

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESPECTROS ESPECÍFICOS PARA LA CIUDAD DE QUITO EN
FUNCIÓN DE FALLAS CIEGAS INVERSAS

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
ESTRUCTURAS

DIEGO MARCELO QUIZANGA MARTÍNEZ
diego.quizanga@est.epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PHD. ROBERTO AGUIAR FALCONÍ
rraguiar@espe.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. MSC. DIEGO SOSA CAIZA
diego87_16@hotmail.com

Quito, Octubre 2015

DECLARACIÓN

Yo Diego Marcelo Quizanga Martínez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diego Marcelo Quizanga Martínez

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Marcelo Quizanga Martínez, bajo nuestra supervisión.

**Ing. PhD. Roberto
Aguiar Falconí
DIRECTOR DE PROYECTO**

**Ing. MSc. Diego Andrés
Sosa Caiza
CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme salud y vida, porque siempre ha bendecido mi vida, porque en Él se puede confiar siempre.

A mi querida madre Rebeca, aunque ya no está conmigo sus enseñanzas y su amor estarán presentes en mi corazón durante toda mi vida.

A mi padre Vicente por ser mi ejemplo, mi amigo, porque siempre he podido contar con él.

Al Doctor Roberto Aguiar por confiar en mí y permitirme trabajar nuevamente junto a él en esta tesis.

Al Doctor Marcelo Asanza por los comentarios que realizó a este trabajo.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a los ingenieros Juan Carlos Singaicho, Sigifredo Díaz y Gustavo Barahona por todo lo que he aprendido de ellos.

A mis compañeros de la maestría ingenieros Diego Sosa y Eduardo López porque siempre me han apoyado.

A Pato, Vicente, Santi, Pepe y Rafa que son mi familia, y que siempre están a mi lado.

A mi amada esposa Denise Cavalcante porque su amor me dio fuerzas para no rendirme, porque su fuerza de voluntad me inspira y sus actitudes me empujan a seguir siempre adelante.

Y por último agradezco a mi pequeña hija María Victoria por ser el motor que mueve mi vida y mi más grande amor.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a la memoria de mi tío Marco Quizanga, quien siempre estuvo apoyándome en los momentos más difíciles de mi vida.

*“Siempre trataste.
Siempre fallaste.
No importa.
Trata de nuevo.
Falla de nuevo.
Falla mejor.”*

Samuel Beckett

CONTENIDO

DECLARACIÓN	1
CERTIFICACIÓN	2
AGRADECIMIENTO	3
DEDICATORIA	4
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
PRESENTACIÓN.....	17
Capítulo 1	1
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivos específicos.....	10
1.3 Alcance	12
1.4 Metodología	14
Capítulo 2	16
2 Fallas ciegas inversas de Quito	16
2.1 Sismicidad de Quito asociado a fallas ciegas.....	16
2.2 Descripción de las evidencias de fallas ciegas.....	23
2.3 Modelo de Fallas propuesto por Alvarado et al (2014)	29
2.4 Períodos de recurrencia hallados por Alvarado et al (2014).....	32
Capítulo 3	35
3 Modelos de movimiento fuerte	35
3.1 Introducción	35
3.2 Ecuaciones de atenuación (GMPE´s).....	41
3.3 Criterio de seleccion de ecuaciones de atenuación	45

3.4	Párametros usados en las ecuaciones de atenuación.....	47
3.4.1	Width (w), length (l).....	47
3.4.2	Style of faulting (SOF)	48
3.4.3	Pseudo-absolute acceleration response spectrum 5% damping (PSa_{ROT50})	50
3.4.4	Peak ground acceleration (g) (PGA).....	53
3.4.5	Moment magnitude (M).....	53
3.4.6	Depth to top of coesismic ruptures (Z_{TOR})	53
3.4.7	Sediment depth ($Z_{1.0}$).....	53
3.4.8	Depth to 2.5 km/s ($Z_{2.5}$).....	54
3.4.9	Rupture distance (R_{RUP}).....	54
3.4.10	Joyner-Boore distance (R_{JB}).....	54
3.4.11	Horizontal distance (R_X)	55
3.4.12	Hypocentral distance (R_{HYPO})	55
3.4.13	Shear wave velocity (V_{S30}).....	56
3.4.14	Aleatory variability (σ).....	56
Capítulo 4	.....	59
4	Modelo de Chiou y Youngs (2013).....	59
4.1	Introducción	59
4.2	Descripción de la base de datos de los modelos de Chiou y Youngs (2013).....	62
4.2.1	Complementos de metadatos	64
4.3	Descripción del modelo	68
4.4	Modelo aleatorio	73
4.5	Limitaciones del modelo.....	74
Capítulo 5	.....	75
5	Modelo de Campbell y Borzognia (2013)	75

5.1	Introducción	75
5.2	Descripción de la base de datos de los modelos de Campbell y Borzognia (2013).....	76
5.3	Descripción del modelo	78
5.3.1	Término de magnitud.....	81
5.3.2	Término de atenuación geométrica.....	81
5.3.3	Término de mecanismo de falla	81
5.3.4	Término de hanging wall.....	81
5.3.5	Término de respuesta superficial de sitio.....	82
5.3.6	Término de cuenca sedimentaria.....	83
5.3.7	Término de profundidad hipocentral	83
5.3.8	Término de buzamiento	83
5.3.9	Término de atenuación inelastica	84
5.4	Incertidumbre	84
5.5	Limitaciones del modelo.....	86
Capítulo 6	.....	87
6	Modelo de Abrahamson y Silva (2013)	87
6.1	Introducción	87
6.2	Descripción de la base de datos de los modelos de Abrahamson y Silva (2013)	88
6.2.1	Eventos no representativos de tectónica cortical	89
6.2.2	Monitoreo a largas distancias	89
6.2.3	Mediciones que no estaban en campo libre	90
6.2.4	Otros eventos eliminados	91
6.2.5	Eventos con niveles cuestionables de confianza y metadatos perdidos.....	91
6.3	Descripción del modelo.....	93

6.3.1	Modelo base	94
6.3.2	Modelo estilo de falla (SOF)	94
6.3.3	Modelo de respuesta de sitio	95
6.3.4	Modelo de escalamiento de hanging wall	95
6.3.5	Modelo de profundidad de falla	96
6.3.6	Modelo de profundidad de suelo	97
6.3.7	Modelo de escalamiento de réplicas	97
6.3.8	Modelo regional	97
6.4	Modelo aleatorio	98
6.5	Limitaciones del modelo	100
Capítulo 7	.....	101
7	Cálculo de espectros	101
7.1	Introducción	101
7.2	El área de estudio	102
7.2.1	Parámetros asociados al sitio	104
7.2.2	Velocidad media de corte Vs30 en Quito	106
7.2.3	La Malla obtenida	119
7.3	Espectros encontrados con el modelo CY13	120
7.4	Espectros encontrados con el modelo CB13	125
7.5	Espectros encontrados con el modelo ASK13	127
7.6	Espectros promedios	130
7.7	Espectros promedios y espectro NEC-2015	134
Capítulo 8	.....	144
8	Conclusiones y recomendaciones	144
8.1	Conclusiones y recomendaciones	144
8.2	Bibliografía	148
Anexos	.....	152

Anexo 1	153
Anexo 2	158
Anexo 3	164

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Localización evento sísmico registrado el 12 de Agosto del 2014.....	1
FIGURA 1.2 Casa en Calderón, afectada por el sismo de Agosto del 2014.....	2
FIGURA 1.3 Componentes del Riesgo.....	3
FIGURA 1.4 Edificio residencial en la ciudad de Quito, presenta columna corta.....	6
FIGURA 1.5 Zonificación estructural, estudio de Yepez et al.	7
FIGURA 1.6 Zonas de Estudio.....	12
FIGURA 2.1 Límites de placa	18
FIGURA 2.2 Condiciones Geodinámicas y tectónicas del Ecuador.....	21
FIGURA 2.3 Estratigrafía de afloramientos geológicos de la cuenca de Quito	22
FIGURA 2.4 Vista tridimensional de la cuenca de Quito	24
FIGURA 2.5 Vista tridimensional de la cuenca de Quito	25
FIGURA 2.6 Foto aérea de la ciudad de Quito.....	26
FIGURA 2.7 Nuevo mapa neotectónico de la ciudad de Quito y mapa geomórfico del segmento ILB.....	28
FIGURA 2.8 Segmentos de falla de la QFS	30
FIGURA 2.9 Ecuaciones de Wells y Coppersmith para estimar el área de Ruptura	31
FIGURA 2.10 Rutina wesnou.....	33
FIGURA 3.1 PGA para un evento en Perú.....	37
FIGURA 3.2 Procedimiento para DSHA.....	38
FIGURA 3.3 Procedimiento para PSHA	39
FIGURA 3.4 Ecuación de atenuación y PGA medidos vs distancia.....	45
FIGURA 3.5 Ángulos que definen el tipo de falla	48
FIGURA 3.6 Mecanismos de falla en función del rake	50
FIGURA 3.7 Relación entre SaRotD50/SaGMRotI50.....	52
FIGURA 3.8 Distancias usadas en ecuaciones de atenuación.....	55
FIGURA 4.1 Distribución de los epicentros incluidos en la base de datos de NGA-WEST2.....	60
FIGURA 4.2 Distribución de los eventos en función de su localización	61

FIGURA 4.3 Base de datos de Chiou y Youngs 2013 - Magnitud vs R_{RUP} (km) 64

FIGURA 4.4 Z_1 (m) vs V_{s30} (m/s) para California (CY13) 65

FIGURA 4.5 Z_{TOR} (km) vs M para California (CY13) 67

FIGURA 5.1 Magnitud vs R_{RUP} (km) (CB13) 78

FIGURA 6.1 Magnitud vs R_{RUP} (km)..... 92

FIGURA 7.1 Área de Estudio 102

FIGURA 7.2 Malla de estudio 103

FIGURA 7.3 Área de estudio y planos de falla 105

FIGURA 7.4 Mapa de V_{s30} región oriental de Estados Unidos 107

FIGURA 7.5 Estudios realizados por EPN 1994 y 2002 109

FIGURA 7.6 Estudios realizados por Metro de Quito para la determinación de V_{s30} 114

FIGURA 7.7 Estudios realizados por ERN12 115

FIGURA 7.8 Estudios realizados por ERN, PLANMAN, METRO sobre microzonificación de Valverde..... 118

FIGURA 7.9 Mallas usadas en función del factor V_{s30} adoptado 119

FIGURA 7.10 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Falla de Bellavista-Catequilla..... 121

FIGURA 7.11 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector norte 122

FIGURA 7.12 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro-norte 123

FIGURA 7.13 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro 123

FIGURA 7.14 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro-sur..... 124

FIGURA 7.15 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector sur 124

FIGURA 7.16 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector norte 125

FIGURA 7.17 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro-norte 125

FIGURA 7.18 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro. 126

FIGURA 7.19 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro-sur..... 126

FIGURA 7.20 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector sur 127

FIGURA 7.21 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector norte	128
FIGURA 7.22 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro-norte.....	128
FIGURA 7.23 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro.....	129
FIGURA 7.24 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro-sur.....	129
FIGURA 7.25 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector sur	130
FIGURA 7.26 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector norte	131
FIGURA 7.27 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector centro-norte	132
FIGURA 7.28 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector centro.	132
FIGURA 7.29 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13 .Sector centro-sur.....	133
FIGURA 7.30 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector sur.	133
FIGURA 7.31 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 460 m/s.....	136
FIGURA 7.32 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s.	136
FIGURA 7.33 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s	137
FIGURA 7.34 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s	137
FIGURA 7.35 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s.....	138
FIGURA 7.36 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 300 m/s.....	138
FIGURA 7.37 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s.	139
FIGURA 7.38 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s	139
FIGURA 7.39 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s.....	140

FIGURA 7.40 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s	140
FIGURA 7.41 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 200 m/s.....	141
FIGURA 7.42 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s.	141
FIGURA 7.43 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s	142
FIGURA 7.44 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s	142
FIGURA 7.45 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s	143

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Eventos cronológicamente sentidos en la ciudad de Quito.....	19
TABLA 2.2 Características del QFS	30
TABLA 3.1 Bases de datos a nivel mundial.	43
TABLA 3.2 Clasificación del tipo mecanismo de falla en función del rake.	49
TABLA 3.3 Terminología usada en las ecuaciones de atenuación	57
TABLA 3.4 Comparación de uso de parámetros en las GMPE's de este estudio	58
TABLA 6.1 Resumen de parámetros de exclusión (ASK13).....	88
TABLA 6.2 Parámetros usados para exclusión por monitoreo.....	89
TABLA 6.3 Parámetros usados para exclusión por ubicación del instrumento	90
TABLA 7.1 Clasificación de los perfiles de suelo S1 a S3 según el CEC-2000.....	110
TABLA 7.2 Clasificación de los perfiles de suelo según NEC-2015.....	112
TABLA 7.3 Valores de Vs30 obtenidos en diferentes estudios	116

RESUMEN

El sistema de fallas de Quito se extiende a lo largo de 60 km en la región internadina.

El modelo neotectónico propuesto por Alexandra Alvarado describe este sistema de fallas. El modelo neotectónico basado en las características geomorfológicas del sistema de fallas de Quito, considera la ruptura de segmentos individuales de la falla como un escenario probable. El modelo neotectónico considera 5 segmentos para el sistema de fallas de Quito que son: Puengasí, Ilumbisí-La Bota, Carcelén-El Inca, Bellavista-Catequilla y Tangahuilla.

Con la información del modelo neotectónico y mediante el uso de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte se evalúa el peligro en la ciudad de Quito.

Se usan los modelos desarrollados por Abrahamson et al (2013); Chiou and Youngs (2013); Campbell y Borzognia (2013); los cuales son válidos para estimar movimientos fuertes de suelo en regimen cortical.

Los modelos proveen ecuaciones para determinar espectros de aceleración con 5 % de amortiguamiento, se obtienen así espectros de pseudoaceleración para 5 zonas de Quito (norte, centro-norte, centro, centro-sur y sur) usando diferentes parámetros de suelo.

ABSTRACT

The Quito Fault System (QFS) extends over 60 km in the Interandean region. The neotectonic model of Quito proposed by Alexandra Alvarado describes the Quito fault system (QFS). The neotectonic model based in geomorphological characteristics of Quito fault system, takes into account the rupture of individual segments as a probable scenario. The neotectonic model regards 5 segments for the QFS that are: Puengasí, Ilumbisí-La Bota, Carcelén-El Inca, Bellavista-Catequilla and Tangahuilla.

The neotectonic model's information and Ground Motion Peak Equations (GMPE's) are used to calculate the seismic hazard in Quito.

Models developed by Abrahamson et al (2013); Chiou & Youngs (2013); and Campbell & Borzognia (2013); which are valid for estimating ground motions from shallow continental earthquakes are used.

Models provides predictive equations for the orientation independent average horizontal component of ground motion. Equations are provided for 5% damped pseudo-spectral acceleration.

Pseudo-spectral acceleration for different soil conditions in 5 zones of Quito (North, North Central, Central, South Central and South) are obtained.

PRESENTACIÓN

Esta tesis está organizada en ocho capítulos como se muestran a continuación:

Capítulo 1: Introducción.- Presenta la motivación por la que se realiza este estudio, además se presentan los objetivos y alcance propuestos, finalmente también se presenta brevemente el contenido y contribuciones.

Capítulo 2: Fallas ciegas inversas de Quito.- Detalla el modelo neotectónico de la región de Quito obtenido por Alvarado et al que servirá como base para la obtención de los espectros.

Capítulo 3: Modelos de movimiento fuerte.- Presenta los parámetros usados en las ecuaciones de atenuación y los criterios de selección de los modelos de atenuación.

Capítulo 4: Modelo de Chiou y Youngs (2013).- Detalla los parámetros usados en la ecuación de atenuación de Chiou y Youngs, su base de datos y su modelo aleatorio.

Capítulo 5: Modelo de Campbell y Borzognia (2013).- Detalla los parámetros usados en la ecuación de atenuación de Campbell y Borzognia, su base de datos y su modelo aleatorio.

Capítulo 6: Modelo de Abrahamson y Silva (2013).- Detalla los parámetros usados en la ecuación de atenuación de Abrahamson y Silva, su base de datos y su modelo aleatorio.

Capítulo 7: Cálculo de espectros.- Detalla la forma en que se han obtenido los espectros a partir de las ecuaciones de atenuación seleccionadas, muestra los resultados obtenidos.

Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones.- Se proponen las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

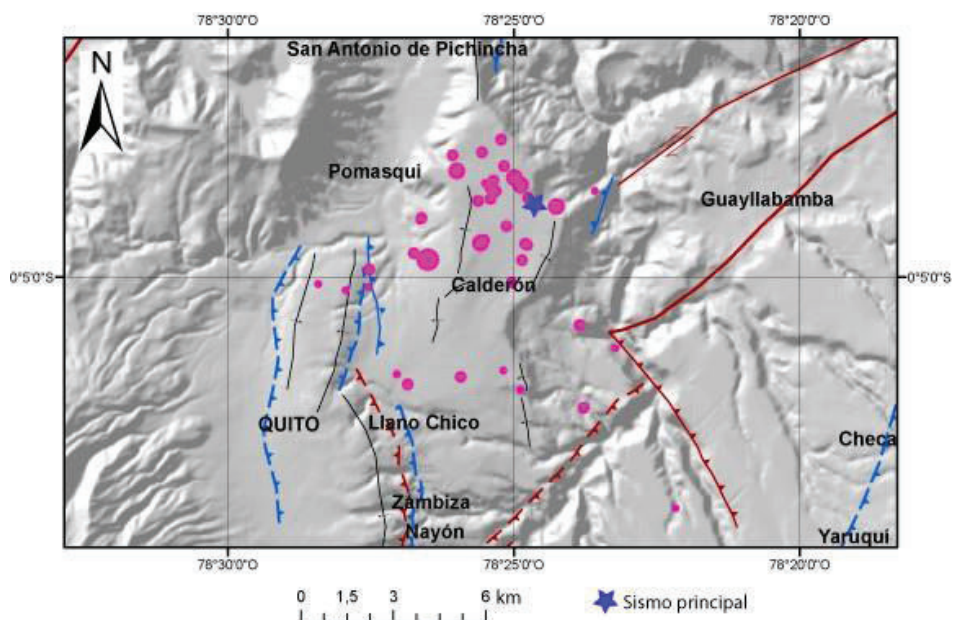
CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El día 12 de agosto del 2014 a las 14h57 se registró un sismo de una magnitud de 5.1, al Noroeste de la parroquia de Calderón según el informe presentado por el Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional (IGEPN). Este evento sísmico presentó una réplica inmediata con una magnitud de 4.1 grados y varias réplicas posteriores con magnitudes que variaban entre 1 y 3.9 grados. El evento sísmico fue atribuido a una falla perteneciente al denominado sistema de fallas de Quito QFS (por sus siglas en inglés; Quito Fault System). El mecanismo focal de ruptura del evento correspondió a una falla del tipo inversa con un rumbo NNE-SSW. La figura 1.1 muestra la localización del sismo principal y la localización de las réplicas de este evento.

FIGURA 1.1 Localización evento sísmico registrado el 12 de Agosto del 2014



FUENTE: IGEPN.

El informe del Instituto Geofísico señaló que en promedio en la ciudad de Quito, este evento sísmico tuvo una intensidad de 4 en la Escala Macrosísmica Europea (EMS). Esta intensidad reportada indica que la mayoría de personas en el interior de las edificaciones sintió el movimiento de objetos livianos, como sillas, espejos vajillas, entre otros objetos.

En las parroquias de Calderón, Pomasqui y los lugares aledaños al epicentro del evento se midió una intensidad máxima de 6 en la escala EMS, pues varias estructuras fueron afectadas presentando daños moderados (no estructurales) en las mismas.

La figura 1.2 muestra una estructura en el sector de Calderón que fue afectada. Se puede observar que esta vivienda presenta fisuras de gran dimensión en la mampostería.

Este evento sísmico generó pánico especialmente en las personas que se encontraban en el sector norte de la capital. Hubo varias personas heridas e inclusive pérdida de vidas humanas que se reportaron en los sectores del Cerro Catequilla y San Isidro del Inca.

FIGURA 1.2 Casa en Calderón, afectada por el sismo de Agosto del 2014

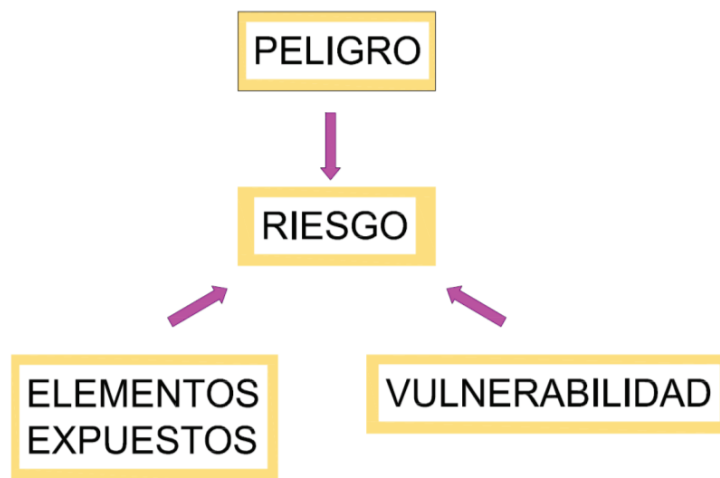


FUENTE: El Comercio, 2014

Sobre la base de lo antes descrito, es importante tener un conocimiento adecuado del peligro sísmico, que es uno de los componentes para el análisis del riesgo sísmico.

El riesgo sísmico es la probabilidad de que exista la pérdida de vidas humanas, de bienes económicos debido a la ocurrencia de un evento sísmico. Tiene tres componentes básicos que son el peligro o amenaza, la vulnerabilidad o susceptibilidad y el tipo de exposición, como indica la figura 1.3

FIGURA 1.3 Componentes del Riesgo.



FUENTE: Singaicho, 2014

Como parte de los trabajos de elaboración de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, se realizó un estudio del peligro sísmico del Ecuador, obteniendo como resultado entre otras informaciones un mapa de isoaceleraciones del terreno. Este mapa se muestra en el capítulo de peligro sísmico y diseño sismo resistente de la nueva Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015.

Sin embargo, pocos estudios se han realizado a nivel local hablando específicamente de la ciudad de Quito, para conocer y evaluar el peligro sísmico.

En cuanto a la vulnerabilidad, se debe recordar que la NEC-2015 ha sido implementada a inicios de este año 2015 y anteriormente debido a la falta de un código propio los ingenieros calculistas como buena práctica de ingeniería usaban códigos internacionales cuyo enfoque en general consiste en reducir la vulnerabilidad de las estructuras mediante la aplicación de criterios y métodos de diseño, esto porque el Código Ecuatoriano vigente anteriormente en Ecuador antes del año 2000, hacía únicamente referencia al peligro sísmico y no así a los métodos de diseño y mucho menos al desempeño de las estructuras.

Acorde a los criterios anteriormente expuestos la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 señala que la filosofía de diseño sismo resistente que debe aplicarse en nuestro país consiste en disipar la energía del sismo fuerte mediante el diseño por capacidad o mediante el uso de mecanismos de control sísmico, como aisladores base, disipadores. Con este criterio la NEC-2015 está haciendo énfasis en disminuir la vulnerabilidad de las estructuras ante un evento conocido como sismo de diseño que tiene una probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años, con una tasa de retorno de 475 años.

La NEC-2015 señala también la importancia de estudios a nivel local, en ciudades con poblaciones mayores a 100.000 habitantes. Indica que se debe contar con estudios geotécnicos y sísmicos determinados.

Pese a que los códigos hagan su enfoque en reducir la vulnerabilidad de las estructuras, hay que recordar que en el Ecuador y particularmente en Quito gran parte de las construcciones han sido realizada de manera informal, es decir muchas de las estructuras que se encuentran en la ciudad, no han sido ni diseñadas y mucho menos construidas de acuerdo a las recomendaciones dadas en los códigos y normas.

Se observa en Quito una gran cantidad de construcciones no ingenieriles o informales (42%), mientras las construcción de hormigón armado alcanzan un 25%, les siguen estructuras de mampostería no reforzada en un 11 % y otras tipologías en porcentajes menores (Yépez, 2001).

Si a la construcción informal se añade que existen muchas estructuras que posiblemente fueron diseñadas con el código CEC del 77 que no presentaba requisitos de diseño sismo resistente adecuados, y que otras a simple vista presentan graves problemas desde su configuración estructural presentando irregularidades en planta y elevación es posible inferir que Quito, tiene una gran cantidad de estructuras vulnerables al peligro sísmico.

Se mencionan algunos de los problemas más comunes que se observan fácilmente en las estructuras de la ciudad.

- Columna corta
- Torsión en Planta
- Piso Blando
- Incompatibilidad de materiales.

La figura 1.4 muestra una edificación típica de la ciudad que ha sido construida con hormigón armado y el uso de vigas banda, se puede observar que la estructura presenta varias columnas cortas en su base, esto hace pensar que esta estructura ante un sismo severo posiblemente no va a tener un comportamiento sísmico adecuado.

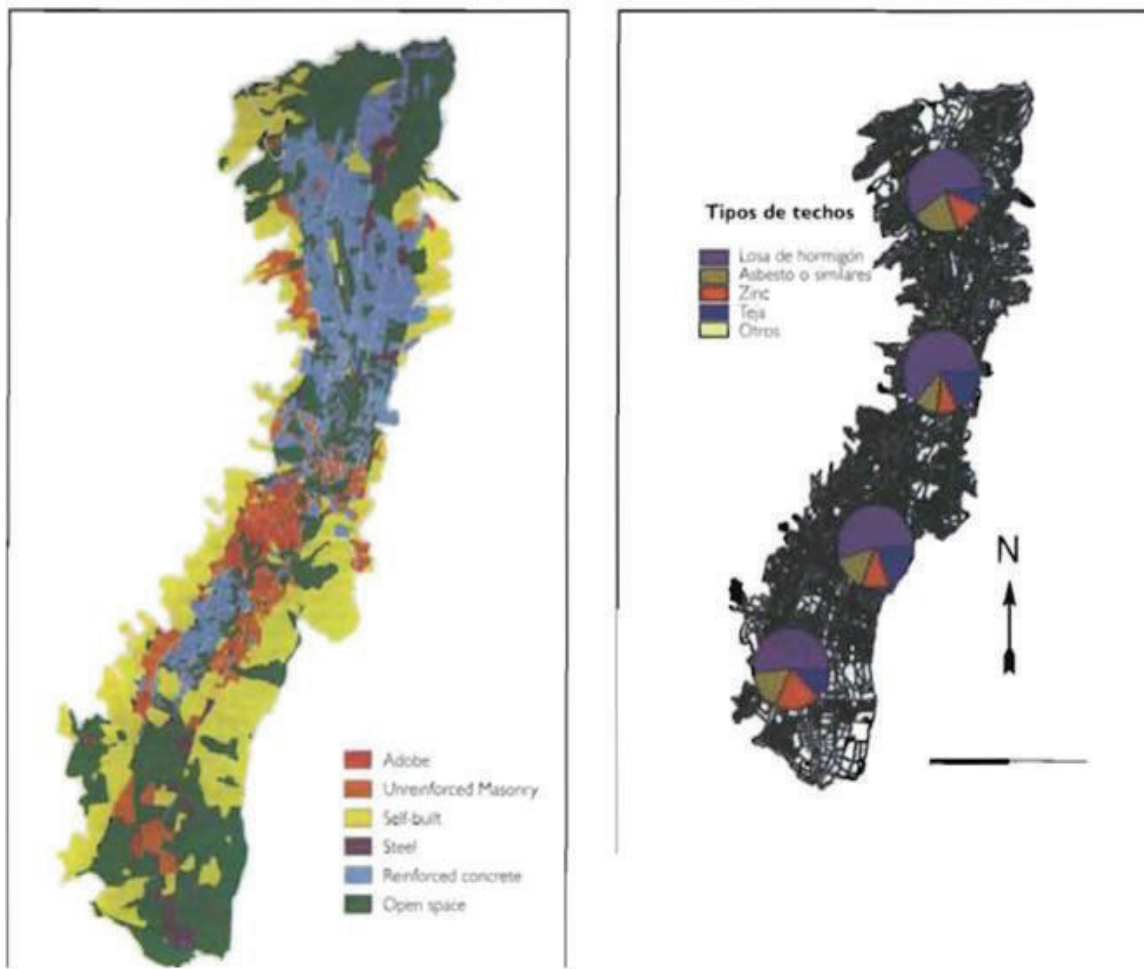
FIGURA 1.4 Edificio residencial en la ciudad de Quito, presenta columna corta.



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Referente a los análisis de la vulnerabilidad de las estructuras en la ciudad de Quito, se conoce que prácticamente no existen estudios locales actualizados que permitan determinar el grado de vulnerabilidad de las estructuras existentes en la ciudad de Quito. Aunque es importante indicar que la EPN en 1994, junto con Oyo Corporation, Geo Hazard, Orstom y el Municipio de Quito hicieron un primer estudio para evaluar la vulnerabilidad de las estructuras, posteriormente en el año 2001, Fabricio Yépez junto con otros expertos realizaron una zonificación estructural de acuerdo al tipo de material y a la tipología estructural. La figura 1.5 muestra la zonificación realizada en este estudio.

FIGURA 1.5 Zonificación estructural, estudio de Yepéz et al.



FUENTE: Yepéz, 2001

El estudio de Yépez, no sólo se limitó a realizar una evaluación de la vulnerabilidad sino que obtuvo estimaciones de riesgo sísmico para la ciudad de Quito a partir de asumir datos razonables sobre la amenaza o peligro sísmico, para ello se impuso 3 sismos hipotéticos, dos sismos de subducción con magnitudes M_w 7.3 y 8.4 localizado el primero a 80 km al oriente de la ciudad, el segundo a 200 km al oeste y un último sismo asociado a la tectónica local con magnitud $M_w=6.5$ localizado 25 km al noroccidente de la ciudad, asociado a la falla de Catequilla.

Una de las conclusiones que se obtuvieron en este estudio fue la siguiente “Es urgente contar con una amplia y moderna red de instrumentación acelerográfica que permita disponer de información real y exacta, y reemplazar las suposiciones realizadas ”(Yépez, 2001).

El estudio de Yépez también concluyó que por los resultados obtenidos usando los 3 eventos sísmicos potenciales, el que produce el mayor daño es el sismo local es decir el asociado a la tectónica cortical. Este daño se concentró principalmente en las construcciones informales.

Considerando que el crecimiento de la infraestructura de la ciudad ha sido notable en estos últimos años, especialmente en el período comprendido entre 2010 y 2014, en el que se ha visto la construcción de muchos edificios de gran altura, sobre todo en el norte de la ciudad, debido principalmente a que la topografía sobre la cual se encuentra asentada la ciudad no permite un crecimiento horizontal, y ante el incremento de población y demanda de vivienda, la infraestructura de vivienda en Quito (especialmente sus edificios) ha crecido verticalmente. Por ello es bastante razonable decir que la infraestructura de vivienda y comercio de Quito está creciendo verticalmente.

Como ya se mencionó en el tema de vulnerabilidad local no se cuenta con un inventario actualizado de tipología estructural a nivel de toda la ciudad, pues no se ha actualizado los estudios de la EPN y de Yépez.

En la evaluación de la vulnerabilidad de estructuras existentes tampoco se han realizado a nivel local entre otras cosas curvas de fragilidad que permitan mostrar la medida y el grado de afectación (leve, moderada o severa) que podrían tener las estructuras ante un determinado evento. Este tipo de curvas pueden ser obtenidas a través de análisis más complejos del tipo dinámico no lineal. Para realizar este tipo de análisis de evaluación se debería contar con los planos estructurales de todas las estructuras a analizar, además de estimaciones adecuadas del peligro

que provean una información del movimiento del suelo. Sin embargo en la capital existe una gran cantidad de construcción informal y no se dispone a nivel de toda la ciudad un registro completo de los detalles estructurales de las edificaciones, lo cual dificultaría la realización de este tipo de evaluaciones de riesgo sísmico.

El enfoque del presente estudio no es evaluar la vulnerabilidad de las estructuras de la ciudad por lo tanto este estudio tampoco pretende evaluar el riesgo sísmico pues este trabajo se centra netamente sobre el conocimiento y la **evaluación del peligro** o amenaza sísmica, debido los fenómenos naturales que ocurrieron en el Distrito Metropolitano de Quito y que fueron anteriormente mencionados, y a que los estudios anteriormente descritos reflejan necesidad de profundizar este tipo de trabajos.

Este trabajo considera realizar la evaluación del peligro, asociado a eventos con régimen tectónico cortical, es decir se pretende evaluar el peligro debido a la presencia del sistema de falla de Quito (QFS), para ello se deberá partir de un análisis geomorfológico y de micro sismicidad local para la región de Quito realizado por diferentes investigadores y que serán descritos en el capítulo dos de este trabajo.

Solo conociendo adecuadamente los componentes del riesgo esto es peligro y vulnerabilidad se pueden minimizar los daños en las edificaciones y la pérdida de vidas, por todo lo anteriormente señalado se recalca la importancia este estudio pues pretende evaluar el peligro o amenaza sísmica a nivel local.

1.2 OBJETIVOS

La ciudad de Quito se encuentra en una zona de alto peligro sísmico, afectado por un sistema de fallas corticales (QFS), a este sistema de fallas puede atribuirse la generación de sismos severos que podrían ser 40 veces más fuertes a los ocurridos en Agosto del 2014.

El presente estudio pretende evaluar el peligro sísmico en la ciudad de Quito para cumplir este objetivo se van a generar espectros de respuesta en aceleración asociados a cada uno de los diferentes segmentos del sistema de fallas de Quito. Los espectros de respuesta que se proyectan obtener se los realizará a partir de ecuaciones de atenuación llamadas también ecuaciones de predicción de movimiento fuerte o GMPE's por sus siglas en inglés (Ground Motion Prediction Equation), que deben ser apropiadas para esta región de estudio y que pueden ser aplicadas en ambientes tectónicos similares a los del Distrito Metropolitano de Quito, estos espectros encontrados para los diferentes sectores de Quito estarán asociados también a las características del suelo.

El estudio propuesto permitirá entre otras cosas clarificar conceptos de aplicación en ingeniería sobre los factores que influyen en la determinación de las ecuaciones de predicción de movimiento, los diferentes espectros que se pueden presentar en una misma ciudad y sobre todo intenta predecir la respuesta del suelo ante un evento sísmico para de esta manera evaluar el peligro o amenaza sísmica localmente.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las investigaciones realizadas por diferentes autores referentes al peligro sismotectónico en la región de Quito que sirvan como punto de partida del presente estudio.
- Conocer las características geológicas y geomorfológicas de la región de Quito así como el sistema de fallas de Quito (QFS) y los diferentes segmentos que conforman este sistema. Sobre cada uno de estos segmentos se desea conocer sus respectivas magnitudes máximas esperadas (M_w) así como también el área de ruptura de cada segmento.

- Escoger ecuaciones de atenuación que sean apropiadas para la región de estudio, en este caso la ciudad de Quito.
- Evaluar diferentes estudios realizados de microzonificación de suelos que permitan obtener valores adecuados para el uso del V_{s30} , asociado al factor de sitio en las ecuaciones de atenuación.
- Determinar espectros a partir de las diferentes ecuaciones de atenuación, para cinco zonas o sectores del Distrito Metropolitano de Quito que son las siguientes:

Zona norte

Zona centro norte

Zona centro

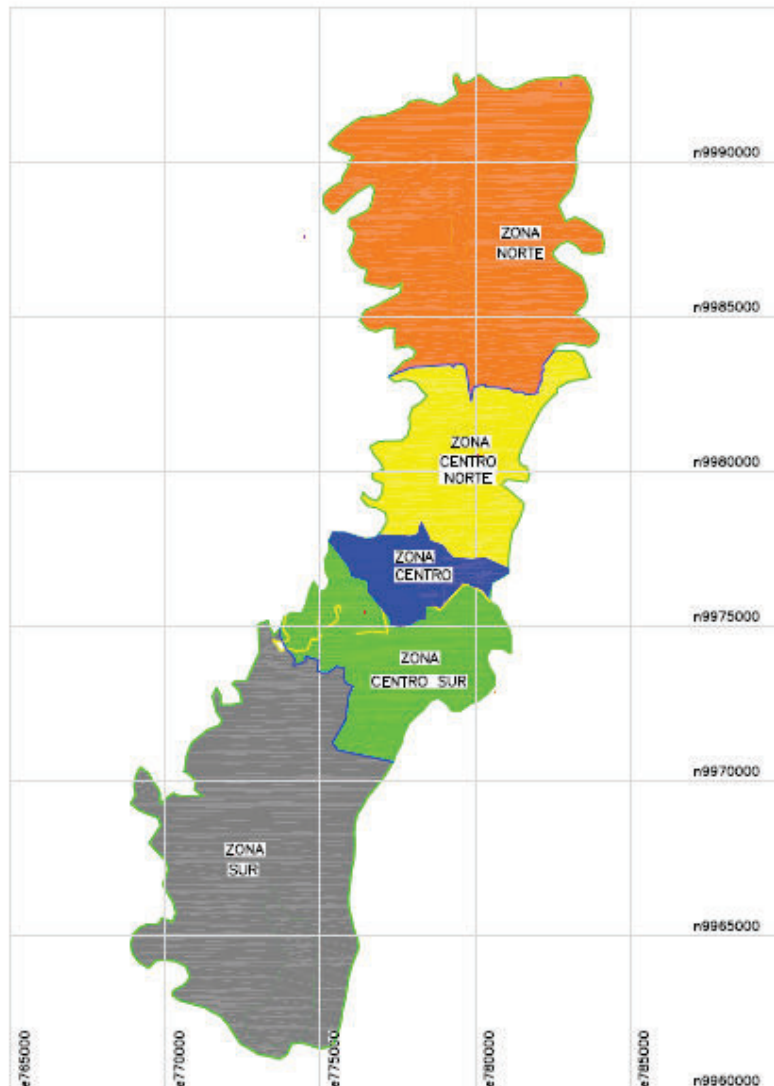
Zona centro sur

Zona sur

Cada uno de estos espectros obtenidos deberá ser evaluado también para diferentes valores de V_{s30} que se obtendrán de la evaluación de la microzonificación de suelos.

- Comparar los espectros obtenidos con los espectros de diseño que se obtienen usando la NEC-2015.

La figura 1.6 presenta la limitación del área de estudio y la subdivisión de la misma en 5 zonas que ya han sido indicadas.

FIGURA 1.6 Zonas de Estudio

FUENTE: Aguiar, 2013

1.3 ALCANCE

En cuanto a la delimitación de resultados que se desea obtener a partir de este estudio, sabiendo que el objetivo de este estudio es evaluar el peligro en la ciudad de Quito mediante la determinación de espectros de respuesta asociados a los diferentes segmentos del sistema de fallas de Quito (QFS), se presentarán los resultados de este estudio como espectros para 5 zonas del distrito metropolitano de Quito.

Los espectros calculados se los obtendrá también para diferentes niveles de confianza, pues se conoce que las ecuaciones de atenuación (GMPE's) son obtenidas a través de regresiones matemáticas, provistas de una desviación estándar (sigma) para los datos que se deben ajustar.

En la obtención de espectros a partir del uso de ecuaciones de atenuación, se conoce que estas ecuaciones tienen diferentes datos de entrada siendo un dato fundamental el valor del V_{s30} a adoptar, este valor medio de la onda de corte en los 30 metros superiores del perfil está asociado en las GMPE's con el factor de sitio. Este estudio recopilará una determinada cantidad de sondeos de refracción sísmica que han sido realizados en diferentes estudios y que permitirán obtener el V_{s30} en varios lugares del Distrito Metropolitano. Se describirán detalladamente los mismos en el capítulo 7. También se analizarán estudios de microzonificación de suelos realizados anteriormente, que darán uno o más criterios de los valores de V_{s30} que se puedan usar para los diferentes sectores de la ciudad. Sin embargo al no disponer localmente de mapas de isovelocidades V_{s30} , este factor se constituye en una limitante sobre los resultados que se obtengan. Por lo mencionado anteriormente se supone que los resultados que se presenten en este estudio permitan una cierta flexibilidad ya que podrán reajustarse en un futuro cuando se tenga mayor información sobre el tipo de suelo y una mayor cantidad de sondeos de refracción sísmica para obtener los diferentes valores de V_{s30} .

En este punto es importante indicar que las ecuaciones de atenuación que plantean los diferentes investigadores, se van actualizando año tras año conforme se tiene una mayor cantidad de datos que puedan servir para realizar el reajuste de las mismas, por lo que no se descarta que las ecuaciones mostradas en este estudio puedan modificarse en un futuro.

Por último se debe señalar que a nivel regional no se cuenta con ecuaciones de atenuación propias, por lo que se usa ecuaciones de autores extranjeros. Sin embargo las ecuaciones que se usarán en este trabajo pretenden cumplir la condición de ser apropiadas para la región en estudio.

Los espectros obtenidos en el presente estudio podrán usarse como espectros de control para verificar el desempeño de estructuras ya existentes y diseñadas de acuerdo a las normativas anteriores que usaban en el país como el CEC 77, CEC 2000, y también permitirán verificar si existe compatibilidad entre los resultados obtenidos y espectro propuesto por la NEC-2015.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología a emplear para desarrollar el presente estudio, considera la compilación de la información publicada por diferentes investigadores referentes a la evaluación de la actividad tectónica de Quito realizada por medio de estudios geomorfológicos y de sismicidad local.

También se recopilará información bibliográfica relacionada con la obtención de los espectros de respuesta a partir de ecuaciones de predicción del movimiento de suelo (GMPE's). Se verificará la aplicabilidad del uso de las ecuaciones escogidas a nuestro medio. Una vez identificadas las ecuaciones apropiadas para el presente estudio, se debe analizarán las variables propias de cada una de ellas.

Como se indicó en el alcance, las ecuaciones de atenuación (GMPE's) consideran dentro de sus modelos la obtención de un factor de sitio el mismo que se lo relaciona con el valor medio de la onda de corte en los 30 metros superiores del perfil de suelo (V_{s30}). Para identificar este dato es necesario contar con estudios referentes a microzonificación de suelos realizados para la ciudad de Quito. Además es preciso contar con estudios de sísmica de refracción realizados en diferentes lugares de la ciudad, por lo que es necesario la búsqueda, clasificación y análisis de estudios que sean compatibles a este trabajo.

Los estudios geotécnicos y geotectónicos anteriormente mencionados servirán como punto de partida del presente estudio. Antes de la realización de los espectros de respuesta se delimitará el área de estudio, la misma que corresponde

al área urbana de Quito. Se ha subdividido el área de estudio en 5 zonas que se mostraron en la figura 1.4.

Una vez definidos los datos de partida para la obtención de los espectros de respuesta a partir de ecuaciones de atenuación, estas pueden ser programadas en Matlab o realizadas mediante hojas de cálculo de EXCEL.

Después de realizar el cálculo de espectros usando las diferentes ecuaciones de atenuación, se obtendrán los espectros promedios asociados a cada segmento del sistema de Fallas de Quito (QFS), usando diferentes valores de V_{s30} y en diferentes zonas de la ciudad.

Los espectros de respuesta promedios obtenidos se los comparará con los espectros recomendados por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015. A partir de estas nuevas gráficas se podrá obtener conclusiones del trabajo realizado y hacer recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO 2

FALLAS CIEGAS INVERSAS DE QUITO

2.1 SISMICIDAD DE QUITO ASOCIADO A FALLAS CIEGAS.

El Ecuador tiene tres tipos de regímenes tectónicos que son: Cortical (Por la presencia de fallas en el continente); subducción interfase y subducción intraplaca. Estos regímenes son descritos por Taipe, en 2013. (Referencia 24)

El objetivo del presente estudio es evaluar el peligro en la ciudad de Quito, por lo es necesario hacer énfasis en la descripción del régimen tectónico de Quito.

La ciudad de Quito ubicada sobre los 2820 msnm se encuentra en la región interandina del Ecuador, dentro de la depresión interandina. La ciudad está ubicada en la provincia de Pichincha en una región volcánica y sísmica activa.

La ciudad está construida sobre una cuenca volcanoclastica del Plio-Cuaternario entre la cordillera occidental y una cadena ondulada de montañas con rumbo N20E que se encuentran 500 m sobre la depresión interandina (Alvarado et al., 2012).

La ocurrencia de los sismos en la ciudad de Quito pueden tener dos diferentes fuentes de origen que son la tectónica (cortical y subducción) y la volcánica.

En otras palabras un evento sísmico en la ciudad de Quito puede ser originado por la subducción de las placas tectónicas o debido la actividad tectónica de las fallas corticales del sistema de fallas de Quito (QFS) o de sistemas de fallas cercanos como el sistema de fallas de Guayllabamba (GFS por sus siglas en inglés), sistema de fallas de Latacunga, entre otros.

En el caso de la ciudad de Quito el origen tectónico de los eventos, genera los mayores movimientos fuertes de suelo. Sin embargo los eventos en la ciudad también podría originarse por la actividad de un volcán debido a que la ciudad se encuentra rodeada de un conjunto de volcanes, como por ejemplo el Cotopaxi y el Guagua Pichincha, siendo el Pichincha un volcán sísmicamente activo en cuyas faldas se encuentran varios barrios del Distrito Metropolitano.

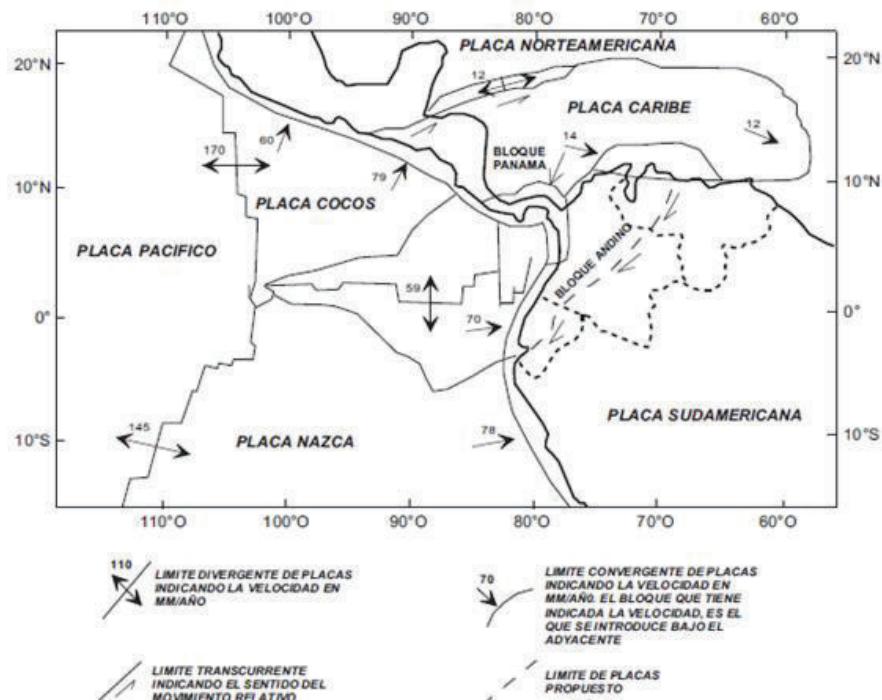
En general los sismos de origen tectónico pueden alcanzar magnitudes M_w de hasta 9.5, mientras que los sismos de origen volcánico generalmente tienen magnitudes M_w menores a 3. Se puede mencionar respecto a esto que la actividad volcánica del Guagua Pichincha produjo en Quito vibraciones que causaron efectos de intensidad VI en 1660 (Del Pino & Yepes, 1990).

En cuanto a la subducción se hace referencia lo señalado por diferentes estudios. Primero es importante indicar que parte del Ecuador continental se encuentra sobre una micro placa llamada “Bloque Andino” que fue descrita por Peggninton (1981). (Taípe, 2013).

A lo largo del margen occidental del Ecuador, la placa oceánica de Nazca esta subduciendo oblicuamente con respecto al bloque andino norte y la placa sudamericana durante los últimos 5 millones de años a lo largo de un rumbo $N83^\circ E$ (Kendric et al 2003; Nocquet el 2009)

La figura 2.1 muestra los límites de placas propuestos por Ego et al en 1995. En esta figura se puede también apreciar las velocidades de convergencia y divergencia entre placas en mm/año. Se observa que la placa de Nazca converge o se introduce bajo la placa Sudamericana a una velocidad de 7 cm por año. Otros autores en estudios más recientes señalan que velocidad de convergencia entre las placas es menor y es igual a 6 cm por año.

FIGURA 2.1 Límites de placa



FUENTE: Ego, 1995

El estudio de la convergencia entre placas es de gran interés para la evaluación del peligro sísmico en la ciudad de Quito ya que constituye una fuente sismogénica de eventos que podrían afectar a la ciudad.

Sismos debido a la subducción, como el del año 1906 en la provincia de Esmeraldas, alcanzó una magnitud $M_w = 8.9$ y ocasionó una intensidad de grado VI en la escala MSK en la zona de Quito (Del Pino & Yepes, 1990).

Debajo de la ciudad de Quito, la interfaz de subducción se encuentra a una profundidad aproximada a 120 km, sin influencia conocida sobre la tectónica superficiales de la placa superior (Guillier et al., 2001; Segovia y Alvarado, 2009; Font et al., 2013).

En términos de peligro sísmico, 5 eventos sísmicos principales fueron sentidos en Quito en los pasados 500 años, el último en un periodo anterior a 1859, la mayoría de ellos se cree que son eventos debido a la subducción, pero un evento ocurrió en

la corteza y debería estar asociado con la QFS de acuerdo con la distribución espacial de intensidades de agitación (Evento Guayllabamba de 1587) (Alvarado et al.,2012).

El evento sísmico de 1587 tuvo una intensidad estimada de VIII (Del Pino & Yepes, 1990).El sismo de Guayllabamba de 1587, tuvo una magnitud Mw de 6.4 y causó un gran daño en la naciente ciudad de Quito (Aguiar, 2014).

TABLA 2.1 Eventos cronológicamente sentidos en la ciudad de Quito

Evento	Año	Intensidad	Escala
Sismo de Guayllabamba	1587	IX	MSK
Terremoto de Riobamba	1797	VII	MSK
Sismo de Otavalo	1859	IX	MSK
Terremoto de Ibarra	1868	IX	MSK
Terremoto de Esmeraldas	1906	VI	MSK
Sismo de Machachi	1923	VI	MSK
Sismo de Baeza	1987	VII	MSK
Sismo de Pomasqui	1990	V	MSK
Sismo de Catequilla	2014	IV	EMS

FUENTE: Hibsich 1996; IGEPN 2014

La Tabla 2.1 muestra los eventos que han sido sentidos en la ciudad de Quito, los eventos sísmicos mostrados en la tabla se encuentran ordenados cronológicamente junto con las intensidades reportadas en diferentes estudios. Estos eventos tienen distinto origen tectónico, de particular interés para este estudio son los sismos de: Guayllabamba, Pomasqui y Catequilla que están asociados a sistemas de fallas corticales, estos dos últimos eventos son recientes y se caracterizan por haber tenido un foco superficial.

Hay que recordar que la intensidad es una medida del grado en que las personas sienten el sismo. Conocer la intensidad es particularmente importante para eventos

históricos que no han sido registrados mediante instrumentos, esta medida está asociada a la profundidad del evento y a la distancia del epicentro.

De los eventos presentados en la tabla 2.1 la mayoría no tienen registros en acelerógrafos. Por eso la importancia de la creación de la RENAC en 2009 (Red Nacional de Acelerógrafos). En la actualidad hay 76 estaciones de aceleración instaladas en todo el país, de las cuales 27 son marca REFTEK, y 49 GURALP (Singaicho,2014).

Recientemente, extensas redes sísmicas y de GPS han sido desplegadas en esta región de Quito por el Instituto Geofísico – EPN y el programa francés de los Andes del Norte (ADN) para caracterizar la deformación de la corteza en curso, una red sísmica local ha sido desplegada en el área de Quito y sus alrededores para el monitoreo volcánico y tectónico. Diez sismómetros y quince acelerómetros han estado operando por 25 y 3 años respectivamente (Alvarado et al,2012).

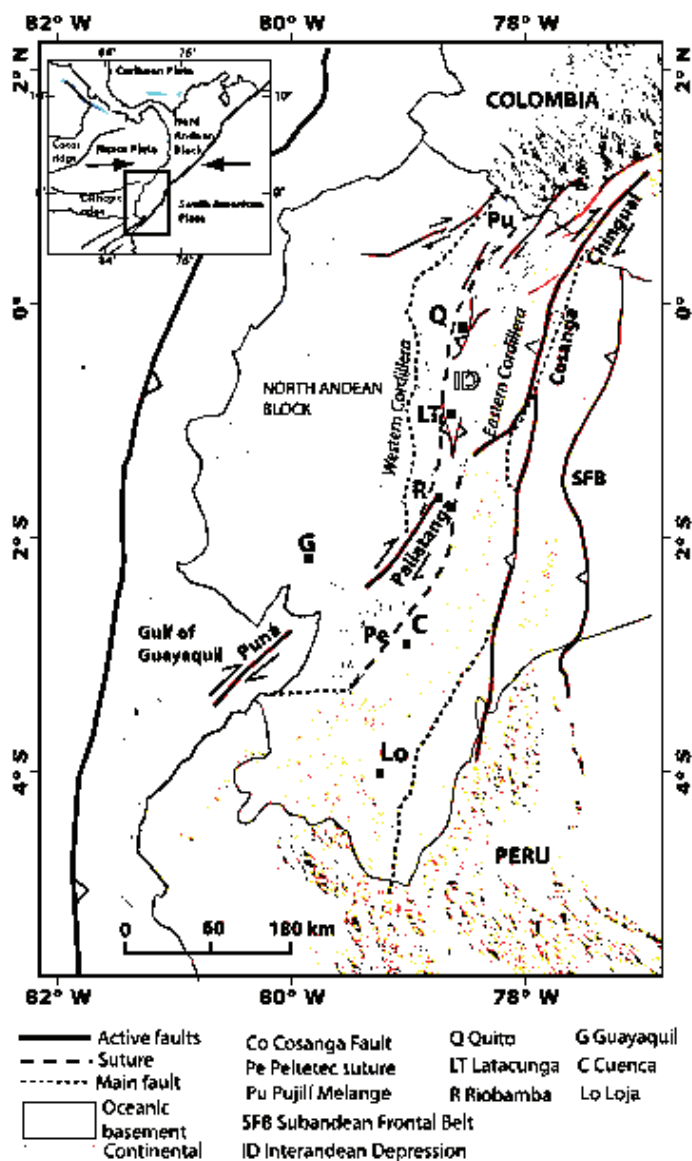
En otras palabras si se contara con un mayor número de registros se podría evaluar de mejor manera el peligro, sin embargo se cuenta con registros en la región de Quito únicamente en los últimos 30 años.

Alexandra Alvarado y otros investigadores en 2012, presentaron un estudio cuyo objetivo fue cuantificar la cinemática y la geometría del sistema de fallas de Quito (QFS), a través de análisis geomorfológicos, geológicos, geodésicos e información sísmológica. Ese estudio dio como resultado la obtención de un modelo neotectónico integral de la deformación regional en Quito (QFS).

Los resultados de la investigación de Alvarado et al. servirán como punto de partida para la obtención de variables a utilizar en las ecuaciones de atenuación (GMPE's) que se utilizarán en este estudio, estas ecuaciones permitirán evaluar el peligro en la ciudad de Quito mediante la obtención de espectros de respuesta en aceleración.

La figura 2.2 tomada del estudio de Alvarado muestra las condiciones geodinámicas y tectónicas del Ecuador reportadas en un modelo digital de elevación (Digital Elevation Model DEM), donde se aprecia el bloque andino que tiene su límite al sur de la región de Riobamba.

FIGURA 2.2 Condiciones Geodinámicas y tectónicas del Ecuador



FUENTE: Alvarado et al. (2012)

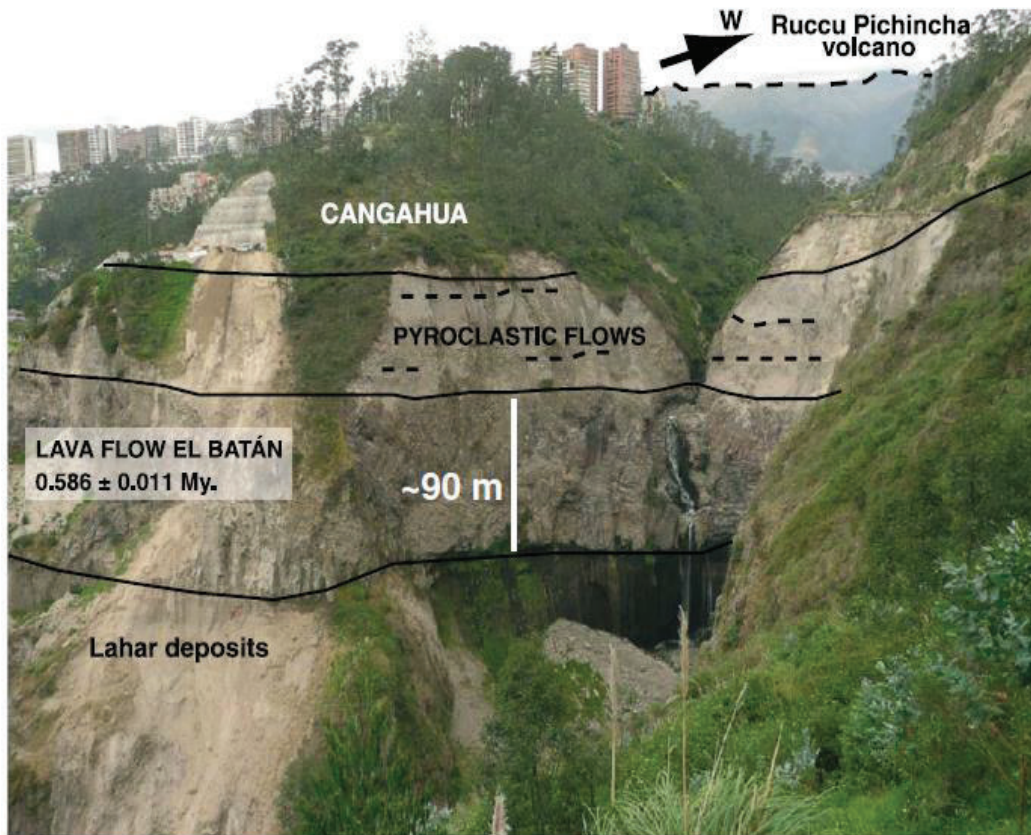
Según el estudio de Alvarado, la actividad tectónica del sistema de fallas de Quito, afecta a los depósitos volcanoclásticos superiores de la depresión interandina, pero

no así a los indicadores del cuaternario que fueron previamente registrados en la región de Quito y que documentan la reciente actividad sísmica.

En general, las litologías del cuaternario consisten en las siguientes unidades, de la más antigua a la más nueva son: Formación Pisque (tobas), Formación San Miguel (Sedimentos lacustres), Formación Guayllabamba (Lava), Formación Chiche (aluviales y depósitos piro clásticos) y Formación Cangahua (tobas) (Villagómez, 2003).

El flujo de lava en la parte superior de la formación Pisque data de un período 1.2 ± 0.13 Ma y 1.17 ± 0.01 Ma (Barberi et al. ,1988)

FIGURA 2.3 Estratigrafía de afloramientos geológicos de la cuenca de Quito



FUENTE: Alvarado et al. (2012)

La figura 2.3 muestra la estratigrafía geológica de la cuenca de Quito, mediante análisis geoquímicos (uso de la técnica de Potasio-Argon), la investigación de Alvarado determinó que la edad del flujo de lava el Batán es de $0,589 \pm 0,011\text{Ma}$, lo que evidencia una inclinación regresiva del flujo de lava para fluir después que se emplaza.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS EVIDENCIAS DE FALLAS CIEGAS.

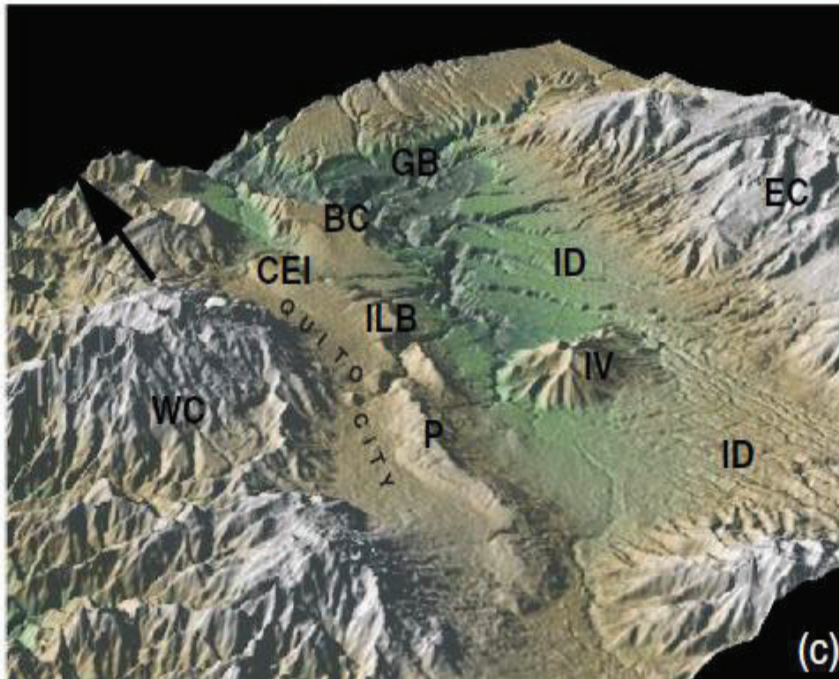
La ciudad de Quito está atravesada por un sistema de fallas corticales (QFS), los indicadores geotectónicos como el análisis estratigráfico permiten identificar la actividad tectónica de estas fallas. Sin embargo los estudios geomorfológicos también constituyen instrumentos que permite diferenciar los segmentos sismo tectónicos de las subcuencas, como en el caso de la ciudad de Quito.

El sistema de fallas de Quito (QFS), presenta diferentes segmentos ubicados de Sur a Norte. Se enumeran a continuación estos segmentos con la abreviación adoptada para este trabajo:

- Segmento Puengasí (**P**)
- Segmento Ilumbisí- La Bota (**ILB**)
- Segmento Carcelén – El Inca (**CEI**)
- Segmento Bellavista Catequilla (**BC**)
- Segmento Tangahuilla (**T**)

La figura 2.4 tomada del estudio de Alvarado, muestra una vista tridimensional de los segmentos de falla que en conjunto forman el sistema de fallas de Quito. Además se puede apreciar la cuenca sobre la que está asentada la ciudad de Quito, que limita occidentalmente con la cordillera Occidental y se encuentra sobre la depresión interandina, al Este de la depresión interandina, se encuentra la cordillera oriental.

FIGURA 2.4 Vista tridimensional de la cuenca de Quito



FUENTE: Alvarado et al. (2012)

La figura anterior usa abreviaciones que vienen de la nomenclatura en inglés.
Dónde:

GB = Cuenca de Guayllabamba

WC = Cordillera Occidental

EC = Cordillera Oriental

ID = Depresión interandina

IV = Volcán Ilaló (inactivo)

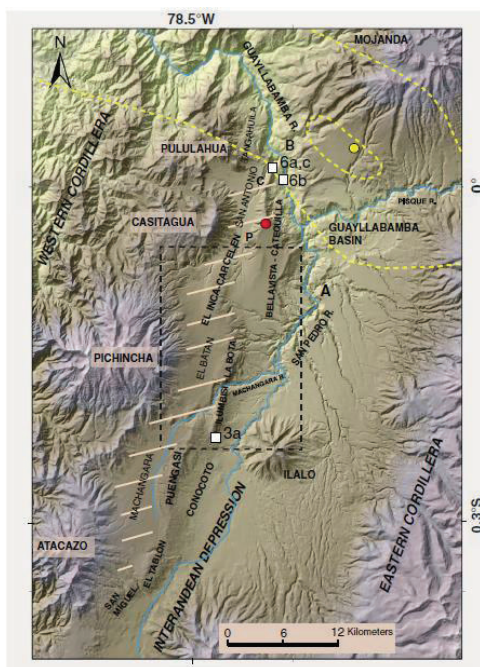
Los ríos son muy sensibles a cambios topográficos causados por la elevación o el hundimiento y son marcadores ideales para identificar la reciente actividad tectónica (Burbank y Anderson, 2001, Audin et al 2003; Whipple,2004). Con este criterio estudiar el sistema de drenajes de la ciudad de Quito, permitiría identificar la actividad tectónica de esta región.

El río Machángara, nace en el volcán Atacazo recorre el sur de la ciudad de Quito en un trayecto aproximado de 22 km posteriormente se dirige en sentido nororiente NE hasta unirse con el río San Pedro finalmente se intersecta con el río Pisque y forma el río Guayllabamba en la cuenca que lleva el mismo nombre y que se encuentra ubicada al Noreste de Quito.

Los ríos Guayllabamba y San Pedro aparentemente regresan a sus cursos, apartados por la cadena de pliegue crecientes al Este por la interconexión de segmentos de pliegue individuales con el gran sistema de fallas de Guayllabamba (GFS) al noreste, similarmente el río Machángara adopta una dirección NE después de cruzar el anticlinal del segmento ILB (Alvarado et al,2012). (Ver figura 2.5).

Mientras la gran quebrada del Machángara demuestra que el río está continuamente injertándose, se evidencia antiguos cursos laterales del río pues existen canales abandonados así como fragmentos de canales abandonados y terrazas aluviales que ocurren hasta cien metros de elevación encima del canal moderno (Alvarado et al,2012).

FIGURA 2.5 Vista tridimensional de la cuenca de Quito



FUENTE: Alvarado et al. (2012)

La figura 2.5 tomada del estudio de Alvarado muestra los recorridos de los ríos Machángara y San Pedro que ya han sido previamente descritos. El círculo amarillo representa el epicentro del evento sísmico de Guayllabamba en 1587 que tuvo una magnitud M_w de 6.4 como se mencionó anteriormente, la línea punteada amarilla representa la isosista de este sismo. El círculo rojo indica el epicentro del sismo de Pomasqui de 1990.

La figura 2.6 muestra una foto aérea de la ciudad de Quito. Se aprecian los segmentos Ilumbisí-La Bota (ILB) y Puengasí (P), al fondo se puede apreciar el volcán Atacazo (4.445 msnm) y más adelante la quebrada por donde recorre el río Machángara. Se aprecia que el cauce de este río toma una dirección NE en el sector del Trébol. La foto también muestra que gran parte de la ciudad se ha construido sobre laderas y que particularmente en el sur de la ciudad la mayoría de estructuras no tiene un número mayor a tres pisos y son construidas en hormigón armado.

Se realiza esta acotación sobre el tipo de estructuras en el sur de la ciudad, pues se infiere que estas estructuras deberían tener periodos fundamentales similares a 0.33 segundos, usando como referencia para determinar este periodo de estructuras la ecuación $T = 0,11 \times N$ ($N =$ número de pisos), por lo que la fuerza sísmica que se podría calcular usando los espectros de respuesta en aceleración de este estudio, estaría asociada a periodos cercanos a 0.33 segundos.

FIGURA 2.6 Foto aérea de la ciudad de Quito



FUENTE: www.skyscrapercity.com, Identificación (Trujillo, 2014)

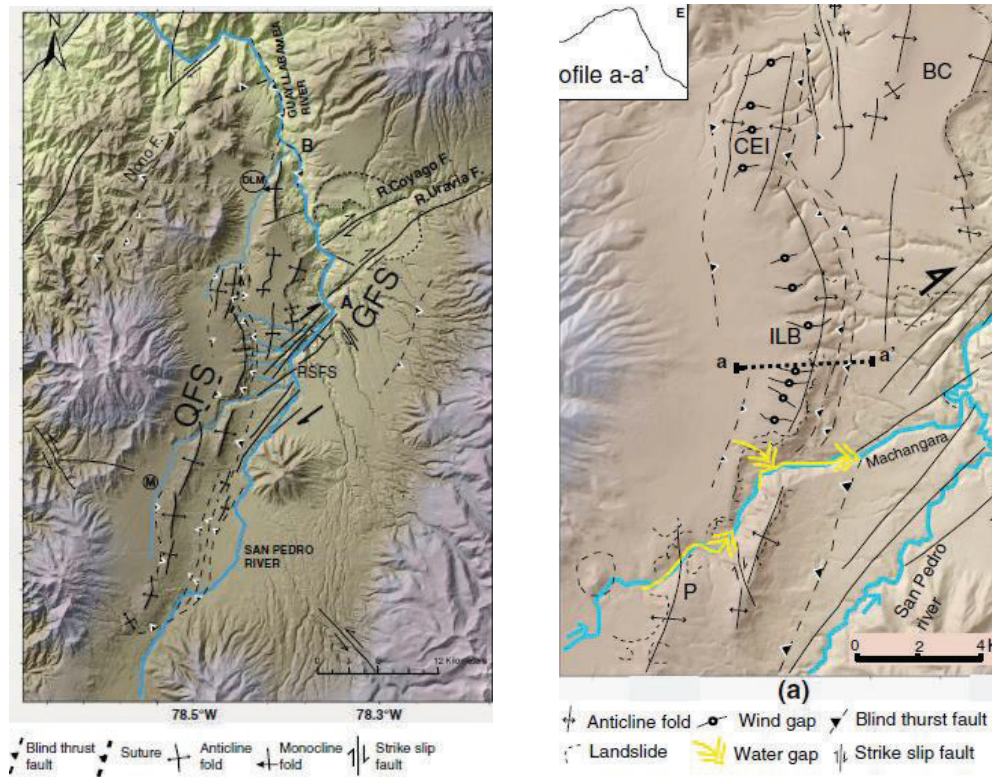
Observaciones de campo y un mapeo detallado con satélite sobre modelos digitalizados de elevación le permitieron a Alvarado identificar varios segmentos de falla.

El mapa neotectónico de la ciudad de Quito propuesto por Alvarado se muestra en la figura 2.7. En la parte izquierda de la figura 2.7 se muestra el río Machángara identificado con la letra M, el sistema de falla de Quito con las siglas QFS y el sistema de Guayllabamba con las letras GFS, en la parte derecha de esta figura se identifica el recorrido del río Machángara en el segmento Ilumbisí-La Bota (ILB).

Se observa también en esta figura que los segmentos Ilumbisí-La Bota, Puengasí y Carcelén presentan una forma de escalón, es decir no se encuentran alineados. Este tipo de forma es conocida por los geólogos como fallamiento tipo “enchelon”, además se pueden observar en la figura 2.7 los “wind gap” o ríos fósiles, donde se supone que alguna vez el agua fluyó y que actualmente se encuentran secos.

Criterios estructurales adicionales como geometrías escalonadas, derivaciones e intersecciones de sub segmentos, o geometría curvada constituyen observaciones que permiten diferenciar segmentos sismo tectónicos individuales de subcuencas (Audin et al,2008).

FIGURA 2.7 Nuevo mapa neotectónico de la ciudad de Quito y mapa geomórfico del segmento ILB



FUENTE: Alvarado et al. (2012)

El estudio de Alvarado determinó que el sistema de fallas de Quito consiste en un sistema transcurrente con rumbo NS, y un ángulo de buzamiento de 45° hacia el oeste de una falla ciega inversa. Su afloramiento en la superficie es un sistema segmentado de pliegues con una longitud superior a 60 km. Cada segmento individual tiene una compresión principal y una componente secundaria transcurrente dextral, evidenciado por una geometría tipo “enchelon”. Este primer grupo está mejor expresado en su parte Norte y parece migrar al Noreste, conectándose de este modo a la falla de Guayllabamba (Alvarado et al, 2012).

En otras palabras la falla de Quito es del tipo inversa y tiene componentes transcurrente dextral.

2.3 MODELO DE FALLAS PROPUESTO POR ALVARADO ET AL (2014)

Una vez que se identifican los segmentos de falla que forman parte del sistema de fallas de Quito, es necesario cuantificar la energía máxima que puede liberar un evento en función del término magnitud de momento (M_w) y el área de ruptura del segmento de falla (Rupture Area RA).

Para el cálculo del área de ruptura de cada segmento el ancho “W” (width of fault) puede ser estimado ya sea de la distribución de sismicidad a cierta profundidad o tomando una longitud bloqueada estimada de la Geodesia (mediciones a través de GPS) (Alvarado, 2012).

En las gráficas de espectros que se mostrarán más adelante en el capítulo 7, no han considerado incluir al segmento Tangahuilla porque se encuentra fuera del perímetro de estudio delimitado previamente.

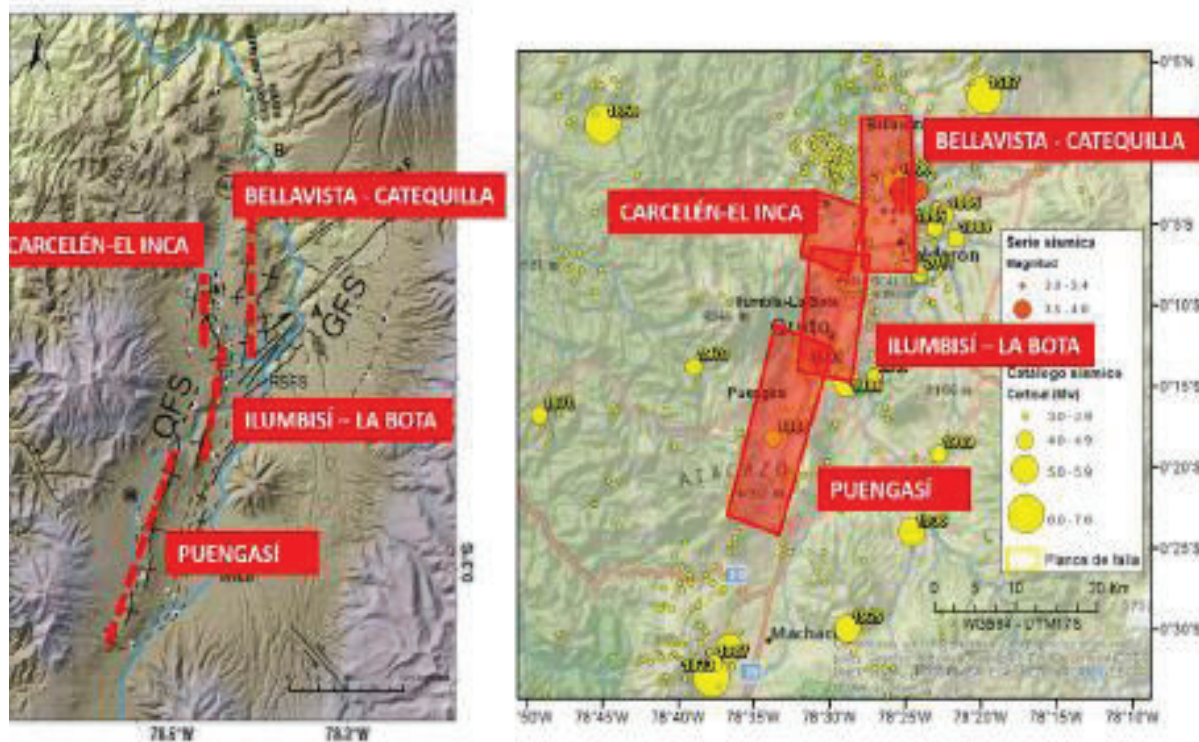
El estudio de Alvarado usando mediciones geodésicas determinó que la longitud de acople entre los diferentes segmentos varía entre 3 y 7 km. Esta profundidad de bloqueo superficial proporcionó un ajuste razonable a las mediciones de GPS.

Para calcular el área de ruptura, Alvarado consideró el ancho “W” de cada segmento y su longitud promedio “L”, el ancho W lo calculó usando al ancho promedio de la distribución occidental de eventos sísmicos de cada segmento plegado. Adicionalmente la longitud de superficie de ruptura (Surface ruptura long SRL) la consideró igual a la longitud de segmento que previamente ya había definido.

La figura 2.8 muestra los segmentos definidos por Alvarado. En la parte izquierda se aprecia la longitud de superficie de ruptura (SRL) de cada segmento. En la parte derecha de la figura se puede observar la superficie de cada plano de falla obtenido a partir de la información generada por Alvarado y que se muestran detalladamente

en la tabla 2.2. También se puede apreciar en la figura los focos de diferentes eventos ocurridos en el sistema de fallas de Quito.

FIGURA 2.8 Segmentos de falla de la QFS



FUENTE: Alvarado (2012), Rivas et al (2014)

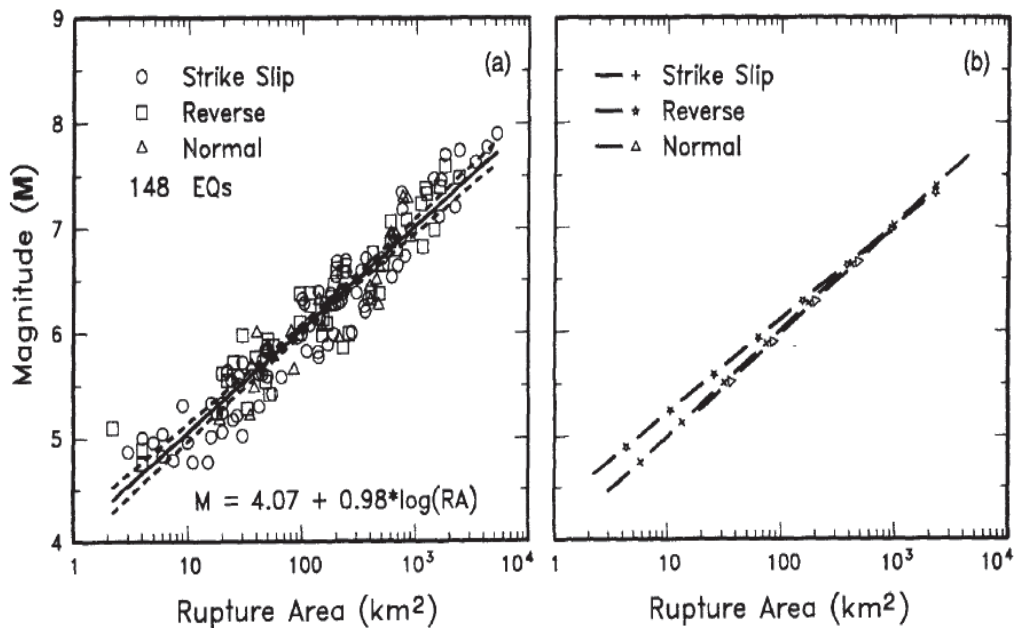
TABLA 2.2 Características del QFS

Segment	Rupture Area (RA) Km ²	Mag (RA)	Surface Rupture Long (km)	Mag (SRL)	Recurrence Time (yr.)	RA ; Mw 3km coupled	RA ; Mw 7km coupled
Puengasí	259	6.4	22	6.4	188	66 : 5.8	154 : 6.2
ILB	176	6.2	15	6.2	138	45 : 5.6	105 : 6.0
CEI	82	5.9	7	5.7	105	21 : 5.3	49 : 5.7
BC	191	6.3	17.5	6.3	183	54 : 5.7	126 : 6.1
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0	115	36 : 5.6	84 : 5.9

FUENTE: Alvarado et al. (2012)

Una vez que se ha definido la longitud de ruptura en superficie (SRL) y el área de ruptura (RA), es necesario correlacionar las mismas con la magnitud para cada segmento. Wells y Coppersmith en 1994 definieron algunas relaciones empíricas entre magnitud, longitud de ruptura, ancho de ruptura y desplazamiento superficial. La figura 2.9 muestra una de las ecuaciones obtenidas en ese estudio.

FIGURA 2.9 Ecuaciones de Wells y Coppersmith para estimar el área de Ruptura



FUENTE: Wells y Coppersmith (1994)

Leonard en 2010, definió también algunas relaciones empíricas entre magnitud, longitud de ruptura, ancho de ruptura y desplazamiento superficial. Las ecuaciones de Leonard para fallas inversas que fueron usadas para relacionar la longitud de superficie de falla (SRL) con el momento sísmico en la investigación de Alvarado fueron:

$$M_{W(SRL)} = 1.52 \log(L) + 4.4 \quad (2.1)$$

$$M_{W(RA)} = 1.00 \log(A) + 4 \quad (2.2)$$

Los valores resultantes de las magnitudes que se mostraron anteriormente en la tabla 2.2 consideraron los valores de la profundidad de bloqueo que fueron previamente descritos.

2.4 PERÍODOS DE RECURRENCIA HALLADOS POR ALVARADO ET AL (2014)

Considerando las características geomorfológicas de la QFS, Alvarado consideró la ruptura de los segmentos individuales anteriormente indicados como un escenario tectónico probable.

Para este escenario el tamaño del terremoto máximo y el tiempo de recurrencia son funciones de la tasa de acumulación de esfuerzo, la longitud y el ancho de los segmentos individuales que pueden producir la ruptura en el futuro.

El período de recurrencia (Tr) es el tiempo que transcurre para que ocurra un sismo de las mismas características. Es una definición muy diferente del periodo de retorno que normalmente se usa en las normativas sísmicas (Aguiar,2015).

Para calcular el periodo de recurrencia, Alvarado utilizó las ecuaciones propuestas por Wesnousky en 1986 que indica que el período de recurrencia es la relación del momento sísmico máximo dividido para la tasa de acumulación del momento sísmico estimado de la medición geodésica:

$$Tr = \frac{M_o}{\dot{M}_o} \quad (2.3)$$

$$\dot{M}_o = \mu u \dot{A} \quad (2.4)$$

Donde:

Tr = Período de Recurrencia en años

M_o = Momento sísmico

\dot{M}_o = Tasa de acumulación del momento sísmico

u = Es la tasa de movimiento de la falla (Datos de GPS)

A = Area de de ruptura (km^2)

u = Módulo de deformación de las rocas durante el sismo en Pascales

Mo puede ser despejado de la ecuación 2.3 formulada en 1979 por Hanks y Kanamori, que se muestra a continuación:

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7 \quad (2.5)$$

Los cálculos del periodo de recurrencia Tr obtenidos por Alvarado y que están descritos en la tabla 2.2 de este capítulo, pueden comprobarse con esta rutina desarrollada en Matlab llamada “Wesnou” que permite obtener el periodo de recurrencia a partir de la Magnitud “ M_w ” y el área “ A ”, se presenta la rutina en la FIGURA 2.10.

FIGURA 2.10 Rutina wesnou

```
function [Tr]=wesnou(Mw,U,D,A)

% RUTINA PARA OBTENER EL PERIODO DE RECURRENCIA
% DESARROLLADO POR DIEGO QUIZANGA
% JUNIO 2015
% [Tr]=wesnou[Mw,U,D,A]
% Tr = Periodo de recurrencia en años en base a Wesnousky 1986
% DATOS
% Mw = Magnitud de momento
% U = Módulo de deformación de las rocas en Pascales
% D = Tasa de movimiento de la Falla (mm/año)
% A = Area de Ruptura (km2)

%CALCULO DE Tr (PERIODO DE RECURRENCIA)
Mo=10^(1.5*(Mw+10.7)); % Dina-cm
Mo=Mo/(100000*100); % N-m
U1=U/9.81; % U en Kgf/m2
D1=D/1000; % D en m/año
A1=A*(1000^2); % A en m2
Mo1=U1*D1*A1*9.81; % Mo en Nm/año
format short
Tr=Mo/Mo1 % En años
```

ELABORACIÓN: Diego Quizanga.

Mediante el uso de la rutina mostrada anteriormente, se han obtenido periodos de recurrencia muy parecidos a los de Alvarado, usando valores de área de ruptura

comprendida entre 82 y 259 km² se calculó un periodo de recurrencia (T_r) máximo de 188 años, sin embargo el estudio de Alvarado sugiere que para la estimación del periodo de recurrencia se debe usar la longitud de bloqueo estimada a partir de la geodesia de esta manera los valores para magnitud están reducidos a $M_w_{(RA)}$ 6.2 (máxima magnitud acoplada a 7 km) y $M_w_{(RA)} = 5.3$ (mínima magnitud de segmento Carcelén el Inca CEI acoplado a 3 km), con estos criterios el periodo de recurrencia según los datos de Alvarado variaría entre 200 a 400 años.

Un valor de periodo de recurrencia (T_r) igual a 400 años es bajo comparado con los registros históricos mostrados en la tabla 2.1, en otras palabras según el periodo de recurrencia calculado un evento de características similar al terremoto de Guayllabamba de 1585 debió haberse presentado dentro de un periodo de 400 años.

Los valores de magnitud momento sísmico (M_w), área de ruptura de falla (RA), y longitud de superficie de ruptura (SRL), obtenidos en el estudio de Alvarado se tomarán como datos iniciales en el uso de ecuaciones de atenuación que permitirán la creación de espectros de aceleración que se mostrarán más adelante en el capítulo 7.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE

3.1 INTRODUCCIÓN

Quito es una ciudad que se encuentra en una región de alta amenaza o peligro sísmico, si a eso le sumamos que en muchos casos las estructuras han sido construidas y diseñadas sin cumplir los códigos, es posible afirmar que las estructuras existentes en la ciudad son vulnerables, como consecuencia de estos dos factores se puede presumir que el Distrito Metropolitano de Quito tiene un elevado riesgo sísmico.

Una mejor estimación del riesgo sísmico es fundamental para minimizar la pérdida de vida, daño a la propiedad, el trastorno social y económico debido a los sismos (Norma ecuatoriana de la construcción-NEC 2015).

El peligro es uno de los factores que incide en la determinación del riesgo sísmico, conocer este peligro o amenaza sísmica, en una ciudad como Quito que se encuentra rodeada de fuentes sismogénicas es de suma importancia debido a que solo con un mejor conocimiento del peligro se podrá buscar un comportamiento adecuado de las estructuras ante los eventos sísmicos, reduciendo de esta manera el riesgo sísmico.

Desgraciadamente, existen incertidumbres en las evaluaciones del peligro sísmico para Quito, y, en general para el Ecuador, dichas incertidumbres provienen del hecho de que no se dispone de información instrumental suficiente en cuanto a aceleraciones del terreno se refiere. (Yépez, 2001).

El presente estudio está enfocado en evaluar el peligro en la ciudad de Quito, esta evaluación de la amenaza consiste en intentar predecir la respuesta del suelo ante

un evento sísmico, teniendo en cuenta que en el caso particular de este estudio el evento está asociado a fuentes sismogénicas del tipo cortical.

Las formas de evaluar el peligro pueden ser determinísticas (Deterministic Seismic Hazard Analysis –DSHA) y probabilísticas (Probabilistic Seismic Hazard Analysis –PSHA).

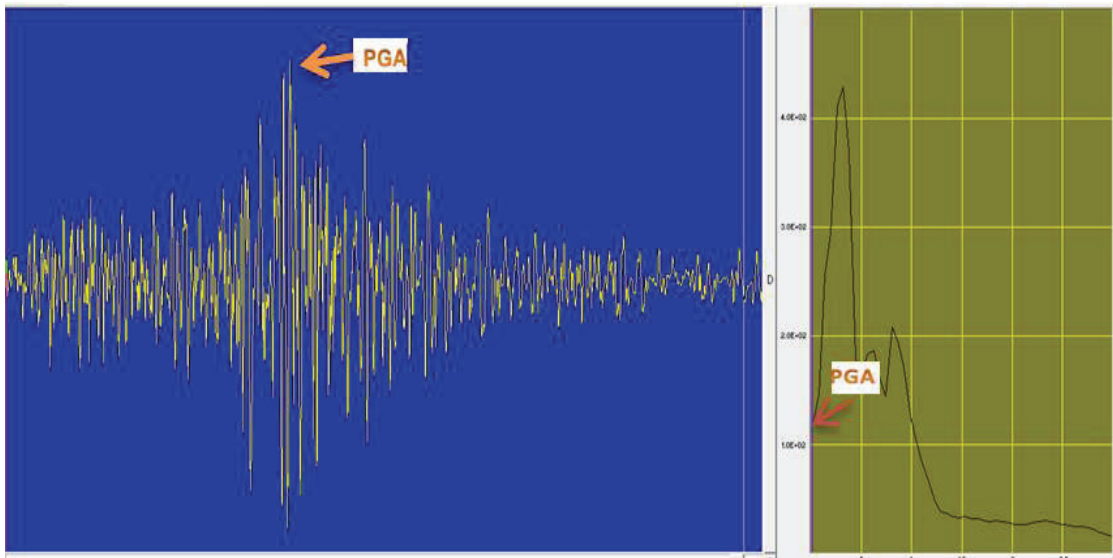
Generalmente la aceleración máxima del suelo es un parámetro que se usa para cuantificar el movimiento del suelo en estos dos métodos; esta aceleración es conocida como PGA por sus siglas en inglés (Peak ground acceleration), aunque también se pueden usar otros indicadores del movimiento del suelo como el PGV (Peak ground velocity), y el PGD (Peak ground displacement), que indican la máxima velocidad y el máximo desplazamiento del suelo.

Actualmente el parámetro más usado en las ecuaciones de atenuación como indicador del movimiento del suelo son los pseudo espectros de respuesta en aceleración (PSa), esto se debe a que este parámetro permite ser aplicado en el campo de la ingeniería civil, concretamente en el diseño sismo resistente. En las ecuaciones de atenuación que se usarán en este estudio también se definen parámetros para el cálculo del PGA y del PGV.

La figura 3.1 muestra un registro de aceleración tomado en la estación la Molina en Perú, el evento tuvo una magnitud M_w de 6.4; esta estación estaba ubicada a 84.55 km del epicentro en un suelo limo arcilloso, el registro muestra un PGA de 116 cm/s^2 .

Se cargó el registro de la Molina en el programa Degtra desarrollado por Mario Ordaz investigador de la UNAM. Mediante el uso del programa se hizo la corrección de la línea base del mismo y posteriormente se obtuvo el pseudo espectro de aceleración, que se muestra en la parte derecha de esta figura. Se hizo esto con el objeto de observar compatibilidad existente entre el valor del PGA observado en el registro y la primera ordenada en el espectro de aceleración.

FIGURA 3.1 PGA para un evento en Perú



ELABORACIÓN: Diego Quizanga.

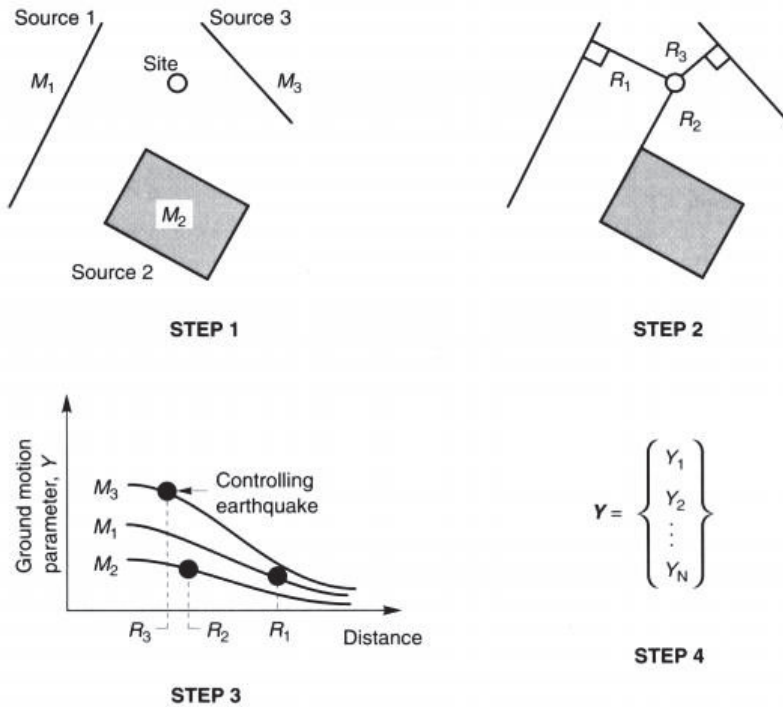
A continuación se menciona brevemente en qué consisten los dos enfoques para evaluar el peligro (Determinístico y Probabilístico).

El DSHA o enfoque determinístico es usado generalmente en lugares donde las características tectónicas están bien definidas. El DSHA considera las fuentes sismogénicas cercanas al sitio y los datos geológicos de las mismas para generar un modelo de movimiento para el sitio (El sitio es el lugar donde está nuestro punto de estudio).

El procedimiento para realizar este DSHA consiste en tomar una o más fuentes cercanas al sitio una vez identificadas las fuentes sismogénicas con sus características tectónicas definidas (M_w , SRL etc) se obtienen las distancias del sitio a las fuentes (R_1 R_2 R_3), se realizan gráficas de parámetro de movimiento vs distancia para cada fuente, en esta gráfica se determina el sismo de control que es aquel que produce una mayor respuesta del suelo, este sismo controlador está asociado a una magnitud M_w y a una distancia R . Finalmente con los datos del sismo controlador finalmente se evalúa el peligro usando una GMPE (Espectro de aceleración, de velocidad, desplazamiento).

En la figura 3.2 muestra una síntesis de este método.

FIGURA 3.2 Procedimiento para DSHA



FUENTE: (Kramer, 1996)

El otro enfoque que se puede realizar en la evaluación del peligro es el análisis probabilístico. Este tipo de análisis se usó en la Norma NEC-2015 para la elaboración de las curvas de peligro sísmico.

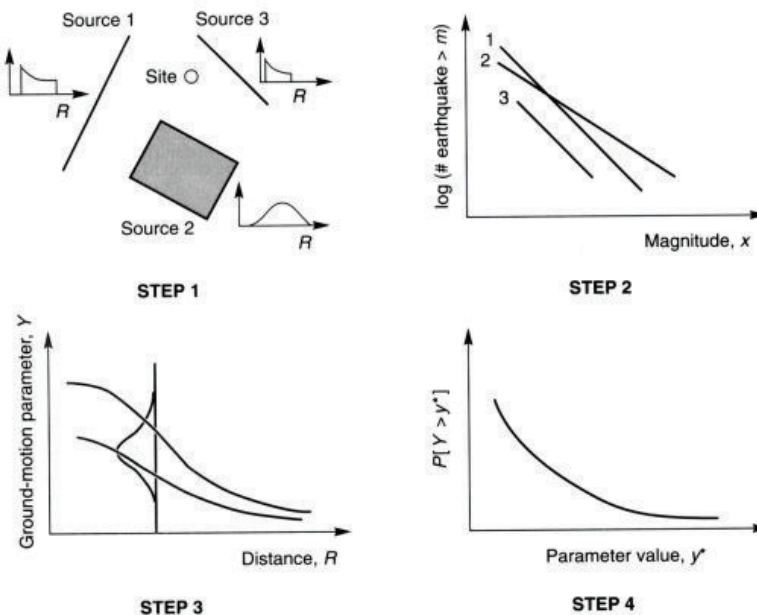
El objetivo del PSHA es cuantificar la probabilidad de exceder diferentes niveles de movimiento de como el PGA, PGV, PGD en un sitio dados todos los posibles sismos.

El análisis probabilístico provee un marco en el cuál las incertidumbres (provenientes del tamaño de un sismo, localizaciones, tasa de ocurrencias) pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas de manera racional para brindar un mejor panorama al peligro sísmico (Kramer, 1996)

El procedimiento para realizar el PSHA al igual que en el enfoque determinístico consiste en identificar y caracterizar las fuentes cercanas como fallas corticales subducción y otras, a diferencia del método determinístico en este método la ubicación del punto de ruptura tiene distintas probabilidades de encontrarse en diferentes lugares del plano de falla, esta ubicación combinada con la geometría de la fuente produce una distribución de probabilidades de la distancia para cada fuente y el sitio; no así en el método anterior donde se consideraba que la distancia entre el sitio y el plano de falla ya estaban definidos y que en los otros puntos de la falla no podría existir eventos. Se utiliza después una relación de recurrencia que busca identificar la tasa de ocurrencia de los sismos en las fuentes ubicadas (usualmente se utiliza la relación de Gutenberg-Richter), después mediante las GMPEs se obtiene parámetros de medición de respuesta (PGA, PGV, PGD) para diferentes magnitudes en cualquier punto de la fuente. Finalmente se realiza una curva de peligro que involucra todas las incertidumbres que se tienen en la ubicación, tamaño y en el uso de las GMPE's.

En la figura 3.3 se muestra una síntesis del método PSHA.

FIGURA 3.3 Procedimiento para PSHA



FUENTE: (Kramer, 1996)

Referente a la elaboración de las curvas de peligro en el Ecuador, estas constan en el capítulo de peligro sísmico de la NEC 2015. En la norma se indica que para realizar las curvas se utilizó de las ecuaciones de predicción de movimiento validadas por el Global Earthquake Model (GEM), para las fuentes intraplaca (entre ellas las de Boore y Atkinson, 2008; Akkar y Boomer, 2010; Kanno et. al.,2006; Bindi et. al., 2009), las curvas de la NEC permiten obtener espectros de aceleración en roca para diferentes tasas anuales de excedencia en las principales ciudades del país.

Con respecto al uso de uno o de otro método se puede mencionar que el DSHA (método determinístico) presenta el peor caso de escenario de terremoto para el diseño, en otras palabras provee como resultado una respuesta del suelo para un evento que puede producirse quizá en más de 200 años, no indicando cuan probable es que este evento se produzca durante la vida útil de la estructura. El enfoque determinístico es de mucha utilidad cuando se quiere ver cuál es el escenario que afecta más a una obra perteneciente a la infraestructura de una ciudad.

Para evaluar el peligro sísmico este estudio utilizará un método determinístico pues se obtendrá espectros calculados en 810 sitios diferentes para cada uno de los segmentos de falla de la QFS y que fueron previamente descritos en el capítulo anterior, estos segmentos son: ILB, CEI, BC y P con lo que se pueden obtener un total de 3240 espectros de respuesta en aceleración.

Con los espectros calculados se obtendrán espectros promedios para 5 zonas geográficas de estudio (zona norte, centro norte, centro, centro sur y sur)

Los sitios de estudio corresponden a diferentes lugares de una malla que abarca la zona urbana del distrito metropolitano de Quito, y será explicada con detalle en el capítulo 7.

El método determinístico a usar en este estudio considera:

- Identificar las fuentes sismogénicas y sus características.

- Obtener distancias del sitio a las fuentes (R_1 R_2 R_3),
- Obtener la respuesta en aceleración mediante el uso de GMPEs, se omitió la determinación del sismo controlador debido a que en este estudio se están obteniendo todos los espectros posibles para los 810 sitios de análisis.

Este estudio mostró en el capítulo anterior la identificación de las fuentes sismogénicas, las áreas de ruptura esperada para cada segmento de falla y sus respectivas magnitudes.

Considerando que en este estudio determinístico la ubicación del hipocentro del evento no tiene distintas probabilidades de encontrarse en diferentes lugares del plano de falla y se encuentra ubicado en el centro del área de ruptura es fácil obtener mediante el uso de geometría las distancias entre el sitio y el hipocentro. En una ecuación de atenuación además de conocer la distancia hipocentral R_{HYP0} se necesita conocer parámetros asociados a las distancias al sitio. Estos parámetros son el R_X , R_{JB} y R_{RUP} , se realizará la definición de estos parámetros de entrada para las GMPE's más adelante.

Queda por definir en este punto las GMPE's que se van a usar, pero previamente se indicará los criterios adoptados para la selección de las diferentes GMPE's, debido que la correcta selección de una ecuación de atenuación es un paso muy sensible en la evaluación del peligro sísmico. Además se mostrarán los diferentes parámetros generales que se requieren en una GMPE's y los criterios para poder escoger GMPEs adecuadas a la región de Quito.

3.2 ECUACIONES DE ATENUACIÓN (GMPE'S)

La atenuación sísmica como su nombre lo indica muestra el grado en que se atenúa o disminuye la onda sísmica en la corteza terrestre debido a la distancia existente entre el sitio y el hipocentro de un evento, y a la disipación de energía a lo largo de la trayectoria de desplazamiento.

Para intentar predecir la atenuación se han creado ecuaciones que han sido obtenidas basadas en los métodos de regresiones matemáticas que no son otra cosa que métodos numéricos que buscan a partir de mediciones conocidas obtener ecuaciones matemáticas, estas ecuaciones relacionarán una variable independiente con una dependiente y un término aleatorio (ε), esta variable dependiente junto al término aleatorio permiten obtener valores cercanos a la medición ya conocida.

A las ecuaciones de atenuación se las conoce también como GMPE o ecuaciones de predicción de movimiento fuerte, se les llama también modelos de atenuación, modelos de movimiento fuerte o simplemente modelos, relaciones de atenuación, entre otros nombres.

Las expresiones matemáticas que se utilizarán en este estudio no deben ser llamadas leyes de atenuación porque este término no es correcto, debido a que estrictamente hablando lo que se está presentando son ecuaciones de predicción de movimiento.

Las ecuaciones de atenuación sísmica se disponen en términos de aceleración máxima (PGA), que se define como el valor máximo absoluto de un registro temporal de la aceleración sísmica del suelo y también en términos de ordenadas espectrales del espectro de aceleraciones (PSa), dada una distancia epicentral y una magnitud (Scherbaum et al 2004; Cotton et al. 2006; Douglas 2007; Stafford et al 2008) (Ver figura 3.1 como referencia).

A nivel mundial son dos los grupos principales que han venido trabajando en el desarrollo de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (GMPE's) estos son:

1. **PEER** (Pacific Earthquake Engineering Research Center) con sede en la Universidad de California, Berkeley, con sus programas: (Next Generation Attenuation) NGA-WEST1, NGA WEST2, NGA EAST

2. **GEM** (Global Earthquake Model) que es un organización internacional que viene trabajando en conjunto con PEER.

Sin embargo existen muchos grupos a nivel mundial que trabajan en la obtención de GMPE's, el último reporte emitido por PEER señala que desde 1964 hasta 2010 se habían realizado a nivel mundial un total de 289 GMPEs para la predicción de la aceleración máxima de suelo y 188 modelos para la estimación del espectro de respuesta. La primera ecuación recopilada en este informe es la de Esteva & Rosenblueth de 1964, esta ecuación relaciona el movimiento del suelo únicamente con la magnitud del evento.

La tabla 3.1 muestra los diferentes programas a nivel mundial, los números de registros, los eventos considerados y el país, esta tabla ha sido tomada de Cotton et al y está actualizada a 2010. Se puede observar que en la tabla consta la base de datos del programa NGA WEST 1 de PEER. Se mostrará en el capítulo 4 la actualización de los registros de esta base de datos de PEER.

TABLA 3.1 Bases de datos a nivel mundial.

NOMBRE	NÚMERO DE REGISTROS	NÚMERO DE COMPONENTES	NÚMERO DE EVENTOS	PAÍS/ORIGEN
PROGRAMA				
ITACA	1165	3	202	ITALIA
NGA	3551	3	173	USA, TAIWAN
TNSMD	4607	3	2996	TURQUÍA
ESMD	462	3	110	EUROPA
KIK-NET	4704	6	596	JAPÓN
CAUZZI & FACCIOLI	1163	3	60	USA,ITALIA,ISLANDIA TURQUIA Y JAPÓN

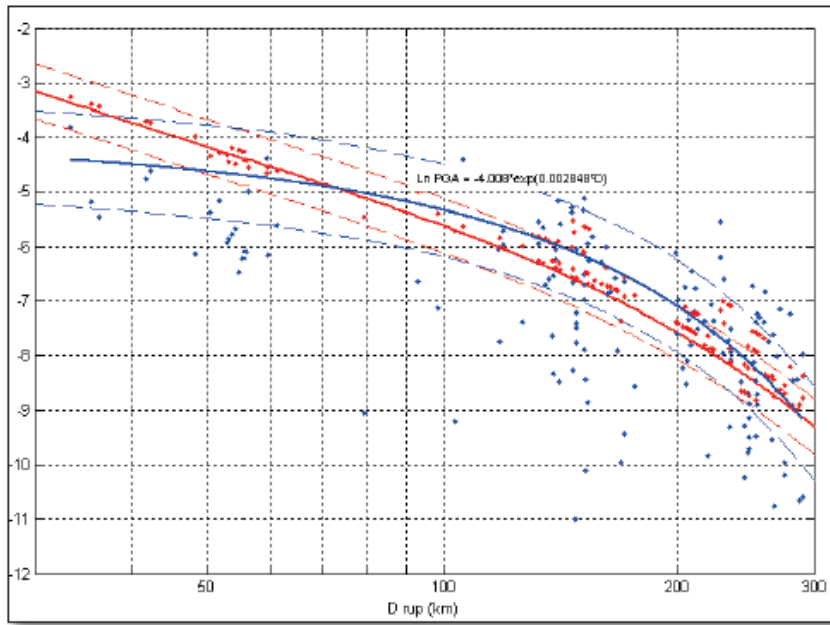
FUENTE: (Cotton, 2010)

El proceso que se usa para generar una ecuación de atenuación consta de tres pasos que se describen a continuación:

1. Seleccionar la forma de la función matemática (Se escoge la forma de una ecuación que permita que la gráfica magnitud vs distancia más cercana al plano de ruptura R_{RUP} sea lo más cercana a la realidad, generalmente se escogen funciones logarítmicas porque las aceleraciones máximas del movimiento de suelo PGA están distribuidas aproximadamente de forma log normal)
2. Tener una base extensa de registros.
3. Realizar la regresión matemática.
4. Validar la ecuación a partir de la comparación entre el modelo planteado y las mediciones conocidas

A nivel latinoamericano todavía no existen estudios para determinar GMPE's propias de la región por lo que en la mayoría de códigos y normas de diseño sismo resistente de Sudamérica basan su evaluación del peligro usando ecuaciones planteadas por alguno de los dos grupos anteriormente descritos.

Un análisis de aplicabilidad de las GMPE's de PEER para Ecuador utilizando datos registrados durante el periodo 2000-2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos fue realizado por Lourdes Taipe en 2013. La figura 3.4 tomada de este estudio muestra una gráfica de $\ln(PGA)$ vs distancia R_{RUP} para eventos de Magnitud M_w entre 4.5. y 5, la GMPE que utilizó para la obtención de la gráfica fue la ecuación de Chiou y Youngs del 2008 que se muestra con la línea en color rojo, los puntos azules corresponden a los diferentes PGAs tomados en las diferentes estaciones que proporcionaron los datos de PGA conocidos.

FIGURA 3.4 Ecuación de atenuación y PGA medidos vs distancia

FUENTE: (Taipe, 2013)

Toda ecuación de movimiento fuerte de suelo viene con un “sigma” o desviación estándar que indica el grado de dispersión que pueden alejarse los datos respecto al modelo, se lo conoce en las GMPE’s como modelo de desviación estándar o modelo aleatorio y tiene una componente intra evento y otra interevento, en los capítulos referentes a los modelos adoptados se indicará como los diferentes autores consideraron estos modelos aleatorios.

3.3 CRITERIO DE SELECCION DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Existen a nivel mundial cientos de ecuaciones de atenuación algunas con un gran número de variables y otras muy sencillas.

Como se mencionó previamente existen muchos autores a nivel mundial de ecuaciones de atenuación, por este motivo es necesario que en el proceso de selección para usar una GMPE’s se tome en cuenta al menos estos 7 parámetros

de exclusión que han sido sugeridos por diferentes autores (Douglas et al,2012), (Cotton et al, 2006) y que se mencionan a continuación:

1. El modelo es de un régimen tectónico claramente irrelevante
2. La GMPE´s no ha sido publicada en revistas internacionales
3. La ecuación no ha sido obtenida a partir de una extensa base de datos
4. El modelo ha sido reemplazado en publicaciones más recientes
5. El rango de frecuencias del modelo no es apropiado para aplicaciones de ingeniería
6. El modelo tiene una forma funcional inapropiada
7. El método de regresión o los coeficientes son inapropiados

El estudio de Taipe de 2013, concluyo que los valores de PGA obtenidos mediante modelo de Campbell y Borzognia de 2008 (CB08), son similares a los PGA observados en diferentes estaciones en Ecuador. Este estudio recomendó al modelo CB08 como un buen candidato para ser utilizado como una GMPE´s para eventos corticales (intraplaca superior), por este motivo esta ecuación es aplicable para regiones como la de Quito, debido a que el sistema de fallas de Quito QFS está dentro de este régimen.

El análisis de Taipe en base a probabilidades demostró también que la ecuación de Chiou y Youngs de 2008 (CY08), es confiable para eventos corticales, siendo necesario conocer en detalle los parámetros de la fuente sismogénica.

Las ecuaciones (CB08 y CY08) pertenecen al programa de Next Generation Attenuation NGA WEST1 de PEER (Universidad de California, Berkeley) y no caen dentro de los parámetros de exclusión descritos por Cotton, pues tienen formas funcionales adecuadas (forma lognormal es recomendada para este tipo de ecuaciones), han sido publicados en diferentes revistas internacionales, además han sido obtenidos a partir de una base de datos extensa etc.

Con estos antecedentes y debido a que se pueden ajustar al ambiente tectónico de la región de Quito las ecuaciones de atenuación que se usarán en este estudio son:

Campbell y Borzognia de 2013 (CB13) → Sismicidad cortical somera

Chiou y Youngs de 2013 (CY13) → Sismicidad cortical somera

Abrahamson y Silva de 2013 (ASK13) → Sismicidad cortical somera

Todas estas ecuaciones de movimiento fuerte de suelo han sido desarrolladas por PEER y pertenecen al programa NGA WEST2, pueden ser usadas para ambientes tectónicos similares a los de la región de Quito, porque han sido obtenidas a partir de una base extensa de datos que serán descritos en cada caso en los capítulos siguientes y han sido citadas en publicaciones recientes.

3.4 PARÁMETROS USADOS EN LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Una vez que se ha definido que son la GMPE's y las ecuaciones que se utilizarán en el presente estudio se hará énfasis en describir los parámetros que utilizan en ellas; se coloca el nombre en inglés y sus siglas en este idioma debido a que la información bibliográfica usada en este estudio respecto a ecuaciones de atenuación viene escrita en este idioma, la tabla 3.3 muestra un resumen de los términos usados en las GMPE's con su traducción al español.

3.4.1 WIDTH (W), LENGHT (L)

W representa el ancho de falla y L la longitud del plano de falla, ambos parámetros se miden en la GMPE's en km.

Es necesario haber pre establecido estos parámetros como datos de entrada de las GMPE's. En la figura 3.4 se puede observar gráficamente estos dos parámetros.

3.4.2 STYLE OF FAULTING (SOF)

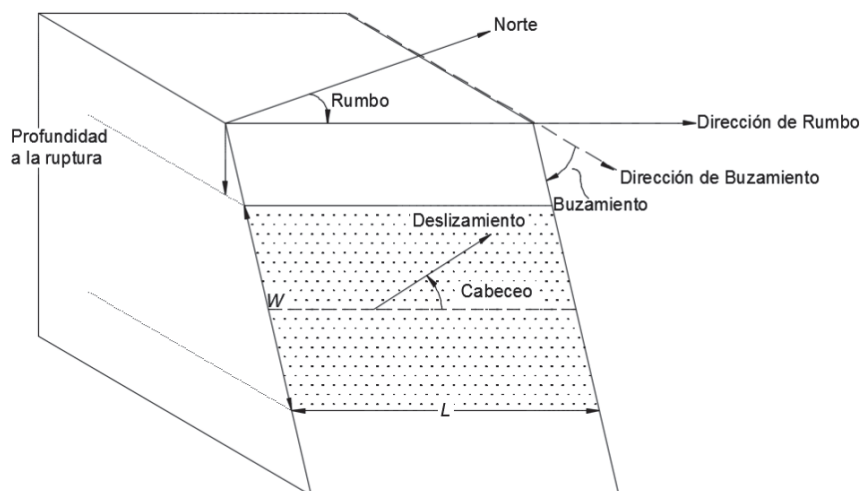
Aunque para definir geoméricamente una falla se usan tres ángulos que son strike, dip y rake, es este último ángulo el que define en una ecuación de atenuación el estilo o mecanismo de fallamiento (SOF).

Se enumera a continuación los rangos de los ángulos que definen a una falla:

- ✓ **Strike (ϕ)**, Indica la orientación con respecto al Norte, su rango es de 0 a 360 °.
- ✓ **Dip (δ)**, Indica la orientación con respecto a la horizontal, su rango es de 0 a 90 °.
- ✓ **Rake (λ)**, Indica el ángulo de desplazamiento de un segmento con respecto a otro, su rango es de -180 a 180 °. El NGA define al rake como el ángulo medido en el plano de falla en sentido anti horario desde la dirección referencia del rumbo hasta la dirección media de deslizamiento.

La figura 3.5 muestra los diferentes ángulos anteriormente descritos, según la simbología del proyecto NGA WEST2, así también muestra las longitudes de ancho “W” y de largo “L” del plano de falla.

FIGURA 3.5 Ángulos que definen el tipo de falla



FUENTE: NGA WEST2

La tabla 3.2 muestra el mecanismo de falla según el ángulo rake, según los criterios del NGA WEST2.

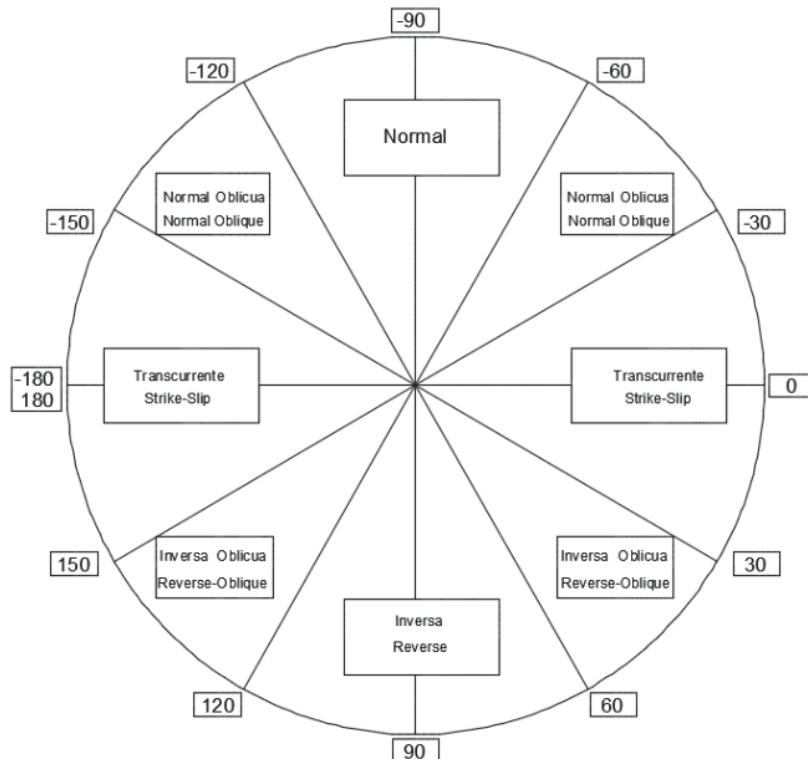
TABLA 3.2 Clasificación del tipo mecanismo de falla en función del rake.

Clase de mecanismo de fallamiento (SOF)		Rango del ángulo rake en grados
Mecanismo de falla basada en el ángulo de cabeceo (Rake)	Transcurrente (Strike -Slip)	-180<rake<-150
		-30<rake<30
		150<rake<180
	Normal	-120<rake<-60
		60<rake<120
	Inversa (Reverse)	30<rake<60
Inversa-oblicua (Reverse-oblique)	120<rake<150	
Normal-oblicua (Normal-oblique)	-150<rake<-120	
	-60<rake<-30	

FUENTE: NGA WEST2

La figura 3.6 muestra un esquema de la clasificación de las fallas en función del rake aunque se evidenciará más adelante que no todos los autores que forman parte del proyecto NGA WEST2 y que han formulados las GMPE's, consideran la clasificación mostrada en la siguiente figura.

FIGURA 3.6 Mecanismos de falla en función del rake



FUENTE: NGA WEST2- Robert Darragh

3.4.3 PSEUDO-ABSOLUTE ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM 5% DAMPING (PSa_{ROT50})

El pseudo espectro de aceleración (PSa) por definición es el espectro obtenido a partir del espectro de desplazamiento relativo (Sds) mediante el siguiente artificio:

$$PSa = \omega^2 Sds \quad (3.1)$$

La pseudoaceleración y el espectro de respuesta aceleración absoluta (Saa) son idénticos para sistemas sin amortiguamiento (Chopra, 1981), para estructuras con amortiguamiento esto no siempre se cumple.

Un acelerógrafo nos da tres registros uno en la dirección N-S, otro en la dirección E-W (componentes horizontales) y otro en sentido vertical.

Las primeras ecuaciones de atenuación formuladas han usado como medida de intensidad la media geométrica de dos registros horizontales, esta media era dependiente de la orientación de los sensores instalados.

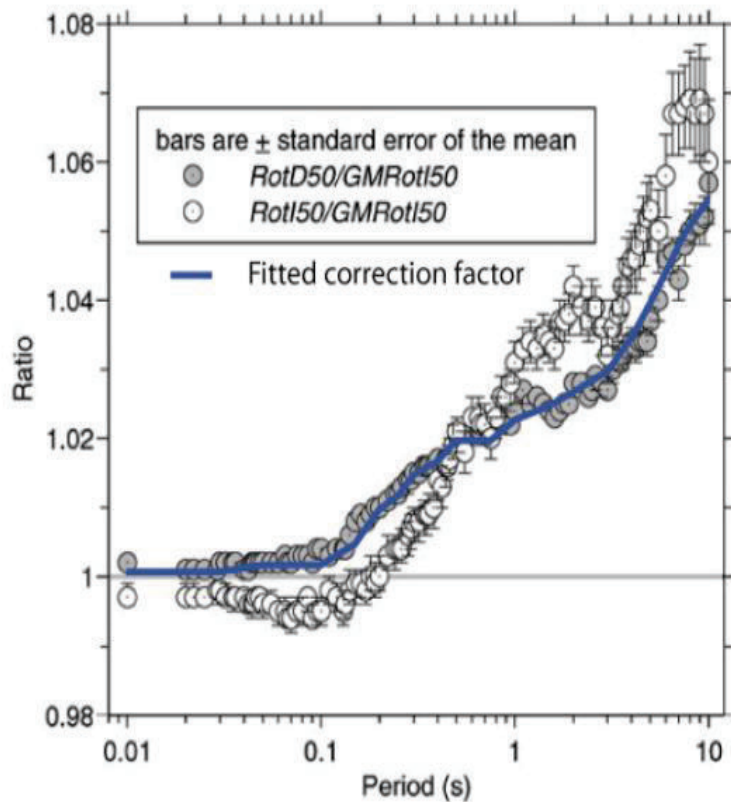
Una nueva medida de intensidad del movimiento fuerte se definió en el programa NGA-WEST1. Boore en 2006 obtuvo este nuevo parámetro de medición del movimiento fuerte, el cual era independiente de la orientación de los sensores instalados en campo y se lo definió como el término "**GMRotDpp**", donde GM representa la media geométrica, Rot indica que se utiliza la rotación sobre todos los ángulos no redundantes (0 -90 °), D indica que se usa periodos dependientes a los ángulos de rotación, y pp indica el valor del percentil usado.

Las ecuaciones de atenuación utilizadas, en el programa NGA WEST1 usaron el parámetro GMRotDpp como medida indicadora del movimiento fuerte.

Posteriormente en 2010, Boore propuso una nueva medida de intensidad del movimiento fuerte esta es independiente de la orientación de los sensores y abarca todos los rangos de las amplitudes espectrales sobre todos los posibles ángulos de rotación, la diferencia con la medida propuesta en 2006 es que ya no considera la media geométrica en los cálculos, se definió esta medida como el término "**RotDpp**".

La figura 3.7 del estudio de Boore de 2010 muestra la comparación entre las dos medidas usando la base del programa NGA WEST1. Boore concluyó en su estudio del 2010 que las nuevas medidas eran similares a las previamente introducidas en 2006.

FIGURA 3.7 Relación entre $Sa_{RotD50}/Sa_{GMRot150}$



FUENTE: (Boore, 2010)

El espectro que se obtiene en todas las ecuaciones que forman parte del programa NGA WEST2, utiliza la nueva medida de Boore del 2010, a este espectro se le conoce como el Sa_{RotD50} es definido con el valor medio (50 percentil) de aceleraciones espectrales calculadas sobre todos los ángulos de rotación para un movimiento fuerte dado y que abarca todos los rangos de amplitudes espectrales.

Pese a que las ecuaciones de atenuación del NGA-WEST2 calculan la respuesta como Sa_{RotD50} , hay criterios que consideran que la máxima aceleración espectral rotada en todas las direcciones $Sa_{RotD100}$ es más significativo que el Sa_{RotD50} (Shashi et al,2014)

3.4.4 PEAK GROUND ACCELERATION (G) (PGA)

Previamente ya se definió al PGA como el valor máximo absoluto de un registro en aceleración, en las GMPE's se utiliza generalmente "g" como unidad de aceleración.

El PGA horizontal puede tener una componente N-S, E-W, al igual que en el caso del espectro PSa, en las ecuaciones de atenuación usadas el PGA que se obtiene es el $PGA_{Rot D50}$ de acuerdo a las consideraciones previamente descritas.

3.4.5 MOMENT MAGNITUDE (M)

Indica la cantidad de energía liberada por el terremoto en un evento sísmico, aunque se tiene diferentes tipos de magnitud desde la magnitud local ML definida por Richter en 1935, existen otros tipos de magnitudes como M_s , M_{Lbg} y M_w .

En las ecuaciones de atenuación se usa únicamente el término M_w que es la magnitud de momento sísmico, cuya ecuación se mostró anteriormente (Ec 2.5).

3.4.6 DEPTH TO TOP OF COESISMIC RUPTURES (Z_{TOR})

El parámetro Z_{TOR} es la distancia más cercana entre la superficie donde se encuentra el sitio y la parte superior del plano de falla, su distancia se mide en km.

Es usada en las GMPE's de ASK13, CB13 and CY13.

Ver la figura 3.8 como referencia.

3.4.7 SEDIMENT DEPTH ($Z_{1.0}$)

El parámetro $Z_{1.0}$ es la profundidad en la cual la onda de corte tiene una velocidad de 1km/s.

Este parámetro es usado en los modelos ASK13, CB13 y CY13, se mide el mismo en metros.

3.4.8 DEPTH TO 2.5 KM/S ($Z_{2.5}$)

El parámetro $Z_{2.5}$ es la profundidad a la que la onda de corte tiene una velocidad horizontal de 2.5 km/s.

Es usada en la GMPE´s de CB13, se mide esta distancia en metros.

3.4.9 RUPTURE DISTANCE (R_{RUP})

El parámetro R_{RUP} es la distancia más cercana entre el sitio y el plano de ruptura, para el caso de fallas inversas como las del sistema de fallas de Quito, si el sitio se encuentra sobre el plano de falla se deber trazar una perpendicular entre el sitio y el plano de falla, R_{RUP} es usada en las ecuaciones ASK13, CB13 and CY13, en las GMPE´s se mide esta distancia en km.

Ver la figura 3.8 como referencia de los distintos casos en que debe calcularse esta distancia.

3.4.10 JOYNER-BOORE DISTANCE (R_{JB})

El parámetro R_{JB} , conocido como radio de Joyner-Boore es la distancia más cercana entre la proyección horizontal de la superficie de falla y el sitio, en las GMPE´s se mide esta distancia en km. El radio R_{JB} cuando el sitio se encuentra sobre la proyección del plano de falla esta distancia se toma con un valor de 0.

Este parámetros es utilizado en las GMPE´s CB13, ASK13 y CY13.

Ver la figura 3.8 como referencia de los distintos casos en que debe calcularse esta distancia.

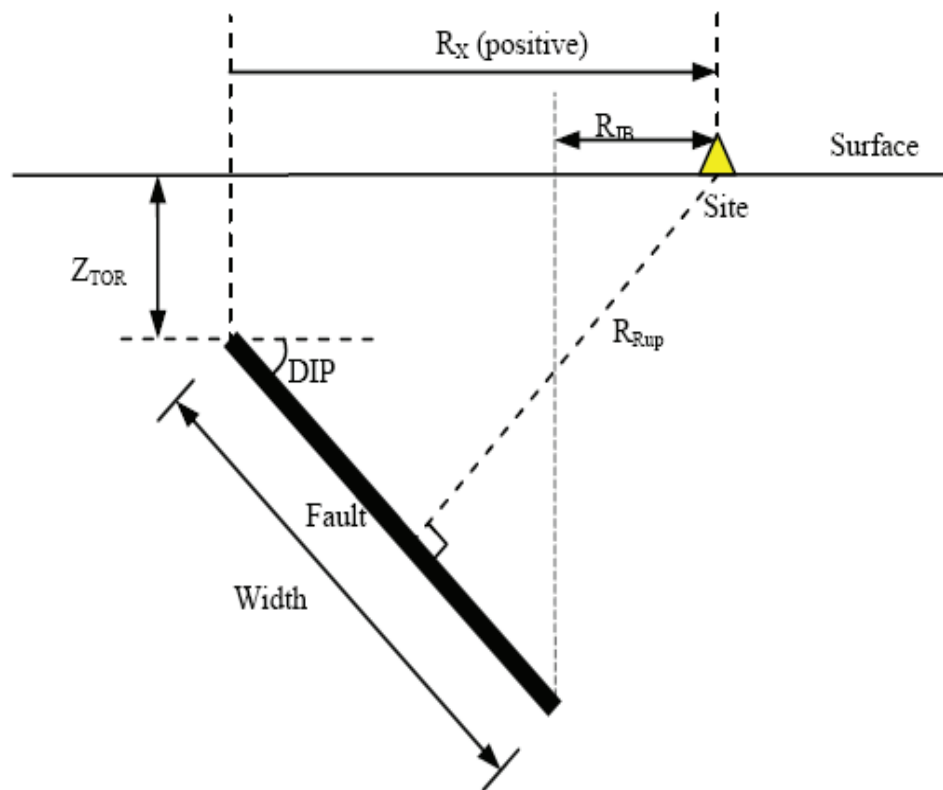
3.4.11 HORIZONTAL DISTANCE (R_X)

El parámetro R_X , es la distancia horizontal medida desde la proyección de la parte superior del plano de falla hasta el sitio, es medido en (km), se usa en las ecuaciones ASK13 y CY13. Ver la figura 3.8 como referencia de los distintos casos en que debe calcularse esta distancia.

3.4.12 HYPOCENTRAL DISTANCE (R_{HYPO})

El parámetro R_{HYPO} , es la distancia entre el hipocentro y el sitio es medido en (km), se usa en la ecuación de Campbell y Borzognia (CB13).

FIGURA 3.8 Distancias usadas en ecuaciones de atenuación



FUENTE: Kanklamanos 2011

3.4.13 SHEAR WAVE VELOCITY (V_{s30})

El parámetro V_{s30} indica la velocidad de onda media en los 30 metros superiores del sitio, es medido en (m/s).

Este factor es utilizado en los modelos CY13, CB13 y ASK13.

3.4.14 ALEATORY VARIABILITY (σ)

El parámetro sigma " σ " indica el grado de dispersión que pueden tener los resultados, generalmente en las GMPEs la variable aleatoria "sigma" en la amplitud del movimiento fuerte depende de la magnitud del evento y el grado de la respuesta no lineal del suelo.

La tabla 3.3 muestra un resumen de la terminología usada en las ecuaciones de atenuación, en los capítulos siguientes se usará el nombre de las variables en español pero se mantendrá el uso de las abreviaciones originales (en inglés).

TABLA 3.3 Terminología usada en las ecuaciones de atenuación

Término usados y abreviaciones	Referencia en español
Ground motion peak ecuation (GMPE)	Ecuación de movimiento fuerte
Next Generation Atenuation (NGA)	Nueva generación de ecuaciones de atenuación
Pacific Earthquake engineering research center (PEER)	Centro de ingeniería e investigación de sismos del Pacífico
Width (W),	Ancho de plano de falla
Lenght (L)	Longitud de plano de falla
Style of faulting (SOF)	Mecanismo de falla
Strike (ϕ)	Ángulo de Rumbo
Dip (δ)	Ángulo de Buzamiento
Rake (λ)	Ángulo de deslizamiento o cabeceo
PSa _{ROTD50} (Pseudo-absolute acceleration response spectrum ; 5% damping)	Pseudo espectro de aceleración absoluta considerando un amortiguamiento del 5%
Peak ground acceleration (PGA)	Aceleración máxima del suelo
Moment magnitude (M)	Magnitud de Momento
Depth to top of coesismic ruptures (Z_{TOR})	Profundidad al tope del plano de falla
Sediment depth ($Z_{1.0}$)	Profundidad del sedimento
Depth to 2.5 km/s ($Z_{2.5}$)	Profundidad a la que la onda de corte tiene una velocidad de 2.5 km/s
Rupture distance (R_{RUP})	Profundidad al plano de Ruptura
Joyner-Boore distance (R_{JB})	Distancia Joyner Boore
Horizontal distance (R_X)	Distancia Horizontal
Hypocentral distance (R_{HYPO})	Distancia Hipocentral
Shear wave velocity (V_{s30})	Promedio de la velocidad de la onda de corte de 0 a 30 m
Aleatory variability (σ)	Variable aleatoria

ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Finalmente se realiza un cuadro comparativo de las variables que se utilizan en las ecuaciones de atenuación escogidas que se muestra en la tabla 3.4. Se detallará en los siguientes capítulos el cálculo de estas variables en las GMPE's para obtener los espectros asociados a las fallas ciegas del QFS.

TABLA 3.4 Comparación de uso de parámetros en las GMPE's de este estudio

Parámetro	Modelo		
	AS K-13	C B-13	CY-13
Parámetros de fuente sismogénica			
Magnitud (M)	▪	▪	▪
Profundidad del plano de ruptura (Z_{TOR})	▪	▪	▪
Ancho de la ruptura (W)	▪		
Angulo de buzamiento (dip)	▪	▪	▪
Mecanismo de falla (Función de λ)	▪	▪	▪
Efecto réplica (Para modelos aplicables)	▪		
Parámetros de trayectoria			
Distancia al plano de ruptura (R_{RUP})	▪	▪	▪
Distancia Joyner-Boore (R_{JB})	▪	▪	▪
Distancia R_X	▪		▪
Efecto Hanging-Wall (H_W)	▪		▪
Parámetros de sitio			
V_{S30}	▪	▪	▪
$Z_{1.0}$	▪		▪
$Z_{2.5}$	▪	▪	▪
PGA en roca, como base para la respuesta no lineal del sitio	▪	▪	▪

FUENTE: Kanklamanos 2011

CAPÍTULO 4

MODELO DE CHIOU Y YOUNGS (2013)

4.1 INTRODUCCIÓN

En 2003 PEER (Pacific Earthquake Engineering research center) inicio un largo programa para desarrollar la nueva generación de ecuaciones de movimiento fuerte para eventos en la superficie de la corteza de regiones tectónicamente activas. El proyecto (NGA West1) concluyo en 2008 y proveyó algunos productos importantes incluyendo una base de datos de movimientos fuertes y un set de GMPE's (Ancheta et al,2011).

Entre las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte más conocidas de este programa se destacan las siguientes:

- AS08: Abrahamson & Silva 2008
- BA08: Boore & Atkinson 2008
- CB08: Campbell & Bozorgnia 2008
- CY08: Chiou & Youngs 2008
- I08: Idriss 2008

Las ecuaciones de atenuación del NGA WEST1 han tenido aceptación a nivel mundial y en Ecuador han sido varios los trabajos que se han presentado usando estas GMPE's. El análisis de peligro de la norma NEC-2015 para fuentes intraplaca trabaja con varias de las GMPE's validadas por Global Earthquake Model (GEM) que a su vez trabaja en conjunto con PEER.

Sin embargo investigadores de PEER identificaron que los modelos del programa NGA WEST 1 presentaron varios problemas en cuanto a la predicción del movimiento fuerte para eventos medianos y pequeños que cumplían la condición de tener una magnitud M menor a 5, por lo que se decidió continuar la investigación

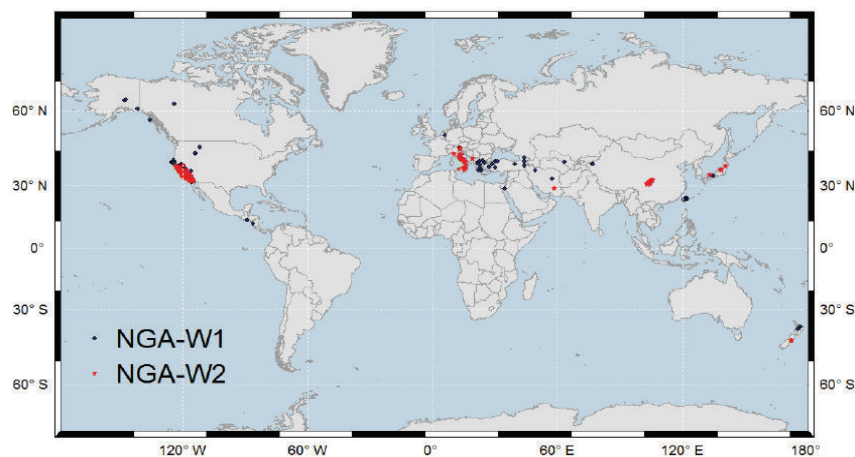
mediante la creación del programa NGA WEST2, este proyecto comenzó en marzo de 2010, y debía durar 30 meses.

El NGA-WEST2 fue concebido para ampliar la base de datos de su programa predecesor y mejorar en cuanto a calidad y consistencia. El NGA WEST2 considera estos criterios descritos por Ancheta et al para la base de datos:

- Un evento es cortical si ocurre dentro de la corteza continental.
- Los eventos considerados dentro de la base de datos tienen un hipocentro con una profundidad menor a 20 km.
- Los eventos se encuentran en regiones tectónicamente activas.
- No se excluyeron eventos ocurridos en una proximidad cercana (tiempo o espacio) de un evento previo.

La base de datos del NGA WEST2 es una combinación de dos set de datos reunidos en esfuerzos separados y después combinados. El primer set de datos es global y concentra eventos relativamente grandes $M > 5$, esta porción de datos incluye 173 eventos de NGA-WEST 1 y 160 eventos adicionales, el segundo set de datos incluye 266 eventos moderados de California con un magnitudes que varían entre 3 y 5.45 (Ancheta et al, 2011).

FIGURA 4.1 Distribución de los epicentros incluidos en la base de datos de NGA-WEST2

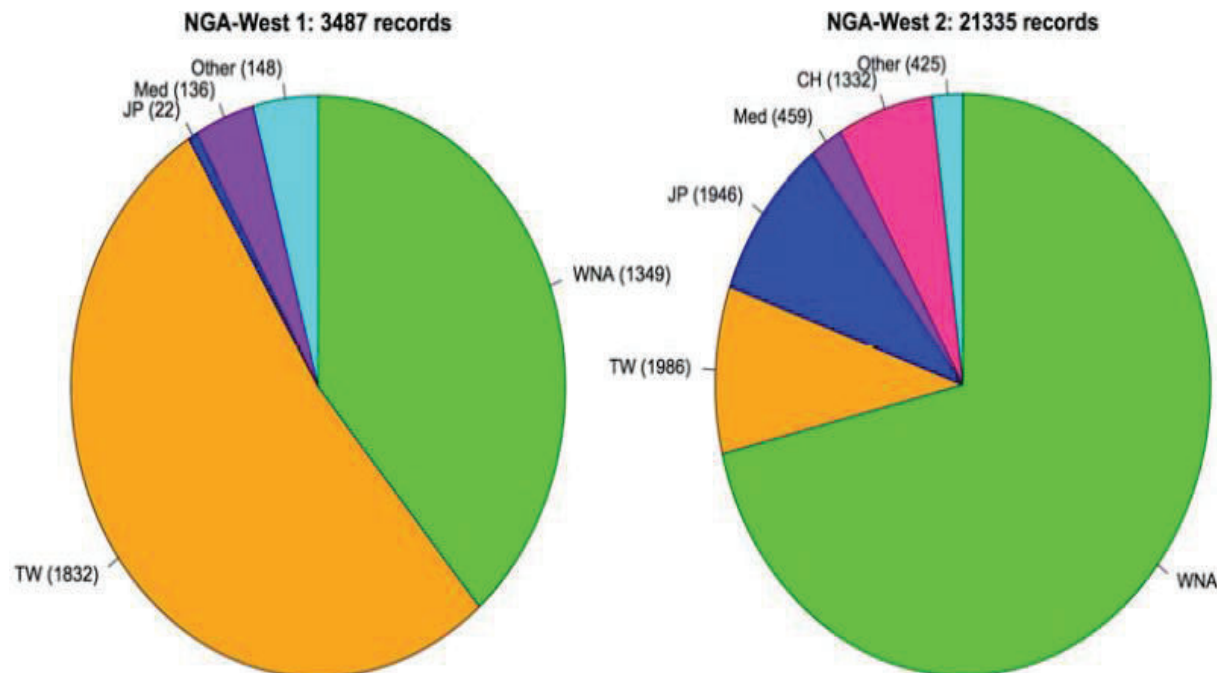


FUENTE: (Ancheta et al,2011).

La figura 4.1 muestra los epicentros considerados para los 599 eventos que se consideraron en el NGA –WEST 2.

La figura 4.2 muestra una gráfica tipo pastel que indica la comparación entre la base de datos de NGA-WEST1 y NGA-WEST2. Se observa que se ha incrementado en más de 6 veces el número de registros ya que el NGA WEST1 contaba con 3.487 registros y el NGA WEST 2 cuenta con 21.335. Además se tiene nuevos países que han contribuido significativamente con registros como Japón, China, Taiwan etc. También se puede observar que prácticamente se ha obtenido registros en 5 continentes, sin embargo en esta base de datos no se cuentan con registros provenientes de América del Sur.

FIGURA 4.2 Distribución de los eventos en función de su localización



FUENTE: (Ancheta et al,2011).

Los registros mencionados anteriormente cumplen los siguientes parámetros que han sido descritos por Ancheta et al:

- En la estación de monitoreo el equipo está colocado a nivel de piso (No dentro de estructuras), o en su defecto debe estar colocada en el nivel más bajo de una estructura.
- La grabación tiene señal adecuada a ruido de la inspección visual a veces tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.
- Se debe conocer la localización de la estación de registro (Latitud y Longitud).
- Cuando se ha colocado múltiples instrumentos sobre una misma base, se debe seleccionar un registro singular.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS MODELOS DE CHIOU Y YOUNGS (2013)

La base de datos usada en este modelo fue tomada del programa NGA-WEST2 indicado previamente, además para la realización del modelo se complementaron las matrices de bases de datos perdidos.

El criterio de selección de datos de este modelo a partir de la base de datos del NGA-WEST2 consistió en que los registros debían ser tomados de eventos corticales, los registros debían ser tomados a nivel de suelo de esta manera se eliminaron registros tomados en edificios, se mantuvieron los registros que tenían efectos topográficos, pues los autores consideraron que los efectos topográficos debían ser introducidos dentro de la variabilidad de la GMPE. Además se excluyeron registros que no tenían información de las condiciones locales del suelo.

En Chiou y Youngs (2008) se usó una combinación empírica de datos de regiones tectónicas activas principalmente (California, la isla de Taiwán, Turquía, y limitando los datos de Irán, Italia y Japón). La base expandida del NGA-WEST2 incorporó

registros adicionales de Italia y Japón, así como registros de Nueva Zelanda y China. La evaluación preliminar de Chiou y Youngs (2012) determinó que existen diferencias regionales en la atenuación inelástica y en el escalamiento del V_{s30} . (Chiou y Youngs, 2013).

Por lo anteriormente mencionado los autores del modelo decidieron preliminarmente trabajar en un modelo únicamente para California usando solo los datos de esta región, con este criterio evitarían las necesidades para abordar el direccionamiento de la diferencia regional en el escalamiento del movimiento fuerte. Posteriormente se consideraron los eventos en otras regiones que cumplieran con estas condiciones:

- El evento debía tener una escala mayor a 6.
- El evento debía contar al menos con 5 registros.

Además los autores excluyeron de su base de datos eventos que ocurridos en la corteza oceánica de California y Taiwán. Inicialmente se desarrolló la GMPE de Chiou y Youngs con eventos que tenían una distancia menor a 70 km.

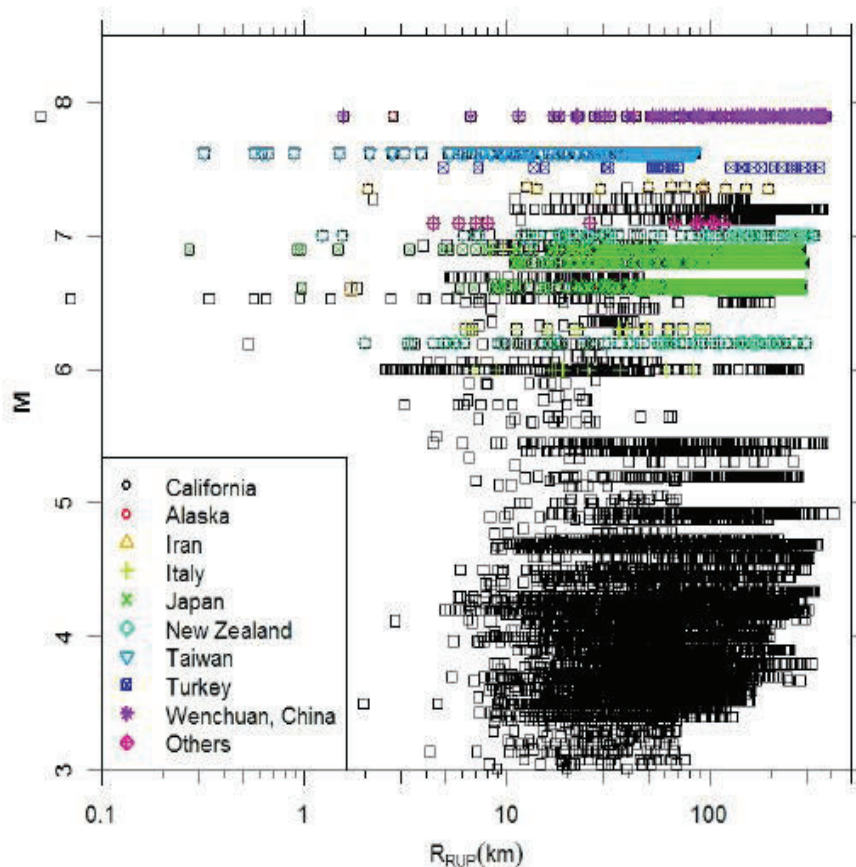
En el modelo del 2008, se incluyeron réplicas en la base de datos, con la nueva base de datos de NGA-WEST2, la GMPE de Chiou y Youngs de 2013 ya no incluyó este tipo de eventos. Para ello utilizaron un criterio que consistía en eliminar de la base de datos las réplicas (Eventos clase 2) que se encontraban dentro de los 20 km de un evento principal (Evento clase 1).

Después de aplicar los criterios de selección descritos anteriormente, Chiou y Youngs consideraron un total de 12.444 registros obtenidos de 300 eventos diferentes, estos registros constituyen la base de datos para la actualización de la GMPE.

De entre los 12.444 registros un total de 2.587 registros fueron seleccionados de 18 eventos fuera de California (Irán, Italia, Japón, Nueva Zelanda etc.).

La figura 4.1 incluye una gráfica con la dispersión de datos y las magnitudes consideradas. Se puede observar de esta figura que la base de datos de Chiou y Youngs tiene una gran cantidad de registros cuando R_{RUP} varía de 10 a 100 km y la magnitud M se encuentra entre 3 y 5.

FIGURA 4.3 Base de datos de Chiou y Youngs 2013 - Magnitud vs R_{RUP} (km)



FUENTE: Chiou y Youngs 2013

4.2.1 COMPLEMENTOS DE METADATOS

El parámetro $Z_{1.0}$ fue incluido en la base de datos del NGA-WEST2 en sitios que cubría el área de estudio del centro de estudio sísmico para el sur de California (Southern California Earthquake center S.C.E.C) mediante modelos 3D. En eventos dentro la Bahía de San Francisco se calculó este parámetro con datos de modelamiento de la velocidad dados por el servicio de geología de USA (United

States Geological Survey USGS). En otros sitios se obtuvo $Z_{1.0}$ mediante mediciones, sin embargo no todos los registros contaban con este dato por ello los autores estimaron el cálculo del $Z_{1.0}$ en base a 2 ecuaciones empíricas que se muestran a continuación:

Para California:

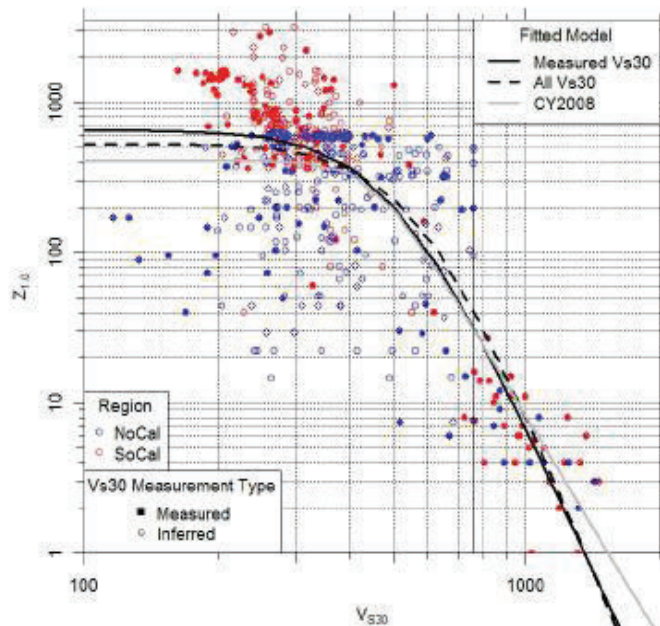
$$\ln(Z_1) = \frac{-7.15}{4} \ln\left(\frac{Vs_{30}^4 + 571^4}{1360^4 + 571^4}\right) \quad (4.1)$$

Para Japón:

$$\ln(Z_1) = \frac{-5.23}{2} \ln\left(\frac{Vs_{30}^2 + 412^2}{1360^2 + 412^2}\right) \quad (4.2)$$

La figura 4.4 muestra una gráfica de $Z_{1.0}$ vs Vs_{30} , en ella se pueden observar con puntos azules el valor de Vs_{30} para sitios ubicados en California Central, con puntos rojos los valores para California del Sur, consta también la relación descrita anteriormente que fue desarrollada en la base de datos del programa NGA-WEST2.

FIGURA 4.4 Z_1 (m) vs Vs_{30} (m/s) para California (CY13)



FUENTE: Chiou y Youngs 2013

Para el cálculo de los espectros de aceleración asociados a fallas ciegas en la región de Quito y que son el objeto de este estudio, se utilizará el $Z_{1.0}$ usando la ecuación obtenida para la región de California. Usando la ecuación (4.1) para un suelo con un V_{s30} de 300 m/s que es una buena referencia para el valor de los suelos en Quito se tendría una profundidad $Z_{1.0}$ de aproximadamente 458 metros. Sin embargo se recalca que se indicará más adelante en detalle las consideraciones para la determinación del V_{s30} en la ciudad de Quito.

Z_{TOR} en la base de datos del programa NGA WEST2 se determinó por una de estas dos maneras:

- Mediante un modelo finito de la falla
- Mediante un método de simulación que relaciona Z_{TOR} con M (CY08)

Adicionalmente los autores obtuvieron una relación para para la determinación del parámetro Z_{TOR} , debido a que las distancias a la fuente se estimaron para todos los eventos en la base de datos del NGA WEST2 a excepción de unos pocos eventos que tenían datos faltantes. Para estimar los datos faltantes en estos eventos los autores del modelo CY13 establecieron dos ecuaciones que relacionan la distancia a la fuente Z_{TOR} y la magnitud. Se tiene dos ecuaciones distintas porque el modelo considero dos tipos de mecanismos de falla (SOF), a continuación se describen estas ecuaciones:

Para fallas inversas y oblicuas:

$$Z_{TOR} = \max[2.704 - 1.226\max(M - 5.849, 0), 0]^2 \quad (4.3)$$

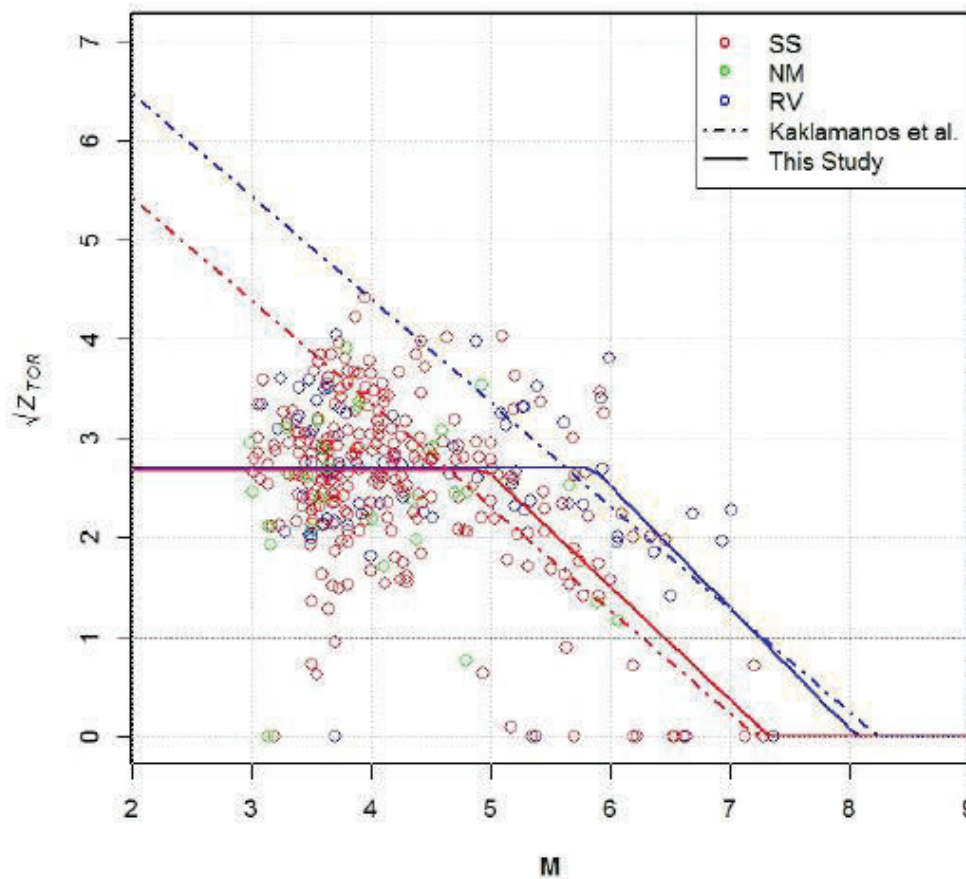
Para la combinación de fallas normales y transcurrentes:

$$Z_{TOR} = \max[2.673 - 1.136\max(M - 4.970, 0), 0]^2 \quad (4.4)$$

La figura 4.5 muestra la relación entre Z_{TOR} y la magnitud en la región de California, la simbología de los puntos mostrados referentes a su mecanismo de falla es la siguiente SS =Strike slip (transcurrente), NM= Normal, RV=Reverse (Inversas).

Se puede apreciar en esta figura la relaciones encontrada por Chiou y Young, se identifica con línea continua azul la relación para fallas inversa y con línea roja para mecanismos transcurrentes y normales, además en la gráfica consta la relación descrita por Kaklamanos et al que fue desarrollada para la base de datos del programa NGA-WEST1.

FIGURA 4.5 Z_{TOR} (km) vs M para California (CY13)



FUENTE: Chiou y Youngs 2013

4.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo de Chiou y Youngs nació en el año 2006, como una actualización del modelo de Sadigh et al de 1997, aunque Youngs ya había trabajado desde los años 80 en sus propios modelos, al modelo del 2006 se lo actualizó en el año 2008 usando una base de datos mayor (NGA-WEST1).

Antes de indicar la ecuación obtenida por Chiou y Youngs es importante indicar algunas acotaciones que los autores de la GMPE hicieron con respecto a la formulación de la ecuación presentada en 2008 y que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{ref\ ij}) = & c_1 + \{c_{1a}F_{RVi} + c_{1b}F_{NMi} + c_7(Z_{TORi} - 4)\}(1 - AS_i) + [c_{10} + c_{7a}(Z_{TORi} - 4)]AS_i \\
 & + c_2(M_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{cn(c_M - M_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_{RB}^2}\right) \\
 & + \left\{c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))}\right\} R_{RUP} \\
 & + c_9 F_{HWij} \tanh\left(\frac{R_{xij} \cos^2 \delta}{c_{9a}}\right) \left\{1 - \frac{\sqrt{R_{RUPij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 0.001}\right\}
 \end{aligned}$$

(4.5.A)

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{ij}) = & \ln(y_{ref\ ij}) + \phi_1 \min\left(\ln\left(\frac{VS_{30j}}{1130}\right), 0\right) \\
 & + \phi_2 \left(e^{\phi_3(\min(VS_{30}, 1130) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)}\right) \ln\left(\frac{y_{ref\ ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \phi_5 \left(1 - \frac{1}{\cosh(\phi_6 \max(Z_1 - \phi_7))}\right) + \frac{\phi_8}{\cosh(0.15 \max(0, Z_1 - 15))} + \eta_i + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}$$

(4.5.B)

Sobre la ecuación anterior se acota que el modelo del 2008 primero permite obtener la respuesta en roca (ecuación 4.5.A) y posteriormente considera el efecto local de sitio para obtener una respuesta de acuerdo al tipo de suelo (ecuación 4.5.B), las mismas consideraciones son usadas en la ecuación del 2013 que se mostrará más adelante.

El estudio de Chiou y Youngs de 2013, clasificó a los eventos como SMM (eventos de magnitud mediana y moderada) y LM (eventos de gran magnitud).

Para que un evento sea considerado del tipo SMM, los autores definieron que el evento debería tener una magnitud entre 3 y 5.5, así mismo para que un evento sea considerado tipo LM debía tener una magnitud mayor a 5.5 con este antecedente, los autores notaron que el escalamiento del movimiento debería ser diferente de acuerdo al tipo de evento por lo que determinaron la siguiente ecuación:

$$f(M_i) = \left\{ \alpha + \frac{\beta}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \quad (4.6)$$

Con esta ecuación los autores restringieron la influencia indebida del escalamiento de eventos de magnitud moderada debido a eventos de gran magnitud.

Respecto al modelo 2008, los autores mencionan que la ecuación de CY13 considera modificaciones respecto a su modelo predecesor en los siguientes ítems:

- Influencia del mecanismo de falla,
- Cálculo del Z_{TOR}
- Determinación de $Z_{1.0}$
- Efectos de “hanging Wall”

En cuanto al mecanismo de falla, los autores del modelo CY13 identificaron que la ecuación 4.6 rastrea correctamente la tendencia de la magnitud del efecto del fallamiento inverso por lo que se modificó el término de CY08 para al mecanismo de falla de la siguiente manera:

Para fallamiento inverso se modificó según se muestra:

$$c_{1a}F_{RVi} \text{ cambió a } \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2\max(M_i-4.5,0))} \right\} F_{RVi}$$

Para fallamiento normal se modificó así:

$$c_{1b}F_{NMi} \text{ cambió a } \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2\max(M_i-4.5,0))} \right\} F_{NMi}$$

Respecto al cálculo de la profundidad al plano de ruptura Z_{tor} , en CY13 los autores introdujeron una nueva variable ΔZ_{tor} mediante la siguiente relación:

$$\Delta Z_{TOR} = Z_{tor} - E[Z_{TOR}] \quad (4.7)$$

Dónde:

Z_{tor} : Es la profundidad Z_{TOR} medida, o determinada mediante modelos 3D

$E[Z_{TOR}]$: Es el valor obtenido al evaluar Z_{TOR} usando las ecuaciones 4.3 y 4.4 según sea el mecanismo de falla.

Con este precedente modificaron el modelo CY08 en la ecuación CY13 de la siguiente manera:

$$c_7(Z_{TORi} - 4) \text{ cambió a } \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2\max(M_i-4.5,0))} \right\} \Delta Z_{TORi}$$

Referente al cálculo de la profundidad Z_1 , así mismo en CY13, los autores introdujeron una nueva variable ΔZ_1 , mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\Delta Z_1 = Z_1 - E[Z_1] \quad (4.8)$$

Donde

Z_1 = Es la profundidad de Z_1 medida

$E[Z_1]$ =Es la media obtenida usando la ecuación 4.1

El escalamiento de “Hanging Wall” desarrollado por Chiou y Youngs del 2008, establecía una relación directa entre la amplificación de movimientos en el “Hanging Wall” con el incremento del valor absoluto de R_x , lo cual quedo expresado en el modelo CY13 mediante la siguiente expresión:

$$c_9 F_{HWij} \cos \delta \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh \left(\frac{R_{xij}}{c_{9b}} \right) \right\} \left(1 - \frac{\sqrt{R_{RUPij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right)$$

Además los autores añadieron en el modelo de 2013 los efectos debido a la influencia del ángulo de ruptura y a la directividad, debido a que en el modelo del 2008 no estaba incluido este último parámetro. Como indicador de la directividad los autores escogieron el parámetro (DPP) (Direct Point Parameter). Así mismo al igual que en los casos de Z_{TOR} y Z_1 introdujeron en el modelo CY13 una nueva variable llamada ΔDPP que se obtiene de la variación entre un valor observado y otro calculado.

La ecuación para definir la directividad en CY13 fue siguiendo la formulación de Spudich 2013 que se indica a continuación:

$$c_8 \text{fr fm } e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta_{DPP}$$

Dónde:

$$\text{fr} = \max \left(1 + \frac{\max(R_{RUP} - 40, 0)}{30}, 0 \right)$$

$$\text{fm} = \min \left(1 + \frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1 \right)$$

En el caso particular del uso de CY13 para este estudio se han considerado los valores de ΔDPP , ΔZ_{tor} , ΔZ_1 igual a cero debido a que no se disponen de valores observados de Z_{tor} y Z_1 .

Con las modificaciones realizadas al modelo de 2008 la ecuación de atenuación de Chiou y Youngs del 2013 queda expresada de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
\ln(y_{ref\ ij}) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RVI} \\
& + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMI} \\
& + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{tori} \\
& + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos\delta_i)^2 + c_2 \ln(M_i - 6) \\
& + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{\min(c_M - M_i)}) + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
& + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_{RB}^2}\right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUP} \\
& + c_8 \max\left(1 + \frac{\max(R_{RUP} - 40, 0)}{30}, 0\right) \min\left(1 + \frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta_{DPPij} \\
& + c_9 F_{HWij} \cos\delta \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{xij}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{RUPij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\}
\end{aligned} \tag{4.9.A}$$

$$\begin{aligned}
\ln(y_{ij}) = & \ln(y_{ref\ ij}) + \phi_1 \min\left(\ln\left(\frac{VS_{30j}}{1130}\right), 0\right) \\
& + \phi_2 (e^{\phi_3(\min(VS_{30}, 1130) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)}) \ln\left(\frac{y_{ref\ ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
& + \phi_5 \left(1 - e^{\Delta Z_{1,0}/\phi_6}\right) + \eta_i + \varepsilon_{ij}
\end{aligned} \tag{4.9.B}$$

Donde los datos de partida son:

M = Magnitud de Momento.

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km)

R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).

R_x = Distancia horizontal (km).

F_{HW} = Factor de Hanging Wall (Usar 1 Si $R_x \geq 0$, y 0 en otros casos).

δ = Ángulo de Buzamiento (°).

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla.

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa (Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

V_{s30} = Velocidad de onda de corte a los 30 metros superiores del suelo (m/s).

ΔDPP = Parámetro de variación de DPP

ΔZ_{tor} = Parámetro de variación de Z_{TOR}

Z_1 = Parámetro de variación de Z_1

Los coeficientes de la ecuación que no han sido descritos se encuentran en las tablas que forman parte del Anexo 1.

4.4 MODELO ALEATORIO

La terminología en el modelo CY13 para expresar las componentes del modelo aleatorio es la siguiente:

$$\sigma_T = (1 + NL_o)^2 \tau^2 + \sigma_{NL_o}^2 \quad (4.10)$$

Dónde:

$$\tau = \tau_1 + \frac{\tau_2 - \tau_1}{2.25} (\min(\max(M, 5), 7.25) - 5)$$

$$\sigma_{NL_o} = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2.25} \right)^2 (\min(\max(M, 5), 7.25) - 5) \sqrt{\sigma_3 F_{inferred} + 0.7 F_{Measured} + (1 + NL_o)^2}$$

$$NL_o = \Phi_2 \left(e^{\Phi_3 (\min(V_{s30}, 1130) - 360)} - e^{\Phi_3 (1130 - 360)} \right) \left(\frac{y_{ref}}{y_{ref} + \Phi_4} \right)$$

4.5 LIMITACIONES DEL MODELO

El alcance del modelo de Chiou y Youngs de 2013 está limitado por las siguientes condiciones:

- $3.5 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en fallas transcurrentes
- $3.5 \leq M \leq 8.0$ para sismos generados en fallas inversas o normales.
- $Z_{TOR} \leq 20\text{km}$.
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$.
- $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$.

CAPÍTULO 5

MODELO DE CAMPBELL Y BORZOGNIA (2013)

5.1 INTRODUCCIÓN

El programa NGA –WEST 2 fue desarrollado con la finalidad de actualizar los modelos de movimiento fuerte obtenidos en el NGA-WEST 1. Además tenía otros objetivos como el extender los modelos de NGA para eventos con magnitudes moderadas, así como el desarrollo de GMPEs para obtener componentes verticales de movimiento, espectros para amortiguamientos que varíen entre 5 y 30 %. Un último objetivo de este programa era estudiar la direccionalidad, y la respuesta no lineal del suelo.

Sobre las GMPE´s que forman parte del NGA WEST2 debían cumplir las siguientes condiciones:

- Incluir como parámetro de movimiento fuerte el PGA, el PGV y el PSA para períodos que van de 0 a 10 segundos
- Usar como medida de intensidad el ROT_{D50} definido por Boore en 2010
- Ser válidas para eventos corticales con diferentes mecanismos de falla
- Ser válidas para magnitudes Mw entre 3 a 8.5 y distancias de 0 a 200 km
- Incorporar en las variables el uso del factor V_{s30} (velocidad de onda de corte media de 0 a 30 metros)

Varios modelos de movimiento fuerte se desarrollaron, como parte del programa NGA-WEST1. Se mencionaron varios de ellos en el capítulo anterior, el modelo de Campbell y Borzognia de 2008 formó también parte de este programa, vale acotar que el modelo de Campbell y Borzognia apareció como tal en el año 1994, pero previamente estos autores ya habían trabajado por separado y con otros investigadores durante los años ochenta.

Se mencionan como trabajos importantes realizados por los autores los modelos de Campbell de los años 1997, 2000, 2001 y Campbell & Borzognia de 1994, 2003 y 2004.

Sobre los modelos de los años 1994, 2003 y 2004 se debe mencionar que estos usaban una medida de intensidad de movimiento fuerte diferente a la que actualmente usan las ecuaciones del NGA-WEST2 (Rot_{D50}). En estos modelos la medida usada era una media geométrica horizontal de las dos componentes horizontales del registro. Esta medida quedó obsoleta con la aparición en el año 2006 del parámetro GM Rot_{I50} que fue utilizada en las ecuaciones de atenuación de Campbell y Borzognia de 2008. Posteriormente con la aparición de la medida propuesta por Boore en 2010 conocida como Rot_{D50} se adoptó este parámetro para el modelo de Campbell y Borzognia del año 2013.

Los autores del modelo CB13 indican que el desarrollo de la GMPE está enfocado a considerar lo siguiente:

- Efectos de hanging Wall
- Mecanismo de falla
- Profundidad hipocentral
- Dependencia regional de amplificación superficial lineal del sitio
- Respuesta no lineal del suelo
- Amplificación tridimensional de la cuenca
- Desviación estándar que depende de la respuesta no lineal en el sitio

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS MODELOS DE CAMPBELL Y BORZOGNIA (2013)

Al igual que en el modelo de Chiou y Youngs, el desarrollo de la GMPE de Campbell y Borzognia utilizó la base de datos del programa NGA WEST2 como punto de partida de su formulación cuyas características fueron mencionadas en el

capítulo anterior y que son descritas minuciosamente por Ancheta et al. (Referencia 8).

Sobre esta base de datos además de los parámetros de exclusión propios de la base de datos del NGA-WEST2 descritos por Ancheta et al, los autores de la GMPE incluyeron parámetros adicionales de exclusión para la base de datos de partida para elaborar su modelo.

En el modelo CB13 se menciona que se eliminó lo siguiente:

- Registros que solo tenían una componente horizontal o una vertical, la cual excluye el cálculo de la componente horizontal Rot_{D50}
- Registros que no tenían el dato de V_{s30}
- Registros que no tenían el valor del rake
- Registros con hipocentros mayores a 20 km
- Registros del año 1999 pertenecientes al observatorio geológico Lamont Doherty
- Registros con una pobre calidad (Instrumentos designados con calidad "D").
- Réplicas con C_{Rjb} menores a 10 km
- Para aislar el efecto de la atenuación geométrica se excluyeron registros con R_{RUP} menores a 80 km. Sin embargo para modelar atenuación aparente anelástico, se usó una base de datos separada con distancias tan lejanas como 500 km
- Registros que no cumplían el siguiente criterio: $M < 5.5$ y $N < 5$ o $5.5 < M < 6.5$ y $N < 3$, siendo M la magnitud y N el número de registros con $R_{RUP} \leq 80$ km
- Registros de estaciones sísmicas no representativas

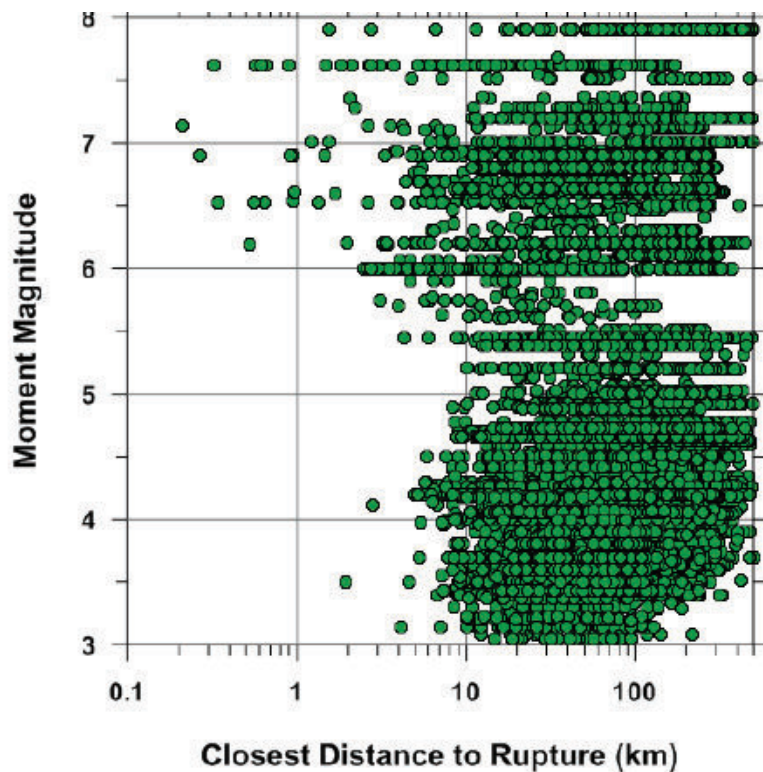
Para los autores de la GMPE las estaciones no representativas, son aquellas en las que el aparato se encuentra en el sótano de un edificio, embebido más de unos pocos metros debajo de la superficie del suelo, en terraplenes o en presas.

Después de aplicar los criterios de selección descritos anteriormente, Campbell y Borzognia consideraron para su modelo 2013 un total de 15.521 registros obtenidos de 322 eventos diferentes.

De entre los 15.521 registros un total de 7.208 registros fueron seleccionados para eventos con R_{RUP} menor a 80 km y un total de 8.313 registros para R_{RUP} comprendidos entre 80 km y 500 km.

La figura 5.1 incluye una gráfica con la dispersión de datos y las magnitudes consideradas. Se puede observar de esta figura que la base de datos de Campbell y Borzognia tiene una gran cantidad de registros cuando R_{RUP} varía de 10 a 500 km y la magnitud M se encuentra entre 4 y 5.

FIGURA 5.1 Magnitud vs R_{RUP} (km) (CB13)



FUENTE: Campbell y Borzognia 2013

5.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Las funciones de forma de los términos usados en la GMPE fueron confirmados usando técnicas como el análisis de residuos, en el modelo CB013 los autores actualizaron y modificaron las funciones de formas usadas en el 2008.

Los autores señalaron que para realizar el modelo CB13, las formas funcionales de los términos fueron seleccionadas a través de numerosas iteraciones que buscaban capturar la tendencia observada en los datos.

Sobre el enfoque de la regresión matemática Campbell y Borzognia señalaron que el modelo fue desarrollado en dos fases. La primera fase incluía la base de datos cercanos a la fuente con R_{Rup} menores a 80 km, el uso de esta base de datos impidió el intercambio de los términos de “aparente” atenuación geométrica y anélastica que ocurre cuando se intenta ajustar ambos simultáneamente, durante el desarrollo de las funciones de forma usando la base de datos “cercana” se realizaron dos pasos usando un subconjunto de períodos espectrales y el proceso de regresión de Boore de 1993. En la etapa 1 todos los términos matemáticos fueron ajustados por el método de mínimos cuadrados no lineales, los registros fueron restringidos a fin de tener una media residual de cero, los términos obtenidos en esta etapa son:

- Término de atenuación geométrica
- Término de efectos de hanging wall
- Término de respuesta de sitio
- Término de cuenca sedimentaria

En la etapa 2 todos los términos matemáticos que envuelven la fuente sismogénica fueron ajustados por el método de mínimos cuadrados ponderados, usando los términos de fuente de la etapa 1, los términos obtenidos en esta etapa son:

- Término de magnitud
- Término de mecanismo de falla
- Término de profundidad hipocentral
- Término de buzamiento

Para obtener el modelo CB13, los autores mencionan que una vez que todas las funciones de forma y los términos matemáticos fueron establecidos, realizaron una

regresión final para el rango total del espectro usando efectos aleatorios de regresión según Abrahamson (1992). Una vez desarrollada la GMPE para una fuente cercana, realizaron efectos aleatorios de regresión en conjunto con la base de datos “lejana” para encontrar un término regional dependiente de la atenuación anelástica, finalmente buscaron el suavizado del espectro obtenido.

De esta manera la ecuación de Campbell y Borzognia de 2013, para encontrar el logaritmo natural del RotD50 del PGA y del PSa en (g) viene dado por la ecuación:

$$\ln Y = \begin{cases} \ln PGA & Y < PGA, T < 0.25 \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{set} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atm}; & \text{OTRO CASO} \end{cases} \quad (5.1)$$

Donde los datos de partida son:

M = Magnitud de Momento.

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km).

R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).

R_x = Distancia horizontal (km).

λ = Ángulo de cabeceo (rake °).

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa e inversa oblicua.
(Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

F_{NM} = Factor de mecanismo de falla normal y normal oblicua.
(Usar 1 Si $-150 \leq \lambda \leq -30$, y 0 en otros casos)

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla (km)

δ = Ángulo de Buzamiento (°)

V_{s30} = Velocidad media de onda de corte en los 30 metros superiores del suelo
(m/s)

A₁₁₀₀ = Es el valor medio previsto del PGA en roca (g), cuyo valor del V_{s30} es de 1100 (m/s)

S_j = Es una variable que representa los efectos regionales de sitio, es igual a 1 para sitios localizados en Japón y 0 para otros casos

Z_{HYP} = Profundidad al hipocentro (km)

A continuación se indica la ecuación obtenida por Campbell y Borzognia para cada término de la GMPE.

5.3.1 TÉRMINO DE MAGNITUD

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1M; & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5); & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5) + c_4(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (5.2)$$

5.3.2 TÉRMINO DE ATENUACIÓN GEOMÉTRICA

$$f_{dis} = (c_5 + c_6M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_7^2} \right) \quad (5.3)$$

5.3.3 TÉRMINO DE MECANISMO DE FALLA

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M} \quad (5.4)$$

$$f_{flt,F} = c_8 F_{RV} + c_9 F_{NM}$$

$$f_{flt,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases}$$

5.3.4 TÉRMINO DE HANGING WALL

$$f_{hng} = c_{10} f_{hng,Rx} f_{hng,RUP} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta} \quad (5.5)$$

$$f_{hng,Rx} = \begin{cases} 0; & R_x < 0 \\ f_1(R_x); & 0 < R_x \leq R_1 \\ \max[f_2(R_x), 0]; & R_x > R_1 \end{cases}$$

$$f_1(R_x) = h_1 + h_2 \left(\frac{R_x}{R_1} \right) + h_3 \left(\frac{R_x}{R_1} \right)^2$$

$$f_2(R_x) = h_4 + h_5 \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right) + h_6 \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2$$

$$R_1 = W \cos(\delta)$$

$$R_2 = 62M - 350$$

$$f_{hng,RRUP} = \begin{cases} 1; & R_{RUP} = 0 \\ (R_{RUP} - R_{JB})/R_{RUP}; & R_{RUP} > 0 \end{cases}$$

$$f_{hng,Rx} = \begin{cases} 0; & M \leq 5.5 \\ (M - 5.5)[1 + a_2(M - 6.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ 1 + a_2(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{hng,RRUP} = \begin{cases} 1 - 0.06 Z_{TOR}; & Z_{TOR} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{TOR} > 16.66 \end{cases}$$

$$f_1 = (90 - \delta)/45$$

5.3.5 TÉRMINO DE RESPUESTA SUPERFICIAL DE SITIO

$$f_{SITE} = f_{SITE,G} + S_J f_{SITE,J}$$

(5.6)

$$f_{SITE,G} = \begin{cases} C_{11} \ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right) + k_2 \left\{ \ln \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right] - \ln [A_{1100} + c] \right\}; & V_{S30} \leq k_1 \\ (C_{11} + k_2 n) \ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right); & V_{S30} > k_1 \end{cases}$$

$$f_{SITE,J} = \begin{cases} (C_{12} + k_2 n) \left[\ln \left(\frac{V_{s30}}{k_1} \right) - \ln \left(\frac{200}{k_1} \right) \right]; & V_{s30} \leq 200 \\ (C_{13} + k_2 n) \ln \left(\frac{V_{s30}}{k_1} \right); & \text{All } V_{s30} \end{cases}$$

5.3.6 TÉRMINO DE CUENCA SEDIMENTARIA

$$f_{sed} = \begin{cases} (c_{14} + c_{15} S_J)(Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16} k_3 e^{-0.75} [1 - \exp(-.25(Z_{2.5} - 3))]; & Z_{2.5} > 3 \end{cases}$$

(5.7)

5.3.7 TÉRMINO DE PROFUNDIDAD HIPOCENTRAL

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} + f_{hyp,M}$$

(5.8)

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{HYP} \leq 7 \\ Z_{HYP} - 7; & 7 < Z_{HYP} \leq 20 \\ 13; & Z_{HYP} > 20 \end{cases}$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} c_{17}; & M \leq 5.5 \\ [c_{17} + (c_{18} - c_{17})(M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18}; & M > 6.5 \end{cases}$$

5.3.8 TÉRMINO DE BUZAMIENTO

$$f_{dip} = \begin{cases} c_{19} \delta; & M \leq 4.5 \\ c_{19}(5.5 - M) \delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases}$$

(5.9)

5.3.9 TÉRMINO DE ATENUACIÓN INELÁSTICA

$$f_{atn} = \begin{cases} (c_{20} + \Delta c_{20})(R_{RUP} - 80); & R_{RUP} > 80 \\ 0; & R_{RUP} \leq 80 \end{cases} \quad (5.10)$$

5.4 INCERTIDUMBRE

Los autores definieron el modelo aleatorio de variabilidad en términos de Rot_{D50} y de las componentes horizontales del movimiento, y viene dado por:

$$y_{ij} = Y_{ij} + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (5.11)$$

Dónde:

j Es el registro

i Es el evento

y_{ij} Es el valor observado o dato de un registro i en un evento j

Y_{ij} Es el valor calculado mediante la ecuación de atenuación de un registro i en un evento j

η_i Es el residual entre eventos (inter-evento), en otras palabras es la variabilidad de datos entre un evento y el siguiente

ε_{ij} Es la variabilidad de datos dentro de un evento (intra-evento)

La desviación estándar en roca ($V_{s30}=1100$ m/s) determinada a partir de la condición de que los residuales η_i y ε_{ij} tengan una media de cero es una función de la magnitud. Según se muestra en las siguientes ecuaciones que están en función de la magnitud.

Desviación estándar para intra-evento:

$$\tau_{lny} = \begin{cases} \tau_1; & M \leq 4.5 \\ \tau_1 + (\tau_1 - \tau_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \tau_2; & M \geq 5.5 \end{cases}$$

Desviación estándar para inter-evento:

$$\phi_{lny} = \begin{cases} \phi_1; & M \leq 4.5 \\ \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \phi_2; & M \geq 5.5 \end{cases}$$

La relación entre f_{site} y $\ln A_{1100}$ se calcula con la siguiente función lineal:

$$\alpha = \frac{\partial site}{\partial \ln 1100} = \begin{cases} k_2 A_{1100} \left\{ \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right]^{-1} - [A_{1100} + c]^{-1} \right\}; & V_{S30} < k_1 \\ 0; & R_{RUP} > 0 \end{cases}$$

Para incorporar la respuesta no lineal del suelo se deben usar las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \sqrt{\tau_{lnYB}^2 + \alpha^2 \tau_{lnPGA_B}^2 + 2\alpha \rho_{lnPGA,lnY} \tau_{lnYB} \tau_{lnPGA_B}}$$

$$\phi = \sqrt{\phi_{lnYB}^2 + \phi_{lnAF}^2 + \alpha^2 \phi_{lnPGA}^2 + 2\alpha \rho_{lnPGA,lnY} \phi_{lnYB} \phi_{lnPGA_B}}$$

Donde $\tau_{lnYB} = \tau_{lnY}$ y $\tau_{lnPGA_B} = \tau_{lnPGA}$ son las desviaciones estándar de inter-eventos para las medidas de intensidad de interés en la base del perfil de sitio, así mismo las desviaciones estándar de intra-eventos vienen dados por:

$$\phi_{lnYB} = (\phi_{lnY}^2 - \phi_{lnAF}^2)^{1/2}$$

$$\phi_{lnPGA_B} = (\phi_{lnPGA}^2 - \phi_{lnAF}^2)^{1/2}$$

Finalmente la desviación estándar total viene dado por la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar previamente calculados para intra-eventos e inter-eventos dados mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 + \phi^2}$$

Se acota por último que mientras más pequeña sea esta desviación estándar el modelo será más confiable.

Los coeficientes de las ecuaciones anteriormente mostradas y que no han sido descritos se encuentran en las tablas que forman parte del anexo 2.

5.5 LIMITACIONES DEL MODELO

En términos generales el modelo de Campbell y Borzognia (2013) es considerado válido para evaluar eventos superficiales continentales en todo el mundo en regímenes tectónicos cuando se cumple lo siguiente:

- ✓ $3.3 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en fallas transcurrentes.
- ✓ $3.3 \leq M \leq 8.0$ para sismos generados en fallas inversas.
- ✓ $3.3 \leq M \leq 7.5$ para sismos generados en fallas normales.
- ✓ $0 \leq R_{RUP} \leq 300$ km
- ✓ $Z_{TOR} \leq 20$ km
- ✓ $150 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$.
- ✓ $Z_{2.5} \leq 10$ km.
- ✓ $Z_{HYP} \leq 0-20$ km.
- ✓ $\delta = 15-90^\circ$.

Se puede apreciar que las limitaciones del modelo, en ningún caso restringe el uso particular de esta ecuación para la región de Quito por lo que se confirma una vez más el uso de esta ecuación para este caso particular de este estudio.

CAPÍTULO 6

MODELO DE ABRAHAMSON Y SILVA (2013)

6.1 INTRODUCCIÓN

El modelo de Abrahamson y Silva de 2008 fue una de las ecuaciones de atenuación que se obtuvieron en el programa NGA-WEST1, al igual que las ya descritas ecuaciones de Campbell y Borzognia; y Chiou y Youngs. Sin embargo Abrahamson hace más de 30 años ya había trabajado junto a Bolt en una ecuación de atenuación que obtenía una respuesta de movimiento, únicamente en función de la magnitud, esta ecuación correspondió al modelo de Abrahamson y Bolt del año 1982.

El modelo de Abrahamson y Silva apareció como tal en el año de 1992, y le sucedieron posteriormente los modelos de los años 1997, 2008 y 2009.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, dentro del programa NGA-WEST 2 se consideró como uno de sus objetivos la actualización de las ecuaciones que formaron parte del NGA, entre ellas también estaba la ecuación de Abrahamson y Silva de 2008.

En esta actualización (2013) de la ecuación AS08, los autores han usado modelos analíticos de respuesta de sitio según Kamai para así poder restringir los efectos no lineales en el sitio, así como un modelo analítico finito de las fallas para restringir los efectos de hanging Wall, para los fines de este estudio se le denominará a este modelo como ASK13 (Abrahamson, Silva y Kamai).

En este modelo ASK13, los autores usaron resultados de un conjunto de simulaciones finitas de falla para evaluar eventos con magnitudes de 6.5 a 8, el modelo partió de una base de datos mayor a su predecesor (AS08), es decir como punto de partida de su formulación la base de datos del NGA-WEST 2,

descrita por Ancheta Et al, se describe a continuación la base de datos del modelo ASK13.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS MODELOS DE ABRAHAMSON Y SILVA (2013)

El enfoque de los autores del modelo, para evaluar el subconjunto de datos, tomados a partir de la base de datos NGA-WEST2 fue considerar todos los eventos (sin excluir las réplicas) en regímenes corticales activos. Se hizo este enfoque tomando en cuenta que en promedio el movimiento de suelo para los sismos ocurridos en regiones corticales a distancias menores a 80 km son similares en los diferentes lugares de mundo.

Los criterios de exclusión de ASK13, que se aplicaron sobre la base de datos NGA-WEST2 se han colocado en la siguiente tabla:

TABLA 6.1 Resumen de parámetros de exclusión (ASK13)

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN MODELO ASK 13
Eventos no representativos de tectónica cortical
Registros mayores que la distancia de monitoreo.
Registros que no se encuentran en campo libre
Eventos con profundidades hipocentrales cuestionables
Réplicas de evento Wenchuan
Registros con pérdidas importantes de metadatos
Registros identificados como cuestionables
Eventos con menos de 3 registros cuando $M > 5$
Eventos con menos de 10 registros con una buena cobertura en distancia cuando $M < 5$

FUENTE: (Abrahamson y Silva, 2013)

Se describe brevemente la base de datos de ASK13 en función de los parámetros descritos en la tabla 6.1.

6.2.1 EVENTOS NO REPRESENTATIVOS DE TECTÓNICA CORTICAL

Los autores excluyeron los sismos de Pelekanada(Grecia), Taiwán y de San Elías (Alaska) por considerarlos en una zona de subducción. Además eliminaron 5 eventos asociado a la placa “gorda” que se encuentra al occidente de California.

6.2.2 MONITOREO A LARGAS DISTANCIAS

El enfoque que usaron los autores en el modelo para eliminar registros con distancias mayores que las distancias de monitoreo se lo hizo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D_{CENSOR} = \begin{cases} D_5; & M \leq 5 \\ D_5(D_6 - D_5)(M - 5); & 5 < M \leq 6 \\ D_5(D_7 - D_6)(M - 6); & 6 < M \leq 7 \\ D_7; & 7 < M \end{cases}$$

Donde los valores D_5 , D_6 y D_7 pueden ser determinados mediante el uso de la tabla 6.2.

TABLA 6.2 Parámetros usados para exclusión por monitoreo

Eventos	D5	D6	D7
1933-2000	50,00 km	100,00 km	200,00 km
2001-2005	100,00 km	150,00 km	250,00 km
2006-2011	200,00 km	250,00 km	350,00 km
Sismos de Japón, 2001-2011 (EQUID)	200,00 km	250,00 km	350,00 km
L'Aquila Sequence (EQID 274, 275, 276)	200,00 km	250,00 km	350,00 km
Wenchuan (EQID 277)	200,00 km	250,00 km	350,00 km
Wenchuan (Réplicas)	200,00 km	250,00 km	350,00 km
CA (Magnitud moderada)	200,00 km	250,00 km	350,00 km

FUENTE: (Abrahamson y Silva, 2013)

6.2.3 MEDICIONES QUE NO ESTABAN EN CAMPO LIBRE

Para el modelo ASK13, los autores excluyeron eventos en los que el instrumento se localizaba en una estructura “grande”, puesto que consideraron que estas mediciones difieren de las mediciones registradas en campo libre, el modelo consideró algunos de los ítems mencionados en la clasificación GMX C1 y que se resumen en la tabla 6.3.

TABLA 6.3 Parámetros usados para exclusión por ubicación del instrumento

GMX Letra Inicial	ESTRUCTURA TIPO PARA EL INSTRUMENTO
C	Estructuras de uno a cuatro pisos de la construcción ligera. El instrumento se encuentra en el nivel más bajo en un sótano y por debajo de la superficie del suelo.
D	Estructura de más de 5 pisos de construcción pesada. El instrumento está ubicado en el nivel más bajo y varios pies dentro de la superficie del suelo.
E	Estructura de más de 5 pisos de construcción pesada. El instrumento está ubicado en el nivel más bajo en un sótano y por debajo de la superficie del suelo.
F	Estructura vivienda para el instrumento, este está enterrado debajo de la superficie del suelo, por ejemplo, un túnel o bóveda sísmica.
G	Estructura de construcción ligero o pesada. El instrumento no está ubicado al nivel más bajo.
P	Castillo de construcción de mampostería, de uno a tres pisos
Q	Asociada con una estructura, el tamaño de la estructura no es conocido
S	Asociados con una estructura y en el sótano. El tamaño de la estructura no es conocido
T	Asociados con un túnel

FUENTE: (Abrahamson y Silva, 2013)

Considerando que los instrumentos se encontraban en estructuras similares a las descritas en la tabla anterior, los autores eliminaron de la base de datos de su modelo un total de 423 registros, de los cuales la mayoría de ellos estaban en el sótano de estructuras de uno a cuatro pisos.

6.2.4 OTROS EVENTOS ELIMINADOS

Los autores eliminaron registros con profundidades hipo centrales cuestionables, el criterio usado para considerar un registro como cuestionable era tener hipocentros con una profundidad menor a 1 km y mayor a 30 kilómetros, con este criterio eliminaron un total de 11 registros. Por esta razón esta GMPE no es aplicable para profundidades del hipocentro mayores a 30 km.

En el desarrollo de la base de datos para modelo ASK13, con respecto a eventos de magnitud pequeña, los autores seleccionaron eventos con al menos diez registros en distancias comprendidas entre 10 y 100 km, con este criterio los autores eliminaron un total de 157 eventos.

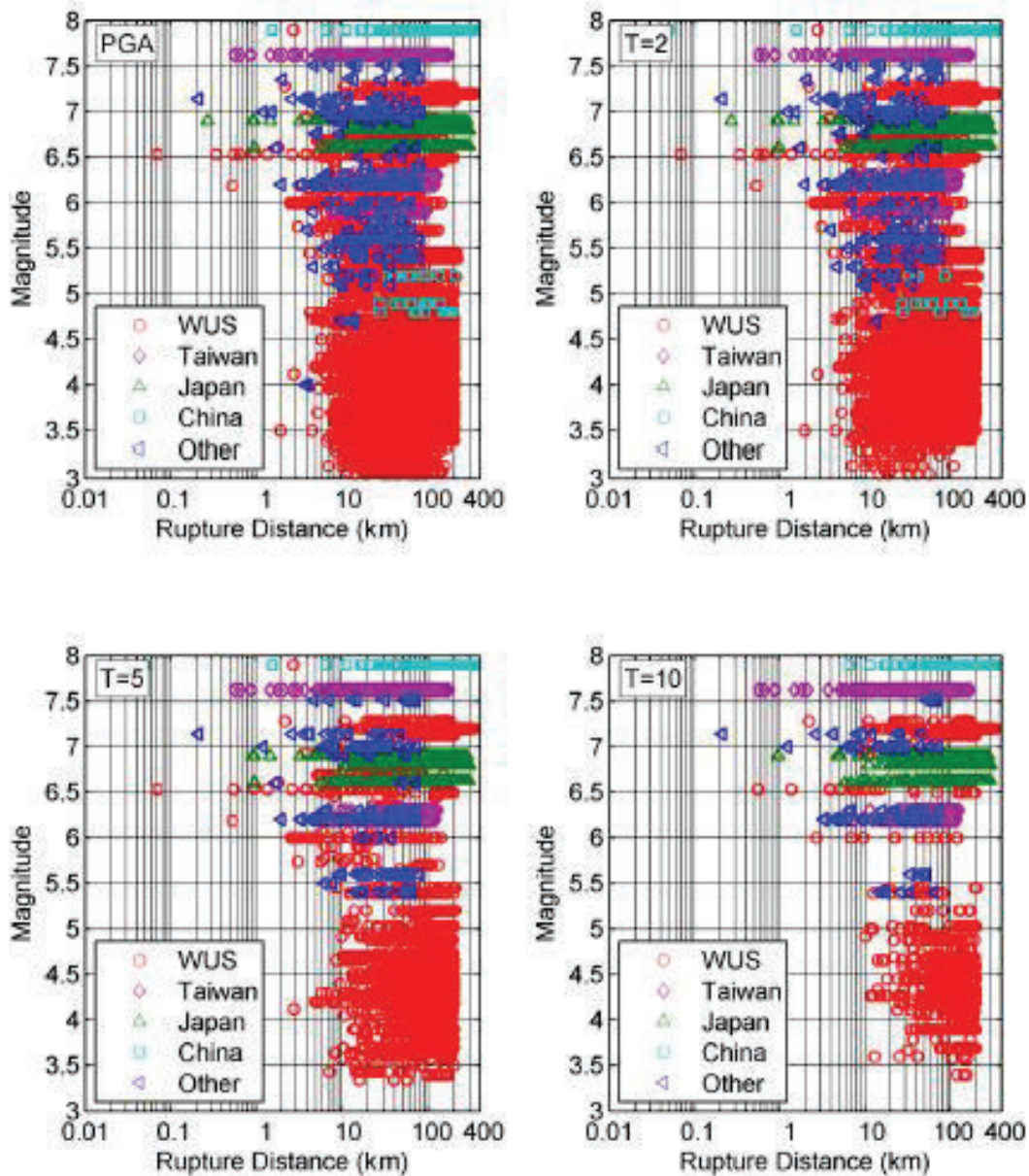
Además excluyeron los eventos de Taiwán, por considerarlos que no proveían una buena estimación del movimiento, otra condición de exclusión fue incluir únicamente eventos con más de tres registros, con este requerimiento eliminaron 70 eventos de la base de datos.

6.2.5 EVENTOS CON NIVELES CUESTIONABLES DE CONFIANZA Y METADATOS PERDIDOS.

En la base de datos existían registros que los autores consideraron que tenía cuestionables niveles de confianza debido a sus inusuales formas espectrales, debido a estas consideraciones eliminaron adicionalmente 178 eventos de magnitud pequeña ubicados en la región de California. También eliminaron 34 registros por considerarlos provocados por una fase amplia de ondas S, por último eliminaron registros que no contaban con la información del V_{s30} , de esta forma eliminaron 15 registros más.

Con la aplicación de los criterios anteriormente descritos la base de datos de la ecuación de atenuación de Abrahamson Silva y Kamai del 2013, tiene un total de 15.570 registros que corresponden a 326 eventos ubicados en diferentes partes del mundo, se muestra una gráfica de la magnitud vs la distancia de ruptura R_{RUP} de esta base de datos en la figura 6.1 en diferentes valores de tiempo.

FIGURA 6.1 Magnitud vs R_{RUP} (km)



FUENTE: Abrahamson y Silva 2013

6.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo ASK13 tiene la misma forma funcional que el modelo del 2008. Sin embargo en la actualización de esta GMPE se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- El término de la respuesta no lineal del sitio se basa en la aceleración espectral en roca.
- La magnitud de escalamiento ha sido modificada de acuerdo al criterio $M < 5$
- El escalamiento del Hanging Wall, buzamiento y distancia, se ha modificado, así también el escalamiento del Z_1 .
- El estilo de fallamiento es dado por una función dependiente de la magnitud.

La ecuación de movimiento fuerte de Abrahamson, Silva y Kamai viene dado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{rup}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) \\ & + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30}) \\ & + Regional(V_{s30}, R_{rup}) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Donde los datos de partida son:

Parámetros asociados a la fuente sismogénica.

M = Magnitud de Momento.

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla (km)

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa.

(Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

F_{NM} = Factor de mecanismo de falla normal y normal oblicua.

(Usar 1 Si $-120 \leq \lambda \leq -30$, y 0 en otros casos)

CR_{jb} = Centroide de R_{jb} , definidos por Wooddell y Abrahamson en 2012.

Eventos clase 2 son aquellos que tienen un $CR_{jb} < 15$ km y están dentro de la ventana de tiempo definida por Garder y Knopoff, corresponde a las réplicas del evento principal.

- F_{As} = Factor de réplicas.
 (1 para eventos clase2 (réplicas) y considerar 0 para eventos principales)
- δ = Ángulo de Buzamiento ($^{\circ}$)
- W = Ancho de ruptura de falla (km).

Parámetros asociados a la clasificación del sitio:

- V_{s30} = Velocidad de onda de corte a los 30 metros superiores del suelo (m/s)
- Z_{HYP} = Profundidad a la que onda de corte tiene un $V_s=1.0$ km/s (km)

Parámetros asociados a las distancias respecto al sitio:

- R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km).
- R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).
- R_x = Distancia horizontal (km).

6.3.1 MODELO BASE

El factor f_1 es dado por:

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4(M_2 - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + a_7(M - M_2)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) + a_{17}R_{rup}; & M < M_2 \end{cases} \quad (6.2)$$

Donde:

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_{4M}^2}$$

$$c_{4M}(M) = \begin{cases} c_4; & M > 5 \\ c_4(c_4 - 1)(5 - M); & 4 < M \leq 5 \\ 1; & M \leq 4 \end{cases}$$

6.3.2 MODELO ESTILO DE FALLA (SOF)

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11}; & M > 5 \\ a_{11}(M - 4)(5 - M); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases}$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12}; & M > 5 \\ a_{12}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases} \quad (6.3)$$

6.3.3 MODELO DE RESPUESTA DE SITIO

$$f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) = \begin{cases} (a_{10}) \ln \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}} \right) - b \ln(Sa_{1100} + c) + b \ln \left(Sa_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}} \right)^n \right); & V_{s30} < V_{LIN} \\ (a_{10} + bn) \ln \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}} \right); & V_{s30} \geq V_{LIN} \end{cases} \quad (6.4)$$

Dónde:

$$V_{s30}^* = \begin{cases} V_{s30}; & V_{s30} < V_1 \\ V_1; & V_{s30} \geq V_1 \end{cases}$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500; & T \leq 0.5 \text{ sec} \\ \exp \left(-0.35 \ln \left(\frac{T}{0.5} \right) + \ln(1500) \right); & 0.5 \text{ sec} > T > 3 \text{ sec} \\ 800; & T \geq 3 \text{ sec} \end{cases}$$

6.3.4 MODELO DE ESCALAMIENTO DE HANGING WALL

$$f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, dip, Z_{tor}, M) = a_{13} T_1(dip) T_2(M) T_3(R_x, W, dip) T_4(Z_{TOR}) T_5(R_x, R_{yo}) \quad (6.5)$$

$$T_1(dip) = \begin{cases} (90 - dip)/45; & dip > 30 \\ 60/45; & dip < 30 \end{cases}$$

$$T_2(M) = \begin{cases} 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - 1 + a_{2HW}(M - 6.5); & M \geq 6.5 \\ 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - (1 + a_{2HW})(M - 6.5)^2; & 5.5 < M < 6.5 \\ 0; & M \leq 5.5 \end{cases}$$

$$T_3(R_x) = \begin{cases} h_1 + h_2(R_x/R_y) + h_3(R_x/R_y)^2; & R_x < R_1 \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right); & R_1 \leq R_x \leq R_2 \\ 0; & R_x > R_2 \end{cases}$$

$$T_4(Z_{TOR}) = \begin{cases} 1 - \frac{Z_{TOR}}{100}; & Z_{TOR} \leq 10 \text{ km} \\ 0; & Z_{TOR} \geq 10 \text{ km} \end{cases}$$

$$T_5(R_x, R_{y0}) = \begin{cases} 1; & R_{y0} < R_{y1} \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{5}\right); & R_{y0} - R_{y1} < 5 \\ 0; & R_{y0} - R_{y1} \geq 5 \end{cases}$$

$$R_1 = W \cos(\text{dip})$$

$$R_2 = 3R_1$$

$$R_{y1} = R_x \tan(20)$$

$$h_1 = 0.25$$

$$h_2 = 1.5$$

$$h_3 = -0.75$$

Si no se ha medido la distancia R_{y0} el término T_5 puede ser calculado mediante la ecuación:

$$T_5(R_{jb}) = \begin{cases} 1; & R_{jb} = 0 \\ 1 - \left(\frac{R_{jb}}{30}\right); & R_{jb} < 30 \\ 0; & R_{jb} \geq 30 \end{cases}$$

6.3.5 MODELO DE PROFUNDIDAD DE FALLA

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \frac{Z_{TOR}}{100}; & Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15}; & Z_{TOR} \geq 20 \text{ km} \end{cases}$$

(6.6)

6.3.6 MODELO DE PROFUNDIDAD DE SUELO

$$f_{10}(Z_1, V_{s30}) = \begin{cases} a_{43} \ln \left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1ref} + 0.01} \right); & V_{s30} \leq 200 \\ a_{44} \ln \left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1ref} + 0.01} \right); & 200 < V_{s30} \leq 300 \\ a_{45} \ln \left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1ref} + 0.01} \right); & 300 < V_{s30} \leq 500 \\ a_{46} \ln \left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1ref} + 0.01} \right); & 500 < V_{s30} \end{cases}$$

(6.7)

Donde:

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp \left(\frac{-7.67}{4} \ln \left(\frac{V_{s30}^4 + 610^4}{1360^4 + 610^4} \right) \right)$$

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp \left(\frac{-5.23}{2} \ln \left(\frac{V_{s30}^4 + 412^2}{1360^4 + 412^2} \right) \right)$$

6.3.7 MODELO DE ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS

$$f_{11}(CR_{jb}) = \begin{cases} a_{14}; & CR_{jb} \leq 5 \\ a_{14} \left[1 - \frac{CR_{jb} - 5}{10} \right]; & 5 < CR_{jb} < 15 \\ 0; & CR_{jb} > 15 \end{cases}$$

(6.8)

6.3.8 MODELO REGIONAL

$$\begin{aligned} Reg(V_{s30}, R_{rup}) &= F_{TW}(f_{11}(V_{s30}) + a_{25}R_{rup}) + F_{CN}(a_{28}, R_{rup}) \\ &- F_{JP}(f_{12}(V_{s30}) + a_{29}R_{rup}) \end{aligned}$$

(6.9)

Dónde:

$$f_{11}(V_{S30}) = a_{22} \ln \left(\frac{V_{S30}}{V_{Lin}} \right)$$

$$f_{12}(V_{S30}) = \begin{cases} a_{36}; & V_{S30} < 200 \\ a_{37}; & 200 \leq V_{S30} < 300 \\ a_{38}; & 300 \leq V_{S30} < 400 \\ a_{39}; & 400 \leq V_{S30} < 500 \\ a_{40}; & 500 \leq V_{S30} < 700 \\ a_{41}; & 700 \leq V_{S30} < 1000 \\ a_{42}; & V_{S30} \geq 1000 \end{cases}$$

Los coeficientes de la ecuación que no han sido descritos se encuentran en las tablas que forman parte de los anexos.

6.4 MODELO ALEATORIO

La desviación estándar para intra-eventos se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente expresión:

$$\phi_{A,L}(M) = \begin{cases} s_1; & M < 4 \\ s_1 \frac{s_1 - s_2}{2} (M - 4); & 4 \leq M \leq 6 \\ s_2; & M > 6 \end{cases}$$

La desviación estándar para inter-eventos así mismo se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{A,L}(M) = \begin{cases} s_3; & M < 5 \\ s_3 \frac{s_4 - s_3}{2} (M - 4); & 5 \leq M \leq 7 \\ s_4; & M > 7 \end{cases}$$

La desviación estándar en la respuesta no lineal del suelo depende de la magnitud del evento, esta variabilidad depende del movimiento en roca, por lo que es

necesario estimar la desviación estándar en roca, para hallar este valor los autores han empleado las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_B(M, T) = \sqrt{\Phi_{A,L}^2(M, T) - \Phi_{Amp}^2(T)} \quad (6.10)$$

Dónde:

Φ_B : La desviación estándar en roca.

Φ_{AL} : La desviación estándar para intra-eventos (lineal), que está en función de la magnitud (M) y el periodo (T).

Φ_{Amp} : La desviación estándar de la amplificación del sitio. Asumida como 0.4 para todos los periodos basados en Kamai,2013

Para la variabilidad inter eventos la desviación estándar en roca es la misma observada en la variabilidad del rango lineal entonces:

$$\tau_B(M, T) = \tau_{A,L}(M, T)$$

Los autores para considerar los efectos de la no linealidad del suelo consideraron las siguientes ecuaciones:

Para intra-eventos

$$\Phi(T, M, Sa_{1100}, Vs_{30}) = \left[\Phi_B^2(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \text{Amp}(T, Sa_{1100}, Vs_{30})}{\delta \ln Sa_{1100}} \right)^2 + \Phi_{Amp}^2(T) \right]^{1/2}$$

Para inter eventos

$$\tau(T, M, Sa_{1100}, Vs_{30}) = \tau_B(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \text{Amp}(T, Sa_{1100}, Vs_{30})}{\delta \ln Sa_{1100}} \right)$$

Dónde:

$$\frac{\tau(T, M, Sa_{1100}, V_{S30})}{\partial \ln Sa_{1100}} = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_{S30} \geq V_{Lin} \\ \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c} + \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{V_{LIN}}\right)^n} & \text{Si } V_{S30} < V_{Lin} \end{cases}$$

6.5 LIMITACIONES DEL MODELO

El alcance del modelo ASK13 es el siguiente:

- $3.0 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en cualquier tipo de falla cortical.
- $Z_{TOR} \leq 20\text{km}$
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$

Aunque según recomendaciones de los autores no debería usarse un V_{S30} menor a 190 m/s.

CAPÍTULO 7

CÁLCULO DE ESPECTROS

7.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es la evaluación del peligro sísmico para la ciudad de Quito mediante la obtención de espectros de respuesta en aceleración asociados al sistema de fallas de Quito (QFS). Para ello es necesario realizar previamente estos pasos: limitar el área de estudio, determinar el tipo de estudio a realizar y las características neotectónicas del sistema de fallas, analizar las ecuaciones de atenuación aplicables a la región en estudio y por último definir los parámetros que permitan determinar los efectos locales de los sitios en estudio.

Los pasos para la obtención de estos espectros han sido realizados y descritos en los capítulos anteriores, a partir de la información del modelo neotectónico de Alvarado et Al. y de la programación de los modelos de atenuación dados por P.E.E.R (CY13, CB13 y ASK13). Queda pendiente la caracterización de efectos de sitio como último paso para poder obtener los espectros de respuesta.

El estudio de efectos de sitio determina si el suelo produce una amplificación o disipación de ondas sísmicas, necesario para obtener un valor para acción sísmica de diseño (Yépez et al, 2001).

El efecto local de amplificación de ondas sísmicas del suelo en un terremoto por la respuesta dinámica de una estratigrafía determinada, es causante de graves daños estructurales y no estructurales en casas y edificios, aspecto que no se toma muy en cuenta en el análisis y diseño de estructuras en el Distrito Metropolitano de Quito (Valverde et al, 2002).

7.2 EL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito metropolitano de Quito tiene 65 parroquias de las cuales 32 conforman la zona urbana de la ciudad de Quito. El área de estudio está limitada únicamente a estas parroquias que conforman la parte urbana de la ciudad. No se ha considerado incluir en la zona de estudio las parroquias rurales porque para la determinación del factor V_{s30} no se tiene una cantidad adecuada de información geotécnica que permita estimar los valores de este factor V_{s30} .

El distrito metropolitano tiene 5 zonas que son: norte, centro norte, centro, centro sur y sur dentro de estas zonas podemos ubicar las diferentes parroquias urbanas de acuerdo a la figura 7.1.

FIGURA 7.1 Área de Estudio

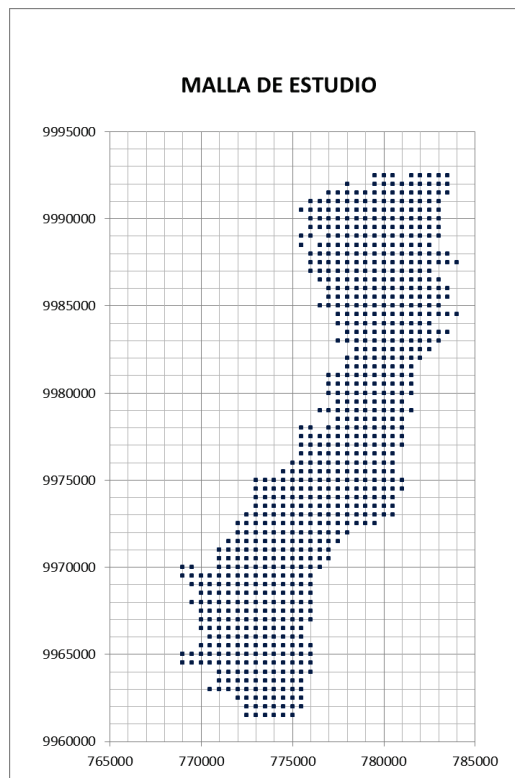
Ítem	Parroquia	Zona	
1	Carcelén	Norte	
2	El condado		
3	Ponceano		
4	Cotocollao		
5	Comité del pueblo		
6	Cochapamba		
7	Concepción		
8	Kenedy		
9	El inca		
10	Jipijapa	Centro Norte	
11	Rumipamba		
12	Iñaquito		
13	Belisario Quevedo		
14	Mariscal sucre	Centro	
15	Itchimbia		
16	San Juan		
17	Centro historico	Centro Sur	
18	La libertad		
19	Puengasí		
20	Chimbacalle		
21	Chilibulo		
22	La Ferroviaria		
23	La Magdalena	Sur	
24	San Bartolo		
25	La Mena		
26	Solanda		
27	La Argelia		
28	Chillogallo		
29	Quitumbe		
30	La ecuatoriana		
31	Guamaní		
32	Turubamba		

FUENTE: Municipio de Quito

Para la determinación de los espectros de respuesta se ha creado una malla de puntos con una separación de 500 metros en sentido Norte-Sur y Este-Oeste dentro del área previamente definida (área urbana del distrito metropolitano de Quito). Se tiene de esta manera un total de 810 puntos dentro de la malla.

Con esta consideración es posible obtener un espectro en cada punto de la malla asociado a las fallas de Puengasí, Ilumbisí, Carcelén y Catequilla, con lo que es factible calcular un total de 3240 espectros. Además se pueden obtener estos 3240 espectros por cada modelo de movimiento fuerte (CY13, CB13, ASK13). De esta manera se podría calcular un máximo de 9.720 espectros. Sin embargo el objeto de este estudio es obtener espectros críticos, es decir espectros que tengan las mayores pseudoaceleraciones asociado a una falla, a un factor de sitio y a una zona de Quito, por lo que en este trabajo se presentarán únicamente los resultados para los espectros críticos.

FIGURA 7.2 Malla de estudio



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

La figura 7.2 muestra la malla usada en este estudio. Cada punto tiene una coordenada Norte y Este, es decir se tienen un total de 810 puntos con coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator). Aproximadamente el área de estudio es de 200 km² teniendo como límites las parroquias de Carcelén al norte y Turubamba al sur.

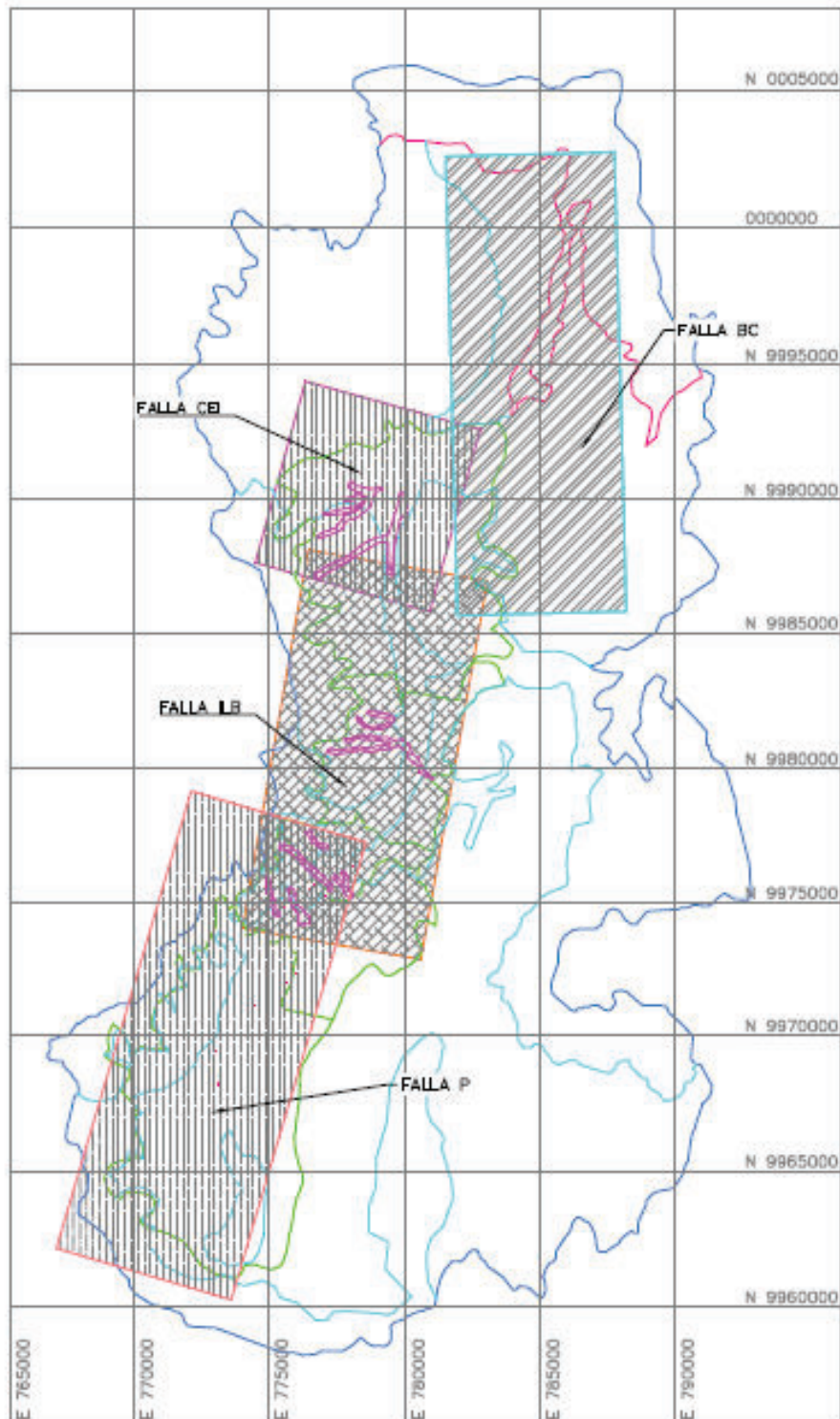
Para la realización de los espectros, además de la creación de la malla de puntos es necesario caracterizar cada uno de los sitios que se encuentren dentro de la misma.

Caracterizar cada punto en este estudio implica dos consideraciones que son:

- Obtener parámetros asociados a las distancias respecto al sitio es decir a partir de las coordenadas UTM de cada punto, y de las coordenadas UTM del hipocentro se debe determinar las distancias que los modelos de atenuación requieran como son R_x R_{RUP} R_{JB} , estas distancias serán medidas entre el sitio y el hipocentro ubicado en el centroide del plano de falla de los 4 segmentos de definidos en este estudio que son los segmentos de Puengasí (**P**), Ilumbisí- La Bota (**ILB**), Carcelén – El Inca (**CEI**), Bellavista Catequilla (**BC**).
- Determinar los parámetros necesarios para la cuantificación del efecto local de amplificación de ondas sísmicas del suelo, en las ecuaciones de atenuación. La velocidad media de la onda de corte de 0 a 30 metros permite realizar esta cuantificación.

7.2.1 PARÁMETROS ASOCIADOS AL SITIO

Como se mencionó en el capítulo 3, las ecuaciones de atenuación usan diferentes parámetros asociados a las distancias respecto al sitio. En este trabajo los 810 puntos dentro de la malla previamente definida, corresponden a los sitios de estudio y las áreas de ruptura han sido consideradas en función del modelo neotectónico de Alvarado et al. que fue descrito en el capítulo 2.

FIGURA 7.3 Área de estudio y planos de falla

ELABORACIÓN: Diego Quizanga, Fuente: Alvarado et al.

La figura 7.3 muestra los planos de fallas del QFS (sistema de fallas de Quito). De Norte a Sur se muestran los segmentos de Catequilla, Carcelén-El Inca, Ilumbisí-La Bota y Puengasí.

Por la cercanía a los sitios se puede inferir que la falla de Puengasí generaría mayores respuestas en aceleración en los sectores del sur y centro de la ciudad y que el segmento Ilumbisí-La Bota generaría mayores aceleraciones en las parroquias del norte de Quito, por el simple hecho de que la energía se atenúa en función de la distancia, sin embargo los espectros de respuestas obtenidos no solo son función de las distancias sino también están relacionados con la magnitud y los factores locales del sitio, entre otros. Por lo que se verificará más adelante cuales son los espectros críticos para los diferentes sectores.

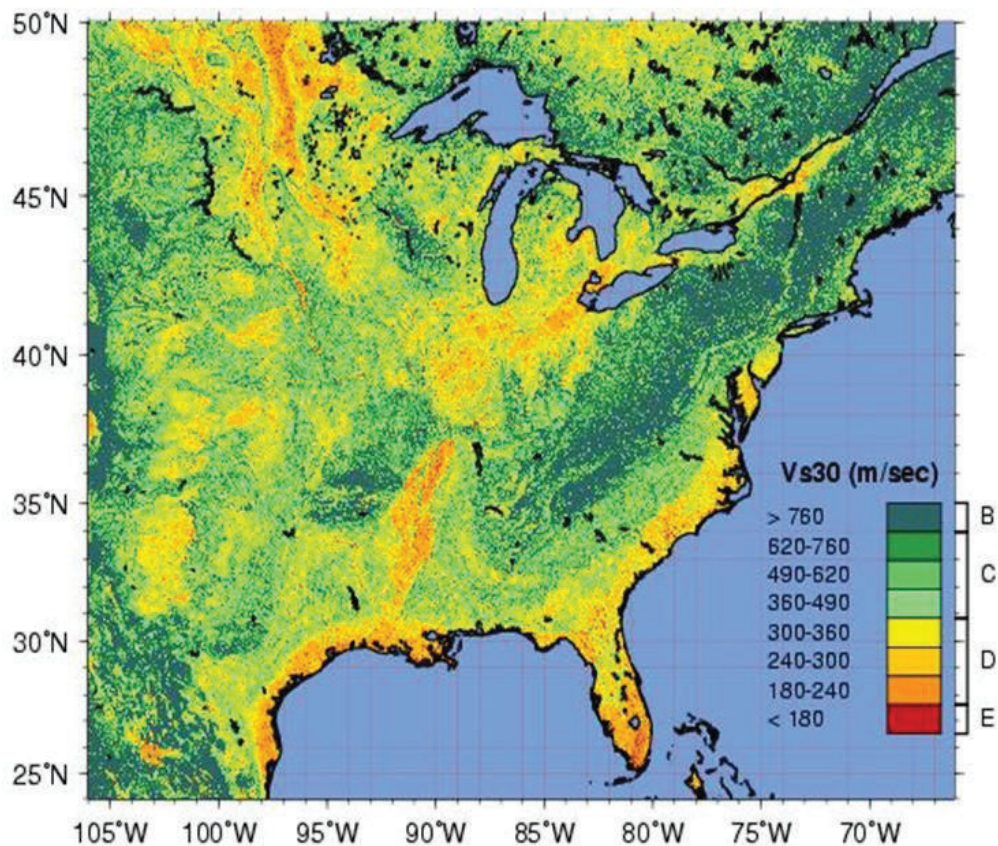
Una vez conocidas las coordenadas de los sitios de la malla y de los planos de falla se determinó las distancias R_X R_{RUP} R_{JB} entre el sitio y el plano de falla, como ya fue mencionado se asumió que el hipocentro en este estudio siempre estará en el centroide del plano de falla.

7.2.2 VELOCIDAD MEDIA DE CORTE VS30 EN QUITO

En las ecuaciones de atenuación descritas en los capítulos anteriores la determinación del efecto de sitio está asociado a la información de la velocidad media de la onda de corte de 0 a 30 metros (V_{s30}).

Si en la ciudad de Quito se tuviera un mapa de isovelocidades se tomaría estas velocidades en los diferentes sitios y se colocarían como datos de entrada en las ecuaciones de atenuación de este estudio. Sin embargo no existen este tipo de mapas en el distrito metropolitano de Quito y tampoco en el Ecuador, como si es el caso de otros países que cuentan con este tipo de información (Ver figura 7.4).

FIGURA 7.4 Mapa de V_{s30} región oriental de Estados Unidos



FUENTE: USGS

Debido a que no se tiene un mapa de isovelocidades, se ha recurrido a estudios de microzonificación de suelos y a estudios de geofísica efectuados por diferentes autores para establecer los parámetros adecuados de V_{s30} para la ciudad de Quito. Para la obtención del parámetro V_{s30} en este trabajo se toma en cuenta los siguientes informes técnicos:

- “Proyecto del manejo del Riesgo Sísmico de Quito-Ecuador (EPN.,1994)
- “Microzonificación sísmica de los suelos del distrito metropolitano de la ciudad de Quito” (Valverde et al,2002)
- Estudios geofísicos a detalle realizados por el metro de Quito

- Estudios para el proyecto “Reforzamiento sísmico de las edificaciones de los centros educativos municipales del Distrito metropolitano de Quito” (Planman, 2012)
- “ Microzonificación sísmica de Quito” (ERN,2012)

A continuación se hace una breve descripción de estos trabajos y la información obtenida a partir de los trabajos anteriormente mencionados.

El “Proyecto del manejo del riesgo sísmico de Quito” iniciado en 1992 y culminado en 1994 recogió información sismológica, geológica, de mecánica de suelos de toda la ciudad de Quito producto de varios años de trabajo y recopilación de la información existente. (Valverde, 2001).

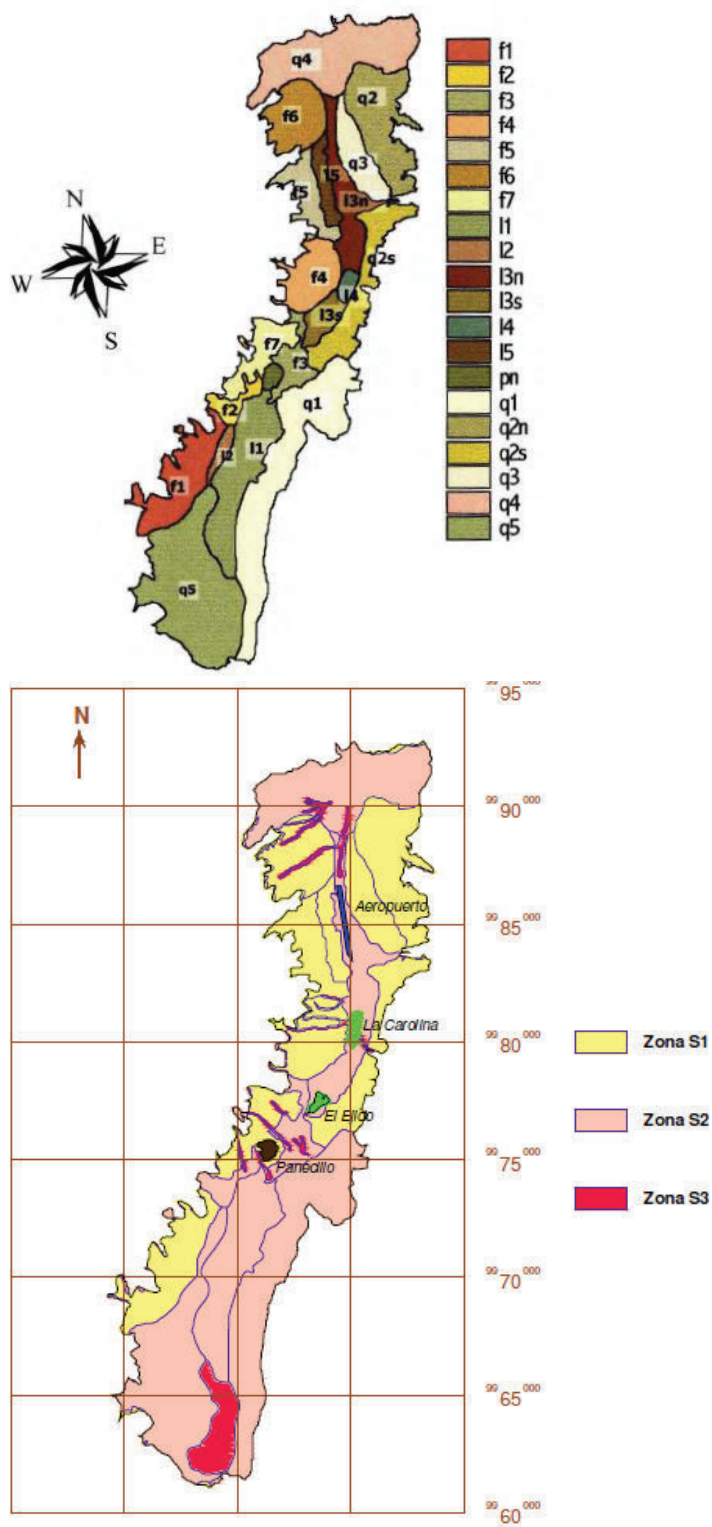
Este primer estudio identificó 20 zonas en la ciudad de Quito con sus respectivas estratigrafías y características geomecánicas. La zonificación obtenida en 1994 sirvió de base para el “Estudio de microzonificación de suelos” realizada posteriormente por Valverde et al en el año 2001. El objetivo de ese segundo estudio fue representar el comportamiento dinámico de los diferentes depósitos de suelos en Quito. Para ello se usaron funciones de transferencia obtenidas con el programa SHAKE 91. Además ese trabajo presentó un mapa de microzonificación en el que se aprecia que la ciudad de Quito está conformada por 3 tipos de suelos: S1, S2 y S3, de acuerdo a los tipos de perfiles de suelo del Código ecuatoriano de la construcción CEC-2000 (código que estaba vigente en ese entonces).

Finalmente el estudio de 2002 de Valverde et al permitió obtener espectros de diseño para las zonas mostradas en la microzonificación.

Estos espectros de diseño obtenidos fueron comparados con los espectros del CEC-2000.

Los mapas de zonificación de los estudios de la EPN de 1994 y de Valverde et al de 2002 se muestran en la figura 7.5 y las características de los suelos S1, S2 y S3 se muestran en la tabla 7.1

FIGURA 7.5 Estudios realizados por EPN 1994 y 2002



FUENTE: Valverde et al 2002

TABLA 7.1 Clasificación de los perfiles de suelo S1 a S3 según el CEC-2000

Perfil tipo S1: Roca o suelo firme.-			
<p>A este grupo corresponden las rocas y los suelos endurecidos con velocidades de ondas de corte similares a las de una roca (mayores a 750 m/s), con períodos fundamentales de vibración menores a 0.20s. Se incluyen los siguientes tipos de suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Roca sana o parcialmente alterada, con resistencia a la compresión no confinada mayor o igual a 500 kPa (5 kg/cm²). · Gravas arenosas, limosas o arcillosas densas y secas. · Suelos cohesivos duros con resistencia al corte en condiciones no drenadas mayores a 100 kpa (1 kg/cm²), con espesores menores a 20m. y sobreyacentes a roca u otros material endurecido con velocidad de onda de corte superior a 750 m/s. · Arenas densas con número de golpes del SPT: N > 50, con espesores menores a 20m. sobreyacentes a roca u otro material endurecido con velocidad de onda de corte superior a 750 m/s. · Suelos y depósitos de origen volcánico firmemente cementados, tobas y conglomerados con número de golpes del SPT: N > 50. 			
Perfil tipo S2: Suelos intermedios			
Suelos con características intermedias entre los perfiles de suelos tipo S1 y S3.			
Perfil tipo S3: Suelos blandos o estratos profundos			
En este grupo se incluyen los perfiles de suelos blandos o estratos de gran espesor, en los que los períodos fundamentales son mayores a 0.6 s, incluyéndose:			
Suelos Cohesivos	Velocidad de ondas de corte, V_s (m/s)	Resistencia al Corte No Drenada, S_u (kPa)	Espesor del estrato
Blandos	< 200	< 25	> 20m
Semiblandos	200-400	25-50	> 25m
Duros	400-750	50-100	> 40m
Muy duros	> 750	100-200	> 60m
Suelos Granulares	Velocidad de ondas de corte, V_s (m/s)	Valores del N del SPT	Espesor del estrato
Sueltos	< 200	4 a 10	> 40m
Semidensos	200-750	10 a 30	> 45m
Densos	> 750	> 30	> 100m

FUENTE: CEC-2000

Como se puede apreciar en la parte inferior de la figura 7.5 el estudio de Valverde de 2002 definió que la ciudad de Quito, tenía 3 tipos de suelos S1, S2 y S3. Es decir en la ciudad podemos encontrar suelos con periodos de 0.2 a 0.6 segundos.

El problema que se presentó en este estudio para poder usar la microzonificación del 2002, es que debido a que esta se la realizó en función del CEC-2000 y el CEC no señalaba recomendaciones concretas para los valores de la onda a corte a los 30 metros en los diferentes perfiles. Es decir hay una incertidumbre sobre el valor del V_{s30} que se debería adoptar en este trabajo a partir de la microzonificación del año 2002.

A diferencia del CEC-2000 la norma actual vigente NEC-2015 clasifica a los perfiles de suelos en 6 tipos diferentes que son A,B,C,D,E y F e indica los valores de V_{s30} para cada tipo de suelo (Ver tabla 7.2).

TABLA 7.2 Clasificación de los perfiles de suelo según NEC-2015

Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o rocas blandas que cumplen con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	760 m/s > $V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplen con cualquiera de los dos criterios.	$N \geq 50$ $SU \geq 1$ kg/cm ²
D	Perfiles de suelo rígidos, que cumplen con el criterio de velocidad la onda de cortante, o	360 m/s > $V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelo que cumplen con cualquiera de las dos condiciones.	$50 > N \geq 15$ 1 kg/cm ² > $SU \geq 0.5$ kg/cm ²
E	Perfil de suelo que cumple con criterio de velocidad de la onda de corte, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m., de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40$ % $SU < 0.5$ kg/cm ²
F	Suelos que requieren una evaluación en el sitio del Proyecto.	
	F1.- Suelos susceptibles a la falla o colapso, causados por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersos o débilmente cementados, etc.	
	F2.- Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m., para turbas o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3.- Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con IP > 75).	
	F4.- Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30 m).	
	F5.- Suelos con contraste de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 metros.	
F6.- Rellenos colocados sin control ingenieril.		

FUENTE: NEC-2015

En la actualidad no existe un estudio de microzonificación de suelos de acuerdo a los perfiles que menciona la NEC-2015, ni tampoco existe un mapa de isovelocidades de la ciudad de Quito. Por estos motivos este trabajo decidió adoptar la microzonificación del estudio de Valverde del año 2002 y considerar que los suelos S1, S2 y S3 van a tener los mismos valores de V_{s30} en dichas zonas.

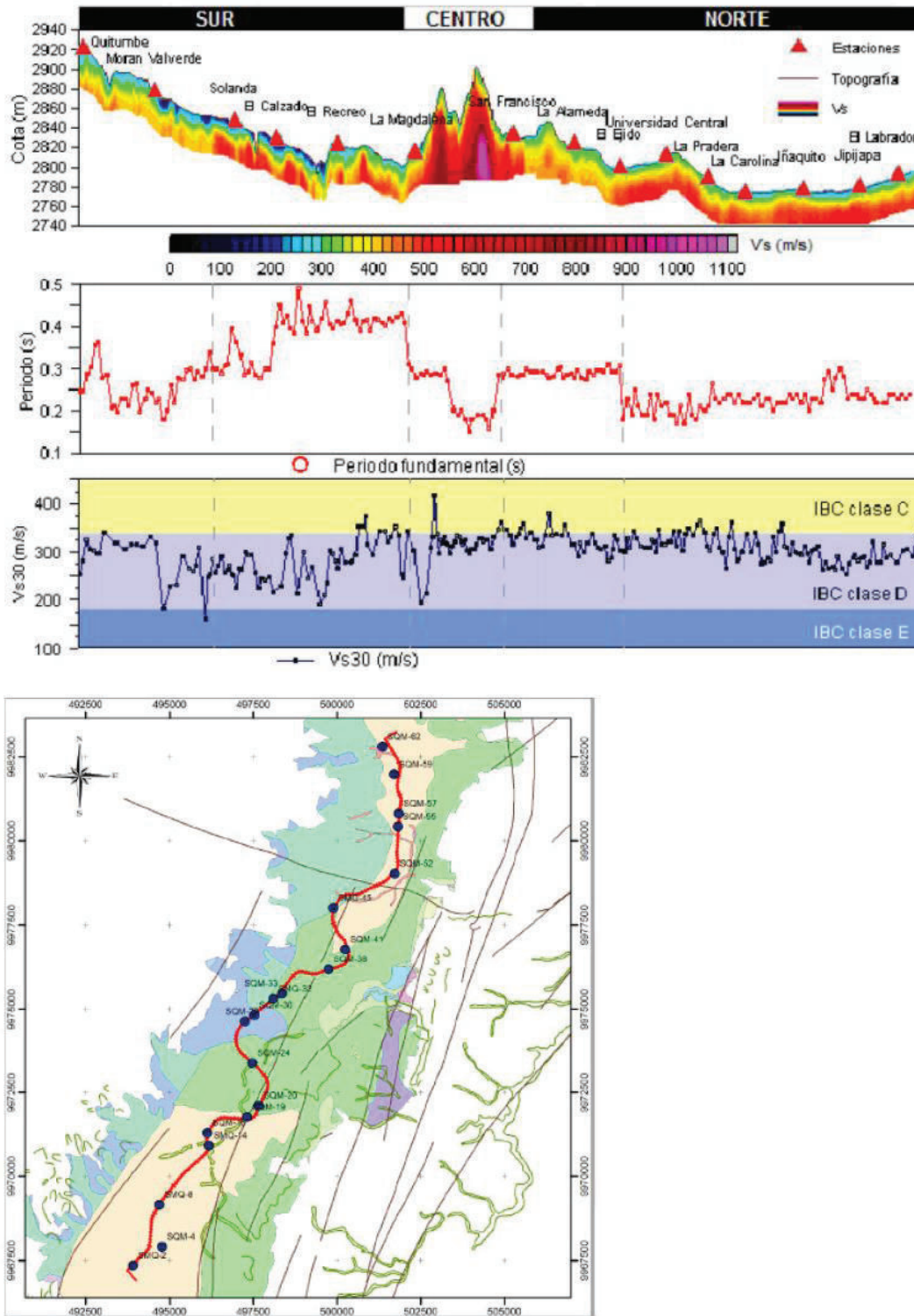
Como se mencionó anteriormente, el estudio de Valverde del año 2002, no provee un dato específico de la velocidad de onda de corte media de 0 a 30 metros. Por ello se consultó diferentes estudios de refracción sísmica y se superpusieron la ubicación de los sondeos de dichos estudios sobre la microzonificación propuesta por Valverde, para de esta manera obtener un V_{s30} de referencia. Básicamente se tomaron los valores de V_{s30} de tres consultorías que se mencionan a continuación:

- “Estudios para el metro de Quito” (Ver figura 7.4)
- “Reforzamiento sísmico de las edificaciones de los centros educativos municipales del Distrito metropolitano de Quito” (Planman, 2012)
- “ Microzonificación sísmica de Quito” ERN,2012 (Ver figura 7.5)

La figura 7.6 muestra en su parte superior los valores de V_s calculado en los estudios del metro de Quito. Este estudio realizó ensayos de refracción sísmica tipo Down-hole, en las 20 estaciones futuras del metro de Quito.

Se puede mencionar que los períodos de los suelos encontrados en el eje del proyecto varían entre 0.2 y 0.5 segundos. Estos períodos son bastantes similares a los períodos obtenidos por el estudio de Valverde de 2002, también es importante indicar que los valores de V_{s30} encontrados en esta consultoría varían mayormente entre 180 m/s y 360 m/s, (Perfil de suelo tipo D según el NEC-2015), aunque también se tienen valores mayores a 360 (Perfil suelo C según NEC-2015), en la parte inferior de la figura se muestra la ubicación de los sondeos realizados.

FIGURA 7.6 Estudios realizados por Metro de Quito para la determinación de V_{s30}



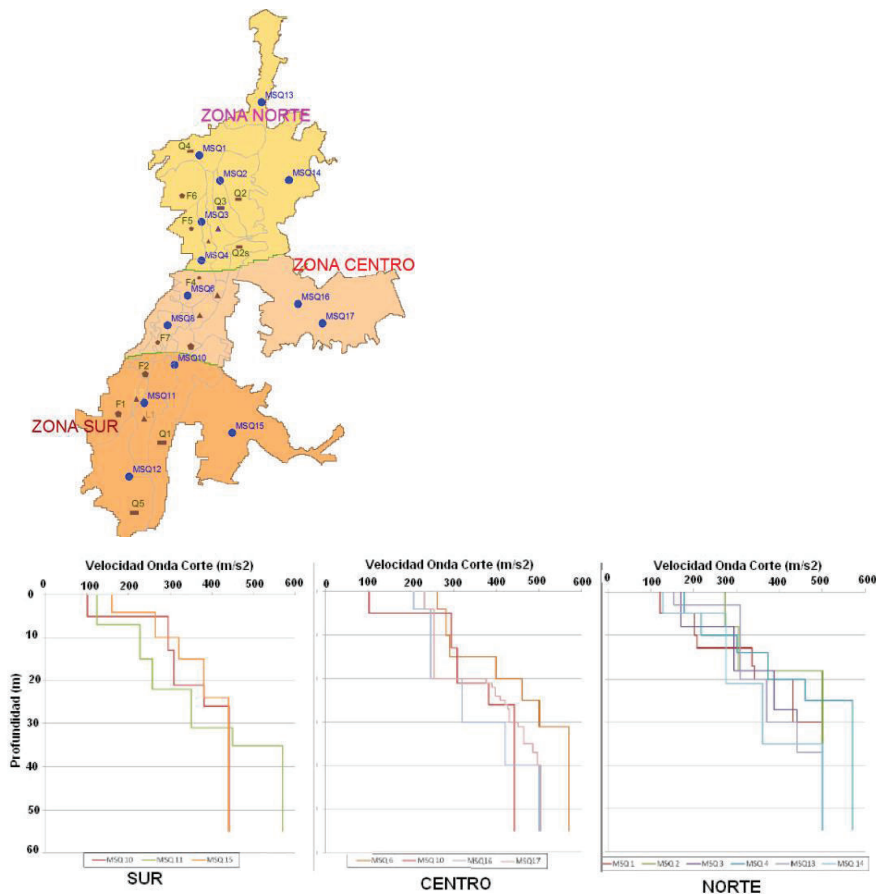
FUENTE: Aguiar, 2013

Otro estudio que se usó como referencial para obtener la información de V_{s30} , fue el estudio realizado por la consultora ERN (Evaluación de riesgos naturales), en el año 2012.

La figura 7.7 muestra en su parte superior la ubicación de ensayos para la obtención del V_{s30} realizado por ERN. Ese estudio realizó ensayos de refracción sísmica a profundidades de 30 y 40 metros, incluyendo sondeos en los valles de Cumbaya y Tumbaco.

Se muestra en la parte inferior de la figura 7.7 gráficas de la velocidad de onda de corte versus la profundidad. Es importante indicar que los valores de V_{s30} encontrados en esta consultoría en su mayor parte dieron valores cercanos a 300 m/s.

FIGURA 7.7 Estudios realizados por ERN12



FUENTE: Aguiar, 2013

El último estudio que se tomó para referenciar el valor de V_{s30} fue la consultoría realizada por PLANMAN en el año 2013, en la cual se obtuvieron valores del V_{s30} en 4 instituciones municipales.

La tabla 7.3 muestra un resumen de la velocidad de onda obtenida en las tres consultorías referenciales (PLANMAN, ERN, METRO). Se aprecia que en la mayor parte de los ensayos se obtuvieron valores de V_{s30} cercanos a los 300 m/s.

TABLA 7.3 Valores de V_{s30} obtenidos en diferentes estudios

Valores de V_{s30} para diferentes puntos							
Item	Nombre	Autor	Ubicación	Este	Norte	V_{s30} m/s	NEC- 15
1	MSQ11	ERN12	Solanda	774129,4	9969787,0	211	D
2	MSQ10	ERN12	Chimbacalle	776641,9	9972714,0	241	D
3	MSQ6	ERN12	La Gasca	777579,4	9978134,0	345	D
4	MSQ4	ERN12	Quito tenis	779166,8	9981621,0	299	D
5	MSQ3	ERN12	Andalucia	778269,8	9984391,0	270	D
6	MSQ2	ERN12	Real audiencia	780065,9	9986862,0	347	D
7	MSQ1	ERN12	Condado	778905,1	9989138,0	242	D
8	PM1	PLANMAN	Liceo Fernández Madrid	777156,7	9974843,0	441	C
9	PM2	PLANMAN	Escuela Sucre	777166,9	9975232,0	228	D
10	PM3	PLANMAN	Colegio Benalcázar	780514,7	9979795,0	578	C
11	PM4	PLANMAN	Escuela Espejo	778053,2	9976817,0	398	C
12	Q2	METRO	Quitumbe	772330,5	9968306,0	280	D
13	Q4	METRO	Moran Valverde	773182,0	9968920,0	315	D
14	Q8	METRO	Solanda	773073,5	9970171,0	225	D
15	Q16	METRO	El calzado	774490,0	9972251,0	220	D
16	Q20	METRO	El recreo	776045,5	9973076,0	260	D
17	Q24	METRO	La magdalena	775898,0	9974344,0	300	D
18	Q30	METRO	San Francisco	777100,5	9975660,0	315	D
19	Q41	METRO	La alameda	778193,0	9977027,0	315	D
20	Q45	METRO	U central	778331,5	9978874,0	320	D
21	Q52	METRO	La pradera	780137,0	9979838,0	310	D
22	Q55	METRO	La carolina	780651,0	9980530,0	340	D
23	Q57	METRO	Inaquito	780245,5	9981218,0	300	D
24	Q59	METRO	Jipijapa	780250,0	9981607,0	285	D
25	Q62	METRO	El labrador	779751,0	9983578,0	275	D

ELABORACIÓN: Diego Quizanga

La tabla 7.3 muestra la ubicación en coordenadas UTM de los diferentes estudios realizados se observa con código MSQ los sondeos realizados por ERN, con PM los realizados por PLANMAN y con Q los sondeos para el metro de Quito.

En total se tienen 25 sondeos en diferentes lugares de la ciudad. En ninguno de los sondeos se llegó a tener una velocidad V_{s30} de 760 m/s por lo que en este estudio no se utilizó las características del suelo clasificado como tipo “B” según la NEC-15.

La figura 7.8 muestra la ubicación de los sondeos con sus respectivos códigos colocados sobre la microzonificación de Valverde de 2002, se puede observar que la mayoría de sondeos caen dentro de las zonas que Valverde clasificó como “S2 - CEC2000”, es decir en estas zonas los sondeos dieron una media de 300 m/s por lo que se infiere que este valor es un valor adecuado para asumirlo en la realización de los espectros.

Además se observa que los puntos PM1, PM3 y PM4 tienen los valores mayores de V_{s30} estos puntos cayeron en las zonas en las que la microzonificación de Valverde de 2002 definió como “S1” y tienen una V_s media de 460 m/s se ha inferido que los demás puntos dentro de esta zona van a tener un valor similar de V_{s30} .

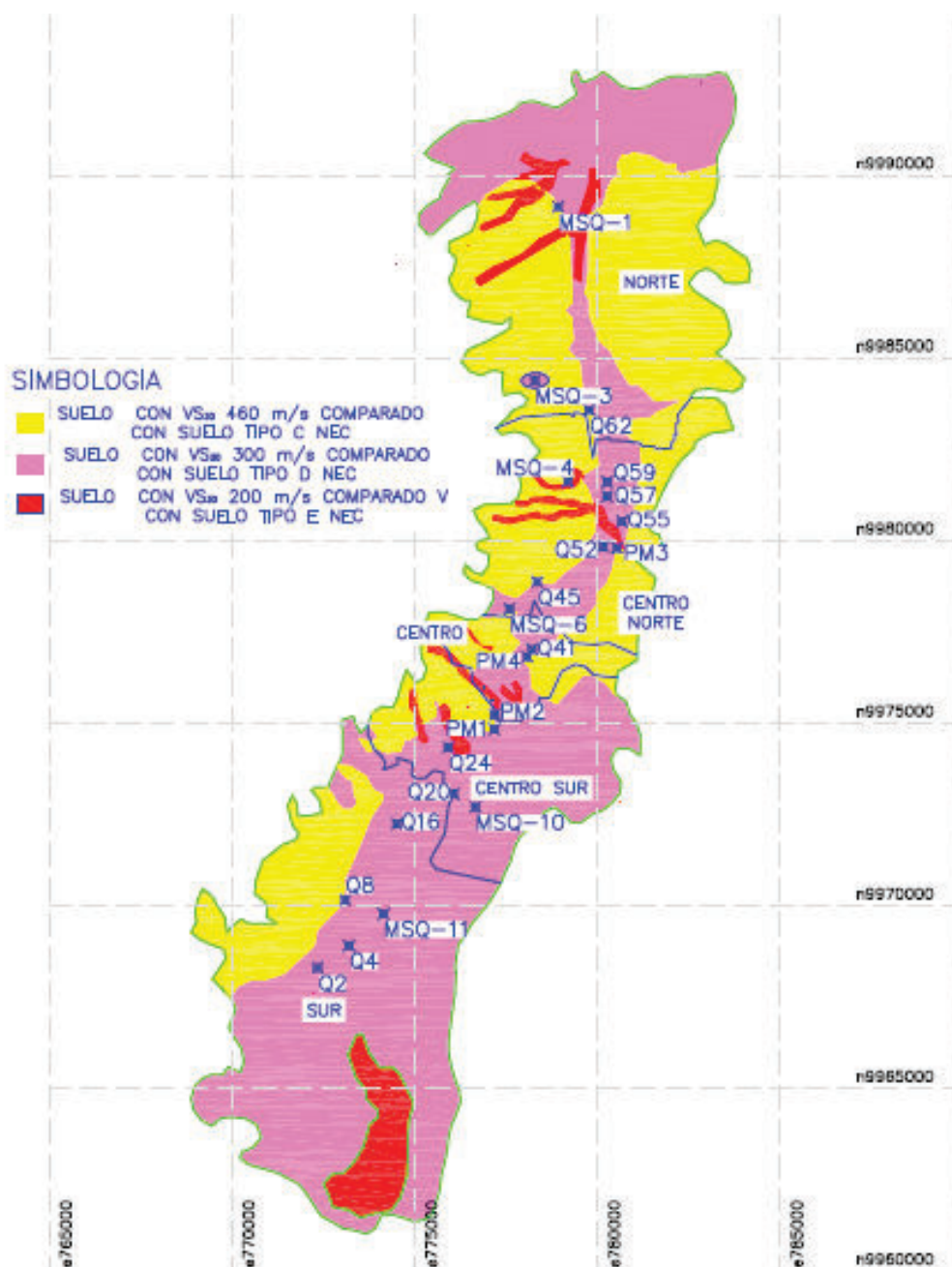
Por último según la microzonificación del año 2002 se tiene zonas clasificadas como S3 sobre estas zonas no existen sondeos que permitan determinar un V_{s30} . Por esta razón se ha colocado en ellas un V_{s30} de 200 m/s que es un valor menor al que se ha adoptado en la zona S2.

Resumiendo este estudio considera que la ciudad de Quito tiene velocidades de onda de corte V_{s30} de 460 m/s, 300 m/s y 200 m/s como se puede apreciar en la figura 7.8.

Se debe mencionar que el estudio de Valverde no encontró suelos extremadamente blandos o especiales que correspondían al tipo de suelo S4 del

CEC-2000, sin embargo en el mismo estudio se recomendó que los sitios de potente rellenos de la ciudad de Quito deben ser estudiados detalladamente y los mismos no fueron incluidos en ese estudio.

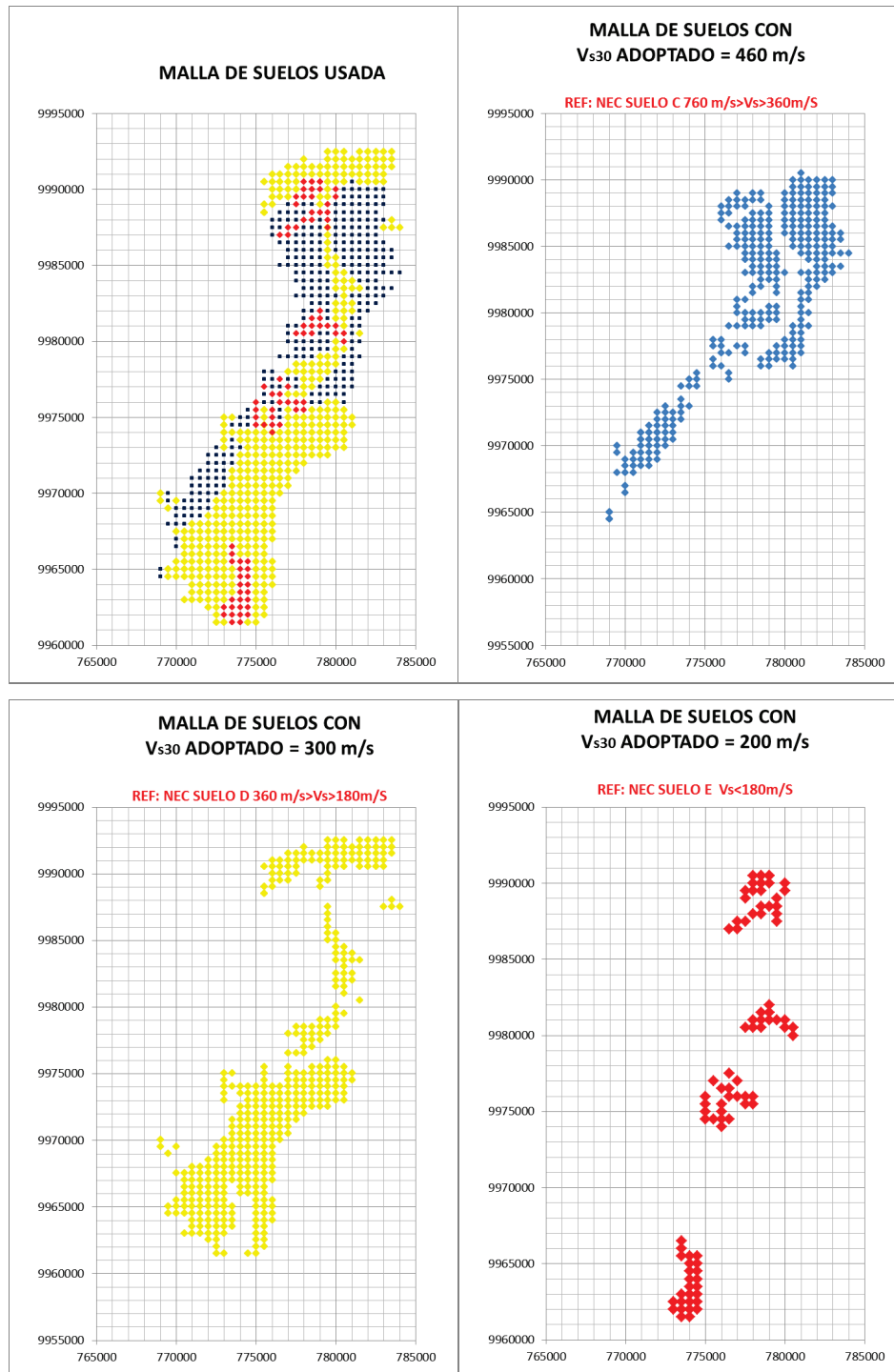
FIGURA 7.8 Estudios realizados por ERN, PLANMAN, METRO sobre microzonificación de Valverde



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

7.2.3 LA MALLA OBTENIDA

FIGURA 7.9 Mallas usadas en función del factor V_{s30} adoptado



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Una vez que se han caracterizado los puntos en cuanto a los parámetros asociados a la distancia y a los valores de V_{s30} a adoptar, se trabajará con un total de 15 sub-mallas es decir se tendrán mallas con V_{s30} de 460 m/s para las zonas norte, centro norte, centro, centro sur y sur, así también se tendrán 5 sub-mallas cuando V_{s30} es igual a 300 m/s y 5 sub mallas cuando V_{s30} es igual 200 m/s.

En la figura 7.9 mostrada anteriormente, se puede apreciar en su parte izquierda superior la malla usada con su respectiva caracterización de acuerdo a las velocidades V_{s30} adoptadas que han sido previamente descritas.

Los puntos azules de la figura muestran los sitios en los que se ha asumido que el V_{s30} es de 460 m/s, con puntos amarillos se muestran los sitios en los que se ha asumido un valor de V_{s30} de 300 m/s y con puntos rojos los sitios donde el V_{s30} es 200 m/s.

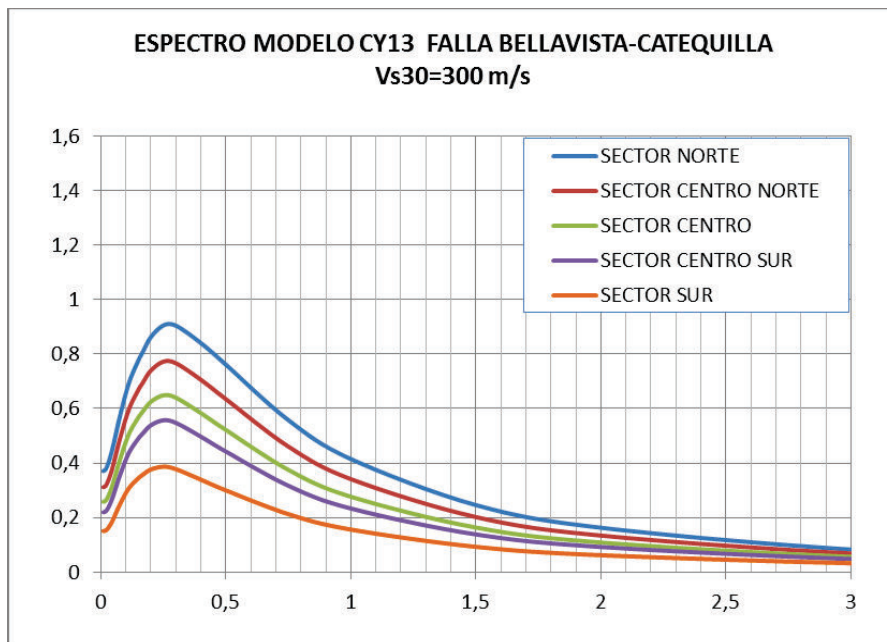
Una vez definidos todos los datos de entrada se calculó los espectros según se muestra a continuación.

7.3 ESPECTROS ENCONTRADOS CON EL MODELO CY13.

Antes de presentar los resultados obtenidos con el modelo de Chiou y Youngs es necesario recalcar que el objetivo de este trabajo es presentar los espectros críticos asociados a una zona de Quito y a una condición local del suelo, esto debido a que se podría presentar 60 espectros por cada V_{s30} . Sin embargo para evitar presentar una gran cantidad de espectros que no representan las peores condiciones de aceleración en las diferentes zonas de Quito hay que buscar los espectros críticos.

La figura 7.10 muestra por ejemplo los espectros asociados a la falla de Catequilla, obtenidos a partir del modelo CY13 usando un V_{s30} de 300 m/s, en las diferentes zonas de Quito se puede apreciar con línea azul el espectro obtenido para el sector norte, con línea roja el espectro obtenido para la zona centro-norte, con línea verde para la zona centro, con línea morada para el sector centro-sur y con línea naranja el espectro obtenido para el sector sur.

FIGURA 7.10 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Falla de Bellavista-Catequilla



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

De la figura anterior se puede concluir que ante las mismas condiciones locales del suelo, los espectros asociados al segmento de falla Bellavista-Catequilla tienen una mayor respuesta en aceleración en los sitios ubicados en el norte y conforme se van alejando los sitios las aceleraciones de los espectros van disminuyendo, en este punto no se puede concluir que el segmento de Bellavista-Catequilla sea el que este asociado a las mayores aceleraciones de suelo (espectro crítico) en la zona norte, pero si se puede verificar que por su ubicación un evento asociado a la fuente del segmento Bellavista-Catequilla (BC) generará mayores respuestas en la zona norte del distrito metropolitano de Quito.

Para determinar el espectro crítico en cada zona se debe obtener espectros asociados a cada segmento de falla en las 5 zonas predefinidas, se realiza esto con cada uno de los modelos de atenuación, empezando con el modelo CY13, con el objeto de determinar cuál es el segmento de falla que causa una mayor aceleración en cada zona de Quito.

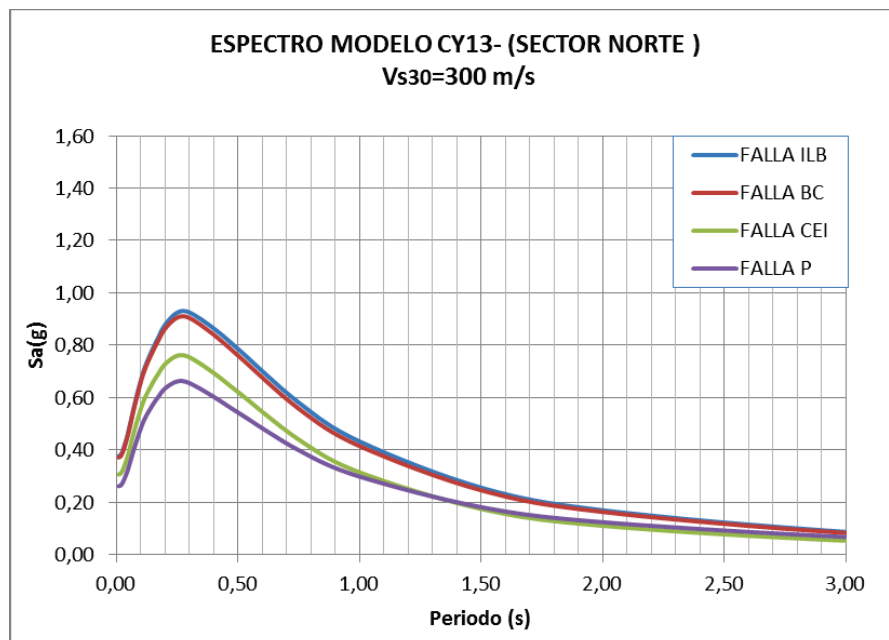
Al igual que en el ejemplo de cálculo mostrado en la figura 7.10 se asumió para la determinación de los espectros un V_{s30} igual 300 m/s, por ser un valor bastante representativo de los valores del V_{s30} que tiene la mayoría de puntos de la malla.

En las figuras 7.11 a 7.16 se muestran los espectros de aceleración para los diferentes sectores de estudio, partiendo del modelo de Chiou y Youngs CY13 y de la sub-malla previamente descrita.

En las siguientes figuras se muestra los espectros de respuesta en aceleración para los segmentos de falla de Ilumbisí-La Bota (**ILB**) con color azul, de Bellavista-Catequilla (**BC**) con color rojo, Carcelén – El Inca (**CEI**) con color verde y de Puengasí (**P**) con color morado.

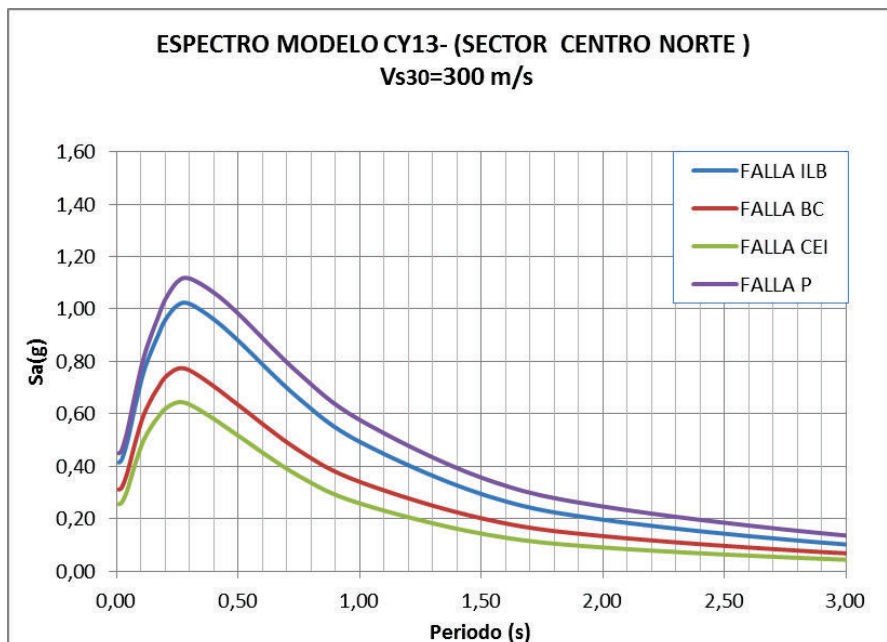
El valor del período en las siguientes figuras viene dado en segundos y la aceleración en (g).

FIGURA 7.11 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector norte



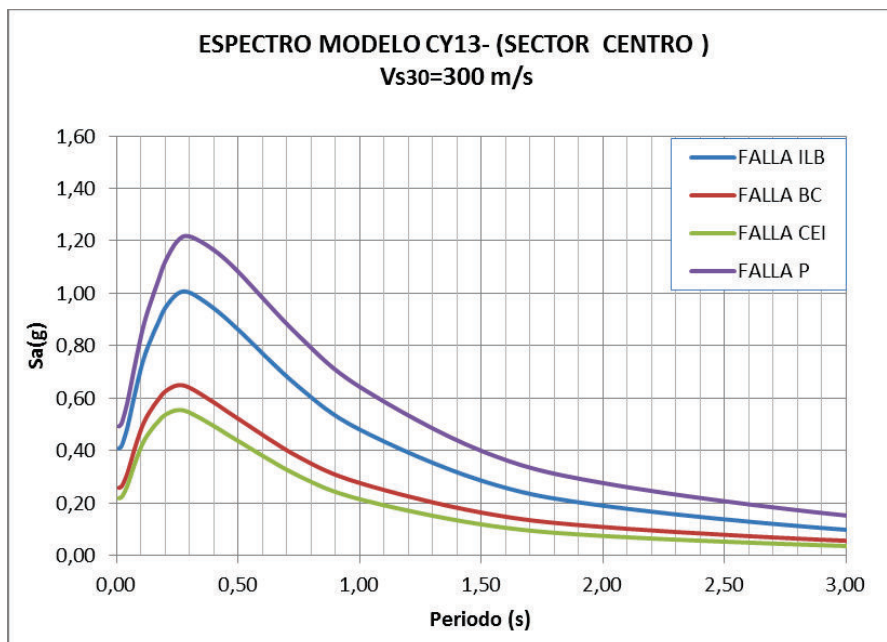
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.12 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro-norte



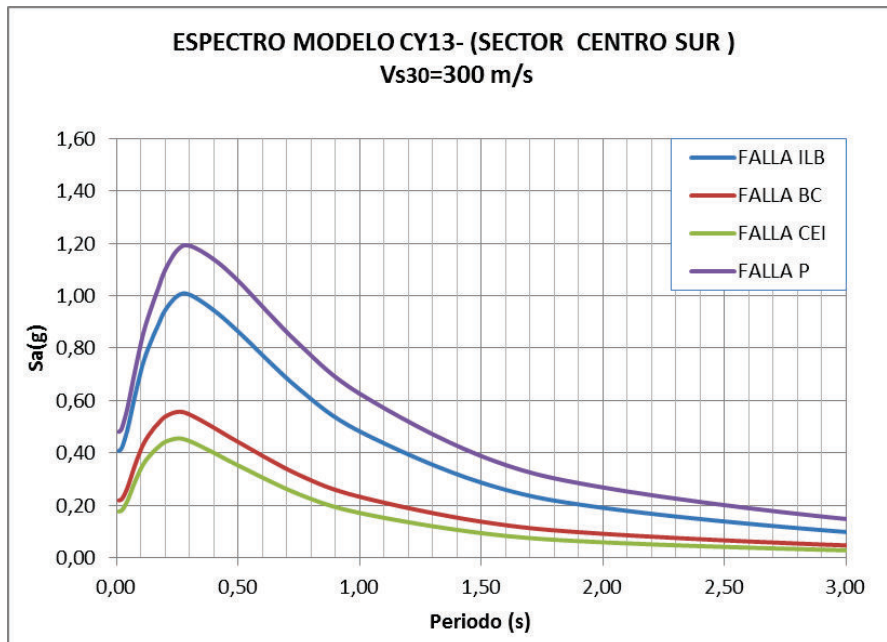
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.13 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro



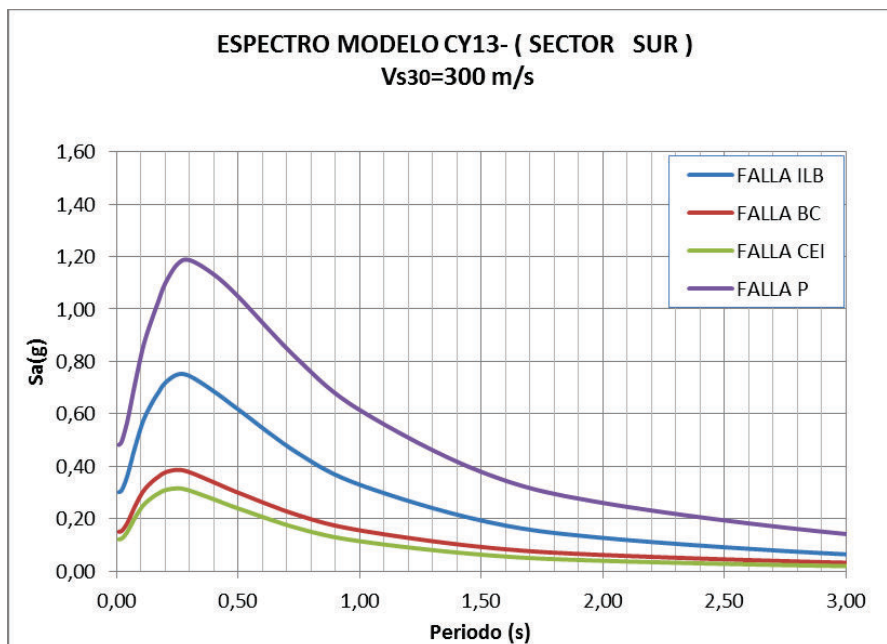
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.14 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector centro-sur



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.15 Espectro de pseudoaceleración modelo CY13. Sector sur



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

7.4 ESPECTROS ENCONTRADOS CON EL MODELO CB13

Siguiendo la metodología anteriormente descrita se obtiene espectros para 5 zonas de la ciudad usando un V_{s30} de 300 m/s y el modelo de Campbell y Borzognia.

FIGURA 7.16 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector norte

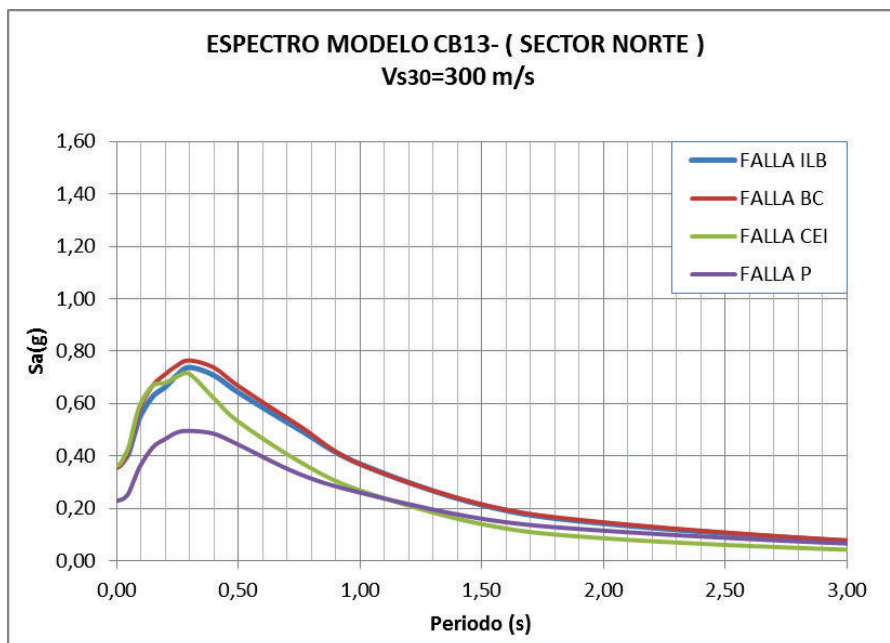
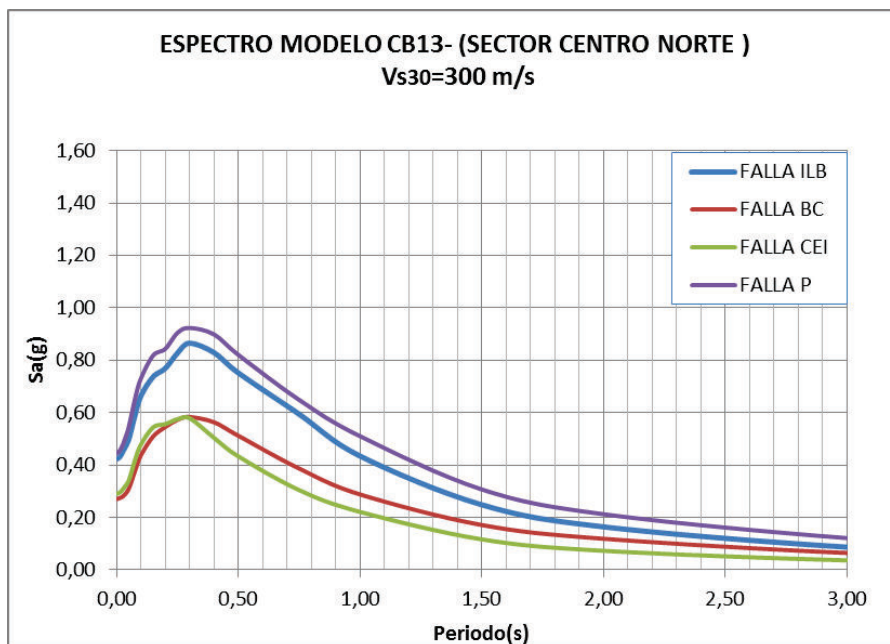
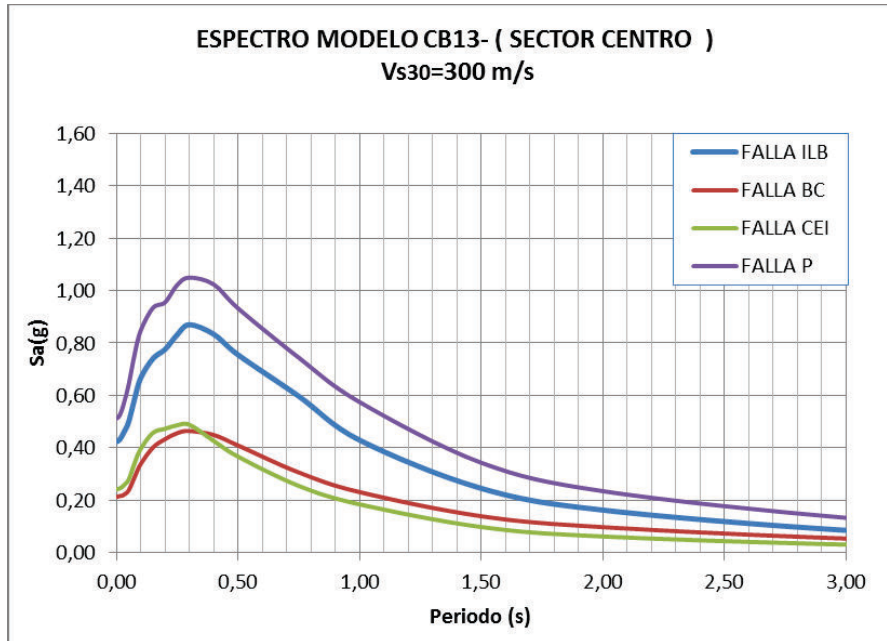


FIGURA 7.17 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro-norte



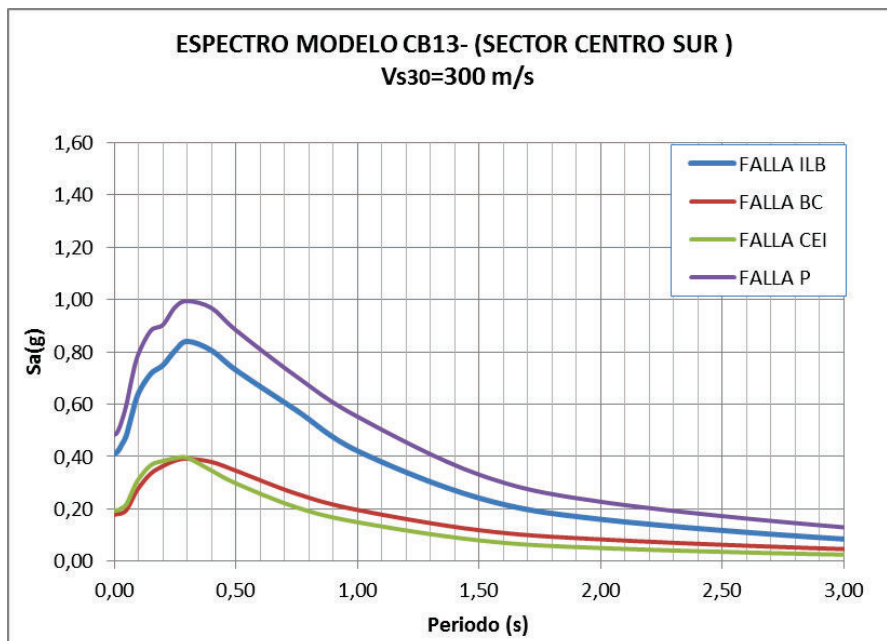
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.18 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro.



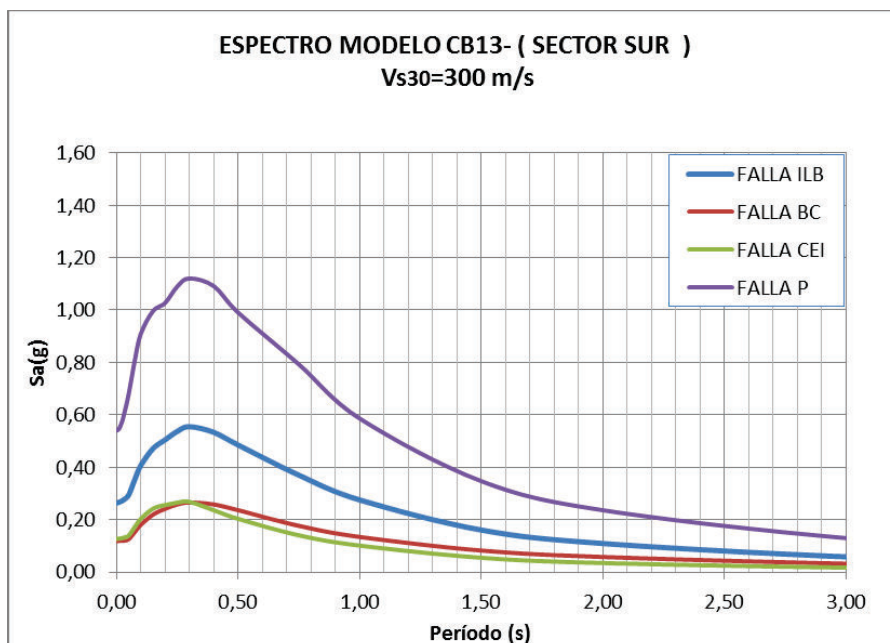
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.19 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector centro-sur



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.20 Espectro de pseudoaceleración modelo CB13. Sector sur



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

7.5 ESPECTROS ENCONTRADOS CON EL MODELO ASK13

Al igual que para los modelos CY13, y CB13, se obtienen espectros para 5 zonas de la ciudad usando un V_{s30} de 300 m/s y el modelo ASK13.

FIGURA 7.21 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector norte

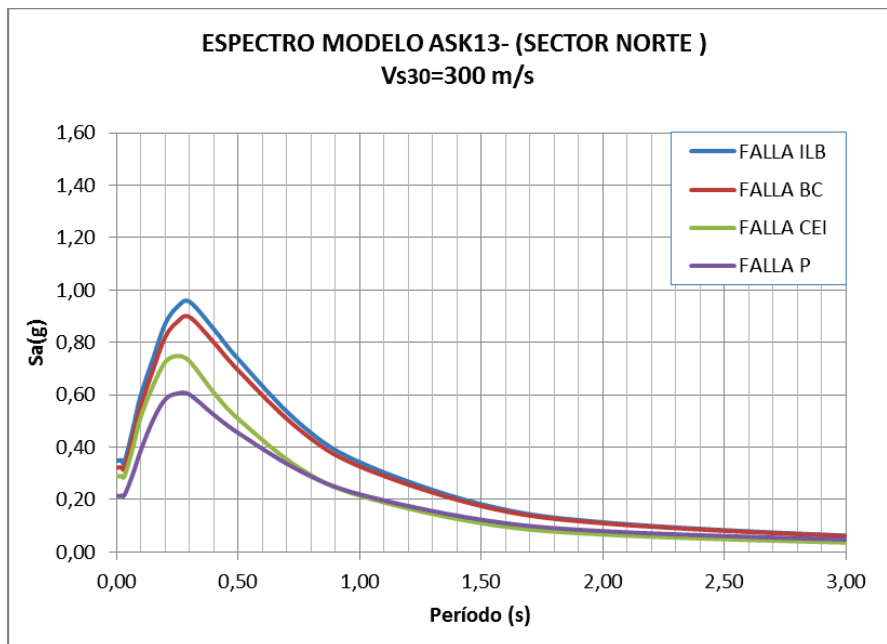
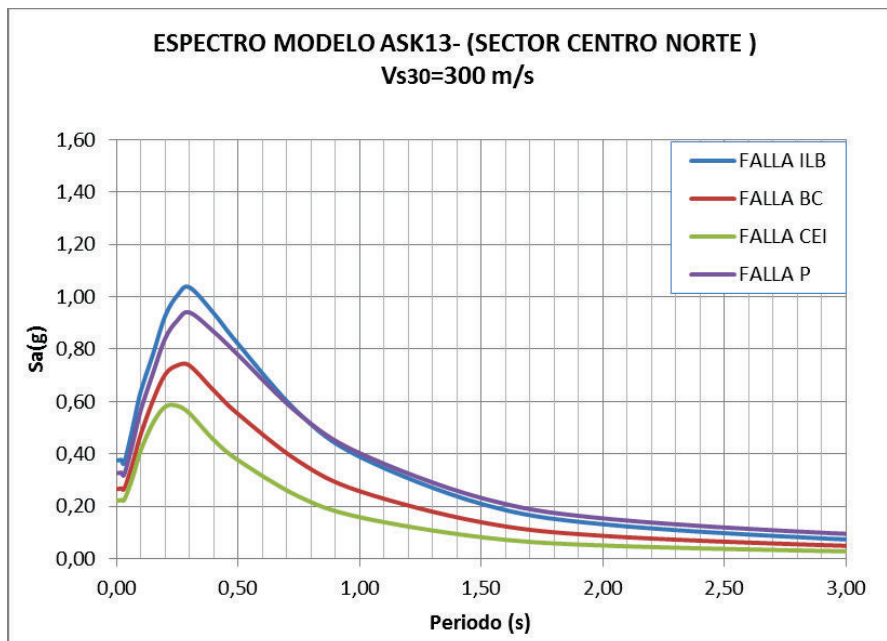
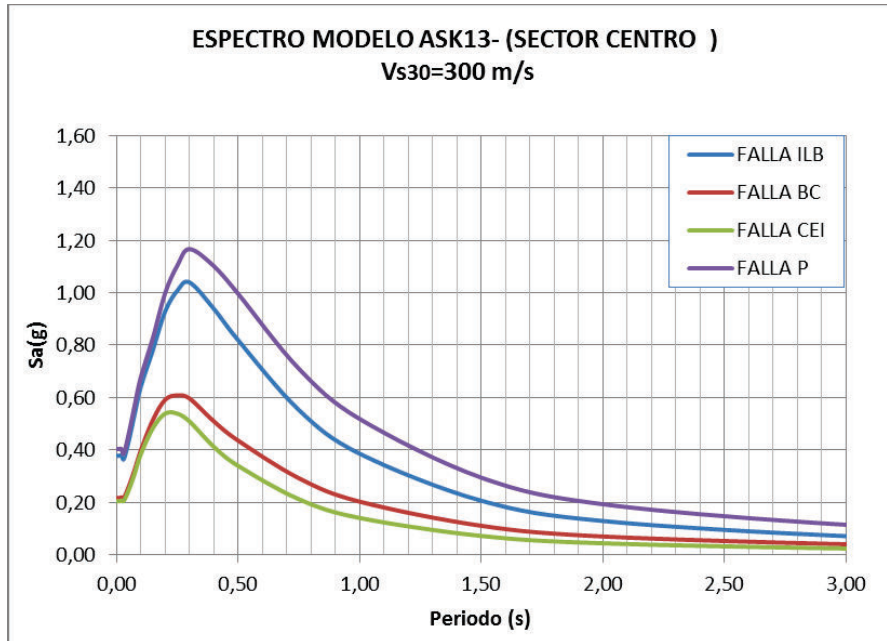


FIGURA 7.22 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro-norte.



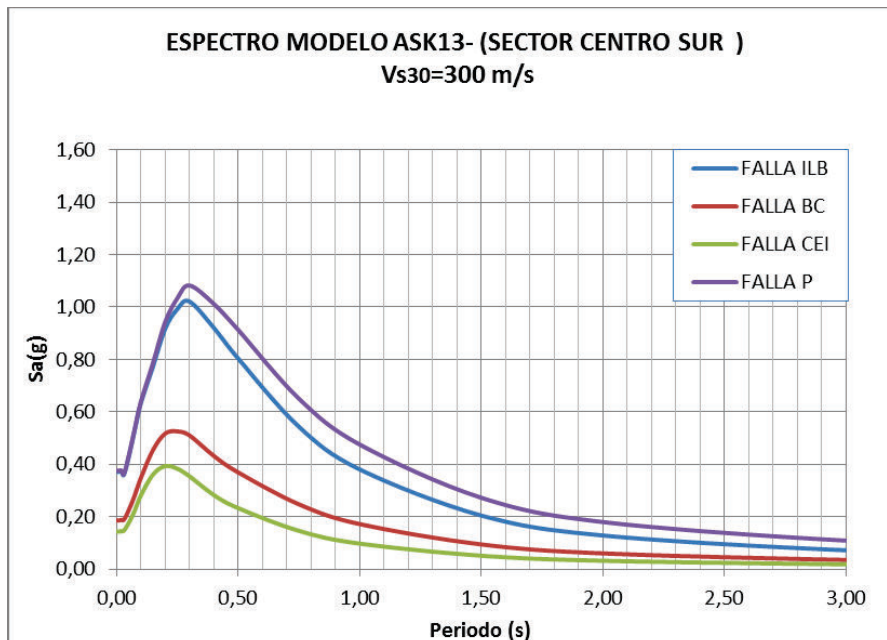
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.23 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro.

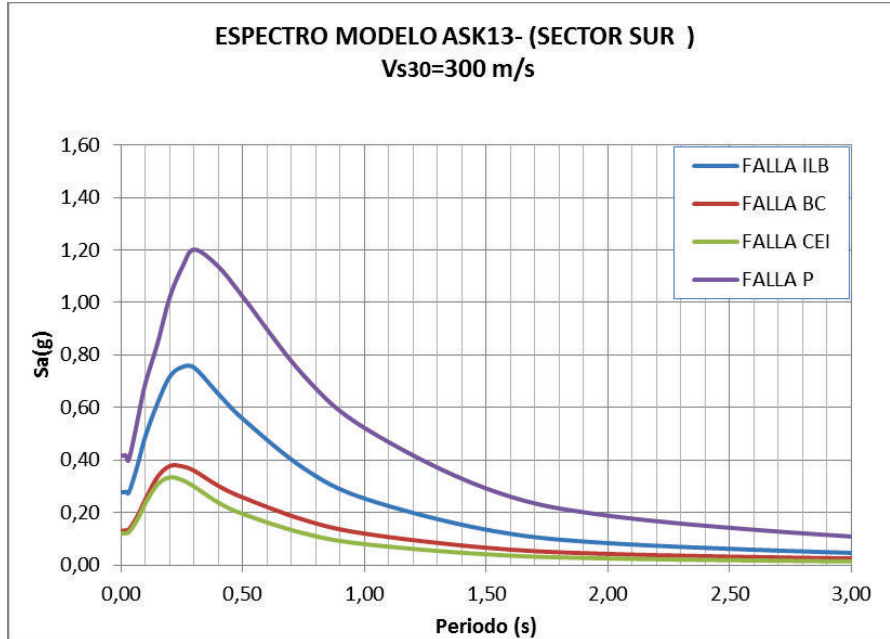


ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.24 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector centro-sur



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.25 Espectro de pseudoaceleración modelo ASK13. Sector sur

ELABORACIÓN: Diego Quizanga

De los espectros anteriormente calculados que se mostraron en las figuras 7.11 a 7.25 se puede acotar que efectivamente como se había previsto la falla de Puengasí es la que genera mayores respuestas de aceleración en cuatro sectores de la ciudad que son: sur, centro-sur, centro y centro norte; en el sector norte el segmento de falla que genera una aceleración máxima es el de Ilumbisí-La Bota (ILB), por lo que se considera críticos los espectros asociados a estos dos segmentos de fallas en los diferentes sectores.

No tiene sentido revisar los espectros de las 5 zonas asociados a las otras fallas porque no son críticos, tal como se pudo apreciar en la figura 7.10.

7.6 ESPECTROS PROMEDIOS

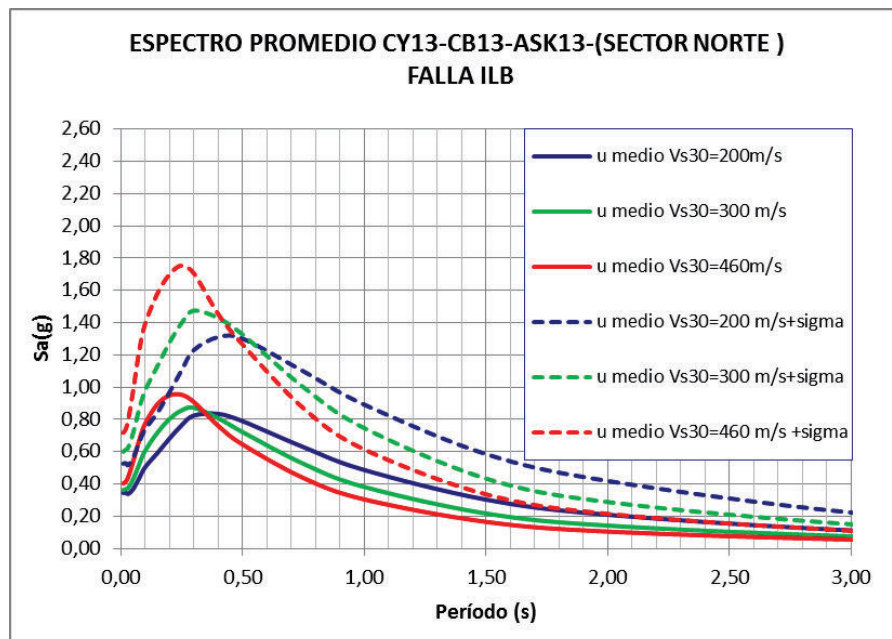
Una vez que se han identificado los segmentos críticos para las diferentes zonas de la ciudad se obtienen los espectros promedios en cada sector usando los 3 modelos de atenuación (CY13, CB13, ASK13) y los tres valores de V_{s30} de este estudio. Nótese en las figuras 7.26 a 7.30 que se ha colocado además del espectro promedio el espectro considerando el nivel de confianza.

El nivel de confianza es la probabilidad de que el valor calculado (en este caso de estudio las aceleraciones espectrales) este dentro de un rango llamado intervalo de confianza, entonces se tiene un 50% de nivel de confianza cuando se considera que no se ha tomado en cuenta el valor de la desviación estándar (sigma) en la obtención del espectro, si consideramos el 100 % del valor de la desviación estándar se tiene un nivel de confianza del 84%.

En las figuras 7.26 a la 7.30 se muestran los espectros promedios de los modelos CY13, CB13 y ASK 13 para los diferentes sectores de la ciudad de Quito, con línea continua de color azul se muestran los espectros obtenidos a partir del uso de un V_{s30} igual a 200 m/s, con color verde los espectros medios calculados con V_{s30} igual a 300 m/s y con color rojo espectros para un V_{s30} igual a 460 m/s.

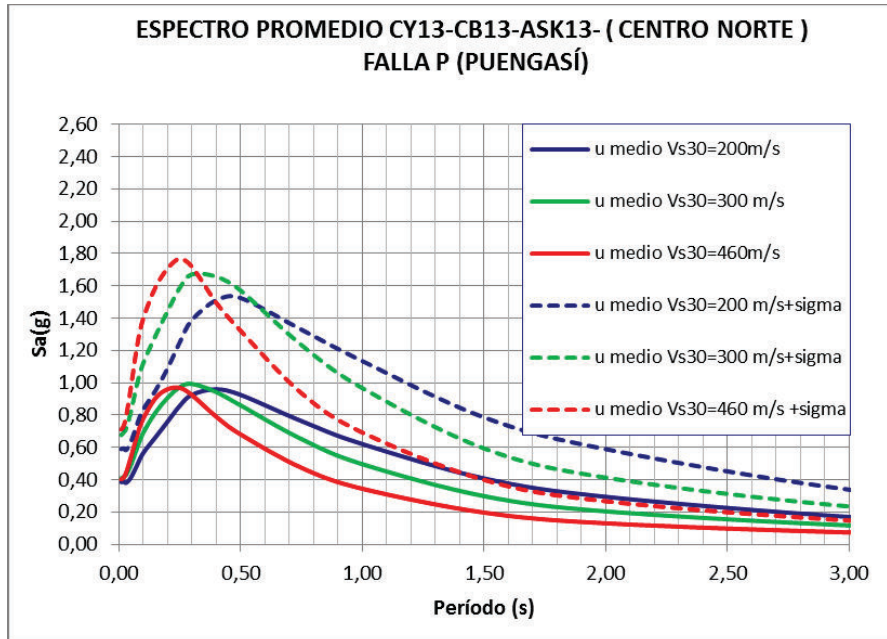
Además se puede apreciar en las figuras siguientes los espectros calculados considerando el 100% de la desviación estándar en los tres modelos, los mismos que se muestran con línea punteada.

FIGURA 7.26 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector norte



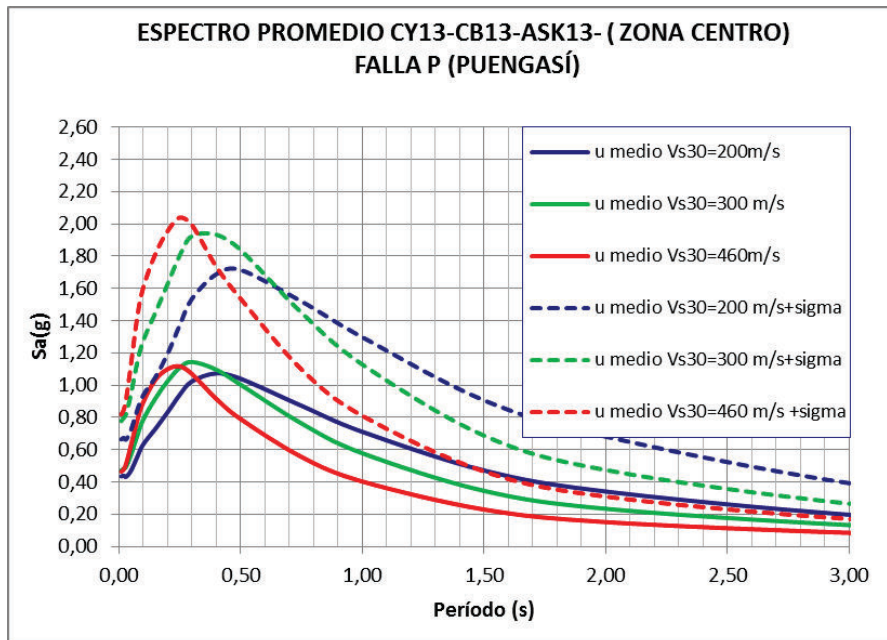
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.27 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector centro-norte



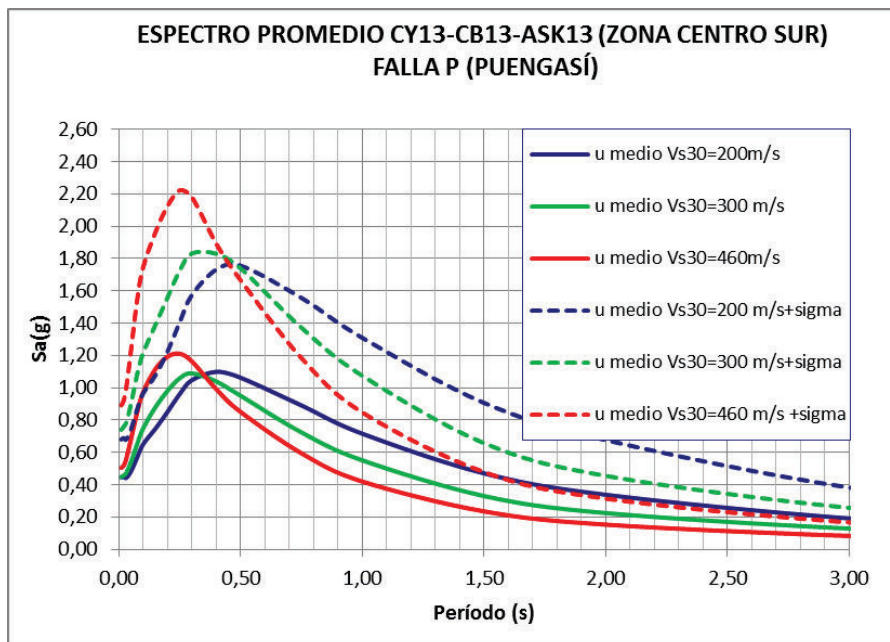
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.28 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector centro.



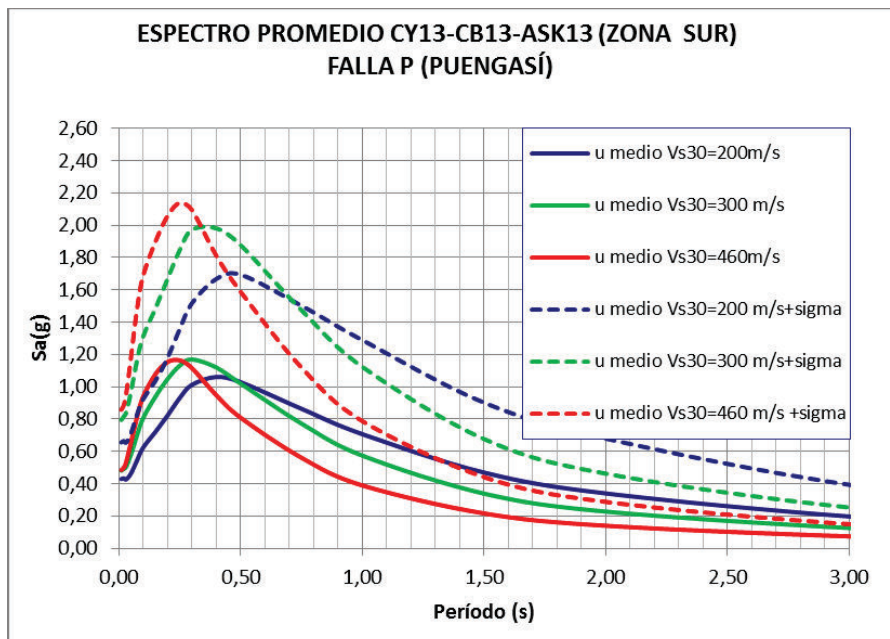
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.29 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13 .Sector centro-sur.



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.30 Espectro medio modelos CY13-CB13-ASK13. Sector sur.



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Sobre los espectros promedios que se mostraron en las figuras 7.26 a 7.30 se puede mencionar dos aspectos importantes: el primero es que los espectros calculados considerando el 100 % de la desviación estándar prácticamente duplican el valor de la máxima aceleración obtenida con los espectros promedios en los que no se consideró incluir la desviación estándar. Además se aprecia que el espectro que tiene una mayor ordenada se da en la zona sur y está asociado a un evento dado por el segmento de Puengasí, esta aceleración tendrá una cresta mayor cuando el suelo tiene velocidades de onda de corte V_{s30} entre 460 m/s y 300 m/s.

En el Norte el espectro crítico está asociada al segmento Ilumbisí la Bota (ILB) y presenta ordenadas espectrales menores que las aceleraciones máximas obtenidas el sur, esta menor respuesta en aceleración se debe a que la magnitud del segmento ILB es menor a la magnitud que se puede presentar en el segmento de Puengasí, sin embargo por la cercanía del segmento ILB a las parroquias del norte, el evento sísmico asociado a esta falla causaría mayores aceleraciones en los sitios del norte que el segmento Puengasí.

7.7 ESPECTROS PROMEDIOS Y ESPECTRO NEC-2015

Para realizar la comparación de los espectros de este estudio con el espectro del NEC-2015 se debe considerar que la norma ecuatoriana de la construcción define que el suelo del perfil tipo C tiene valores de V_s entre 360 m/s y 760 m/s, en el suelo tipo D los valores de V_s varían entre 180 m/s y 360 m/s y para el suelo tipo E el V_s debe ser menor a 180 m/s.

Los espectros obtenidos en este estudio han sido calculados con valores de V_{s30} de 460 m/s, 300 m/s y 200 m/s utilizando las sub-mallas previamente mencionadas. Con el objetivo de hacer una comparación entre los espectros obtenidos usando las diferentes ecuaciones de atenuación de P.E.E.R se colocará en las gráficas siguientes los espectros críticos obtenidos a partir de CY13, ASK13 y CB13 en las 5 zonas de Quito y se incluirá el espectro de diseño del NEC-2015 para el tipo de suelo en cuyo rango de V_s se encuentran los espectros de este estudio.

En otras palabras para los espectros obtenidos con un V_{s30} de 460 m/s se colocó en la gráfica el espectro correspondiente al suelo tipo C del NEC, para espectros obtenidos un V_{s30} de 300 m/s se colocó el espectro del NEC para el suelo tipo D, y para los espectros obtenidos usando un V_{s30} de 200 m/s se colocó el espectro del NEC-2015 para perfil tipo E.

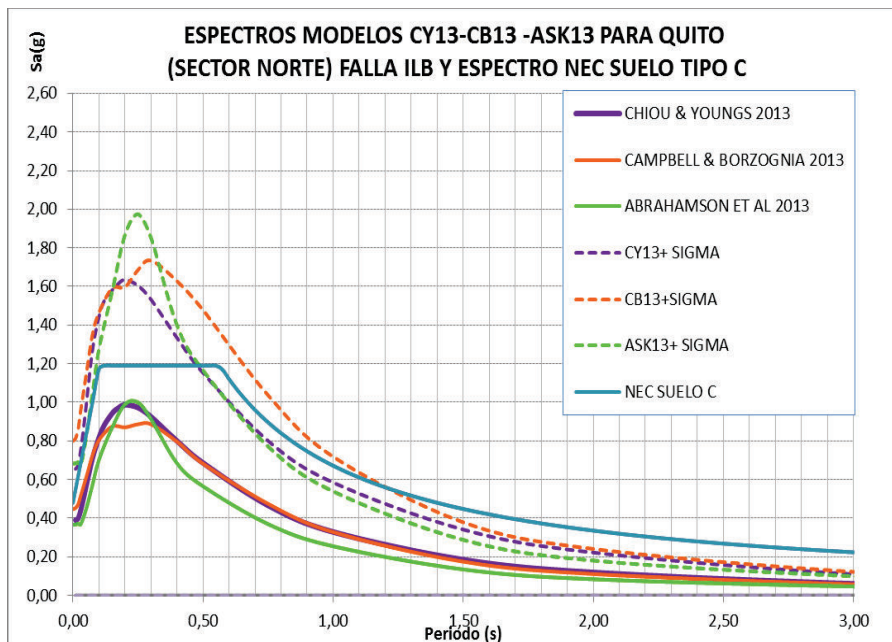
Se recalca que los espectros obtenidos en este estudio son determinísticos por lo que están asociados a una tasa de recurrencia que se mostró en el capítulo 2 en la tabla 2.2 cuando se analizó el modelo neotectónico de Alvarado et al y a un nivel de confianza relacionado con la desviación estándar (σ).

En este punto es importante recalcar lo que fue anteriormente mencionado en el capítulo 3, el espectro del NEC-2015 es un espectro obtenido con un método probalístico es decir para su cálculo se consideraron simulaciones estocásticas de acelerogramas artificiales, y estudios de formas espectrales; los espectros que se están presentando en este trabajo son obtenidos con un método determinístico es decir a partir de magnitudes conocidas, distancias conocidas y factores de sitio conocidos se obtienen indicadores de movimiento fuerte en este caso una respuesta en aceleración. De esta manera se indica que no se debería comparar modelos determinísticos con modelos probabilísticos.

En las figuras 7.31 a la 7.45 se muestran los espectros críticos obtenidos a partir de los modelos CY13, CB13 y ASK13 para los diferentes sectores de la ciudad de Quito, utilizando los distintos valores de V_{s30} definidos en este estudio.

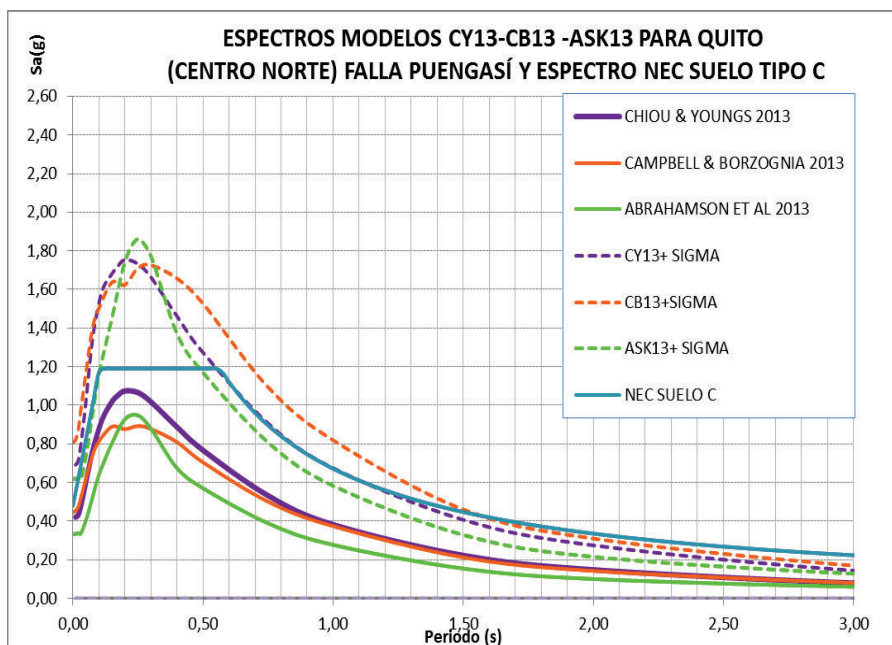
Las figuras siguientes muestran con línea continua de color morado los espectros obtenidos a partir del modelo de Chiou y Youngs (CY13), con color verde los resultados obtenidos con el modelo de Abrahamson-Silva y Kamai (ASK13) y con color naranja los espectros obtenidos para el modelo de Campbell y Borzognia (CB13), además se presenta con línea punteada los espectros para un nivel de confianza del 84 %, finalmente únicamente como referencia se coloca el espectro del NEC 2015 con color azul.

FIGURA 7.31 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 460 m/s.



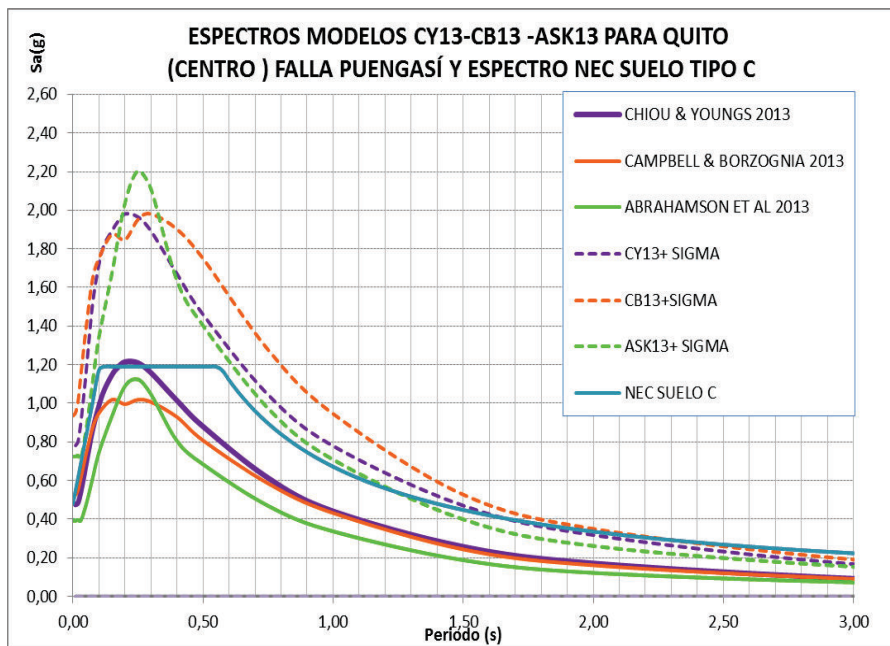
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.32 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s.



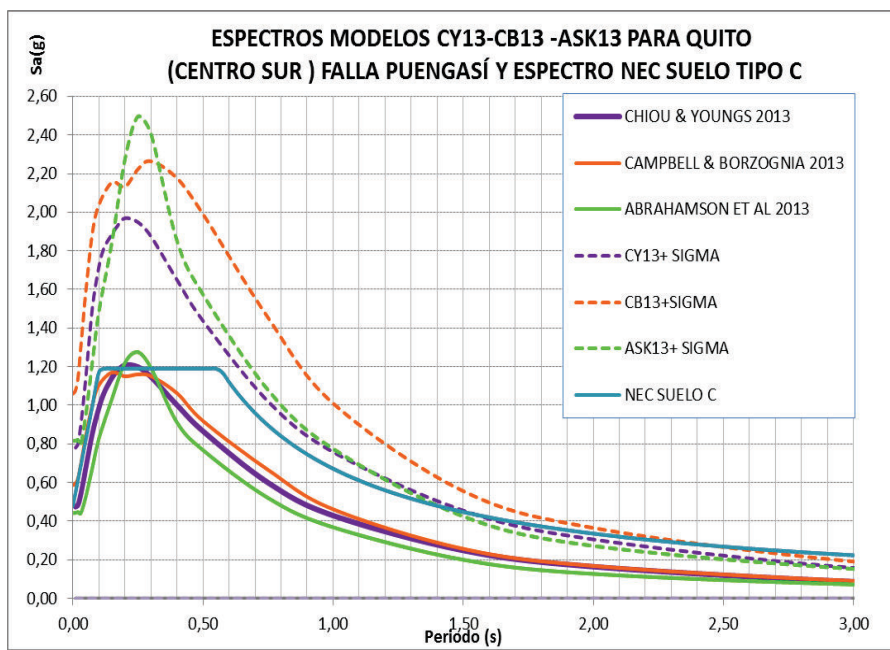
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.33 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s



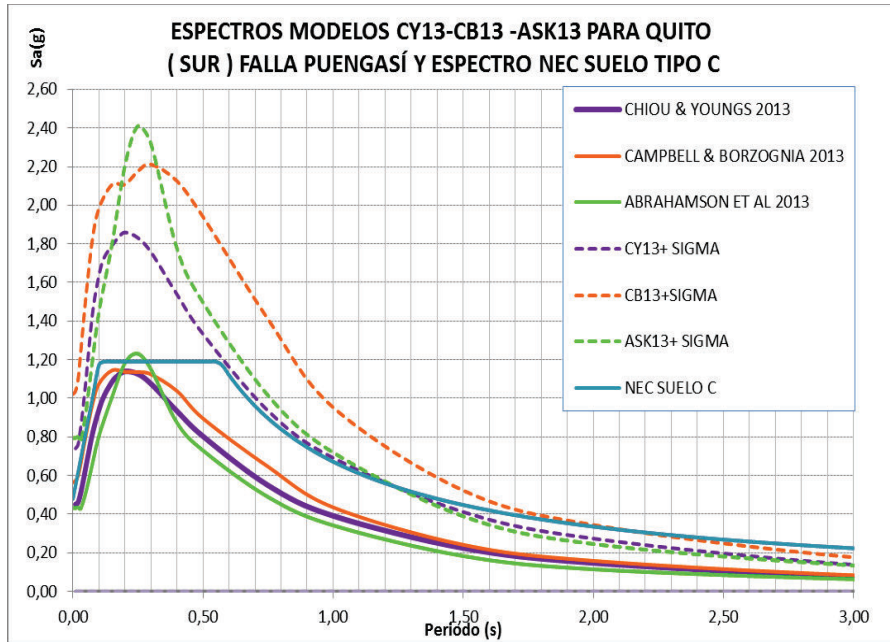
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.34 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s



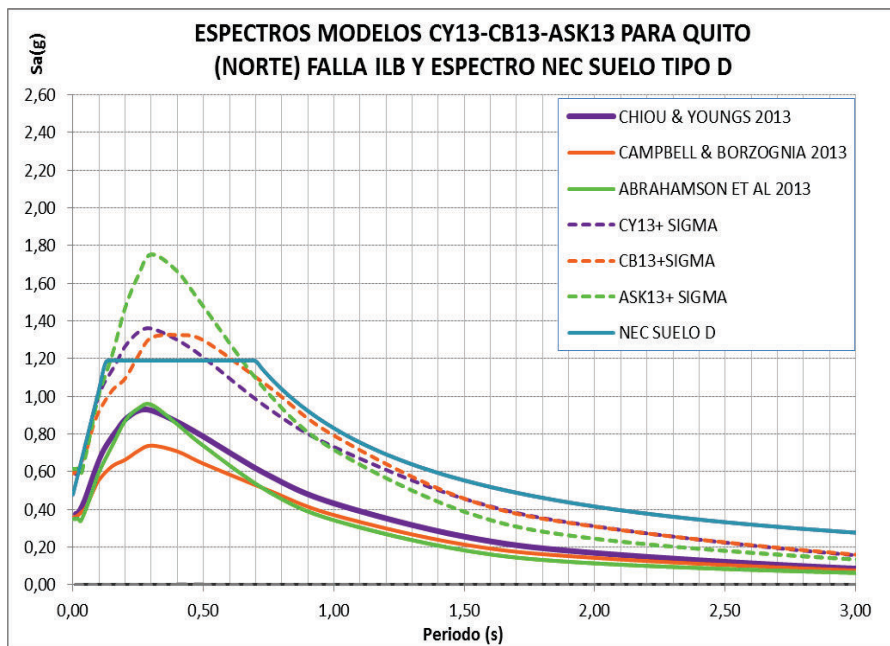
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.35 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 460 m/s



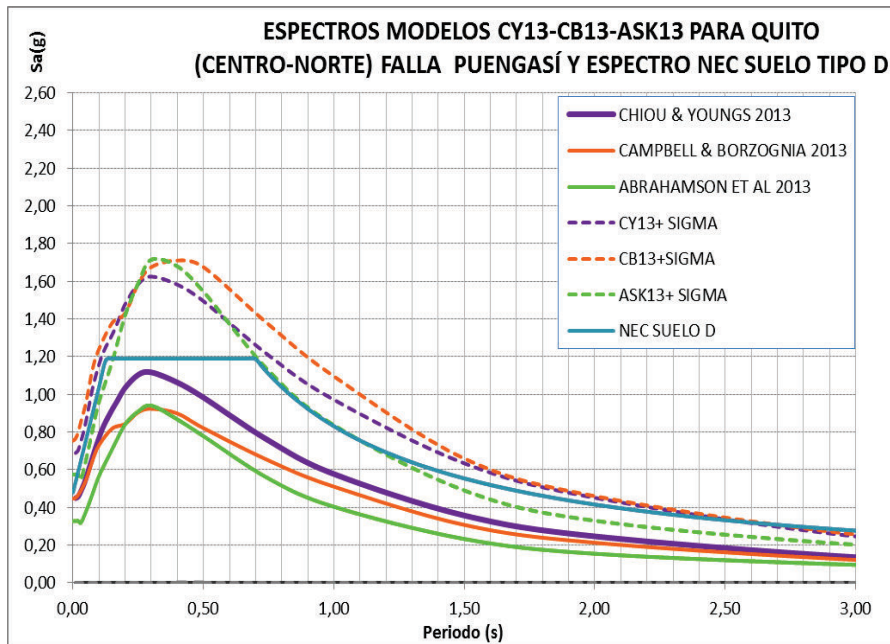
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.36 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 300 m/s.



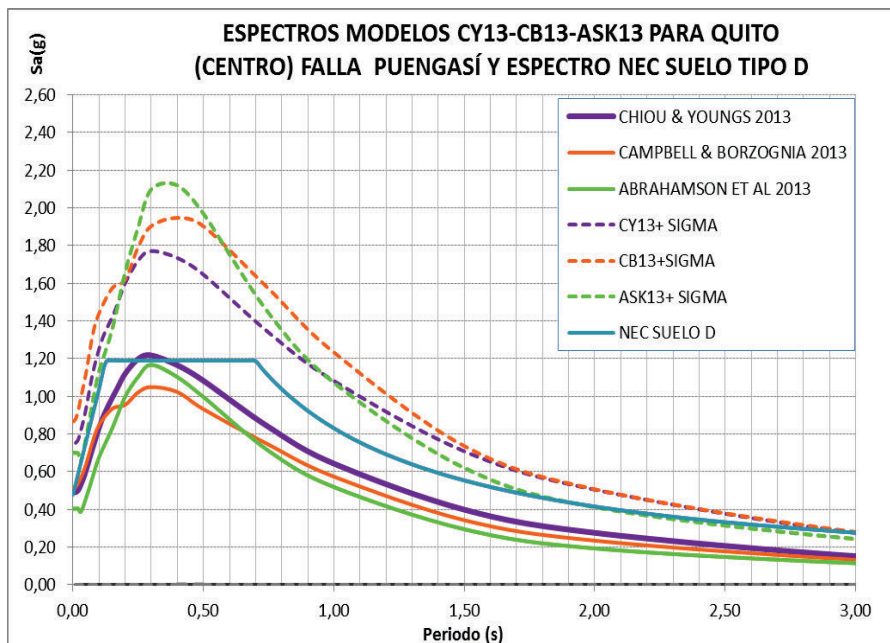
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.37 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s.



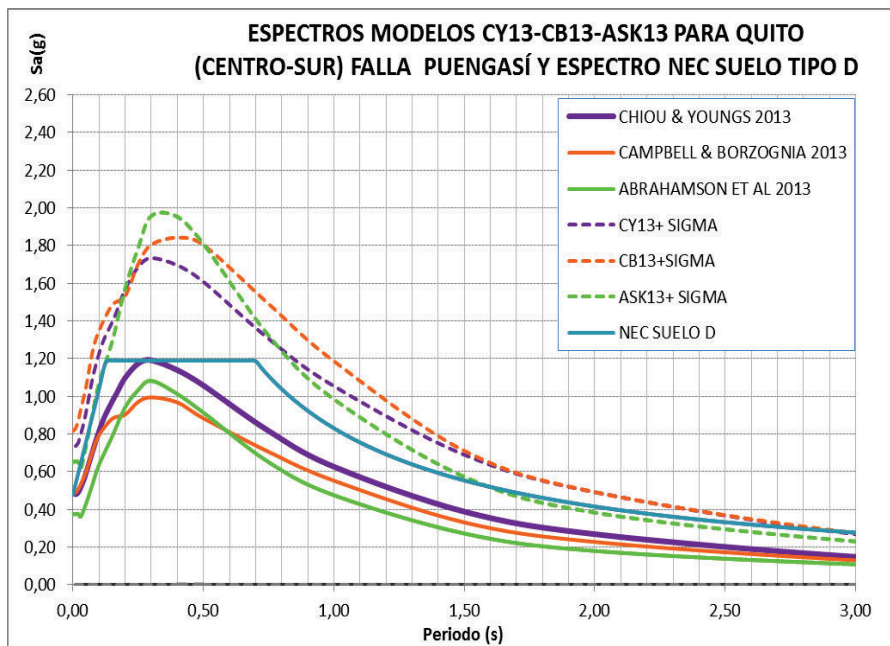
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.38 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s



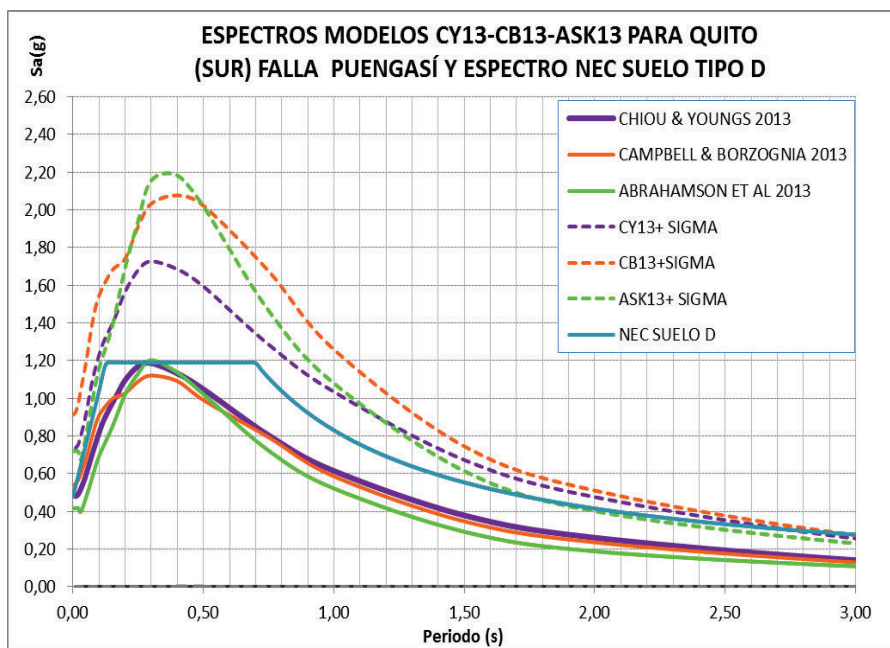
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.39 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s.



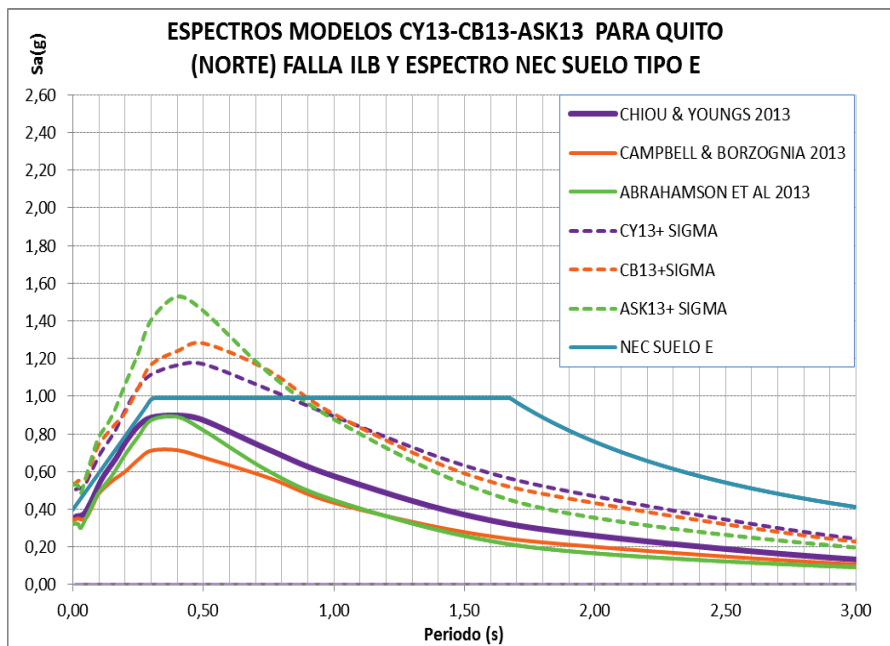
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.40 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 300 m/s



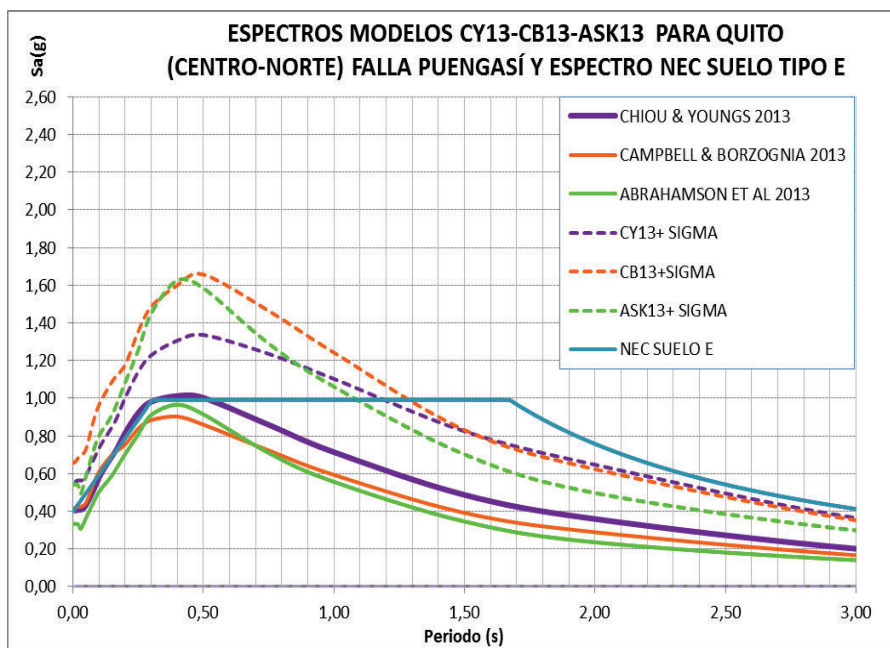
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.41 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector norte, falla ILB para V_{s30} de 200 m/s.



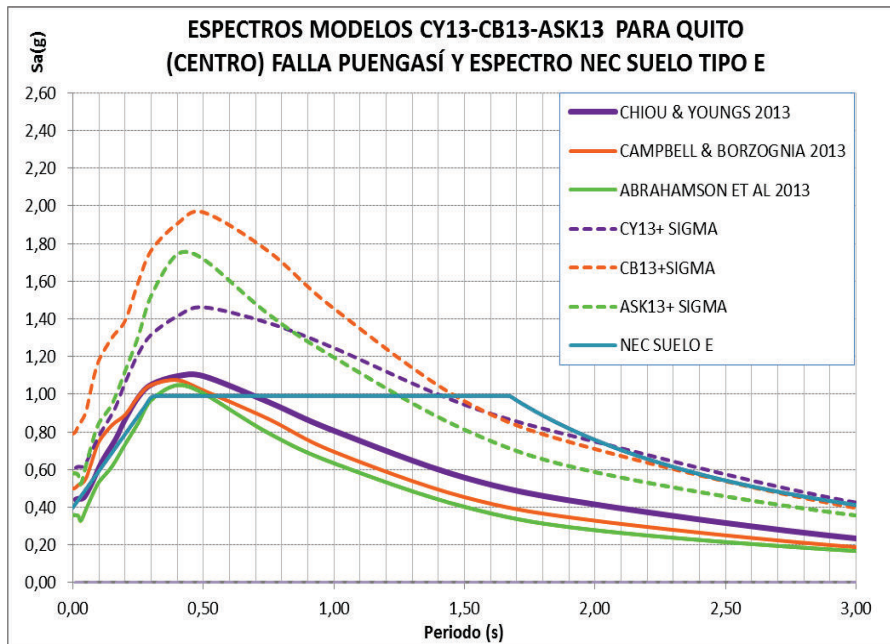
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.42 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro norte, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s.



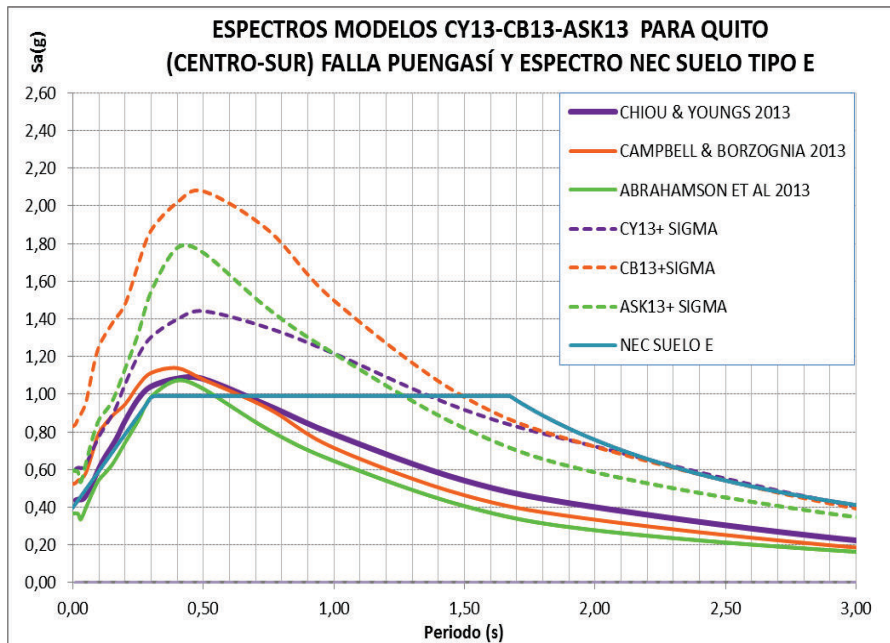
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.43 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s



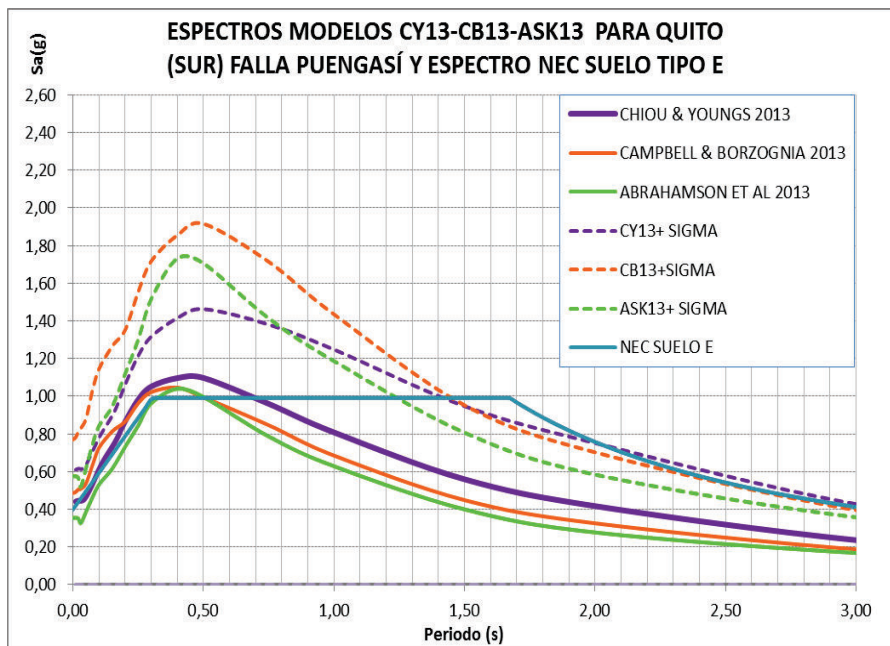
ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.44 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector centro-sur, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

FIGURA 7.45 Espectros modelos CY13, CB13, ASK13 y NEC. Sector sur, falla Puengasí para V_{s30} de 200 m/s



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Sobre las figuras anteriores se puede mencionar que los espectros calculados sin considerar la desviación estándar tienen valores similares a los espectros de la NEC-2015 en cuanto a la ordenada espectral máxima y al PGA, la forma de los espectros obtenidos es muy similar al espectro de la NEC en los espectros que se han obtenidos usando V_{s30} igual a 460m/s y 300 m/s, sin embargo esto no sucede cuando se observa el espectro NEC del suelo tipo E con el espectro obtenido usando un V_{s30} de 200 m/s, y esto se debe a que las ecuaciones de atenuación no son aplicables para velocidades menores a 180 m/s, otra acotación que se debe realizar es que los tres modelos de PEER presentan formas espectrales muy parecidas.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El evento sísmico del 12 de agosto de 2014 tuvo un PGA promedio de 30 gals si se observa el PGA obtenido en los espectros críticos de este estudio se puede observar que el PGA llega hasta 980 gals, es decir se podría tener en Quito un evento sísmico asociado a la tectónica cortical que reporte aceleraciones 30 veces más fuertes que las del sismo pasado generado en el segmento de falla de Catequilla. Además si se considera el hecho de que el periodo de recurrencia para el evento de gran magnitud considerado en modelo neotectónico obtenido por Alvarado y descrito en este estudio varía entre 200 y 400 años, que es un período menor al observado en el historial sísmico de la ciudad de Quito, sobre la base de lo anteriormente descrito se puede reflexionar que en cualquier instante puede presentarse un evento de gran magnitud en el Distrito Metropolitano de Quito, sin embargo ante la inminente presencia de un terremoto que puede ocurrir a corto o largo plazo, debe haber una concientización por parte de quienes se encuentran involucrados en el área de infraestructura, no solo calculistas estructurales y constructores sino también por parte de las autoridades sobre la importancia de cumplir y hacer cumplir las normas técnicas establecidas por los códigos para de esta manera disminuir la vulnerabilidad de la estructuras y así precautelar la vida de las personas, porque finalmente lo que mata a las personas en un sismo no es el evento propiamente en sí sino el colapso que pueden tener estructuras que no han sido correctamente diseñadas.

Según se mostró en este estudio existe grandes bases de datos a nivel mundial con miles de registros, estas bases de datos se amplían cada vez más lo que permite que investigadores puedan actualizar sus modelos. PEER por ejemplo incremento 6 veces la base datos que tenía en 2008 en un lapso de 4 años. Contar

con bases de datos con muchos registros que datan desde los años setenta ha permitido que en países como Estados Unidos se desarrolle hace más de 30 años modelos de atenuación. Sin embargo a nivel local y regional poco se ha hecho en este campo, en cuanto a la formulación de ecuaciones de atenuación propias para la región, esto debido a que la redes nacionales de sismógrafos no tienen muchos años de creación y por el hecho de que para crear ecuaciones de atenuación propias se debería contar con recursos para hacer este tipo de investigaciones, además de realizar un trabajo en conjunto con especialistas de otros países de la región, es por la falta de este tipo de información técnica propia que hasta la misma Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 se ve obligada adoptar ecuaciones extranjeras para realizar la evaluación del peligro .

En cuanto a la evaluación del peligro para la ciudad de Quito, se deben desarrollar muchos más trabajos de investigación, sin embargo hay que indicar que trabajos como los de Yépez, Valverde, Aguiar y Alvarado sirven como una buena referencia para futuras investigaciones. Además es muy importante para la ciudad de Quito el hecho de contar ya con una red de sismógrafos propia colocados en diferentes lugares de la ciudad.

Respecto a los modelos de atenuación de P.E.E.R y que han sido usados en el presente trabajo se puede apreciar que en cuanto a los resultados obtenidos los tres modelos dan espectros muy parecidos, pues tienen formas espectrales similares, valores de PGA y de aceleraciones muy cercanos entre ellos. Sin embargo en cuanto a la complejidad de la formulación el modelo de Abrahamson, Silva y Kamai es el que tiene mayor cantidad de parámetros que se deben conocer antes de realizar el modelo porque tiene una serie de consideraciones que los otros dos modelos no toman en cuenta, pero por los resultados obtenidos se puede concluir que los tres modelos se pueden aplicar individualmente para la determinación de espectros determinísticos en la ciudad de Quito.

Referente a los datos de entrada usados en la ecuaciones de atenuación, se puede afirmar que una vez que se cuenta con la información del modelo neotécnico, los factores asociados a las condiciones locales del sitio son hasta ahora la mayor

limitante para la creación de espectros esto porque como se mencionó en el capítulo 7, Quito no tiene un mapa de isovelocidades V_{s30} y tampoco se ha actualizado la microzonificación de suelos de acuerdo a la NEC-2015, esta falta de información obliga a asumir ciertos parámetros del suelo como se realizó en este estudio.

Se pudo apreciar en las gráficas de los espectros promedios que el espectro crítico para la ciudad de Quito se lo obtiene a partir de los sitios ubicados en el sector sur y centro-sur de la capital. Este espectro está asociado a un evento sísmico generado por liberación de energía en el segmento de falla Puengasí y será mayor en los sitios en los que se tiene un V_{s30} de 460 m/s, en estos sitios se podría tener aceleraciones espectrales que varían entre 1.2 y 2.2 g dependiendo el nivel de confianza que se quiera asumir.

Se aprecia valores de respuesta en aceleración muy altos en los espectros críticos del sur de Quito (Nivel de confianza de 84%); debido a la forma espectral de estos espectros se concluye que las estructuras que deberán soportar mayores fuerzas sísmicas en la ciudad de Quito son aquellas que se encuentran en el sur de la ciudad cuyos períodos varíen entre 0.1 y 0.6 segundos teniendo una mayor aceleración aquellas que se encuentren en suelos tipo C.

En el norte de Quito el espectro crítico está asociado al segmento de falla Ilumbisí-La Bota, en los sitios ubicados en el sector norte y centro norte de Quito usando un nivel de confianza del 84%, se podría esperar aceleraciones de hasta 1.8 (g), que pese a ser menores a las aceleraciones encontradas en el sur son valores altos si se los compara con los obtenidos con el espectro normativo.

Los espectros críticos obtenidos usando un nivel de confianza del 50% tienen valores de PGA y formas espectrales muy parecidos al espectro del NEC, salvo el caso del espectro NEC para perfil tipo E que se colocó junto a los espectros con V_{s30} igual a 200 m/s, la diferencia radica principalmente en que el perfil de suelo E es definido por la NEC para V_{s30} menores a 180 m/s y para estos valores las ecuaciones de atenuación usadas no son aplicables.

Es importante que Quito tenga un mapa de microzonificación de suelos actualizado de acuerdo a la nueva norma NEC y también un mapa de isoaceleraciones V_{s30} pues la información geotécnica es fundamental para este tipo de evaluaciones de peligro. Se recomienda que se realicen futuros trabajos enfocados exclusivamente en este tema, así como el que fue presentado años atrás por Valverde.

Por las formas espectrales obtenidas se debe prestar especial atención en cuanto a buscar disminuir el grado de vulnerabilidad de estructuras que se encuentren en el sur de Quito y que tengan periodos menores 0.6 segundos (Como por ejemplo estructuras de hormigón armado con menos de 5 pisos).

Las ecuaciones de atenuación se siguen actualizando, al término de la redacción de este estudio P.E.E.R estaba lanzando las ecuaciones de Abrahamson y Silva, Campbell y Borzognia, Chiou y Youngs con coeficientes para el año 2014; es decir este tipo de trabajos siempre están renovándose, por lo que también se recomienda actualizar este estudio usando los nuevos coeficientes.

8.2 BIBLIOGRAFÍA

1. Abrahamson N., Silva W., Kamai R. (2013), Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 143 p.
2. Abrahamson N.A., Silva W.J. (2008). "Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations", Earthquake Spectra 24: 67–97.
3. Alvarado A., Audin L., Nocquet M., Lagreulet S., Segovia M., Font Y., Lamarque G., Yepes H., Mothes P., Rolandone F., Jarrín P., and Quidelleur X., (2014), "Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity", Tectonics, AGU-PUBLICATIONS, 17 p., Article online.
4. Alvarado (2013), "La deformación continental en el Ecuador y su implicación en el Peligro Sísmico", Tercer Encuentro de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
5. Alvarado (2012), Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. These pour obtenir le grade de Docteur. Université de Grenoble.
6. Alvarado A., (1996), Evolución geológica cuaternaria y paleosismicidad de la cuenca de Quito, Ecuador. Tesis de grado. Facultad de Geología, Minas y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional, 380 p., Quito.
7. Asanza M. Comunicación personal.
8. Ancheta T., Darragh R., Stewart J., Seyhan E., Silva W., Chiou B., Wooddell K., Graves R., Kottke A., Boore D., Kishida T., Donahue J., PEER NGA-WEST-2 Database. Report PEER 2013/03. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

9. Hanks, T. C., y H. Kanamori, 1979, b values and w-g seismic source models: Implications for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion: Journal of Geophysical Research, v. 84, p. 2235-2242.
10. Beauval C., Yepes H., Bakun W., Egred J., Alvarado A., and Singaicho C., (2010), "Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1586-1996). Geophys. Journal International, 181, 1613-1633.
11. Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging fro 0.01 to 10 sec, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 75 p.
12. Chiou B., Youngs R., (2013), Uddate of the Chiou and Youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra, PEER Report 2013/07, 105 p., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA
13. Chiou B.S.-J., Youngs R.R. (2008). NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, PEER Report 2008/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA
14. Castillo D., (2014), Espectros de diseño para Quito considerando factores de cercanía asociados a fallas ciegas. Tesis de grado. Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE, 160 p., Sangolquí.
15. CEC-2000 (2000), Código Ecuatoriano de la Construcción, Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha, Quito.

16. Douglas J., (2010). "Ground-motion prediction equations 1964–2010", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 455 p.
17. Kaklamanos J, Baise L., Boore Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction Equations in Engineering Practice Earthquake Spectra, Volume 27, No. 4, pages 1219–1235, November 2011; VC 2011, Earthquake Engineering Research Institute
18. Kamai R., Abrahamson N., Silva W. (2013), Nonlinear horizontal site response for the NGA-West2 project. Report PEER 2013/12, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER.
19. NEC-15 (2015) Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI.
20. PLANMAN (2012), Estudio de Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de los Centros Educativos Municipales en el Distrito Metropolitano de Quito. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad. Distrito Metropolitano de Quito, Fase A 153 p., y Fase B, 120 p., Quito.
21. Sangurima K., (2013), Programa MIZOSIQ y la microzonificación sísmica de Quito, Tesis de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica del Ejército, 172 p., Quito.
22. Singaicho J. Comunicación personal.
23. Soulas J-P., Eguez A., Yepes H., Pérez H., (1991), "Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia", Boletín Geológico Ecuatoriano, 2 (1), 3-11, Quito.

24. Taípe L., (2013), "Análisis de las ecuaciones de predicción de movimiento de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el período 2000-2011 en estaciones de banda ancha y acelerógrafos". Tesis de grado. Facultad de Geología, Minas y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional, 148 p., Quito.
25. Valverde J., Fernández J., Jiménez E., Vaca T., Alarcón F., (2002), "Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la Ciudad de Quito", Escuela Politécnica Nacional. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 146 p. más Anexos, Quito.
26. Wells, D., y K. Coppersmith, 1994, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement": Bulletin of Seismological Society of America, v. 84, 4, p. 974-1002.
27. Yépez F, 2001, "Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito, y futuros proyectos de Quito y futuros proyectos de mitigación". Memorias de gestión de riesgos y prevención de desastres, 168 p., Quito.

ANEXOS

ANEXO 1

COEFICIENTES MODELO DE CHIOU Y YOUNGS 2013

**Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chiou y
Youngs 2013**

C2	C4	C4a	CRB	C8	C8a
1.06	-2.10	-0.50	50.00	0.2153	0.2695

T (s)	C1	C1a	C1b	C1c	C1d	Cn	CM	C3	C5	CHM	C6
0.01	-1.507	0.165	-0.373	-0.165	0.198	16.088	4.999	1.96	6.455	3.096	0.489
0.02	-1.479	0.165	-0.377	-0.165	0.218	15.712	4.999	1.96	6.455	3.096	0.489
0.03	-1.312	0.165	-0.443	-0.165	0.348	15.882	4.999	1.96	6.455	3.097	0.489
0.04	-1.116	0.165	-0.512	-0.165	0.473	16.456	4.999	1.96	6.455	3.099	0.489
0.05	-0.946	0.165	-0.554	-0.165	0.543	17.645	4.999	1.96	6.455	3.101	0.488
0.08	-0.675	0.165	-0.593	-0.165	0.562	20.177	5.003	1.96	6.455	3.109	0.487
0.10	-0.574	0.165	-0.576	-0.165	0.463	19.999	5.017	1.96	6.831	3.238	0.485
0.12	-0.544	0.165	-0.558	-0.165	0.400	18.711	5.032	1.98	7.133	3.341	0.484
0.15	-0.554	0.165	-0.535	-0.165	0.334	16.625	5.055	2.04	7.362	3.430	0.481
0.17	-0.593	0.165	-0.519	-0.165	0.296	15.371	5.070	2.08	7.437	3.469	0.479
0.20	-0.687	0.165	-0.494	-0.165	0.244	13.701	5.094	2.15	7.497	3.515	0.476
0.25	-0.872	0.165	-0.452	-0.165	0.162	11.267	5.132	2.26	7.542	3.575	0.471
0.30	-1.056	0.165	-0.412	-0.165	0.088	9.191	5.167	2.34	7.560	3.623	0.467
0.40	-1.380	0.165	-0.353	-0.165	-0.029	6.546	5.232	2.47	7.574	3.695	0.461
0.50	-1.647	0.165	-0.310	-0.165	-0.116	5.231	5.289	2.56	7.578	3.740	0.457
0.75	-2.142	0.165	-0.222	-0.165	-0.271	3.790	5.411	2.68	7.581	3.794	0.453
1.00	-2.527	0.165	-0.169	-0.165	-0.353	3.302	5.511	2.75	7.581	3.814	0.452
1.50	-3.066	0.165	-0.138	-0.165	-0.345	2.850	5.671	2.82	7.582	3.828	0.451
2.00	-3.411	0.165	-0.122	-0.165	-0.261	2.542	5.798	2.85	7.582	3.833	0.450
3.00	-3.833	0.117	-0.105	-0.117	-0.091	2.149	5.998	2.89	7.582	3.836	0.450
4.00	-4.121	0.073	-0.101	-0.073	-0.031	1.896	6.155	2.91	7.582	3.837	0.450
5.00	-4.344	0.048	-0.100	-0.048	-0.013	1.723	6.286	2.92	7.582	3.838	0.450
7.50	-4.749	0.022	-0.099	-0.022	-0.001	1.574	6.543	2.93	7.582	3.838	0.450
10.00	-5.037	0.012	-0.100	-0.012	0.000	1.527	6.742	2.94	7.582	3.838	0.450

**Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chiou y
Youngs 2013**

T (s)	C7	C7B	C8B	C9	C9a	C9b	C11	C11b	C_γ1	C_γ2	C_γ3
0.01	0.035	0.046	0.483	0.923	0.12	6.861	0.000	-0.454	-0.007	-0.007	4.129
0.02	0.035	0.047	1.214	0.930	0.12	6.870	0.000	-0.454	-0.007	-0.007	4.072
0.03	0.035	0.053	1.642	0.940	0.12	6.911	0.000	-0.454	-0.008	-0.007	4.001
0.04	0.035	0.060	1.946	0.966	0.12	7.027	0.000	-0.454	-0.008	-0.007	3.965
0.05	0.035	0.064	2.181	0.979	0.12	7.096	0.000	-0.454	-0.008	-0.007	3.983
0.08	0.035	0.063	2.609	1.026	0.12	7.330	0.000	-0.454	-0.009	-0.007	4.195
0.10	0.035	0.053	2.912	1.018	0.11	7.259	0.000	-0.454	-0.010	-0.005	4.484
0.12	0.035	0.045	3.105	1.001	0.11	7.237	0.000	-0.454	-0.010	-0.005	4.673
0.15	0.035	0.035	3.340	0.980	0.11	7.211	0.000	-0.454	-0.010	-0.004	4.827
0.17	0.035	0.028	3.472	0.965	0.12	7.249	0.000	-0.454	-0.010	-0.003	4.867
0.20	0.035	0.020	3.643	0.946	0.12	7.299	0.000	-0.444	-0.010	-0.003	4.880
0.25	0.035	0.009	3.879	0.920	0.12	7.369	0.000	-0.354	-0.009	-0.002	4.837
0.30	0.035	0.000	4.071	0.883	0.12	6.879	0.000	-0.269	-0.008	-0.002	4.758
0.40	0.035	-0.016	4.375	0.830	0.11	6.533	0.000	-0.179	-0.007	-0.001	4.552
0.50	0.035	-0.028	4.610	0.788	0.11	6.526	0.000	-0.143	-0.006	-0.001	4.405
0.75	0.035	-0.048	5.038	0.675	0.10	6.500	0.000	-0.114	-0.005	-0.001	4.208
1.00	0.035	-0.056	5.341	0.620	0.10	6.500	0.000	-0.106	-0.004	-0.001	4.013
1.50	0.035	-0.063	5.769	0.510	0.10	6.500	0.000	-0.102	-0.003	-0.002	3.673
2.00	0.035	-0.067	6.072	0.392	0.10	6.500	0.000	-0.101	-0.002	-0.002	3.507
3.00	0.016	-0.052	6.500	0.124	0.10	6.500	0.000	-0.100	-0.001	-0.003	3.475
4.00	0.016	-0.052	6.500	0.124	0.10	6.500	0.000	-0.100	-0.001	-0.003	3.475
5.00	0.003	-0.042	7.039	0.000	0.10	6.500	0.000	-0.100	-0.001	-0.004	3.548
7.50	0.001	-0.035	7.467	0.000	0.10	6.500	0.000	-0.100	-0.001	-0.004	3.595
10.00	0.000	-0.025	7.770	0.000	0.10	6.500	0.000	-0.100	-0.001	-0.004	3.625

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chiou y Youngs 2013

T (s)	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6
0.01	-0.521	-0.14	-0.007	0.102	0.000	300
0.02	-0.506	-0.14	-0.007	0.108	0.000	300
0.03	-0.437	-0.14	-0.007	0.120	0.000	300
0.04	-0.375	-0.16	-0.007	0.134	0.000	300
0.05	-0.347	-0.19	-0.006	0.149	0.000	300
0.08	-0.375	-0.25	-0.006	0.191	0.000	300
0.10	-0.444	-0.29	-0.006	0.231	0.000	300
0.12	-0.490	-0.31	-0.006	0.253	0.000	300
0.15	-0.548	-0.31	-0.006	0.266	0.000	300
0.17	-0.592	-0.31	-0.006	0.265	0.000	300
0.20	-0.669	-0.29	-0.006	0.255	0.000	300
0.25	-0.777	-0.27	-0.006	0.232	0.000	300
0.30	-0.850	-0.24	-0.007	0.207	0.001	300
0.40	-0.943	-0.20	-0.007	0.165	0.004	300
0.50	-1.004	-0.16	-0.007	0.134	0.010	300
0.75	-1.060	-0.10	-0.008	0.085	0.034	300
1.00	-1.094	-0.07	-0.008	0.059	0.067	300
1.50	-1.114	-0.04	-0.008	0.032	0.143	300
2.00	-1.115	-0.03	-0.005	0.020	0.203	300
3.00	-1.108	-0.01	-0.002	0.010	0.277	300
4.00	-1.060	0.00	-0.002	0.005	0.309	300
5.00	-0.987	0.00	-0.001	0.003	0.321	300
7.50	-0.827	0.00	-0.001	0.001	0.329	300
10.00	0.705	0.00	-0.001	0.001	0.330	300

Coeficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Chiou y Youngs 2013

T (s)	τ_1	τ_2	σ_1	σ_2	σ_3
0.01	0.401	0.247	0.553	0.41	0.800
0.02	0.408	0.242	0.557	0.41	0.800
0.03	0.432	0.232	0.568	0.41	0.800
0.04	0.446	0.246	0.582	0.42	0.800
0.05	0.467	0.275	0.593	0.43	0.800
0.08	0.486	0.419	0.598	0.45	0.800
0.10	0.468	0.427	0.587	0.48	0.800
0.12	0.453	0.384	0.589	0.48	0.800
0.15	0.417	0.297	0.589	0.48	0.800
0.17	0.403	0.256	0.588	0.48	0.800
0.20	0.386	0.231	0.580	0.48	0.800
0.25	0.369	0.207	0.564	0.48	0.800
0.30	0.368	0.198	0.553	0.48	0.800
0.40	0.376	0.170	0.534	0.48	0.799
0.50	0.375	0.171	0.523	0.48	0.797
0.75	0.388	0.178	0.487	0.51	0.779
1.00	0.434	0.233	0.470	0.52	0.750
1.50	0.496	0.218	0.445	0.53	0.714
2.00	0.511	0.231	0.422	0.53	0.704
3.00	0.477	0.275	0.414	0.49	0.701
4.00	0.516	0.330	0.398	0.48	0.700
5.00	0.508	0.337	0.386	0.46	0.700
7.50	0.434	0.329	0.364	0.45	0.700
10.00	0.332	0.404	0.350	0.40	0.700

ANEXO 2

COEFICIENTES MODELO DE CAMPBELL Y BORZOGNIA 2013

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Campbell y Borzognia 2013

T (s)	C₀	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆	C₇	C₈	C₉	C₁₀	C₁₁
0.01	-4.292	0.977	0.533	-1.485	-0.499	-2.773	0.248	6.753	0	-0.214	0.720	1.094
0.02	-4.271	0.976	0.549	-1.488	-0.501	-2.772	0.247	6.502	0	-0.208	0.730	1.149
0.03	-3.963	0.931	0.628	-1.494	-0.517	-2.782	0.246	6.291	0	-0.213	0.759	1.290
0.05	-3.475	0.887	0.674	-1.388	-0.615	-2.791	0.240	6.317	0	-0.244	0.826	1.449
0.08	-3.293	0.902	0.726	-1.469	-0.596	-2.745	0.227	6.861	0	-0.266	0.815	1.535
0.10	-3.666	0.993	0.698	-1.572	-0.536	-2.633	0.210	7.294	0	-0.229	0.831	1.615
0.15	-4.866	1.267	0.510	-1.669	-0.490	-2.458	0.183	8.031	0	-0.211	0.749	1.877
0.20	-5.411	1.366	0.447	-1.750	-0.451	-2.421	0.182	8.385	0	-0.163	0.764	2.069
0.25	-5.962	1.458	0.274	-1.711	-0.404	-2.392	0.189	7.534	0	-0.150	0.716	2.205
0.30	-6.403	1.528	0.193	-1.770	-0.321	-2.376	0.195	6.990	0	-0.131	0.737	2.306
0.40	-7.566	1.739	-0.020	-1.594	-0.426	-2.303	0.185	7.012	0	-0.159	0.738	2.398
0.50	-8.379	1.872	-0.121	-1.577	-0.440	-2.296	0.186	6.902	0	-0.153	0.718	2.355
0.75	-9.841	2.021	-0.042	-1.757	-0.443	-2.232	0.186	5.522	0	-0.090	0.795	1.995
1.00	-11.011	2.180	-0.069	-1.707	-0.527	-2.158	0.169	5.650	0	-0.105	0.556	1.447
1.50	-12.469	2.270	0.047	-1.621	-0.630	-2.063	0.158	5.795	0	-0.058	0.480	0.330
2.00	-12.969	2.271	0.149	-1.512	-0.768	-2.104	0.158	6.632	0	-0.028	0.401	-0.514
3.00	-13.306	2.150	0.368	-1.315	-0.890	-2.051	0.148	6.759	0	0.000	0.206	-0.848
4.00	-14.020	2.132	0.726	-1.506	-0.885	-1.986	0.135	7.978	0	0.000	0.105	-0.793
5.00	-14.558	2.116	1.027	-1.721	-0.878	-2.021	0.140	8.538	0	0.000	0.000	-0.748
7.50	-15.509	2.223	0.169	-0.756	-1.077	-2.179	0.178	8.468	0	0.000	0.000	-0.664
10.00	-15.975	2.132	0.367	-0.800	-1.282	-2.244	0.194	6.564	0	0.000	0.000	-0.576
PGA	-4.346	0.984	0.537	-1.499	-0.496	-2.773	0.248	6.768	0	-0.212	0.720	1.090

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Campbell y Borzognia 2013.

T (s)	C₁₂	C₁₃	C₁₄	C₁₅	C₁₆	C₁₇	C₁₈	C₁₉	k₁	k₂	k₃
0.01	2.191	1.416	-0.007	-0.207	0.390	0.098	0.033	0.008	865	-1.186	1.839
0.02	2.189	1.453	-0.017	-0.199	0.387	0.101	0.033	0.008	865	-1.219	1.840
0.03	2.164	1.476	-0.042	-0.202	0.378	0.110	0.033	0.008	908	-1.273	1.841
0.05	2.138	1.549	-0.066	-0.339	0.295	0.123	0.027	0.008	1054	-1.346	1.843
0.08	2.446	1.772	-0.079	-0.404	0.322	0.117	0.029	0.008	1086	-1.471	1.845
0.10	2.969	1.916	-0.029	-0.416	0.384	0.100	0.033	0.007	1032	-1.624	1.847
0.15	3.544	2.161	0.064	-0.407	0.417	0.076	0.039	0.007	878	-1.931	1.852
0.20	3.707	2.465	0.097	-0.311	0.404	0.057	0.044	0.007	748	-2.188	1.856
0.25	3.343	2.766	0.144	-0.172	0.466	0.044	0.046	0.006	654	-2.381	1.861
0.30	3.334	3.011	0.160	-0.084	0.528	0.032	0.051	0.005	587	-2.518	1.865
0.40	3.544	3.203	0.141	0.085	0.540	0.021	0.043	0.004	503	-2.657	1.874
0.50	3.016	3.333	0.147	0.233	0.638	0.009	0.041	0.004	457	-2.669	1.883
0.75	2.616	3.054	0.176	0.411	0.776	-0.008	0.042	0.004	410	-2.401	1.906
1.00	2.470	2.562	0.259	0.479	0.771	-0.013	0.043	0.004	400	-1.955	1.929
1.50	2.108	1.453	0.288	0.566	0.748	-0.019	0.038	0.004	400	-1.025	1.974
2.00	1.327	0.657	0.311	0.562	0.763	-0.026	0.025	0.004	400	-0.299	2.019
3.00	0.601	0.367	0.348	0.534	0.686	-0.031	0.024	0.003	400	0.000	2.110
4.00	0.568	0.306	0.375	0.522	0.691	-0.041	0.010	0.006	400	0.000	2.200
5.00	0.356	0.268	0.338	0.477	0.670	-0.028	0.003	0.008	400	0.000	2.291
7.50	0.075	0.374	0.375	0.321	0.757	-0.021	0.005	0.003	400	0.000	2.517
10.00	-0.027	0.297	0.351	0.174	0.621	0.001	0.010	0.005	400	0.000	2.744
PGA	2.186	1.420	-0.006	-0.202	0.393	0.098	0.033	0.008	865	-1.186	1.839

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Campbell y Borzognia 2013.

T (s)	a₂	h₁	h₂	h₃	h₄	h₅	h₆
0.01	0.168	0.242	1.471	-0.714	1.000	-0.336	-0.270
0.02	0.166	0.244	1.467	-0.711	1.000	-0.339	-0.263
0.03	0.167	0.246	1.467	-0.713	1.000	-0.338	-0.259
0.05	0.173	0.251	1.449	-0.701	1.000	-0.338	-0.263
0.08	0.198	0.260	1.435	-0.695	1.000	-0.347	-0.219
0.10	0.174	0.259	1.449	-0.708	1.000	-0.391	-0.201
0.15	0.198	0.254	1.461	-0.715	1.000	-0.449	-0.099
0.20	0.204	0.237	1.484	-0.721	1.000	-0.393	-0.198
0.25	0.185	0.206	1.581	-0.787	1.000	-0.339	-0.210
0.30	0.164	0.210	1.586	-0.795	1.000	-0.447	-0.121
0.40	0.160	0.226	1.544	-0.770	1.000	-0.525	-0.086
0.50	0.184	0.217	1.554	-0.770	1.000	-0.407	-0.281
0.75	0.216	0.154	1.626	-0.780	1.000	-0.371	-0.285
1.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
1.50	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
2.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
3.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
4.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
5.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
7.50	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
10.00	0.596	0.117	1.616	-0.733	1.000	-0.128	-0.756
PGA	0.167	0.241	1.474	-0.715	1.000	-0.337	-0.270

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Campbell y Borzognia 2013.

T (s)	C ₂₀	ΔC ₂₀		
		CA	JP	CH
0.01	-0.006	0.000	-0.004	0.004
0.02	-0.006	0.000	-0.004	0.004
0.03	-0.006	0.000	-0.003	0.004
0.05	-0.006	0.000	-0.004	0.004
0.08	-0.007	0.000	-0.004	0.004
0.10	-0.007	0.000	-0.003	0.004
0.15	-0.007	0.000	-0.003	0.004
0.20	-0.006	0.000	-0.003	0.004
0.25	-0.006	0.000	-0.003	0.004
0.30	-0.005	0.000	-0.004	0.003
0.40	-0.004	0.000	-0.003	0.003
0.50	-0.003	0.000	-0.003	0.003
0.75	-0.002	0.000	-0.003	0.002
1.00	-0.001	0.000	-0.003	0.001
1.50	0.000	0.000	-0.002	0.000
2.00	0.000	0.000	-0.001	0.000
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000
4.00	0.000	0.000	0.000	0.000
5.00	0.000	0.000	0.000	0.000
7.50	0.000	0.000	0.000	0.000
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000
PGA	-0.006	0.000	-0.004	0.004

**Coefficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Campbell y Borzognia
2013.**

T (s)	τ_1	τ_2	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_{LNAF}	ϕ_c	M<4.5		M >5.5		$\sigma_{\ln PGA, \ln Y}$
							s	sarb	s	sarb	
0.01	0.404	0.325	0.734	0.492	0.300	0.166	0.838	0.854	0.590	0.613	1.000
0.02	0.417	0.326	0.738	0.496	0.300	0.166	0.848	0.864	0.594	0.617	0.999
0.03	0.446	0.344	0.747	0.503	0.300	0.165	0.870	0.886	0.609	0.631	0.989
0.05	0.508	0.377	0.777	0.520	0.300	0.162	0.928	0.942	0.642	0.662	0.963
0.08	0.504	0.418	0.782	0.535	0.300	0.158	0.930	0.943	0.679	0.697	0.922
0.10	0.445	0.426	0.769	0.543	0.300	0.170	0.888	0.904	0.690	0.711	0.898
0.15	0.382	0.387	0.769	0.543	0.300	0.180	0.859	0.878	0.667	0.691	0.890
0.20	0.339	0.338	0.761	0.552	0.300	0.186	0.833	0.854	0.647	0.673	0.871
0.25	0.340	0.316	0.744	0.545	0.300	0.191	0.818	0.840	0.630	0.658	0.852
0.30	0.340	0.300	0.727	0.568	0.300	0.198	0.803	0.827	0.642	0.672	0.831
0.40	0.356	0.264	0.690	0.593	0.300	0.206	0.776	0.803	0.649	0.681	0.785
0.50	0.379	0.263	0.663	0.611	0.300	0.208	0.764	0.792	0.665	0.697	0.735
0.75	0.430	0.326	0.606	0.633	0.300	0.221	0.743	0.775	0.712	0.746	0.628
1.00	0.470	0.353	0.579	0.628	0.300	0.225	0.746	0.779	0.720	0.754	0.534
1.50	0.497	0.399	0.541	0.603	0.300	0.222	0.735	0.768	0.723	0.756	0.411
2.00	0.499	0.400	0.529	0.588	0.300	0.226	0.727	0.761	0.711	0.746	0.331
3.00	0.500	0.417	0.527	0.578	0.300	0.229	0.726	0.761	0.713	0.749	0.289
4.00	0.543	0.393	0.521	0.559	0.300	0.237	0.753	0.789	0.683	0.723	0.261
5.00	0.534	0.421	0.502	0.551	0.300	0.237	0.733	0.770	0.693	0.732	0.200
7.50	0.523	0.438	0.457	0.546	0.300	0.271	0.695	0.746	0.700	0.751	0.174
10.00	0.466	0.438	0.441	0.543	0.300	0.290	0.642	0.704	0.698	0.756	0.174
PGA	0.409	0.322	0.734	0.492	0.300	0.166	0.840	0.856	0.588	0.611	1.000

ANEXO 3

COEFICIENTES MODELO DE ABRAHAMSON Y SILVA 2013

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Abrahamson y Silva 2013.

M ₂	a ₄	a ₅	a ₇	N	C
5.0	-0.10	-0.49	0.00	1.5	2.4

T (s)	VLIN	b	c ₄	M ₁	a ₁	a ₂	a ₃	a ₆	a ₈
PGA	660	-1.4700	6.0000	6.7500	0.4640	-0.7900	0.2810	2.2800	0.0000
0.01	660	-1.4700	6.0000	6.7500	0.4640	-0.7900	0.2810	2.2800	0.0000
0.02	680	-1.4600	6.0000	6.7500	0.4730	-0.7900	0.2810	2.2800	0.0000
0.03	770	-1.3900	6.0000	6.7500	0.4570	-0.7900	0.2810	2.2500	0.0000
0.05	800	-1.2200	6.0000	6.7500	0.6520	-0.7900	0.2810	2.1800	0.0000
0.08	800	-1.1500	6.0000	6.7500	0.9500	-0.7900	0.2780	2.1300	0.0000
0.10	800	-1.2300	5.9000	6.7500	1.1600	-0.7900	0.2700	2.1400	0.0000
0.15	740	-1.5900	5.8000	6.7500	1.4870	-0.7900	0.2580	2.1900	-0.0290
0.20	590	-2.0100	5.7000	6.7500	1.7120	-0.7900	0.2500	2.2500	-0.0500
0.25	495	-2.4100	5.6000	6.7500	1.7960	-0.7900	0.2420	2.3000	-0.0660
0.30	430	-2.7600	5.5000	6.7500	1.8490	-0.7900	0.2390	2.3500	-0.0790
0.40	360	-3.2800	5.2000	6.7500	1.8250	-0.7900	0.2310	2.4500	-0.0990
0.50	340	-3.6000	4.8000	6.7500	1.7680	-0.7900	0.2300	2.5500	-0.1150
0.75	330	-3.8000	4.4000	6.7500	1.5430	-0.7900	0.2300	2.6500	-0.1440
1.00	330	-3.5000	4.0000	6.7500	1.2920	-0.7900	0.2300	2.7000	-0.1650
1.50	330	-2.4000	3.7500	6.7500	0.8550	-0.7900	0.2300	2.7500	-0.1940
2.00	330	-1.0000	3.5000	6.7500	0.5210	-0.7900	0.2300	2.7500	-0.2140
3.00	330	0.0000	3.2500	6.8200	0.1600	-0.7900	0.2300	2.7500	-0.2430
4.00	330	0.0000	3.0000	6.9200	-0.0700	-0.7900	0.2300	2.7500	-0.2640
5.00	330	0.0000	3.0000	7.0000	-0.4100	-0.7560	0.2300	2.7500	-0.2700
6.00	330	0.0000	3.0000	7.0600	-0.8380	-0.7000	0.2300	2.7500	-0.2700
7.50	330	0.0000	3.0000	7.1500	-1.4330	-0.6200	0.2300	2.7500	-0.2700
10.00	330	0.0000	3.0000	7.2500	-2.3680	-0.5150	0.2300	2.7500	-0.2700

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Abrahamson y Silva 2013.

T (s)	a₁₀	a₁₁	a₁₂	a₁₃	a₁₄	a₁₅	a₁₇
PGA	1.7350	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0066
0.01	1.7350	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0066
0.02	1.7180	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0066
0.03	1.6150	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0066
0.05	1.3580	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0075
0.08	1.2580	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0092
0.10	1.3100	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0101
0.15	1.6600	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0097
0.20	2.2200	0	-0.1000	0.6000	-0.3000	1.1000	-0.0084
0.25	2.7700	0	-0.1000	0.6000	-0.2400	1.1000	-0.0074
0.30	3.2500	0	-0.1000	0.6000	-0.1900	1.0300	-0.0064
0.40	3.9900	0	-0.1000	0.5800	-0.1100	0.9200	-0.0043
0.50	4.4500	0	-0.1000	0.5600	-0.0400	0.8400	-0.0032
0.75	4.7500	0	-0.1000	0.5300	0.0700	0.6800	-0.0025
1.00	4.3000	0	-0.1000	0.5000	0.1500	0.5700	-0.0022
1.50	2.6500	0	-0.1000	0.4200	0.2700	0.4200	-0.0016
2.00	0.5500	0	-0.1000	0.3500	0.3500	0.3100	-0.0013
3.00	-0.9500	0	-0.1000	0.2000	0.4600	0.1600	-0.0010
4.00	-0.9500	0	-0.1000	0.0000	0.5400	0.0500	-0.0010
5.00	-0.9300	0	-0.1000	0.0000	0.6100	-0.0400	-0.0010
6.00	-0.9100	0	-0.1000	0.0000	0.6500	-0.1100	-0.0010
7.50	-0.8750	0	-0.1000	0.0000	0.7200	-0.1900	-0.0010
10.00	-0.8000	0	-0.1000	0.0000	0.8000	-0.3000	-0.0010

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Abrahamson y Silva 2013.

T (s)	a43	a44	a45	a46
PGA	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.01	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.02	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.03	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.05	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.08	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.10	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.15	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0500
0.20	0.1000	0.0500	0.0000	-0.0300
0.25	0.1000	0.0500	0.0000	0.0000
0.30	0.1000	0.0500	0.0300	0.0300
0.40	0.1000	0.0700	0.0600	0.0600
0.50	0.1000	0.1000	0.1000	0.0900
0.75	0.1400	0.1400	0.1400	0.1300
1.00	0.1700	0.1700	0.1700	0.1400
1.50	0.2200	0.2100	0.2000	0.1600
2.00	0.2600	0.2500	0.2200	0.1600
3.00	0.3400	0.3000	0.2300	0.1600
4.00	0.4100	0.3200	0.2300	0.1400
5.00	0.5100	0.3200	0.2200	0.1300
6.00	0.5500	0.3200	0.2000	0.1000
7.50	0.5500	0.2900	0.1700	0.0800
10.00	0.4200	0.2200	0.1400	0.0800

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Abrahamson y Silva 2013.

T (s)	a25	a28	a29	a31
PGA	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
0.01	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
0.02	-0.0015	0.0024	-0.0033	-0.1479
0.03	-0.0016	0.0023	-0.0034	-0.1447
0.05	-0.0020	0.0027	-0.0033	-0.1326
0.08	-0.0027	0.0032	-0.0029	-0.1353
0.10	-0.0033	0.0036	-0.0025	-0.1128
0.15	-0.0035	0.0033	-0.0025	0.0383
0.20	-0.0033	0.0027	-0.0031	0.0775
0.25	-0.0029	0.0024	-0.0036	0.0741
0.30	-0.0027	0.0020	-0.0039	0.2548
0.40	-0.0023	0.0010	-0.0048	0.2136
0.50	-0.0020	0.0008	-0.0050	0.1542
0.75	-0.0010	0.0007	-0.0041	0.0787
1.00	-0.0005	0.0007	-0.0032	0.0476
1.50	-0.0004	0.0006	-0.0020	-0.0163
2.00	-0.0002	0.0003	-0.0017	-0.1203
3.00	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.2719
4.00	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.2958
5.00	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.2718
6.00	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.2517
7.50	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.1337
10.00	0.0000	0.0000	-0.0020	-0.0216

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Abrahamson y Silva 2013.

T (s)	a₃₆	a₃₇	a₃₈	a₄₀	a₄₁	a₄₂
PGA	0.2650	0.3370	0.1880	0.0880	-0.1960	0.0440
0.01	0.2650	0.3370	0.1880	0.0880	-0.1960	0.0440
0.02	0.2550	0.3280	0.1840	0.0880	-0.1940	0.0610
0.03	0.2490	0.3200	0.1800	0.0930	-0.1750	0.1620
0.05	0.2020	0.2890	0.1670	0.1330	-0.0900	0.4510
0.08	0.1260	0.2750	0.1730	0.1860	0.0900	0.5060
0.10	0.0220	0.2560	0.1890	0.1600	0.0060	0.3350
0.15	-0.1360	0.1620	0.1080	0.0680	-0.1560	-0.0840
0.20	-0.0780	0.2240	0.1150	0.0480	-0.2740	-0.1780
0.25	0.0370	0.2480	0.1220	0.0550	-0.2480	-0.1870
0.30	-0.0910	0.2030	0.0960	0.0730	-0.2030	-0.1590
0.40	0.1290	0.2320	0.1230	0.1430	-0.1540	-0.0230
0.50	0.3100	0.2520	0.1340	0.1600	-0.1590	-0.0290
0.75	0.5050	0.2080	0.1290	0.1580	-0.1410	0.0610
1.00	0.3580	0.2080	0.1520	0.1450	-0.1440	0.0620
1.50	0.1310	0.1080	0.1180	0.1310	-0.1260	0.0370
2.00	0.1230	0.0680	0.1190	0.0830	-0.0750	-0.1430
3.00	0.1090	-0.0230	0.0930	0.0700	-0.0210	-0.0280
4.00	0.1350	0.0280	0.0840	0.1010	0.0720	-0.0970
5.00	0.1890	0.0310	0.0580	0.0950	0.2050	0.0150
6.00	0.2150	0.0240	0.0650	0.1330	0.2850	0.1040
7.50	0.1660	-0.0610	0.0090	0.1510	0.3290	0.2990
10.00	0.0920	-0.1590	-0.0500	0.1240	0.3010	0.2430

Coefficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Abrahamson y Silva 2013.

T (s)	Vs30 Estimado		Vs30 Medido		s3	s4	Japan	
	s1	s2	s1	s2			s5	s6
PGA	0.7540	0.5200	0.741	0.501	0.4700	0.3600	0.540	0.630
0.01	0.7540	0.5200	0.741	0.501	0.4700	0.3600	0.540	0.630
0.02	0.7600	0.5200	0.747	0.501	0.4700	0.3600	0.540	0.630
0.03	0.7810	0.5200	0.769	0.501	0.4700	0.3600	0.550	0.630
0.05	0.8100	0.5300	0.798	0.512	0.4700	0.3600	0.560	0.650
0.08	0.8100	0.5400	0.798	0.522	0.4700	0.3600	0.570	0.690
0.10	0.8100	0.5500	0.795	0.527	0.4700	0.3600	0.570	0.700
0.15	0.8010	0.5600	0.773	0.519	0.4700	0.3600	0.580	0.700
0.20	0.7890	0.5650	0.753	0.514	0.4700	0.3600	0.590	0.700
0.25	0.7700	0.5700	0.729	0.513	0.4700	0.3600	0.610	0.700
0.30	0.7400	0.5800	0.693	0.519	0.4700	0.3600	0.630	0.700
0.40	0.6990	0.5900	0.644	0.524	0.4700	0.3600	0.660	0.700
0.50	0.6760	0.6000	0.616	0.532	0.4700	0.3600	0.690	0.700
0.75	0.6310	0.6150	0.566	0.548	0.4700	0.3600	0.730	0.690
1.00	0.6090	0.6300	0.541	0.565	0.4700	0.3600	0.770	0.680
1.50	0.5780	0.6400	0.506	0.576	0.4700	0.3600	0.800	0.660
2.00	0.5550	0.6500	0.480	0.587	0.4700	0.3600	0.800	0.620
3.00	0.5480	0.6400	0.472	0.576	0.4700	0.3600	0.800	0.550
4.00	0.5270	0.6300	0.447	0.565	0.4700	0.3600	0.760	0.520
5.00	0.5050	0.6300	0.425	0.568	0.4700	0.3600	0.720	0.500
6.00	0.4770	0.6300	0.395	0.571	0.4700	0.3600	0.700	0.500
7.50	0.4570	0.6300	0.378	0.575	0.4700	0.3600	0.670	0.500
10.00	0.4290	0.6300	0.359	0.585	0.4700	0.3600	0.640	0.500