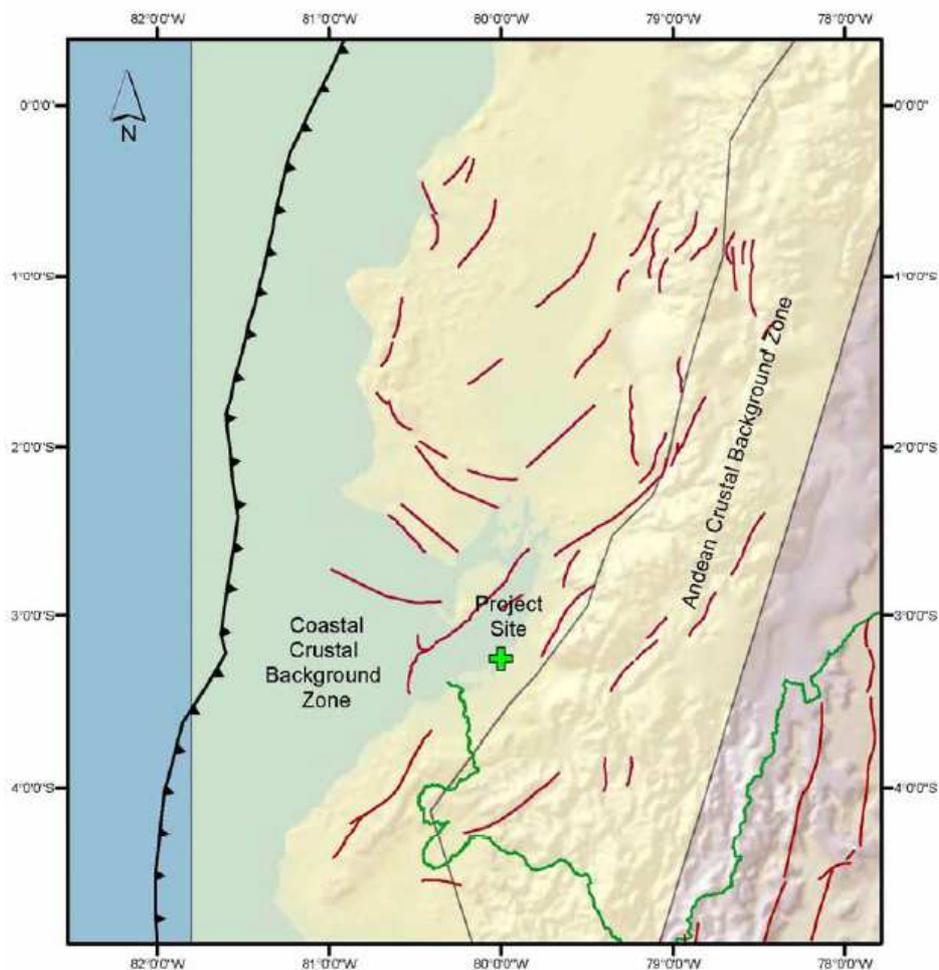


Figura 12 Clasificación de fallas activas según su ambiente tectónico

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

En la Figura 12 se puede apreciar que para el estudio realizado por la consultora GeoSísmica se ha tomado en cuenta tanto fallas corticales como la zona de subducción

de las placas de Nazca y Sudamericana, pero además se ha subdividido a las fallas corticales en 2 agrupaciones que tendrán características sísmicas totalmente diferentes.

El primer conjunto de fallas corticales es la zona Costera que se encuentra más cerca de la zona de subducción y que posee gran cantidad de fallas activas con tamaños importantes y la segunda es la zona Andina conformada por un número más reducido de fallas activas.

2.4 Modelación e implementación de Fuentes sísmicas en HAZ 45.2

En el trabajo que precede a este Mora (2018), modela tres fuentes sísmicas, una por cada régimen tectónico, y obtiene resultados de peligro sísmico usando como herramienta el programa HAZ 45.2. Las fuentes tomadas en cuenta fueron las fallas Guayaquil-Babahoyo y La Toma, mientras que la tercera fue una fuente de área de tipo circular. Los parámetros usados para la implementación de estas fuentes en el programa así como los resultados obtenidos en el citado estudio son presentados a continuación en la Tabla 2, Tabla 3 y Gráfica 1.

Tabla 2 Datos de sismicidad de fuentes seleccionadas

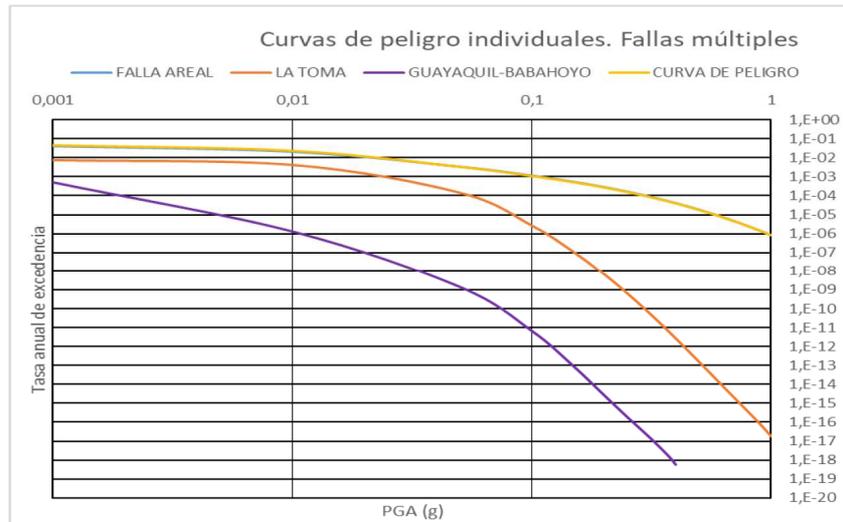
DATOS ECUADOR								
NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FUENTE	INMERSIÓN	TASA DE DESLIZAMIENTO	PROFUNDIDAD	FUNCIÓN MAG-DENSIDAD	MOVIMIENTO DE SUELO	DIMENSIÓN DE RUPTURA
LA TOMA	Ruptura simple mas pequeña que el plano de falla en la falla de inmersión	Falla 1 (Reverse); $b=0.91$	55°	0,88	25	Función delta en M 6.5	Sadigh et al. (1997), rock $\sigma_a=0$	$\text{Log}(A) = M-4$; $\sigma_a=0$ $\text{Log}(W) = 0.5 \cdot M - 2.15$; $\sigma_w=0$ $\text{Log}(L) = 0.5 \cdot M - 1.85$; $\sigma_L=0$
GUAYAQUIL-BABAHOYO	Ruptura individual de todo el plano de falla	Falla 2 (Normal); $b=0.85$;	90°	1,44	23	Función delta en M 7.1	Sadigh et al. (1997), rock $\sigma_a=0$	$\text{Log}(A) = M-4$; $\sigma_a=0$ $\text{Log}(W) = 0.5 \cdot M - 2.15$; $\sigma_w=0$ $\text{Log}(L) = 0.5 \cdot M - 1.85$; $\sigma_L=0$
ÁREA	Fuente de volumen con profundidad de 5 Km a 10 Km	Area 1 $N(M>5)=0.0395$; $b=0.81$	90°	-	6	Exponencial truncado, $M_{\max} = 6.5$ $M_{\min} = 5$	Sadigh et al. (1997), rock $\sigma_a=0$ No truncado	Use ± 0.5 Km de espaciamiento en cuadrícula en los puntos de las fuentes o pequeñas fallas para simular una distribución uniforme

Fuente: (Mora, 2018)

Tabla 3 Coordenadas de Sitio de estudio

Coordenadas del sitio		
Sitio	Latitud	Longitud
1	3.250	80.000

Fuente: (Mora, 2018)



Gráfica 1 Curvas de Peligro individuales para fuentes seleccionadas

Fuente: (Mora, 2018)

Fue necesario revisar lo hecho por Mora en su estudio ya que este presenta las consideraciones hechas por él así como los formatos de archivos de ingreso y de fuente usados para poder usar el programa HAZ 45.2, algo que también se debió implementar en el presente trabajo. En capítulo de Anexos se presentarán las coordenadas usadas para estas fuentes así como los archivos de fuente e ingreso que fueron desarrollados por Mora en su trabajo.

3 CAPÍTULO 3- CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS

En el presente capítulo se procederá a detallar el proceso de modelación de las fuentes sísmicas seleccionadas para realizar el análisis probabilístico de peligro sísmico. Para ello se seguirán los pasos descritos en el capítulo anterior. Primero se realizará la caracterización de las fuentes seleccionadas para el análisis, por lo que se deberán seleccionar y detallar los parámetros geométricos y de la sismicidad de la fuente. Para esto se han dividido las fuentes en 2 grupos, fuentes de fallas corticales y fuentes de la zona de subducción.

Para el modelamiento de las fuentes sísmicas seleccionadas para el desarrollo del presente trabajo de titulación es necesario primero definir las características de interés de cada una de ellas. Los parámetros de interés para cada fuente sísmica variarán según su origen tectónico (subducción o cortical) y los modelos seleccionados para modelar las variables de carácter estadístico como: distribución de magnitudes, distribución de distancias, desviaciones estándar escogidas para cada variable, etc. De manera general se puede decir que los parámetros más importantes para la caracterización de las fuentes sísmicas son:

- Ubicación de la falla en función de coordenadas puntos que pasen por la misma.
- Tipo de falla.
- Longitud aproximada de ruptura.
- Desplazamiento medio anual de la falla.
- Magnitud máxima (M_w).
- Ángulo de inmersión.
- Modelo escogido para la distribución de magnitudes.
- Valor b escogido para modelo de distribución de magnitudes (de ser necesario).

3.1 Caracterización de fallas corticales

Se han escogido 17 fallas corticales de la zona costera del Ecuador para el desarrollo del presente trabajo, para la identificación de las mismas se ha tomado en cuenta lo descrito por Eguez (2003) y Dumont (2005) y GeoSísmica (2017) en sus estudios

respectivos, cabe recalcar que dichos estudios presentan mucho más fallas pero la selección se hizo tomando en cuenta el tamaño de las fallas, ya que evidentemente un mayor tamaño de falla genera mayor peligro sísmico debido a la posibilidad de generar sismos de mayor magnitud.

Las fallas corticales a modelar se han sub dividido en 2 grupos, aquellas que puede considerárselas no segmentadas y las segmentadas. Esta diferenciación se hace de acuerdo al análisis especial que se debe hacer a las fallas segmentadas y que fue discutido en el capítulo 2.2.3 del presente trabajo.

Se seleccionó un grupo de 15 fallas corticales no segmentadas para su modelamiento, estas fueron:

- Falla La toma
- Falla Guayaquil-Babahoyo
- Falla Carrizal
- Falla Chanduy
- Falla La Cruz
- Falla Tarqui
- Falla Naranjal
- Falla Jambelí
- Falla Tenguel
- Falla Ponce Enriquez
- Falla Piqueros
- Falla Célica
- Falla Macará
- Falla Posorja
- Falla Zambapala-Lechuza

Mientras que las fallas segmentadas seleccionadas fueron las siguientes:

- Sistema de fallas Colonche
- Sistema de fallas Girón

caso se presentará la ponderación a lado de cada valor tomado para el parámetro de interés, esta ponderación sumada tiene que ser igual a 1. El programa HAZ 45.2 genera resultados para cada posible combinación de los parámetros seleccionados, pero nos mostrara en la curva de peligro el resultado ponderando cada variable según sea el caso.

En la Tabla 4 se enlistan los parámetros de interés con sus respectivos valores y ponderaciones según sea el caso.

Tabla 4 Parámetros de las fuentes sísmicas corticales no segmentadas

Fallas Corticales No segmentadas								
Nombre	Tipo	Longitud de Ruptura (km)	Ancho (km)	Magnitud máxima (Mw)	Desplazamiento medio anual (mm/año)	Ángulo de inmersión	Modelo para pdf de magnitudes	b
La Toma	Inversa	21.4	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.6	0.2 (0.4) 1 (0.4) 2 (0.2)	30 (0.3) 55 (0.4) 80 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.81
Guayaquil-Babahoyo	Dextral	60	20 (0.3) 23 (0.4) 26 (0.3)	7.1	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	90	Modelo característico (Y&C)	0.85
Carrizal	Dextral	36.5	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.9	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	60 (0.2) 75 (0.3) 90 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Chanduy	Normal (0.5) Dextral (0.5)	35	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.9	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.3) 60 (0.4) 90 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.85
La Cruz	Dextral	48	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	7.0 (0.5) 7.3 (0.5)	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	90	Modelo característico (Y&C)	0.85
Tarqui	Inversa (0.3) Dextral (0.7)	17.8	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.5	0.2 (0.2) 1 (0.5) 2 (0.3)	70 (0.3) 90 (0.4) 30 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.81
Naranjal	Inversa (0.5) Dextral (0.5)	25.9	12 (0.3) 15 (0.4) 18 (0.3)	6.8	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Jambelí	Normal (0.4) Dextral (0.6)	41	12 (0.3) 15 (0.4) 18 (0.3)	7	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Tenguel	Normal	15	12 (0.3) 15 (0.4) 18 (0.3)	6.4	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Ponce Enriquez	Inversa (0.5) Dextral (0.5)	56.9	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	7.1	0.2 (0.3) 1 (0.4) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Piqueros	Normal (0.4) Dextral (0.6)	40	12 (0.3) 15 (0.4) 18 (0.3)	6.9	3 (0.3) 5 (0.4) 10 (0.3)	50 (0.8) 70 (0.2)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Posorja	Normal	75	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	7.2	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Zambapala-Lechuza	Dextral	41.7	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.9	3 (0.3) 5 (0.4) 10 (0.3)	70 (0.3) 90 (0.4) 30 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.85
Célica	Inversa (0.7) Sinistral (0.7)	54	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	7.1	0.2 (0.2) 1 (0.5) 2 (0.3)	30 (0.3) 55 (0.4) 80 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.81
Macará	Inversa	35.3	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	6.9	0.2 (0.2) 1 (0.5) 2 (0.3)	30 (0.3) 55 (0.4) 80 (0.3)	Modelo característico (Y&C)	0.81

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

Otro parámetro de interés es la localización geográfica, este parámetro se presentará de manera puntual para cada falla debido a la complejidad de poner en una sola tabla las coordenadas de cada falla. A continuación se presenta la Tabla 5 en donde se enlista las coordenadas de las fallas corticales no segmentadas seleccionadas necesario para el modelamiento geométrico para implementar la metodología de un PSHA. Los puntos de referencia tomados en cuenta para cada falla fueron seleccionados de acuerdo al recorrido en planta que sigue la misma a través del posicionamiento de cada una de las fallas corticales tomadas en cuenta en la herramienta Google Earth, a partir del mapa publicado en el estudio de Eguez (2003). Aquellas fallas que pueden ser asumidas como una recta pueden ser modeladas con 2 puntos mientras que aquellas con trazado irregular necesitaron más puntos de referencia para poder ser correctamente modeladas.

Tabla 5 Coordenadas de fuentes sísmicas corticales no segmentadas

Coordenadas Falla: La Toma	
Longitud	Latitud
79.400	3.8250
79.500	4.0500
Coordenadas Falla: Gye-Babahoyo	
Longitud	Latitud
79.400	1.6500
76.600	2.1000
Coordenadas Falla: Carrizal	
Longitud	Latitud
80.1798	2.2901
80.2049	2.2419
80.4640	2.1601
Coordenadas Falla: Posorja	
Longitud	Latitud
80.7542	2.9475
80.6120	3.0425
80.2186	2.8626
80.1406	2.8687
Coordenadas Falla: Chanduy	
Longitud	Latitud
80.87780	2.32960
80.69580	2.41890
Coordenadas Falla: La Cruz	
Longitud	Latitud
80.1848	2.7684
80.2418	2.6834
80.4484	2.4892
80.5739	2.8687
Coordenadas Falla: Zambapala	
Longitud	Latitud
80.35370	3.10970
79.86450	2.66810

Coordenadas Falla: Tarqui	
Longitud	Latitud
79.1771	3.031
79.1269	2.9369
Coordenadas Falla: Naranjal	
Longitud	Latitud
79.7190	2.7851
79.5013	2.6043
Coordenadas Falla: Jambelí	
Longitud	Latitud
79.8437	2.8976
79.5243	2.6011
Coordenadas Falla: Tenguel	
Longitud	Latitud
80.4197	3.1399
80.5072	3.1482
80.5992	3.0620
Coordenadas Falla: Ponce Enriquez	
Longitud	Latitud
79.7766	3.196
79.6817	2.9937
79.5365	2.8584
Coordenadas Falla: Piqueros	
Longitud	Latitud
80.5000	3.4907
80.4738	3.3395
80.4586	3.2248
Coordenadas Falla: Célica	
Longitud	Latitud
79.752	3.9873
80.1184	4.2368
Coordenadas Falla: Macará	
Longitud	Latitud
79.9975	4.37068
79.811	4.0943

Fuente: (Autor, 2018)

3.1.2 Caracterización de fuentes corticales segmentadas

Para la caracterización de fallas corticales segmentadas tomadas en cuenta en el presente estudio (sistema Colonche y sistema Girón) fue necesario buscar en la literatura

seguida los parámetros geométricos y sísmicos de cada una de las fuentes de manera análoga a lo hecho en las fuentes corticales no segmentadas.

Como se discutió en el capítulo 2 del presente estudio aquellas fuentes sísmicas compuestas por varias fallas deben tomar en cuenta la posibilidad de que el sistema falle de manera total, es decir todos los segmentos se rompan, o que se origine una ruptura individual o en sub-grupos de las fallas que componen el sistema. A cada uno de los posibles escenarios se le asignará una ponderación sobre el 100% según lo encontrado en el estudio realizado por GeoSísmica en Puerto Bolívar.

3.1.2.1 Sistema Colonche

El sistema Colonche está compuesta por 4 fallas que han sido denominados en el estudio de Eguez (2003) como segmentos: sur, central, norte y noroeste. Este sistema va desde la ciudad de Guayaquil en donde se encuentra el segmento sur del sistema hasta la actual provincia de Santa Elena den donde termina la última falla del sistema denominado segmento noroeste. Se presentará a continuación la Tabla 6 de características sísmicas y geométricas del sistema, donde se puede observar que se han tomado en cuenta 4 grupos de posibles rupturas. El primer caso toma en cuenta la posibilidad de que la falla se rompa en todos sus segmentos al mismo tiempo, ha este caso se le ha dado una ponderación del 25%. El segundo grupo toma en cuenta que la ruptura pueda producirse en pares de fallas colindantes, pero de acuerdo a lo presentado anteriormente en el capítulo 2 también es necesario considerar la probabilidad de los demás segmentos se rompan de manera individual, se compone de tres sub-casos y se ha definido para cada uno de estos una ponderación del 14%. El grupo tres toma en cuenta la probabilidad de que el sistema se rompa en tríos de fallas colindantes, está formado por dos sub-casos y cada uno de estos se le ha asignado una ponderación del 12.5%. El cuarto caso toma en cuenta la probabilidad de que cada una de las fallas que componen el sistema se rompan de manera independiente, a este caso se le ha asignado una ponderación del 10%. Se presenta también en la Figura 14 el grupo de fallas Colonche en el mapa presentado por Eguez (2003), aquí están representados por la codificación 16a, 16b, 16c y 16d para los segmentos noroeste, norte, central y sur respectivamente.



Figura 14 Ubicación del sistema Colonche en el Ecuador, mapa elaborado por Eguez (2003)

Fuente: (Eguez y otros, 2003)

Tabla 6 Parámetros geométricos y sísmicos del sistema Colonche y formas de ruptura tomadas en cuenta para el modelamiento en HAZ45.2

Fallas Corticales No segmentadas										
Nombre	MODELO DE RUPTURA	SEGMENTOS CONSIDERADOS	Tipo	Longitud de Ruptura (km)	Ancho (km)	Magnitud máxima (Mw)	Desplazamiento medio anual (mm/año)	Ángulo de inmersión	Modelo para pdf de magnitudes	b
SISTEMA COLONCHE	NO SEGMENTADA (0.25)	SISTEMA COLONCHE	Inversa (0.5) Dextral (0.5)	90	13 (0.3) 17 (0.4) 22 (0.3)	7.4	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.2) 60 (0.5) 90 (0.3)	Modelo Característico	0.85
	2A (0.14)	SUR+CENTRAL		54		7.1				
		NORTE		24		6.7				
		NOROESTE		12		6.3				
		2B (0.14)		SUR		32				
	CENTRAL+NORTE			46		7				
	NOROESTE			12		6.3				
	2C (0.14)	SUR		32		6.9				
		CENTRAL		22		6.6				
		NORTE+NOROESTE		36		6.9				
	3A (0.125)	SUR+CENTRAL+NORTE		78		7.3				
		NOROESTE		12		6.3				
	3B (0.125)	SUR		32		6.9				
		CENTRAL+NORTE+NOROESTE		58		7.1				
	INDIVIDUAL (0.10)	SUR		32		6.9				
		CENTRAL		22		6.6				
NORTE		24	6.7							
NOROESTE		12	6.3							

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

Análogamente a lo hecho para las fuentes corticales no segmentadas se presentará a continuación la Tabla 7 en donde se en lista las coordenadas de cada una de las fallas que componen el sistemas Colonche.

Tabla 7 Coordenadas de fallas que componen el sistema Colonche

SISTEMA COLONCHE	
Coordenadas Falla: Colonche Sur	
Longitud	Latitud
79.7492	2.1719
80.0097	2.1791
Coordenadas Falla: Colonche Central	
Longitud	Latitud
80.0204	2.1772
80.2569	2.1036
Coordenadas Falla: Colonche Norte	
Longitud	Latitud
80.3299	3.0621
80.5588	1.9611
Coordenadas Falla: Colonche Noroeste	
Longitud	Latitud
80.527	1.8970
80.7249	1.6801

Fuente: (Autor, 2018)

3.1.2.2. Sistema Girón

El sistema Girón se encuentra ubicado en la fosa cortical andina entre las provincias de Loja y Azuay, está compuesto por dos segmentos que han sido denominados como segmentos noreste y suroeste, respectivamente. De manera análoga a lo hecho en el sistema Colonche se analizaron dos posibles casos de ruptura, el primero contempla la probabilidad de que los dos segmentos se rompan de manera conjunta, a este caso se le ha dado una ponderación del 50%. El segundo caso toma en cuenta la probabilidad de que los segmentos se rompan de manera independiente, a este caso se le dio una ponderación del 50%. A continuación en la Tabla 8 se muestra los parámetros geométricos y sísmicos de cada uno de los segmentos, así como los casos mencionados anteriormente, mientras que en la Figura 15 se muestra la ubicación del sistema Girón en

el territorio ecuatoriano elaborado por Eguez (2003) en donde se han codificado como 81a y 81b.

Tabla 8 Parámetros geométricos y sísmicos del sistema Girón y formas de ruptura tomadas en cuenta para el modelamiento en HAZ45.2

Fallas Corticales No segmentadas										
Nombre	MODELO DE RUPTURA	SEGMENTOS CONSIDERADOS	Tipo	Longitud de Ruptura (km)	Ancho (km)	Magnitud máxima (Mw)	Desplazamiento medio anual (mm/año)	Ángulo de inmersión	Modelo para pdf de magnitudes	b
SISTEMA GIRÓN	NO SEGMENTADA (0.5)	SISTEMA GIRÓN	Normal (0.5) Dextral (0.5)	44.7	15 (0.3) 20 (0.4) 25 (0.3)	7	0.2 (0.2) 0.6 (0.5) 1.0 (0.3)	30 (0.3) 55 (0.4) 80 (0.3)	Modelo Característico	0.81
	2 SEGMENTOS (0.5)	NORESTE	Normal	23.7		6.7	0.2 (0.2) 0.6 (0.5) 1.0 (0.3)			
		SURESTE	Normal (0.5) Dextral (0.5)	23.7		6.7	0.5 (0.3) 1.0 (0.4) 2.0 (0.3)			

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

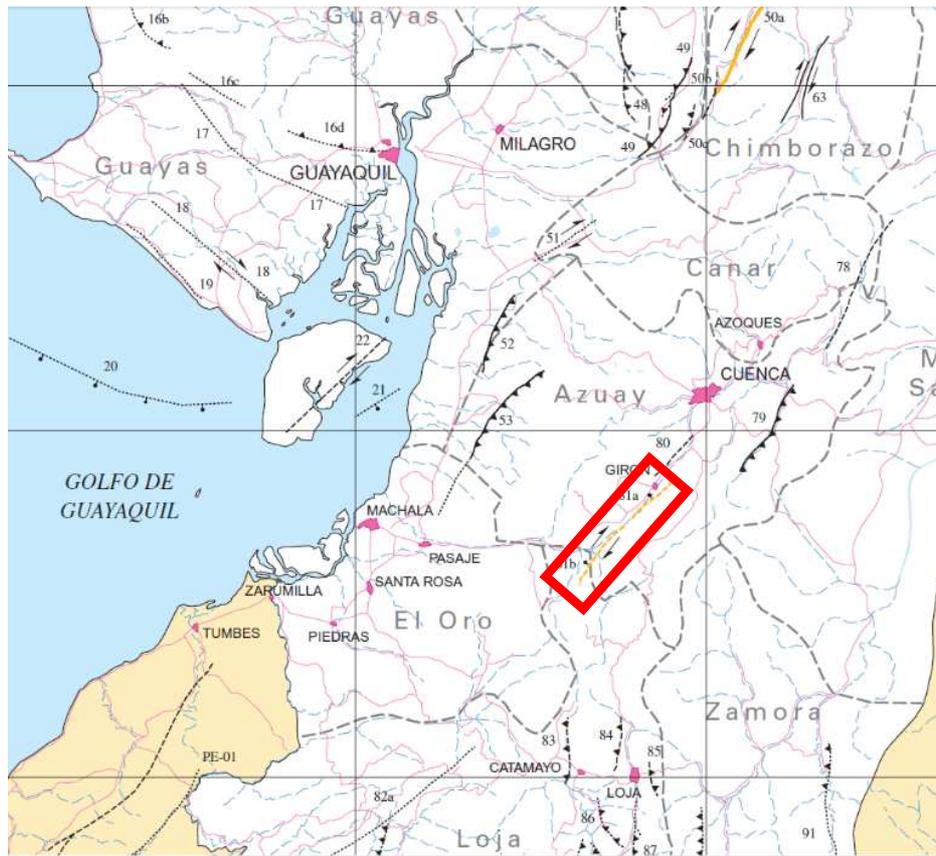


Figura 15 Ubicación del sistema Girón en el Ecuador, mapa elaborado por Eguez (2003)

Fuente: (Eguez, 2003)

Tabla 9 Coordenadas de fallas que componen sistema Girón

SISTEMA GIRÓN	
Coordenadas Falla: Girón Norte	
Longitud	Latitud
79.2573	3.0128
79.1644	3.1747
Coordenadas Falla: Girón Sur	
Longitud	Latitud
79.3443	3.4391
79.2772	3.3158

Fuente: (Autor, 2018)

3.2 Caracterización de zona de subducción

GeoSísmica en su estudio sub-divide los fenómenos sísmicos asociados a la subducción en dos grupos: la zona de sismos interplaca (megathrust) y la zona de sismos intraplaca (intraslab). Esta subdivisión se hace debido a que las características de los sismos generados por estas fuentes son diferentes, como se detallará más adelante, y es necesario separarlas para tener una mejor aproximación del riesgo sísmico en el litoral ecuatoriano.

3.2.1 Fuente de sismos interplaca o megathrust

La llamada zona de “megathrust” es el lugar en donde una placa oceánica, en este caso la placa de Nazca, se mete por debajo de la placa continental, en este caso la placa Sudamericana. La placa oceánica irá desplazándose constantemente con respecto a la placa continental, generando así deformación entre las placas y acumulación de energía. Este fenómeno es capaz de acumular energía suficiente como para generar sismos de gran magnitud como ya se lo ha vivido en el país con el terremoto de Pedernales 2016 y en el siglo pasado con terremotos como los de 1906 y 1942. En este caso los sismos serán producidos por esta interacción entre las dos placas tectónicas, y se ha considerado que esta zona llega hasta una profundidad aproximada de 40 km.

En su estudio Eguez (2003) caracteriza la zona llamada trinchera de subducción Colombo-ecuatoriana que se encuentra frente a las costas de Manabí y se extiende hacia el Norte hasta las costas colombianas. En este estudio puede encontrarse referencia a

tasas de desplazamiento anual de alrededor de 70 mm/año y también que el mecanismo de falla es inverso.

Por su parte en su estudio GeoSísmica (2017) divide la zona de megathrust de la costa oeste sudamericana en tres zonas: norte, central y sur. La zona norte va desde las costas norte de Manabí y se prolonga hacia Colombia. La zona central de megathrust va desde las costas norte de Manabí y desciende hasta la altura de la zona que se encuentra frente a la provincia de El Oro. La zona sur va desde la culminación de la zona central (costas frente a la provincia de El Oro) y va hacia el sur hasta las costas de Perú. GeoSísmica asigna tasa de desplazamiento anual de alrededor de 60 mm/año. Esta subdivisión se ha hecho ya que estudios han demostrado que la geometría de estas zonas de subducción no es la misma, principalmente el ángulo con el que la placa de Nazca subduce a la Sudamericana, además la zona de subducción central está caracterizada por la presencia de la dorsal Carnegie que es una cordillera oceánica que va desde la trinchera de subducción hasta las islas Galápagos y por la llamada brecha sísmica conocida así por la falta de información existente en cuanto a eventos sísmicos recientes. A continuación se presenta dos ilustraciones realizadas por Gutscher y otros (1999) donde se puede apreciar de mejor forma esta segmentación de la zona de subducción.

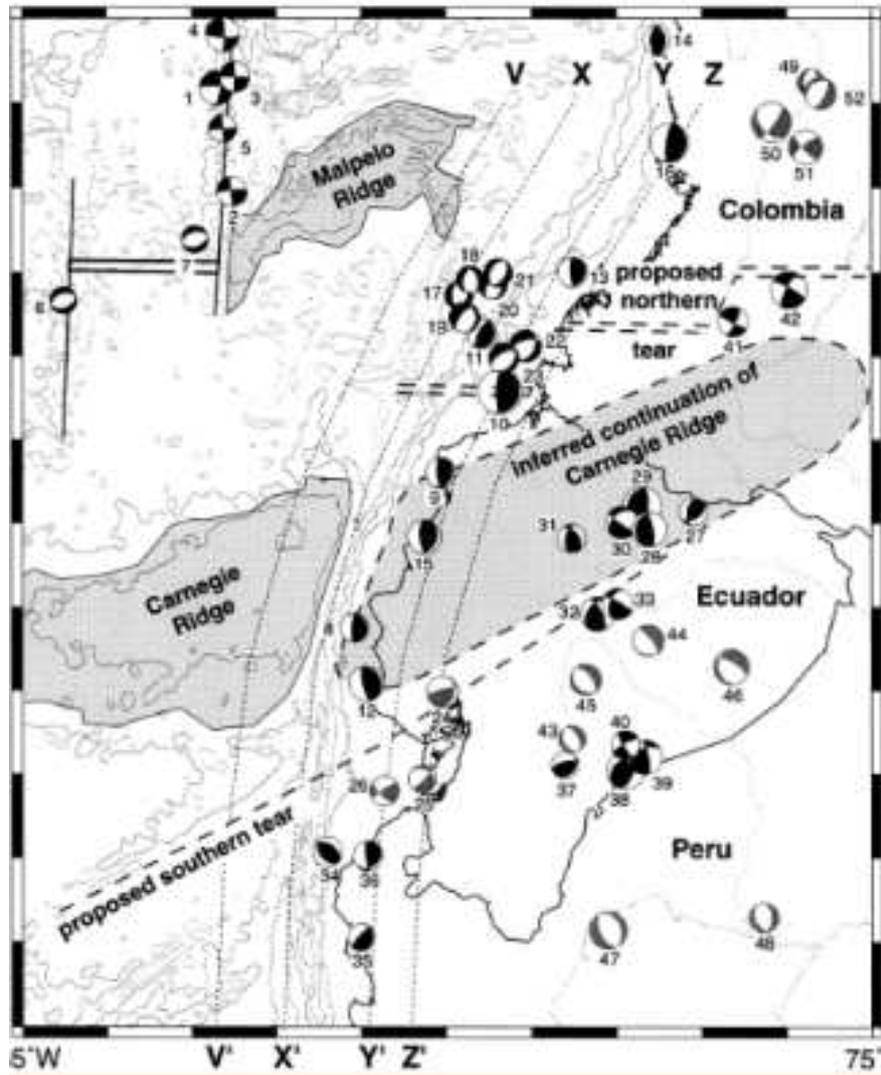


Figura 16 Ubicación de la dorsal Carnegie con referencia a Ecuador

Fuente:(Gutscher y otros, 1999)

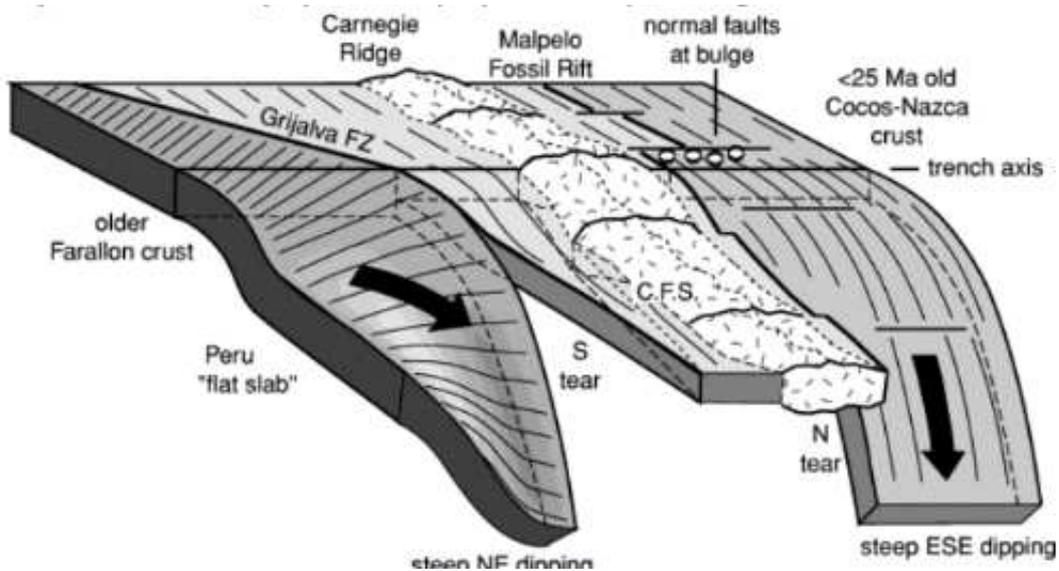


Figura 17 Ilustración de los ángulos de inmersión de las tres zonas de subducción consideradas, se observan de derecha a izquierda las zonas: sur, central y norte.

Fuente:(Gutscher y otros, 1999)

A continuación será presentada en la Tabla 10 las características geométricas y sísmicas tomadas en cuenta para el modelamiento de estas tres zonas de subducción en el programa HAZ45.2.

Tabla 10 Parámetros geométricos y sísmicos tomados en cuenta para modelamiento de zona de subducción en

Zona de Subducción								
Nombre	Tipo	Longitud (km)	Ancho (km)	Magnitud máxima (Mw)	Desplazamiento medio anual (mm/año)	Ángulo de inmersión (°)	Modelo para pdf de magnitudes	b
Subducción Norte	Inversa	550	40	7.5 (0.3) 8.3 (0.3) 8.8 (0.4)	65	16	Modelo característico (Y&C)	0.9
Subducción Central		320		8.0				
Subducción Sur		360		7.5 (0.3) 8.3 (0.3) 8.8 (0.4)				

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

De manera análoga a lo hecho para las fuentes corticales también fue necesario definir para las zonas de subducción las coordenadas que definen su ubicación para que el programa HAZ45.2 pueda calcular las distancias pertinentes tanto de ubicación de los eventos generados con respecto al sitio de estudio. A continuación se presenta en la Tabla 11 las coordenadas de ubicación de las tres zonas de subducción a modelar.

Tabla 11 Coordenadas de inicio y fin de las diferentes zonas de megathrust incluidas en el modelo HAZ45.2

Zona de megathrust:	
Norte	
Longitud	Latitud
78.4750	-4.0000
81.3625	0
Central	
Longitud	Latitud
81.3625	0
81.7061	2.9136
Sur	
Longitud	Latitud
81.7061	2.9136
82.0838	6.0613

Fuente: (Autor, 2018)

3.2.2 Fuentes de sismos intraplaca o “intraslab”

Esta fuente corresponde a la porción de la placa de Nazca que se prolonga por debajo de la placa Sudamericana con un ángulo de inmersión diferente al de la zona megathrust. De manera general se puede decir que esta zona se encuentra a profundidades entre los 40 y 80 km en el litoral ecuatoriano, y entre 80 y 150 km para las regiones Sierra y Amazonía. Es importante modelar esta zona debido a que se han presentado eventos con magnitudes de hasta 7.9 M como el ocurrido en el año de 1970, lo que podría generar intensidades importantes considerando que debajo de las ciudades costeras esta zona intraslab se encuentra profundidades de alrededor de los 60 km, pudiendo así generar distancias focales relativamente pequeñas.

Se ha escogido para esta zona un modelo geométrico de área de acuerdo a lo hecho por GeoSísmica (2017) y a lo propuesto por Hayes (2012). Para esto se ha considerado dos áreas que representarán estas fuentes de sismos, la primera zona irá desde los 40 km de profundidad hasta los 60 km y la segunda irá desde los 60 km hasta los 80 km. Para obtener las coordenadas que representarían estas áreas se recurrió al modelo de Hayes (2012) en donde se ha estimado la profundidad a la que se encuentra la placa de Nazca en diferentes zonas del país, a

continuación se muestra en la Figura 18 la distribución de la profundidad de la placa de Nazca en el Ecuador.

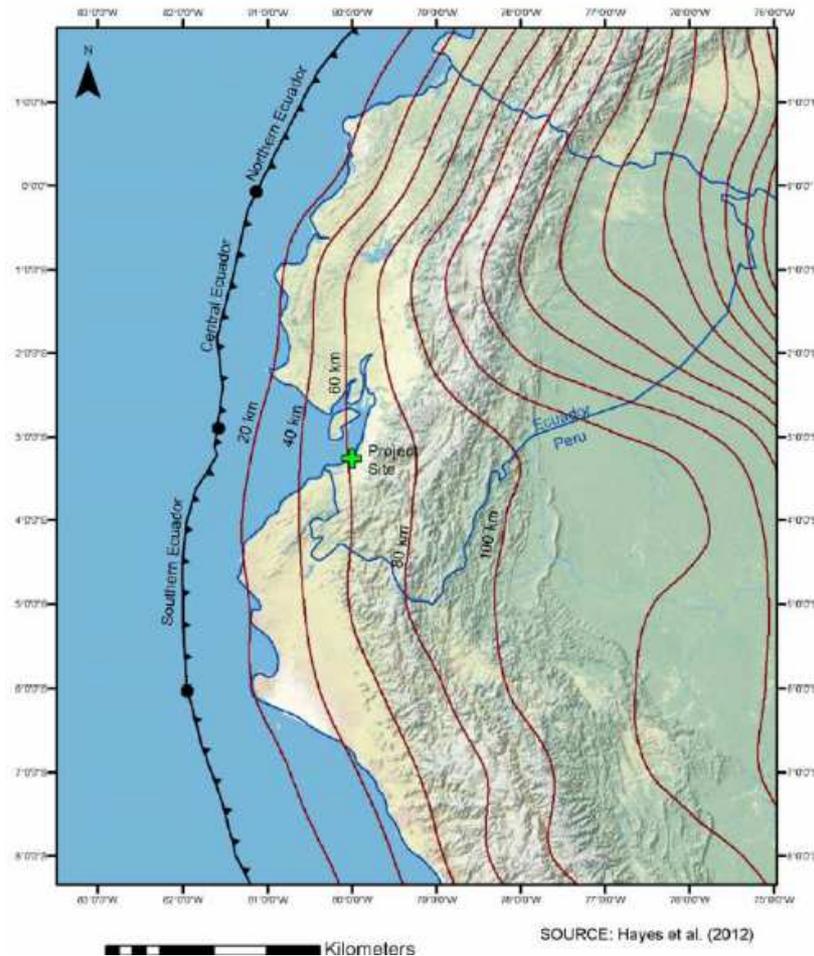


Figura 18 Distribución de la profundidad a la que se encuentra la placa de Nazca con respecto a la superficie de la placa Sudamericana

Fuente: (Hayes y otros, 2012)

Al ser escogido el modelo geométrico de áreas es necesario conocer las coordenadas que definen estas áreas en el espacio además de la altura que tendrá (para este caso 20 km) por lo que a continuación se presentará una la Tabla 12 que muestra las coordenadas de los puntos considerados para las fuentes de sismos intraslab.

Tabla 12 Coordenadas de zona intraslab incluida en el modelo en HAZ45.2

Coordenadas zona intralab 1 (40-60 km)	
Longitud	Latitud
80.02	4.34
79.16	4.81
79.27	0.87
79.8	0.86
80.02	4.34
Coordenadas zona intralab 1 (60-80 km)	
Longitud	Latitud
80.65	4.00
80.02	4.34
79.8	0.88
80.31	0.81
80.65	4.00

Fuente: (Autor, 2018)

En lo que a la sismicidad concierne se ha escogido un modelo exponencial truncado ya que estos modelos caracterizan mejor a grandes fuentes, con una magnitud de máxima de 7.5 Mw y con un b-value de 0.91 de acuerdo a lo observado en el estudio de GeoSísmica (2017).

3.4 Modelos de predicción de movimiento sísmico

El siguiente paso fue la selección de los modelos de predicción de movimiento, como se discutió anteriormente se seleccionó un grupo de modelos de predicción que han sido establecidos en base a registros de varias partes del mundo y que constituyen los llamados modelo globales y se le dio a cada una de ellas una ponderación para poder manejar de esta manera un grado de incertidumbre asociado con estas ecuaciones.

De acuerdo con lo encontrado en la literatura y en los estudios que han sido referidos anteriormente, se ha tomado en cuenta los modelos elaborados en el proyecto PEER-NGA-West2 desarrollados en California para fuentes corticales. Estos modelos toman en cuenta numerosos registros sísmicos de eventos de moderada magnitud de países como China, California, Japón, Nueva Zelanda e Italia. Los modelos implementados para las fuentes sísmicas corticales del presente estudio fueron las siguientes: Abrahamson (2014), Campbell y Borzorgnia (2014), Chiou y Youngs (2014) y Boore (2014). Debe decirse que se les dará una ponderación del 25% a los resultados obtenidos para cada uno de los modelos de predicción de movimiento sísmico.

Análogamente para la zona de subducción han sido tomadas en cuenta 4 modelos de predicción de movimiento sísmico: Youngs (1997), Zhao (2006), Atkinson y Boore (2003) y Abrahamson (2016). Se han definido ponderaciones del 10% para el modelo propuesto por Youngs (1997), 20% para los modelos de Zhao (2006) y Atkinson y Boore (2003) respectivamente y 50% para el modelo de Abrahamson (2016). Se le dio mayor ponderación al último modelo citado porque se considera que ha sido desarrollada con mayor número de registros y por su modernidad podría generar resultados más confiables. Debe decirse que este modelo ha sido desarrollado para la zona de subducción de Cascadia pero se ha basado en registros de sismos de varias partes del mundo con magnitud mayores a 8 y con origen tectónico similar a la zona de subducción de Cascadia.

A continuación se presenta en la Figura 19 un árbol lógico en donde se detallan los modelos de predicción de movimiento sísmico tomados en cuenta tanto para fuentes sísmicas corticales y la zona de subducción así como la ponderación que se ha considerado para cada una de ellas.

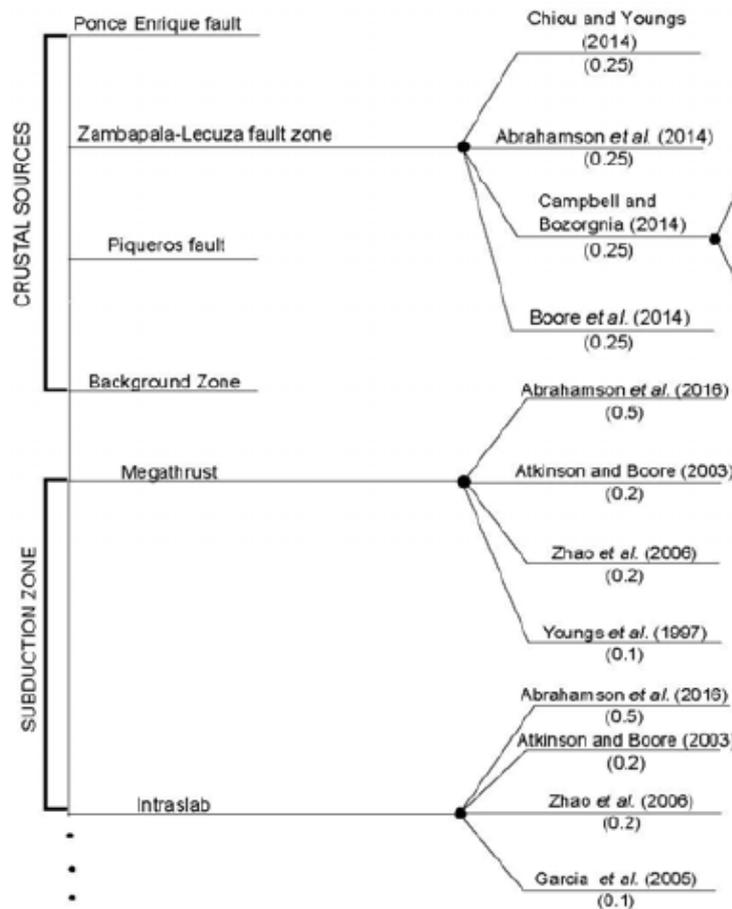


Figura 19 Modelos de predicción de movimiento sísmico para fuentes corticales y zona de subducción

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

Para implementar estos modelos de predicción de movimiento sísmico en el programa HAZ45.2 fue únicamente necesario ingresar un código que identifica a cada uno de estos modelos dentro de la base de datos del programa en el archivo de ingreso. A continuación se presentarán en la Tabla 13 el código que identifica a cada uno de los modelos descritos anteriormente.

Tabla 13 Modelos de predicción de movimiento sísmicos y sus códigos de identificación en el programa HAZ45.2

Modelo de predicción de movimiento sísmico	Código
Fuentes corticales	
Chiou y Youngs (2014)	8797
Abrahamson (2014)	8787
Campbell y Borzognia	8836
Boore (2014)	8922
Fuentes de subducción	
Atkinson y Boore (2003)	310
Abrahamson (2016)	350
Zhao (2006)	251
Youngs (1997)	201

Fuente: (Autor, 2018)

3.5 Implementación de fuentes en programa HAZ45.2

Para la implementación de las fuentes sísmicas antes detalladas en el programa HAZ45.2 debe de contarse con dos archivos de texto que serán los que contengan toda la información recogida de la literatura para cada fuente. El primero es el archivo de fuente aquí se enumerarán las fuentes que se tomarán en cuenta y se ingresará toda la información de la misma para que el programa haga uso de ella. El siguiente archivo es el archivo de ingreso que será el que le informe al programa que archivo de fuente tomar y bajo qué condiciones hacer el PSHA. A continuación se discutirá de manera breve lo hecho para generar estos archivos.

3.5.1. Archivos de Fuente

El archivo de fuente es un archivo de texto en el que se incluye de manera ordenada y sistemática las características geométricas y sísmicas determinadas y discutidas anteriormente en el capítulo de caracterización de fuentes. Como ejemplo se pondrá a continuación la falla Naranjal, se presentará a continuación en la Tabla 14 y Tabla 15 las características únicamente de la falla Naranjal y en la Figura 20 el archivo de fuente generado para su implementación en el programa HAZ45.2.

Tabla 14 Características geométricas y sísmicas de la falla Naranjal

Nombre	Tipo	Longitud de Ruptura (km)	Ancho (km)	Magnitud máxima (Mw)	Desplazamiento medio anual (mm/año)	Ángulo de inmersión	Modelo para pdf de magnitudes	b
Naranjal	Inversa (0.5) Dextral (0.5)	25.9	12 (0.3) 15 (0.4) 18 (0.3)	6.8	0.2 (0.2) 1 (0.5) 3 (0.3)	45 (0.5) 60 (0.5)	Modelo característico (Y&C)	0.85

Fuente: (GeoSísmica, 2017)

Tabla 15 Coordenadas falla Naranjal

Coordenadas Falla: Naranjal	
Longitud	Latitud
79.7190	2.7851
79.5013	2.6043

Fuente: (Autor, 2018)

Debe decirse que en un archivo fuente puede contener a su vez varias fuentes, no sólo una como se presentará a continuación, y que para este trabajo de titulación se han elaborado varios archivos de fuente en donde se agrupan varias fuentes sísmicas, imágenes de estos archivos serán mostradas en el capítulo de Anexos.

```

1 1 iCoord (0=x,y 1=long,lat)
2 1 Number of fits
3 Naranjal
4 1.0 Prob Activity
5 1 Number of seg models
6 1. wts for seg models
7 1 Number of segments
8 1 flags for seg model
9 05 Naranjal
10 1 1 0. 0 0 source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
11 1.0 aleatory seg wt
12 50 0.0 dip, depth to top
13 2 Number of long/lat pts
14 79.719 2.7851 long lat pts
15 79.5013 2.6043
16 2 Number of dip variations
17 45 60 dip variations
18 0.5 0.5 wt for dip variations
19 1 Number of b-values
20 0.85 b-values
21 1. wts for b-values
22 0 Number of act rates
23 1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
24 3 Number of slip-rates
25 0.2 1.0 3 slip rates (mm/yr)
26 0.5 0.4 0.1 wts for slip rates
27 0 Number of rec. int.
28 0 Number moment rates
29 1 Number of mag recur models
30 0 mag recur model (0=Y&C)
31 1.0 wts for mag recur model
32 0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
33 1 Number of fault widths
34 15 fault widths
35 1 wts for fault widths
36 0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
37 1 Number of max mags (fault width 1)
38 6.8 max mags
39 1.0 wts for max mags
40 5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
41 -4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
42 -2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
43 1 Number of fault mech models
44 1.0 wts for fault mech models
45 2 Number of fault mech
46 -1.0 0.0 fault mech
47 0.5 0.5 wts for fault mech

```

Figura 20 Archivo fuente de la falla Naranjal previo a su implementación en el programa HAZ45.2 para análisis probabilístico de peligro sísmico.

Fuente: (Autor, 2018)

3.5.2. Archivo de Ingreso

El archivo de ingreso es básicamente un archivo de texto que contiene las directrices del PSHA a realizar. Aquí es dónde se ingresarán los códigos de los modelos de predicción de movimiento sísmico a usar en las fuentes, así como la lista de las intensidades para las cuales se quiere conocer la tasa anual de excedencia. Debe decirse también es en este archivo en donde se deberá especificar las coordenadas del sitio de estudio de las misma manera a lo hecho en las fuentes ingresadas. A diferencia de los archivos de

fuerza este archivo de ingreso podría ser único si sólo se trabaja con un sitio de estudio y no se varían los mismos modelos de predicción de movimiento sísmico para todas las fuentes. Para el presente estudio se han elaborado dos archivos de ingreso, uno para las fuentes corticales y uno para las zonas de subducción. A continuación se presentará el archivo de ingreso para las fuentes corticales en la Figura 21, mientras que el archivo de ingreso para las zonas de subducción será mostrado en el capítulo de Anexos del presente trabajo.

```

1 Source_S1Test2.txt
2 45.2          version of fault file
3 1.0 5.0 78.0 82.0    min max lat long
4 400.         maxdist
5 Tesis Christian Ramirez
6 1 1          nProb, nAttenType
7 0.0 8 0      period, max epsilon, dir flag
8 18
9 0.001 0.01 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
10 4           Number of GM Models for AttenType 1
11 8787 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
12 8922 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
13 8836 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
14 8797 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
15 0           psCorFlag (0=no, 1=yes)
16 21         Number of deag mag values
17 5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0    deag mag values
18 7           Number of deag dist values
19 0.0 20. 40. 60. 80.0 100. 200.    deag dist values
20 6           Number of deag eps values
21 -10. -2. 0. 1. 2. 10.    deag eps values
22 4           Number of deag dir values
23 0.0 0.10 0.40 2.0    deag dir values
24 0           soil amp
25 1           nSites
26 79.40486 2.18101 760.0 0.0481 0.250 0.6068 0.8 0 (sx, sy, Vs, DVs1.0, DVs1.5, DVs2.5, Vrup, FABA)
27 Set2Test1_Site1.out1
28 Set2Test1_Site1.out2
29 Set2Test1_Site1.out3
30 Set2Test1_Site1.out4
31 Set2Test1_Site1.out5
32 Set2Test1_Site1.out6
33 Set2Test1_Site1.out7
34

```

Figura 21 Archivo de ingreso implementación en el programa HAZ45.2 de fuentes corticales para análisis probabilístico de peligro sísmico.

Fuente: (Autor, 2018)

Puede verse que para este archivo ya se ha seleccionado un sitio de estudio, este fue la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Otro de los parámetros importantes a ingresar en este archivo es el tipo de suelo del sitio ya que los modelos de predicción de movimiento sísmico contemplan variaciones en la intensidad dependiendo del tipo de suelo definido. El parámetro con el que se caracterizó el suelo en este caso fue la velocidad de onda de corte (V_{s30}) que fue asumida como 760 m/s lo que correspondería a suelos tipo “B” o “C” en la clasificación NEC-15. Se presenta a

continuación la imagen satelital de donde se tomó las coordenadas del sitio de estudio en la Figura 22 el sitio de estudio se encuentra enmarcado en un recuadro rojo y en la Tabla 16 se muestran las coordenadas obtenidas para el archivo de ingreso.

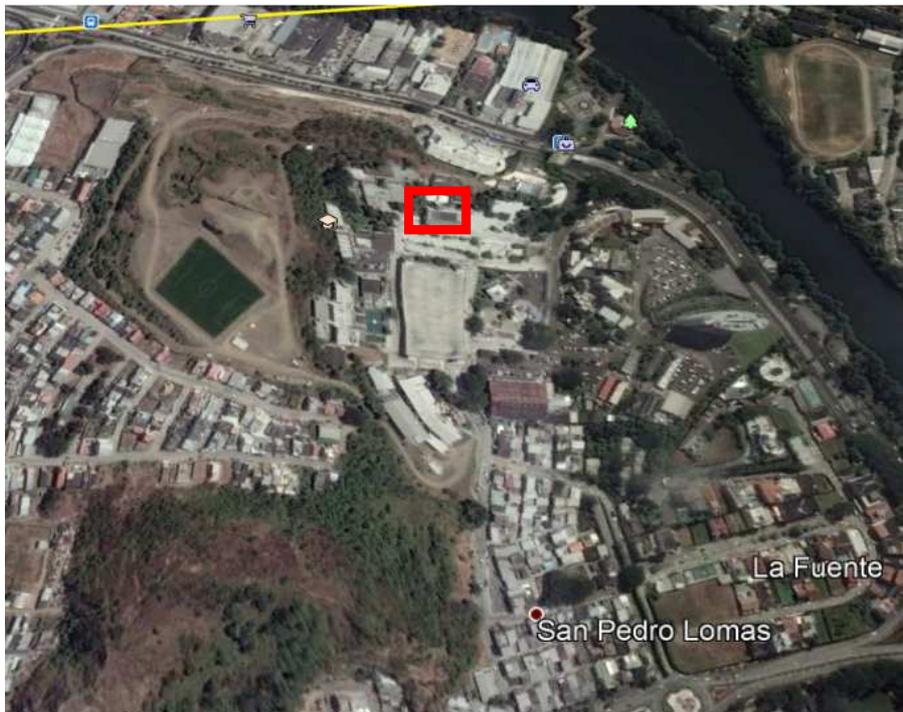


Figura 22 Imagen satelital de Facultad de Ingeniería de Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

Fuente: (Autor, 2018)

Tabla 16 Coordenadas de sitio de estudio considerado para implementación de PSHA en programa HAZ45.2

Facultad de Ingeniería UCSG	
Longitud	Latitud
79.40486	2.18101

Fuente: (Autor, 2018)

4 CAPÍTULO 4- RESULTADOS

Una vez generados todos los archivos de fuente y haberlos implementado al programa HAZ45.2 mediante los archivos de ingresos desarrollados para cada ambiente tectónico fue posible obtener resultados de tasa anual de excedencia para cada fuente tomada en cuenta en el presente trabajo de titulación.

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos, es decir las curvas de peligro sísmico y de período de retorno entregadas por el programa con base en las fuentes caracterizadas. Primero se presentarán los resultados para las fuentes corticales no segmentadas, luego las segmentadas, seguido por los resultados encontrados para la zona de subducción y por último la curva de peligro sísmico y período de retorno total que se obtendrá sumando los resultados de cada una de las fuentes implementadas. Para todos los casos el programa HAZ45.2 ha evaluado la tasa anual de excedencia para intensidades: 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, estas intensidades son valores de PGA (Peak ground acceleration) en porcentaje de la gravedad.

4.1. Fuentes sísmicas corticales no segmentadas

Al implementar las fuentes sísmicas corticales no segmentadas, que fueron presentadas con anterioridad, en el programa HAZ45.2 fue posible encontrar resultados de tasa anual de excedencia para las intensidades detalladas anteriormente y así generar las curvas de peligro sísmico para este grupo de fuentes sísmicas. En la Tabla 17 y Tabla 18 se presentan las tasas anuales de excedencia para cada uno de los niveles de intensidades evaluados y para cada una de las fuentes sísmicas corticales no segmentadas incorporadas en el análisis. Por otro lado la Tabla 19 muestra la tasa anual de excedencia total en el sitio de estudio para cada uno de los niveles de intensidad evaluados, estos valores han sido obtenidos sumando la tasa anual de excedencia para cada nivel de intensidad de cada una de las fuentes evaluadas, también es mostrado el período de retorno de cada intensidad que se obtuvo calculando el inverso de la tasa anual de excedencia.

Tabla 17 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas (1) en HAZ45.2

PGA	La Toma	Gye-Babahoyo	Carrizal	Posorja	Chanduy	La Cruz	Tarqui	Naranjal
0.00	4.30E-03	5.61E-03	1.14E-02	5.15E-03	2.75E-03	7.08E-03	3.37E-03	2.10E-03
0.01	6.16E-04	5.17E-03	5.62E-03	1.23E-03	6.87E-04	2.38E-03	2.29E-03	1.50E-03
0.05	1.70E-06	2.54E-03	7.79E-04	8.57E-05	3.26E-05	2.01E-04	4.52E-04	3.81E-04
0.10	2.36E-08	1.24E-03	1.06E-04	7.08E-06	2.16E-06	2.05E-05	8.14E-05	9.46E-05
0.15	1.21E-09	6.59E-04	2.13E-05	1.01E-06	2.75E-07	3.33E-06	2.05E-05	2.80E-05
0.20	1.20E-10	3.68E-04	5.56E-06	2.02E-07	5.13E-08	7.30E-07	6.49E-06	9.59E-06
0.25	1.79E-11	2.12E-04	1.76E-06	5.11E-08	1.23E-08	1.97E-07	2.42E-06	3.69E-06
0.30	3.49E-12	1.26E-04	6.36E-07	1.53E-08	3.56E-09	6.20E-08	1.02E-06	1.55E-06
0.35	8.31E-13	7.73E-05	2.56E-07	5.23E-09	1.18E-09	2.20E-08	4.68E-07	7.06E-07
0.40	2.30E-13	4.85E-05	1.12E-07	1.97E-09	4.34E-10	8.56E-09	2.32E-07	3.41E-07
0.45	7.20E-14	3.12E-05	5.27E-08	8.10E-10	1.74E-10	3.60E-09	1.22E-07	1.73E-07
0.50	2.48E-14	2.04E-05	2.62E-08	3.56E-10	7.52E-11	1.62E-09	6.70E-08	9.22E-08
0.55	9.27E-15	1.36E-05	1.36E-08	1.66E-10	3.44E-11	7.66E-10	3.84E-08	5.09E-08
0.60	3.71E-15	9.26E-06	7.39E-09	8.11E-11	1.66E-11	3.81E-10	2.28E-08	2.90E-08
0.70	7.01E-16	4.47E-06	2.41E-09	2.19E-11	4.37E-12	1.06E-10	8.76E-09	1.03E-08
0.80	1.58E-16	2.27E-06	8.77E-10	6.78E-12	1.32E-12	3.35E-11	3.69E-09	4.01E-09
0.90	4.07E-17	1.21E-06	3.49E-10	2.33E-12	4.46E-13	1.17E-11	1.67E-09	1.69E-09
1.00	1.15E-17	6.67E-07	1.49E-10	8.74E-13	1.64E-13	4.48E-12	8.06E-10	7.58E-10

Fuente: (Autor, 2018)

Tabla 18 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas (2) en HAZ45.2

PGA	Jambelí	Ponce Enriquez	Piqueros	Tenguel	Zambapala	Célica	Macará
0.00	3.99E-03	2.37E-03	9.40E-03	5.56E-03	5.22E-02	2.43E-03	2.66E-03
0.01	2.48E-03	1.15E-03	1.68E-03	7.41E-04	2.52E-02	3.46E-04	3.36E-04
0.05	5.98E-04	1.98E-04	1.71E-05	1.68E-06	3.68E-03	2.81E-06	1.30E-06
0.10	1.67E-04	3.82E-05	4.40E-07	2.22E-08	5.46E-04	5.87E-08	2.03E-08
0.15	5.41E-05	9.33E-06	3.17E-08	1.10E-09	1.15E-04	3.58E-09	1.09E-09
0.20	1.98E-05	2.73E-06	3.96E-09	1.05E-10	3.06E-05	3.90E-10	1.11E-10
0.25	8.03E-06	9.21E-07	6.98E-10	1.50E-11	9.66E-06	6.16E-11	1.67E-11
0.30	3.54E-06	3.47E-07	1.56E-10	2.82E-12	3.47E-06	1.26E-11	3.30E-12
0.35	1.67E-06	1.42E-07	4.17E-11	6.47E-13	1.38E-06	3.13E-12	7.97E-13
0.40	8.32E-07	6.27E-08	1.27E-11	1.73E-13	5.92E-07	9.00E-13	2.24E-13
0.45	4.35E-07	2.94E-08	4.34E-12	5.25E-14	2.72E-07	2.91E-13	7.07E-14
0.50	2.37E-07	1.45E-08	1.61E-12	1.76E-14	1.32E-07	1.04E-13	2.47E-14
0.55	1.34E-07	7.46E-09	6.46E-13	6.39E-15	6.72E-08	4.01E-14	9.32E-15
0.60	7.83E-08	3.99E-09	2.75E-13	2.49E-15	3.57E-08	1.66E-14	3.77E-15
0.70	2.89E-08	1.26E-09	5.83E-14	4.48E-16	1.11E-08	3.34E-15	7.29E-16
0.80	1.16E-08	4.43E-10	1.46E-14	9.63E-17	3.88E-09	8.03E-16	1.68E-16
0.90	5.04E-09	1.70E-10	4.14E-15	2.34E-17	1.49E-09	2.22E-16	4.45E-17
1.00	2.32E-09	7.01E-11	1.31E-15	6.10E-18	6.13E-10	6.84E-17	1.30E-17

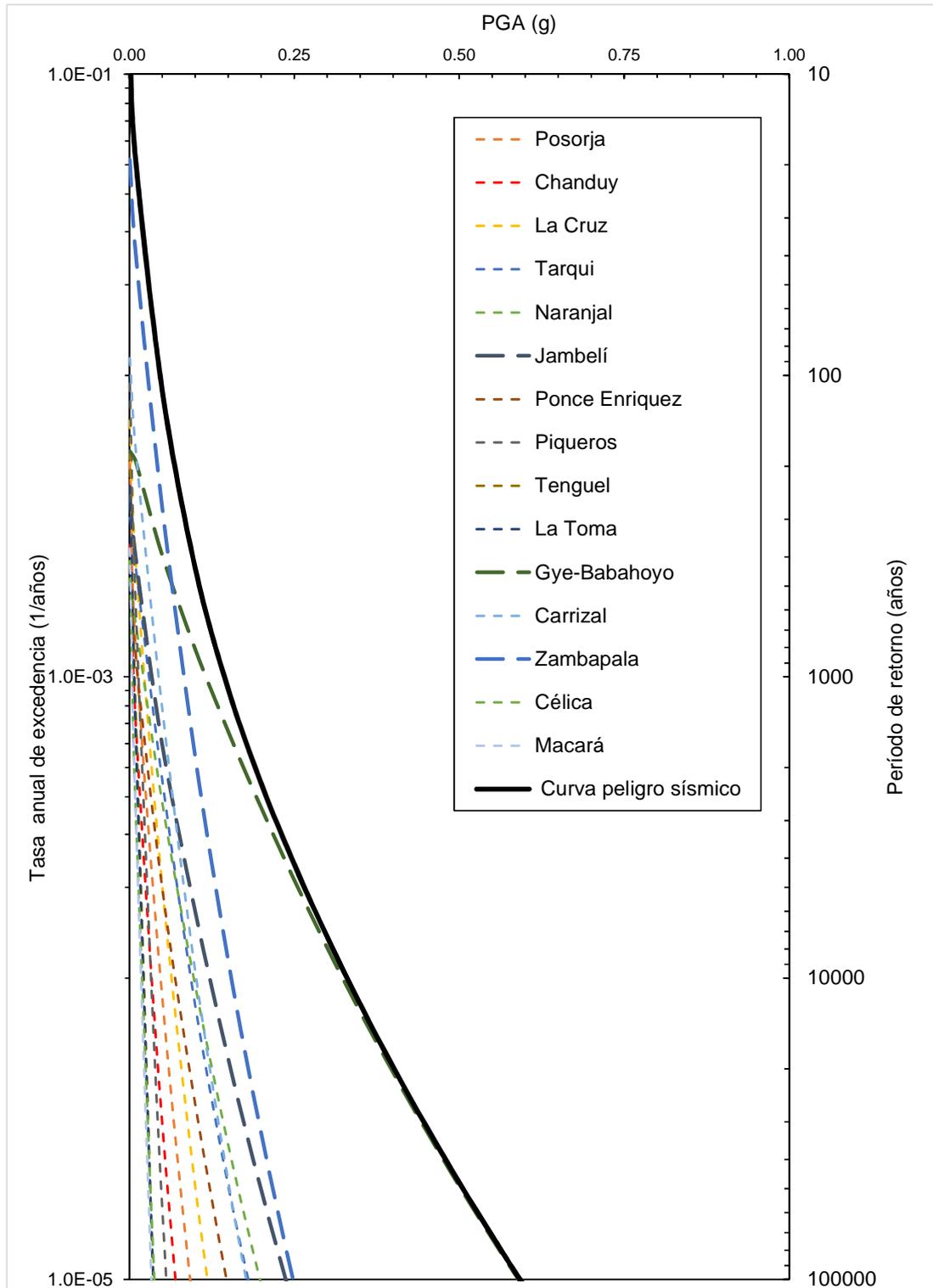
Fuente: (Autor, 2018)

Tabla 19 Tasa anual de excedencia y períodos de retorno para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de fallas corticales no segmentadas en HAZ45.2

PGA (g)	Tasa anual de excedencia total (1/yr)	Período de retorno (yr)
0.00	1.20E-01	8
0.01	5.14E-02	19
0.05	8.97E-03	112
0.10	2.30E-03	435
0.15	9.12E-04	1097
0.20	4.43E-04	2256
0.25	2.39E-04	4185
0.30	1.37E-04	7302
0.35	8.20E-05	12199
0.40	5.07E-05	19715
0.45	3.22E-05	31009
0.50	2.10E-05	47639
0.55	1.40E-05	71670
0.60	9.44E-06	105970
0.70	4.53E-06	220758
0.80	2.30E-06	435620
0.90	1.22E-06	821408
1.00	6.72E-07	1489150

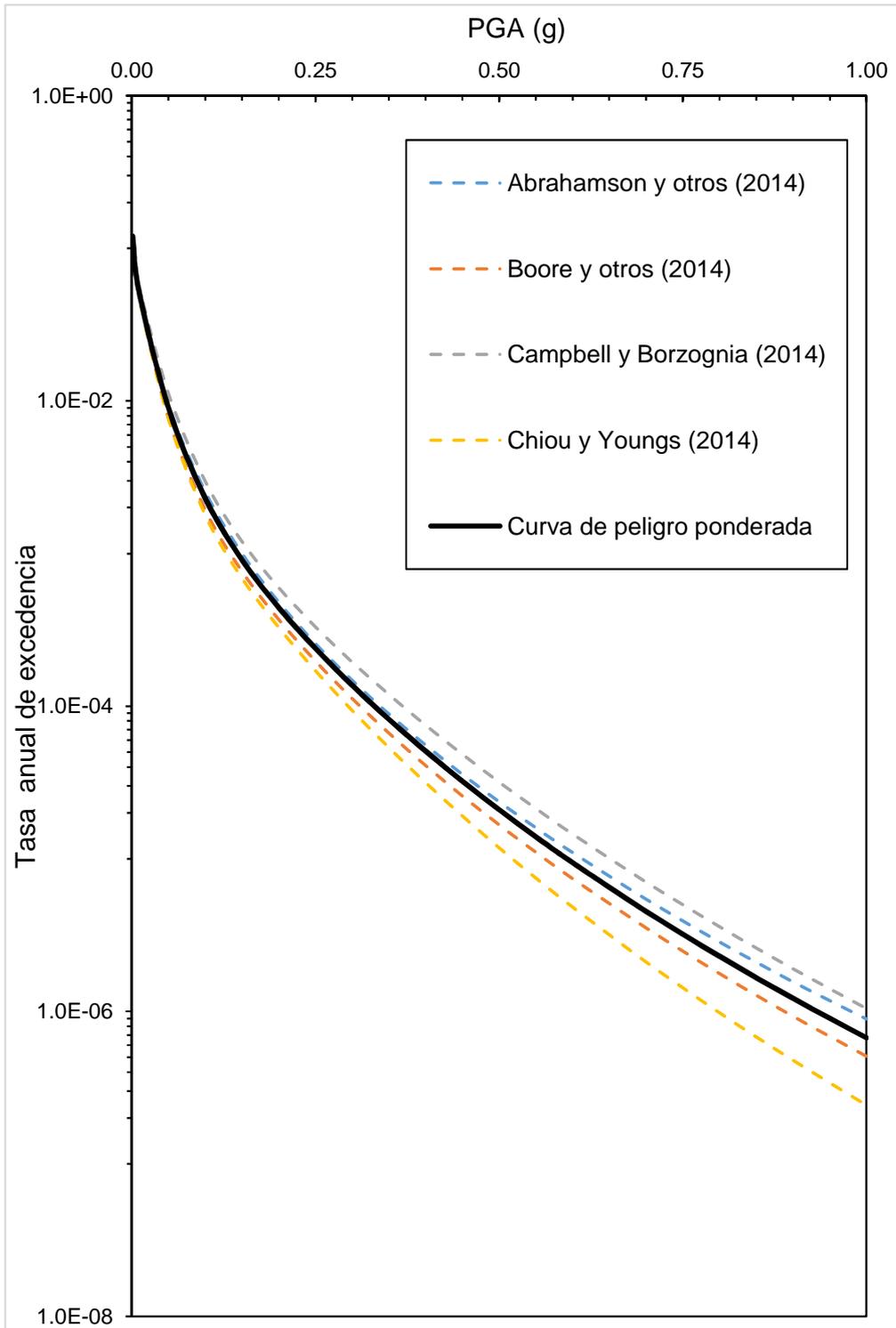
Fuente: (Autor, 2018)

A partir de la tasa anual de excedencia total y el período de retorno inherente se puede obtener las curvas de peligro sísmico, teniendo la tasa anual de excedencia en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas la intensidad, en este caso PGA. En la Gráfica 2 se muestra la curva de peligro sísmico asociada a las fuentes corticales no segmentadas, en distintos colores se presentan las diferentes fuentes pero sólo se ha remarcado las fallas Zambapala Guayaquil-Babahoyo y Jambelí puesto que estas están gobernando en el peligro sísmico del sitio por su proximidad a la ciudad de Guayaquil. Adicionalmente se han incluido la Gráfica 3 y Gráfica 4 que muestran las curvas de peligro sísmico en términos de tasa anual de excedencia y período de retorno respectivamente pero incluyendo los resultados generados por el programa para cada una de los modelos de predicción de movimiento sísmico tomado en cuenta.



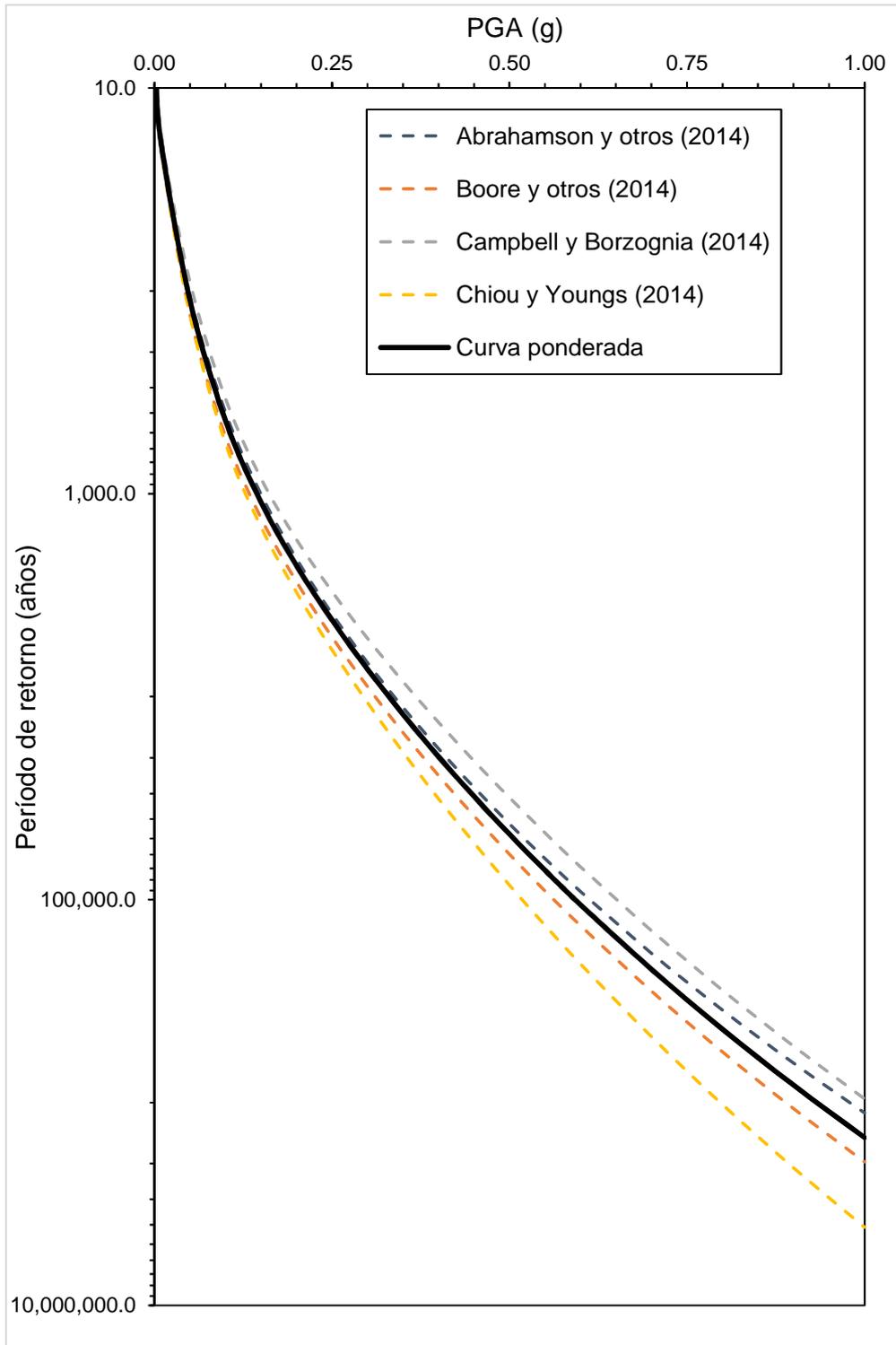
Gráfica 2 Curvas de peligro sísmico individual y total obtenidas a partir del modelamiento de fuentes sísmicas corticales no segmentadas en HAZ45.2

Fuente: (Autor, 2018)



Gráfica 3 Curvas de peligro sísmico para cada una de los modelos de predicción de movimiento sísmico considerados junto con la curva de peligro sísmico total

Fuente: (Autor, 2018)



Gráfica 4 Curvas de peligro sísmico en términos de período de retorno para cada una de los modelos de predicción de movimiento sísmico considerados junto con la curva de peligro sísmico total

Fuente: (Autor, 2018)

4.2. Fuentes sísmicas corticales segmentadas

Como se ha mencionado anteriormente para las fuentes sísmicas corticales segmentadas se han considerado distintos modelos de ruptura para incluir la probabilidad de que las fallas que componen tanto el sistema Colonche y Girón puedan romperse de forma individual o que todo el sistema se rompa. En el capítulo anterior se mostraron los modelos de ruptura considerados y la nomenclatura que se le asignó a cada una de ellos, por lo que a continuación se presentarán tres tablas, la Tabla 21 muestra la tasa anual de excedencia para cada intensidad evaluada y para cada modelo implementado en el sistema Colonche, en las columna final muestra la tasa anual de excedencia de la fuente considerando la ponderación que se le ha dado a cada modelo. Por otro lado la Tabla 20 presenta la tasa anual de excedencia para cada modelo considerado para el sistema de fallas Girón, así mismo muestra los resultados ponderados de la tasa anual de excedencia según el peso que se dio a cada modelo. Por último la Tabla 22 muestra la tasa anual de excedencia total para las fuentes sísmicas corticales segmentadas producto de la suma de los resultados ponderados, mostrados anteriormente, para cada una de las fuentes consideradas y también el período de retorno asociado a cada una de las intensidades evaluadas.

Tabla 20 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento del sistema de fallas Girón en HAZ45.2 considerando distintos modelos de ruptura

Tasa anual de excedencia sistema de fallas Girón			
PGA	Girón: No segmentadas	Girón: 2 segmentos	Tasa anual de excedencia ponderada
0.00	6.58E-03	2.19E-03	4.39E-03
0.01	2.87E-03	9.46E-04	1.91E-03
0.05	1.87E-04	1.07E-04	1.47E-04
0.10	1.63E-05	1.31E-05	1.47E-05
0.15	2.60E-06	2.41E-06	2.51E-06
0.20	5.93E-07	5.81E-07	5.87E-07
0.25	1.70E-07	1.70E-07	1.70E-07
0.30	5.74E-08	5.73E-08	5.73E-08
0.35	2.19E-08	2.15E-08	2.17E-08
0.40	9.14E-09	8.85E-09	8.99E-09
0.45	4.12E-09	3.90E-09	4.01E-09
0.50	1.98E-09	1.83E-09	1.90E-09
0.55	1.00E-09	9.03E-10	9.51E-10
0.60	5.28E-10	4.65E-10	4.97E-10
0.70	1.64E-10	1.38E-10	1.51E-10
0.80	5.74E-11	4.63E-11	5.18E-11
0.90	2.20E-11	1.71E-11	1.96E-11
1.00	9.14E-12	6.83E-12	7.98E-12

Fuente: (Autor, 2018)

Tabla 21 Tasa anual de excedencia para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento del sistema de fallas Colonche en HAZ45.2 considerando distintos modelos de ruptura

Tasa anual de excedencia sistema de fallas Colonche								
PGA	Colonche: 2A	Colonche: 2B	Colonche: 2C	Colonche: 3A	Colonche: 3B	Colonche: Individual	Colonche: No segmentada	Tasa anual de excedencia ponderada
0.00	7.24E-02	3.94E-02	2.50E-02	3.02E-02	2.06E-02	7.98E-02	7.98E-02	5.34E-02
0.01	2.60E-02	1.60E-02	1.66E-02	1.19E-02	1.06E-02	3.02E-02	3.02E-02	2.16E-02
0.05	3.42E-03	3.21E-03	5.23E-03	2.19E-03	2.86E-03	4.81E-03	4.81E-03	3.97E-03
0.10	9.86E-04	1.20E-03	2.15E-03	7.87E-04	1.14E-03	1.64E-03	1.64E-03	1.42E-03
0.15	3.89E-04	6.21E-04	1.06E-03	3.36E-04	6.02E-04	8.00E-04	8.00E-04	6.88E-04
0.20	1.74E-04	3.69E-04	5.87E-04	1.55E-04	3.63E-04	4.56E-04	4.56E-04	3.83E-04
0.25	8.43E-05	2.38E-04	3.50E-04	7.65E-05	2.35E-04	2.84E-04	2.84E-04	2.33E-04
0.30	4.34E-05	1.61E-04	2.22E-04	3.98E-05	1.60E-04	1.87E-04	1.87E-04	1.50E-04
0.35	2.35E-05	1.13E-04	1.48E-04	2.17E-05	1.12E-04	1.28E-04	1.28E-04	1.01E-04
0.40	1.33E-05	8.10E-05	1.02E-04	1.23E-05	8.07E-05	9.09E-05	9.09E-05	7.09E-05
0.45	7.80E-06	5.96E-05	7.24E-05	7.23E-06	5.94E-05	6.60E-05	6.60E-05	5.10E-05
0.50	4.72E-06	4.46E-05	5.28E-05	4.38E-06	4.45E-05	4.89E-05	4.89E-05	3.75E-05
0.55	2.94E-06	3.39E-05	3.93E-05	2.73E-06	3.39E-05	3.68E-05	3.68E-05	2.81E-05
0.60	1.87E-06	2.62E-05	2.98E-05	1.74E-06	2.61E-05	2.82E-05	2.82E-05	2.14E-05
0.70	8.12E-07	1.61E-05	1.78E-05	7.53E-07	1.61E-05	1.71E-05	1.71E-05	1.30E-05
0.80	3.78E-07	1.03E-05	1.12E-05	3.50E-07	1.03E-05	1.09E-05	1.09E-05	8.19E-06
0.90	1.87E-07	6.78E-06	7.27E-06	1.73E-07	6.77E-06	7.12E-06	7.12E-06	5.35E-06
1.00	9.73E-08	4.59E-06	4.88E-06	8.95E-08	4.59E-06	4.80E-06	4.80E-06	3.60E-06

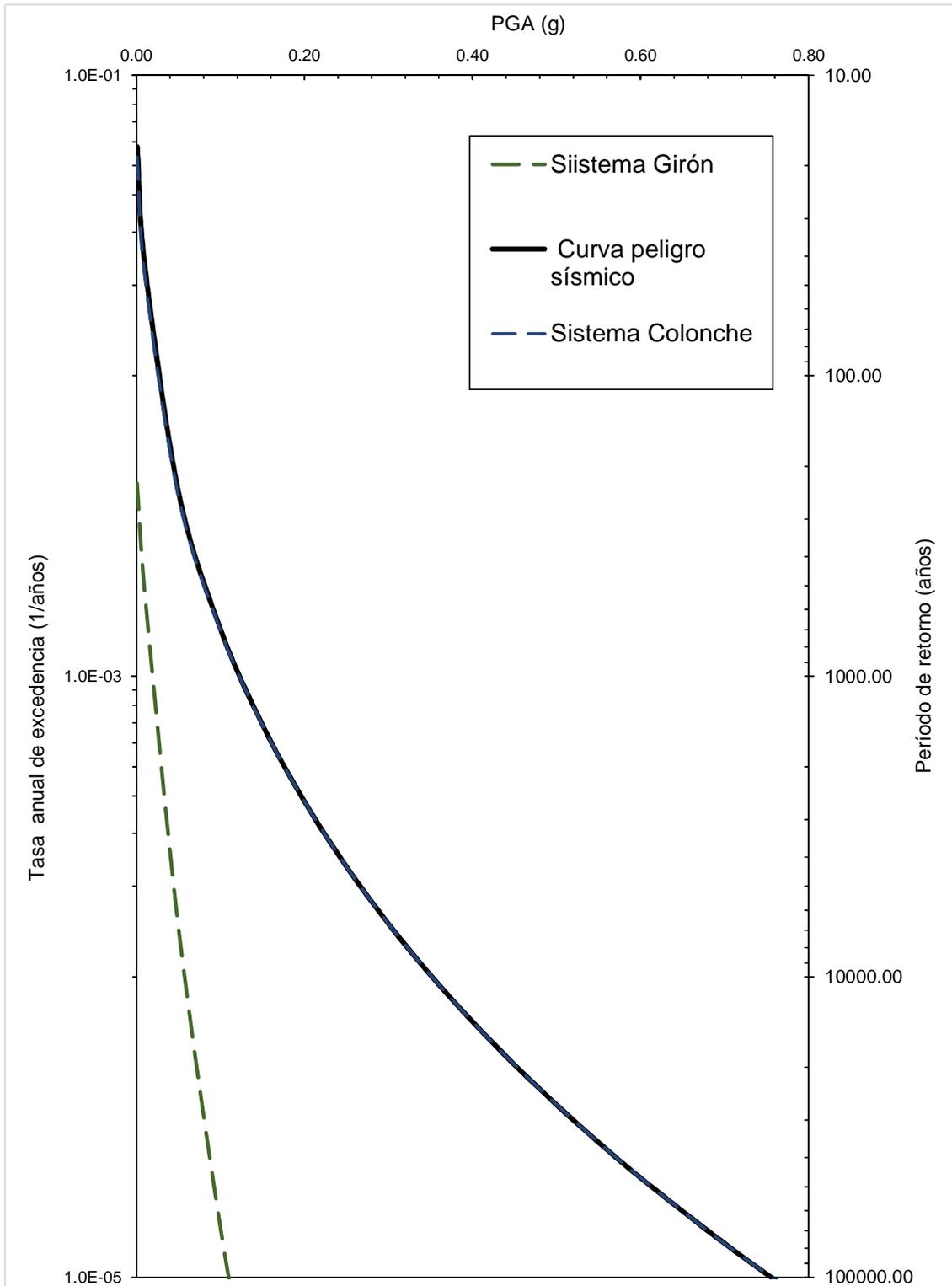
Fuente: (Autor, 2018)

Tabla 22 Tasa anual de excedencia total para las fuentes sísmicas corticales segmentadas obtenidas a través del modelamiento de las fuentes en HAZ45.2

PGA	Sistema Colonche	Siistema Girón	Tasa anual de excedencia (1/yr)
0.00	5.34E-02	4.39E-03	5.78E-02
0.01	2.16E-02	1.91E-03	2.35E-02
0.05	3.97E-03	1.47E-04	4.12E-03
0.10	1.42E-03	1.47E-05	1.44E-03
0.15	6.88E-04	2.51E-06	6.90E-04
0.20	3.83E-04	5.87E-07	3.83E-04
0.25	2.33E-04	1.70E-07	2.33E-04
0.30	1.50E-04	5.73E-08	1.50E-04
0.35	1.01E-04	2.17E-08	1.01E-04
0.40	7.09E-05	8.99E-09	7.09E-05
0.45	5.10E-05	4.01E-09	5.10E-05
0.50	3.75E-05	1.90E-09	3.75E-05
0.55	2.81E-05	9.51E-10	2.81E-05
0.60	2.14E-05	4.97E-10	2.14E-05
0.70	1.30E-05	1.51E-10	1.30E-05
0.80	8.19E-06	5.18E-11	8.19E-06
0.90	5.35E-06	1.96E-11	5.35E-06
1.00	3.60E-06	7.98E-12	3.60E-06

Fuente: (Autor, 2018)

Análogamente a lo hecho para las fuentes sísmicas corticales no segmentadas se presenta a continuación en la Gráfica 5 la curva de peligro sísmico que muestra la tasa anual de excedencia total y el período de retorno en el eje de las ordenadas y el PGA en porcentaje de la gravedad en el eje de las abscisas, las tasas anuales de excedencia graficadas son las mostradas en la Tabla 22. Debe decirse que en la gráfica no puede verse a simple vista la curva de peligro sísmico del Sistema Colonche y esto se debe a que por su cercanía al sitio la curva de peligro total es básicamente la curva de peligro obtenida para el sistema Colonche.



Gráfica 5 Curvas de peligro sísmico total e individuales obtenidas a partir del modelamiento de los sistemas de fallas Girón y Colonche en HAZ45.2

Fuente: (Autor, 2018)

4.3. Zona de subducción

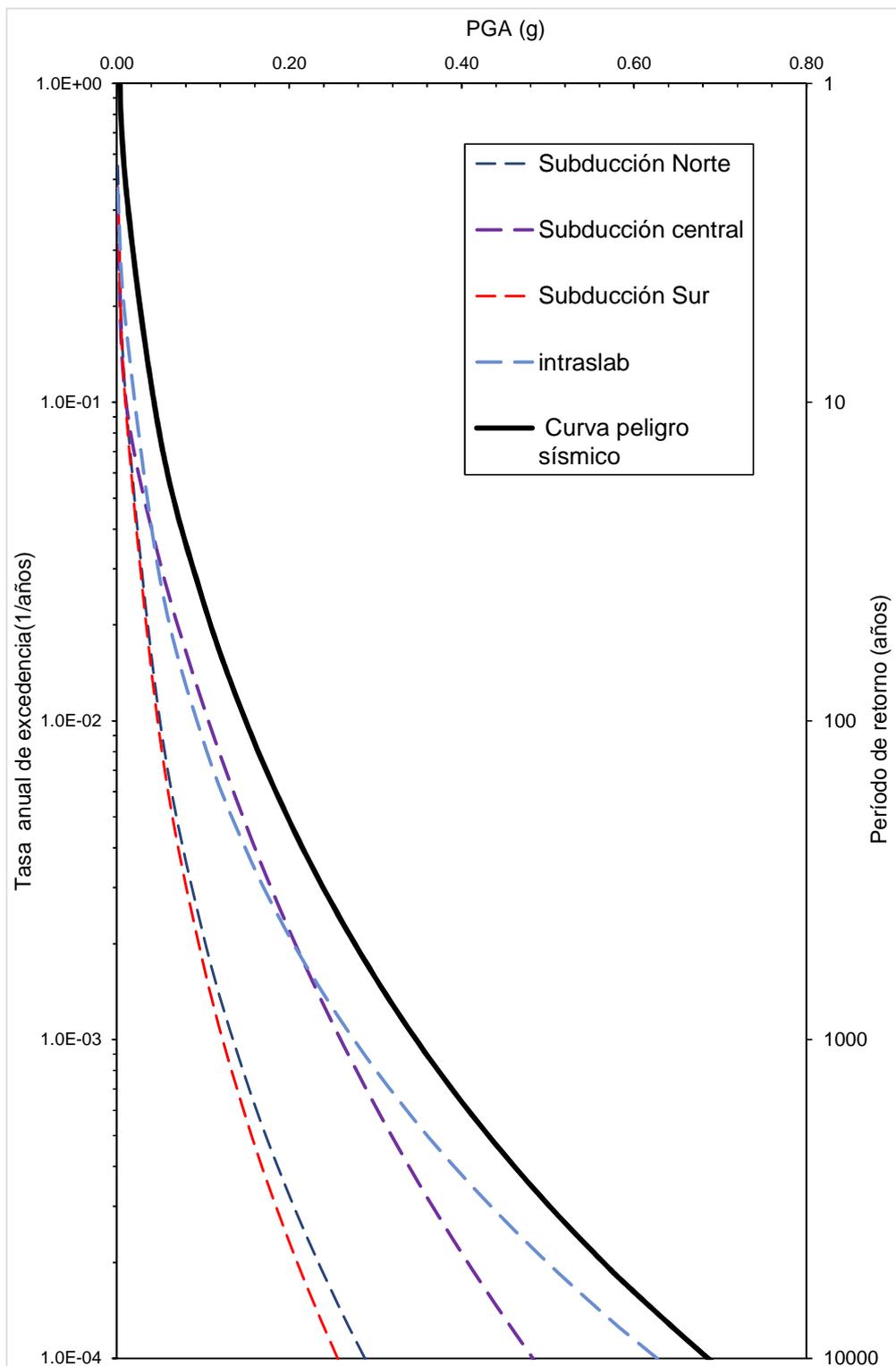
Se obtuvieron las tasas anuales de excedencia para las tres zonas de megathrust y las zonas de intraslab implementadas y descritas en el capítulo anterior. Cabe recalcar que es en esta zona es donde se espera que provengan los sismos que generen mayores intensidades en el sitio de estudio, es decir que gobiernen el peligro sísmico para altas intensidades y altos períodos de retorno. A continuación en la Tabla 23 se muestran los valores de tasa anual de excedencia encontrados para cada zona de subducción, en las columnas finales se presenta la tasa anual de excedencia totales y los períodos de retorno para cada intensidad evaluada.

Tabla 23 Tasa anual de excedencia y período de retorno para distintos niveles de intensidades obtenidas a partir del modelamiento de las zonas de subducción Norte, Central y Sur en HAZ45.2

PGA	Tasa anual de excedencia zona de subducción				Total (1/yr)	Periodo de retorno (yr)
	Subducción Norte	Subducción central	Subducción Sur	intraslab		
0.00	5.51E-01	4.09E-01	4.73E-01	4.68E-01	1.90E+00	0.53
0.01	1.06E-01	1.03E-01	9.91E-02	1.79E-01	4.87E-01	2
0.05	9.96E-03	3.14E-02	8.78E-03	2.78E-02	7.79E-02	13
0.10	2.15E-03	1.12E-02	1.75E-03	8.67E-03	2.38E-02	42
0.15	7.48E-04	4.69E-03	5.67E-04	3.92E-03	9.92E-03	101
0.20	3.24E-04	2.20E-03	2.32E-04	2.11E-03	4.87E-03	205
0.25	1.61E-04	1.13E-03	1.09E-04	1.26E-03	2.65E-03	377
0.30	8.67E-05	6.17E-04	5.62E-05	8.03E-04	1.56E-03	640
0.35	5.00E-05	3.56E-04	3.11E-05	5.39E-04	9.76E-04	1025
0.40	3.03E-05	2.14E-04	1.82E-05	3.76E-04	6.39E-04	1566
0.45	1.91E-05	1.34E-04	1.11E-05	2.70E-04	4.34E-04	2303
0.50	1.24E-05	8.61E-05	7.00E-06	1.99E-04	3.04E-04	3284
0.55	8.31E-06	5.69E-05	4.56E-06	1.50E-04	2.19E-04	4559
0.60	5.69E-06	3.85E-05	3.05E-06	1.14E-04	1.62E-04	6187
0.70	2.84E-06	1.87E-05	1.45E-06	6.98E-05	9.28E-05	10776
0.80	1.51E-06	9.68E-06	7.41E-07	4.46E-05	5.66E-05	17679
0.90	8.44E-07	5.28E-06	4.00E-07	2.96E-05	3.61E-05	27673
1.00	4.93E-07	3.02E-06	2.26E-07	2.02E-05	2.40E-05	41712

Fuente: (Autor, 2018)

A partir de estos resultados mostrados se obtuvieron las curvas de peligro sísmico graficando los valores de tasa anual de excedencia en las ordenadas y la intensidad PGA en porcentaje de aceleración de gravedad en el eje de abscisas. En la Gráfica 6 se muestra las curvas de peligro sísmico tanto total como de cada una de las zonas de subducción consideradas.



Gráfica 6 Curvas de peligro sísmico individual y total obtenidas a partir del modelamiento de zonas de subducción en HAZ45.2

Fuente: (Autor, 2018)

4.4. Resultados totales

Una vez implementadas en el programa HA45.2 todas las fuentes consideradas y haber obtenido las tasas anuales de excedencia de cada una de ellas es posible determinar la curva de peligro sísmico final para el sitio sumando las tasas anuales de excedencia de todas las fuentes para cada una de las intensidades evaluadas, para luego, a partir de estos resultados totales determinar cuáles serían los niveles de peligro sísmico que afectarán al sitio de estudio. A continuación se presentará en la Tabla 24 un resumen de las tasas anuales de excedencia encontradas para cada una de los grupos de fuentes considerados en el estudio Para este resumen se han agrupado todas las tasas anuales de excedencia de las fuentes corticales (segmentadas y no segmentadas) en una sola columna debido a que aunque tienen un tratamiento diferente comparten el mismo ambiente tectónico.

Tabla 24 Resumen de tasas anuales de excedencia para cada intensidad evaluada de todas las fuentes sísmicas implementadas en el programa HAZ45.2

PGA	Tasa anual de excedencia				
	Fuentes corticales	Subducción Norte	Subducción central	Subducción Sur	Intraslab
0.00	1.61E-01	5.51E-01	4.09E-01	4.73E-01	4.68E-01
0.01	6.87E-02	1.06E-01	1.03E-01	9.91E-02	1.79E-01
0.05	1.22E-02	9.96E-03	3.14E-02	8.78E-03	2.78E-02
0.10	3.45E-03	2.15E-03	1.12E-02	1.75E-03	8.67E-03
0.15	1.46E-03	7.48E-04	4.69E-03	5.67E-04	3.92E-03
0.20	7.38E-04	3.24E-04	2.20E-03	2.32E-04	2.11E-03
0.25	4.14E-04	1.61E-04	1.13E-03	1.09E-04	1.26E-03
0.30	2.47E-04	8.67E-05	6.17E-04	5.62E-05	8.03E-04
0.35	1.55E-04	5.00E-05	3.56E-04	3.11E-05	5.39E-04
0.40	1.01E-04	3.03E-05	2.14E-04	1.82E-05	3.76E-04
0.45	6.81E-05	1.91E-05	1.34E-04	1.11E-05	2.70E-04
0.50	4.71E-05	1.24E-05	8.61E-05	7.00E-06	1.99E-04
0.55	3.34E-05	8.31E-06	5.69E-05	4.56E-06	1.50E-04
0.60	2.42E-05	5.69E-06	3.85E-05	3.05E-06	1.14E-04
0.70	1.33E-05	2.84E-06	1.87E-05	1.45E-06	6.98E-05
0.80	7.83E-06	1.51E-06	9.68E-06	7.41E-07	4.46E-05
0.90	4.82E-06	8.44E-07	5.28E-06	4.00E-07	2.96E-05
1.00	3.09E-06	4.93E-07	3.02E-06	2.26E-07	2.02E-05

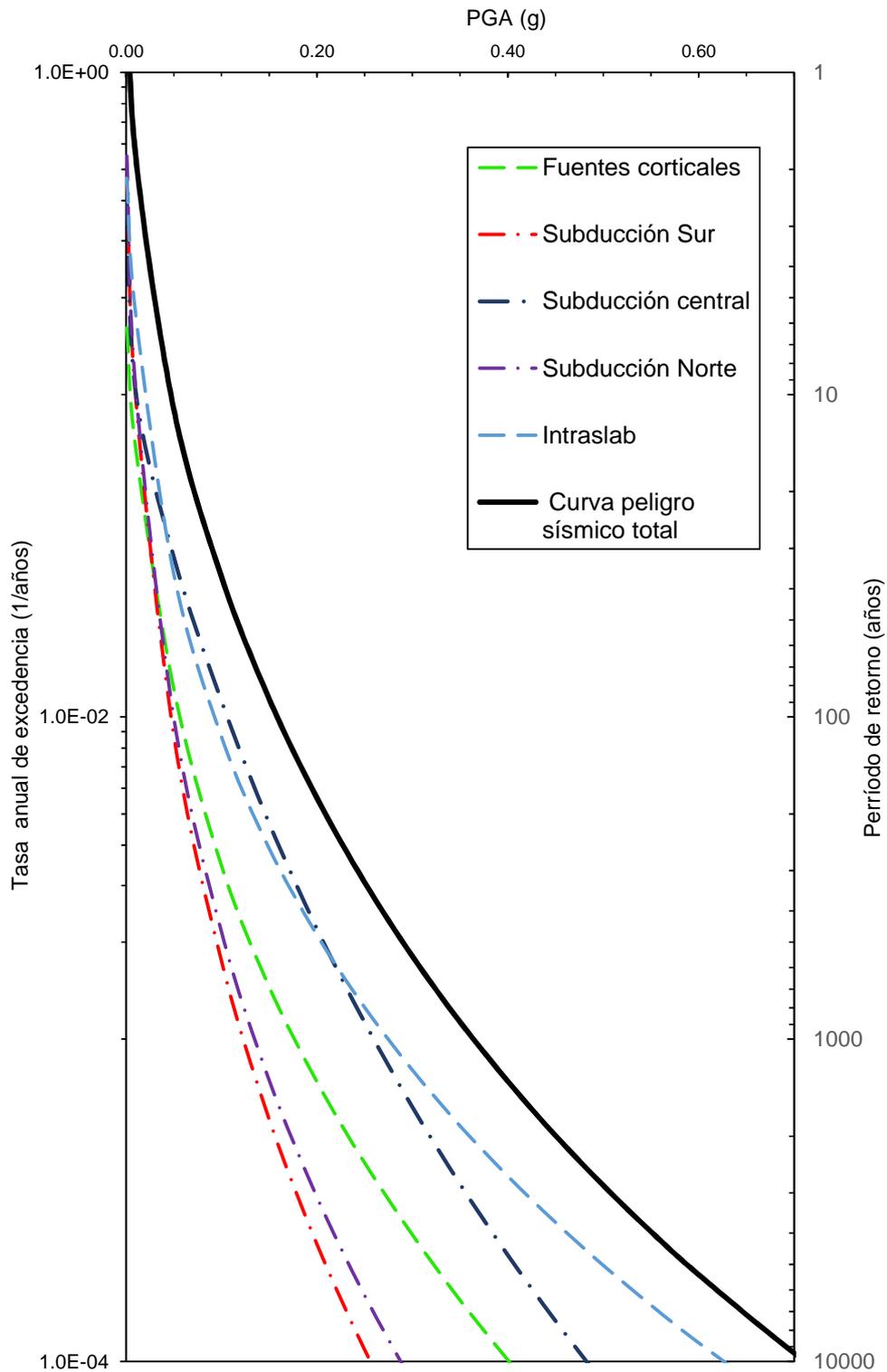
Fuente: (Autor, 2018)

Sumando cada una de estas filas, es decir la tasa anual de excedencia encontrada para cada intensidad, se pudo obtener la tasa anual de excedencia total del estudio para cada una de las intensidades. Estos valores serán mostrados a continuación en la Tabla 25 junto con el período de retorno estimado para cada una de las intensidades en el sitio de estudio, con ello se han construido las curvas de peligro sísmico tanto en términos de tasa anual de excedencia como de período de retorno, estas curvas son presentadas en la Gráfica 7.

Tabla 25 Tasa de anual de excedencia y período de retorno total obtenidas a través del modelamiento de fuentes corticales y de subducción y su respectiva implementación en el programa HAZ45.2

PGA	Tasa anual de excedencia total (1/yr)	Período de retorno (yr)
0.00	2.06E+00	0
0.01	5.55E-01	2
0.05	9.02E-02	11
0.10	2.72E-02	37
0.15	1.14E-02	88
0.20	5.61E-03	178
0.25	3.07E-03	326
0.30	1.81E-03	553
0.35	1.13E-03	884
0.40	7.40E-04	1352
0.45	5.02E-04	1991
0.50	3.52E-04	2844
0.55	2.53E-04	3957
0.60	1.86E-04	5383
0.70	1.06E-04	9421
0.80	6.44E-05	15529
0.90	4.10E-05	24414
1.00	2.71E-05	36947

Fuente: (Autor, 2018)



Gráfica 7 Curvas de peligro sísmico total obtenida a partir del modelamiento de fuentes corticales y de subducción y su respectiva implementación en el programa HAZ45.2

Fuente: (Autor, 2018)

Puede observarse en las curvas presentadas que para el sitio escogido (Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil) las fuentes que están gobernando el peligro sísmico son las fuentes de subducción (megathrust e intraslab), en especial para altos períodos de retorno. En períodos de retorno bajos se puede observar que también hay una contribución importante de las fuentes corticales debido a su proximidad al sitio, especialmente de las fallas Guayaquil-Babahoyo, Zambapala-Lechuza y Sistema Colonche, como se pudo observar anteriormente.

Una vez la curva de peligro sísmico final para el sitio de estudio es posible determinar las respectivas amenazas sísmicas en el sitio en función del período de retorno. NEC (2015) establece 4 niveles de amenaza sísmica que serán enlistadas a continuación:

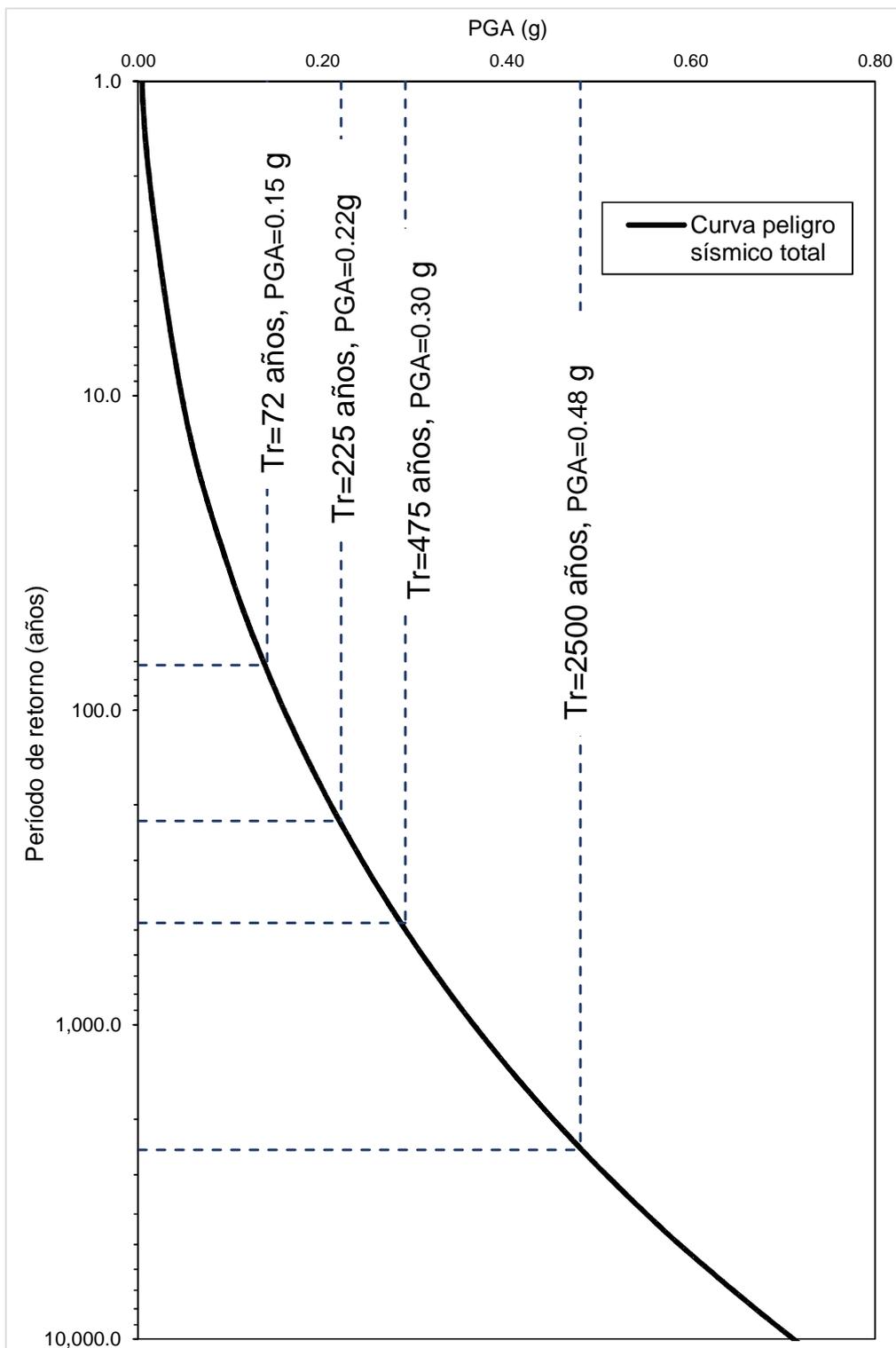
- Amenaza frecuente ($T_r=72$ años)
- Amenaza ocasional ($T_r= 225$ años)
- Amenaza rara ($T_r=475$ años)
- Amenaza muy rara ($T_r=2500$ años)

Tabla 26 Niveles de amenaza sísmica en función del período de retornos especificados en NEC-15

Nivel de sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Período de retorno T_r (años)	Tasa anual de excedencia ($1/T_r$)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
3	Raro (severo)	10%	475	0.00211
4	Muy raro* (extremo)	2%	2 500	0.00040

Fuente: (NEC, 2015)

Por lo que al interceptar la curva de peligro sísmico obtenidas al implementar las fuentes corticales y de subducción en el programa HAZ45.2 en los períodos de retorno correspondientes a cada nivel de amenaza, fue posible determinar el valor del PGA esperado para el sitio de estudio en cada nivel especificado. A continuación se presenta en la Gráfica 8 los respectivos niveles de amenaza sísmica encontrados para el sitio de estudio.



Gráfica 8 Curva de peligro sísmico en términos de período de retorno para el sitio de estudio elegido con los respectivos niveles amenaza sísmica detallados en NEC-15

Fuente: (Autor, 2018)

Puede observarse que para un período de retorno de 475 años, decir una amenaza sísmica rara, se ha obtenido un PGA esperado de 0.30 g. A continuación en la Tabla 27 se hará un resumen de los PGA esperados para cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 27 PGAs esperados para cada nivel de amenaza sísmica encontradas a través del modelamiento e implementación en HAZ45.2 de fuentes corticales y de subducción para el sitio de estudio evaluado

Amenaza sísmica		$u(Sa>z)$	Tr (años)	PGA (%g)
1	Frecuente	0.01389	72	0.15
2	Ocasional	0.0044	225	22
3	Raro	0.00211	475	0.3
4	Muy raro	0.0004	2500	48

Fuente: (Autor, 2018)

5 CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se revisaron los estudios realizados por Eguez (2003) y GeoSísmica (2017), en donde se detallan las características geométricas y sísmicas de algunas de las fallas corticales más relevantes que podrían afectar un sitio en la costa ecuatoriana, así mismo se revisaron en los estudios citados las características de la zona de subducción frente a las costas del país para poder generar o seleccionar los parámetros necesarios para implementar las fuentes sísmicas escogidas en el programa HAZ45.2.
- Se escogió para el modelamiento en el programa HAZ45.2 un total de 17 fallas corticales, estas fueron divididas en dos grupos: segmentadas y no segmentadas, mientras que la zona de subducción fue dividida en zonas: norte, central, sur e intraslab, de acuerdo a las diferentes características geométricas y sísmicas que cada una de estos grupos presenta y que las diferencia una de otras.
- Para la implementación de la metodología del PSHA usando el programa HAZ45.2 en conjunto con las fuentes modeladas fue escogido como sitio de estudio la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Se encontraron las tasas anuales de excedencia de cada una de las fuentes escogiendo como parámetro de intensidad el PGA (Peak Ground Acceleration) medido en porcentaje de la aceleración de la gravedad. Las intensidades evaluadas fueron: 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00.
- Como resultado final del trabajo de titulación puede decirse que para el sitio escogido y en función de las fuentes modeladas se ha encontrado que para un período de retorno de 475 años se esperaría un PGA de 0.30 g para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Debe decirse que este PGA encontrado es únicamente representativo si solo existieran en el territorio nacional las fuentes presentadas en este estudio, por lo que de ninguna manera esta intensidad

encontrada debe ser tomada como un resultado concluyente del peligro sísmico en la ciudad de Guayaquil.

- Es recomendación del autor del presenta trabajo de titulación que se modelen más fuentes sísmicas, con el fin de que se pueda tener abarcado mayor cantidad de territorio nacional y poder generar mejores resultados de peligro sísmico usando el programa HAZ45.2 en diferentes ciudades del país.
- Otra recomendación válida es que se debería estudiar mejor las características geométricas y sísmicas de las fallas activas en el territorio nacional, así mismo como actualizar los catálogos sísmicos, con el fin de poder generar resultados cada vez más representativos de lo que está sucediendo en el país.

6 CAPÍTULO 6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahamson, N. A. (2013). *State of the practice of seismic hazard evaluation*.

Krammer. (1996).

Eguez, (2003). Base de datos y mapa de fallas y plegamientos del Cuaternario en el Ecuador y su zona costera.

Geosísmica, (2017). Site-specific Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Site response analysis for Puerto Bolivar, Machala, Ecuador.

Krammer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington.

McGuire, R. K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*.

Mora, 2018 Implementación de fuentes sísmicas del Ecuador en programa HAZ 45.2.

Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*, (94), 1-26.

7 CAPÍTULO 7- ANEXOS

Anexo 1 Archivos de fuente generados para las diferentes fuentes sísmicas consideradas

```
latoma
1.0      Prob Activity
1      Number of seg models
1.      wts for seg models
1      Number of segments
1      flags for seg model
01_latoma
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
55 0.0      dip, depth to top
2      Number of long/lat pts
79.40000 3.82500      long lat pts
79.50000 4.05000
3      Number of dip variations
30.0 55.0 80.0      dip variations
0.3 0.4 0.3      wt for dip variations
1      Number of b-values
0.91      b-values
1.      wts for b-values
0      Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0      wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3      Number of slip-rates
0.2 1.0 2.0      slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2      wts for slip rates
0      Number of rec. int.
0      Number moment rates
1      Number of mag recur models
0      mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
3      Number of fault widths
15 20 25      fault widths
0.3 0.4 0.3      wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0      Depth pdf model (0=uniform) and params
1      Number of max mags (fault width 1)
6.5      max mags
1.      wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0      minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0      rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0      rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1      Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1      Number of fault mech
1.0      fault mech
1.0      wts for fault mech
C:\summit\Babakou
```

Figura 23 Archivo de fuente falla La Toma

Fuente: (Autor, 2018)

```

GuyaquilBabahoyo
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
02 GuyaquilBabahoyo
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
90 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.40000 1.65000 long lat pts
79.60000 2.10000
1        Number of dip variations
0.       dip variations
1.       wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85     b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3     slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3   wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25  mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12       fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
7.1      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0  rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0  rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0.0      fault mech
1.0      wts for fault mech
0.00000

```

Figura 24 Archivo de fuente falla Guayaquil-Babahoyo

Fuente: (Autor, 2018)

```

Carrizal
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
03_Carrizal
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
90 0.0      dip, depth to top
3        Number of long/lat pts
80.17980 2.29010    long lat pts
80.20490 2.24190
80.46400 2.16010
3        Number of dip variations
60.0 75.0 90.0    dip variations
0.2 0.3 0.5      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0    wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3        slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of msg recur models
0        msg recur model (0=Y&C)
1.0      wts for msg recur model
0.5 1.0 0.25    mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0    Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
7.2      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0    rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0    rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0.0      fault mech
1.0      wts for fault mech

```

Figura 25 Archivo de fuente falla Carrizal

Fuente: (Autor, 2018)

```

04_Posorja
1 1 0. 0 0 source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0 aleatory seg wt
50.0 0.0 dip, depth to top
4 Number of long/lat pts
80.75420 2.94750 long lat pts
80.61200 3.04250
80.21860 2.86260
80.14060 2.86870
2 Number of dip variations
45.0 60.0 dip variations
0.5 0.5 wt for dip variations
1 Number of b-values
0.85 b-values
1. wts for b-values
0 Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3 Number of slip-rates
0.2 1.0 3 slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3 wts for slip rates
0 Number of rec. int.
0 Number moment rates
1 Number of mag recur models
0 mag recur model (0=Y&C)
1.0 wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1 Number of fault widths
12 fault widths
1 wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1 Number of max mags (fault width 1)
7.2 max mags
1. wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1 Number of fault mech models
1.0 wts for fault mech models
1 Number of fault mech
0.0 fault mech
1.0 wts for fault mech
Chanduy
1.0 Prob Activity
1 Number of seg models
1. wts for seg models
1 Number of segments

```

Figura 26 Archivo de fuente falla Posorja

Fuente: (Autor, 2018)

```

US_Chanduy
1 1 0. 0 0 source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0 aleatory seg wt
60.0 0.0 dip, depth to top
2 Number of long/lat pts
80.8778 2.3296 long lat pts
80.6958 2.4189
3 Number of dip variations
45.0 60.0 90.0 dip variations
0.2 0.3 0.5 wt for dip variations
1 Number of b-values
0.85 b-values
1. wts for b-values
0 Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3 Number of slip-rates
0.2 1.0 3 slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3 wts for slip rates
0 Number of rec. int.
0 Number moment rates
1 Number of mag recur models
0 mag recur model (0=Y&C)
1.0 wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1 Number of fault widths
12 fault widths
1 wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1 Number of max mags (fault width 1)
7.1 max mags
1. wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1 Number of fault mech models
1.0 wts for fault mech models
1 Number of fault mech
0.0 fault mech
1.0 wts for fault mech
La_Cruz
1.0 Prob Activity
1 Number of seg models
1. wts for seg models
1 Number of segments
1 flags for seg model
06_La_Cruz

```

Figura 27 Archivo de fuente falla Chanduy

Fuente: (Autor, 2018)

```

06_La_Cruz
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0            aleatory seg wt
90 0.0        dip, depth to top
4            Number of long/lat pts
80.1848 2.7684 long lat pts
80.2418 2.6834
80.4484 2.4892
80.5739 2.8687
1            Number of dip variations
0.          dip variations
1.          wt for dip variations
1            Number of b-values
0.85        b-values
1.          wts for b-values
0            Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3            Number of slip-rates
0.2 1.0 3    slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3  wts for slip rates
0            Number of rec. int.
0            Number moment rates
1            Number of mag recur models
0            mag recur model (0=Y&C)
1.0          wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1            Number of fault widths
12          fault widths
1            wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
2            Number of max mags (fault width 1)
7.0 7.3      max mags
0.5 0.5      wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1            Number of fault mech models
1.0          wts for fault mech models
1            Number of fault mech
0.0          fault mech

```

Figura 28 Archivo de fuente falla La Cruz

Fuente: (Autor, 2018)

```

07_Tarqui
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0           aleatory seg wt
70 0.0        dip, depth to top
2            Number of long/lat pts
79.1771  3.031  long lat pts
79.1269  2.9369
3            Number of dip variations
-70 90 70      dip variations
0.3 0.4 0.3    wt for dip variations
1            Number of b-values
0.85         b-values
1.          wts for b-values
0            Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3            Number of slip-rates
0.2 1.0 2.0    slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2    wts for slip rates
0            Number of rec. int.
0            Number moment rates
1            Number of mag recur models
0            mag recur model (0=Y&C)
1.0          wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25   mpdf1, mpdf2, mpdf3
1            Number of fault widths
12           fault widths
1            wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1            Number of max mags (fault width 1)
6.5         max mags
1.0         wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0  rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0  rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1            Number of fault mech models
1.0         wts for fault mech models
1            Number of fault mech
0.0         fault mech

```

Figura 29 Archivo de fuente falla Tarqui

Fuente: (Autor, 2018)

```

Naranjal
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
08_Naranjal
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
80 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.719  2.7851  long lat pts
79.5013  2.6043
2        Number of dip variations
45 60      dip variations
0.5 0.5    wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85     b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0  wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3      slip rates (mm/yr)
0.5 0.4 0.1    wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0     wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25   mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 0.0  Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.8     max mags
1.0     wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0   rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0   rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0     wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0.0     fault mech

```

Figura 30 Archivo de fuente falla Naranjal

Fuente: (Autor, 2018)

```

Jambeli
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.        wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
09_Jambeli
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
50 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.8437 2.8976 long lat pts
79.5243 2.6011
2        Number of dip variations
45 60      dip variations
0.5 0.5      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85      b-values
1.        wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3    slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3  wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
7.0      max mags
1.0      wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0.0      fault mech

```

Figura 31 Archivo de fuente falla Jambeli

Fuente: (Autor, 2018)

```

Ponce_Enriquez
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
10_Ponce_Enriquez
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
50 0.0      dip, depth to top
3        Number of long/lat pts
79.7766  3.1960  long lat pts
79.6817  2.9937
79.5365  2.8584
2        Number of dip variations
45 60      dip variations
0.5 0.5    wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85     b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3   slip rates (mm/yr)
0.5 0.4 0.1 wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0     wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12      fault widths
1       wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1       Number of max mags (fault width 1)
7.1    max mags
1.0    wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0  rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0  rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1       Number of fault mech models
1.0    wts for fault mech models
1       Number of fault mech
0.0    fault mech

```

Figura 32 Archivo de fuente falla Ponce Enriquez

Fuente: (Autor, 2018)

```

Piqueros
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
11_Piqueros
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
60 0.0      dip, depth to top
3        Number of long/lat pts
80.5000   3.4907 long lat pts
80.4738   3.3395
80.4586   3.2248
2        Number of dip variations
50 70      dip variations
0.5 0.5    wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85     b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
3.0 5.0 10.0 slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2 wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0     wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
12     fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.9     max mags
1.0     wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0     wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0.0     fault mech

```

Figura 33 Archivo de fuente falla Piqueros

Fuente: (Autor, 2018)

```

Tenguel
1.0          Prob Activity
1           Number of seg models
1.         wts for seg models
1           Number of segments
1           flags for seg model
12 Tenguel
1 1 0. 0 0   source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0        aleatory seg wt
50 0.0      dip, depth to top
3          Number of long/lat pts
80.4197 3.1399 long lat pts
80.5072 3.1482
80.5992 3.062
2          Number of dip variations
45 60      dip variations
0.5 0.5    wt for dip variations
1          Number of b-values
0.85      b-values
1.         wts for b-values
0          Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3          Number of slip-rates
0.2 1.0 3   slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3 wts for slip rates
0          Number of rec. int.
0          Number moment rates
1          Number of mag recur models
0          mag recur model (0=Y&C)
1.0       wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1          Number of fault widths
12        fault widths
1         wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1          Number of max mags (fault width 1)
6.4       max mags
1.0       wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1          Number of fault mech models
1.0       wts for fault mech models
1          Number of fault mech
0.0       fault mech

```

Figura 34 Archivo de fuente falla Tenguel

Fuente: (Autor, 2018)

```

Zambalapa-Lechuza
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
10_Zambapala-Lechuza
1 1 0. 0 0 source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0     aleatory seg wt
30 0.0  dip, depth to top
2       Number of long/lat pts
79.8645 2.6681 long lat pts
80.3537 3.1097
3       Number of dip variations
70.0 90.0 30.0 dip variations
0.3 0.4 0.3 wt for dip variations
1       Number of b-values
0.85   b-values
1.     wts for b-values
0       Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3       Number of slip-rates
3.0 5.0 10 slip rates (mm/yr)
0.3 0.4 0.3 wts for slip rates
0       Number of rec. int.
0       Number moment rates
1       Number of mag recur models
0       mag recur model (0=Y&C)
1.0    wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1       Number of fault widths
25     fault widths
1       wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1       Number of max mags (fault width 1)
6.9    max mags
1.     wts for max mags
5.0 0.5 0.4 0.4 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1       Number of fault mech models
1.0    wts for fault mech models
1       Number of fault mech
0.0    fault mech
1.0    wts for fault mech

```

Figura 35 Archivo de fuente falla Zambapala-Lechuza

Fuente: (Autor, 2018)

```

Macará
1.0          Prob Activity
1           Number of seg models
1.          wts for seg models
1           Number of segments
1           flags for seg model
14_Macará
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0         aleatory seg wt
55 0.0       dip, depth to top
2           Number of long/lat pts
79.9975  4.3707  long lat pts
79.811   4.0943
3           Number of dip variations
30.0 55.0 80.0      dip variations
0.3 0.4 0.3       wts for dip variations
1           Number of b-values
0.81         b-values
1.          wts for b-values
0           Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0    wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3           Number of slip-rates
0.2 1.0 2         slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2       wts for slip rates
0           Number of rec. int.
0           Number moment rates
1           Number of mag recur models
0           mag recur model (0=Y&C)
1.0         wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1           Number of fault widths
25          fault widths
1           wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0     Depth pdf model (0=uniform) and params
1           Number of max mags (fault width 1)
6.9         max mags
1.          wts for max mags
5.0 0.5 0.4 0.4 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0     rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0     rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1           Number of fault mech models
1.0         wts for fault mech models
1           Number of fault mech
1.0         fault mech
1.0         wts for fault mech

```

Figura 36 Archivo de fuente falla Macará

Fuente: (Autor, 2018)

```

Celica
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
13_Celica
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
55 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.752 3.9873  long lat pts
80.1184 4.2368
3        Number of dip variations
30.0 55.0 80.0      dip variations
0.3 0.4 0.3      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.81      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0    wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 2      slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25    mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
25      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0    Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
7.1      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.5 0.4 0.4 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0    rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0    rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
1.0      fault mech
1.0      wts for fault mech

```

Figura 37 Archivo de fuente falla Célica

Fuente: (Autor, 2018)

```

Girón_noreste
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
01_Girón_noreste
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
55 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.2573 3.0128  long lat pts
79.1644 3.1747
3        Number of dip variations
30.0 55.0 80.0      dip variations
0.3 0.4 0.3      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.81      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0      wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 2      slip rates (mm/yr)
0.4 0.4 0.2      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
25      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.7      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0      rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0      rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
-1.0      fault mech
1.0      wts for fault mech

```

Figura 38 Archivo de fuente falla Girón noroeste

Fuente: (Autor, 2018)

```

Girón_suroeste
1.0          Prob Activity
1           Number of seg models
1.          wts for seg models
1           Number of segments
1           flags for seg model
02_Girón_suroeste
1 1 0. 0 0   source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0         aleatory seg wt
55 0.0      dip, depth to top
2           Number of long/lat pts
79.3443 3.4391 long lat pts
79.2772 3.3158
3           Number of dip variations
30.0 55.0 80.0      dip variations
0.3 0.4 0.3        wt for dip variations
1           Number of b-values
0.81        b-values
1.          wts for b-values
0           Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0    wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3           Number of slip-rates
0.5 1.0 2         slip rates (mm/yr)
0.3 0.4 0.3        wts for slip rates
0           Number of rec. int.
0           Number moment rates
1           Number of mag recur models
0           mag recur model (0=Y&C)
1.0        wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1           Number of fault widths
25          fault widths
1           wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0    Depth pdf model (0=uniform) and params
1           Number of max mags (fault width 1)
6.7         max mags
1.          wts for max mags
5.0 0.05 0.1 0.1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0     rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0     rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1           Number of fault mech models
1.0        wts for fault mech models
2           Number of fault mech
-1.0 0         fault mech
0.5 0.5        wts for fault mech

```

Figura 39 Archivo de fuente falla Girón sureste

Fuente: (Autor, 2018)

```

Colonche_sur
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
01_Colonche_sur
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
60 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
79.7492 2.1719 long lat pts
80.0097 2.1791
3        Number of dip variations
45.0 60.0 90.0      dip variations
0.2 0.5 0.3      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0      wts for sr, act. rate, rec int, McRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3      slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
25      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.9      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.30 0.25 0.25 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0      rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0      rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
2        Number of fault mech
1.0 0.0      fault mech
0.5 0.5      wts for fault mech

```

Figura 40 Archivo de fuente falla Colonche sur

Fuente: (Autor, 2018)

```

Colonche_central
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
02_Colonche_central
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
60 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
80.0204 2.1772 long lat pts
80.2569 2.21036
3        Number of dip variations
45.0 60.0 90.0      dip variations
0.2 0.5 0.3      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0      wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3      slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
25      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.6      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.3 0.25 0.25 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0      rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0      rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
2        Number of fault mech
1.0 0.0      fault mech
0.5 0.5      wts for fault mech

```

Figura 41 Archivo de fuente falla Colonche central

Fuente: (Autor, 2018)

```

Colonche_norte
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
03_Colonche_norte
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
60 0.0      dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
80.3299 3.0621 long lat pts
80.5588 1.9611
3        Number of dip variations
45.0 60.0 90.0      dip variations
0.2 0.5 0.3      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.85      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0      wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3        Number of slip-rates
0.2 1.0 3      slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25      mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
25      fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
6.6      max mags
1.       wts for max mags
5.0 0.3 0.25 0.25 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0      rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0      rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
2        Number of fault mech
1.0 0.0      fault mech
0.5 0.5      wts for fault mech

```

Figura 42 Archivo de fuente falla Colonche norte

Fuente: (Autor, 2018)

```

Colonche_noroeste
1.0          Prob Activity
1           Number of seg models
1.         wts for seg models
1           Number of segments
1           flags for seg model
04_Colonche_noroeste
1 1 0. 0 0   source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0         aleatory seg wt
60 0.0       dip, depth to top
2           Number of long/lat pts
80.5270  1.8970  long lat pts
80.7242  1.6801
3           Number of dip variations
45.0 60.0 90.0       dip variations
0.2 0.5 0.3         wts for dip variations
1           Number of b-values
0.85        b-values
1.         wts for b-values
0           Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0     wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
3           Number of slip-rates
0.2 1.0 3         slip rates (mm/yr)
0.2 0.5 0.3       wts for slip rates
0           Number of rec. int.
0           Number moment rates
1           Number of mag recur models
0           mag recur model (0=Y&C)
1.0        wts for mag recur model
0.5 1.0 0.25     mpdf1, mpdf2, mpdf3
1           Number of fault widths
25          fault widths
1           wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0     Depth pdf model (0=uniform) and params
1           Number of max mags (fault width 1)
6.3         max mags
1.         wts for max mags
5.0 0.3 0.25 0.25 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0     rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0     rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1           Number of fault mech models
1.0        wts for fault mech models
2           Number of fault mech
1.0 0.0         fault mech
0.5 0.5         wts for fault mech

```

Figura 43 Archivo de fuente falla Colonche noroeste

Fuente: (Autor, 2018)

```

subduccion_norte
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
01_subduccion_norte
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
15 0         dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
78.66 -4.40    long lat pts
81.36 0.0
1        Number of dip variations
15       dip variations
1.0     wt for dip variations
1       Number of b-values
0.5     b-values
1.      wts for b-values
0       Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
1       Number of slip-rates
70      slip rates (mm/yr)
1.0     wts for slip rates
0       Number of rec. int.
0       Number moment rates
1       Number of mag recur models
0       mag recur model (0=Y&C)
1.0     wts for mag recur model
0.5 1 0.25    mpdf1, mpdf2, mpdf3
1       Number of fault widths
60      fault widths
1       wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
3       Number of max mags (fault width 1)
7.5 8.3 8.8   max mags
0.3 0.3 0.4   wts for max mags
8.0 0.15 1 1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0  rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0  rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1       Number of fault mech models
1.0     wts for fault mech models
1       Number of fault mech
0       fault mech
1       wts for fault mech

```

Figura 44 Archivo de fuente zona megathrust norte

Fuente: (Autor, 2018)

```

subducción_centro
1.0      Prob Activity
1        Number of seg models
1.       wts for seg models
1        Number of segments
1        flags for seg model
02_subducción_centro
1 1 0. 0 0      source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0      aleatory seg wt
15 0         dip, depth to top
2        Number of long/lat pts
81.36 0.0     long lat pts
81.70 2.9
1         Number of dip variations
15        dip variations
1.0      wt for dip variations
1        Number of b-values
0.5      b-values
1.       wts for b-values
0        Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
1        Number of slip-rates
70       slip rates (mm/yr)
1.0      wts for slip rates
0        Number of rec. int.
0        Number moment rates
1        Number of mag recur models
0        mag recur model (0=Y&C)
1.0      wts for mag recur model
0.5 1 0.25     mpdf1, mpdf2, mpdf3
1        Number of fault widths
60       fault widths
1        wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
1        Number of max mags (fault width 1)
8        max mags
1        wts for max mags
5.0 0.15 1 1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0   rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0   rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1        Number of fault mech models
1.0      wts for fault mech models
1        Number of fault mech
0        fault mech
1        wts for fault mech

```

Figura 45 Archivo de fuente zona megathrust central

Fuente: (Autor, 2018)

```

03_subducción_sur
1 1 0. 0 0 source type, atten type, sample step (km), dirflag, synflag
1.0 aleatory seg wt
15 0 dip, depth to top
2 Number of long/lat pts
81.70 2.9 long lat pts
82.0838 7.06
1 Number of dip variations
15 dip variations
1.0 wt for dip variations
1 Number of b-values
0.5 b-values
1. wts for b-values
0 Number of act rates
1.0 0.0 0.0 0.0 wts for sr, act. rate, rec int, MoRate branches
1 Number of slip-rates
70 slip rates (mm/yr)
1.0 wts for slip rates
0 Number of rec. int.
0 Number moment rates
1 Number of mag recur models
0 mag recur model (0=Y&C)
1.0 wts for mag recur model
0.5 1 0.25 mpdf1, mpdf2, mpdf3
1 Number of fault widths
60 fault widths
1 wts for fault widths
0 0.0 0.0 0.0 Depth pdf model (0=uniform) and params
3 Number of max mags (fault width 1)
7.5 8.3 8.8 max mags
0.3 0.3 0.4 wts for max mags
5.0 0.15 1 1 1 1 0.0 minmag, magstep, hxStep, hzStep, nRupArea, nRupWidth, minDepth
-4.00 1.0 0.0 rupArea coeff: a, b, sigma in log10 units
-2.15 0.5 0.0 rupWidth coeff: a, b, sigma in log10 units
1 Number of fault mech models
1.0 wts for fault mech models
1 Number of fault mech
0 fault mech
1 wts for fault mech

```

Figura 46 Archivo de fuente zona megathrust sur

Fuente: (Autor, 2018)

Anexo 2 Archivos de ingreso generados para las diferentes fuentes consideradas

```

Fuentes_corticales.txt
45.2          version of fault file
1.0 5.0 78.0 82.0    min max lat long
400.         maxdist
PEER Verification, Set 2 Test 1
1 1          nProb, nAttenType
0.0 8 0      period, max epsilon, dir flag
18
0.001 0.01 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
4           Number of GM Models for AttenType 1
8787 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVeradd, mixflag (Sadigh rock)
8922 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVeradd, mixflag (Sadigh rock)
8836 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVeradd, mixflag (Sadigh rock)
8797 0.0 0.0 0.25 0.0 0      jcalc, const1, const2, wt, SigVeradd, mixflag (Sadigh rock)
0           psCorFlag (0=no, 1=yes)
21          Number of deag mag values
5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0      deag mag
7           Number of deag dist values
0.0 20. 40. 60. 80.0 100. 200.      deag dist values
6           Number of deag eps values
-10. -2. 0. 1. 2. 10.      deag eps values
4           Number of deag dir values
0.0 0.10 0.40 2.0      deag dir values
0           soil amp
1           nSites
79.40 2.18 760.0 0.0481 0.250 0.6068 0.8 0 (sx, sy, Vs, DVs1.0, DVs1.5, DVs2.5, Vrup, FAR
Set2Test1_Sitel.out1
Set2Test1_Sitel.out2
Set2Test1_Sitel.out3
Set2Test1_Sitel.out4
Set2Test1_Sitel.out5
Set2Test1_Sitel.out6
Set2Test1_Sitel.out7

```

Figura 47 Archivo de ingreso para fallas corticales segmentadas y no segmentadas

Fuente: (Autor, 2018)

```

Fuentes_subducción.txt
45.2          version of fault file
0.00 7.0 77.0 82.0    min max lat long
500          maxdist
PEER Verification, Set 1 Test 10
1 1          nProb, nAttenType
0.0 8 0      period, max epsilon, dir flag
18
0.001 0.01 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
4          Number of GM Models for AttenType 1
310 0.0 0.0 0.2 0.0 0          jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
350 0.0 0.0 0.5 0.0 0          jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
251 0.0 0.0 1 0.2 0 0          jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
201 0.0 0.0 1 0.1 0          jcalc, const1, const2, wt, SigVaradd, mixflag (Sadigh rock)
0          psCorFlag (0=no, 1=yes)
5          Number of deag mag values
4.75 5.75 6.25 6.75 7.0      deag mag values
6          Number of deag dist values
0.0 10.0 20.0 50.0 100.0 250.0    deag dist values
6          Number of deag eps values
-10. -2. 0. 1. 2. 10.      deag eps values
4          Number of deag dir values
0.0 0.10 0.40 2.0          deag dir values
0          soil amp
1          nSites
79.40 2.18 760.0 0.0481 0.250 0.6068 0.8 0 (sx, sy, Vs, DVs1.0, DVs1.5, DVs2.5, Vrup, FAB
Set1Test10_Sitel.out1
Set1Test10_Sitel.out2
Set1Test10_Sitel.out3
Set1Test10_Sitel.out4
Set1Test10_Sitel.out5
Set1Test10_Sitel.out6
Set1Test10_Sitel.out7

```

Figura 48 Archivo de ingreso para zonas de subducción

Fuente: (Autor, 2018)



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Christian Marcelo Ramírez Carvajal**, con C.C: # 0930719596 autor del trabajo de titulación: **Modelación de peligro sísmico usando como herramienta el programa HAZ45.2 (segunda parte)** previo a la obtención del título de **Ingeniero civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 12 de Septiembre de 2018

f. _____

Nombre: **Ramírez Carvajal, Christian Marcelo**

C.C: **0930719596**



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Modelación de peligro sísmico usando como herramienta el programa HAZ45.2 (segunda parte)		
AUTOR	Christian Marcelo Ramírez Carvajal		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Roberto Xavier Luque Nuques		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultado de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	12 de septiembre de 2018	No. DE PÁGINAS:	126
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería sísmica		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Modelo sísmico, HAZ45.2, período de retorno		
RESUMEN/ABSTRACT: Los sismos son el fenómeno natural de mayor importancia para la práctica de la ingeniería civil debido a su alto poder destructivo y su incidencia directa en los proyectos de infraestructura. Ecuador se encuentra dentro de la zona conocida como “anillo de fuego del Pacífico” por lo que es un país en donde se vuelve primordial estudiar y aproximar los niveles de peligro sísmico a los que lo proyectos de ingeniería podrían estar expuestos en su vida útil, para este efecto el análisis probabilístico de peligro sísmico se ha vuelto la principal herramienta para evaluar los niveles de intensidad esperados en una zona en función de la actividad de las fuentes sísmicas circundantes. El programa HAZ45.2 desarrollado por el Dr. Normam Abrahamson es un software de libre acceso que permite modelar las fuentes sísmicas con sus respectivas características geométricas y sísmicas para implementar análisis probabilístico de peligro sísmico en un sitio cualquiera, este programa aparte de tener la ventaja de ser de libre acceso también ha sido validado con respecto a otros softwares comerciales del mercado que tienen considerables montos de adquisición. Es intención del presenta trabajo de titulación continuar con lo hecho por Eduardo Mora y modelar distintas fuentes sísmicas relevantes en la zona del Litoral ecuatoriano para poder generar resultados de peligro sísmico cada vez más aproximados para esta zona del país y adicionalmente generar resultados de peligro sísmico para la Facultad de Ingeniería de la UCSG en función de las fuentes modeladas.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR:	Teléfono: +593-4- 6016977	E-mail: christian.ramcar0105@gmail.com	
	Nombre: Clara Glas Cevallos		



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Teléfono: +593-4 -2206956
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA	
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	