



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: TRUJILLO TAMAYO, SANTIAGO FERNANDO**

**TEMA: ESPECTRO DE CONTROL  
PARA EL CENTRO NORTE DE QUITO**

**DIRECTOR: DR. AGUIAR, ROBERTO  
CODIRECTOR: ING. CHÁVEZ, BLANCA**

**SANGOLQUÍ, ENERO DE 2015**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. SANTIAGO FERNANDO TRUJILLO TAMAYO como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERO CIVIL.

Sangolquí, Enero de 2015.

---

ING. ROBERTO AGUIAR Ph.D.  
DIRECTOR DE TESIS

---

ING. BLANCA CHÁVEZ.  
CODIRECTOR DE TESIS

REVISADO POR

---

ING. PABLO CAIZA Ph.D.  
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

SANTIAGO FERNANDO TRUJILLO TAMAYO

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “ESPECTRO DE CONTROL PARA EL CENTRO NORTE DE QUITO”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En razón de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Sangolquí, Enero de 2015

---

SANTIAGO F. TRUJILLO TAMAYO

## AUTORIZACIÓN

Yo, SANTIAGO FERNANDO TRUJILLO TAMAYO

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo “ESPECTRO DE CONTROL PARA EL CENTRO NORTE DE QUITO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Enero de 2015.

---

SANTIAGO F. TRUJILLO TAMAYO

## DEDICATORIA

La presente investigación está dedicada a toda mi familia. A mis padres Segundo y Anita, quienes han sido los pilares de mi formación moral y académica.

A todos mis hermanos, nombrándolos desde el mayor: Wilson, Lorena, Brenda y Eliana; con quienes he compartido excelentes momentos de fraternidad y espero seguirlos teniendo hasta que el ocaso de nuestras vidas, momentáneamente nos aparte.

A mi abuelito Segundo, una persona afable y demás familiares que no podría nombrarlos a todos, ya que cada uno es importante para mí.

*Santiago Fernando Trujillo Tamayo*

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente a Dios, por bendecirme cada día, motivándome a perseverar en todas mis actividades. De igual manera, agradezco infinitamente a la Virgen María.

A mi profesor y director de tesis Dr. Roberto Aguiar, una persona excelente, verdaderamente destacable; quien con su amplia experiencia y conocimientos, me ha conducido durante todo el trayecto de mi investigación.

A todos mis amigos, por compartir junto a mí, experiencias agradables durante esta etapa de mi vida.

*Santiago Fernando Trujillo Tamayo*

## Contenido

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
LISTADO DE TABLAS.....	x
LISTADO DE FIGURAS.....	xii

### CAPÍTULO I

<b>GENERALIDADES</b> .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación de la investigación.....	4

### CAPÍTULO II

<b>PELIGROSIDAD SÍSMICA DE QUITO</b> .....	6
2.1 Fallas ciegas inversas de Quito.....	6
2.1.1 El Sistema de Fallas Ciegas de Quito.....	7
2.1.2 Segmento de Falla Ilumbisí - La Bota (ILB).....	12
2.2 Tectónica local .....	14
2.3 Relación de recurrencia.....	15
2.3.1 Zona fuente Ilumbisí-La Bota (ILB) .....	17
2.3.2 Zona fuente Bellavista-Catequilla (BC) .....	20
2.3.3 Zona fuente Carcelén-El Inca (CEI) .....	22
2.4 El sismo del 12 de Agosto de 2014. ....	24

## **CAPÍTULO III**

<b>MODELO DE CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013)</b> .....	31
3.1 Descripción del Estudio.....	31
3.2 Clasificación de suelos del modelo CB13.....	33
3.3 Ecuaciones del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013). ....	36
3.3.1 Función de magnitud: .....	36
3.3.2 Función de la atenuación geométrica: .....	36
3.3.3 Función del tipo de falla: .....	37
3.3.4 Función del efecto hanging-wall: .....	37
3.3.5 Función de respuesta del sitio: .....	40
3.3.6 Función que considera el efecto de la cuenca sedimentaria: .....	41
3.3.7 Función de la profundidad focal:.....	41
3.3.8 Función del ángulo de buzamiento: .....	42
3.3.9 Función de la atenuación anelástica:.....	42
3.3.10 Definición de los parámetros: .....	44
3.4 Incertidumbre del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).....	47
3.5 Alcance del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).....	50

## **CAPÍTULO IV**

<b>MODELO DE ABRAHAMSON, SILVA Y KAMAI (2013)</b> .....	52
4.1 Descripción del Estudio.....	52
4.2 Clasificación de suelos del modelo ASK13. ....	54
4.3 Ecuaciones del modelo ASK13. ....	54
4.3.1 Función del modelo base:.....	55
4.3.2 Función del tipo de falla: .....	55
4.3.3 Función de respuesta del sitio: .....	56



4.3.4 Función del efecto hanging-wall: .....	57
4.3.5 Función de la profundidad al borde superior de la ruptura:.....	59
4.3.6 Función de la profundidad del suelo: .....	59
4.3.7 Función que considera las réplicas:.....	60
4.3.8 Función de regionalización: .....	61
4.3.9 Definición de los parámetros: .....	63
4.4 Incertidumbre del modelo ASK13.....	66
4.5 Alcance del modelo ASK13.....	69

## **CAPÍTULO V**

<b>MODELO DE ZHAO <i>ET AL.</i> (2006)</b> .....	70
5.1 Descripción del Estudio .....	70
5.2 Clasificación de suelos del modelo de Zhao <i>et al.</i> .....	71
5.3 Ecuaciones del modelo de Zhao <i>et al.</i> .....	73
5.4 Incertidumbre del modelo de Zhao <i>et al.</i> .....	77
5.5 Alcance del modelo de Zhao <i>et al.</i> .....	78

## **CAPÍTULO VI**

<b>DETERMINACIÓN DE ESPECTROS</b> .....	79
6.1 Detalle del programa .....	82
6.2 Espectros con modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).....	87
6.3 Espectros con modelo de Abrahamson, Silva y Kamai (2013).....	91
6.4 Espectros con modelo de Zhao <i>et al.</i> (2006).....	94
6.5 Comparación con el espectro de NEC-11 y ERN-12.....	99
6.6 El sismo de 22 de febrero de 2011 Christchurch, Nueva Zelanda. ..	112

**CAPÍTULO VII**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>117</b>
7.1 Conclusiones.....	117
7.2 Recomendaciones.....	119
7.3 Referencias Bibliográficas.....	121

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Magnitudes y periodos de recurrencia de los segmentos. ....	14
Tabla 2: Sismos registrados en Quito, periodo 1990 - 2014. ....	15
Tabla 3: Magnitud y número de eventos originados en el segmento ILB. ....	19
Tabla 4: Ajuste por mínimos cuadrados, segmento ILB. ....	19
Tabla 5: Valores $M$ , $N$ y ajuste por mínimos cuadrados, segmento BC. ....	21
Tabla 6: Valores $M$ , $N$ y ajuste por mínimos cuadrados, segmento CEI. ....	22
Tabla 7: Datos del sismo de 12/08/2014. ....	24
Tabla 8: Categorías de suelos NEHRP. ....	34
Tabla 9: Límites, media geométrica y valores recomendados de $V_{s30}$ . ....	35
Tabla 10: Coeficientes de la función hanging-wall del modelo CB13. ....	39
Tabla 11: Coeficientes de la atenuación anelástica regional. ....	43
Tabla 12: Coeficientes $c_i$ del modelo CB13. ....	46
Tabla 13: Coeficientes $c_i$ y $k_i$ del modelo CB13. ....	47
Tabla 14: Coeficientes de correlación y desviaciones estándar. ....	50
Tabla 15: Parámetros del modelo ASK13. ....	53
Tabla 16: Número de sismos y registros utilizados en el modelo ASK13. ...	53
Tabla 17: Tipos de suelo NEHRP. ....	54
Tabla 18: Coeficientes de la función $f_{10}$ . ....	60
Tabla 19: Coeficientes para Taiwan, China y Japón. ....	62
Tabla 20: Coeficientes para el ajuste de $V_{s30}$ , Japón. ....	63
Tabla 21: Coeficientes del modelo ASK13. ....	65
Tabla 22: Constantes independientes del periodo. ....	66
Tabla 23: Coeficientes $a_{10}$ - $a_{17}$ . ....	66
Tabla 24: Coeficientes de la incertidumbre del modelo. ....	67
Tabla 25: Número de registros considerados en el modelo Z06. ....	71
Tabla 26: Clasificación de suelos utilizada en el modelo Z06. ....	72
Tabla 27: Número de registros acordes al tipo de suelo. ....	72
Tabla 28: Coeficientes de la ecuación general. ....	75
Tabla 29: Coeficientes $C_k$ y desviaciones estándar del modelo Z06. ....	76
Tabla 30: Coeficientes de la ecuación de corrección. ....	77

Tabla 31: Valores del espectro medio e incertidumbre, CB13.....	87
Tabla 32: Valores del espectro medio e incertidumbre, ASK13.....	91
Tabla 33: Valores espectrales medios e incertidumbre, modelo Z06.....	94
Tabla 34: Barrios de la Zona 1.....	101
Tabla 35: Factores de Sitio ERN-12, Zona 1.....	103
Tabla 36: Barrios de la Zona 2.....	104
Tabla 37: Factores de Sitio ERN-12, Zona 2.....	105
Tabla 38: Barrios de la Zona 3.....	106
Tabla 39: Aceleraciones espectrales ponderadas. ....	110

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio.....	2
Figura 2: Vista del Centro Norte de Quito. ....	3
Figura 3: Vista 3D de la Depresión Interandina. ....	8
Figura 4: Segmentos del Sistema de Fallas Quito. ....	9
Figura 5: Distribución de la sismicidad en Quito. ....	10
Figura 6: Segmento Puengasí atravesado por el río Machángara.....	13
Figura 7: Segmento Ilumbisí-La Bota atravesado por el río Machángara ....	13
Figura 8: Eventos registrados en Quito entre 1990-2014. ....	17
Figura 9: Relación de recurrencia, segmento Ilumbisí-La Bota. ....	20
Figura 10: Loma Bellavista-Catequilla. ....	21
Figura 11: Relación de recurrencia, segmento Bellavista-Catequilla. ....	22
Figura 12: Relación de recurrencia, segmento Carcelén-El Inca.....	23
Figura 13: Sismo principal y réplicas del sismo 12/08/2014.. ....	25
Figura 14: Confiabilidad de los modelos ..... 27	27
Figura 15: Base de datos del modelo CB13. ....	32
Figura 16: Representación de $Z_{tor}$ , $W$ , $L$ , $\delta$ (dip) y $\lambda$ (rake). ....	46
Figura 17: Loma Ilumbisí - La Bota. (Foto: O. Trujillo) ....	79
Figura 18: Sitios de estudio emplazados en el Centro Norte de Quito.....	81
Figura 19: Esquemmatización del procedimiento de cálculo. ....	82
Figura 20: Sitio emplazado sobre la proyección del plano de ruptura.....	83
Figura 21: Sitio localizado fuera de la proyección del plano de ruptura. ....	84
Figura 22: Medidas usadas en los modelos ASK13 y CB13.....	84
Figura 23: Sitio localizado en el bloque deprimido.....	85
Figura 24: Espectros específicos máximo y mínimo (CB13).....	88
Figura 25: Espectro $\mu$ , $\mu+\sigma$ y $\mu-\sigma$ (CB13). ....	88
Figura 26: Espectro $\mu$ , $\mu+\sigma$ y $\mu+2\sigma$ (CB13). ....	89
Figura 27: Desviaciones estándar del modelo CB13. ....	89
Figura 28: Atenuación de PGA con la distancia, modelo CB13.....	90
Figura 29: Espectros específicos máximo y mínimo (ASK13).....	91
Figura 30: Espectro $\mu$ , $\mu+\sigma$ y $\mu-\sigma$ (ASK13). ....	92

Figura 31: Espectro $\mu$ , $\mu+\sigma$ y $\mu+2\sigma$ (ASK13). .....	92
Figura 32: Desviaciones estándar del modelo ASK13. ....	93
Figura 33: Atenuación de PGA con la distancia, modelo ASK13. ....	93
Figura 34: Espectros específicos máximo y mínimo (Z06). ....	95
Figura 35: Espectro $\mu$ , $\mu + \sigma_T$ y $\mu - \sigma_T$ (Z06). ....	95
Figura 36: Espectro $\mu$ , $\mu + \sigma_T$ y $\mu + 2\sigma_T$ (Z06). ....	96
Figura 37: Desviaciones estándar del modelo Z06. ....	96
Figura 38: Atenuación de PGA con la distancia, modelo Z06. ....	97
Figura 39: Espectros de respuesta $\mu$ . ....	98
Figura 40: Espectros de respuesta $\mu$ , $\mu+\sigma$ , $\mu-\sigma$ . ....	98
Figura 41: Espectros de respuesta $\mu$ , $\mu+\sigma$ , $\mu+2\sigma$ . ....	99
Figura 42: Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito. ....	100
Figura 43: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 1. ....	102
Figura 44: Comparación de espectros, Zona 1. ....	102
Figura 45: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 2. ....	104
Figura 46: Comparación de espectros, Zona 2. ....	105
Figura 47: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 3. ....	107
Figura 48: Comparación de espectros, Zona 3. ....	107
Figura 49: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 4. ....	108
Figura 50: Comparación de espectros, Zona 4. ....	109
Figura 51: Eventos del 4/09/2010, 22/02/2011 y 13/06/2011. ....	113
Figura 52: Valores de PGA registrados en el evento del 22/02/2011. ....	114
Figura 53: Espectros de la componente este-oeste, Christchurch. ....	115
Figura 54: Espectros de la componente norte-sur, Christchurch. ....	116

## RESUMEN

El Centro Norte de Quito se encuentra sobre una región tectónicamente activa, específicamente existe un mecanismo inverso de falla debajo de la ciudad, sin afloramiento en la superficie de la Tierra; por lo tanto, ha causado la formación de la loma Ilumbisí - La Bota. La sismicidad de la ciudad en los últimos años ha sido notable; de hecho, el reciente sismo del 12 de agosto de 2014 se asocia a las fallas ciegas inversas. Los sismos asociados a las fallas ciegas inversas tienen un gran potencial sísmico, vale recordar lo acontecido en Northridge (1994) y en Christchurch (2011). Para estimar la respuesta sísmica de las estructuras del Centro Norte de Quito ante un sismo cortical, se emplean modelos de predicción de movimientos del suelo; los cuales poseen una extensa base de datos de movimientos fuertes registrados en regiones tectónicamente activas, alrededor del mundo. Mediante los modelos se establece una predicción de los espectros de respuesta de aceleración elástica, que se generarían ante un sismo asociado al segmento de falla Ilumbisí-La Bota; estos modelos son los desarrollados por: Campbell y Bozorgnia (2013); Abrahamson, Silva y Kamai (2013); y el modelo de Zhao *et al.* (2006). Se obtienen espectros para las diferentes parroquias del Centro Norte de Quito y para el valle de Cumbayá. Paralelamente, se realiza una comparación con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011 y con los del estudio de Microzonificación Sísmica de Quito realizado por ERN en el año 2012.

Palabras claves:

- Espectro de control
- Microzonificación Sísmica de Quito
- Vulnerabilidad del Centro Norte de Quito
- Sistema de Fallas de Quito
- GMPE en Quito

## ABSTRACT

Center North of Quito is located on an active tectonic region, specifically there is a reverse fault mechanism beneath the city without outcrop on the surface; it has caused the formation of the Ilumbisí - La Bota hill. In recent years, the seismicity of the city has been remarkable; in fact, the recent main shock of 12 August 2014 is associated with blind thrust faults. The earthquakes related to blind thrust faults have a seismic potential, it is worth remembering what occurred in Northridge (1994) and Christchurch (2011). We used ground motion prediction equations to estimate the seismic response of the Center North of Quito structures; GMPEs have an extensive database of strong motions in active tectonic regions around the world. GMPEs provide the elastic response spectra to be generated in an earthquake associated to the segment Ilumbisí-Bota; the models are developed by: Campbell and Bozorgnia (2013); Abrahamson, Silva and Kamai (2013); and Zhao et al. (2006). The spectra are obtained for different parishes of Center North of Quito and Cumbayá valley. A comparison with the spectra of the Ecuadorian Construction Standard (2011) and the Quito Seismic Microzonation - ERN (2012) is performed.

Keywords:

- Response spectra
- Quito Seismic Microzonation
- Vulnerability of Center North of Quito
- Quito Fault System
- GMPE Quito



# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

La ciudad de Quito ha tenido un rápido crecimiento poblacional, dando paso a un gran número de construcciones de baja calidad y a la edificación en sitios inestables como quebradas rellenas de suelo suelto y en laderas empinadas (Escuela Politécnica Nacional *et al.*, 1994). En el estudio realizado por Aguiar (2013), en diferentes colegios de la capital ecuatoriana, se estimó que un 70 por ciento de las estructuras de Quito son vulnerables sísmicamente por su forma de construcción.

Desde 1990, año en que se inició la red de monitoreo sísmico en Quito por parte del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), se han registrado eventos sísmicos con profundidades focales menores a 23 kilómetros; además, las mediciones GPS corroboran una deformación en la corteza superficial, confirmando que Quito se encuentra en una región tectónicamente activa.

Varios estudios señalan la existencia de un sistema de fallas ciegas debajo de la ciudad. Una de las zonas de mayor vulnerabilidad es el Centro Norte de Quito, ya que aquí está situado el distrito financiero de la ciudad, importantes centros comerciales, centros culturales, escenarios deportivos y las agencias principales de establecimientos públicos y privados.

La presente investigación basada en la obtención de espectros de control, engloba la zona conocida como el Centro Norte de Quito. De hecho, las parroquias en estudio son: Rumipamba, Jipijapa, Belisario Quevedo, Mariscal Sucre e Iñaquito; además, se analizan sitios de interés en las parroquias: Cochapamba, Kennedy, Concepción y San Isidro del Inca

comprendiendo de este modo la Administración Zonal Eugenio Espejo y el valle de Cumbayá.

Se analizaron sitios de interés cada 500 metros, los cuales fueron ampliamente distribuidos en las parroquias del Centro Norte de Quito, conformando finalmente una malla de 551 sitios o puntos de estudio, tal como se aprecia en la Figura 1.

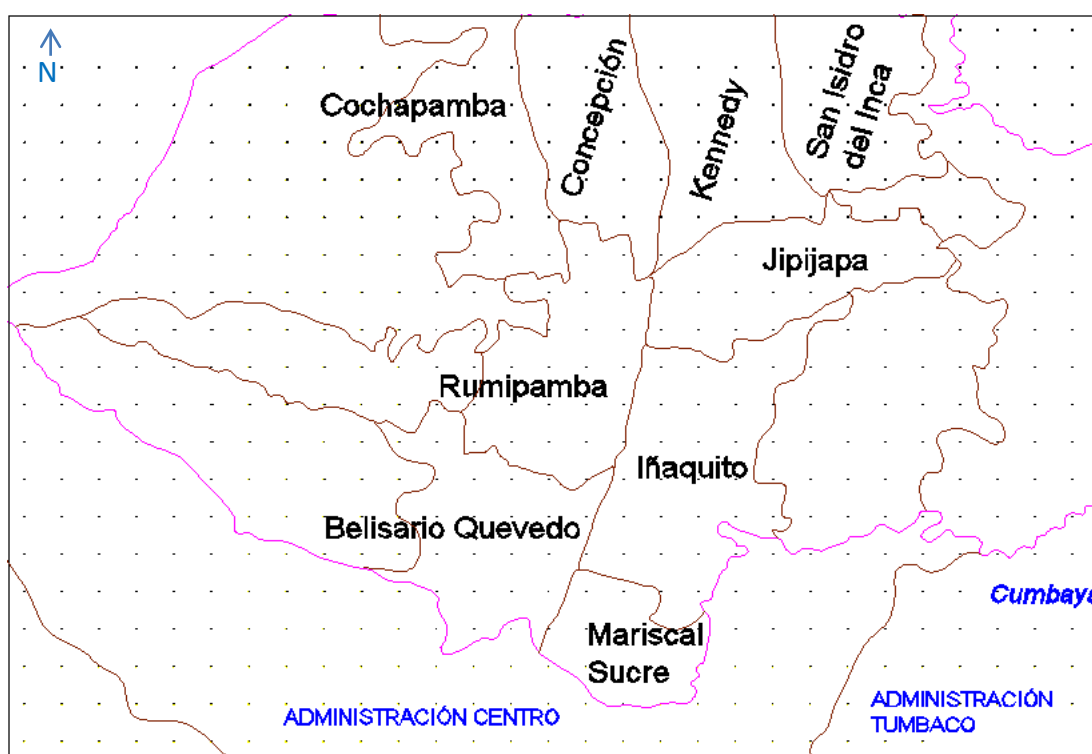


Figura 1: Área de estudio

Según el Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2010, en la Administración Zonal Eugenio Espejo residen 406 029 personas (Instituto de la Ciudad, 2012). Adicionalmente, existe una gran cantidad de turistas, comerciantes, empresarios y empleados que cada día se movilizan a estas parroquias.

En la Figura 2 se presenta una fotografía del Centro Norte de Quito, tomada desde el Instituto Geográfico Militar, la fotografía tiene una vista con dirección hacia el norte de Quito; se observa en primer plano la avenida Patria, donde es visible la Torre CFN, el edificio más alto de la capital ecuatoriana en la actualidad; la fotografía fue tomada en noviembre de 2014.



Figura 2: Vista del Centro Norte de Quito.

Fuente: (O. Trujillo).

El Centro Norte de Quito se sitúa sobre un segmento de falla ciega inversa denominado Ilumbisí - La Bota (ILB), esta localización geográfica profundiza la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones capitalinas. Cabe destacar que dicho segmento de falla forma parte de un complejo sistema de fallas ciegas que atraviesa toda la ciudad de Quito.

Para estimar la respuesta sísmica de las estructuras del Centro Norte de Quito ante un sismo cortical superficial, se emplearán tres modelos de movimientos fuertes; esto se lo realiza en base a una predicción de las aceleraciones del suelo ante una posible ruptura del segmento Ilumbisí-La Bota.

Posteriormente, se obtienen espectros para las diferentes parroquias del Centro Norte de Quito. Paralelamente, se efectúa una comparación con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011 y con los del estudio de Microzonificación Sísmica de Quito realizado por ERN en el año 2012.

## 1.2 Justificación de la investigación

A partir del año 1541, siete grandes sismos históricos se han sentido en Quito con intensidad mayor o igual a VII: en 1587, 1627, 1698, 1755, 1797, 1859 y 1868 (Chatelain, *et al.*, 1999). Sin embargo, el único evento histórico cercano a Quito fue el sismo del 31 de agosto de 1587, cuyo epicentro se localizó en Guayllabamba; Beauval *et al.* (2010) estimaron una magnitud de 6.4 para el evento de 1587.

Estudios proponen un periodo de recurrencia aproximado de 200 años para el Sistema de Fallas de Quito. En efecto, al tomar este periodo de recurrencia, debería haber ocurrido dos eventos de magnitud 6.4 desde 1587, en los años 1787 y 1987; lo cual, afortunadamente no ha sucedido. Por lo tanto, se contempla la posibilidad de que se tenga una gran cantidad de energía acumulada en el Sistema de Fallas de Quito y que estemos muy próximos a un gran sismo (Aguar *et al.*, 2014).

Cabe destacar que el evento de 1859 se localizó al noroeste de Pichincha, alcanzando una intensidad máxima de VIII en la escala MSK, con esta intensidad Beauval *et al.* (2010) encontraron una magnitud de 7.2. Sin embargo, en el área poblada de Quito de ese entonces, la intensidad evaluada fue de VII.

En relación a la presencia de la falla ciega inversa Ilumbisí-La Bota (ILB) debajo del Centro Norte de Quito, acaecería graves consecuencias al producirse un sismo cortical en este sector. Los sismos corticales asociados a las fallas ciegas han sido frecuentes en Quito, como el reciente sismo del 12 de agosto de 2014, cuya magnitud fue de Mw 5.1 y cuyo foco se localizó a una profundidad tan solo de 5 kilómetros. El sismo de agosto de 2014 registró daños considerables en la zona epicentral, pese a ser un evento de corta duración.

Alvarado *et al.* (2014), estiman un sismo de magnitud 6.2 para un periodo de recurrencia de 138 años en el segmento Ilumbisí-La Bota. Al producirse un evento de esta magnitud habría demasiado daño en la zona epicentral, dado que el epicentro se localizaría en alguna de las parroquias del Centro Norte de Quito.

Tomando en cuenta esta información y el poder destructivo de las fallas ciegas inversas avistado en Northridge (1994) o en Christchurch (2011), se hace imprescindible la determinación de espectros de respuesta; a fin de evaluar la respuesta sísmica de las estructuras del Centro Norte de Quito.

## **CAPÍTULO II**

### **PELIGROSIDAD SÍSMICA DE QUITO**

#### **2.1 Fallas ciegas inversas de Quito**

Vale la pena recordar el sismo de Northridge (Estados Unidos) del 17 de enero de 1994, que tuvo una magnitud de 6.7, dejó 72 muertos, 12 000 heridos y pérdidas económicas estimadas en 40 000 millones de dólares; este sismo duró 20 segundos y en tan corto tiempo causó pánico en la ciudad de Northridge por que el sismo se produjo en una falla ciega que atravesaba la ciudad (Aguiar R. , 2013).

Dadas las condiciones similares con Northridge, la ciudad de Quito podría presentar grandes daños en sus edificaciones ante un posible evento asociado a fallas ciegas.

La estructura geológica conocida como el Sistema de Fallas de Quito, recorre el borde oriental de la ciudad, a lo largo de las pendientes que miran hacia los valles de Los Chillos, Cumbayá y Tumbaco y que las conocemos como las lomas: del Tablón (frente a Amaguaña), Puengasí, Lumbisí, El Batán, La Bota y Bellavista-Catequilla (pasando Calderón). (Yepes, 2014).

Estas lomas han sido el resultado de un mecanismo inverso de falla, es decir que uno de los bloques (Quito) se levanta respecto del otro (los valles) en contra de la fuerza de gravedad por fuerzas de compresión tectónica, que empujan al continente desde el occidente; es esta la razón por la que Quito, a fuerza de sismos repetitivos durante su historia geológica, se levanta unos 400 metros sobre el nivel del Valle Interandino (Yepes, 2014).

### 2.1.1 El Sistema de Fallas Ciegas de Quito

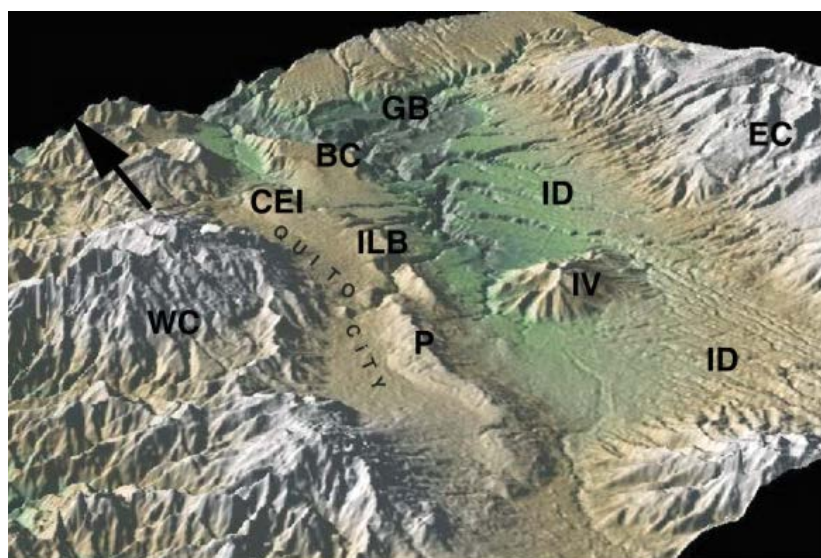
La ciudad de Quito se localiza a 2800 metros sobre el nivel del mar, en la Región Interandina, donde justamente se levanta la Cordillera de los Andes. Cabe destacar que la Cordillera de los Andes en el Ecuador presenta dos cordilleras principales, con tendencias paralelas a la fosa de subducción; las dos cordilleras principales de Ecuador son volcánicas metamórficas (Alvarado, *et al.*, 2014) y se conocen con los nombres de: Cordillera Oriental y Cordillera Occidental.

Ahora bien, la Cordillera Oriental y Occidental son separadas por la Depresión Interandina, que tiene un ancho entre 8 y 30 kilómetros (Alvarado, *et al.*, 2014). En efecto, Quito se emplaza en el borde occidental de la Depresión Interandina, tal como se muestra en la Figura 3.

Al mismo tiempo, Quito se asienta entre la Cordillera Occidental y varias lomas que limitan la parte oriental de la ciudad; las lomas han sido denominadas por los lugares o cerros en los cuales inicia y termina su trayecto; estas son: loma Puengasí, loma Ilumbisí - La Bota, loma Carcelén - El Inca, loma Bellavista - Catequilla y loma Tangahuilla.

Las lomas tienen una formación geológica, debido a un mecanismo inverso de falla, y por lo tanto constituyen segmentos individuales de falla. Los cinco segmentos de falla conforman el Sistema de Fallas de Quito, cuya extensión es de más de 60 kilómetros. Hace varias décadas el Sistema de Fallas de Quito fue descrito por varios autores como una fosa tectónica; en cambio, Soulas, Egüez, Yepes y Pérez (1991) encontraron la presencia de un sistema de fallas ciegas con un buzamiento hacia el oeste, debajo de la ciudad (Alvarado, *et al.*, 2014).

La traza del Sistema de Fallas de Quito tiene una dirección aproximadamente N20° E; en cambio, la traza de los segmentos individuales de falla presentan oblicuidad en algunos casos, convirtiéndolas en estructuras complejas. En lo referente a las cuencas, Quito se emplaza sobre tres sub cuencas, nombrándolas de sur a norte: sub cuenca Machángara, sub cuenca El Batán, y sub cuenca San Antonio (Alvarado, *et al.*, 2014).



BC Bellavista-Catequilla	WC Cordillera Occidental
ID Depresión Interandina	EC Cordillera Oriental
IV volcan Ilaló	P Puengasí
GB Cuenca Guayllabamba	ILB Ilumbisí-La Bota
	CEI Carcelén-El Inca

Figura 3: Vista 3D de la Depresión Interandina.

Fuente: (Alvarado, *et al.*, 2014).

En la Figura 4 se aprecia la localización del Centro, Centro Norte y Norte de Quito en las faldas de la Cordillera Occidental de los Andes; concretamente, la mayor parte de la ciudad se ubica en las laderas orientales del Complejo Volcánico Pichincha. Los picos de los volcanes alcanzan elevaciones imponentes: Guagua Pichincha (4979 msnm), Rucu Pichincha (4698 msnm); mientras que los barrios más elevados sobrepasan los 3100 metros sobre el nivel del mar (Fernandez, 2012). Sísmicamente, el único volcán activo es el Guagua Pichincha.



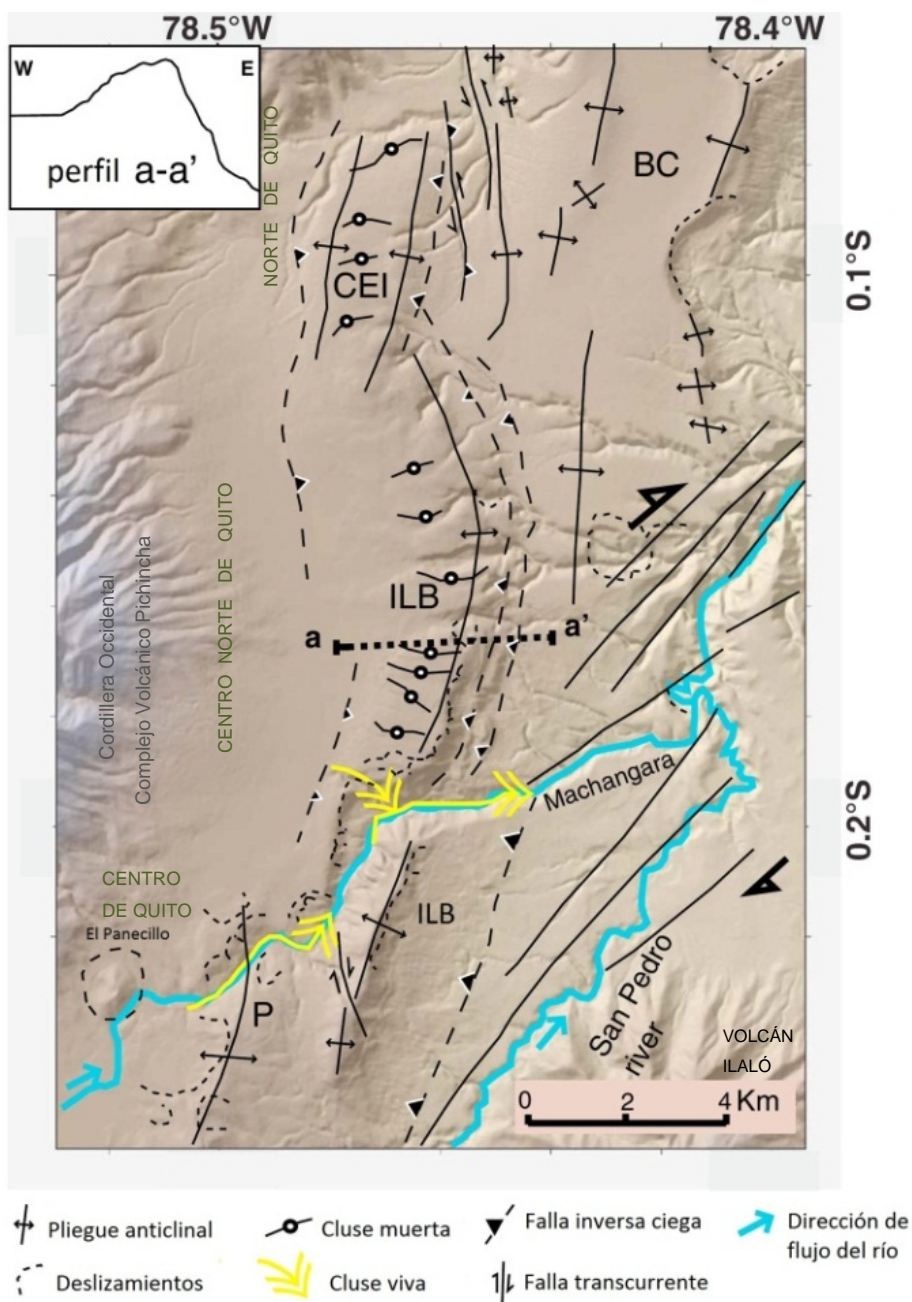


Figura 4: Segmentos del Sistema de Fallas Quito.

Fuente: (Alvarado, *et al.*, 2014).

Las lomas se originaron por fuerzas de compresión en la corteza continental, es así que las fuerzas no llegan a romper los estratos del suelo a una profundidad estimada de 5 kilómetros; consecuentemente, la deformación de las rocas superficiales crearon un pliegue convexo o anticlinal.

Además, en la cuenca de Quito existieron riachuelos y acequias cuyas aguas han desaparecido con los años, conformando en la actualidad las cluses muertas. La corriente del río Machángara, a lo largo de los siglos, ha segado transversalmente las lomas Puengasí e Ilumbisí-La Bota; creando desfiladeros y laderas empinadas, donde actualmente se asientan distintos barrios de Quito. Se debe recalcar que ante un evento sísmico de gran magnitud, se presentarán deslizamientos en los barrios ubicados en los bordes del río Machángara o en las laderas de las lomas anteriormente mencionadas.

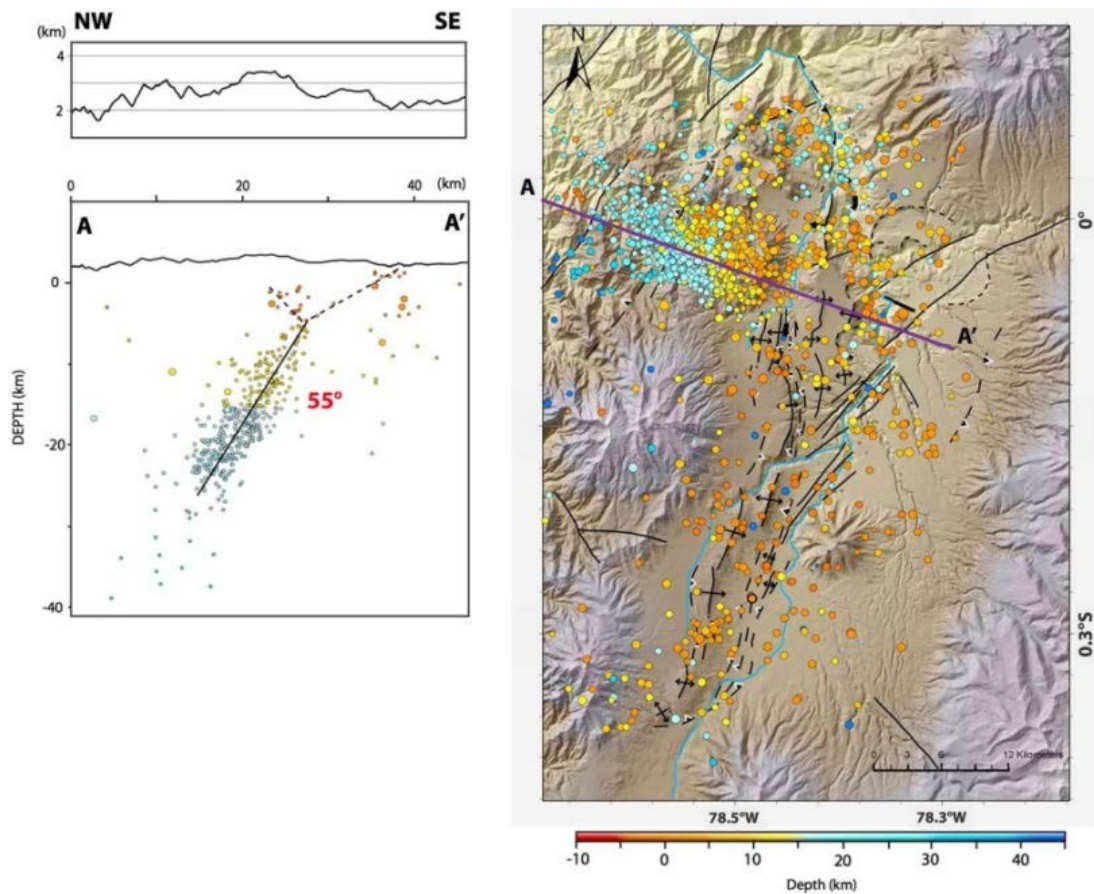


Figura 5: Distribución de la sismicidad en Quito.

Fuente: (Alvarado, *et al.*, 2014).

Mediante el análisis de 1758 eventos corticales registrados entre los años 1994 y 2009, Alvarado *et al.* (2014) establecieron una distribución de la sismicidad en la ciudad de Quito, las magnitudes de los eventos analizados varían desde  $M_w$  3.0 a 5.3 y las profundidades focales consideradas son menores a 40 km.

Tal distribución se compila en la Figura 5 a lo largo del perfil A-A', que es perpendicular al rumbo de la traza del Sistema de Fallas de Quito. El perfil muestra que la sismicidad se produce principalmente debajo de Quito, es decir, al oeste de los segmentos y se alinean en un plano de falla bien definido; el cual tiene un ángulo de buzamiento de 55 grados y se extiende hasta 20 o 30 kilómetros de profundidad; de hecho, el movimiento de Quito tiene una tasa aproximada de 3 mm/año (Alvarado, *et al.*, 2014).

Efectivamente, en la distribución se identifica que el plano de ruptura no llega a la superficie de la Tierra, dicho de otra manera, se trata de una falla oculta o falla ciega. Las fallas ciegas son difíciles de detectar hasta que se rompen, el destructivo evento del año 1994 en Northridge, California, fue causado por una falla ciega que no fue descubierto previamente (Wikipedia, 2014).

### 2.1.2 Segmento de Falla Ilumbisí-La Bota (ILB)

La loma Ilumbisí - La Bota posee una longitud de 15 kilómetros, cabe recalcar que el Centro Norte de Quito se emplaza sobre el segmento de falla Ilumbisí- La Bota. En la parte superior izquierda de la Figura 4 se muestra la sección transversal (a-a') del segmento de falla ILB, se aprecia que el flanco oriental es mucho más vertical que el occidental, debido al buzamiento del plano de ruptura hacia el oeste; consecuentemente, los deslizamientos de taludes son más frecuentes a lo largo del borde que miran a los valles.

Una característica fundamental a distinguir, es que uno o dos ejes definen el rumbo de los segmentos Carcelén-El Inca y Bellavista-Catequilla; en cambio, para el segmento Ilumbisí-La Bota el eje de la traza es curvo, lo que sugiere, una estructura compleja que se propaga hacia el noroeste (Alvarado, *et al.*, 2014).

En lo que se refiere al río Machángara, este inicia en el norte del volcán Atacazo, luego recorre el Sur, Centro Sur y Centro de Quito, donde bordea El Panecillo y atraviesa la loma Puengasí en el sector El Trebol-La Vicentina; de modo que la loma donde se sitúa la parroquia Itchimbia pertenece al segmento Puengasí, tal como se muestra en la Figura 6.

Luego, el río Machángara sigue su trayecto hacia el noreste donde atraviesa el segmento Ilumbisí-La Bota, aproximadamente en el sector de Guápulo - Parque Metropolitano, realizando así un estrecho desfiladero para unirse finalmente al río San Pedro. Estos desfiladeros llegan a tener grandes profundidades, lo cual, atestigua la rápida elevación de los segmentos del Sistema de Fallas de Quito. De hecho, el río Machángara ha sido sensible a los cambios topográficos provocados por las fallas inversas y es por lo tanto un indicador ideal de la reciente actividad tectónica (Alvarado, *et al.*, 2014).





Figura 6: Segmento Puengasí atravesado por el río Machángara, Centro de Quito. Fuente: (www.skyscrapercity.com).

En la Figura 7 se presenta una fotografía aérea con vista hacia el sur de la ciudad; evidentemente, la loma Ilumbisí-La Bota se ha dividido en dos, debido al flujo del río Machángara a lo largo de los siglos. Tal como se aprecia en la fotografía, el Centro Norte de Quito se localiza entre la loma Ilumbisí- La Bota y la Cordillera Occidental.

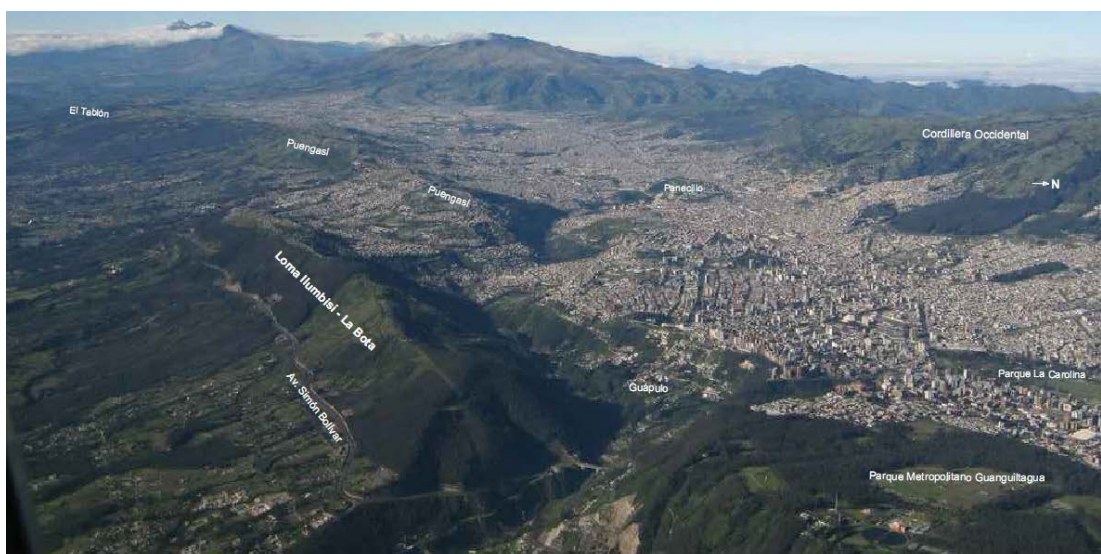


Figura 7: Segmento Ilumbisí-La Bota atravesado por el río Machángara, Centro Norte de Quito. Fuente: (www.skyscrapercity.com).

## 2.2 Tectónica local

Alvarado *et al.* (2014) plantean un posible evento de magnitud de 6.8 (RA) y 7.1 (SRL), en el caso de una ruptura simultánea de todos los segmentos del Sistema de Fallas de Quito. Sin embargo, una ruptura de los segmentos individuales del Sistema de Fallas de Quito es posible; basado en esta hipótesis se han definido 5 segmentos individuales de falla: Ilumbisí-La Bota, Carcelén-El Inca, Bellavista-Catequilla y Tangahuilla.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, se establece en la Tabla 1 las magnitudes máximas para cada uno de los segmentos, en función del área del plano de ruptura (RA) y de la longitud superficial de ruptura (SRL).

Tabla 1: Magnitudes y periodos de recurrencia de los segmentos.

Segmento de falla	Área de Ruptura [RA] en km <sup>2</sup>	Magnitud (RA)	Longitud Superficial de Ruptura [SRL] en km	Magnitud (SRL)	Período de Recurrencia (años)
Puengasí	259	6.4	22	6.4	188
ILB	176	6.2	15	6.2	138
CEI	82	5.9	7	5.7	105
BC	191	6.3	17.5	6.3	183
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0	115

Magnitudes máximas calculadas con Leonard [2010], coeficientes: a=1 y b=4 para RA; a=1.52 y b=4.4 para SRL. Los periodos de recurrencia son calculados con Wesnousky [1986]  $\mu = 3 \times 10^{10}$  Pa

Fuente: (Alvarado, *et al.*, 2014).

A continuación se detallan las ecuaciones propuestas por Leonard (2010) y se demuestra las magnitudes halladas por Alvarado *et al.* (2014) para el segmento Ilumbisí-La Bota:

$$M_w = 1.52 \cdot \log(SRL) + 4.4 \quad (1.1)$$

$$M_w = 1.0 \cdot \log(RA) + 4 \quad (1.2)$$

$$M_w[SRL] = 1.52 \cdot \log(15) + 4.4 = 6.2$$

$$M_w[RA] = 1.0 \cdot \log(176) + 4 = 6.2$$

## 2.3 Relación de recurrencia

Un parámetro significativo en la evaluación de la peligrosidad sísmica es la relación de recurrencia. En tal sentido, se desarrolla la relación de recurrencia en cada una de las zonas fuente de Quito.

En la Tabla 2 se detalla la fecha, localización, magnitud y profundidad focal de los eventos registrados entre 1990 y 2014 en Quito, la mayoría de ellos se compilan en el estudio de Alvarado *et al.* (2014) y el resto de registros fueron proporcionados por Aguiar R. en el 2014.

Tabla 2: Sismos registrados en Quito, periodo 1990 - 2014.

Código	Fecha	Coordenadas		Magnitud	Profundidad focal
		Latitud	Longitud		
1	11/08/1990	-0.04	-78.43	5 Mw	15
2	01/08/1998	-0.08	-78.48	2.7 Md	12.36
3	11/08/1998	-0.15	-78.48	4 Md	9.43
4	05/09/1998	-0.07	-78.46	3 Md	8.4
5	24/09/1998	-0.22	-78.45	4 Md	12.04
6	05/02/1999	-0.04	-78.44	3.5 Md	11.89
7	14/03/1999	-0.03	-78.49	4 Md	7.63
8	30/08/1999	-0.04	-78.47	4.2 Md	7.09
9	26/11/1999	-0.02	-78.50	3.7 Md	9.49
10	02/01/2000	-0.15	-78.50	3.5 Md	2.09
11	15/04/2000	-0.05	-78.50	4.2 Md	8.12
12	17/07/2000	-0.06	-78.48	3.1 Md	6.42
13	19/02/2001	0.01	-78.35	4.1 Md	5.45
14	12/04/2002	-0.47	-78.63	3.9 Md	17.36
15	05/06/2002	0.05	-78.47	3.9 Md	8.88
16	05/06/2002	0.02	-78.46	2.9 Md	8.23
17	21/07/2002	-0.09	-78.37	3.9 Md	8.7
18	23/07/2002	0.14	-78.40	3.8 Md	10.6
19	23/08/2002	-0.31	-78.51	3.4 Md	3.9
20	11/09/2002	-0.23	-78.44	3.6 Md	6.83
21	04/12/2002	-0.43	-78.22	4.2 Md	6.7
22	22/02/2003	-0.44	-78.51	3.9 Md	4.03
23	15/09/2003	0.07	-78.34	4.1 Md	4.98

Continúa →

24	09/12/2003	0.04	-78.46	4	Md	6.06
25	08/03/2004	-0.25	-78.49	4	Md	7.42
26	10/03/2004	-0.23	-78.51	3.7	Md	8.53
27	10/03/2004	-0.24	-78.52	3.8	Md	11.28
28	14/06/2005	-0.15	-78.50	4	Md	7.56
29	13/07/2005	-0.20	-78.45	3.7	Md	10.02
30	30/07/2005	-0.06	-78.44	3.6	Md	10.28
31	20/01/2007	-0.09	-78.52	4.2	Md	5.61
32	11/05/2008	0.00	-78.52	4.1	Md	15.65
33	04/10/2008	-0.16	-78.65	4.3	Md	6.32
34	07/11/2009	-0.04	-78.37	4.2	Md	8.37
35	17/02/2011	-0.25	-78.49	4.1	ML	14.89
36	17/02/2011	-0.24	-78.50	3.9	ML	11.78
37	25/06/2011	-0.21	-78.49	3.4	ML	10.69
38	25/06/2011	-0.20	-78.49	3.4	ML	12.88
39	17/07/2011	-0.32	-78.50	3.5	ML	22.03
40	02/08/2011	-0.15	-78.44	3.4	ML	10.93
41	06/10/2011	-0.14	-78.39	3	ML	5.3
42	29/10/2011	-0.13	-78.39	4.6	Md	16.9
43	26/11/2011	-0.14	-78.39	3.6	ML	16.9
44	21/02/2011	-0,11	-78,41	3,4		11,7
45	17/02/2011	-0,25	-78,49	4,1		14,8
46	02/09/2011	-0,05	-78,46	3,0		0,0
47	06/10/2011	-0,12	-78,37	3,0		5,2
48	29/10/2011	-0,13	-78,39	4,0		5,4
49	26/11/2011	-0,12	-78,38	3,7		5,2
50	11/06/2012	-0,20	-78,47	3,0		0,0
51	08/02/2013	-0,14	-78,38	3,4		12,0
52	06/03/2013	-0,04	-78,61	3,1		23,7
53	29/07/2013	-0,05	-78,57	3,8		0,0
54	01/09/2013	0,04	-78,38	3,3		2,0
55	23/01/2014	0,03	-78,39	3,7		6,0
56	31/01/2014	-0,39	-78,62	3,1		8,0
57	16/03/2014	-0,36	-78,67	3,3		3,0
58	09/08/2014	-0,15	-78,52	3,4		7,0
59	12/08/2014	-0,05	-78,42	5,1		5,0

Fuente: (Alvarado, *et al.*, 2014), Aguiar, R.



Para hallar la relación de recurrencia en cada segmento de falla, es necesario clasificar los eventos de acuerdo a la localización del epicentro; por lo cual, en la Figura 8 se expone la localización de los sismos en cada una de las zonas fuente.

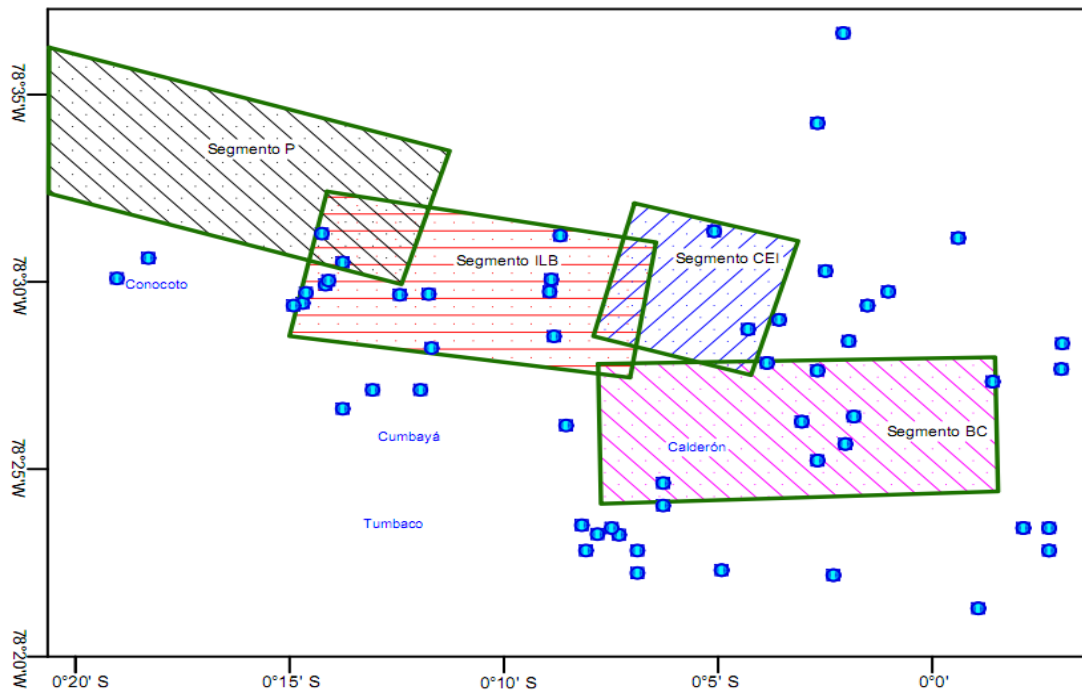


Figura 8: Eventos registrados en Quito entre 1990-2014.

Fuente: (Aguiar, *et al.*, 2014).

### 2.3.1 Zona fuente Ilumbisí-La Bota (ILB)

Si bien es cierto no existe la manera de predecir el día o mes específico que ocurrirá un sismo, se puede estimar la frecuencia con que ocurre (recurrencia) un evento de magnitud determinada; esto se lo realiza en base a los datos de la sismicidad histórica de la zona de estudio, mientras más años de información sísmica se tenga, la ecuación de recurrencia se ajustará mucho mejor.

Una de las ecuaciones más usadas para determinar la recurrencia de un evento es la propuesta por Gutenberg y Richter (1944):

$$\text{Log}_{10} N = a - b \cdot M \quad (1.3)$$

Donde  $M$  es la magnitud del sismo y  $N$  es el número de sismos de magnitud mayor o igual a  $M$ .

Al emplear un método gráfico, el procedimiento de cálculo se basa en ubicar pares ordenados dentro de un eje de coordenadas; donde el eje de las abscisas es representado por la Magnitud ( $M$ ) y el eje de las ordenadas es generado por el número de sismos mayores o iguales a  $M$ , en escala logarítmica. Resulta oportuno destacar la utilización de un gran número de eventos con magnitudes diferentes, algunas magnitudes varían de otras por su parte decimal, por tal razón se agrupa dichos eventos dentro de un determinado rango de magnitud; contabilizando de este modo el número de sismos; de hecho, para graficar el eje de las abscisas se puede tomar la media de los valores límites del rango de magnitud.

Una vez graficados los pares ordenados, se aplica un método para encontrar una ecuación que se ajuste al conjunto de datos; una técnica empleada para ajustar curvas es mediante mínimos cuadrados y una técnica para ajustar rectas es por regresión lineal. Al encontrarse la variable dependiente  $N$  en escala logarítmica, el método de mínimos cuadrados se ajusta al conjunto de datos de forma lineal.

En la Tabla 3 se detalla el rango de magnitud y la media de sus límites; la cuarta columna representa el número de eventos acontecidos en 24 años (1990-2014). Se desarrolla una relación de recurrencia por año, por lo tanto,  $\lambda$  simboliza el número de eventos anuales y  $\lambda$  acumulado representa el número de eventos anuales de igual o mayor magnitud que  $M$ .

Tabla 3: Magnitud y número de eventos originados en el segmento ILB.

ID	Rango de magnitud	$M$	Nº eventos / (Años)	$\lambda$ (1/años)	$\lambda$ acumulado (1/año)
1	2.6 - 3	2.8	1 / (24)	0.042	0.583
2	3.1 - 3.5	3.3	4 / (24)	0.167	0.542
3	3.6 - 4	3.8	7 / (24)	0.292	0.375
4	4.1 - 4.5	4.3	2 / (24)	0.083	0.083

La Tabla 4 compila el ajuste de los datos mediante mínimos cuadrados. Siendo  $\log Y = \log(\lambda \text{ acumulado})$ ,  $X = M$  y la variable  $n_t$  es el número de total de datos, para el presente caso  $n_t = 4$ .

Tabla 4: Ajuste por mínimos cuadrados, segmento ILB.

ID	$\log Y$	$X$	$X \cdot \log Y$	$X^2$
1	-0.234	2.8	-0.655	7.840
2	-0.266	3.3	-0.879	10.890
3	-0.426	3.8	-1.619	14.440
4	-1.079	4.3	-4.640	18.490
$\Sigma=$	-2.006	14.2	-7.793	51.660

$$\Sigma(\log Y) = n_t \cdot a + b \cdot \Sigma X \quad (1.4)$$

$$\Sigma(X \cdot \log Y) = a \cdot \Sigma X + b \cdot \Sigma(X^2) \quad (1.5)$$

Remplazando los valores de la Tabla 4 en las ecuaciones (1.4) y (1.5) se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$-2.006 = 4 \cdot a + 14.2 \cdot b$$

$$-7.793 = 14.2 \cdot a + 51.66 \cdot b$$

El anterior sistema, expresado en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} 4 & 14.2 \\ 14.2 & 51.66 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.006 \\ -7.793 \end{bmatrix}$$

Se desprende que la solución para hallar los coeficientes a y b, es:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 14.2 \\ 14.2 & 51.66 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -2.006 \\ -7.793 \end{bmatrix}$$

$$a=1.412, b=0.539$$

$$\beta=b \cdot \ln(10)=1.241.$$

Finalmente, la ecuación de recurrencia del segmento Ilumbisí-La Bota es la indicada en la Figura 9.

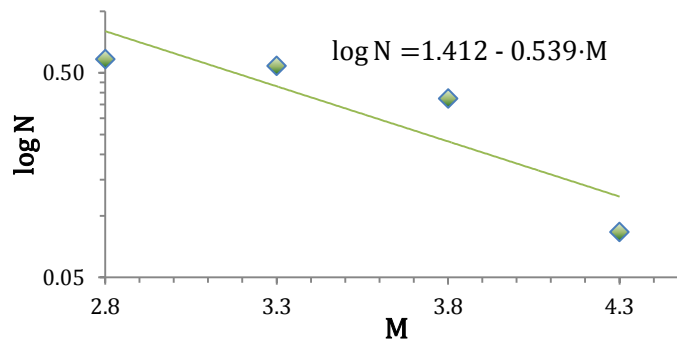


Figura 9: Relación de recurrencia, segmento Ilumbisí-La Bota.

### 2.3.2 Zona fuente Bellavista-Catequilla (BC)

Este segmento de falla inicia en el norte de la parroquia Calderón (barrio Bellavista), recorre el borde oriental de la parroquia Pomasqui y San Antonio de Pichincha, culminando en parte norte del cerro Catequilla.

En la Figura 10 se presenta una fotografía aérea, tiene una vista desde Calderón hacia el norte de Pichincha; en la parte inferior de la fotografía se encuentran los barrios Unión Nacional y Plan de Vivienda Ecuador; a la derecha, se observa la trayectoria de la loma Bellavista-Catequilla; en el centro, están las áreas pobladas de Pomasqui y San Antonio de Pichincha, donde es visible la avenida Manuel Córdova Galarza; a la izquierda, el volcán Casitagua y en el plano de fondo el Complejo volcánico Pululahua.



Figura 10: Loma Bellavista-Catequilla.

Fuente: (www.skyscrapercity.com).

Se exponen los cálculos de manera sintetizada, debido a que se utilizó el mismo procedimiento de la anterior zona fuente; la Tabla 5 también compila los valores hallados mediante mínimos cuadrados.

Tabla 5: Valores  $M$ ,  $N$  y ajuste por mínimos cuadrados, segmento BC.

ID	Rango de magnitud	$M$	Nº eventos / (Años)	$\lambda$ (1/años)	$\lambda$ acumulado (1/año) [N]	logY	X·logY	$X^2$	
1	2.6 - 3	2.8	3 / (24)	0.125	0.375	-0.426	-1.19	7.84	
2	3.1 - 3.5	3.3	2 / (24)	0.083	0.250	-0.602	-1.99	10.89	
3	3.6 - 4	3.8	1 / (24)	0.042	0.167	-0.778	-2.96	14.44	
4	4.1 - 4.5	4.3	1 / (24)	0.042	0.125	-0.903	-3.88	18.49	
5	4.6 - 5	4.8	1 / (24)	0.042	0.083	-1.079	-5.18	23.04	
6	5.1 - 5.5	5.3	1 / (24)	0.042	0.042	-1.380	-7.32	28.09	
						$\Sigma =$	-5.169	-22.51	102.79

Aplicando las ecuaciones (1.4) y (1.5) se encontraron los valores:  $a=0.603$ ,  $b=0.362$  y  $\beta=b \cdot \ln(10)=0.833$ ; en efecto, la relación de recurrencia se muestra en la Figura 11.

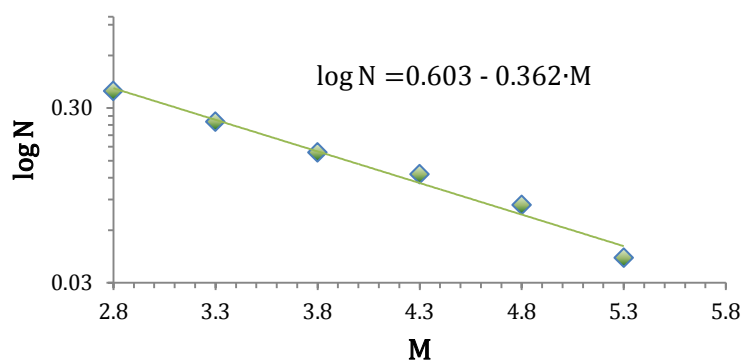


Figura 11: Relación de recurrencia, segmento Bellavista-Catequilla.

### 2.3.3 Zona fuente Carcelén-El Inca (CEI)

El segmento de falla Carcelén - El Inca se extiende a partir del norte de la parroquia San Isidro del Inca hasta los barrios septentrionales de la parroquia de Carcelén. A diferencia de las demás lomas, que pertenecen a las fallas ciegas inversas Quito, la loma CEI no alcanza grandes elevaciones; sin embargo, existe una colina apreciable en el sector de Collaloma.

Tabla 6: Valores  $M$ ,  $N$  y ajuste por mínimos cuadrados, segmento CEI.

ID	Rango de magnitud	$M$	Nº eventos / (Años)	$\lambda$ (1/años)	$\lambda$ acumulado (1/año) [N]	logY	X·logY	$X^2$
1	2.6 - 3	2.8	1 / (24)	0.042	0.083	-1.079	-3.022	7.840
2	3.1 - 3.5	3.3	0 / (24)	0.000	0.042	-1.380	-4.555	10.89
3	3.6 - 4	3.8	0 / (24)	0.000	0.042	-1.380	-5.245	14.44
4	4.1 - 4.5	4.3	1 / (24)	0.042	0.042	-1.380	-5.935	18.49
$\Sigma =$						-5.220	-18.756	51.66

En la Tabla 6 se registra un compendio de los valores necesarios en el cálculo de la recurrencia sísmica; aplicando las ecuaciones (1.4) y (1.5) se obtiene:  $a = -0.664$ ,  $b = 0.181$  y  $\beta = b \cdot \ln(10) = 0.417$ . La Figura 12 presenta la relación de recurrencia en la zona fuente CEI.

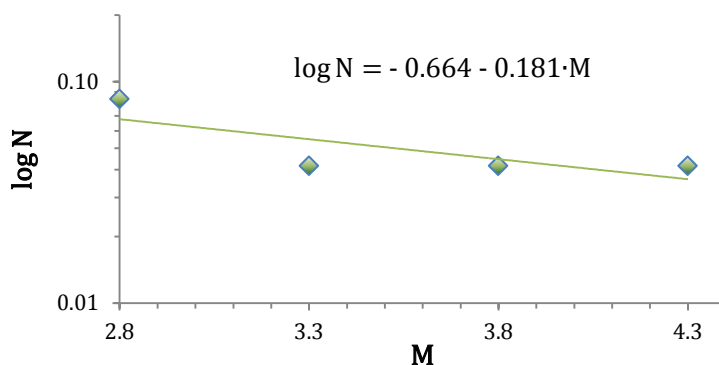


Figura 12: Relación de recurrencia, segmento Carcelén-El Inca.

Por otra parte, en el periodo 1990 - 2014, no se localizaron epicentros de sismos en el segmento Puengasí; por lo tanto no fue posible hallar una relación de recurrencia asociada a este segmento. El plano de ruptura estimado para el segmento Puengasí es de 259 km<sup>2</sup>, abarcado el Sur, Centro Sur y parte del Centro de Quito.

En conclusión, mediante el análisis de los sismos registrados (entre 1990 y 2014) en la capital ecuatoriana, se conoce que existe un sismo de magnitud Mw 5 cada 24 años. Además, se han presentado más de 20 sismos con magnitudes de cercanas a 4. Por su parte, no se observa un patrón en la profundidad focal, más bien las profundidades hipocentrales oscilan indistintamente hasta los 23 kilómetros. Finalmente, los segmentos de mayor sismicidad en los últimos años son Bellavista-Catequilla e Ilumbisí-La Bota. No se observa una sismicidad considerable en el segmento Puengasí, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que dicho segmento de falla esté acumulando energía.

## 2.4 El sismo del 12 de Agosto de 2014.

En el mes de agosto de 2014, los habitantes de la ciudad de Quito se alarmaron por un sismo de magnitud 5.1, registrado a las 14:58 hora local; la localización del epicentro y profundidad focal del sismo principal se indican en la Tabla 7.

Tabla 7: Datos del sismo de 12/08/2014.

<b>Magnitud Mw:</b>	<b>5.1</b>
<b>Provincia:</b>	Pichincha
<b>Latitud:</b>	-0.05°
<b>Longitud:</b>	-78.42°
<b>Profundidad focal</b>	5 km

Fuente: (IG-EPN, 2014)

El epicentro del sismo principal se localizó en la parte norte de la ciudad de Quito, entre Calderón y Pomasqui; efectivamente, al tener un foco superficial (poco profundo), el evento está asociado al segmento de falla ciega Bellavista-Catequilla. Una vez más se evidenció el potencial sísmico que tiene el Sistema de Fallas Ciegas de Quito.

Los sismos asociados a estas fallas inversas son de tipo impulsivo y tienen las siguientes características: son de corta duración; causan demasiado daño en la zona epicentral cuando la magnitud es mayor que 6, pero se atenúan muy rápidamente con la distancia; evidenciándose de esta manera, una ligera sensación de temblor en los valles de los Chillos y de Tumbaco, que se encuentran aproximadamente a 30 km del epicentro (Aguiar, *et al.*, 2014).

El área del plano de ruptura asociado a este evento principal fue evaluado por Aguilar *et al.* (2014), establecieron un área de 12.6 km<sup>2</sup> y una longitud superficial de ruptura de 2.9 km, tal como se plantea en la Figura 13.



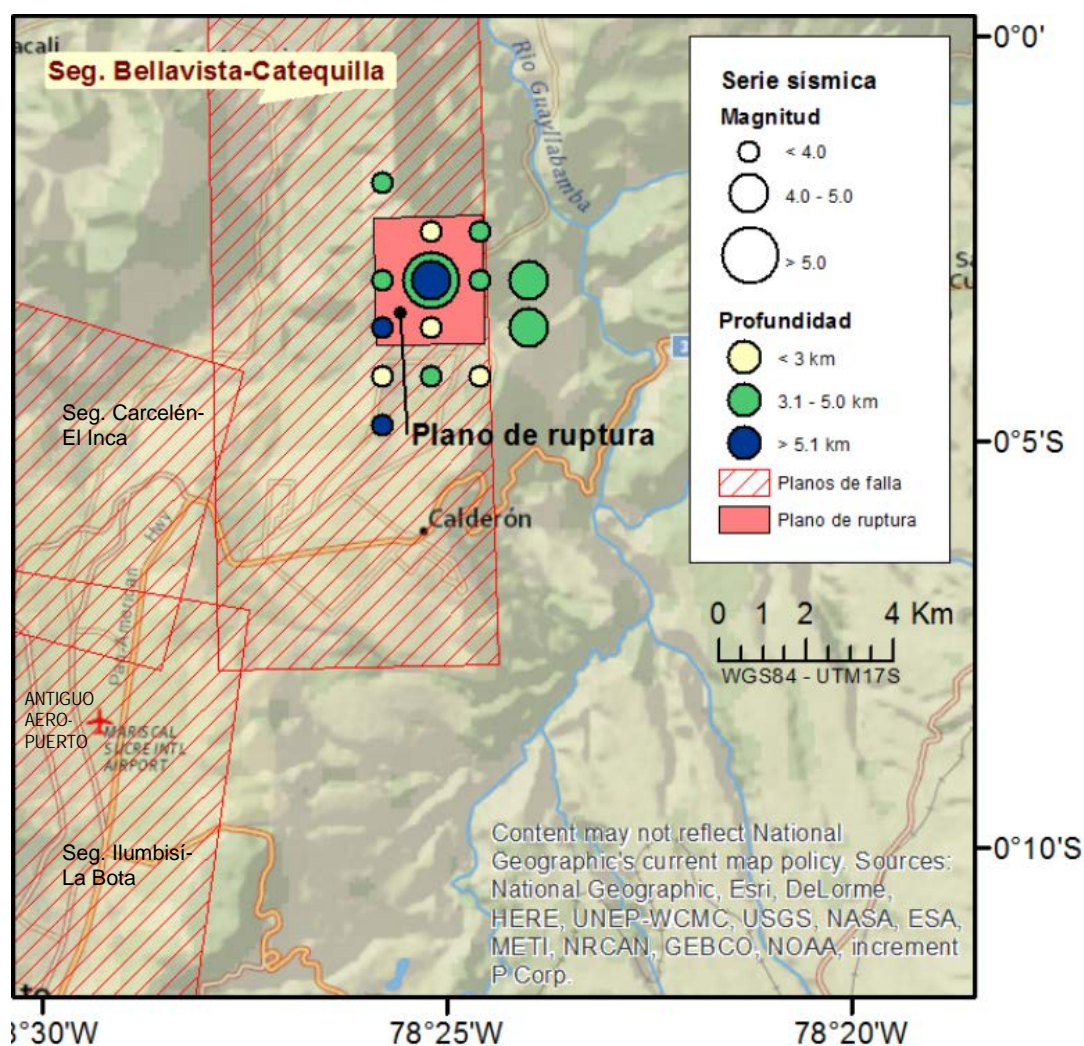


Figura 13: Sismo principal, réplicas y plano de ruptura del sismo 12/08/2014.

Fuente: (Aguiar, *et al.*, 2014).

En lo que se refiere a los daños ocasionados por el sismo de agosto, se presentaron derrumbes en las canteras y lomas de San Antonio de Pichincha, Pomasqui y Calderón; paralelamente una nube espesa de polvo se divisó desde diferentes sitios de la capital ecuatoriana, especialmente por los deslizamientos suscitados a lo largo de la Vía Calderón-Guayllabamba, como consecuencia, la vía se cerró durante varios meses. Las operaciones del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre se suspendieron por algunas horas, el ECU911 informó que 64 viviendas resultaron afectadas en Pomasqui, mientras que la Secretaría de Gestión de Riesgos reportó daños en la mampostería del hospital San Francisco, ubicado en Carcelén.

La máxima intensidad evaluada fue de 6 EMS en Pusuquí (Parroquia Pomasqui) y sus sectores aledaños. Esta intensidad corresponde a daños leves (no estructurales) a nivel de mampostería (fisuras delgadas en paredes) en muchas edificaciones de bloque, ladrillo y mampostería con bajo nivel de confinamiento (Singaicho, 2014).

Dada la condición impulsiva del reciente sismo de 2014 y teniendo en cuenta que fue un evento de magnitud moderada asociada a las fallas ciegas de Quito; la ciudadanía debe estar preparada para un escenario mucho más grave, al originarse un posible evento de mayor magnitud; por esta razón se hace imprescindible conocer: el movimiento del suelo en varios lugares del Centro Norte de Quito y los efectos en las estructuras. Atendiendo a esto, en la presente investigación se utilizan modelos de predicción de movimiento del suelo (GMPE, del inglés Ground Motion Prediction Equation) o también llamados modelos de movimientos fuertes.

El efecto en las estructuras es medido por medio de espectros de respuesta, que proporcionan las amplitudes máximas esperadas para diferentes periodos del movimiento (Benito *et al.*, 1996).

Los modelos de movimientos fuertes empleados se formularon a partir de registros sísmicos, estos registros provienen de estaciones sísmicas localizadas en regiones tectónicamente activas de la corteza, al igual que Quito.

Cada modelo contiene un rango de incertidumbre que es formulada mediante desviaciones estándar, esta incertidumbre procede principalmente: del rango de magnitud adoptado, el error intra-evento e inter-evento, la respuesta lineal y no lineal del sitio de interés o por el número limitado de registros considerados.

De manera ilustrativa, en la Figura 14 se presenta la incertidumbre de los modelos, en la cual se ha graficado PGA y la distancia a la fuente (que origina el sismo); se aprecia que la aceleración máxima del suelo (PGA) disminuye conforme se distancia de la fuente, a esta relación se conoce como atenuación del movimiento.

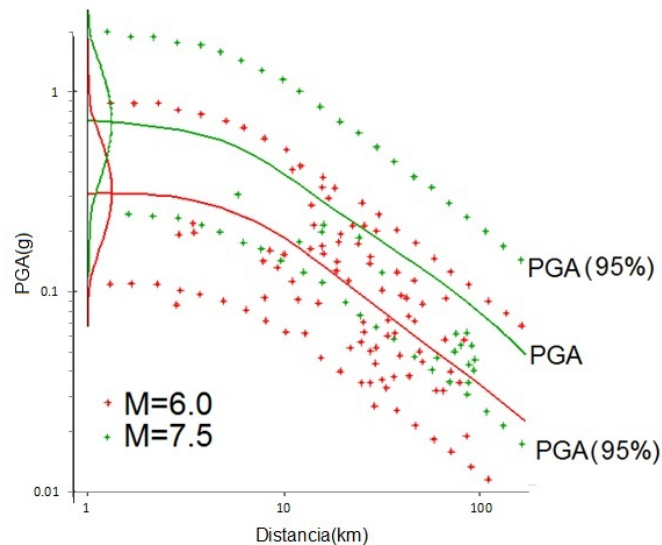


Figura 14: Confiabilidad de los modelos

Se observa claramente que para un sismo de magnitud 7.5 analizado, los modelos de movimientos fuertes proporcionan un valor medio de las aceleraciones del suelo, esto es con un nivel de confiabilidad del 50%. Al incluir la incertidumbre, el nivel de confiabilidad aumenta a un 84% o a un 95%.

En los próximos capítulos se analizarán tres modelos de predicción de movimiento del suelo, con los cuales se obtendrán espectros de respuesta; por lo tanto, al utilizar tres modelos diferentes, la predicción de los efectos en las estructuras del Centro Norte de Quito será mucho más precisa. Dos de los modelos se realizaron especialmente para la región oeste de Estados Unidos y el tercer modelo para zonas de Japón. Sin embargo, estos modelos utilizan registros de eventos sísmicos de todo el mundo; de modo que pueden ser empleados en cualquier región tectónicamente activa.

Antes de plantear los modelos, es necesario conocer su origen e importancia de las investigaciones llevadas a cabo por varias organizaciones, dichas investigaciones tienen la finalidad de reducir el efecto sísmico en las estructuras.

En el año 2003, el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico de Estados Unidos (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER por sus siglas en inglés), inicia un programa de investigación, con el objetivo de desarrollar una nueva generación de relaciones de atenuación para sismos superficiales en regiones tectónicamente activas de la corteza (Bozorgnia, *et al.*, 2014); dicho programa se denominó *Next Generation Attenuation*, más conocido como NGA por sus siglas en inglés.

La primera fase del programa NGA concluyó en el año 2008 con trascendentales resultados, en la cual se incluye una amplia base de datos de movimientos del suelo registrados en todo el mundo y un conjunto de GMPEs para movimiento horizontal (Power, *et al.*, 2008). A esta fase se la denominó NGA-West1.

Varias aplicaciones de los modelos NGA-West1, es decir del año 2008, se han realizado en el Ecuador. Siendo extremadamente importante la actualización y utilización de los modelos de segunda fase: NGA-West2.

Los principales propósitos de los modelos NGA-West2 se resumen en los siguientes tópicos (Campbell & Bozorgnia, 2013):

- Actualizar los modelos NGA-West1 para su utilización en sismos moderados y grandes.
- Extender los modelos a pequeñas magnitudes, tal como Mw 3.0.
- Desarrollar GMPEs para la componente vertical.

- Formular un modelo para ajustar el espectro de respuesta con 5% de amortiguamiento a valores de amortiguamiento entre 0.5% y 30%.
- Explorar los efectos de directividad sísmica de la fuente.
- Desarrollar modelos para ajustar la componente horizontal media a una componente de polarización (direccionalidad).
- Establecer modelos para incorporar la incertidumbre epistémica.
- Actualizar los efectos de respuesta lineal y no lineal de sitio.
- Evaluar los efectos ocasionados por el bloque levantado (hanging-wall).
- Aplicar los modelos en regiones tectónicamente activas alrededor del mundo, especialmente en el Oeste de Estados Unidos.

Los modelos de NGA-West2 necesitan cumplir los siguientes requerimientos para ser utilizados dentro de la comunidad ingenieril (Campbell & Bozorgnia, 2013):

- Deben incluir intensidades medibles de movimiento del suelo como: PGA, PGV o el espectro de pseudo-aceleración absoluta horizontal para el 5% de amortiguamiento (PSA) en periodos comprendidos entre 0 y 10 segundos.
- Deben evaluar la componente media horizontal definida como la dirección de rotación media (RotD50), así como la componente horizontal para la máxima dirección de rotación (RotD100); aunque, este último requerimiento es cubierto por los grupos de trabajo de direccionalidad del proyecto NGA-West2.
- Ser válidos para sismos corticales poco profundos, con mecanismos de falla inversa, normal o transcurrente en regiones tectónicamente activas.

- Ser válidos para magnitudes entre 3.0 y 8.5, y distancias del sitio a la fuente entre 0 y 200 km.
- Deben incorporar la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30m de profundidad ( $V_{s30}$ ), como un parámetro primordial del sitio de interés.

## CAPÍTULO III

### MODELO DE CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013)

#### 3.1 Descripción del Estudio

En el año 2013, Kenneth Campbell y Yousef Bozorgnia publicaron un estudio basado en la predicción del movimiento del suelo (GMPE, del inglés Ground Motion Prediction Equation) originado por eventos corticales superficiales; siendo válida su aplicación en cualquier región tectónicamente activa de la corteza continental. En efecto, el estudio denominado por sus iniciales como CB13, actualiza y reemplaza la GMPE propuesta en el año 2008, por los mismos autores.

Cabe agregar que el estudio de Campbell y Bozorgnia del año 2008 (CB08), utiliza la base de datos de movimientos del suelo PEER NGA-West1, mientras que el modelo CB13 aplica la actualizada base de datos PEER NGA-West2.

El modelo CB13 presenta una ecuación general para la componente horizontal media (RotD50), en la que se incluye: la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima del suelo (PGV) y las ordenadas espectrales de pseudo- aceleración absoluta para un amortiguamiento del 5% (PSA) en periodos que oscilan entre 0.01 a 10 segundos. CB13 admite magnitudes de momento que varían desde 3.3 a 8.5, dependiendo del mecanismo de falla y distancias del sitio a la fuente de hasta 300 kilómetros.

El modelo analiza las siguientes funciones: magnitud del sismo, atenuación geométrica (en sitios cercanos a la fuente), mecanismo de falla (tipo de falla), efecto hanging-wall, efecto de sitio, profundidad focal, ángulo de buzamiento (inclinación) del plano de ruptura, atenuación anelástica (en sitios lejanos a la fuente) y el efecto de propagación de la onda 3D en la

cuenca donde se emplaza el sitio de interés. Tal como se ha visto, el Centro Norte de Quito se encuentra en la cuenca El Batán, que contiene sedimentos volcanoclásticos del periodo Cuaternario (Alvarado, *et al.*, 2014).

La base de datos de movimientos del suelo NGA-West2, contiene más de 21 000 registros sísmicos de todo el mundo, en las tres componentes, con magnitudes de momento que oscilan entre 3 y 7.9. Luego de aplicar varios criterios de selección, se estableció una base de datos para CB13 de **15 521 registros** pertenecientes a 322 sismos.

La base de datos de Campbell y Bozorgnia (2013) contiene 7208 registros cercanos a la fuente ( $R_{rup} < 80$  km) y 8313 registros lejanos a la fuente ( $80 < R_{rup} \leq 500$  km); los autores utilizaron estos últimos registros para evaluar la atenuación anelástica. En la Figura 15 se indica la distribución de los 15 521 registros seleccionados para hallar la ecuación GMPE, el eje de las abscisas representa la distancia del sitio a la fuente y el de las ordenadas es la magnitud de momento  $M_w$ .

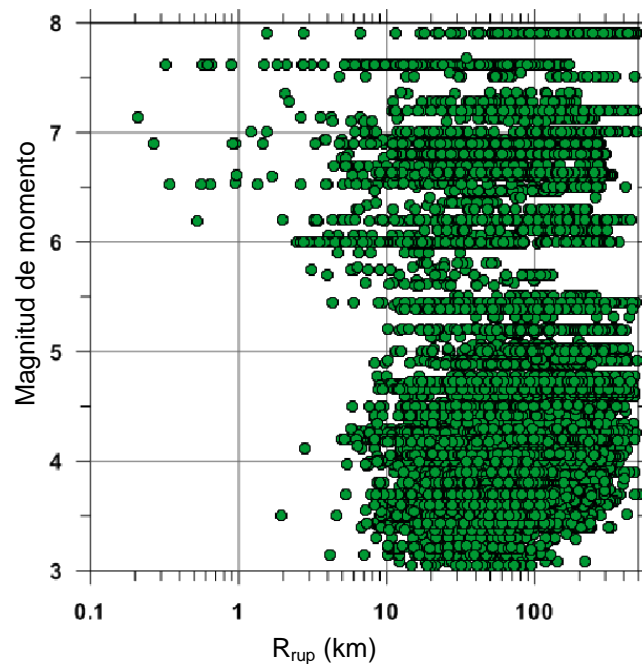


Figura 15: Base de datos del modelo CB13.

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013).



Resulta oportuno destacar que en el modelo de Campbell y Bozorgnia (2008) solamente se utilizaron 1561 registros pertenecientes a 64 sismos.

Conjuntamente, en el modelo CB13, los registros cercanos a la fuente datan a partir de 1966; en cambio, los registros lejanos a la fuente proceden desde 1941. El evento El Mayor-Cucapah, México de 2010 (Mw 7.0), posee más de 300 registros en esta base de datos.

### **3.2 Clasificación de suelos del modelo CB13.**

El modelo se basa en la clasificación de suelos estadounidense para diseño sísmico, esta clasificación fue establecida por el Programa Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico (National Earthquake Hazards Reduction Program) más conocido por sus siglas en inglés como NEHRP. El programa NEHRP se creó en 1977, con el objetivo de investigar, desarrollar e implementar de estrategias que puedan reducir los efectos sísmicos en Estados Unidos; de hecho, cuatro agencias federales (FEMA, NIST, NSF, y USGS) trabajan en colaboración junto con NEHRP. (FEMA, 2014).

NEHRP realiza publicaciones sobre: métodos de diseño, resultados de investigaciones, recomendaciones para normativas sísmicas y códigos de construcción. Las recomendaciones sísmicas de NEHRP han sido relevantes, por lo cual se han incluido en normativas como ASCE o el Código Internacional de Construcción (BSSC, 2003).

Ahora bien, en el modelo CB13 se utiliza exclusivamente la velocidad media de la onda de corte  $V_{s30}$ , a fin de establecer una relación con el tipo de suelo, ver Tabla 8. Si en un sitio de interés se desconoce el valor de  $V_{s30}$ , este puede ser estimado a partir de la clasificación de suelos de NEHRP; a partir de unidades geológicas; o de características geotécnicas y geomorfológicas. (Campbell & Bozorgnia, 2013).

En referencia a los valores de  $V_{s30}$  en la clasificación de suelos de NEHRP, se puede utilizar tanto los valores límites del tipo de suelo; como la media geométrica de los valores límites. Cuando no se conoce exactamente el valor de  $V_{s30}$ , los autores recomiendan utilizar cantidades acordes al modelo, estas cantidades se especifican en la cuarta columna de la Tabla 9.

Tabla 8: Categorías de suelos NEHRP.

Tipo de Suelo	$\bar{V}_s$	$\bar{N}$	$\bar{S}_u$
<b>A. Roca dura</b>	> 1500 m/s	-	-
<b>B. Roca</b>	760 m/s a 1500 m/s	-	-
<b>C. Suelo muy denso y roca blanda</b>	360 m/s a 760 m/s	>50	> 2,000 psf
<b>D. Suelo rígido</b>	180 m/s a 360 m/s	15 a 50	1,000 a 2,000 psf
<b>E. Perfil de suelo con:</b>	< 180 m/s	<15	<1,000 psf
	Perfil que contiene un espesor mayor a 3 m. de arcillas blandas, que cumple con las condiciones:		
	-Índice de plasticidad $PI > 20$ ,		
	-Contenido de humedad $w \geq 40\%$ ,		
	-Resistencia al corte sin drenaje $\bar{S}_u < 500$ psf		
<b>F. Suelos que requieren una evaluación en el sitio del proyecto.</b>			

Fuente: (BSSC, 2003).

$\bar{V}_s$  es la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad, debajo del sitio de interés, la cual se denomina  $V_{s30}$ .  $\bar{N}$  es el valor medio del número de golpes del ensayo de penetración estándar y  $\bar{S}_u$  es la resistencia media al corte sin drenaje.

Es importante tener en cuenta, que el valor de  $V_{s30}$ , no se puede calcular como la media aritmética de las velocidades de onda de corte de los perfiles de suelo. Más bien,  $V_{s30}$  se calcula aplicando la ecuación (2.1).

$$V_{s30} = \bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n \frac{di}{V_{si}}} \quad (2.1)$$

Donde  $n$  es el número de capas o perfiles de suelo,  $d_i$  es el espesor del perfil de suelo  $i$ , en metros;  $V_{si}$  es la velocidad de la onda de corte del perfil  $i$ , en m/s. Para que  $V_{s30}$  cumpla la condición de ser una velocidad media de onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad, la sumatoria de los espesores de las capas  $\sum_{i=1}^n d_i$  debe ser igual a 30 metros.

Tabla 9: Límites, media geométrica y valores recomendados de  $V_{s30}$ .

Descripción	Límites NEHRP de $V_{s30}$	Media geométrica de los límites de cada tipo de suelo	Valores recomendados por CB13
<b>A</b> Roca dura	> 1500 m/s	-	-
<b>B</b> Roca	760 m/s a 1500 m/s	1068 m/s	1070 760
<b>C</b> Suelo muy denso y roca blanda	360 m/s a 760 m/s	523 m/s	525 360
<b>D</b> Suelo rígido	180 m/s a 360 m/s	255 m/s	255 180
<b>E</b> Arcillas blandas	< 180 m/s	-	150

No se recomienda el uso del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013) en sitios con suelo NEHRP E y F, ya que el modelo tiene un número limitado de registros con  $V_{s30} < 180$  m/s o son sitios que requieren un análisis específico del suelo. Sin embargo, el modelo es válido para velocidades  $V_{s30}$  superiores a 150 m/s, ya que posee una base teórica y los valores residuales intra-evento son despreciables. Por otra parte, existe un solo registro clasificado como categoría NEHRP A, por lo que no se debería utilizar el modelo, en sitios con velocidades mayores a 1500 m/s.

Cabe destacar que existe una tendencia a subestimar los movimientos del suelo en periodos espectrales mayores a 1 segundo, en los sitios con categoría NEHRP B, lo que significa que existe atenuación por este tipo de suelo.

### 3.3 Ecuaciones del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).

El logaritmo natural de la componente horizontal (RotD50) del movimiento de suelo de PGA, PGV y PSA es:

$$\ln Y = \begin{cases} \ln \text{PGA}; & Y < \text{PGA}, T < 0.25 \\ f_{\text{mag}} + f_{\text{dis}} + f_{\text{fit}} + f_{\text{hng}} + f_{\text{site}} + f_{\text{sed}} + f_{\text{hyp}} + f_{\text{dip}} + f_{\text{atn}}; & \text{Para otros casos} \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde PGA y PSA se obtienen en unidades de fracción de la gravedad (g) y PGV en cm/s.

#### 3.3.1 Función de magnitud:

$$f_{\text{mag}} = \begin{cases} c_0 + c_1 \cdot M; & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1 \cdot M + c_2 \cdot (M - 4.5); & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 \cdot M + c_2 \cdot (M - 4.5) + c_3 \cdot (M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 \cdot M + c_2 \cdot (M - 4.5) + c_3 \cdot (M - 5.5) + c_4 \cdot (M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (2.3)$$

El valor de  $f_{\text{mag}}$  está en función de cuatro intervalos de magnitud, permitiendo de esta manera ajustar el modelo a un sismo de pequeña o gran magnitud. En este modelo se ha complementado con el intervalo de magnitud  $M \leq 4.5$ , comparativamente con el modelo del año 2008, el cual considera solamente tres rangos de magnitud.

Es evidente entonces que el intervalo del modelo de 2008 ( $M \leq 5.5$ ), es menos preciso en la aplicación de pequeñas magnitudes, ya que tiende a sobredimensionar la magnitud del sismo.

#### 3.3.2 Función de la atenuación geométrica:

$$f_{\text{dis}} = (c_5 + c_6 \cdot M) \cdot \ln \left( \sqrt{R_{\text{rup}}^2 + c_7^2} \right) \quad (2.4)$$

La función  $f_{dis}$  relaciona la distancia entre la fuente y el sitio de interés, por lo tanto, describe una atenuación geométrica en el movimiento del suelo;  $f_{dis}$  incorpora la dependencia de la magnitud a través del coeficiente  $c_6$ .

La función  $f_{dis}$  identifica los efectos de la duración del sismo, así como cualquier atenuación anelástica existente en distancias  $R_{rup} \leq 80$  km. Cabe recalcar que la base de datos cercana a la fuente, limita  $R_{rup}$  a 80km.

### 3.3.3 Función del tipo de falla:

$$f_{ft} = f_{ft,F} \cdot f_{ft,M} \quad (2.5)$$

$$f_{ft,F} = c_8 \cdot F_{RV} + c_9 \cdot F_{NM} \quad (2.6)$$

$$f_{ft,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases} \quad (2.7)$$

La función del tipo de falla en el modelo CB08, se fundamenta en la profundidad  $Z_{tor}$ , ya que este parámetro puede representar el afloramiento de la ruptura en la superficie; en cambio, en el modelo del año 2013,  $Z_{tor}$  fue excluido como parámetro del tipo de falla. Los efectos del tipo de falla no son los mismos para sismos de gran magnitud que para sismos de pequeña magnitud, por esta razón se incluye el parámetro  $f_{ft,M}$ . El parámetro  $f_{ft,F}$  considera un mecanismo de falla inverso mediante el coeficiente  $c_8$  y un mecanismo normal, mediante  $c_9$ .

### 3.3.4 Función del efecto hanging-wall:

$$f_{hng} = c_{10} \cdot f_{hng,Rx} \cdot f_{hng,Rrup} \cdot f_{hng,M} \cdot f_{hng,Z} \cdot f_{hng,\xi} \quad (2.8)$$

$$f_{hng,Rx} = \begin{cases} 0; & R_x < 0 \\ f_1(R_x); & 0 \leq R_x < R_1 \\ \max[f_2(R_x), 0]; & R_x \geq R_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$f_1(R_x) = h_1 + h_2 \cdot (R_x/R_1) + h_3 \cdot (R_x/R_1)^2 \quad (2.10)$$

$$f_2(R_x) = h_4 + h_5 \cdot \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right) + h_6 \cdot \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right)^2 \quad (2.11)$$

$$R_1 = W \cdot \cos(\delta) \quad (2.12)$$

$$R_2 = 62 \cdot M - 350 \quad (2.13)$$

$$f_{hng, R_{rup}} = \begin{cases} 1; & R_{rup} = 0 \\ (R_{rup} - R_{jb}) / R_{rup}; & R_{rup} > 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$f_{hng, M} = \begin{cases} 0; & M \leq 5.5 \\ (M - 5.5) [1 + a_2 \cdot (M - 6.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ 1 + a_2 \cdot (M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (2.15)$$

$$f_{hng, z} = \begin{cases} 1 - 0.06 Z_{tor}; & Z_{tor} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{tor} > 16.66 \end{cases} \quad (2.16)$$

$$f_{hng, \delta} = (90 - \delta) / 45 \quad (2.17)$$

El efecto hanging-wall es la amplificación del movimiento del suelo al evaluar un sitio de interés sobre el bloque levantado, la función  $f_{hng}$  considera una dependencia de  $W$ ,  $\delta$ ,  $M$ ,  $R_x$ ,  $R_{rup}$ ,  $R_{jb}$  y  $Z_{tor}$  en la amplificación del movimiento del suelo.

Los autores consiguieron resultados favorables en sitios localizados sobre el plano de ruptura cosísmico, pero obtuvieron valores muy altos cuando los sitios estaban localizados fuera del plano de ruptura; por lo tanto se incluyó la función  $f_{hng, R_x}$  en el modelo del año 2013. Con esta actualización del efecto hanging-wall, se logra afinar la transición entre el hanging-wall y footwall, evitando así la predicción abrupta de movimientos del suelo en sitios localizados a lo largo de la traza de falla.

Según se ha visto en el capítulo anterior, el Centro Norte de Quito se encuentra sobre el hanging-wall y a la misma vez sobre el plano de ruptura cosísmico.

Con respecto a los parámetros restantes,  $f_{\text{hng},M}$  restringe el efecto hanging-wall en pequeñas magnitudes ( $M \leq 5.5$ ) y  $f_{\text{hng},Z}$  limita grandes profundidades del plano de ruptura ( $Z_{\text{tor}} \leq 16.66$ ); de hecho, se ha encontrado que cuando  $Z_{\text{tor}} > 16.66$  los valores son insignificantes. La Tabla 10 contiene los coeficientes  $a_2$  y  $h_i$ , intervinientes en el efecto hanging-wall.

Tabla 10: Coeficientes de la función hanging-wall del modelo CB13.

T (seg)	$a_2$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$
0.01	0.168	0.242	1.471	-0.714	1	-0.336	-0.270
0.02	0.166	0.244	1.467	-0.711	1	-0.339	-0.263
0.03	0.167	0.246	1.467	-0.713	1	-0.338	-0.259
0.05	0.173	0.251	1.449	-0.701	1	-0.338	-0.263
0.075	0.198	0.26	1.435	-0.695	1	-0.347	-0.219
0.1	0.174	0.259	1.449	-0.708	1	-0.391	-0.201
0.15	0.198	0.254	1.461	-0.715	1	-0.449	-0.099
0.2	0.204	0.237	1.484	-0.721	1	-0.393	-0.198
0.25	0.185	0.206	1.581	-0.787	1	-0.339	-0.21
0.3	0.164	0.21	1.586	-0.795	1	-0.447	-0.121
0.4	0.16	0.226	1.544	-0.77	1	-0.525	-0.086
0.5	0.184	0.217	1.554	-0.77	1	-0.407	-0.281
0.75	0.216	0.154	1.626	-0.78	1	-0.371	-0.285
1	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
1.5	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
2	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
3	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
4	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
5	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
7.5	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
10	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756
PGA	0.167	0.241	1.474	-0.715	1	-0.337	-0.27
PGV	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.756

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013)

### 3.3.5 Función de respuesta del sitio:

$$f_{\text{site}} = f_{\text{site,G}} + S_J \cdot f_{\text{site,J}} \quad (2.18)$$

$$f_{\text{site,G}} = \begin{cases} c_{11} \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) + k_2 \cdot \left\{ \ln\left[A_{1100} + c \cdot \left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right)^n\right] - \ln[A_{1100} + c] \right\}; & V_{s30} \leq k_1 \\ (c_{11} + k_2 \cdot n) \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & V_{s30} > k_1 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$f_{\text{site,J}} = \begin{cases} (c_{12} + k_2 \cdot n) \cdot \left[ \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) - \ln\left(\frac{200}{k_1}\right) \right]; & V_{s30} \leq 200 \\ (c_{13} + k_2 \cdot n) \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & \text{demás } V_{s30} \end{cases} \quad (2.20)$$

La función  $f_{\text{site}}$  analiza el comportamiento del suelo del sitio de interés, relacionándolo a una clasificación de suelo mediante el parámetro  $V_{s30}$ ; el parámetro  $f_{\text{site,J}}$  se emplea específicamente para sitios en Japón mediante la variable indicadora  $S_J$ ; mientras que para sitios emplazados fuera de Japón automáticamente se aplica  $f_{\text{site,G}}$ .

No se recomienda emplear el modelo CB13 en velocidades de onda de corte superiores a  $V_{s30} > 1500 \text{ m/s}$ ; ya que representa el límite entre el tipo de suelo NEHRP A y NEHRP B. (BSSC, 2009).

Los coeficientes que vinculan el comportamiento no lineal del sitio son  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $n$  y  $c$ . En cambio, los coeficientes empíricos que relacionan el comportamiento lineal del sitio son  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  y  $c_{13}$ .

Walling *et al.* (2008) publicaron dos grupos de coeficientes no lineales para la respuesta del sitio, a partir de dos estudios anteriores; estos coeficientes representan las propiedades dinámicas del suelo. Los estudios que precedieron a Walling *et al.* (2008) son: el primero, desarrollado por EPRI (1993) y el segundo, conocido como *Peninsular Range* (PR, por sus siglas en inglés) o curvas PEN desarrollado por Silva *et al.* (1999). Para el modelo CB13 se ha seleccionado los coeficientes PR, ya que estos factores consideran los efectos de sitio en diferentes regiones del mundo.



### 3.3.6 Función que considera el efecto de la cuenca sedimentaria:

$$f_{\text{sed}} = \begin{cases} (c_{14} + c_{15} \cdot S_J) \cdot (Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16} \cdot k_3 \cdot e^{-0.75} [1 - \exp(-0.25 \cdot \{Z_{2.5} - 3\})]; & Z_{2.5} > 3 \end{cases} \quad (2.21)$$

El parámetro  $Z_{2.5}$  caracteriza de mejor manera las profundidades de las cuencas californianas comparado a la profundidad  $Z_{1.0}$ , esta última es la profundidad a la cual se obtiene una velocidad de la onda de corte de 1 km/s.

La función  $f_{\text{sed}}$  contiene tres intervalos que son dependientes de la profundidad del sedimento  $Z_{2.5}$ . Si la profundidad  $Z_{2.5} < 1$  km, el modelo encuentra un término para modelar la propagación de la onda sísmica en los sedimentos superficiales; si la profundidad  $Z_{2.5}$  está entre 1 y 3 km no se considera el efecto de la cuenca. Si la profundidad  $Z_{2.5} > 3$  km se emplea una ecuación compleja para modelar los efectos de la cuenca en 3D.

En profundidades  $Z_{2.5} < 1$  km, los efectos de la cuenca no son iguales para Japón que otras regiones del mundo; por lo cual, el coeficiente  $c_{15}$  define los efectos de las cuencas de Japón mediante la variable indicadora  $S_J$ . Para otras regiones del mundo se emplea los coeficientes  $c_{14}$ .

### 3.3.7 Función de la profundidad focal:

$$f_{\text{hyp}} = f_{\text{hyp,H}} \cdot f_{\text{hyp,M}} \quad (2.22)$$

$$f_{\text{hyp,H}} = \begin{cases} 0; & Z_{\text{hyp}} \leq 7 \\ Z_{\text{hyp}} - 7; & 7 < Z_{\text{hyp}} \leq 20 \\ 13; & Z_{\text{hyp}} > 20 \end{cases} \quad (2.23)$$

$$f_{\text{hyp,M}} = \begin{cases} c_{17}; & M \leq 5.5 \\ [c_{17} + (c_{18} - c_{17}) \cdot (M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18}; & M > 6.5 \end{cases} \quad (2.24)$$

Los autores examinaron la dependencia de  $Z_{\text{tor}}$  y  $Z_{\text{hyp}}$  en la función de profundidad focal, comprobando que al usar  $Z_{\text{tor}}$  en sismos de gran magnitud, se obtienen diferencias significativas en comparación con la aplicación de  $Z_{\text{hyp}}$ ; por tal razón, CB13 utiliza únicamente el valor de  $Z_{\text{hyp}}$ .

El parámetro  $f_{\text{hyp,H}}$  establece incrementos en el movimiento del suelo a profundidades  $Z_{\text{hyp}} > 7$  km; los eventos de mayor profundidad en la base de datos bordean los 20 km, por lo cual, el efecto de la profundidad focal está limitada en los 20 km. El parámetro  $f_{\text{hyp,M}}$  examina la dependencia de la magnitud del sismo; los autores han encontrado que el movimiento del suelo es mayor en eventos de pequeña magnitud (en periodos cortos) en comparación a los eventos de gran magnitud, por tal motivo se utilizan los coeficientes  $c_{17}$  y  $c_{18}$ .

### 3.3.8 Función del ángulo de buzamiento:

$$f_{\text{dip}} = \begin{cases} c_{19} \cdot \delta; & M \leq 4.5 \\ c_{19} \cdot (5.5 - M) \cdot \delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases} \quad (2.25)$$

Los autores no encontraron una relación de amplificación sísmica entre el buzamiento y el mecanismo de falla; pero sí, una fuerte dependencia del ángulo  $\delta$  en pequeñas y moderadas magnitudes, lo cual se expresa mediante el coeficiente  $c_{19}$ . Para sismos de gran magnitud la dependencia con el ángulo  $\delta$  es despreciable.

### 3.3.9 Función de la atenuación anelástica:

$$f_{\text{atn}} = \begin{cases} (c_{20} + \Delta c_{20}) \cdot (R_{\text{rup}} - 80); & R_{\text{rup}} > 80 \\ 0; & R_{\text{rup}} \leq 80 \end{cases} \quad (2.26)$$

La disminución no lineal del movimiento del suelo con grandes distancias se conoce como atenuación anelástica. La función  $f_{\text{atn}}$  considera los efectos

de atenuación más allá de los 80 km de distancia a la fuente, que es la distancia máxima (cercana a la fuente) considerada en la base de datos.

Aunque en los análisis probabilísticos de peligrosidad sísmica, generalmente se considera eventos que estén a menos de 80 km del sitio de interés, CB13 han incluido este parámetro para estimar el movimiento del suelo en sitios de baja sismicidad, pero que podrían ser afectados por grandes sismos distantes. Para obtener los coeficientes de atenuación anelástica se utilizó una base de datos de movimientos del suelo lejana a la fuente ( $80 < R_{rup} < 500$  km).

Tabla 11: Coeficientes de la atenuación anelástica regional.

T (seg)	C <sub>20</sub>	ΔC <sub>20</sub>		
		CA	JP	CH
0.01	-0.0055	0	-0.0035	0.0036
0.02	-0.0055	0	-0.0035	0.0036
0.03	-0.0057	0	-0.0034	0.0037
0.05	-0.0063	0	-0.0037	0.004
0.075	-0.007	0	-0.0037	0.0039
0.1	-0.0073	0	-0.0034	0.0042
0.15	-0.0069	0	-0.003	0.0042
0.2	-0.006	0	-0.0031	0.0041
0.25	-0.0055	0	-0.0033	0.0036
0.3	-0.0049	0	-0.0035	0.0031
0.4	-0.0037	0	-0.0034	0.0028
0.5	-0.0027	0	-0.0034	0.0025
0.75	-0.0016	0	-0.0032	0.0016
1	-0.0006	0	-0.003	0.0006
1.5	0	0	-0.0019	0
2	0	0	-0.0005	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
PGA	-0.0055	0	-0.0035	0.0036
PGV	-0.0017	0	-0.0006	0.0017

Nota: CA representa California y regiones tectónicamente activas similares, JP representa Japón e Italia, y CH representa el este de China (coeficientes calculados en base al sismo Wenchuan, China de 2008).

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013).

Los coeficientes  $c_{20}$  de la atenuación anelástica, tomaron como base California y otras regiones similares como Taiwan y el Medio Oriente; en consecuencia  $\Delta c_{20}$  (California) tiene valores de cero. Mientras que para Japón e Italia, la atenuación anelástica es alta, por lo tanto, el movimiento del suelo disminuye, viéndose reflejado en los valores negativos de  $\Delta c_{20}$  JP. El este de China contiene una baja atenuación anelástica incluso menor que la región de California, por consiguiente sus valores  $\Delta c_{20}$  son positivos. Los coeficientes  $c_{20}$  y  $\Delta c_{20}$  se especifican en la Tabla 11.

### 3.3.10 Definición de los parámetros:

Los parámetros que intervienen en las ecuaciones del modelo CB13 se detallan a continuación:

- M es la magnitud de momento Mw.
- $R_{rup}$  (km) es la distancia más cercana al plano de ruptura cosísmico.
- $R_{jb}$  (km) es la distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie (distancia Joyner-Boore).
- $R_x$  (km) es la distancia horizontal más cercana (proyección en la superficie) al borde superior del plano de ruptura medido perpendicularmente desde la dirección del rumbo promedio, donde  $R_x$  es negativo en la dirección footwall (bloque deprimido) y positivo en el hanging-wall (bloque levantado). (Ancheta, *et al.*, 2013).
- W (km) es el ancho del plano de ruptura.
- $\lambda$  (°) rake se define como el ángulo promedio del deslizamiento, medido en el plano de ruptura entre la dirección del rumbo y el vector de deslizamiento (Ancheta, *et al.* 2013; Lay and Wallace, 1995).
- $F_{RV}$  es una variable indicadora que representa fallas inversas e inversas oblicuas, donde  $F_{RV} = 1$  cuando  $30^\circ < \lambda < 150^\circ$  y  $F_{RV} = 0$  para otros mecanismos de falla.

- $F_{NM}$  es una variable indicadora que representa fallas normales y normales oblicuas donde  $F_{NM} = 1$  para  $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$  y  $F_{NM} = 0$  en otros mecanismos de falla.
- $Z_{tor}$  (km) es la profundidad hasta el borde superior del plano de ruptura cosísmico.
- $\delta$  ( $^\circ$ ) es el ángulo de buzamiento promedio del plano de ruptura.
- $V_{S30}$  (m/s) la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 m de profundidad (evaluada en el sitio de interés).
- $A_{1100}$  (g) es el valor previsto de PGA sobre roca, por lo tanto a una velocidad media de onda de corte  $V_{S30} = 1100$  m/s ( $PGA_{roca}$ ).
- $S_j$  es una variable indicadora que considera los efectos regionales en Japón; donde  $S_j = 1$  para los sitios ubicados en Japón y  $S_j = 0$  en otros sitios del mundo.
- $Z_{2.5}$  (km) es la profundidad debajo del sitio de interés a la cual se halla una velocidad de onda de corte de  $V_s = 2.5$  km/s (profundidad del sedimento).
- $Z_{hyp}$  (km) es la profundidad hipocentral (focal) del sismo.
- $c$  y  $n$  son coeficientes limitados teóricamente e independientes del periodo.
- $h_i$ ,  $k_i$  y  $a_2$  son coeficientes limitados teóricamente, dependientes del periodo.
- $c_i$  y  $\Delta C_{20}$  son coeficientes empíricos.

Se presenta la Figura 16 con el objeto de ilustrar los parámetros, se identifica una vista tridimensional de un bloque perteneciente a una falla ciega, el plano de ruptura no aflora en la superficie. Una excelente descripción de los parámetros utilizados en los modelos NGA-West2 se recopila en Ancheta *et al.* (2013).  $L$  es la longitud superficial de la ruptura. Los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $c_0 - c_{19}$  se compilan en la Tabla 12 y Tabla 13.

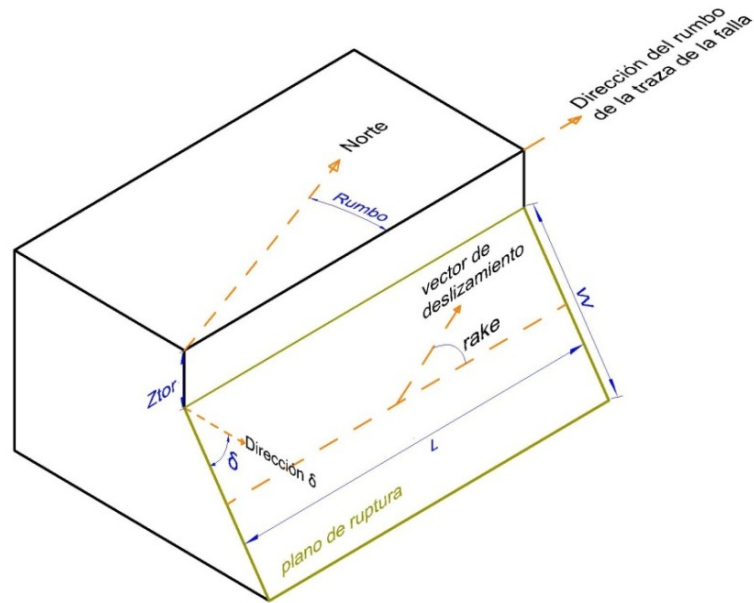


Figura 16: Representación de  $Z_{tor}$ ,  $W$ ,  $L$ ,  $\delta$  (dip) y  $\lambda$  (rake).

Tabla 12: Coeficientes  $c_i$  del modelo CB13

T (s)	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	$c_{11}$
<b>0.01</b>	-4.292	0.977	0.533	-1.485	-0.499	-2.773	0.248	6.753	0	-0.214	0.72	1.094
<b>0.02</b>	-4.271	0.976	0.549	-1.488	-0.501	-2.772	0.247	6.502	0	-0.208	0.73	1.149
<b>0.03</b>	-3.963	0.931	0.628	-1.494	-0.517	-2.782	0.246	6.291	0	-0.213	0.759	1.29
<b>0.05</b>	-3.475	0.887	0.674	-1.388	-0.615	-2.791	0.24	6.317	0	-0.244	0.826	1.449
<b>0.075</b>	-3.293	0.902	0.726	-1.469	-0.596	-2.745	0.227	6.861	0	-0.266	0.815	1.535
<b>0.1</b>	-3.666	0.993	0.698	-1.572	-0.536	-2.633	0.21	7.294	0	-0.229	0.831	1.615
<b>0.15</b>	-4.866	1.267	0.51	-1.669	-0.49	-2.458	0.183	8.031	0	-0.211	0.749	1.877
<b>0.2</b>	-5.411	1.366	0.447	-1.75	-0.451	-2.421	0.182	8.385	0	-0.163	0.764	2.069
<b>0.25</b>	-5.962	1.458	0.274	-1.711	-0.404	-2.392	0.189	7.534	0	-0.15	0.716	2.205
<b>0.3</b>	-6.403	1.528	0.193	-1.77	-0.321	-2.376	0.195	6.99	0	-0.131	0.737	2.306
<b>0.4</b>	-7.566	1.739	-0.02	-1.594	-0.426	-2.303	0.185	7.012	0	-0.159	0.738	2.398
<b>0.5</b>	-8.379	1.872	-0.121	-1.577	-0.44	-2.296	0.186	6.902	0	-0.153	0.718	2.355
<b>0.75</b>	-9.841	2.021	-0.042	-1.757	-0.443	-2.232	0.186	5.522	0	-0.09	0.795	1.995
<b>1</b>	-11.011	2.18	-0.069	-1.707	-0.527	-2.158	0.169	5.65	0	-0.105	0.556	1.447
<b>1.5</b>	-12.469	2.27	0.047	-1.621	-0.63	-2.063	0.158	5.795	0	-0.058	0.48	0.33
<b>2</b>	-12.969	2.271	0.149	-1.512	-0.768	-2.104	0.158	6.632	0	-0.028	0.401	-0.514
<b>3</b>	-13.306	2.15	0.368	-1.315	-0.89	-2.051	0.148	6.759	0	0	0.206	-0.848
<b>4</b>	-14.02	2.132	0.726	-1.506	-0.885	-1.986	0.135	7.978	0	0	0.105	-0.793
<b>5</b>	-14.558	2.116	1.027	-1.721	-0.878	-2.021	0.14	8.538	0	0	0	-0.748
<b>7.5</b>	-15.509	2.223	0.169	-0.756	-1.077	-2.179	0.178	8.468	0	0	0	-0.664
<b>10</b>	-15.975	2.132	0.367	-0.8	-1.282	-2.244	0.194	6.564	0	0	0	-0.576
<b>PGA</b>	-4.346	0.984	0.537	-1.499	-0.496	-2.773	0.248	6.768	0	-0.212	0.72	1.09
<b>PGV</b>	-2.895	1.51	0.27	-1.299	-0.453	-2.466	0.204	5.837	0	-0.168	0.305	1.713

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013).

Tabla 13: Coeficientes  $c_i$  y  $k_i$  del modelo CB13.

T (seg)	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$	$c_{15}$	$c_{16}$	$c_{17}$	$c_{18}$	$c_{19}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
0.01	2.191	1.416	-0.007	-0.207	0.39	0.0981	0.0334	0.00755	865	-1.186	1.839
0.02	2.189	1.453	-0.0167	-0.199	0.387	0.1009	0.0327	0.00759	865	-1.219	1.84
0.03	2.164	1.476	-0.0422	-0.202	0.378	0.1095	0.0331	0.0079	908	-1.273	1.841
0.05	2.138	1.549	-0.0663	-0.339	0.295	0.1226	0.027	0.00803	1054	-1.346	1.843
0.075	2.446	1.772	-0.0794	-0.404	0.322	0.1165	0.0288	0.00811	1086	-1.471	1.845
0.1	2.969	1.916	-0.0294	-0.416	0.384	0.0998	0.0325	0.00744	1032	-1.624	1.847
0.15	3.544	2.161	0.0642	-0.407	0.417	0.076	0.0388	0.00716	878	-1.931	1.852
0.2	3.707	2.465	0.0968	-0.311	0.404	0.0571	0.0437	0.00688	748	-2.188	1.856
0.25	3.343	2.766	0.1441	-0.172	0.466	0.0437	0.0463	0.00556	654	-2.381	1.861
0.3	3.334	3.011	0.1597	-0.084	0.528	0.0323	0.0508	0.00458	587	-2.518	1.865
0.4	3.544	3.203	0.141	0.085	0.54	0.0209	0.0432	0.00401	503	-2.657	1.874
0.5	3.016	3.333	0.1474	0.233	0.638	0.0092	0.0405	0.00388	457	-2.669	1.883
0.75	2.616	3.054	0.1764	0.411	0.776	-0.0082	0.042	0.0042	410	-2.401	1.906
1	2.47	2.562	0.2593	0.479	0.771	-0.0131	0.0426	0.00409	400	-1.955	1.929
1.5	2.108	1.453	0.2881	0.566	0.748	-0.0187	0.038	0.00424	400	-1.025	1.974
2	1.327	0.657	0.3112	0.562	0.763	-0.0258	0.0252	0.00448	400	-0.299	2.019
3	0.601	0.367	0.3478	0.534	0.686	-0.0311	0.0236	0.00345	400	0	2.11
4	0.568	0.306	0.3747	0.522	0.691	-0.0413	0.0102	0.00603	400	0	2.2
5	0.356	0.268	0.3382	0.477	0.67	-0.0281	0.0034	0.00805	400	0	2.291
7.5	0.075	0.374	0.3754	0.321	0.757	-0.0205	0.005	0.0028	400	0	2.517
10	-0.027	0.297	0.3506	0.174	0.621	0.0009	0.0099	0.00458	400	0	2.744
PGA	2.186	1.42	-0.0064	-0.202	0.393	0.0977	0.0333	0.00757	865	-1.186	1.839
PGV	2.602	2.457	0.106	0.332	0.585	0.0517	0.0327	0.00613	400	-1.955	1.929

Nota:  $c=1.88$  y  $n= 1.18$  para todos los periodos espectrales.

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013).

### 3.4 Incertidumbre del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).

La incertidumbre se calcula en base a un modelo de variabilidad aleatoria, esta dada por la siguiente ecuación:

$$y_{ij} = Y_{ij} + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.27)$$

Donde  $\eta_i$  es el valor residual inter-evento (entre eventos) del evento  $i$ ,  $Y_{ij}$  es la aceleración espectral media prevista del modelo CB13 y  $\varepsilon_{ij}$  es el valor residual intra-evento (dentro del evento) para el registro  $j$  del evento  $i$ .

Las variables aleatorias  $\eta_i$  y  $\varepsilon_{ij}$  tienen una media de cero y desviaciones estándar inter-evento e intra-evento respectivamente. Para un sitio de interés emplazado sobre suelo, las desviaciones estándar  $\tau_{ln Y}$  y  $\phi_{ln Y}$  simbolizan las correspondientes respuestas lineales del sitio inter-evento e intra-evento.

Respuesta lineal del suelo:

$$\tau_{ln Y} = \begin{cases} \tau_1; & M \leq 4.5 \\ \tau_2 + (\tau_1 - \tau_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \tau_2; & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\phi_{ln Y} = \begin{cases} \phi_1; & M \leq 4.5 \\ \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \phi_2; & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (2.29)$$

Donde  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\phi_1$  y  $\phi_2$  se establecen en la Tabla 14. Del mismo modo,  $\tau$  y  $\phi$  son las desviaciones finales inter-evento e intra-evento respectivamente, estas incorporan la respuesta no lineal del sitio.

$$\tau = \sqrt{\tau_{ln Y_B}^2 + \alpha^2 \cdot \tau_{ln PGA_B}^2 + 2\alpha \cdot \rho_{ln PGA, ln Y} \cdot \tau_{ln Y_B} \cdot \tau_{ln PGA_B}} \quad (2.30)$$

$$\phi = \sqrt{\phi_{ln Y_B}^2 + \phi_{ln AF}^2 + \alpha^2 \cdot \phi_{ln PGA_B}^2 + 2\alpha \cdot \rho_{ln PGA, ln Y} \cdot \phi_{ln Y_B} \cdot \phi_{ln PGA_B}} \quad (2.31)$$

De hecho, en la desviación estándar inter-evento se establece  $\tau_{ln Y_B} = \tau_{ln Y}$ ,  $\tau_{ln PGA_B} = \tau_{ln PGA}$  y en la desviación estándar intra-evento se define  $\phi_{ln Y_B} = (\phi_{ln Y}^2 - \phi_{ln AF}^2)^{0.5}$  y  $\phi_{ln PGA_B} = (\phi_{ln PGA}^2 - \phi_{ln AF}^2)^{0.5}$ .



El parámetro  $\phi_{\ln AF}$  es la desviación estándar del logaritmo de la función  $f_{site}$  y es independiente del periodo espectral, por lo cual su valor es 0.3.

Mientras tanto, el parámetro  $\rho_{\ln PGA, \ln V}$  es el coeficiente de correlación entre los valores residuales intra-evento;  $\alpha$  es la relación de linealidad entre  $f_{site}$  y  $\ln(A_{1100})$ , se formula a partir de la derivada parcial:

$$\alpha = \frac{\partial f_{site}}{\partial \ln A_{1100}} = \begin{cases} k_2 \cdot A_{1100} \left\{ \left[ A_{1100} + c \left( \frac{V_{s30}}{k_1} \right)^n \right]^{-1} - [A_{1100} + c]^{-1} \right\}; & V_{s30} < k_1 \\ 0; & V_{s30} \geq k_1 \end{cases} \quad (2.32)$$

La desviación estándar total se establece a través la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones inter-evento e intra-evento.

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 + \phi^2} \quad (2.33)$$

El modelo CB08 no analiza la dependencia de la magnitud en la incertidumbre; por el contrario, el modelo CB13 si lo considera en las respuestas lineales del suelo.

Los autores destacan la necesidad de realizar nuevos estudios en la incertidumbre, ya que existen variaciones entre los valores estimados y medidos de  $V_{s30}$ . Cabe destacar que CB13 realiza operaciones con los valores medidos de  $V_{s30}$ , estos pertenecen a la base de datos NGA-West2.

En lo referente al análisis de sismos lejanos a la fuente ( $R_{rup} > 80$  km), la incertidumbre del modelo lo analiza por medio de las desviaciones estándar de la Tabla 14; de hecho, el modelo puede ser usado en eventos cuyas distancias a la fuente sean hasta  $R_{rup} \leq 300$  km.

Tabla 14: Coeficientes de correlación y desviaciones estándar.

T (seg)	$\tau_1$	$\tau_2$	$\emptyset_1$	$\emptyset_2$	$\emptyset_{\ln AF}$	$\sigma \{M \leq 4.5\}$	$\sigma \{M \geq 5.5\}$	$\rho_{\ln PGA, \ln Y}$
0.01	0.404	0.325	0.734	0.492	0.3	0.838	0.590	1.000
0.02	0.417	0.326	0.738	0.496	0.3	0.848	0.594	0.998
0.03	0.446	0.344	0.747	0.503	0.3	0.87	0.609	0.986
0.05	0.508	0.377	0.777	0.52	0.3	0.928	0.642	0.938
0.075	0.504	0.418	0.782	0.535	0.3	0.93	0.679	0.887
0.1	0.445	0.426	0.769	0.543	0.3	0.888	0.69	0.87
0.15	0.382	0.387	0.769	0.543	0.3	0.859	0.667	0.876
0.2	0.339	0.338	0.761	0.552	0.3	0.833	0.647	0.87
0.25	0.34	0.316	0.744	0.545	0.3	0.818	0.63	0.85
0.3	0.34	0.3	0.727	0.568	0.3	0.803	0.642	0.819
0.4	0.356	0.264	0.69	0.593	0.3	0.776	0.649	0.743
0.5	0.379	0.263	0.663	0.611	0.3	0.764	0.665	0.684
0.75	0.43	0.326	0.606	0.633	0.3	0.743	0.712	0.562
1	0.47	0.353	0.579	0.628	0.3	0.746	0.72	0.467
1.5	0.497	0.399	0.541	0.603	0.3	0.735	0.723	0.364
2	0.499	0.4	0.529	0.588	0.3	0.727	0.711	0.298
3	0.5	0.417	0.527	0.578	0.3	0.726	0.713	0.234
4	0.543	0.393	0.521	0.559	0.3	0.753	0.683	0.202
5	0.534	0.421	0.502	0.551	0.3	0.733	0.693	0.184
7.5	0.523	0.438	0.457	0.546	0.3	0.695	0.7	0.176
10	0.466	0.438	0.441	0.543	0.3	0.642	0.698	0.154
PGA	0.409	0.322	0.734	0.492	0.3	0.84	0.588	1.000
PGV	0.317	0.297	0.655	0.494	0.3	0.728	0.576	0.684

Nota: Todas las desviaciones estándar están en unidades de logaritmo natural y son válidas para condiciones lineales de sitio.

Fuente: (Campbell & Bozorgnia, 2013).

### 3.5 Alcance del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).

El modelo CB13 se considera válido en sismos superficiales producidos en la corteza continental, alrededor del mundo y en regiones tectónicamente activas; por consiguiente se aplican las siguientes condiciones:

- Magnitudes mínimas:  $M \geq 3$ .
- Magnitudes máximas de:  $M \leq 8.5$  para fallas transcurrentes; de  $M \leq 8$  para fallas inversas y  $M \leq 7.5$  para fallas normales.

- Distancias  $R_{rup}$  entre 0 y 300 km.
- Velocidades de onda de corte  $V_{s30}$ , entre 150 y 1500 m/s, acorde a los tipos de suelo B, C, D y E de la guía NEHRP.
- Profundidades de sedimentos  $Z_{2.5}$ , entre 0 y 10 km.
- Profundidades  $Z_{tor}$  entre 0 y 20 km.
- Profundidades focales  $Z_{hyp}$ , entre 0 y 20 km.
- Ángulos de buzamiento  $\delta$ , entre  $15^\circ$  y  $90^\circ$ .

El rango de aplicación de algunas variables de predicción se han extendido más allá de los límites de la base de datos; sin embargo, el modelo ha sido limitado teóricamente a través de las funciones. Realizada esta consideración, se recomienda tomar como referencia el estudio de Campbell y Bozorgnia (2013), cuando las variables de predicción se acercan a su límite.

## CAPÍTULO IV

### MODELO DE ABRAHAMSON, SILVA Y KAMAI (2013)

#### 4.1 Descripción del Estudio

Abrahamson, Silva y Kamai presentan un modelo de predicción de movimiento del suelo (GMPE) para la componente horizontal media, este modelo es aplicable en eventos superficiales, originados en regiones tectónicamente activas de la corteza. El estudio considera magnitudes de momento entre 3 - 8.5 y distancias del sitio a la fuente ( $R_{rup}$ ) entre 0 - 300 km; estableciendo ordenadas espectrales para periodos que oscilan entre 0 - 10 segundos.

El modelo del año 2013 (ASK13) es análogo al modelo de Abrahamson y Silva del año 2008 (AS08), sin embargo, se han efectuado las siguientes actualizaciones: la respuesta no lineal de sitio se basa en la aceleración espectral en roca ( $\hat{S}a_{1100}$ ) en lugar de  $PGA_{1100}$ ; en la función del modelo base se encontró que el coeficiente  $c_4$  es dependiente de la magnitud, por lo cual se modificó a  $c_{4M}$ ; en los mecanismos de falla inversa y normal se añadió la dependencia de la magnitud; se incluye  $CR_{jb}$  como parámetro indicador de la réplica, es decir, si  $CR_{jb} < 15$  km el evento analizado es una réplica y si  $CR_{jb} > 15$  km el evento analizado es un sismo principal o un sismo premonitor; en el efecto hanging-wall se modifican las ecuaciones mediante la magnitud, ángulo de buzamiento, distancias  $R_x$  y  $R_{jb}$ , se puede utilizar la distancia  $R_{y0}$  como parámetro dependiente de este efecto.

Además, se incrementa el rango de aplicación de  $Z_{TOR}$  a 20 km, debido a la actualización de la base de datos NGA-West2; no se considera la función de escalamiento para distancias lejanas a la fuente ( $R_{rup} > 100$  km) dada la existencia de registros con mayores distancias en la nueva base de datos; se modifica las ecuaciones que categorizan a  $Z_{1.0}$ , esto es en la función de

profundidad del suelo. Finalmente, se analiza el movimiento del suelo en países como Taiwan, China y Japón mediante la función de regionalización.

Los autores han distinguido los parámetros del modelo ASK13 en: parámetros de la fuente sísmica, parámetros de distancia, parámetros del sitio de interés y parámetros del nivel de movimiento del suelo, éstos se conceptualizan en la Tabla 15.

Tabla 15: Parámetros del modelo ASK13.

Parámetros			
de la fuente sísmica	de distancia	del sitio de interés	del nivel de movimiento del suelo
M, $Z_{TOR}$ , dip, W	$R_{rup}$	$V_{s30}$	$\hat{S}_{a1100}$
$F_{RV}$ , $F_N$ , $F_{AS}$	$R_{jb}$ , $R_x$	$Z_{1.0}$	-
$CR_{jb}$	$R_{y0}$	-	-

La base de datos utilizada en ASK13 procede de la versión NGA-West2 de julio de 2013. Los autores realizaron un proceso meticuloso de selección de estos registros, obteniendo así un total de **15 749 registros** de 326 sismos originados en todo el mundo, se indica en la Tabla 16.

Tabla 16: Número de sismos y registros utilizados en el modelo ASK13.

Región N°	Región	N° de sismos	Rango de Magnitud	N° total de registros
1	California	274	3.1-7.3	12044
2	Otros WUS	2	5.1-7.9	7
3	Taiwan	6	5.9-7.6	1535
4	Italia	25	4.0-6.9	175
5	Medio Oriente	5	6.6-7.5	43
6	América Central	0		0
7	Nueva Zelanda	2	6.2-7.0	72
8	Europa (excluyendo Italia y Grecia)	1	7.1	6
9	China	4	4.8-7.9	158
10	Japón	5	6.1-6.9	1700
11	Grecia	1	6.4	3
12	Otros	1	6.2	5

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013).

## 4.2 Clasificación de suelos del modelo ASK13.

El modelo adopta la clasificación de suelos estadounidense para diseño sísmico, propuesto por NEHRP, esta clasificación se describe en la Tabla 17. Resulta oportuno destacar que esta clasificación es la utilizada en los modelo NGA-West2.

Tabla 17: Tipos de suelo NEHRP.

Tipo de suelo	Descripción	$V_{s30}$
A	Roca dura	> 1500 m/s
B	Roca	760 m/s – 1500 m/s
C	Suelo muy denso y roca blanda	360 m/s – 760 m/s
D	Suelo rígido	180 m/s – 360 m/s
E	Arcillas blandas	< 180 m/s

Fuente: (BSSC, 2003).

Asimismo, para evaluar la intensidad sísmica del sitio de interés se usa la profundidad  $Z_{1.0}$ , los autores consideran esta variable para indicar la profundidad del lecho rocoso.

## 4.3 Ecuaciones del modelo ASK13.

La ecuación general para la componente horizontal media del movimiento del suelo, está dada por la siguiente ecuación:

$$\ln Sa (g) = \left\{ \begin{array}{l} f_1 (M, R_{rup}) + F_{RV} \cdot f_7 (M) + F_N \cdot f_8 (M) + F_{AS} \cdot f_{11}(CR_{jb}) \\ + f_5 (Sa_{1100}, V_{s30}) + F_{HW} \cdot f_4 (R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6 (Z_{TOR}) \\ + f_{10} (Z_{1.0}, V_{s30}) + \text{Regional} (V_{s30}, R_{rup}) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Los parámetros en paréntesis indican la dependencia que tienen las funciones.

### 4.3.1 Función del modelo base:

El modelo base analiza los efectos de la magnitud de momento y de la distancia a la fuente, en el movimiento del suelo. La función  $f_1$  analiza un mecanismo de falla transcurrente.

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5 (M - M_1) + a_8 (8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3 (M - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & M > M_1 \\ a_1 + a_4 (M - M_1) + a_8 (8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3 (M - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4 (M_2 - M_1) + a_8 (8.5 - M_2)^2 + a_6 (M - M_2) + a_7 (M - M_2)^2 \\ + [a_2 + a_3 (M_2 - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & M < M_2 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_{4M}^2} \quad (3.3)$$

$$c_{4M}(M) = \begin{cases} c_4; & M > 5 \\ c_4 - (c_4 - 1)(5 - M); & 4 < M \leq 5 \\ 1; & M \leq 4 \end{cases} \quad (3.4)$$

Siendo  $M_2 = 5$ , los coeficientes  $M_1$  se presentan en la Tabla 21;  $c_{4M}$  es un parámetro ficticio de profundidad, el cual se reduce a 1km en pequeñas magnitudes.

### 4.3.2 Función del tipo de falla:

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11}; & M > 5.0 \\ a_{11}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M < 4.0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12}; & M > 5.0 \\ a_{12}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M < 4.0 \end{cases} \quad (3.6)$$

La función  $f_7$  formula un mecanismo de falla inversa mediante el coeficiente  $a_{11}$ ; mientras tanto, la función  $f_8$  define un mecanismo de falla normal mediante el coeficiente  $a_{12}$ . Los autores no encontraron diferencias significativas entre los mecanismos de falla en pequeñas magnitudes; en consecuencia, no existen valores en las funciones  $f_7$  y  $f_8$  en magnitudes  $M < 4$ . En efecto, las mayores diferencias se encuentran en magnitudes  $M > 5$ .

### 4.3.3 Función de respuesta del sitio:

$$f_5(\hat{S}a_{1100}, V_{s30}^*) = \begin{cases} (a_{10}) \ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right) - b \cdot \ln(\hat{S}a_{1100} + c) + b \cdot \ln\left(\hat{S}a_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right)^n\right); & V_{s30} < V_{Lin} \\ (a_{10} + b \cdot n) \ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right); & V_{s30} \geq V_{Lin} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$V_{s30}^* = \begin{cases} V_{s30}; & V_{s30} < V_1 \\ V_1; & V_{s30} \geq V_1 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500; & T \leq 0.5 \text{ seg} \\ \exp[-0.35 \ln\left(\frac{T}{0.5}\right) + \ln(1500)]; & 0.5 \text{ seg} < T < 3 \text{ seg} \\ 800; & T \geq 3 \text{ seg} \end{cases} \quad (3.9)$$

En la segunda fase del proyecto NGA, Kamai *et al.* (2013) analizaron la investigación de Walling *et al.* (2008) que trata sobre factores de amplificación por efectos de la respuesta no lineal de sitio en los modelos NGA-West1; y añadieron simulaciones mediante la aceleración espectral  $Sa(T)$ ; donde  $T$  es el periodo espectral (Campbell & Bozorgnia, 2013).

Por consiguiente, Kamai *et al.* (2013) plantean dos alternativas del factor de amplificación no lineal del sitio para los modelos del suelo: PR y EPRI, con el objetivo de evaluar la intensidad sísmica en roca. La primera alternativa se fundamenta en la máxima aceleración del suelo (PGA) y la segunda alternativa, en la aceleración espectral para cada periodo  $Sa(T)$ ; en efecto, los parámetros en roca son  $PGA_{1100}$  y  $Sa_{1100}(T)$ .



$PGA_{1100}$  es el valor previsto de PGA sobre roca ( $V_{S30} = 1100$  m/s). En el modelo de Campbell y Bozorgnia (2013),  $PGA_{1100}$  se denomina  $A_{1100}$ .

De hecho, las ecuaciones (3.7) y (3.8) son adoptadas del estudio de Kamai *et al.* (2013) al analizar  $Sa_{1100}(T)$  o denominado como  $\hat{S}a_{1100}$ . En cambio, el modelo AS08 utiliza dichas ecuaciones con  $PGA_{1100}$ . En cuanto a los modelos de suelo, ASK13 adopta los coeficientes del modelo de suelo *Peninsular Range* (PR), estos coeficientes:  $b$ ,  $c$ ,  $n$ ,  $V_{Lin}$ , evalúan la respuesta no lineal del sitio.

A manera de resumen, la función  $f_5$  incorpora el valor de  $\hat{S}a_{1100}$  en lugar de  $PGA_{1100}$ . Los autores consideran que  $\hat{S}a_{1100}$  define de mejor manera la fuerza sísmica en un determinado sitio de interés; al mismo tiempo, simplifica el GMPE ya que no se necesitan parámetros de correlación entre PGA y la aceleración espectral esperada ( $Sa$ ).

#### 4.3.4 Función del efecto hanging-wall:

$$f_4 (R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, dip, Z_{TOR}, M) = a_{13} T_1 (dip) \cdot T_2(M) \cdot T_3(R_x, W, dip) \cdot T_4 (Z_{tor}) \cdot T_5 (R_x, R_{y0}) \quad (3.10)$$

$$T_1 (dip) = \begin{cases} (90 - dip)/45; & dip > 30 \\ 60/45; & dip < 30 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$T_2 (M) = \begin{cases} 1 + a_{2HW} (M - 6.5); & M \geq 6.5 \\ 1 + a_{2HW} (M - 6.5) - (1 - a_{2HW})(M - 6.5)^2; & 5.5 < M < 6.5 \\ 0; & M \leq 5.5 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$T_3 (R_x) = \begin{cases} h_1 + h_2 (R_x/R_1) + h_3 (R_x/R_1)^2; & R_x < R_1 \\ 1 - \left( \frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right); & R_1 \leq R_x \leq R_2 \\ 0; & R_x > R_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$T_4 (Z_{TOR}) = \begin{cases} 1 - \frac{Z_{TOR}^2}{100}; & Z_{TOR} \leq 10 \text{ km} \\ 0; & Z_{TOR} > 10 \text{ km} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$T_5(R_x, R_{y0}) = \begin{cases} 1; & R_{y0} < R_{y1} \\ 1 - \frac{R_{y0} - R_{y1}}{5}; & R_{y0} - R_{y1} < 5 \\ 0; & R_{y0} - R_{y1} \geq 5 \end{cases} \quad (3.15a)$$

Donde  $R_1 = W \cdot \cos(\text{dip})$ ,  $R_2 = 3R_1$ ,  $R_{y1} = R_x \cdot \tan(20^\circ)$ ,  $h_1 = 0.25$ ,  $h_2 = 1.5$ ,  $h_3 = -0.75$  y  $a_{2HW} = 0.2$  para todos los periodos. Si no se dispone el valor de la distancia  $R_{y0}$ , la función  $T_5$  se puede calcular como:

$$T_5(R_{jb}) = \begin{cases} 1; & R_{jb} = 0 \\ 1 - \frac{R_{jb}}{30}; & R_{jb} < 30 \\ 0; & R_{jb} \geq 30 \end{cases} \quad (3.15b)$$

El coeficiente  $a_{13}$  representa la máxima amplitud del efecto hanging-wall, este coeficiente se definió a partir de un sismo de  $M=6.5$ ,  $\text{dip}=45$  y  $Z_{\text{TOR}}=0$ .

Las funciones  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  y  $T_5$  simbolizan los efectos en el movimiento del suelo al encontrarse un sitio de interés en el bloque levantado (HW, del inglés *hanging-wall*), este emplazamiento se denomina efecto hanging-wall.  $T_1$  relaciona el efecto HW en el ángulo de buzamiento del plano de ruptura;  $T_2$  en la magnitud del sismo;  $T_3$  en la distancia horizontal del sitio a la ruptura  $R_x$ ;  $T_4$  en la profundidad hasta el borde superior de la ruptura  $Z_{\text{TOR}}$  y  $T_5$  en la distancia horizontal a la ruptura  $R_{jb}$ .

Cuando el ángulo de buzamiento bordea los 30 grados, se considera dos posibles efectos en la función  $T_1$ .  $T_2$  se evalúa en magnitudes mayores a 5.5;  $T_4$  establece efectos hanging-wall dentro de una profundidad  $Z_{\text{TOR}} \leq 10$  km, sin embargo, este efecto se disipa a más de 10 kilómetros de profundidad.

#### 4.3.5 Función de la profundidad al borde superior de la ruptura:

$$f_6 (Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \left( \frac{Z_{TOR}}{20} \right); & Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15}; & Z_{TOR} \geq 20 \text{ km} \end{cases} \quad (3.16)$$

En la base de datos, existen insuficientes registros con profundidades  $Z_{TOR}$  mayores a 20 kilómetros, por esta razón se determina una función dentro de los 20 km y otro más allá de los 20 km.

#### 4.3.6 Función de la profundidad del suelo:

$$f_{10} (Z_1, V_{s30}) = \begin{cases} a_{43} \ln \left( \frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1,ref} + 0.01} \right); & V_{s30} \leq 200 \\ a_{44} \ln \left( \frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1,ref} + 0.01} \right); & 200 < V_{s30} \leq 300 \\ a_{45} \ln \left( \frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1,ref} + 0.01} \right); & 300 < V_{s30} \leq 500 \\ a_{46} \ln \left( \frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1,ref} + 0.01} \right); & 500 < V_{s30} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp \left( -\frac{7.67}{4} \ln \left( \frac{V_{s30}^4 + 610^4}{1360^4 + 610^4} \right) \right) \quad \text{Para California} \quad (3.18)$$

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp \left( -\frac{5.23}{2} \ln \left( \frac{V_{s30}^2 + 412^2}{1360^2 + 412^2} \right) \right) \quad \text{Para Japón} \quad (3.19)$$

En el modelo de Abrahamson y Silva del año 2008, se empleó el efecto 3D de la cuenca y el modelo 1D de respuesta superficial del sitio, con la finalidad de ajustar los registros que tuvieron profundidades  $Z_{1.0}$  inconsistentes. El modelo ASK13 compila 15 750 registros, de los cuales 9668 poseen valores estimados de  $Z_{1.0}$ ; los restantes 6082 registros no tienen valores estimados de  $Z_{1.0}$ , por esta razón los autores computaron aplicando la ecuación:  $Z_{1.0} = Z_{1,ref}$ . Donde  $Z_{1,ref}$  es el valor medio de  $Z_{1.0}$  para un valor dado de  $V_{s30}$ .

Las variaciones del tipo de suelo son abordadas por la función  $f_{10}$ , mediante la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ . Por lo tanto, los parámetros que determinan la amplificación del tipo de suelo son  $V_{s30}$  y  $Z_{1.0}$ . En la Tabla 18 se detalla los coeficientes de la función de profundidad del suelo.

Tabla 18: Coeficientes de la función  $f_{10}$ .

T (seg)	$a_{43}$	$a_{44}$	$a_{45}$	$a_{46}$
<b>PGA</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>PGV</b>	0.28	0.15	0.09	0.07
<b>0.01</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.02</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.03</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.05</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.075</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.1</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.15</b>	0.1	0.05	0	-0.05
<b>0.2</b>	0.1	0.05	0	-0.03
<b>0.25</b>	0.1	0.05	0	0
<b>0.3</b>	0.1	0.05	0.03	0.03
<b>0.4</b>	0.1	0.07	0.06	0.06
<b>0.5</b>	0.1	0.1	0.1	0.09
<b>0.75</b>	0.14	0.14	0.14	0.13
<b>1</b>	0.17	0.17	0.17	0.14
<b>1.5</b>	0.22	0.21	0.2	0.16
<b>2</b>	0.26	0.25	0.22	0.16
<b>3</b>	0.34	0.3	0.23	0.16
<b>4</b>	0.41	0.32	0.23	0.14
<b>5</b>	0.51	0.32	0.22	0.13
<b>6</b>	0.55	0.32	0.2	0.1
<b>7.5</b>	0.55	0.29	0.17	0.08
<b>10</b>	0.42	0.22	0.14	0.08

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013)

#### 4.3.7 Función que considera las réplicas:

$$f_{11}(CR_{jb}) = \begin{cases} a_{14}; & CR_{jb} \leq 5 \\ a_{14} \left[ 1 - \frac{CR_{jb} - 5}{10} \right]; & 5 < CR_{jb} < 15 \\ 0; & CR_{jb} > 15 \end{cases} \quad (3.20)$$

Los autores han encontrado que las ordenadas espectrales de las réplicas, en pequeños periodos, son menores a las ordenadas espectrales de los sismos principales; en tal sentido, la función  $f_{11}$  evalúa los efectos en el movimiento del suelo, al establecer un determinado evento como réplica. Una réplica se define como un evento Clase 2, que tiene un centroide  $CR_{jb} < 15$  km y está dentro de la ventana de tiempo de Gardner y Knopoff (1974). (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013).

Un evento Clase 1 se define como: un sismo principal, sismo que desencadena otros eventos, o sismo premonitor que se origina fuera de la proyección superficial del plano de ruptura del sismo principal (es decir, a una distancia  $CR_{jb} > 15$  km); las definiciones de eventos Clase 1 y Clase 2 se relatan en el estudio de Wooddell y Abrahamson (2012).

#### 4.3.8 Función de regionalización:

Regional ( $V_{s30}, R_{rup}$ ) =

$$F_{TW} (f_{12} (V_{s30}) + a_{25} \cdot R_{rup}) + F_{CN} (a_{28} \cdot R_{rup}) + F_{JP} (f_{13} (V_{s30}) + a_{29} \cdot R_{rup}); \quad (3.21)$$

$$f_{12} (V_{s30}) = a_{31} \ln \left( \frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}} \right); \quad (3.22)$$

$$f_{13} (V_{s30}) = \begin{cases} a_{36}; & V_{s30} < 200 \text{ m/s} \\ a_{37}; & 200 \leq V_{s30} < 300 \text{ m/s} \\ a_{38}; & 300 \leq V_{s30} < 400 \text{ m/s} \\ a_{39}; & 400 \leq V_{s30} < 500 \text{ m/s} \\ a_{40}; & 500 \leq V_{s30} < 700 \text{ m/s} \\ a_{41}; & 700 \leq V_{s30} < 1000 \text{ m/s} \\ a_{42}; & V_{s30} \geq 1000 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.23)$$

Donde  $F_{TW}$  es igual a 1 para Taiwan y 0 para otras regiones;  $F_{CN}$  vale 1 para China y 0 para otras regiones;  $F_{JP}$  es igual a 1 para Japón y 0 para otras regiones. El coeficiente  $a_{39}$  se ha igualado a cero ( $a_{39} = 0$ ) para normalizar la amplificación del sitio de interés a la función del modelo base.

La función  $f_{12}$  identifica la amplificación del movimiento del suelo para un sitio emplazado en Taiwan, a través del coeficiente  $a_{31}$ . En cambio, la función  $f_{13}$  identifica los efectos en Japón mediante la velocidad de la onda de corte  $V_{s30}$  del sitio. En China no se ha encontrado efectos relacionados a  $V_{s30}$  debido a un número limitado de registros en este país. En los tres países se ha evaluado el efecto de la distancia a la fuente mediante los coeficientes  $a_{25}$ ,  $a_{28}$  y  $a_{29}$ ; estos coeficientes se exponen en la Tabla 19.

La función  $f_{13}$  considera una dependencia de  $V_{s30}$  en el movimiento del suelo japonés, esta dependencia se concibe con los coeficientes  $a_{36}$  -  $a_{42}$ , los cuales se detallan en la Tabla 20.

Tabla 19: Coeficientes para Taiwan, China y Japón.

<b>T (seg)</b>	<b><math>a_{25}</math></b>	<b><math>a_{28}</math></b>	<b><math>a_{29}</math></b>	<b><math>a_{31}</math></b>
<b>PGA</b>	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
<b>PGV</b>	-0.0001	0.0005	-0.0037	-0.1462
<b>0.01</b>	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
<b>0.02</b>	-0.0015	0.0024	-0.0033	-0.1479
<b>0.03</b>	-0.0016	0.0023	-0.0034	-0.1447
<b>0.05</b>	-0.002	0.0027	-0.0033	-0.1326
<b>0.075</b>	-0.0027	0.0032	-0.0029	-0.1353
<b>0.1</b>	-0.0033	0.0036	-0.0025	-0.1128
<b>0.15</b>	-0.0035	0.0033	-0.0025	0.0383
<b>0.2</b>	-0.0033	0.0027	-0.0031	0.0775
<b>0.25</b>	-0.0029	0.0024	-0.0036	0.0741
<b>0.3</b>	-0.0027	0.002	-0.0039	0.2548
<b>0.4</b>	-0.0023	0.001	-0.0048	0.2136
<b>0.5</b>	-0.002	0.0008	-0.005	0.1542
<b>0.75</b>	-0.001	0.0007	-0.0041	0.0787
<b>1</b>	-0.0005	0.0007	-0.0032	0.0476
<b>1.5</b>	-0.0004	0.0006	-0.002	-0.0163
<b>2</b>	-0.0002	0.0003	-0.0017	-0.1203
<b>3</b>	0	0	-0.002	-0.2719
<b>4</b>	0	0	-0.002	-0.2958
<b>5</b>	0	0	-0.002	-0.2718
<b>6</b>	0	0	-0.002	-0.2517
<b>7.5</b>	0	0	-0.002	-0.1337
<b>10</b>	0	0	-0.002	-0.0216

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013)

Tabla 20: Coeficientes para el ajuste de  $V_{s30}$ , Japón.

T (seg)	$a_{36}$	$a_{37}$	$a_{38}$	$a_{40}$	$a_{41}$	$a_{42}$
PGA	0.265	0.337	0.188	0.088	-0.196	0.044
PGV	0.377	0.212	0.157	0.095	-0.038	0.065
0.01	0.265	0.337	0.188	0.088	-0.196	0.044
0.02	0.255	0.328	0.184	0.088	-0.194	0.061
0.03	0.249	0.32	0.18	0.093	-0.175	0.162
0.05	0.202	0.289	0.167	0.133	-0.09	0.451
0.075	0.126	0.275	0.173	0.186	0.09	0.506
0.1	0.022	0.256	0.189	0.16	0.006	0.335
0.15	-0.136	0.162	0.108	0.068	-0.156	-0.084
0.2	-0.078	0.224	0.115	0.048	-0.274	-0.178
0.25	0.037	0.248	0.122	0.055	-0.248	-0.187
0.3	-0.091	0.203	0.096	0.073	-0.203	-0.159
0.4	0.129	0.232	0.123	0.143	-0.154	-0.023
0.5	0.31	0.252	0.134	0.16	-0.159	-0.029
0.75	0.505	0.208	0.129	0.158	-0.141	0.061
1	0.358	0.208	0.152	0.145	-0.144	0.062
1.5	0.131	0.108	0.118	0.131	-0.126	0.037
2	0.123	0.068	0.119	0.083	-0.075	-0.143
3	0.109	-0.023	0.093	0.07	-0.021	-0.028
4	0.135	0.028	0.084	0.101	0.072	-0.097
5	0.189	0.031	0.058	0.095	0.205	0.015
6	0.215	0.024	0.065	0.133	0.285	0.104
7.5	0.166	-0.061	0.009	0.151	0.329	0.299
10	0.092	-0.159	-0.05	0.124	0.301	0.243

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013)

#### 4.3.9 Definición de los parámetros:

Los parámetros que intervienen en las ecuaciones del modelo ASK13 se detallan a continuación:

- $M$  es la magnitud de momento  $M_w$ .
- $R_{rup}$  (km) es la distancia más cercana al plano de ruptura cosísmico.
- $CR_{jb}$  (km) es la distancia del centroide Joyner-Boore.
- $R_{jb}$  (km) es la distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie (distancia Joyner-Boore).

- $R_x$  (km) es la distancia horizontal más cercana (proyección en la superficie) al borde superior del plano de ruptura medido perpendicularmente desde la dirección del rumbo promedio, donde  $R_x$  es negativo en la dirección footwall (bloque deprimido) y positivo en el hanging-wall (bloque levantado). (Ancheta, *et al.*, 2013).
- $R_{y0}$  (km) es la distancia horizontal fuera del borde del plano de ruptura medido paralelamente a la dirección del rumbo.  $R_{y0}$  puede ser cero o un valor positivo. Para sitios ubicados a lo largo de la ruptura  $R_{y0}=0$ , el cual puede ser calculado a partir de  $R_{y0}=R_x \cdot |\tan(\text{Src2SiteA})|$ .
- $W$  (km) es el ancho del plano de ruptura.
- dip o  $\delta$  ( $^\circ$ ) es el ángulo de buzamiento promedio del plano de ruptura.
- $Z_{\text{TOR}}$  (km) es la profundidad hasta el borde superior del plano de ruptura cósmico.
- $\lambda$  ( $^\circ$ ) rake se define como el ángulo promedio del deslizamiento, medido en el plano de ruptura entre la dirección del rumbo y el vector de deslizamiento (Ancheta, *et al.* 2013; Lay and Wallace, 1995).
- $F_{\text{RV}}$  es una variable indicadora que representa fallas inversas e inversas oblicuas, donde  $F_{\text{RV}}=1$  cuando rake oscila entre  $30^\circ < \lambda < 150^\circ$  y  $F_{\text{RV}}=0$  para otros mecanismos de falla.
- $F_{\text{N}}$  es una variable indicadora que representa fallas normales y normales oblicuas donde  $F_{\text{N}} = 1$  para  $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$  y  $F_{\text{NM}} = 0$  para otros mecanismos de falla.
- $F_{\text{AS}}$  es una variable indicadora que considera un evento como replica.  $F_{\text{AS}}=1$  para eventos Clase 2 (replicas) y  $F_{\text{AS}}=0$  para un evento Clase 1 (sismo principal o un sismo premonitor).
- $F_{\text{HW}}$  es una variable indicadora que considera el efecto hanging-wall.  $F_{\text{HW}}=1$  para sitios ubicados sobre del bloque levantado (hanging-wall) y  $F_{\text{HW}}=0$  para sitios ubicados sobre del bloque deprimido (footwall).



- $V_{S30}$  (m/seg) es la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad, evaluada en el sitio de interés.
- $\hat{S}_{a1100}$  (g) es la aceleración espectral para cada periodo en roca, es decir a una velocidad media de onda de corte  $V_{S30} = 1100$  m/s ( $S_{a_{roca}}$ ).
- $Z_{1.0}$  (km) es la profundidad debajo del sitio de interés a la cual se halla una velocidad de onda de corte  $V_s = 1.0$  km/s.

Para ilustrar estos parámetros, se expone la Figura 16; en ella existe una vista tridimensional de un bloque perteneciente a una falla ciega.

Tabla 21: Coeficientes del modelo ASK13.

T (seg)	$V_{Lin}$	b	$c_4$	$M_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_6$	$a_8$
<b>PGA</b>	660	-1.47	6	6.75	0.464	-0.79	0.281	2.28	0
<b>PGV</b>	330	-2.02	3	6.75	6.168	-0.95	0.281	2.3	-0.12
<b>0.01</b>	660	-1.47	6	6.75	0.464	-0.79	0.281	2.28	0
<b>0.02</b>	680	-1.46	6	6.75	0.473	-0.79	0.281	2.28	0
<b>0.03</b>	770	-1.39	6	6.75	0.457	-0.79	0.281	2.25	0
<b>0.05</b>	800	-1.22	6	6.75	0.652	-0.79	0.281	2.18	0
<b>0.075</b>	800	-1.15	6	6.75	0.95	-0.79	0.278	2.13	0
<b>0.1</b>	800	-1.23	5.9	6.75	1.16	-0.79	0.27	2.14	0
<b>0.15</b>	740	-1.59	5.8	6.75	1.487	-0.79	0.258	2.19	-0.029
<b>0.2</b>	590	-2.01	5.7	6.75	1.712	-0.79	0.25	2.25	-0.05
<b>0.25</b>	495	-2.41	5.6	6.75	1.796	-0.79	0.242	2.3	-0.066
<b>0.3</b>	430	-2.76	5.5	6.75	1.849	-0.79	0.239	2.35	-0.079
<b>0.4</b>	360	-3.28	5.2	6.75	1.825	-0.79	0.231	2.45	-0.099
<b>0.5</b>	340	-3.6	4.8	6.75	1.768	-0.79	0.23	2.55	-0.115
<b>0.75</b>	330	-3.8	4.4	6.75	1.543	-0.79	0.23	2.65	-0.144
<b>1</b>	330	-3.5	4	6.75	1.292	-0.79	0.23	2.7	-0.165
<b>1.5</b>	330	-2.4	3.75	6.75	0.855	-0.79	0.23	2.75	-0.194
<b>2</b>	330	-1	3.5	6.75	0.521	-0.79	0.23	2.75	-0.214
<b>3</b>	330	0	3.25	6.82	0.16	-0.79	0.23	2.75	-0.243
<b>4</b>	330	0	3	6.92	-0.07	-0.79	0.23	2.75	-0.264
<b>5</b>	330	0	3	7	-0.41	-0.756	0.23	2.75	-0.27
<b>6</b>	330	0	3	7.06	-0.838	-0.7	0.23	2.75	-0.27
<b>7.5</b>	330	0	3	7.15	-1.433	-0.62	0.23	2.75	-0.27
<b>10</b>	330	0	3	7.25	-2.368	-0.515	0.23	2.75	-0.27

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013).

Tabla 22: Constantes independientes del periodo.

$M_2$	$a_4$	$a_5$	$a_7$	$n$	$c$
5	-0.1	-0.49	0	1.5	2.4 (2400 para PGV)

Fuente: (Abrahamson, Silva, &amp; Kamai, 2013).

Tabla 23: Coeficientes  $a_{10}$ - $a_{17}$ .

T (seg)	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{17}$
<b>PGA</b>	1.735	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0066
<b>PGV</b>	2.36	0	-0.1	0.25	0.22	0.9	-0.001
<b>0.01</b>	1.735	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0066
<b>0.02</b>	1.718	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0066
<b>0.03</b>	1.615	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0066
<b>0.05</b>	1.358	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0075
<b>0.075</b>	1.258	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0092
<b>0.1</b>	1.31	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0101
<b>0.15</b>	1.66	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0097
<b>0.2</b>	2.22	0	-0.1	0.6	-0.3	1.1	-0.0084
<b>0.25</b>	2.77	0	-0.1	0.6	-0.24	1.1	-0.0074
<b>0.3</b>	3.25	0	-0.1	0.6	-0.19	1.03	-0.0064
<b>0.4</b>	3.99	0	-0.1	0.58	-0.11	0.92	-0.0043
<b>0.5</b>	4.45	0	-0.1	0.56	-0.04	0.84	-0.0032
<b>0.75</b>	4.75	0	-0.1	0.53	0.07	0.68	-0.0025
<b>1</b>	4.3	0	-0.1	0.5	0.15	0.57	-0.0022
<b>1.5</b>	2.65	0	-0.1	0.42	0.27	0.42	-0.0016
<b>2</b>	0.55	0	-0.1	0.35	0.35	0.31	-0.0013
<b>3</b>	-0.95	0	-0.1	0.2	0.46	0.16	-0.001
<b>4</b>	-0.95	0	-0.1	0	0.54	0.05	-0.001
<b>5</b>	-0.93	0	-0.1	0	0.61	-0.04	-0.001
<b>6</b>	-0.91	0	-0.1	0	0.65	-0.11	-0.001
<b>7.5</b>	-0.875	0	-0.1	0	0.72	-0.19	-0.001
<b>10</b>	-0.8	0	-0.1	0	0.8	-0.3	-0.001

Fuente: (Abrahamson, Silva, &amp; Kamai, 2013).

#### 4.4 Incertidumbre del modelo ASK13.

$$\emptyset_{A,L}(M) = \begin{cases} S_1; & M < 4 \\ S_1 + \frac{S_2 - S_1}{2}(M - 4); & 4 \leq M \leq 6 \\ S_2; & M > 6 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$T_{A,L}(M) = \begin{cases} S_3; & M < 5 \\ S_3 + \frac{S_4 - S_3}{2}(M - 5); & 5 \leq M \leq 7 \\ S_4; & M > 7 \end{cases} \quad (3.25)$$

Donde  $\phi_{A,L}$  es la desviación estándar lineal intra-evento y  $T_{A,L}$  es la desviación estándar lineal inter-evento. Los coeficientes  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$  se presentan en la Tabla 24. En relación a los intervalos de estas ecuaciones, se ha demostrado que la desviación estándar en la respuesta lineal del sitio es dependiente de la magnitud del evento.

Tabla 24: Coeficientes de la incertidumbre del modelo.

T (seg)	V <sub>s30</sub> estimado		V <sub>s30</sub> Medido		S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	Japón	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>			S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
<b>PGA</b>	0.754	0.52	0.741	0.501	0.47	0.36	0.54	0.63
<b>PGV</b>	0.662	0.51	0.66	0.51	0.38	0.38	0.58	0.53
<b>0.01</b>	0.754	0.52	0.741	0.501	0.47	0.36	0.54	0.63
<b>0.02</b>	0.76	0.52	0.747	0.501	0.47	0.36	0.54	0.63
<b>0.03</b>	0.781	0.52	0.769	0.501	0.47	0.36	0.55	0.63
<b>0.05</b>	0.81	0.53	0.798	0.512	0.47	0.36	0.56	0.65
<b>0.075</b>	0.81	0.54	0.798	0.522	0.47	0.36	0.57	0.69
<b>0.1</b>	0.81	0.55	0.795	0.527	0.47	0.36	0.57	0.7
<b>0.15</b>	0.801	0.56	0.773	0.519	0.47	0.36	0.58	0.7
<b>0.2</b>	0.789	0.565	0.753	0.514	0.47	0.36	0.59	0.7
<b>0.25</b>	0.77	0.57	0.729	0.513	0.47	0.36	0.61	0.7
<b>0.3</b>	0.74	0.58	0.693	0.519	0.47	0.36	0.63	0.7
<b>0.4</b>	0.699	0.59	0.644	0.524	0.47	0.36	0.66	0.7
<b>0.5</b>	0.676	0.6	0.616	0.532	0.47	0.36	0.69	0.7
<b>0.75</b>	0.631	0.615	0.566	0.548	0.47	0.36	0.73	0.69
<b>1</b>	0.609	0.63	0.541	0.565	0.47	0.36	0.77	0.68
<b>1.5</b>	0.578	0.64	0.506	0.576	0.47	0.36	0.8	0.66
<b>2</b>	0.555	0.65	0.48	0.587	0.47	0.36	0.8	0.62
<b>3</b>	0.548	0.64	0.472	0.576	0.47	0.36	0.8	0.55
<b>4</b>	0.527	0.63	0.447	0.565	0.47	0.36	0.76	0.52
<b>5</b>	0.505	0.63	0.425	0.568	0.47	0.36	0.72	0.5
<b>6</b>	0.477	0.63	0.395	0.571	0.47	0.36	0.7	0.5
<b>7.5</b>	0.457	0.63	0.378	0.575	0.47	0.36	0.67	0.5
<b>10</b>	0.429	0.63	0.359	0.585	0.47	0.36	0.64	0.5

Fuente: (Abrahamson, Silva, & Kamai, 2013).

La desviación estándar intra-evento para Japón, es más alta que sus similares de California y Taiwan. Por lo tanto, la desviación estándar lineal intra-evento para Japón es:

$$\phi_{A-JP}(R_{rup}) = \begin{cases} S_5; & R_{rup} < 30 \\ S_5 + \frac{S_6 - S_5}{50} (R_{rup} - 30); & 30 \leq R_{rup} \leq 80 \\ S_6; & R_{rup} > 80 \end{cases} \quad (3.26)$$

La desviación estándar intra-evento del movimiento en roca es:

$$\phi_B(M, T) = \sqrt{\phi_{A,L}^2(M, T) - \phi_{Amp}^2(T)} \quad (3.27)$$

Donde  $\phi_{A,L}$  es la desviación estándar lineal intra-evento en suelo;  $\phi_{Amp}$  es la desviación estándar de la amplificación del sitio y  $T$  es el periodo espectral. Se asume  $\phi_{Amp}(T) = 0.4$  para todos los periodos.

En cuanto a la variabilidad inter-evento, la desviación estándar del movimiento en roca es igual a la desviación estándar del rango lineal, por lo tanto:

$$\tau_B(M, T) = \tau_{A,L}(M, T) \quad (3.28)$$

Finalmente, la desviación estándar intra-evento es:

$$\phi(T, M, \hat{S}a_{1100}, V_{s30}) = \left[ \phi_B^2(M, T) \cdot \left( 1 + \frac{\partial \ln Amp(T, \hat{S}a_{1100}, V_{s30})}{\partial \ln Sa_{1100}} \right)^2 + \phi_{Amp}^2(T) \right]^{1/2} \quad (3.29)$$

La desviación estándar inter-evento esta dada por la ecuación:

$$\tau(T, M, \hat{S}a_{1100}, V_{s30}) = \tau_B(M, T) \cdot \left( 1 + \frac{\partial \ln Amp(T, \hat{S}a_{1100}, V_{s30})}{\partial \ln Sa_{1100}} \right) \quad (3.30)$$

Donde:

$$\frac{\partial \ln Amp(T, \hat{S}a_{1100}, V_{s30})}{\partial \ln Sa_{1100}} = \begin{cases} 0; & V_{s30} \geq V_{Lin} \\ \frac{-b(T)\hat{S}a_{1100}}{\hat{S}a_{1100}+c} + \frac{b(T)\hat{S}a_{1100}}{\hat{S}a_{1100}+c \left(\frac{V_{s30}}{V_{Lin}}\right)^n}; & V_{s30} < V_{Lin} \end{cases} \quad (3.31)$$

#### 4.5 Alcance del modelo ASK13.

El modelo de Abrahamson, Silva y Kamai (2013) se considera válido en sismos superficiales originados en la corteza, alrededor del mundo y en regiones tectónicamente activas, por lo cual, su aplicación debe ser en:

- Magnitudes:  $3 < M < 8.5$ . Aunque, la mayor cantidad de registros de la base de datos oscilan entre  $3 < M < 7.9$ .
- Distancias  $R_{rup}$  entre 0 y 300 km.
- Velocidades de onda de corte  $V_{s30}$ , entre 180 y 1500 m/seg, acorde a los tipos de suelo B, C, D y E de la guía NEHRP.
- Profundidades  $Z_{tor}$  entre 0 y 20 km. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se consigue valores verdaderamente aceptables en profundidades  $Z_{tor}$  entre 0 y 15 km.

## CAPÍTULO V

### MODELO DE ZHAO *ET AL.* (2006)

#### 5.1 Descripción del Estudio

En el año 2006, un grupo de investigadores liderados por J. Zhao, presentaron un modelo de atenuación denominado como Z06 o Z2006 por sus iniciales; el estudio predice la aceleración espectral en tres categorías de sismos. Estas categorías están en función del tipo de fuente tectónico: eventos corticales, eventos inter-placa o inter-fase y eventos intra-placa o slab; los dos últimos se asocian al proceso de subducción de las placas tectónicas.

Resulta oportuno destacar que el modelo Z06 tiene aplicabilidad en regiones de Japón; un país ubicado entre varias placas tectónicas que están activas. De modo que el tipo de fuente es fundamental para generar una ecuación confiable de predicción del movimiento de suelo.

El conjunto de datos de Z06 incluye una serie de movimientos fuertes, registrados en Japón desde 1968 hasta el año 2003; se incorporan sismos de gran magnitud, tales como: Kushiro (1993), Hokkaido (1994), Kobe (1995), Tottori (2000) y Tokachi (2003). Además, se utilizan las profundidades y coordenadas epicentrales presentadas por el Centro Internacional de Sismología (ISC), ya que estas reducen el error inter-evento significativamente.

Se evidencia en la Tabla 25 un total de **4726 registros** analizados; de los cuales 4518 pertenecen a sismos registrados en Japón y 208 corresponden a eventos registrados en Irán y el oeste de Estados Unidos. La profundidad focal del evento y el mecanismo de falla, son parámetros

importantes en este modelo; en tal sentido, se diferencian tres tipos de mecanismos de falla en base al ángulo rake: normal, transcurrente e inverso.

Para el mecanismo de falla inverso, el modelo se respalda en 2285 registros; en cambio, para el mecanismo normal existen tan solo 762 registros, por lo cual, este mecanismo no se considera un grupo separado.

En el conjunto de datos del modelo Z06, se excluyeron los sismos de subducción originados en México y Chile; ya que la zona de subducción mexicana es catalogada como débil; mientras tanto, la zona de subducción chilena se caracteriza por ser fuerte, representando características opuestas y diferentes a los eventos de subducción originados en Japón.

Tabla 25: Número de registros considerados en el modelo Z06.

Mecanismo focal de falla por región	Tipo de fuente			Total de cada mecanismo
	Cortical	Inter-placa	Intra-placa	
<i>Japón:</i>				
Inverso	250	1492	408	2150
Transcurrente	1011	13	574	1598
Normal	24	3	735	762
Desconocido			8	8
<b>Total de cada tipo de fuente</b>	<b>1285</b>	<b>1508</b>	<b>1725</b>	<b>4518</b>
<i>Irán y oeste de USA:</i>				
Inverso	123	12		135
Transcurrente	73			73
<b>Total de cada tipo de fuente</b>	<b>196</b>	<b>12</b>		<b>208</b>
<b>Total de cada tipo de fuente de todas las regiones</b>	<b>1481</b>	<b>1520</b>	<b>1725</b>	<b>4726</b>

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).

## 5.2 Clasificación de suelos del modelo de Zhao *et al.* (2006)

Se emplea un esquema de clasificación de suelos utilizada en la ingeniería japonesa, en ella se categorizan cuatro clases de suelo (SC, del inglés *Site Class*), que corresponden a roca (SC I), suelo duro (SC II), suelo medio (SC III) y suelo suave (SC IV), incluyéndose en esta clasificación la roca dura.

La clasificación de suelos de Z06 se sintetiza en la Tabla 26 según el periodo del suelo y la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad,  $V_{s30}$ . En la última columna de la tabla se muestra la equivalencia de la clasificación de suelos del modelo de Zhao *et al.* (2006) con el de la guía NEHRP. La tercera columna corresponde a los coeficientes  $C_k$ , el subíndice k señala la clase de suelo, estos pueden ser de 1 a 4 y roca dura. El parámetro  $C_k$  es el utilizado en la ecuación general del modelo.

Tabla 26: Clasificación de suelos utilizada en el modelo Z06.

Clase de Suelo	Descripción	Clase de Suelo $C_k$	Periodo natural	Vs30 calculado a partir del periodo del suelo	Clase de suelo NEHRP
<b>Roca dura</b>		$C_H$		$V_{s30} > 1100$	A
<b>SC I</b>	Roca	$C_1$	$T < 0.2$ seg	$V_{s30} > 600$	A+B
<b>SC II</b>	Suelo duro	$C_2$	$0.2 = T < 0.4$ seg	$300 < V_{s30} = 600$	C
<b>SC III</b>	Suelo medio	$C_3$	$0.4 = T < 0.6$ seg	$200 < V_{s30} = 300$	D
<b>SC IV</b>	Suelo suave	$C_4$	$T = 0.6$ seg	$V_{s30} = 200$	E+F

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).

Los coeficientes del tipo de suelo:  $C_H$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  permiten estimar los efectos del tipo de fuente tectónica, esto se logró mediante un proceso de clasificación de la base de datos en base al tipo de suelo y al tipo de fuente; como se aprecia en la Tabla 27.

Tabla 27: Número de registros acordes al tipo de suelo.

Tipo de Fuente por Región	Desconocido	SC I	SC II	SC III	SC IV	Total tipo de fuente
<i>Japón:</i>						
Cortical	32	427	401	137	288	1285
Inter-placa	9	373	540	186	400	1508
Intra-placa	22	668	530	210	295	1725
<b>Total de cada clase de suelo</b>	<b>63</b>	<b>1468</b>	<b>1471</b>	<b>533</b>	<b>983</b>	<b>4518</b>
<i>Irán y oeste de USA:</i>						
Cortical		24	73	93	6	196
Inter-placa		2	7	3		12
<b>Total de cada clase de suelo</b>		<b>26</b>	<b>80</b>	<b>96</b>	<b>6</b>	<b>208</b>
<b>Total de clase de suelo de todas las regiones</b>	<b>63</b>	<b>1494</b>	<b>1551</b>	<b>629</b>	<b>989</b>	<b>4726</b>

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).



### 5.3 Ecuaciones del modelo de Zhao *et al.* (2006)

La relación de atenuación del modelo de Zhao *et al.* (2006), está dada por la siguiente ecuación general:

$$\log_e(Y_{i,j}) = a.Mw_i + b.X_{i,j} - \log_e(r_{i,j}) + e(h - hc). \delta h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \cdot \log_e(X_{i,j}) + C_k + \xi_{i,j} + \eta_i \quad (4.1)$$

$$r_{i,j} = X_{i,j} + c. \exp(d.Mw_i) \quad (4.2)$$

Donde Y es el valor de PGA en  $\text{cm/s}^2$  (gals), también es el valor del espectro de respuesta de aceleración para un amortiguamiento del 5%, en efecto, es la media de las dos componentes horizontales en  $\text{cm/s}^2$ .

A continuación se detallan los parámetros implicados en las anteriores ecuaciones:

- Mw es la magnitud de momento.
- X (km) es la distancia más cercana al plano de ruptura. En CB13 y ASK13 se denomina  $R_{rup}$ .
- h (km) es la profundidad focal, h no puede superar los 125 km; consecuentemente, si  $h \geq 125$  km se debe introducir  $h = 125$  km. En el modelo CB13, h se denomina  $Z_{hyp}$ .
- hc (km) es una constante de profundidad, equivale a 15 kilómetros en los eventos superficiales (poco profundos).
- $\delta h$  es una variable indicadora,  $\delta h = 0$  cuando  $h < hc$  y  $\delta h = 1$  para  $h \geq hc$ .
- $F_R$  es un parámetro indicador del mecanismo inverso de falla en eventos corticales y es igual a cero para otro tipo de mecanismo o evento. A diferencia de los modelos CB13 y ASK13,  $F_R$  está en función de coeficientes.

- $S_I$  es un parámetro que se emplea solamente para eventos de subducción inter-placa y vale cero para otro tipo de evento.
- $S_S$  es un parámetro utilizado en eventos de subducción intra-placa (slab) y vale cero para otro tipo de evento.
- $S_{SL}$  es un parámetro independiente de la magnitud que considera una onda sísmica compleja en eventos de subducción intra-placa.
- $C_k$  es el parámetro que relaciona el tipo de suelo.
- $a, b, c, d$  y  $e$  son coeficientes dependientes del periodo espectral.
- $\xi, \eta$  constituyen la incertidumbre del modelo.

Los parámetros de entrada de la ecuación general son: magnitud  $M_w$ , distancia  $X$  y profundidad focal  $h$ . Para un sismo superficial producido en la corteza, con una profundidad focal menor a 15 km, mecanismo de falla normal o transcurrente; se obtiene un modelo simplificado en función de los parámetros  $M_w, X$  y  $C_k$ . El parámetro  $F_R$  se emplea para un mecanismo de falla inverso, solamente si se trata de un evento cortical.

Evidentemente, el modelo predice aceleraciones espectrales que son perfectamente ajustadas a la magnitud, distancia y profundidad focal en los eventos corticales e inter-placa. Mientras tanto, en los eventos de subducción intra-placa, se adopta el factor de modificación de la distancia:  $S_{SL} \cdot \log_e(X)$ .

Los coeficientes  $a, b, c, d, e$  y los parámetros indicadores del tipo de fuente de las ecuaciones (4.1) y (4.2) están función del periodo espectral y se detallan en la Tabla 28 y Tabla 29.

Tabla 28: Coeficientes de la ecuación general.

Periodo (seg)	a	b	c	d	e	F <sub>R</sub>	S <sub>I</sub>	S <sub>S</sub>	S <sub>SL</sub>
<b>PGA</b>	1.101	-0.00564	0.0055	1.08	0.01412	0.251	0	2.607	-0.528
<b>0.05</b>	1.076	-0.00671	0.0075	1.06	0.01463	0.251	0	2.764	-0.551
<b>0.1</b>	1.118	-0.00787	0.009	1.083	0.01423	0.24	0	2.156	-0.42
<b>0.15</b>	1.134	-0.00722	0.01	1.053	0.01509	0.251	0	2.161	-0.431
<b>0.2</b>	1.147	-0.00659	0.012	1.014	0.01462	0.26	0	1.901	-0.372
<b>0.25</b>	1.149	-0.0059	0.014	0.966	0.01459	0.269	0	1.814	-0.36
<b>0.3</b>	1.163	-0.0052	0.015	0.934	0.01458	0.259	0	2.181	-0.45
<b>0.4</b>	1.2	-0.00422	0.01	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506
<b>0.5</b>	1.25	-0.00338	0.006	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554
<b>0.6</b>	1.293	-0.00282	0.003	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575
<b>0.7</b>	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.22	-0.146	2.654	-0.572
<b>0.8</b>	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.48	-0.54
<b>0.9</b>	1.433	-0.00232	0.002	1.109	0.00972	0.22	-0.206	2.332	-0.522
<b>1</b>	1.479	-0.0022	0.002	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509
<b>1.25</b>	1.551	-0.00207	0.002	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469
<b>1.5</b>	1.621	-0.00224	0.002	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379
<b>2</b>	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248
<b>2.5</b>	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221
<b>3</b>	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263
<b>4</b>	1.826	-0.00195	0.004	1.044	0.0059	0.353	-0.39	0.561	-0.169
<b>5</b>	1.825	-0.00237	0.005	1.065	0.0051	0.248	-0.498	0.225	-0.12

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).

Los coeficientes de  $F_R$  oscilan alrededor de 0.25 en periodos espectrales hasta 2.5 segundos; por lo cual,  $F_R$  es casi independiente del periodo espectral. Los eventos inter-placa producen aceleraciones iguales que los eventos corticales hasta los 0.3 segundos, pero a partir de 0.4 segundos producen menores aceleraciones espectrales.

Además, se sugiere la aplicación de una ecuación de corrección en función de la magnitud, con la finalidad de reducir el error inter evento:

$$\log_e(S_{MSst}) = P_{st}(Mw - Mc) + Q_{st}(Mw - Mc)^2 + W_{st} \quad (4.3)$$

Donde el subíndice  $st$  es igual a:  $c$  para sismos corticales,  $i$  para inter-placa y  $s$  para intra-placa. Los parámetros  $P_{st}$ ,  $Q_{st}$  y  $W_{st}$  están dados por coeficientes en función del periodo, como se aprecia en la Tabla 30.

$M_c$  es igual a 6.3 y  $P_c$  vale cero en eventos corticales e inter-placa. Para eventos intra-placa,  $M_c$  es igual a 6.5.

Tabla 29: Coeficientes  $C_k$  y desviaciones estándar del modelo Z06.

Periodo (seg)	$C_H$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_T$
<b>PGA</b>	0.293	1.111	1.344	1.355	1.420	0.604	0.398	0.723
<b>0.05</b>	0.939	1.684	1.793	1.747	1.814	0.640	0.444	0.779
<b>0.10</b>	1.499	2.061	2.135	2.031	2.082	0.694	0.490	0.849
<b>0.15</b>	1.462	1.916	2.168	2.052	2.113	0.702	0.460	0.839
<b>0.20</b>	1.280	1.669	2.085	2.001	2.030	0.692	0.423	0.811
<b>0.25</b>	1.121	1.468	1.942	1.941	1.937	0.682	0.391	0.786
<b>0.30</b>	0.852	1.172	1.683	1.808	1.770	0.670	0.379	0.770
<b>0.40</b>	0.365	0.655	1.127	1.482	1.397	0.659	0.390	0.766
<b>0.50</b>	-0.207	0.071	0.515	0.934	0.955	0.653	0.389	0.760
<b>0.60</b>	-0.705	-0.429	-0.003	0.394	0.559	0.653	0.401	0.766
<b>0.70</b>	-1.144	-0.866	-0.449	-0.111	0.188	0.652	0.408	0.769
<b>0.80</b>	-1.609	-1.325	-0.928	-0.620	-0.246	0.647	0.418	0.770
<b>0.90</b>	-2.023	-1.732	-1.349	-1.066	-0.643	0.653	0.411	0.771
<b>1.00</b>	-2.451	-2.152	-1.776	-1.523	-1.084	0.657	0.410	0.775
<b>1.25</b>	-3.243	-2.923	-2.542	-2.327	-1.936	0.660	0.402	0.773
<b>1.50</b>	-3.888	-3.548	-3.169	-2.979	-2.661	0.664	0.408	0.779
<b>2.00</b>	-4.783	-4.410	-4.039	-3.871	-3.640	0.669	0.414	0.787
<b>2.50</b>	-5.444	-5.049	-4.698	-4.496	-4.341	0.671	0.411	0.786
<b>3.00</b>	-5.839	-5.431	-5.089	-4.893	-4.758	0.667	0.396	0.776
<b>4.00</b>	-6.598	-6.181	-5.882	-5.698	-5.588	0.647	0.382	0.751
<b>5.00</b>	-6.752	-6.347	-6.051	-5.873	-5.798	0.643	0.377	0.745

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).

Tabla 30: Coeficientes de la ecuación de corrección.

Periodo (seg)	Qc	Wc	Tc	Qt	Wi	Ti	Ps	Qs	Ws	Ts
PGA	0.0	0.0	0.303	0.0	0.0	0.308	0.1392	0.1584	-0.0529	0.321
0.05	0.0	0.0	0.326	0.0	0.0	0.343	0.1636	0.1932	-0.0841	0.378
0.10	0.0	0.0	0.342	0.0	0.0	0.403	0.1690	0.2057	-0.0877	0.420
0.15	0.0	0.0	0.331	-0.0138	0.0286	0.367	0.1669	0.1984	-0.0773	0.372
0.20	0.0	0.0	0.312	-0.0256	0.0352	0.328	0.1631	0.1856	-0.0644	0.324
0.25	0.0	0.0	0.298	-0.0348	0.0403	0.289	0.1588	0.1714	-0.0515	0.294
0.30	0.0	0.0	0.300	-0.0423	0.0445	0.280	0.1544	0.1573	-0.0395	0.284
0.40	0.0	0.0	0.346	-0.0541	0.0511	0.271	0.1460	0.1309	-0.0183	0.278
0.50	-0.0126	0.0116	0.338	-0.0632	0.0562	0.277	0.1381	0.1078	-0.0008	0.272
0.60	-0.0329	0.0202	0.349	-0.0707	0.0604	0.296	0.1307	0.0878	0.0136	0.285
0.70	-0.0501	0.0274	0.351	-0.0771	0.0639	0.313	0.1239	0.0705	0.0254	0.290
0.80	-0.0650	0.0336	0.356	-0.0825	0.0670	0.329	0.1176	0.0556	0.0352	0.299
0.90	-0.0781	0.0391	0.348	-0.0874	0.0697	0.324	0.1116	0.0426	0.0432	0.289
1.00	-0.0899	0.0440	0.338	-0.0917	0.0721	0.328	0.1060	0.0314	0.0498	0.286
1.25	-0.01148	0.0545	0.313	-0.1009	0.0772	0.339	0.0933	0.0093	0.0612	0.277
1.50	-0.1351	0.0630	0.306	-0.1083	0.0814	0.352	0.0821	-0.0062	0.0674	0.282
2.00	-0.1672	0.07764	0.283	-0.1202	0.0880	0.360	0.0628	-0.0235	0.0692	0.300
2.50	-0.1921	0.0869	0.287	-0.1293	0.0931	0.356	0.0465	-0.0287	0.0622	0.292
3.00	-0.2124	0.0954	0.278	-0.1368	0.0972	0.338	0.0322	-0.0261	0.0496	0.274
4.00	-0.2445	0.1088	0.273	-0.1486	0.1038	0.307	0.0083	-0.0065	0.0150	0.281
5.00	-0.2694	0.1193	0.275	-0.1578	0.1090	0.272	-0.0117	0.0246	-0.0268	0.296

Fuente: (Zhao, *et al.*, 2006).

#### 5.4 Incertidumbre del modelo de Zhao *et al.* (2006)

La variable aleatoria  $\xi$ , es el error intra-evento, este error se atribuye a la variabilidad que existe en el valor medio pronosticado de una estación particular dentro un evento dado. El error inter-evento  $\eta$ , representa la variabilidad entre sismos de la misma magnitud. Los errores intra-evento e inter-evento tienen una media de cero y desviaciones estándar  $\sigma$  y  $\tau$ , respectivamente.

La ecuación de la desviación estándar total en el modelo de Zhao *et al.* (2006) se define:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (4.4)$$

Las desviaciones estándar  $\sigma$ ,  $\tau$  y  $\sigma_T$  son independientes de la magnitud; sin embargo, son dependientes del periodo espectral, como se aprecia en la Tabla 29. De hecho, las desviaciones estándar son las mismas para las tres categorías de sismos.

### **5.5 Alcance del modelo de Zhao *et al.* (2006)**

El conjunto de datos incluye un evento inter-placa de magnitud Mw 8.3 (26 de septiembre de 2003) y un sismo de subducción intra-placa de Mw 8.25 (4 de octubre de 1994); consecuentemente, la magnitud de momento fluctúa entre 5 y 8.3. Sin embargo, se considera un rango fiable de aplicación entre 5 y 7.5.

Para los eventos corticales se tiene una profundidad focal de aplicación entre 0 y 25 km; para eventos de inter-placa entre 10 y 50 km; y para eventos intra-placa entre 15 y 120 km.

La distancia X máxima aplicable es de 300 km. La mayoría de registros de la base de datos de Japón se encuentran entre 10 y 300 km, por lo tanto, existen pocos registros cercanos a la fuente; aunque se considera dos eventos fuertes dentro de los 10 km, estos son los sismos de Kobe (1995) y Tottori (2000). Teniendo en cuenta esta limitación se añadieron varios registros de Estados Unidos dentro de los 10 km de distancia a la fuente.

Se ha comprobado que el modelo Z06 muestra excelentes resultados en sismos corticales con mecanismo de falla transcurrente o normal, y profundidades focales hasta de 15 kilómetros.

El coeficiente  $C_H$  se estableció a partir del análisis de muy pocos sitios que contaban con roca dura, por esa razón pueden existir errores en la predicción de sitios con roca. Por otro lado, el modelo no considera ningún parámetro de respuesta no lineal del sitio, lo cual es una limitación.

## CAPÍTULO VI

### DETERMINACIÓN DE ESPECTROS

A lo largo de los planteamientos que se han venido realizando, no existe duda de la intensa actividad sísmica que ha tenido la ciudad de Quito, al encontrarse sobre fallas ciegas inversas. Si bien es importante conocer la sismicidad de la ciudad en años pasados, igualmente, es primordial estar preparados para futuros eventos. Realizada esta observación, Alvarado *et al.* (2014) prevén una posible ruptura del segmento de falla Ilumbisí - La Bota, ocasionando un sismo de magnitud Mw 6.2; esta ruptura tendría una longitud aproximada de 15 kilómetros; consecuentemente, el Centro Norte de Quito sería seriamente afectado.

En la Figura 17 se muestra una fotografía con vista hacia el este de la ciudad, se aprecia la avenida Mariscal Sucre en la parte inferior; se observa que la loma Ilumbisí-La Bota es segada por el río Machángara en el sector de la González Suárez; se visualiza la Cordillera Oriental en el fondo.



Figura 17: Loma Ilumbisí - La Bota. (Foto: O. Trujillo)

Al originarse un evento sísmico, existirán movimientos del suelo que afectarán las edificaciones. Por ejemplo un edificio de 10 pisos, tardaría aproximadamente un segundo, en describir un ciclo completo (oscilación hacia un lado y hacia el otro), por tanto, su periodo natural sería  $T=1s$ .

En cambio una vivienda de 2 plantas se mueve mucho más rápido, aproximadamente  $T=0.2s$  en describir un ciclo (Benito & Cabañas, 1999).

Tomando como ejemplo un edificio de 10 pisos emplazado en el Centro Norte de Quito, es primordial conocer su respuesta estructural ante este posible movimiento del suelo, durante su vida útil. La forma más completa de representar la respuesta máxima de una estructura ante un determinado movimiento, es por medio de espectros de respuesta, dicha respuesta se puede expresar en términos de aceleración. Así, la aceleración máxima con la que responde el edificio de 10 pisos es justamente la ordenada espectral de  $T=1s$ . (Benito & Cabañas, 1999).

Los tres modelos de predicción de movimiento del suelo, establecen ordenadas espectrales con periodos que van hasta 5 o 10 segundos. Las edificaciones del Centro Norte de Quito no superan los 30 pisos, por lo tanto, se presentará en este capítulo, espectros de respuesta con periodos hasta los 3 segundos.

Es así que el espectro presenta la respuesta máxima de cualquier estructura, por ende cualquier periodo; de hecho, la forma del espectro depende del movimiento del suelo y del amortiguamiento esperado en las estructuras (Benito & Cabañas, 1999). Los tres modelos de movimientos fuertes consideran un amortiguamiento del 5%.

Los sismos originados en estas fallas ciegas, tienen las siguientes características: son de corta duración; causan demasiado daño en la zona epicentral cuando la magnitud es mayor que 6, pero se atenúan muy rápidamente con la distancia (Aguilar, *et al.*, 2014).

Al atenuarse el movimiento del suelo, conforme se distancia del epicentro, se tendrán varios niveles de intensidad del movimiento. Es imprescindible conocer cómo se atenúa el movimiento del suelo en las



diferentes parroquias. Por tal razón se han analizado sitios de interés, distribuidos ampliamente en el Centro Norte de Quito, conformando de esta manera una malla de 551 puntos de estudio. Tal como se aprecia en la Figura 18 las parroquias del Centro Norte de Quito se emplazan sobre la proyección superficial del plano de ruptura; esto es muy preocupante, ya que al producirse un evento sísmico en el segmento Ilumbisí-La Bota, el epicentro se localizaría en algún barrio del Centro Norte de Quito.

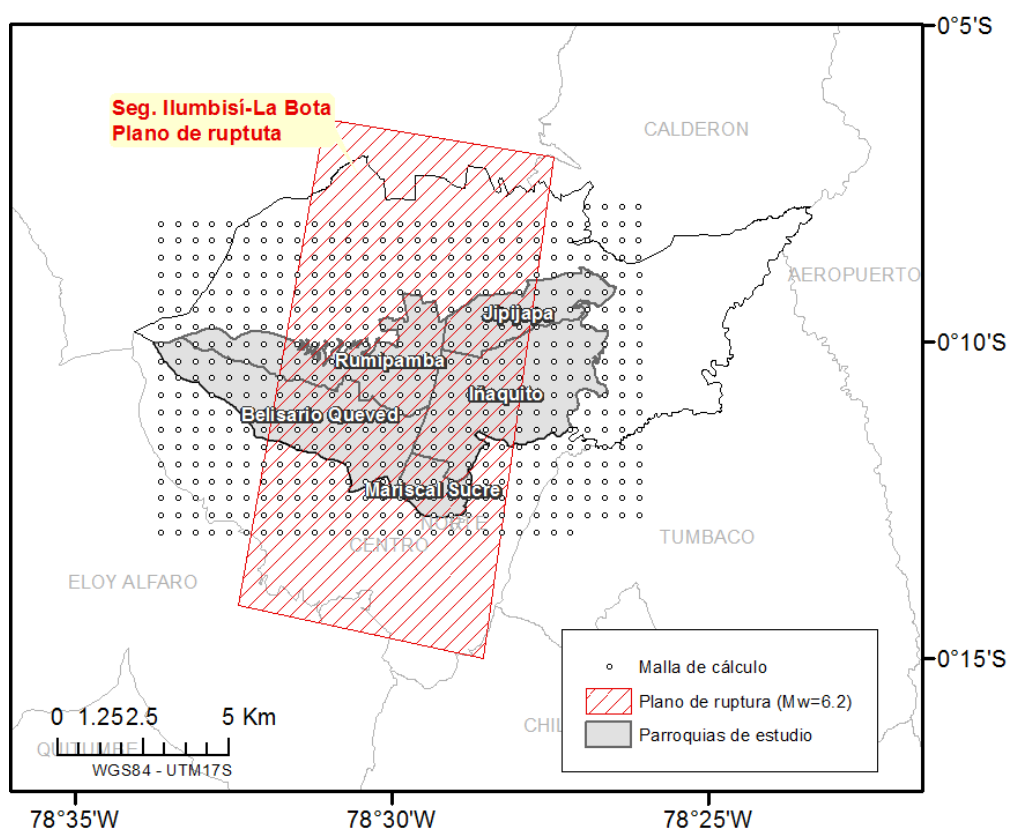


Figura 18: Sitios de estudio emplazados en el Centro Norte de Quito.

Fuente: (Aguilar, 2014)

Cabe destacar, por su importancia práctica, la relación existente entre PGA y las ordenadas espectrales ( $S_a$ ). Para frecuencias muy altas del movimiento, una estructura rígida tiende a moverse con el terreno, y por lo tanto la aceleración de respuesta de la edificación, coincide prácticamente con la máxima del suelo; por eso, la aceleración espectral del periodo  $T \approx 0$  (límite de alta frecuencia), coincide prácticamente con la aceleración máxima

del movimiento, es decir,  $S_a(\omega \approx \infty) \equiv \text{PGA}$ . En efecto, la aceleración máxima del suelo PGA, constituye una medida de fuerza de inercia que ofrece la estructura al movimiento y en consecuencia, de su capacidad de daño (Benito & Cabañas, 1999).

### 6.1 Detalle del programa

Dada la gran cantidad de datos utilizados en cada uno de los modelos y en cada uno de los sitios de estudio, se optó por emplear hojas electrónicas de cálculo; además, se realizaron contribuciones a la librería de CEINCLAB, cuyos programas son desarrollados en Matlab, teniendo numerosas aplicaciones en el análisis estático y dinámico de estructuras. En la Figura 19 se describe el procedimiento de cálculo utilizado en la obtención de los espectros de respuesta.

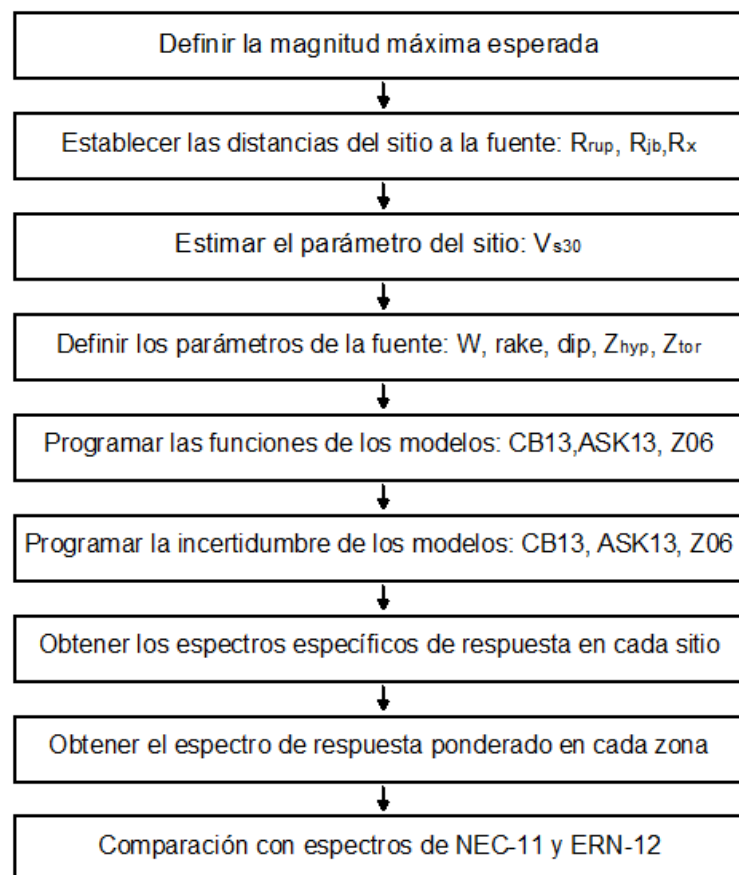


Figura 19: Esquematización del procedimiento de cálculo.

Previamente, se ha definido un escenario de peligrosidad para el Centro Norte de Quito, ya que se espera un evento de magnitud máxima  $M_w$  6.2, el cual fue corroborado en el capítulo II.

Luego se determinan las distancias  $R_{rup}$ ,  $R_x$  y  $R_{jb}$  desde cada uno de los puntos de la malla hasta la fuente sísmica. A continuación se ilustra de manera detallada, la obtención de las distancias a la fuente.

La Figura 20b se muestra el plano de ruptura en la superficie, este plano tiene una dirección aproximada  $N10^\circ E$ , acorde a la dirección de la traza de la falla del segmento Ilumbisí-La Bota; se ha emplazado 551 puntos o sitios de estudio cada 500 metros. Debido a que el Centro Norte de Quito se levanta con respecto a los valles de Cumbayá y Tumbaco, por compresión tectónica, se tienen dos bloques: el primero denominado bloque levantado (hanging-wall-HW) y el segundo, bloque deprimido (footwall-FW); en consecuencia, todo el Centro Norte de Quito se encuentra en el hanging-wall y los valles mencionados en el footwall.

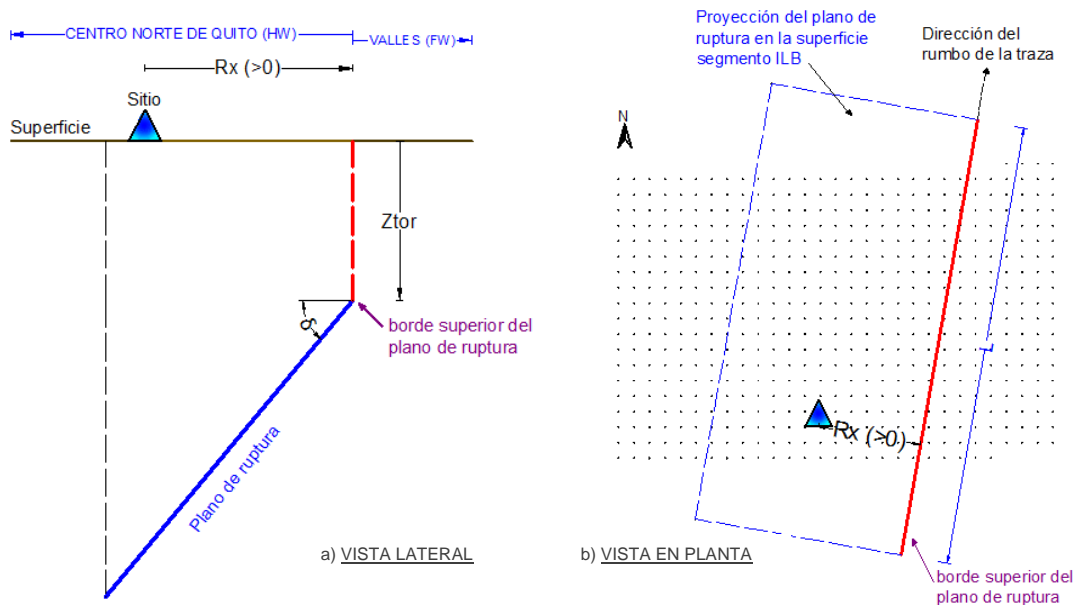


Figura 20: Sitio emplazado sobre la proyección superficial del plano de ruptura.

Existen puntos de estudio localizados sobre la proyección superficial del plano de ruptura y otros fuera de este, por lo tanto se ilustra estas dos posiciones en la Figura 20 y Figura 21. La distancia  $R_x$  es negativa en la dirección del bloque deprimido y positiva en la dirección del bloque levantado; esta distancia es un parámetro fundamental los modelos CB13 y ASK13.

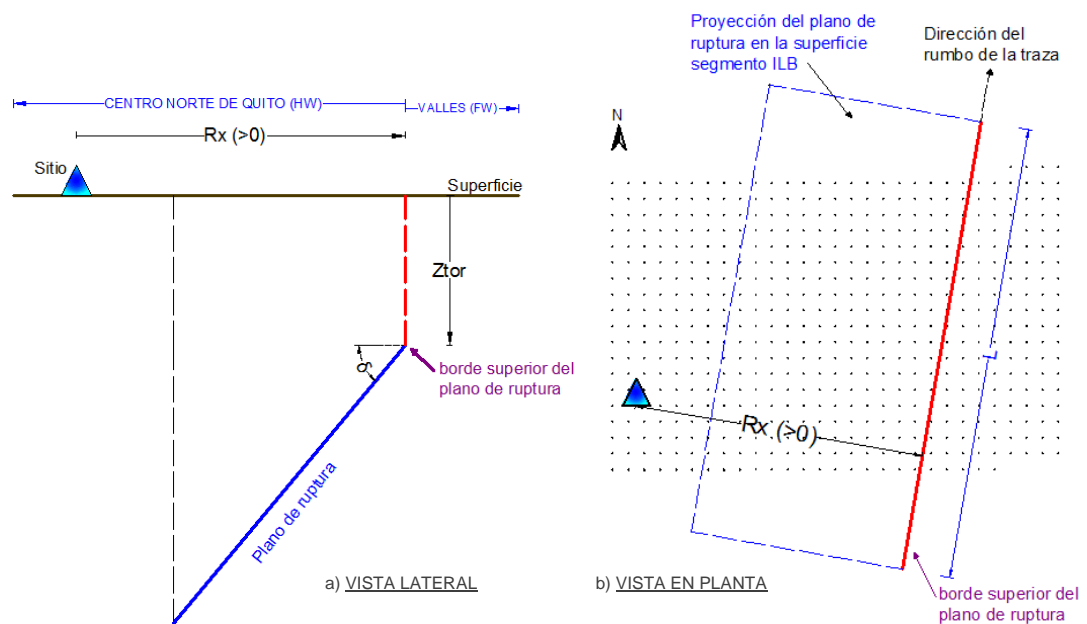


Figura 21: Sitio localizado fuera de la proyección del plano de ruptura.

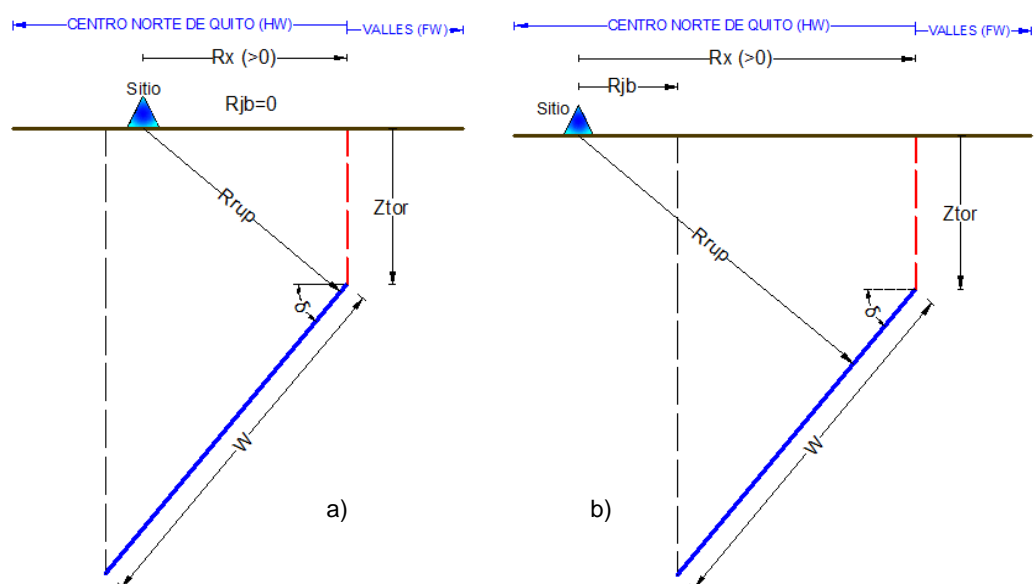


Figura 22: Medidas usadas en los modelos ASK13 y CB13.

En la Figura 22 se compilan los parámetros utilizados en los modelos de movimientos fuertes:  $W$ ,  $dip$ ,  $Z_{tor}$ ,  $R_x$ ,  $R_{rup}$  y  $R_{jb}$ . Cabe destacar que el modelo de Zhao *et al.* (2006) únicamente considera la distancia  $X$  ( $R_{rup}$ ) como un parámetro de predicción. La Figura 22a representa un sitio localizado sobre la proyección superficial del plano de ruptura, en cambio, la Figura 22b muestra un sitio localizado fuera de la proyección del plano de ruptura.

Adicionalmente, se presenta los parámetros para los sitios localizados en el bloque deprimido, en consecuencia emplazados fuera de la proyección superficial del plano de ruptura, Figura 23.

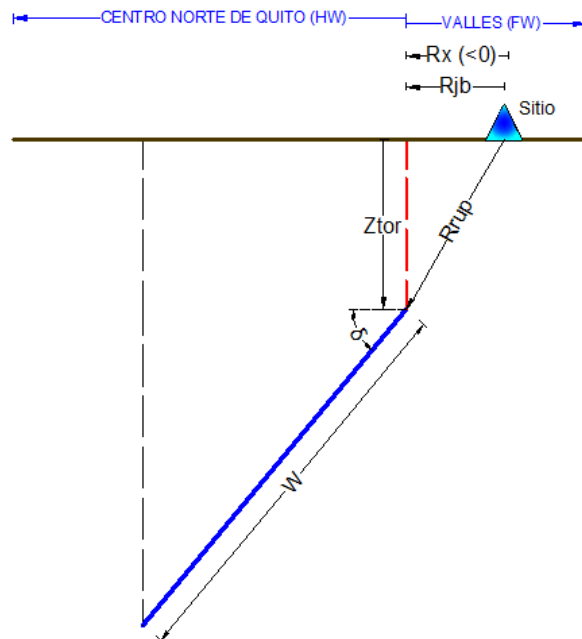


Figura 23: Sitio localizado en el bloque deprimido.

Acorde al procedimiento de cálculo utilizado en la obtención de los espectros de respuesta, se necesita conocer el valor de  $v_{s30}$  en cada uno de los puntos de la malla; se estimó una velocidad de onda de corte congruente con el estudio de Microzonificación Sísmica de Quito, esto fue de 400 m/s.

Ante la presencia de una falla ciega inversa, en la cual, el bloque de Quito se levanta respecto al de los valles, se tiene un desplazamiento casi vertical del bloque; desde otro punto de vista, el bloque de Quito se desplaza verticalmente y al mismo tiempo perpendicularmente con respecto a la traza de la falla ILB; con lo cual el ángulo promedio de desplazamiento (rake) es de 90 grados.

Alvarado *et al.* (2014) estiman un área del plano ruptura de  $176 \text{ km}^2$  para el segmento Ilumbisí-La Bota, al modelar esta área como un rectángulo se encuentra que el ancho del plano de ruptura es  $W = 11.73 \text{ km}$ . Además, se considera una profundidad focal de 10 km, esta profundidad es un valor medio de las profundidades hipocentrales de eventos originados en Quito en años pasados, tal como se indicó en el capítulo II. Al observar la Figura 5 se constata que la profundidad al borde superior de la ruptura ( $Z_{\text{tor}}$ ) está alrededor de los 5 kilómetros.

Una vez establecidos los parámetros de la fuente, se programó las funciones de los modelos. Consecuentemente, se halló los espectros específicos de respuesta e incertidumbre en los 551 sitios de estudio.

Adicionalmente, se encontraron los espectros específicos de respuesta: máximo y mínimo. Para encontrar un espectro representativo de todo el Centro Norte de Quito, se calculó la media los espectros específicos de respuesta, es así que a continuación se presentarán estos espectros medios.

## 6.2 Espectros con modelo de Campbell y Bozorgnia (2013).

En la Tabla 31 se detallan las ordenadas espectrales de  $\mu$ ,  $\mu + \sigma$  y  $\mu - \sigma$  en unidades de fracción de la gravedad.  $\mu$  representa la probabilidad de excedencia de las ordenadas espectrales del 50%. Los valores  $\mu + \sigma$  y  $\mu - \sigma$  corresponden a estas ordenadas espectrales incluyendo las desviaciones estándar del modelo CB13. Por lo tanto,  $\mu + \sigma$  y  $\mu - \sigma$  constituyen la incertidumbre del modelo.

Los espectros específicos de respuesta máximos y mínimos del área de estudio se muestran en la Figura 24. El espectro de respuesta medio considerado representativo del Centro Norte de Quito (CNQ), se indica en la Figura 25 y Figura 26.

Tabla 31: Valores del espectro medio e incertidumbre, CB13.

T (seg)	$\mu$ (g)			$\mu + \sigma$ (g)			$\mu - \sigma$ (g)		
	medio	min	max	medio	min	max	medio	min	max
<b>0</b>	0.41	0.29	0.49	0.69	0.49	0.80	0.25	0.17	0.30
<b>0.010</b>	0.42	0.29	0.49	0.70	0.49	0.81	0.25	0.17	0.30
<b>0.020</b>	0.43	0.30	0.51	0.72	0.50	0.85	0.26	0.18	0.31
<b>0.030</b>	0.47	0.32	0.55	0.78	0.54	0.92	0.28	0.19	0.33
<b>0.050</b>	0.53	0.37	0.63	0.91	0.64	1.06	0.32	0.21	0.38
<b>0.075</b>	0.64	0.45	0.74	1.11	0.81	1.29	0.37	0.25	0.43
<b>0.100</b>	0.72	0.52	0.83	1.26	0.94	1.45	0.41	0.29	0.48
<b>0.150</b>	0.79	0.59	0.90	1.37	1.06	1.54	0.46	0.33	0.53
<b>0.200</b>	0.80	0.61	0.92	1.39	1.08	1.57	0.46	0.34	0.54
<b>0.250</b>	0.83	0.61	0.96	1.44	1.07	1.65	0.48	0.34	0.56
<b>0.300</b>	0.84	0.60	0.98	1.50	1.08	1.75	0.47	0.33	0.55
<b>0.400</b>	0.77	0.53	0.91	1.42	0.99	1.68	0.41	0.28	0.49
<b>0.500</b>	0.67	0.46	0.80	1.28	0.88	1.53	0.35	0.24	0.42
<b>0.750</b>	0.50	0.32	0.61	1.01	0.65	1.25	0.25	0.16	0.30
<b>1.000</b>	0.35	0.23	0.42	0.72	0.46	0.86	0.17	0.11	0.20
<b>1.500</b>	0.19	0.12	0.22	0.39	0.25	0.46	0.09	0.06	0.11
<b>2.000</b>	0.12	0.08	0.14	0.24	0.16	0.28	0.06	0.04	0.07
<b>3.000</b>	0.06	0.04	0.07	0.13	0.09	0.15	0.03	0.02	0.04

Espectros específicos de respuesta máximo y mínimo (CB13)

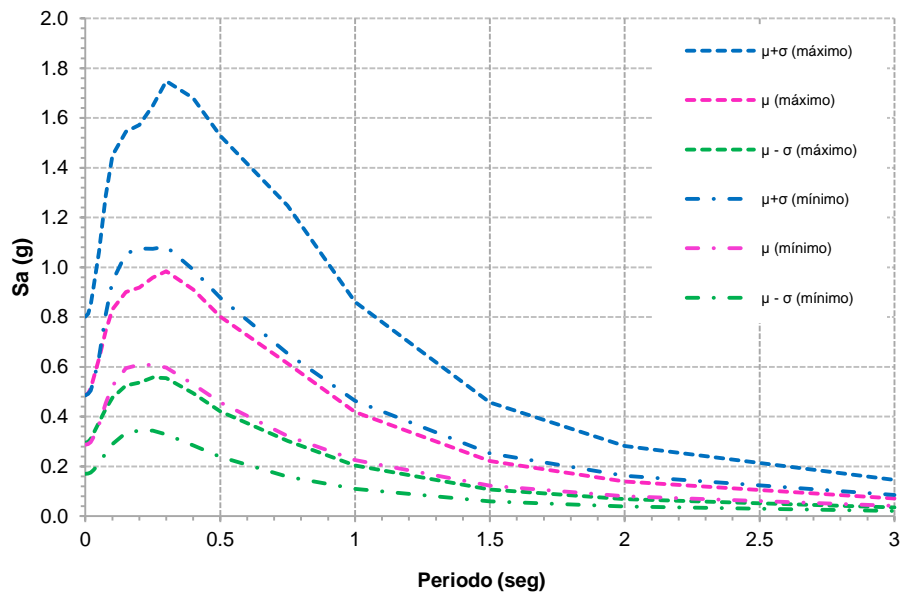
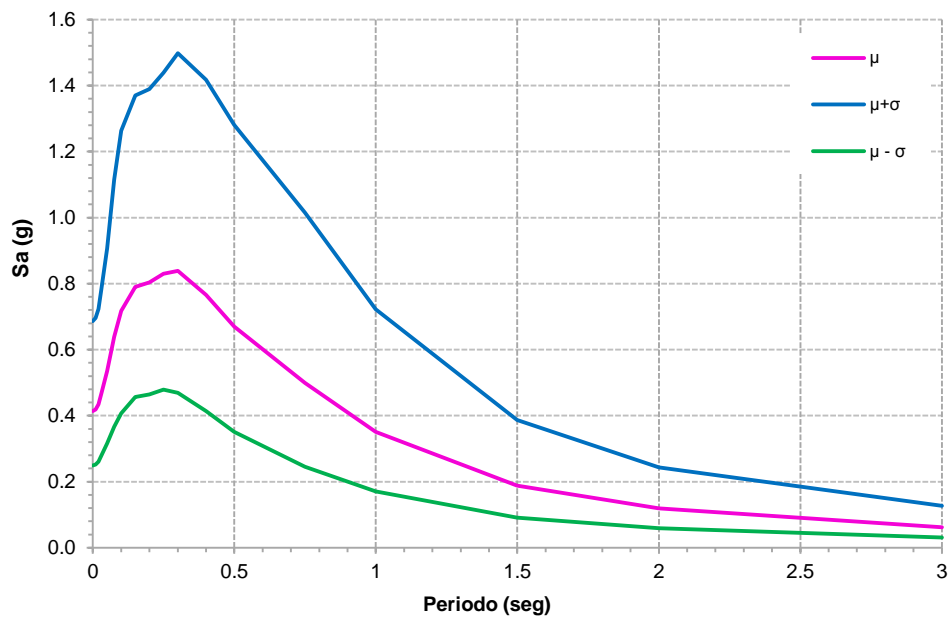


Figura 24: Espectros específicos máximo y mínimo (CB13).

Espectros respuesta, CNQ (CB13)

Figura 25: Espectro  $\mu$ ,  $\mu + \sigma$  y  $\mu - \sigma$  (CB13).



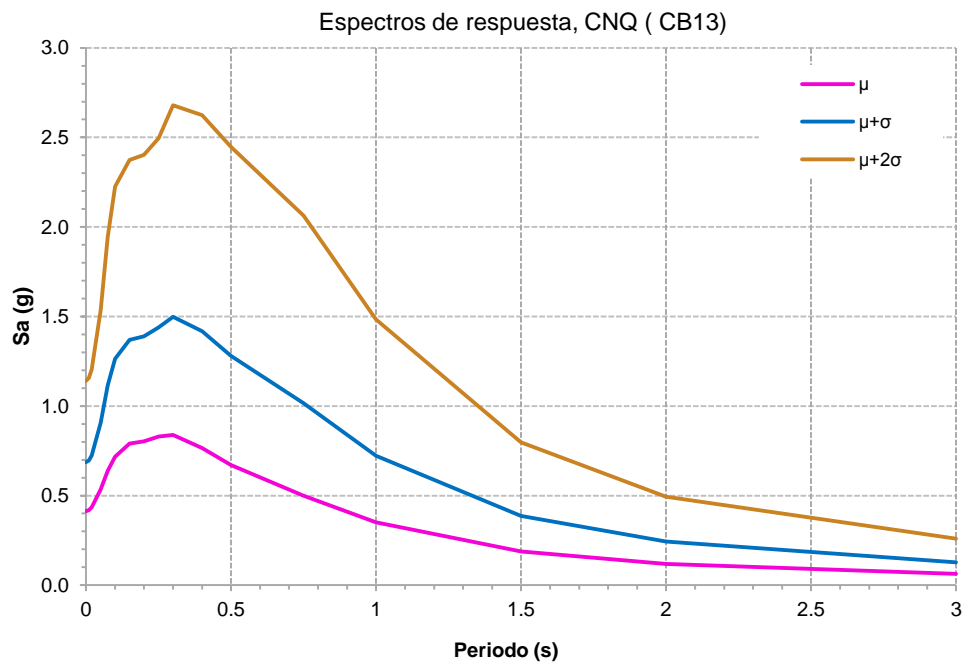


Figura 26: Espectro  $\mu$ ,  $\mu+\sigma$  y  $\mu+2\sigma$  (CB13).

En la Figura 27 se presenta los valores de la desviación estándar del modelo CB13, se aprecian los valores de la desviación estándar: inter-evento  $\tau$ , intra-evento  $\phi$  y total  $\sigma$ .

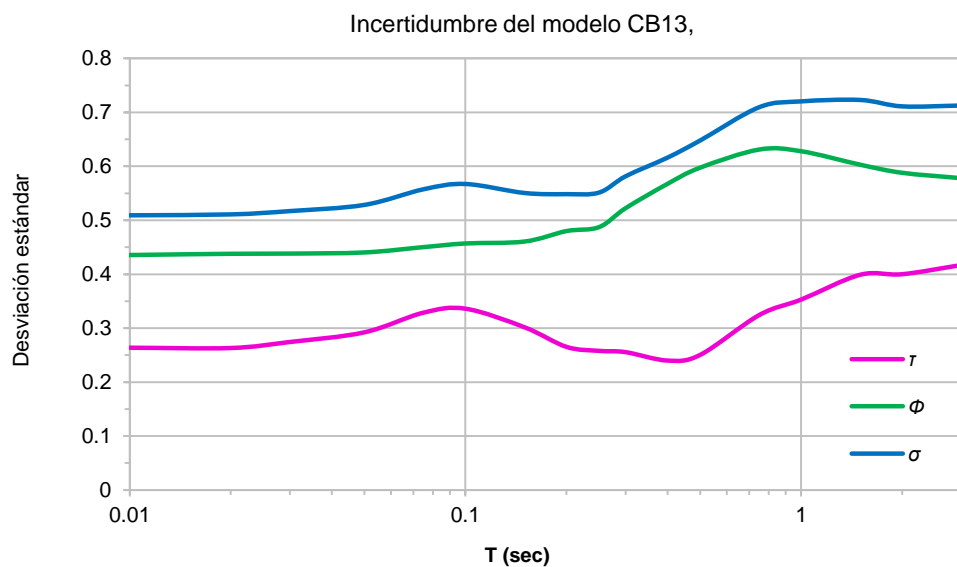


Figura 27: Desviaciones estándar del modelo CB13.

En cuanto a las leyes de atenuación, éstas se puede sintetizar en dos aspectos, que son: el primero, a una misma distancia (a la fuente), se espera tener la misma intensidad sísmica (aceleración); el segundo, la intensidad sísmica disminuye conforme la distancia aumenta y viceversa (Aguiar, 2008).

En la Figura 28 se expone la atenuación del movimiento del suelo en los diferentes sitios de estudio del bloque levantado.

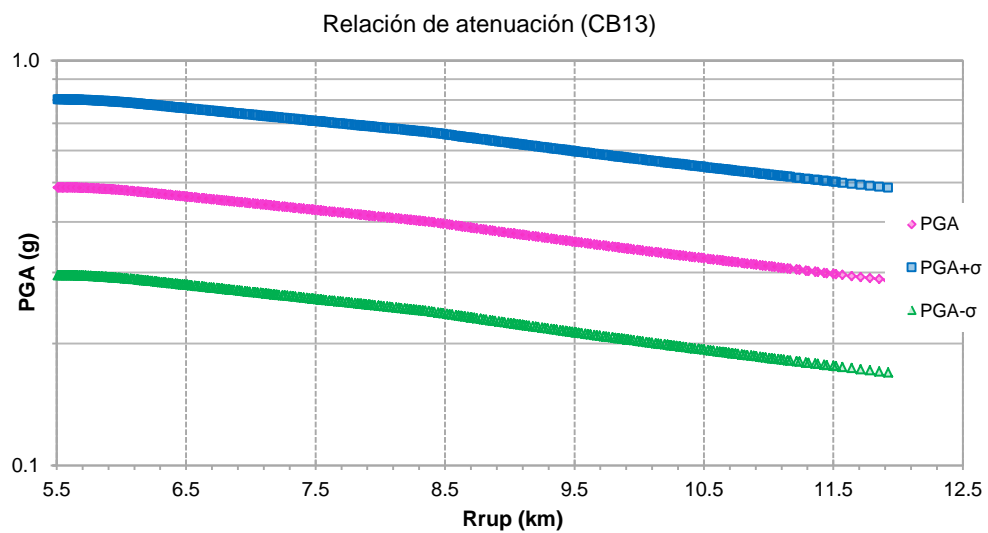


Figura 28: Atenuación de PGA con la distancia, modelo CB13.

### 6.3 Espectros con modelo de Abrahamson, Silva y Kamai (2013).

Tabla 32: Valores del espectro medio e incertidumbre, ASK13.

T (seg)	$\mu$ (g)			$\mu + \sigma$ (g)			$\mu - \sigma$ (g)		
	medio	min	max	medio	min	max	medio	min	max
0	0.33	0.24	0.37	0.61	0.43	0.68	0.18	0.13	0.21
0.010	0.33	0.24	0.37	0.61	0.43	0.68	0.18	0.13	0.21
0.020	0.34	0.24	0.38	0.61	0.44	0.68	0.19	0.13	0.21
0.030	0.33	0.24	0.37	0.60	0.43	0.66	0.19	0.13	0.21
0.050	0.40	0.29	0.45	0.71	0.52	0.79	0.22	0.16	0.25
0.075	0.51	0.37	0.57	0.91	0.66	1.00	0.28	0.20	0.32
0.100	0.61	0.45	0.68	1.08	0.80	1.20	0.35	0.25	0.39
0.150	0.73	0.54	0.80	1.26	0.96	1.39	0.42	0.31	0.46
0.200	0.82	0.59	0.91	1.46	1.08	1.61	0.46	0.33	0.51
0.250	0.85	0.60	0.96	1.59	1.14	1.79	0.46	0.32	0.52
0.300	0.87	0.59	1.00	1.72	1.17	1.96	0.44	0.30	0.51
0.400	0.72	0.47	0.82	1.47	0.97	1.69	0.35	0.23	0.40
0.500	0.59	0.39	0.69	1.22	0.80	1.41	0.29	0.19	0.33
0.750	0.39	0.25	0.45	0.80	0.52	0.94	0.18	0.12	0.22
1.000	0.27	0.17	0.31	0.56	0.36	0.66	0.13	0.08	0.15
1.500	0.14	0.09	0.17	0.30	0.19	0.36	0.07	0.04	0.08
2.000	0.09	0.06	0.10	0.19	0.12	0.23	0.04	0.03	0.05
3.000	0.05	0.03	0.06	0.10	0.06	0.12	0.02	0.01	0.03

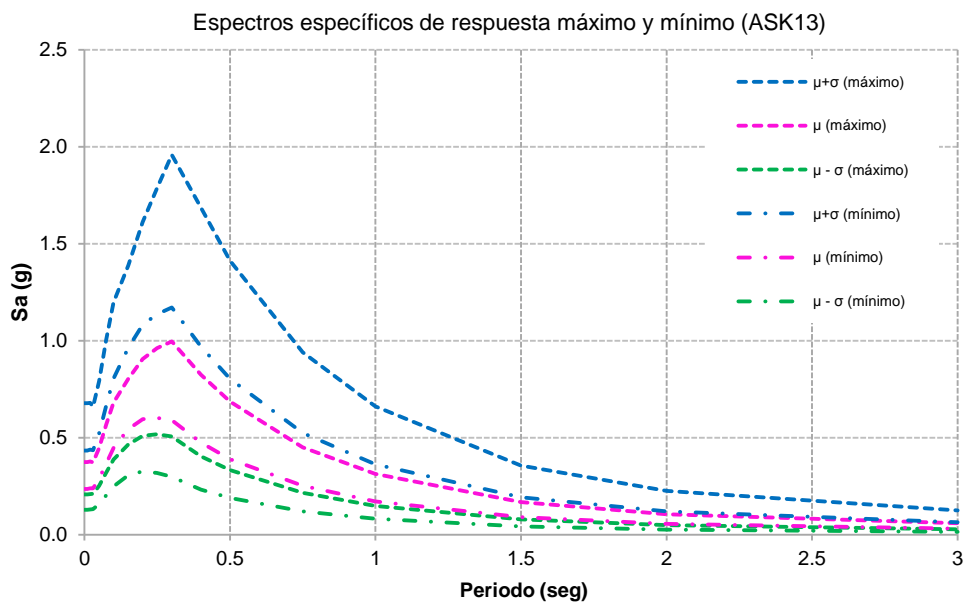


Figura 29: Espectros específicos máximo y mínimo (ASK13).

En la Tabla 32 se presentan las ordenadas espectrales halladas mediante el modelo ASK13. La Figura 29 expone los espectros específicos de respuesta máximos y mínimos de los sitios de estudio. En cambio, la Figura 30 y Figura 31 muestran los espectros medios e incertidumbre.

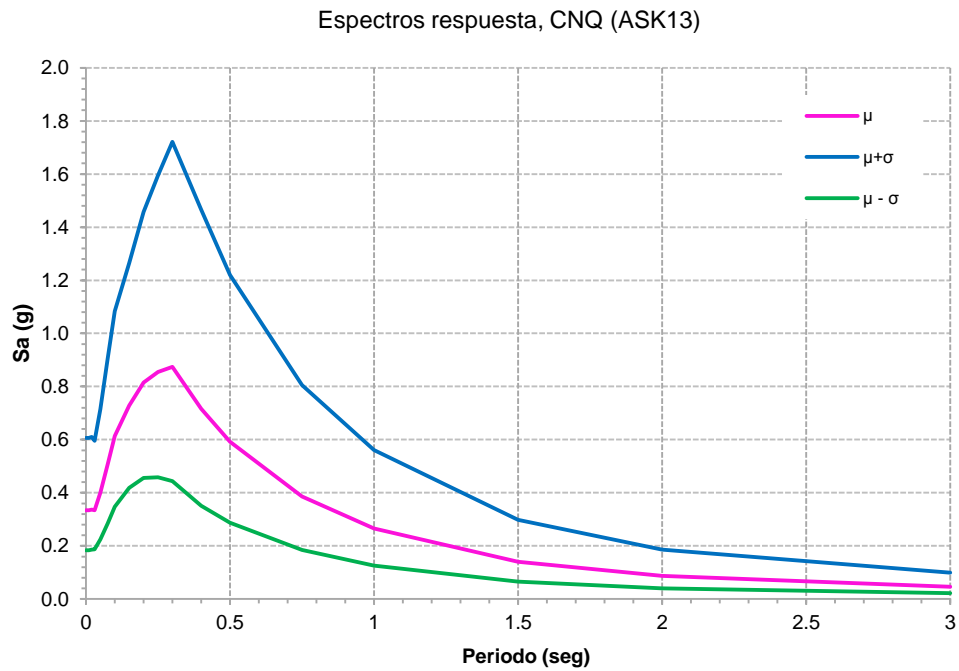


Figura 30: Espectro  $\mu$ ,  $\mu + \sigma$  y  $\mu - \sigma$  (ASK13).

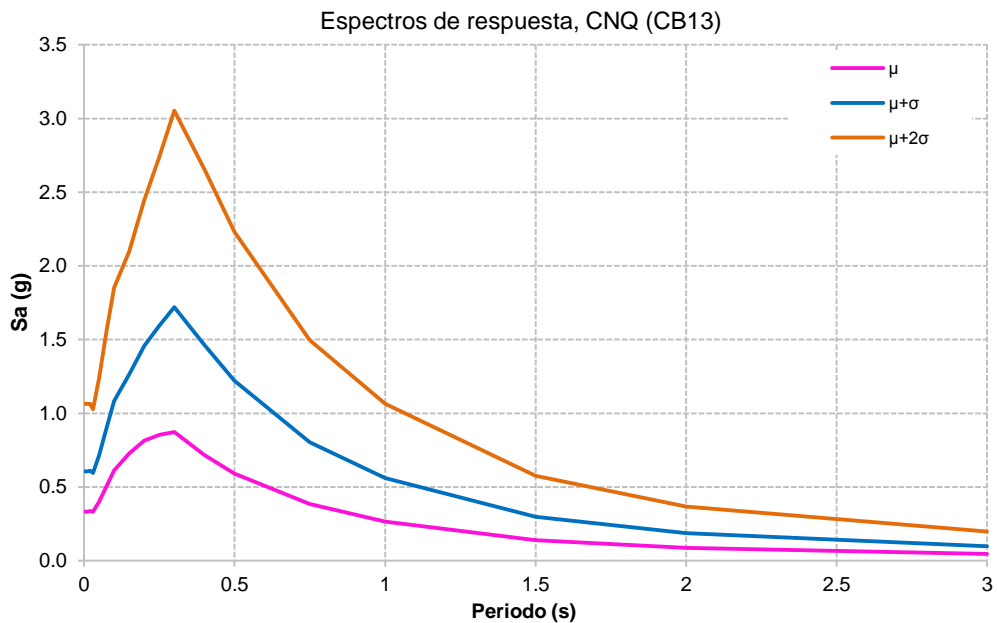


Figura 31: Espectro  $\mu$ ,  $\mu + \sigma$  y  $\mu + 2\sigma$  (ASK13).

En la Figura 32 se presenta los valores de desviación estándar del modelo ASK13; se aprecian los valores de la desviación estándar: inter-evento  $\tau$ , intra-evento  $\phi$  y total  $\sigma$ .

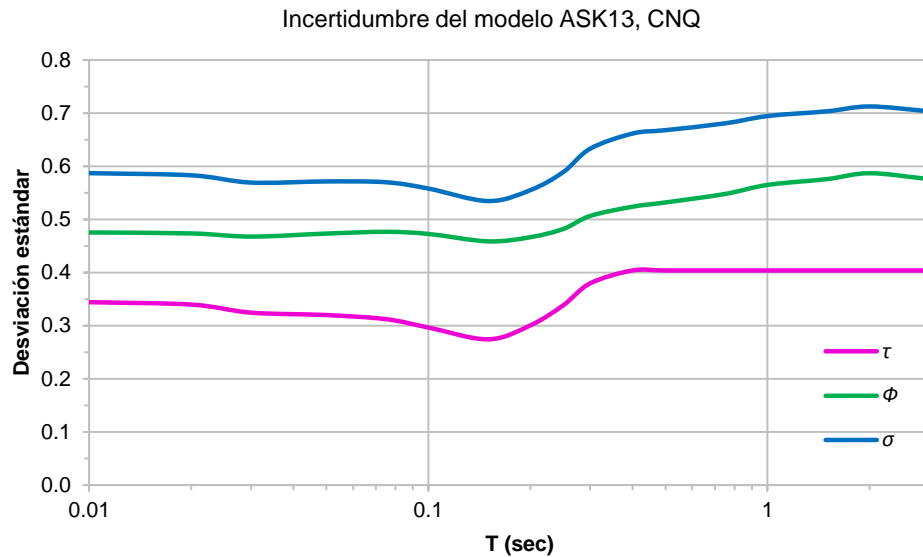


Figura 32: Desviaciones estándar del modelo ASK13.

En la Figura 33 se expone la atenuación del movimiento del suelo en los diferentes sitios de estudio del bloque levantado.

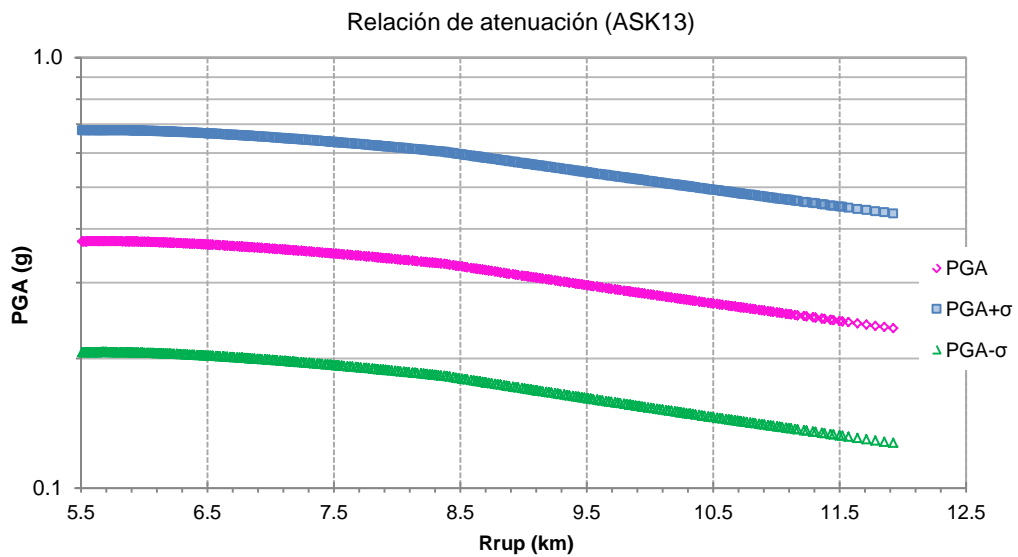


Figura 33: Atenuación de PGA con la distancia, modelo ASK13.

#### 6.4 Espectros con modelo de Zhao *et al.* (2006)

Al examinar la ecuación general de Zhao (ecuación 4.1), se identifica que la profundidad focal del evento es menor que  $h_c$ , es decir  $10 \text{ km} < 15 \text{ km}$ , por lo tanto  $\delta h = 0$ . Además, el evento analizado, se produce en el segmento de falla inversa y en la corteza poco profunda, por consiguiente, se emplea el parámetro  $F_R$  y dejando en desuso los parámetros  $S_I$ ,  $S_s$  y  $S_{SL}$ . La ecuación a utilizar para encontrar las ordenadas espectrales, se simplifica a:

$$\log_e(Y) = a \cdot Mw + b \cdot X - \log_e(r) + F_R + C_k$$

En la Figura 34 está graficado los espectros específicos máximos y mínimos de  $\mu$ ,  $\mu + \sigma_T$  y  $\mu - \sigma_T$ ; en cambio, en la Figura 35 y Figura 36 se encuentra los valores medios del espectro e incertidumbre, todo ellos descritos en la Tabla 33.

Tabla 33: Valores espectrales medios e incertidumbre, modelo Z06.

T (seg)	$\mu$ (g)			$\mu + \sigma_T$ (g)			$\mu - \sigma_T$ (g)		
	medio	min	max	medio	min	max	medio	min	max
0	0.400	0.264	0.476	0.824	0.545	0.982	0.194	0.128	0.231
0.05	0.491	0.332	0.580	1.071	0.723	1.264	0.225	0.152	0.266
0.1	0.750	0.528	0.869	1.754	1.235	2.031	0.321	0.226	0.372
0.15	0.907	0.633	1.055	2.099	1.465	2.441	0.392	0.274	0.456
0.2	0.945	0.656	1.102	2.126	1.476	2.479	0.420	0.292	0.490
0.25	0.901	0.614	1.059	1.977	1.349	2.323	0.410	0.280	0.482
0.3	0.799	0.537	0.946	1.726	1.160	2.043	0.370	0.249	0.438
0.4	0.635	0.415	0.762	1.366	0.892	1.639	0.295	0.193	0.354
0.5	0.507	0.324	0.615	1.084	0.693	1.315	0.237	0.152	0.288
0.6	0.415	0.260	0.508	0.892	0.559	1.092	0.193	0.121	0.236
0.7	0.362	0.222	0.448	0.781	0.480	0.966	0.168	0.103	0.207
0.8	0.318	0.193	0.394	0.686	0.417	0.852	0.147	0.089	0.183
0.9	0.274	0.167	0.339	0.592	0.361	0.733	0.127	0.077	0.157
1	0.233	0.143	0.289	0.507	0.311	0.627	0.108	0.066	0.133
1.25	0.185	0.111	0.230	0.400	0.241	0.499	0.085	0.051	0.106
1.5	0.150	0.091	0.187	0.327	0.198	0.407	0.069	0.042	0.086
2	0.100	0.061	0.125	0.221	0.134	0.275	0.046	0.028	0.057
2.5	0.071	0.043	0.088	0.156	0.095	0.193	0.032	0.020	0.040
3	0.054	0.033	0.068	0.118	0.072	0.147	0.025	0.015	0.031

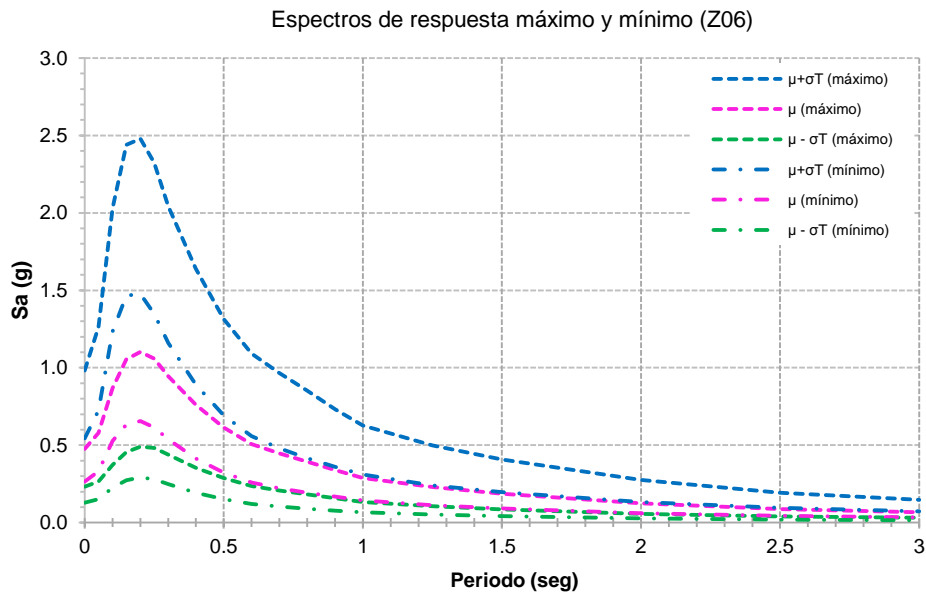


Figura 34: Espectros específicos máximo y mínimo (Z06).

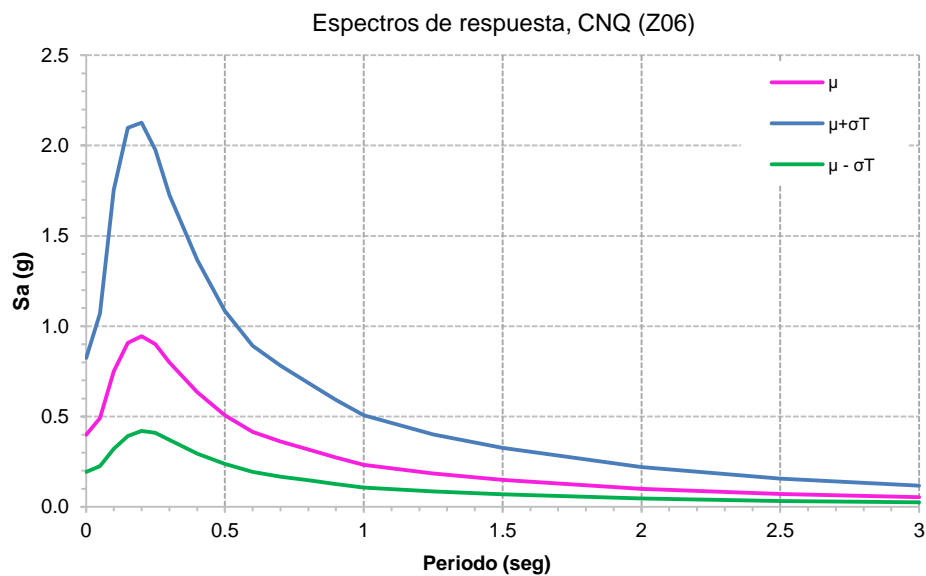


Figura 35: Espectro  $\mu$ ,  $\mu + \sigma_T$  y  $\mu - \sigma_T$  (Z06).

Cabe destacar que las desviaciones estándar del modelo de Zhao *et al.* (2006), no son dependientes del sitio de interés, ya que éstas son evaluadas mediante constantes. En la Figura 37 se presenta los valores de desviación estándar del modelo Z06: inter-evento  $\tau$ , intra-evento  $\sigma$  y total  $\sigma_T$ .

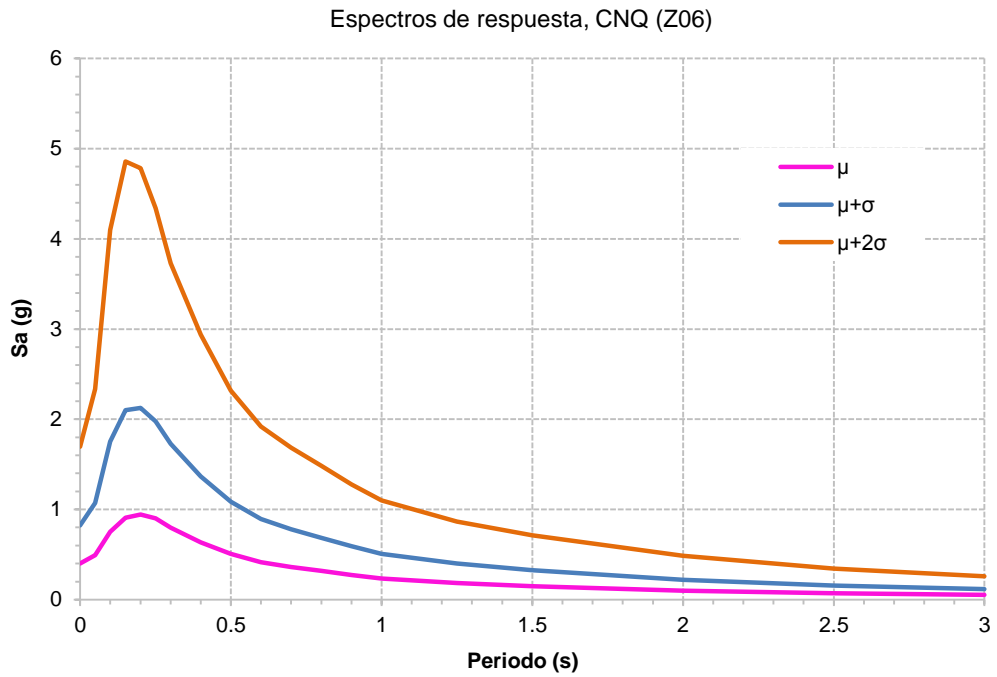


Figura 36: Espectro  $\mu$ ,  $\mu + \sigma_T$  y  $\mu + 2\sigma_T$  (Z06).

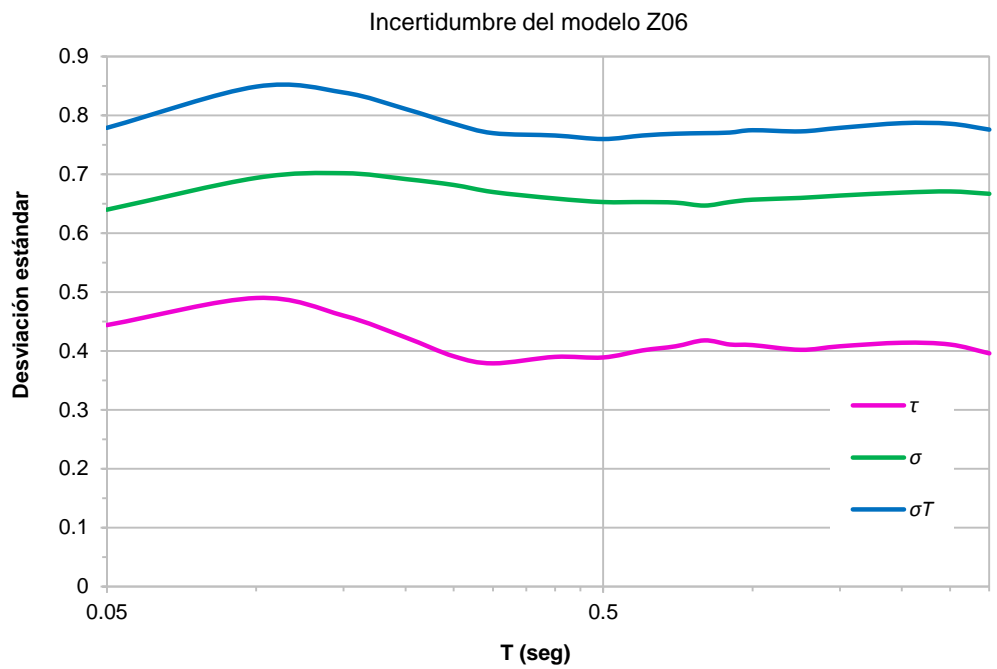


Figura 37: Desviaciones estándar del modelo Z06.



En la Figura 38 se presenta la atenuación del movimiento del suelo, PGA se obtiene en unidades de  $\text{cm/s}^2$ , estas unidades fueron transformadas a  $g$ , para apreciar la atenuación con los demás modelos.

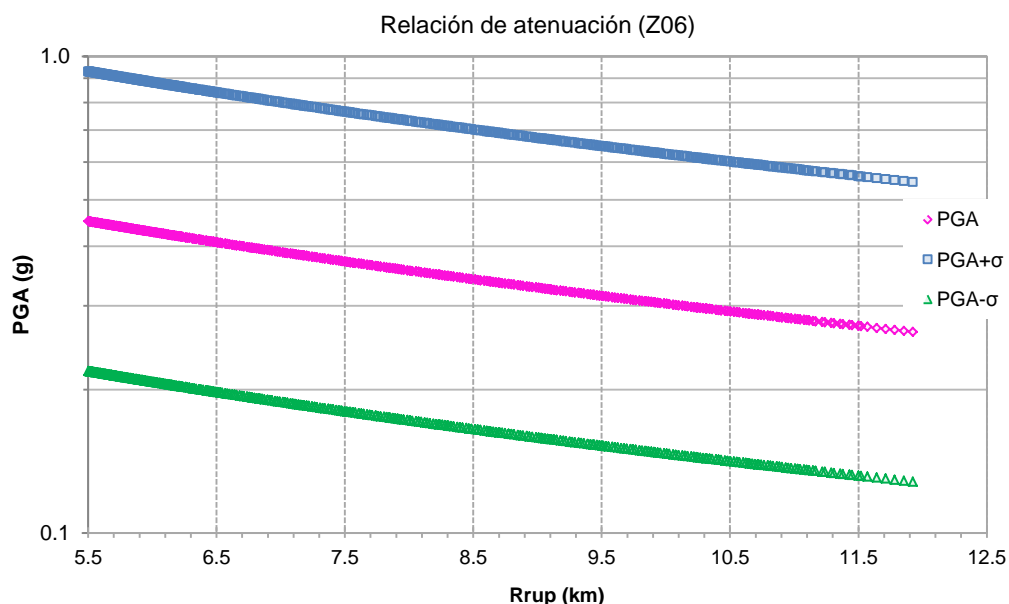
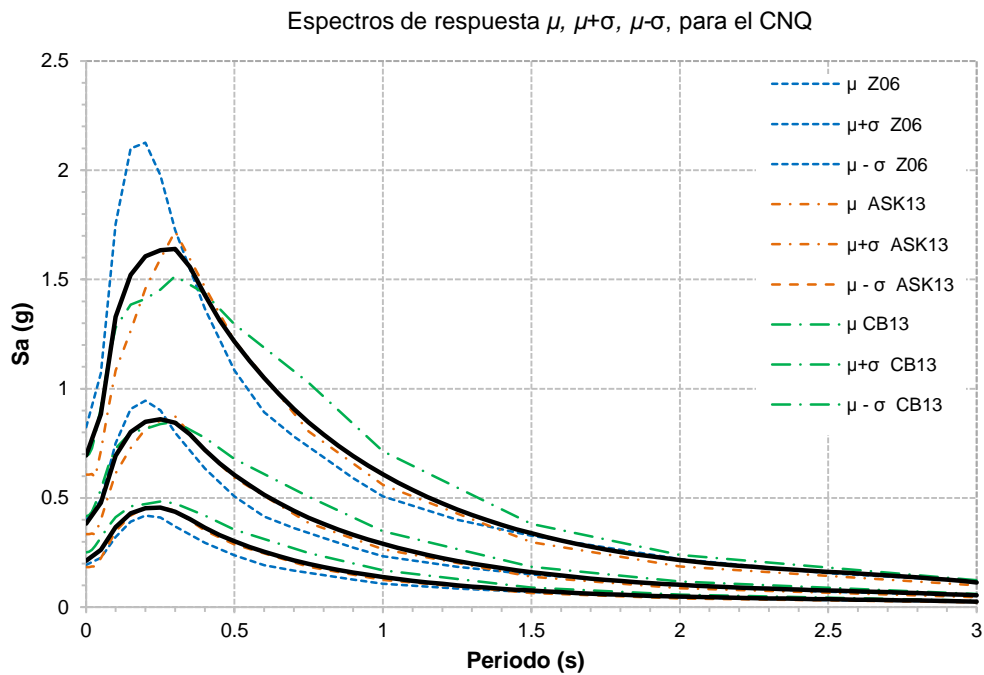
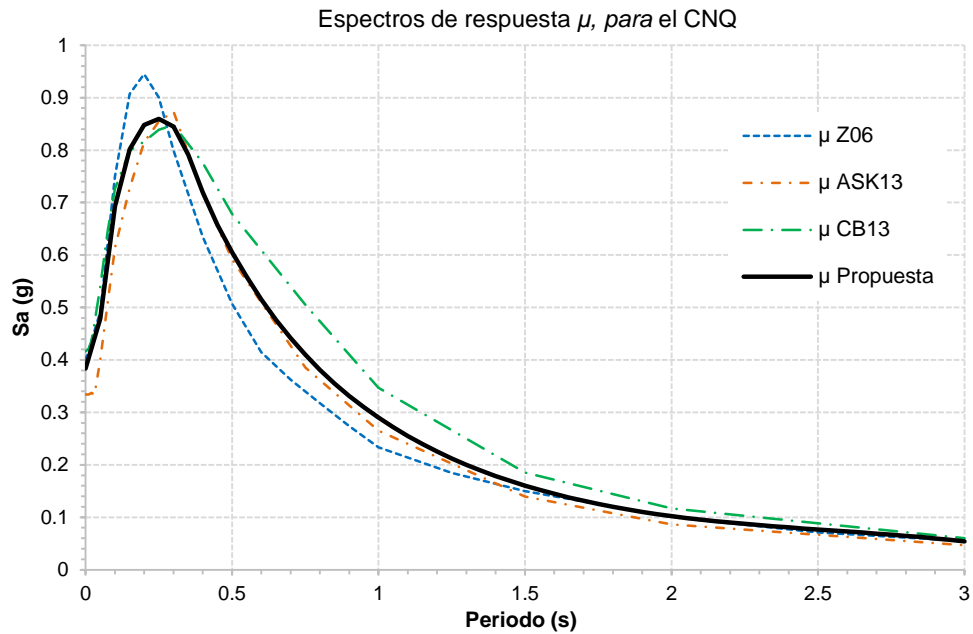


Figura 38: Atenuación de PGA con la distancia, modelo Z06.

En la Figura 39 se compila los espectros hallados con los tres modelos, estos espectros son representativos del Centro Norte de Quito y tienen una probabilidad de excedencia del 50% ( $\mu$ ). Se observa que la ordenada espectral del modelo de Z06 es mucho más alta que CB13 y ASK13 en 0.2 segundos.

Por esa razón se realizó una ponderación de los modelos como una propuesta ante esta variación en los periodos cortos. El objetivo fue darle un peso menor al modelo Z06 (25%) y a los modelos ASK13 y CB13 un peso similar, 35% y 40% respectivamente, la línea de color negro muestra esta ponderación.



En la Figura 40 se presenta los espectros hallados con los tres modelos y el espectro ponderado para un nivel confiabilidad del 50% ( $\mu$ ) y una confiabilidad del 84% ( $\mu+\sigma$  o  $\mu-\sigma$ ). Adicionalmente, se muestra los espectros para un nivel de confiabilidad del 95% ( $\mu+2\sigma$ ) en la Figura 41.

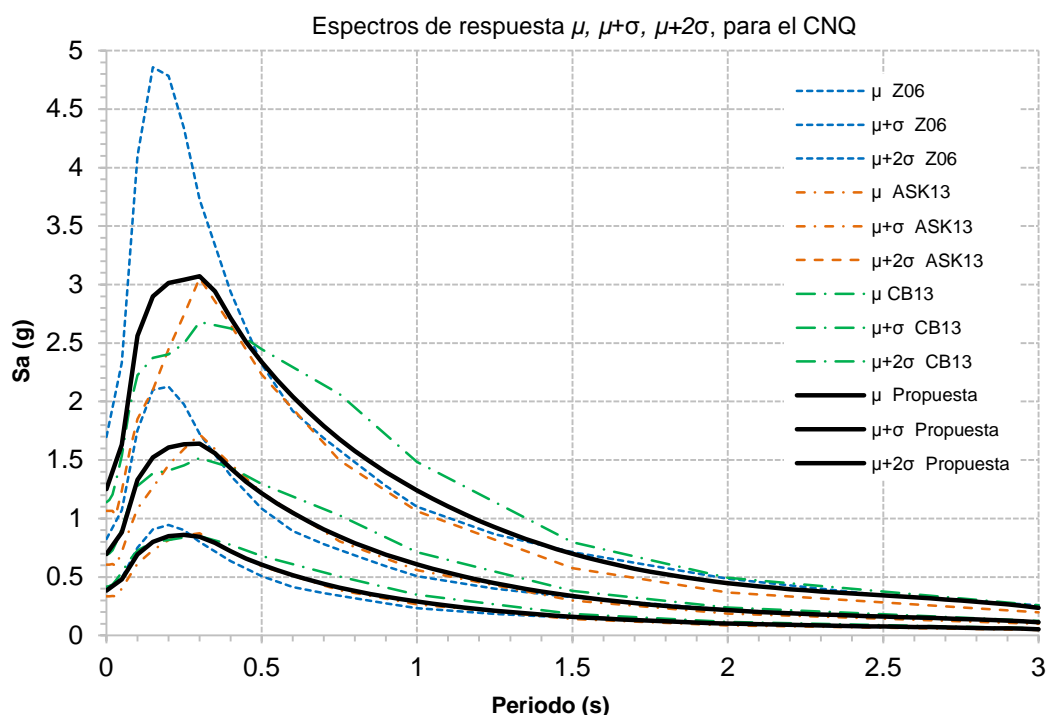


Figura 41: Espectros de respuesta  $\mu$ ,  $\mu+\sigma$ ,  $\mu+2\sigma$ .

## 6.5 Comparación con el espectro de NEC-11 y ERN-12

Se ha encontrado que las ordenadas espectrales son altas en los sectores aledaños a la traza de la falla, específicamente en el bloque levantado. En cambio, en los sectores que se sitúan sobre bloque deprimido y aledaños a la traza de la falla, las ordenadas espectrales son menores.

Para evaluar estas variaciones en las aceleraciones espectrales, se ha examinado tres zonas en el bloque levantado, que tienen ordenadas espectrales: máximas, moderadas y mínimas. En cambio, en el bloque deprimido se ha encontrado que las ordenadas espectrales son moderadas.

Las parroquias que tienen un movimiento del suelo considerable, se encuentran en la denominada *Zona 1*, la cual se ha pintado de color rojo en la Figura 42, ya que pueden producirse mayores daños en sus estructuras en comparación a las otras zonas. Las parroquias occidentales del Centro

Norte de Quito se ubican en las faldas del complejo volcánico Pichincha, estas parroquias se ubican mucho más lejos del plano de falla del segmento ILB, por lo tanto tienen menores aceleraciones del suelo que la Zona 1; dichas parroquias se han establecido en la Zona 2 (color amarillo). La Zona 3 y Zona 4, se encuentran actualmente fuera del límite urbano. Esta evaluación por zonas fue posible ya que se analizaron más de 500 sitios de interés repartidos en el Centro Norte de Quito, en el valle de Cumbayá y en el borde oriental del complejo volcánico Pichincha.

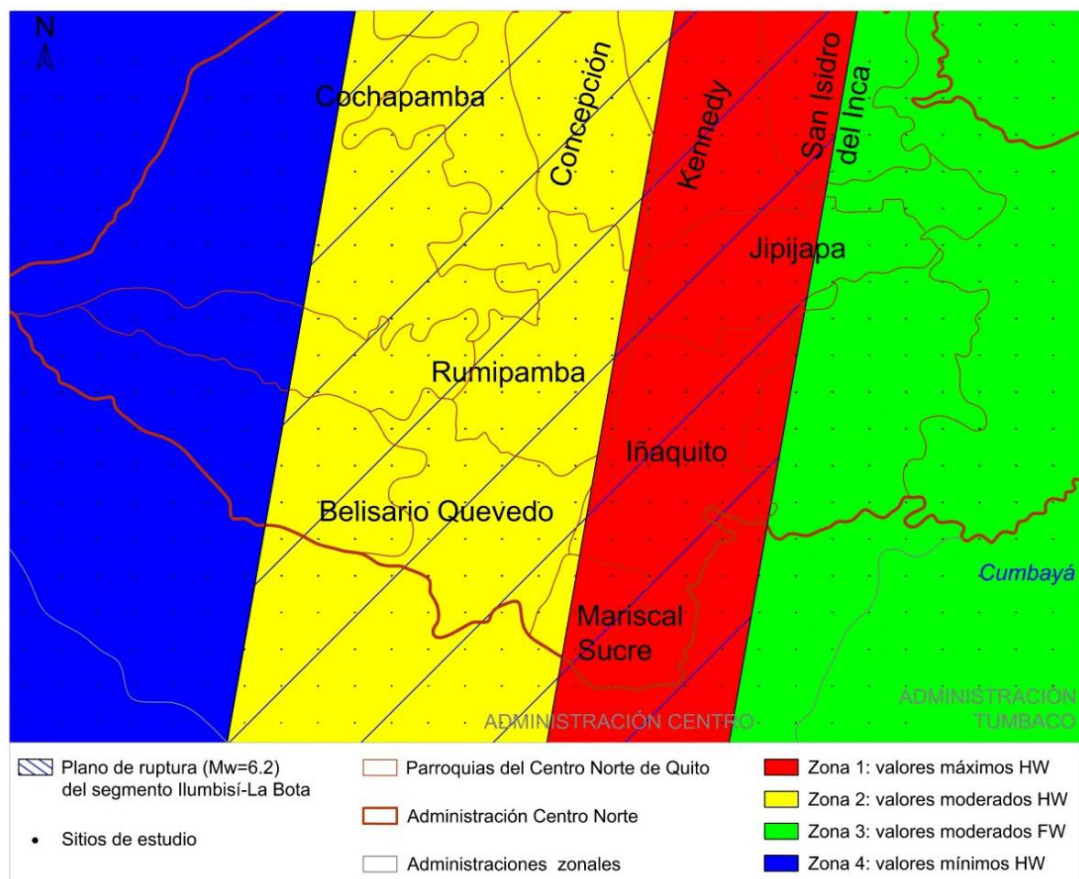


Figura 42: Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito.

A continuación se detallarán las zonas y los espectros calculados con los modelos de movimientos fuertes.

### Zona 1:

Comprende las parroquias urbanas del Centro Norte de Quito: Mariscal Sucre, Iñaquito y Jipijapa. Además, incluye los barrios meridionales de la parroquia San Isidro del Inca y Kennedy.

Acorde al estudio de Microzonificación Sísmica de Quito publicado en Aguiar (2013), los barrios ubicados en la Zona 1 son:

Tabla 34: Barrios de la Zona 1.

<b>BARRIOS DEL CENTRO NORTE DE QUITO</b>		
MARISCAL SUCRE	LA CAROLINA	PABLO YEROVI
EL GIRÓN	LA REPUBLICA	COLEGIO 24 DE MAYO
LA FLORESTA	PARQUE LA CAROLINA	JARDINES DEL BATÁN
LA COLÓN	BENALCAZAR (CIUDADELAS)	EL INCA I
SIMÓN BOLÍVAR	BATÁN ALTO	EL BATÁN (CONDOMINIO)
LA MERCED	BELLAVISTA	IÑAQUITO BAJO
GUÁPULO	ESTADIO ATAHUALPA	BATAN BAJO
GONZÁLEZ SUAREZ	BELLAVISTA ALTA	GABRIELA MARINA
LA PAZ	ARROYO DELGADO	MONTESERRÍN
LA COLINA (LA PAZ)	PEDRO BORJA	ANA LUISA
CRUZ TOBAR	PLAYA ALTA	6 DE DICIEMBRE
JUAN MONTALVO	PLAYA BAJA	JIPIJAPA
LA PRADERA	EL BATÁN	

La Figura 43 muestra los espectros hallados con los tres modelos y el espectro ponderado. En la Figura 44 se muestra la comparación del espectro ponderado con los espectros hallados en el estudio de Microzonificación Sísmica de Quito por parte de ERN en el año 2012. La comparación se la realiza con diferentes barrios ubicados en las parroquias anteriormente mencionadas.

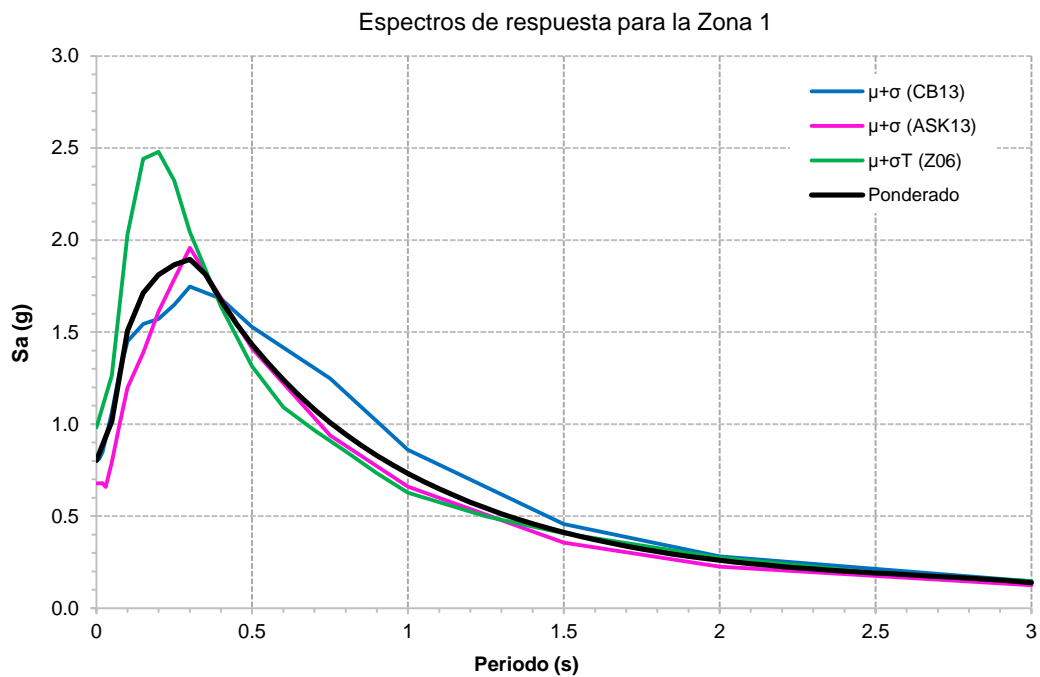


Figura 43: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 1.

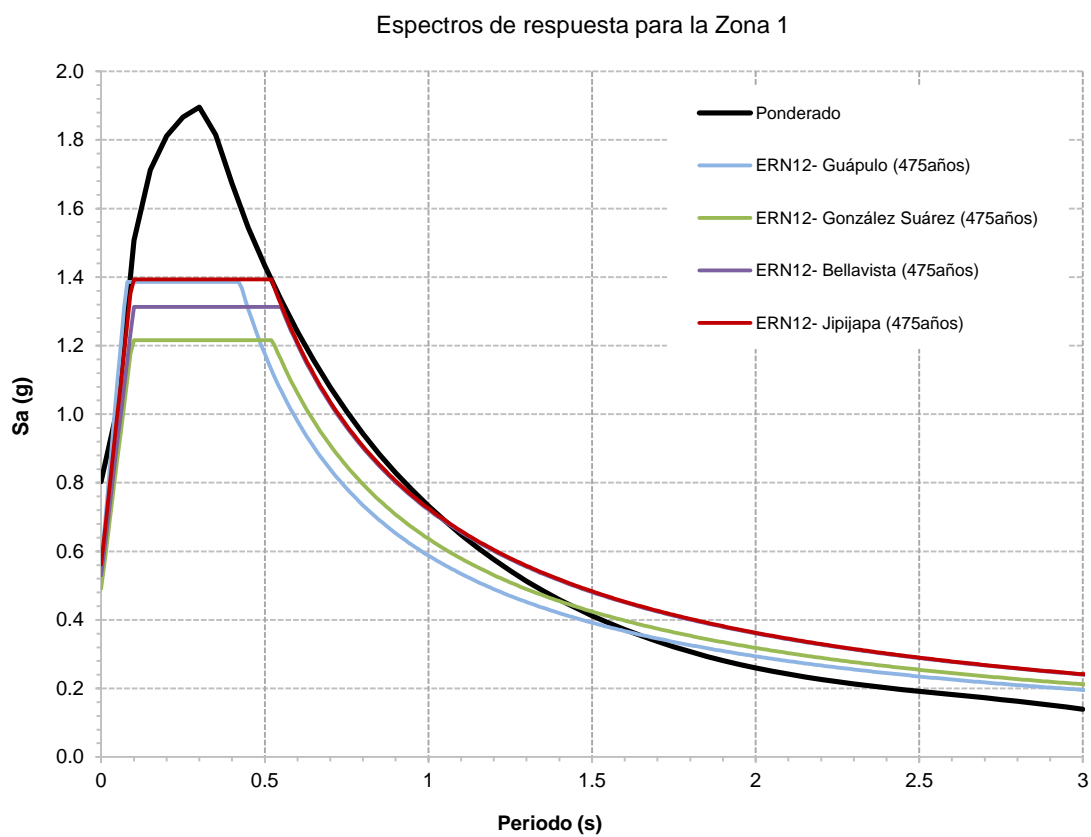


Figura 44: Comparación de espectros, Zona 1.

Se observa que en el espectro ponderado, a los 0.3 segundos la ordenada espectral sobrepasa 1.8g; mientras que los espectros de ERN-12 no sobrepasan 1.4g. Únicamente, en los periodos cortos, es decir en los periodos menores a 0.5 segundos existe una diferencia significativa entre las ordenadas espectrales halladas y las ordenadas de ERN-12.

Cabe destacar que los espectros de ERN-12 utilizan las mismas ecuaciones del espectro de aceleración de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011, con la diferencia de que emplean factores de sitio precisos, los cuales se han obtenido exclusivamente en la ciudad de Quito.

Los factores de sitio con los que se hallaron los espectros de ERN-12, se establecen en la Tabla 35.

Tabla 35: Factores de Sitio ERN-12, Zona 1.

<b>Barrio</b>	<b>Fa</b>	<b>Fd</b>	<b>Fs</b>
Guápulo	1.43	0.9	1.225
González Suárez	1.255	0.975	1.225
Bellavista	1.355	1.105	1.225
Jipijapa	1.43	1.105	1.225

Fuente: (Aguiar R. , 2013)

## **Zona 2:**

Comprende las parroquias urbanas del Centro Norte de Quito: Belisario Quevedo y Rumipamba. Además, incluye los barrios meridionales de las parroquias Cochapamba y Concepción.

Resulta oportuno destacar que la Avenida 10 de Agosto es una de las principales arterias de tránsito; recorre de sur a norte el Centro Norte de Quito, constituyéndose en un eje vial longitudinal (Wikipedia, 2014); esta avenida es el límite de división entre la Zona 1 y Zona 2.

Conforme el estudio de Microzonificación Sísmica de Quito publicado en Aguiar (2013), los barrios localizados en la Zona 2 son:

Tabla 36: Barrios de la Zona 2.

BARRIOS DEL CENTRO NORTE DE QUITO		
ARMERO	LA COMUNA (S.P)	PAMBACHUPA
CHAUPICRUZ	LA COMUNA ALTA	PROFESORES MUNICIPALES
CIUDADELA UNIVERSITARIA	LA GASCA	RUMIPAMBA
COCHAPAMBA SUR	LA GRANJA	SAN GABRIEL
COLINAS DEL PICHINCHA	LA PRIMAVERA	SAN PATRICIO
CONDOMINIOS S. PICHINCHA	LAS CASAS	SAN VICENTE
EINSTEIN	LAS CASAS BAJO (BELISARIO QUEVEDO)	SANTA CLARA DE MILLÁN
EL ARMERO	LIFE	TENIS CLUB
EL BOSQUE	MARIANA DE JESUS	UNIÓN NACIONAL 1
F.A.E	MIRAFLORES	UNIÓN NACIONAL 2
GRANDA CENTENO	MIRAFLORES BAJO	VOZ DE LOS ANDES
IÑAQUITO ALTO	NINGUILLA	

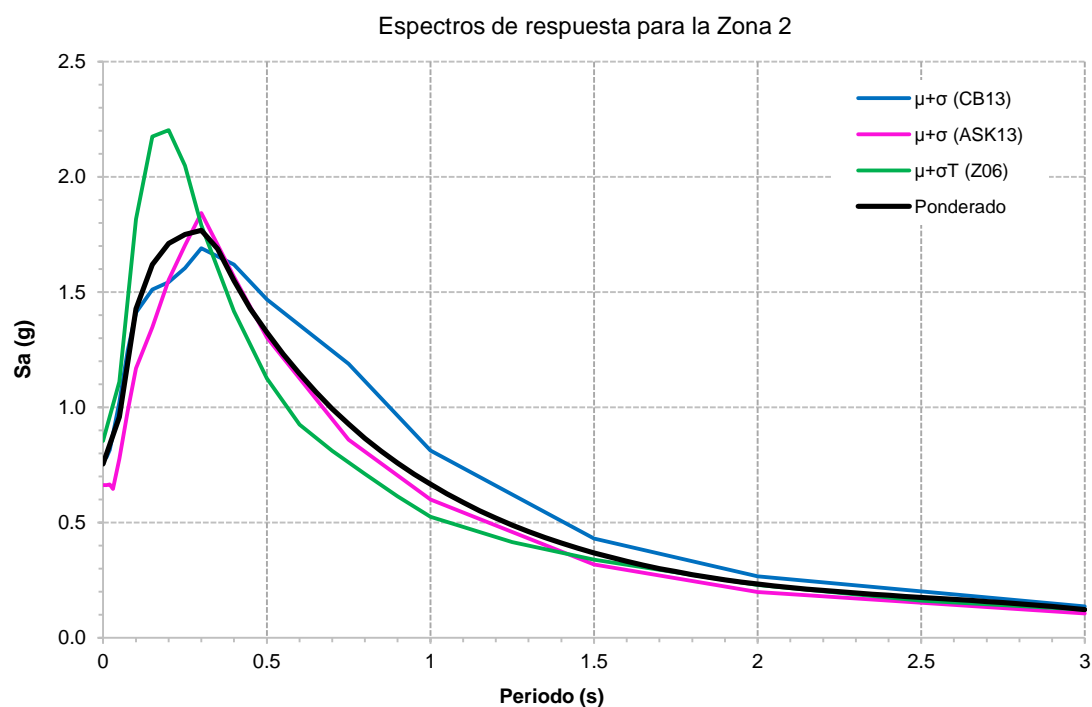


Figura 45: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 2.



En la Figura 45 se muestra los espectros hallados con los tres modelos y el espectro ponderado. El espectro ponderado tiene una ordenada espectral pico de 1.77g en 0.3 segundos. Se muestra la comparación del espectro ponderado con los espectros de ERN-12 para tres diferentes barrios ubicados en las parroquias mencionadas anteriormente, en la Figura 46.

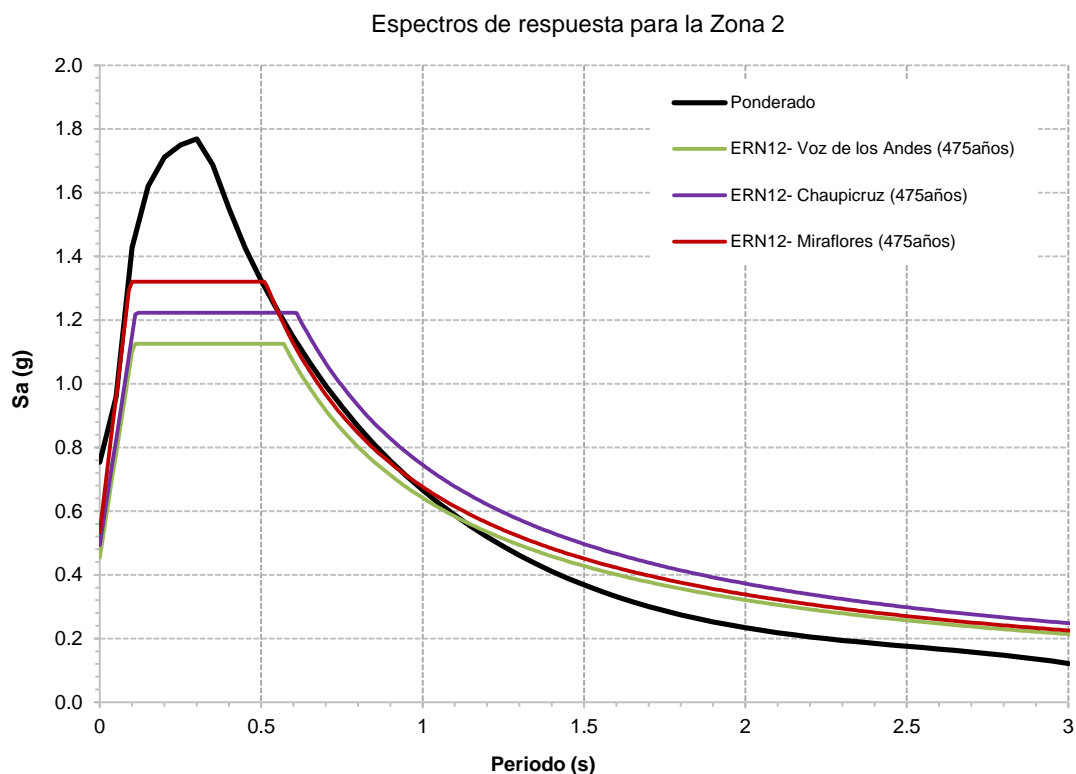


Figura 46: Comparación de espectros, Zona 2.

Los factores de sitio con los que se hallaron los espectros de ERN-12, para la Zona 2, se establecen en la siguiente tabla:

Tabla 37: Factores de Sitio ERN-12, Zona 2.

Barrio	Fa	Fd	Fs
Voz de los Andes	1.155	0.775	1.545
Chaupicruz	1.255	0.9	1.545
Miraflores	1.355	1.705	0.74

Fuente: (Aguiar R. , 2013)

### Zona 3:

En esta zona se localiza Cumbayá y los barrios del Centro Norte de Quito enlistados en la Tabla 38, los barrios son acordes al estudio de Microzonificación Sísmica de Quito publicado en Aguiar (2013).

Tabla 38: Barrios de la Zona 3.

<b>BARRIOS DEL CENTRO NORTE DE QUITO</b>
PETROLERA
LAS BROMELIAS
CAMPO ALEGRE
COVALES
MONTESERRIN II

A diferencia de los modelos ASK13 y CB13, el modelo de Zhao *et al.* (2006) no contiene una función que evalúe el efecto hanging-wall, por consiguiente no hace diferencia entre sitios emplazados en el bloque levantado y el bloque deprimido. Varios estudios señalan una disminución en el movimiento del suelo cuando el sitio se localiza en el bloque deprimido, los modelos CB13 y ASK13 analizan esta disminución en las ordenadas espectrales principalmente mediante los parámetros  $R_x$  y  $F_{HW}$ .

Sobre la base de las consideraciones anteriores, en la Figura 47 se aprecia que la forma del espectro de Zhao *et al.* (2006) para la Zona 3 es prácticamente igual a la Zona 1, lo cual no sucede con los modelos ASK13 y CB13. Este análisis es muy importante, ya que las condiciones tectónicas de Quito son únicas y difieren de otras regiones tectónicamente activas, con las cuales se formularon los modelos de movimientos fuertes. Al disminuir significativamente las ordenadas espectrales en el bloque deprimido, se recomienda utilizar modelos que analicen el efecto hanging-wall, en futuras investigaciones llevadas a cabo en la ciudad de Quito.

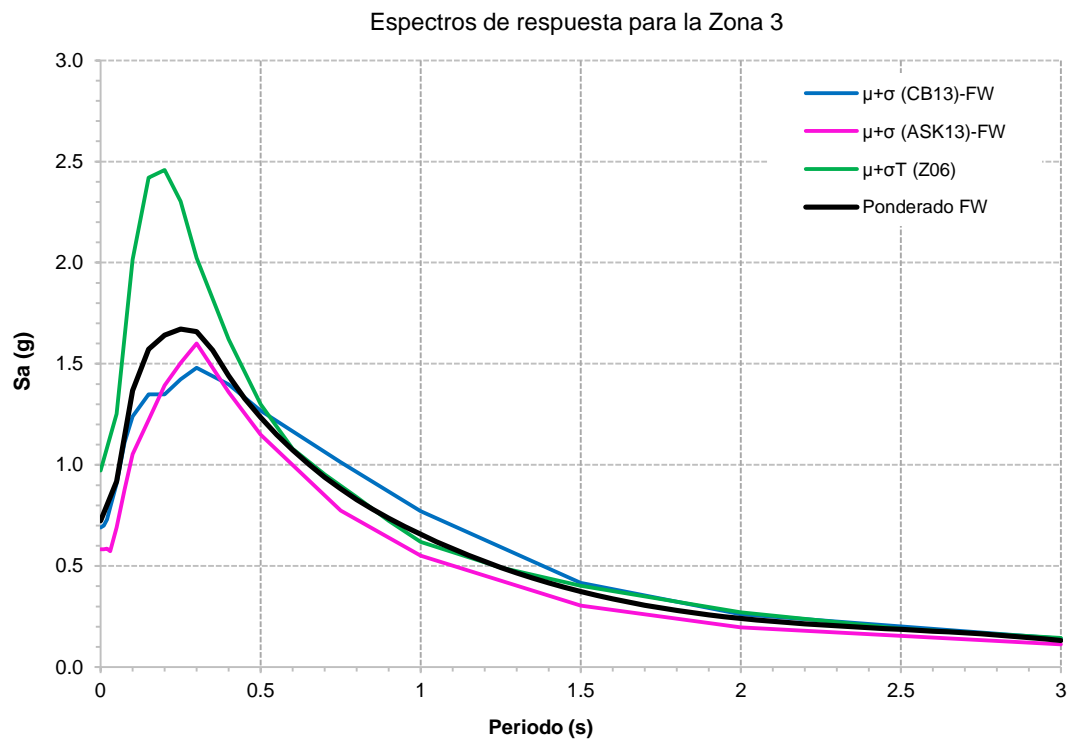


Figura 47: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 3.

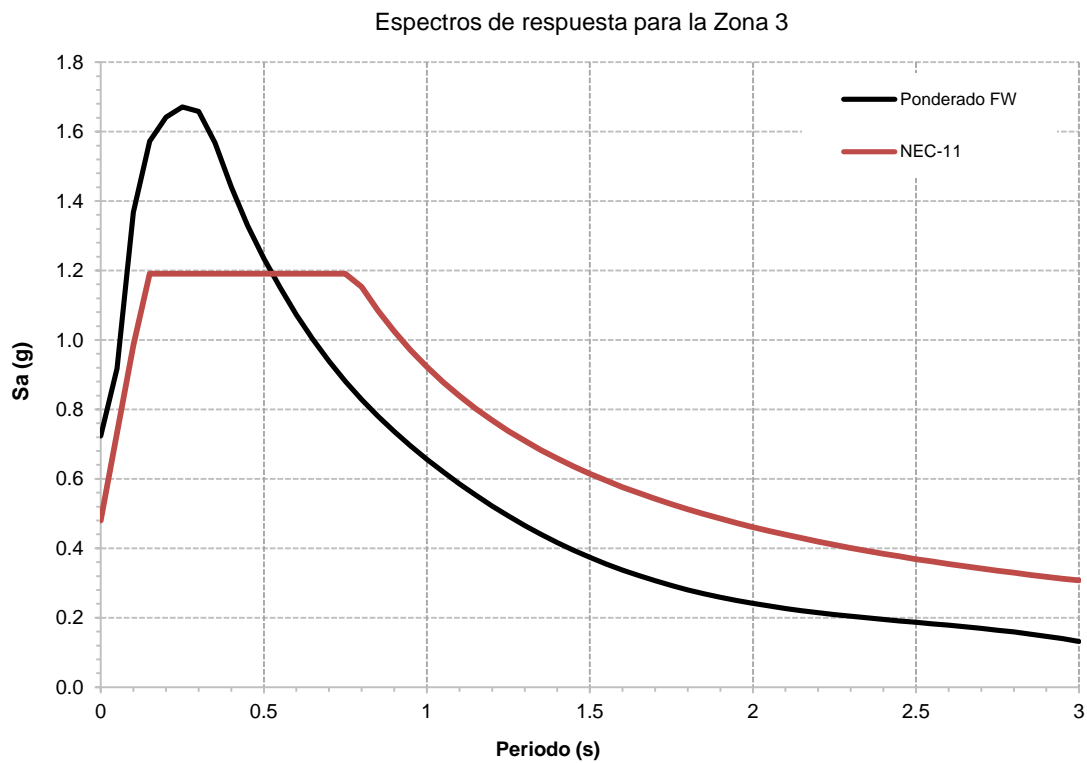


Figura 48: Comparación de espectros, Zona 3.

En la Figura 48, se muestra la comparación del espectro ponderado con el espectro del NEC-11, no se cuenta con factores de sitio de ERN-12 en esta zona. Los sitios analizados pertenecen a una categoría de suelos tipo C, por lo tanto los factores de sitio son:  $F_a=1.2$ ;  $F_d=1.3$ ;  $F_s=1.3$ . El espectro de aceleración del NEC-11 sobrepasa el espectro ponderado, en los periodos mayores a 0.5 segundos; lo cual no sucede en los periodos cortos. La forma del espectro ponderado se debe principalmente a que está influenciado por un evento cortical de fallamiento inverso y de tipo impulsivo.

#### Zona 4:

Con la finalidad de conocer la atenuación del movimiento del suelo, se emplazaron sitios de estudio en el Teleférico y en los bosques protegidos: Ñaquito Alto, Cochapamba y La Florida; los cuales se ubican en la Zona 4.

En la Figura 49 se presentan los espectros de los tres modelos y el espectro ponderado; este último alcanza 1.43g en los periodos cortos.

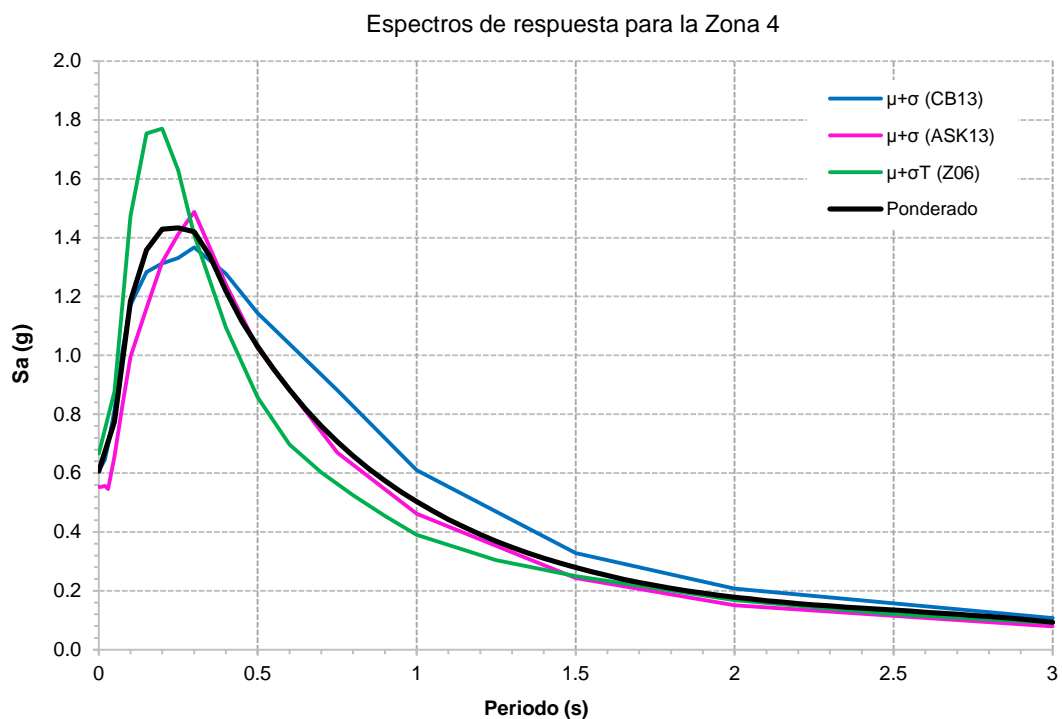


Figura 49: Espectros de respuesta de los modelos para la Zona 4.

En la Figura 50, se muestra la comparación del espectro ponderado con el espectro del NEC-11. Los sitios analizados tienen un suelo tipo C; consecuentemente, los factores de sitio son:  $F_a=1.2$ ;  $F_d=1.3$ ;  $F_s=1.3$ .

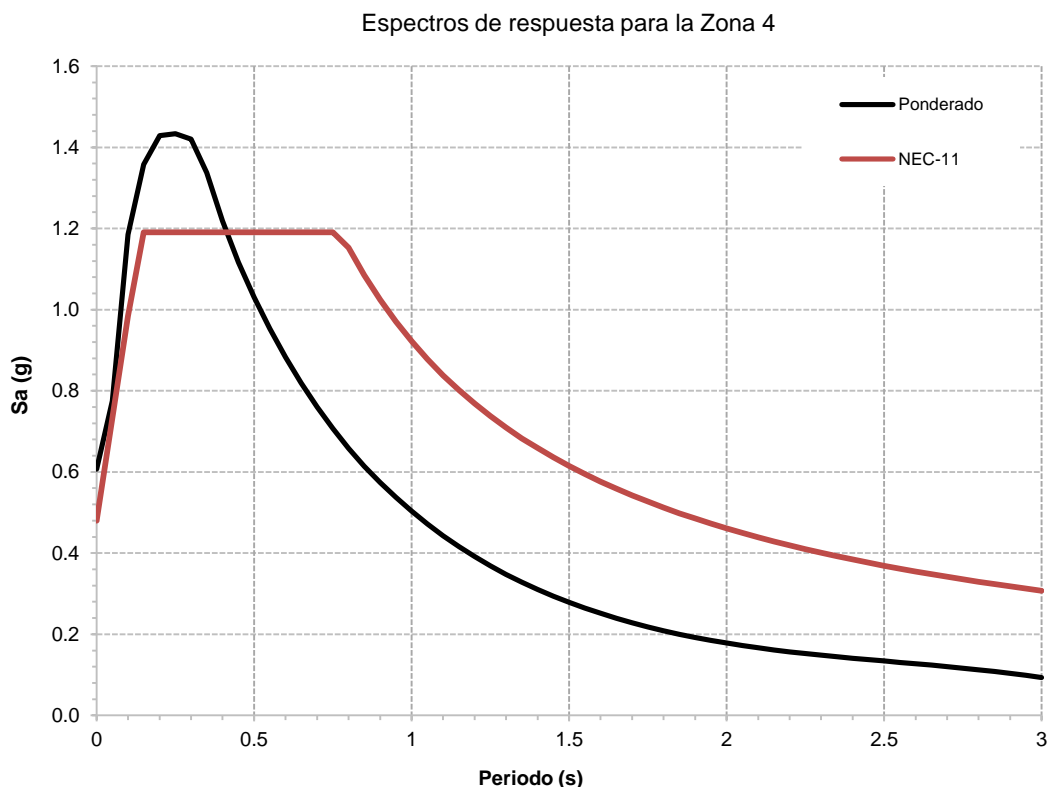


Figura 50: Comparación de espectros, Zona 4.

El espectro de aceleración del NEC-11 cubre bastante bien el espectro ponderado, a excepción de los periodos menores a 0.4 segundos.

En las cuatro zonas analizadas, las ordenadas espectrales (en los periodos cortos) que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011 son menores a las calculadas en la presente investigación; esto demuestra la existencia de grandes e inesperadas aceleraciones, que son producto de un evento sísmico asociado a fallas ciegas.

Un evento sísmico de estas características se dio en el año 2011, en Nueva Zelanda, se registraron aceleraciones espectrales que superaron 1.6g, esto a una distancia de 6 kilómetros del epicentro. Mientras que en la localidad de Heathcote Valley, cercana al epicentro, se registró un PGA de 1.41g (Bradley, 2014). Dicho evento se detallará a continuación, luego de presentar la compilación de las ordenadas espectrales ponderadas en cada una de las zonas, tal como se aprecia en la Tabla 39.

Tabla 39: Aceleraciones espectrales ponderadas.

T(seg)	Aceleración espectral (g)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
<b>PGA</b>	0.80	0.75	0.72	0.61
<b>0.05</b>	1.02	0.96	0.92	0.77
<b>0.1</b>	1.51	1.43	1.37	1.18
<b>0.15</b>	1.71	1.62	1.57	1.36
<b>0.2</b>	1.81	1.71	1.64	1.43
<b>0.25</b>	1.87	1.75	1.67	1.43
<b>0.3</b>	1.90	1.77	1.66	1.42
<b>0.35</b>	1.82	1.69	1.57	1.34
<b>0.4</b>	1.67	1.55	1.44	1.22
<b>0.45</b>	1.54	1.43	1.33	1.12
<b>0.5</b>	1.43	1.32	1.23	1.03
<b>0.55</b>	1.33	1.23	1.15	0.95
<b>0.6</b>	1.24	1.15	1.07	0.88
<b>0.65</b>	1.16	1.07	1.00	0.82
<b>0.7</b>	1.08	0.99	0.94	0.76
<b>0.75</b>	1.01	0.93	0.88	0.71
<b>0.8</b>	0.94	0.87	0.83	0.66
<b>0.85</b>	0.88	0.81	0.78	0.61
<b>0.9</b>	0.83	0.76	0.74	0.57
<b>0.95</b>	0.78	0.71	0.69	0.54
<b>1</b>	0.73	0.67	0.66	0.50
<b>1.05</b>	0.69	0.63	0.62	0.47
<b>1.1</b>	0.65	0.59	0.59	0.44
<b>1.15</b>	0.61	0.55	0.55	0.42
<b>1.2</b>	0.58	0.52	0.52	0.39
<b>1.25</b>	0.54	0.49	0.49	0.37
<b>1.3</b>	0.51	0.46	0.47	0.35
<b>1.35</b>	0.49	0.44	0.44	0.33
<b>1.4</b>	0.46	0.41	0.42	0.31

Continúa →

<b>1.45</b>	0.44	0.39	0.39	0.29
<b>1.5</b>	0.41	0.37	0.37	0.28
<b>1.55</b>	0.39	0.35	0.35	0.26
<b>1.6</b>	0.37	0.33	0.34	0.25
<b>1.65</b>	0.35	0.32	0.32	0.24
<b>1.7</b>	0.34	0.30	0.31	0.23
<b>1.75</b>	0.32	0.29	0.29	0.22
<b>1.8</b>	0.31	0.27	0.28	0.21
<b>1.85</b>	0.29	0.26	0.27	0.20
<b>1.9</b>	0.28	0.25	0.26	0.19
<b>1.95</b>	0.27	0.24	0.25	0.18
<b>2</b>	0.26	0.23	0.24	0.18
<b>2.05</b>	0.25	0.23	0.23	0.17
<b>2.1</b>	0.24	0.22	0.23	0.17
<b>2.15</b>	0.23	0.21	0.22	0.16
<b>2.2</b>	0.23	0.21	0.21	0.16
<b>2.25</b>	0.22	0.20	0.21	0.15
<b>2.3</b>	0.21	0.19	0.20	0.15
<b>2.35</b>	0.21	0.19	0.20	0.14
<b>2.4</b>	0.20	0.18	0.19	0.14
<b>2.45</b>	0.20	0.18	0.19	0.14
<b>2.5</b>	0.19	0.18	0.19	0.13
<b>2.55</b>	0.19	0.17	0.18	0.13
<b>2.6</b>	0.18	0.17	0.18	0.13
<b>2.65</b>	0.18	0.16	0.17	0.12
<b>2.7</b>	0.17	0.16	0.17	0.12
<b>2.75</b>	0.17	0.15	0.16	0.12
<b>2.8</b>	0.16	0.15	0.16	0.11
<b>2.85</b>	0.16	0.14	0.15	0.11
<b>2.9</b>	0.15	0.14	0.15	0.10
<b>2.95</b>	0.15	0.13	0.14	0.10
<b>3</b>	0.14	0.12	0.13	0.09

## **6.6 El sismo del 22 de febrero de 2011 Christchurch, Nueva Zelanda.**

El 22 de febrero de 2011 un sismo de magnitud 6.2, sacudió la ciudad de Christchurch (Lyttelton) a las 12:51 pm hora local; varios estudios califican este sismo como una réplica del sismo principal de Darfield (Mw 7.1) del 04 de septiembre de 2010 (Elwood, 2013).

El epicentro se localizó a 6 kilómetros al sureste del distrito central de negocios de Christchurch (CBD, del inglés *Central Business District*), a una profundidad focal de 5 kilómetros; el mecanismo de falla fue inversa oblicua, con un ángulo de buzamiento de 70 grados (Elwood, 2013).

Christchurch tiene una población de 375 000 habitantes, es la ciudad más grande en la Isla Sur y se encuentra en la Llanura Canterbury; la tasa de movimiento de la Llanura Canterbury es de aproximadamente 1 y 2 mm/año, el movimiento se debe concretamente al choque de dos placas tectónicas (GNS, 2011).

El evento de febrero de 2011 se originó en una falla previamente desconocida. Debido a los profundos depósitos aluviales sobre las llanuras, existe un limitado conocimiento de las fallas activas de la región (GNS, 2011).

Se presentaron daños significativos especialmente en el distrito central de negocios de la ciudad de Christchurch. Este evento sísmico causó significativamente más daño en comparación al sismo de Darfield; dio lugar al colapso de dos estructuras de hormigón armado, un garaje de estacionamiento, y numerosas edificaciones de mampostería no reforzada, incluyendo muchas estructuras patrimoniales; lamentablemente, se registró un total 185 fallecidos (Elwood, 2013).



La Figura 51 muestra la sismicidad de la región, entre septiembre de 2010 y agosto de 2011; se encierra con un cuadrado el distrito central de negocios de Christchurch.

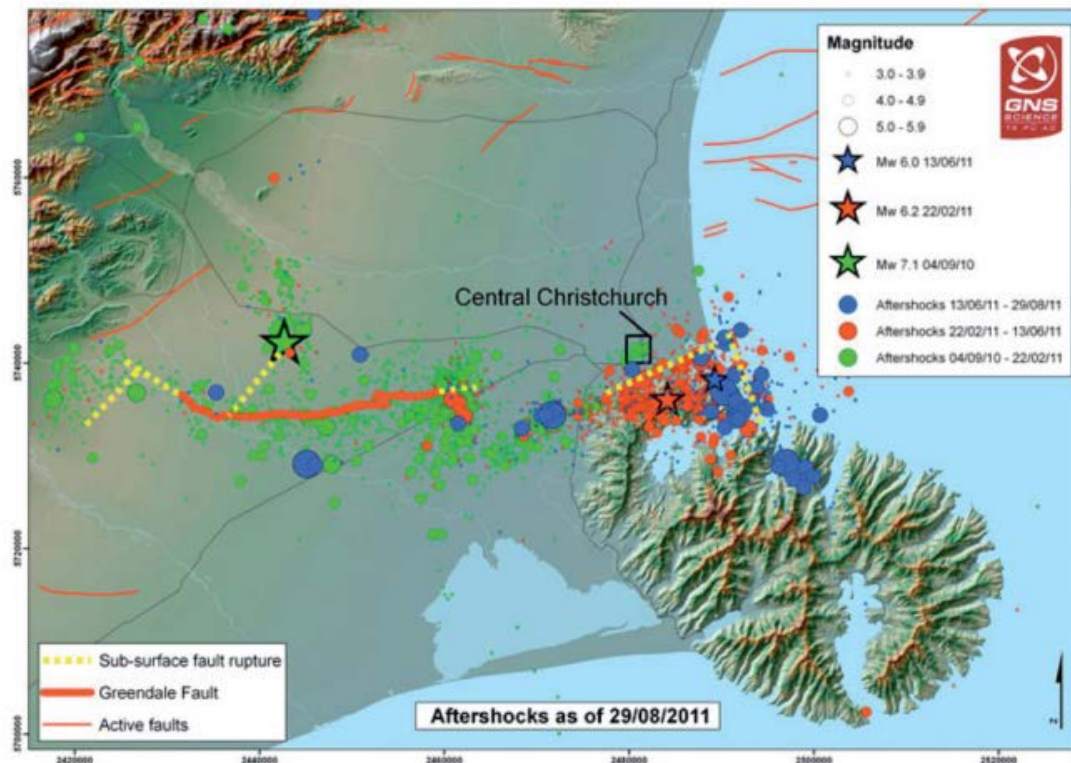


Figura 51: Eventos del 4/09/2010, 22/02/2011 y 13/06/2011, Nueva Zelanda.

Fuente: (GNS, 2011)

Resulta oportuno destacar que la mayoría de estructuras de Christchurch son de hormigón armado (Kam & Pampanin, 2011), como las empleadas en diferentes partes del mundo, incluyendo la ciudad de Quito. Por lo tanto, las lecciones de este evento son relevantes para el presente estudio.

Se capturó un conjunto de registros de movimientos del suelo del evento febrero de 2011, por parte de la red de monitoreo de riesgo sísmico EQC-GNS GeoNet; esta red cuenta con más de 50 estaciones de instrumentación sísmica fuera de los 100 km del CBD y cuatro estaciones permanentes en el distrito central de negocios de Christchurch (Kam & Pampanin, 2011).

La Figura 52 muestra una comparación del PGA horizontal y vertical en las estaciones; se observa que la aceleración vertical alcanzó 2.2g en una estación ubicada en *Heathcote Valley*, muy próxima epicentro; mientras que la aceleración horizontal en el distrito central de negocios de Christchurch varió entre 0.4g y 0.8g (GNS, 2011).

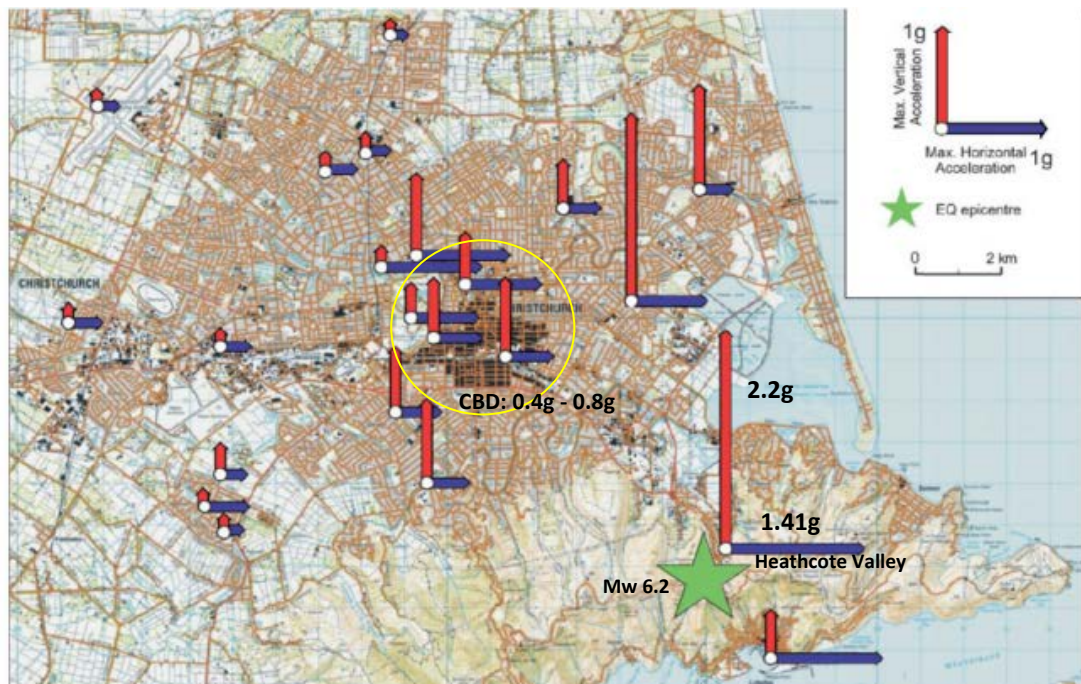


Figura 52: Valores de PGA registrados en el evento del 22/02/2011.

Fuente: (GNS, 2011)

Para conocer las formas espectrales del sismo, en la Figura 53 y Figura 54 se presentan los espectros de respuesta de aceleración elástica de las cuatro estaciones localizadas en el distrito central de negocios de Christchurch, situadas a 6 km del epicentro; los cuales se comparan con los espectros de diseño de la norma de Nueva Zelanda NZS1170 del año 2004, para un periodo de recurrencia de 500 años y 2500 años.

Se observa que el espectro promedio de los cuatro registros (nivel de confianza del 50%) sobrepasa el espectro de la normativa sísmica para un periodo de 500 años y en varias ordenadas espectrales es igual o mayor al espectro de 2500 años. Lo importante de esta comparación, es destacar que

las formas espectrales del sismo sobrepasaron la normativa sísmica, a una distancia del epicentro de 6 kilómetros. No se conocen las formas espectrales del evento en distancias cercanas al epicentro, lógicamente serían mucho más altas que las indicadas en la Figura 53 y Figura 54.

Cabe recalcar que al originarse un evento sísmico en el segmento Ilumbisí-La Bota, el epicentro se localizaría en alguna de las parroquias del Centro Norte de Quito.

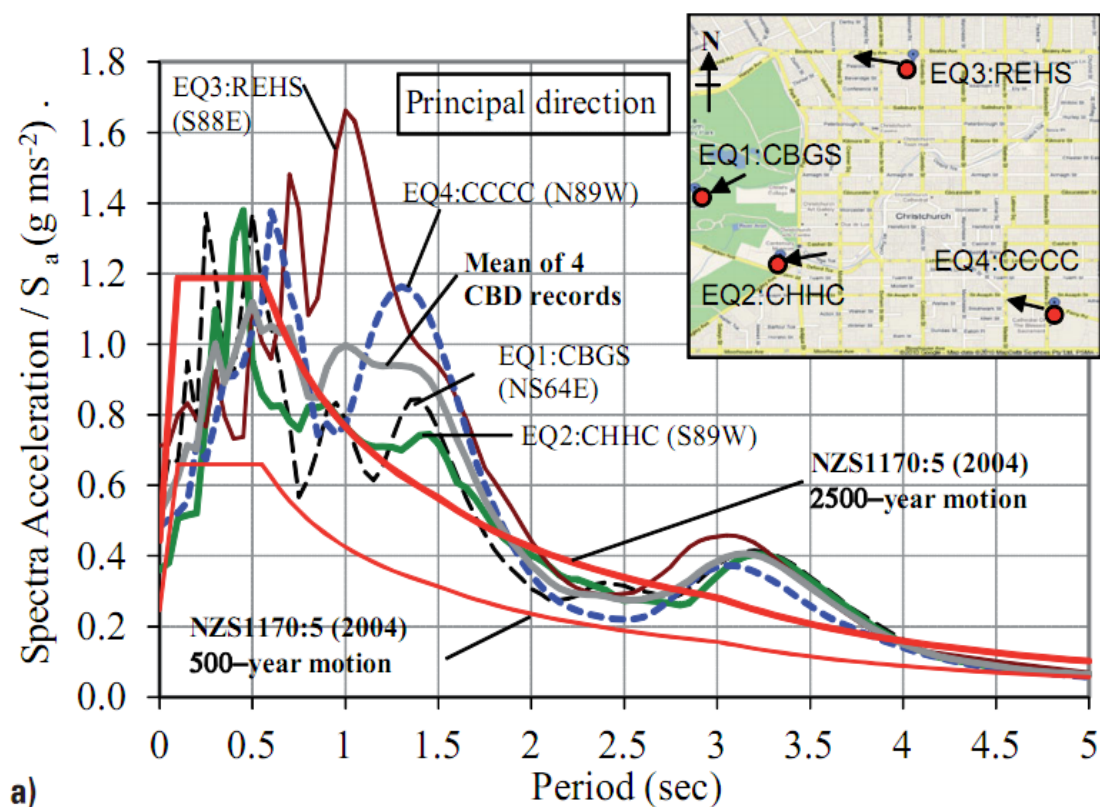
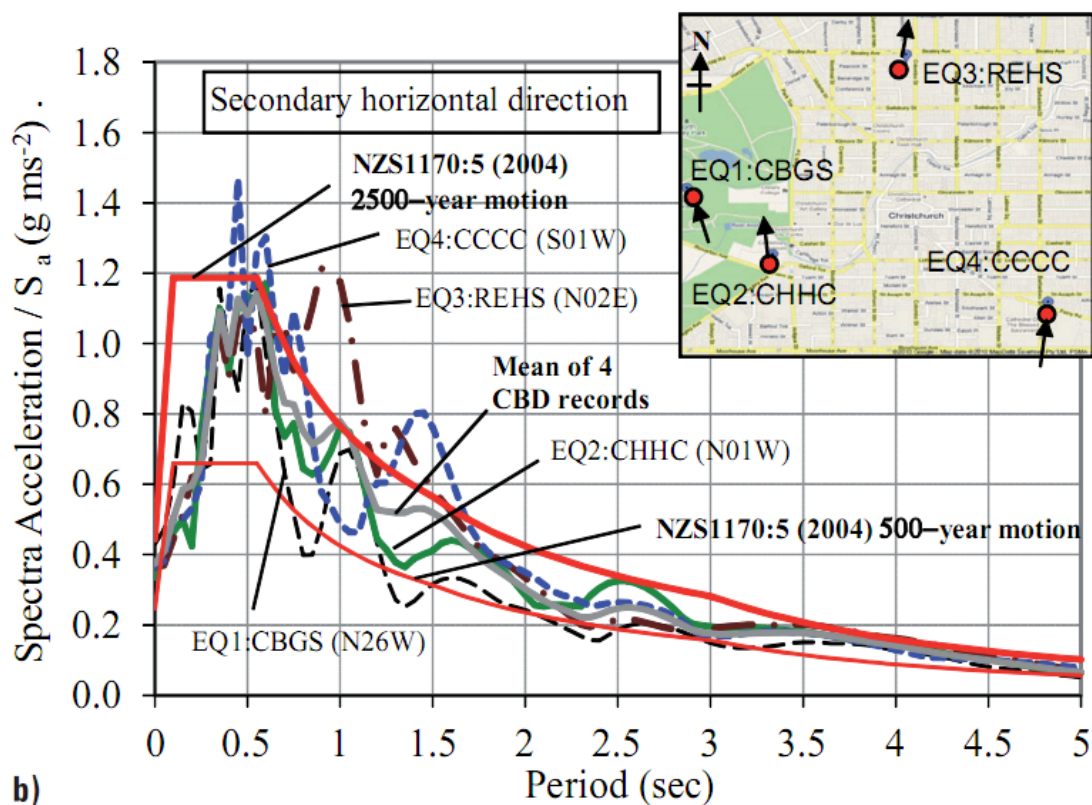


Figura 53: Espectros de la componente este-oeste, obtenidos distrito central de negocios de Christchurch, durante el sismo del 22/02/2011 (Mw 6.2).

Fuente: (Kam & Pampanin, 2011)

La componente horizontal este-oeste del movimiento fue más fuerte que la componente norte-sur, evidenciándose en el daño observado en las edificaciones (Elwood, 2013).



b) Figura 54: Espectros de la componente norte-sur, obtenidos distrito central de negocios de Christchurch, durante el sismo del 22/02/2011 (Mw 6.2).

Fuente: (Kam & Pampanin, 2011)

Las investigaciones atribuyen el fuerte y severo movimiento una compleja interacción de las ondas sísmicas en los suelos aluviales profundos "efecto de cuenca" fundamentalmente en Christchurch, a la superficialidad de la ruptura y los efectos de directividad del mecanismo de falla inversa oblicua. (GNS, 2011).



## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- El Centro Norte de Quito es sísmicamente vulnerable, al encontrarse sobre el segmento de falla Ilumbisí-La Bota; se espera en sismo de magnitud Mw 6.2 para un periodo de recurrencia de 138 años.
- Las ordenadas espectrales del presente estudio, en periodos menores a 0.5 segundos, superan el espectro de diseño elástico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011 y del estudio de Microzonificación Sísmica de Quito de ERN-12.
- El mayor movimiento del suelo se presenta en la Zona1, comprendiendo las parroquias: Mariscal Sucre, Ñaquito y Jipijapa; se estima que los mayores daños se presentarán en los barrios de estas parroquias.
- El modelo de Abrahamson, Silva y Kamai del año 2013, se ajusta muy bien a las ordenadas espectrales esperadas. Consecuentemente, es el modelo que mejor se ajusta al Centro Norte de Quito.
- Las ordenadas espectrales con el modelo Z06 son más altas en 0.2 segundos, comparativamente con ASK13 y CB13, los cuales son similares en periodos entre 0.1 a 0.4 segundos; a partir de los 0.4 segundos estos dos modelos presentan variaciones en sus ordenadas espectrales.
- Con respecto a la incertidumbre, las ordenadas espectrales del modelo de Zhao *et al.* (2006) son mayores que los modelos CB13 y ASK13, por lo tanto, se realizó una ponderación de los tres modelos; obteniendo formas espectrales similares a los reportados en los modelos NGA-West2.

- Uno de los principales efectos a considerar en el Centro Norte de Quito es el hanging-wall. Los modelos ASK13 y CB13 analizan dicho efecto mediante la dependencia de la magnitud,  $R_x$ ,  $R_{rup}$ ,  $R_{jb}$ ,  $W$ ,  $dip$  y  $Z_{tor}$ , en cambio, el modelo de Zhao *et al.* (2006) no analiza este efecto, encontrándose variaciones significativas.
- Los tres modelos de predicción del movimiento del suelo emplean  $V_{s30}$ , como un parámetro que define las características del suelo en un sitio de interés. Los modelos ASK13 y CB13, utilizan la clasificación de suelos estadounidense para diseño sísmico propuesto por NEHRP; mientras que el modelo de Zhao *et al.* (2006) utiliza la clasificación de suelos de Japón.
- En lo que se refiere a la respuesta del sitio de interés, el modelo CB13 emplea el parámetro  $PGA_{1100}$ , mientras que el modelo ASK13 utiliza  $Sa_{1100}$ . Se concluye que  $Sa_{1100}$  relaciona de mejor manera el sitio de interés con la roca, debido a que se analizan diferentes periodos y no existe la necesidad de establecer correlaciones entre  $Sa_{1100}$  y la respuesta espectral de aceleración.
- La incertidumbre del modelo Z06 tiene un carácter de general, ya que considera solo una incertidumbre para los tres tipos de eventos: corticales, subducción inter-placa y subducción intra-placa; con lo cual la predicción de la incertidumbre para un evento de Quito (sismo cortical) es la misma que para otra región del Ecuador. Además, Z06 omite la respuesta no lineal del sitio en la incertidumbre, en cambio ASK13 y CB13 si consideran esta respuesta en sus incertidumbres.
- Las desviaciones estándar intra-evento e inter-evento del modelo Z06, son independientes de la magnitud y del sitio de interés, con lo cual la incertidumbre no se establece exclusivamente para el Centro Norte de Quito. Los modelos CB13 y ASK13 si consideran la dependencia del sitio de interés mediante los valores  $V_{s30}$  y  $A_{1100}$  o  $Sa_{1100}$ , obteniendo una incertidumbre específica para el Centro Norte de Quito.

- Los modelos Z06 y CB13 omiten las réplicas en sus modelos, mientras ASK13 lo considera mediante la definición de evento Clase 2; al modelar un sismo como réplica se obtuvo menores ordenadas espectrales comparativamente con un sismo principal.

## 7.2 Recomendaciones

- Se debe incorporar en las normativas sísmicas, el efecto que tienen las fallas ciegas inversas de Quito, debido a los grandes e inesperados movimientos del suelo que se pueden presentar.
- Se debe tener presente que la magnitud estimada por Alvarado *et al.* (2014) para el Centro Norte de Quito, fue calculada a partir del área de ruptura y de la longitud superficial de ruptura del segmento Ilumbisí-La Bota.
- Se debe considerar que los espectros de aceleración elástica hallados tienen un amortiguamiento del 5% que van hasta los 3 segundos.
- Los modelos CB13 y ASK13 tienen uniformidad en los periodos espectrales, mientras que el modelo Z06 contiene diferentes periodos espectrales. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta esta diferencia en los periodos espectrales, si se desea combinar los modelos.
- El modelo Z06 excluye la respuesta no lineal del sitio. En cambio, los modelos ASK13 y CB13 si consideran esta respuesta utilizando los coeficientes del modelo de suelo Peninsular Range. En base a los buenos resultados obtenidos en el Centro Norte de Quito, se debe analizar la respuesta no lineal del sitio en futuros estudios llevados a cabo en la ciudad.

- Se debe considerar que los sismos originados en el Centro Norte de Quito tienen mecanismo de falla inversa. El modelo de Z06 infiere un evento con mecanismo de falla inversa mediante los coeficientes  $F_R$ , mientras que los modelos CB13 y ASK13 determinan este mecanismo de falla según el ángulo rake, en un rango  $30^\circ < \lambda < 150^\circ$ . Así que para el Centro Norte de Quito el ángulo rake es el que mejor se ajusta.
- Se debe tomar en cuenta las unidades de los modelos de atenuación, ya que se podría incurrir en errores, los modelos ASK13 y CB13 formulan sus respuestas espectrales en unidades de fracción de la gravedad, en cambio, el modelo de Zhao *et al.* (2006) establece sus unidades en *gals*.



### 7.3 Referencias Bibliográficas

- Abrahamson, N., Silva, W., & Kamai, R. (2013). *Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set*. California.
- Aguiar, R. (2008). *Análisis Sísmico de Edificios*. Valle de los Chillos, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- Aguiar, R. (2013). *Microzonificación Sísmica de Quito*. Quito-Ecuador: Primera edición. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, 212 p.
- Aguiar, R., Rivas, A., Benito, M., Gaspar, J., Trujillo, S., Arciniegas, S., . . . Parra, H. (2014). Aceleraciones registradas y calculadas del sismo del 12 de agosto de 2014 en Quito. *Revista Ciencia*, 16 (2), 139-153.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., . . . Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *AGU PUBLICATIONS*, 1-17.
- Ancheta, T., Darragh, R., Stewart, J., Seyhan, E., Silva, W., Chiou, B., . . . Donahue, J. (2013). PEER NGA-West2 Database. *Report PEER 2013/03*.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International* 181, 1613-1633.
- Benito, B., & Cabañas, L. (1999). Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica. *Física de la Tierra*, 11, 49-79.
- Benito, B., Cabañas, L., López, M., Jiménez, M., & López Arroyo, A. (1996). *Revisión de modelos de movimiento fuerte del suelo y aplicación a la predicción de espectros de respuesta*. Madrid.
- Bozorgnia, Y., Abrahamson, N., Al Atick, L., Ancheta, T., Atkinson, G., Baker, J., . . . Rezaeian. (2014). *NGA-West2 Research Project*. California.

- Bradley, B. (2014). Site-specific and spatially-distributed ground-motion intensity estimation in the 2010–2011 Canterbury earthquakes. *Elsevier, Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 61-62, 83–91.
- BSSC. (2003). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)*. Washington D.C: National Institute of Building Sciences.
- BSSC. (2009). *NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-750)*. Washington, D.C: Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences.
- 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 from 0.01 to 10 sec*. California.
- Chatelain, J., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernandez, J., . . . Villacis, C. (1999). Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *GeoJournal*. 49, 185-196.
- Elwood, K. (2013). Performance of concrete buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake and implications for Canadian codes. *Can. J. Civ. Eng.* 40, 759–776.
- EPRI. (1993). Methods and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America: Guidelines for determining design basis ground motions, Electric Power Research Institute. *Report EPRI TR-102293, Vol. 1, Palo Alto, CA*.
- ERN. (2012). *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito. Estudio de la amenaza sísmica a nivel local*. Programa de reducción de riesgos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito.
- Escuela Politécnica Nacional, Geohazards International, Municipio de Quito, & Orstom. Oyo Corporation. (1994). The Quito - Ecuador Earthquake Risk Management Project an Overview. *Geohazards International Publication*.

- FEMA. (19 de Octubre de 2014). *Agencia Federal para el Manejo de Emergencias*. Obtenido de <https://www.fema.gov/national-earthquake-hazards-reduction-program#0>
- Fernandez, M. (16 de Agosto de 2012). *VIAJEAECUADOR*. Obtenido de [viajaecuador.es](http://viajaecuador.es): <http://viajaecuador.es/geografia-de-quito/>
- GNS. (2011). The Canterbury Earthquake Sequence and Implications for Seismic Design Levels. *GNS Science Consultancy Report*, 183.
- Gutenberg, R., & Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185-188.
- IG-EPN. (Agosto de 2014). Obtenido de [igepn.edu.ec](http://www.igepn.edu.ec): <http://www.igepn.edu.ec/index.php/ultimos-sismos>
- Instituto de la Ciudad. (2012). *Difusión y profundización de los resultados del estudio sobre las características económicas y productivas de las administraciones zonales*. Quito.
- Kam, Y. W., & Pampanin, S. (2011). The seismic performance of RC buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake. *Structural Concrete* 12, No 4.
- Kamai, R., Abrahamson, N., & Silva, W. (2013). Nonlinear horizontal site response for the NGA-West2 project. *Report PEER 2013/12*.
- Lay, T., & Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. San Diego: Academic Press.
- Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(5A), 1971–1988.
- NEC-11. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cap 2, Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente* .
- NZS. (2004). Structural design actions, Part 5: earthquake actions New Zealand. NZS 1170.5, Standards New Zealand, Wellington, N.Z. 82 p.
- Power, M., Chiou, B., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., Shantz, T., & Roblee, C. (2008). An overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra*, 3-21.
- Silva, W., Li, S., Darragh, R., & Gregor, N. (1999). Surface geology based strong motion amplification factors for the San Francisco Bay and Los

- Angeles Areas, Pacific Engineering and Analysis, El Cerrito, CA. *Report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, Task 5B.*
- Singaucho, J. (2014). *Evaluación de Intensidades Sísmicas (Sismo de Calderón 12 de agosto de 2014 14:58 TL)*. Quito.
- Skyscrapercity. (Mayo de 2008). Obtenido de skyscrapercity.com: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=635648>
- Soulas, J., Egüez, A., Yepes, H., & Pérez, H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Bol. Geol. Ecuat.*, 3–11.
- Trujillo, O. (agosto de 2014). *Fotografías del Centro Norte de Quito*.
- Walling, M., Silva, W., & Abrahamson, N. (2008). Non-linear site amplification factors for constraining the NGA model. *Earthq. Spectra* 24, 243–55.
- Wikipedia. (31 de Octubre de 2014). *Wikipedia la enciclopedia libre*. Obtenido de wikipedia.org: [http://es.wikipedia.org/wiki/Avenida\\_10\\_de\\_Agosto\\_\(Quito\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Avenida_10_de_Agosto_(Quito))
- Wikipedia. (11 de Marzo de 2014). *Wikipedia la enciclopedia libre*. Obtenido de wikipedia.org: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cabalgamiento#Fallas\\_de\\_cabalgamiento\\_ciegas](http://es.wikipedia.org/wiki/Cabalgamiento#Fallas_de_cabalgamiento_ciegas)
- Wooddell, K., & Abrahamson, N. (2012). *New earthquake classification scheme for mainshocks and aftershocks in the NGA-West2 ground motion prediction equations (GMPEs)*. Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Yepes, H. (13 de Agosto de 2014). *Instituto Geofísico EPN*. Obtenido de igepon: <http://www.igepon.edu.ec/index.php/noticias/item/898-breve-rese%C3%B1a-de-los-sismos-provenientes-de-la-falla-geol%C3%B3gica-de-quito-que-han-afectado-a-la-capital>
- Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., . . . Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 96, No.3, 898-913.



# ANEXOS