



Carrera de Ingeniería Geográfica
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE

50 años
1964 - 2014

Movimientos fuertes y espectros para el Centro Norte de Quito asociados a las fallas ciegas inversas

Roberto Aguiar⁽¹⁾, Alicia Rivas⁽¹⁾, Santiago Trujillo⁽¹⁾, Jorge Gaspar⁽²⁾, Humberto Parra⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos. rraguiar@espe.edu.ec

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía
Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Geografía, Geodesia y Cartografía
Universidad Politécnica de Madrid

En 1587 un sismo de magnitud 6.4 asociado a las fallas ciegas de Quito, causó gran daño en la ciudad; esto es muy preocupante toda vez que existen estudios que indican que el período de recurrencia es de aproximadamente 200 años. Lo que implica que al 2014 debieron haberse producido dos sismos de igual magnitud, que gracias a Dios no ha sucedido, ya que las consecuencias habrían sido desastrosas porque buena parte de la ciudad se encuentra sobre estas fallas.

Al no haberse registrado sismos de la magnitud indicada en los cuatro últimos siglos se tiene una gran acumulación de energía toda vez que la tasa de movimiento de estas fallas se encuentra entre los 3 y 4 mm al año. De tal manera que existe una gran probabilidad de tener un sismo muy fuerte.

En estas condiciones es muy importante obtener espectros de respuesta elástica que se generarían por un sismo asociado a alguno de los segmentos de las fallas ciegas inversas de Quito y que mejor hacerlo con modelos de movimientos fuertes que han sido publicados en los últimos años y reconocidos a nivel mundial por la gran base de datos con la que fueron obtenidos.

En este artículo se van a presentar tres modelos de movimientos fuertes y son los desarrollados por: Abrahamson, Silva y Kamai (2013); Campbell y Borzognia (2013); y el modelo de Zhao *et al.* (2006). Para cada uno de estos modelos se indican la base de datos y las ecuaciones que definen las ramas del espectro. Se destaca que estos modelos sirven también para encontrar leyes de atenuación del movimiento del suelo.

Posteriormente como una aplicación se obtendrá espectros para cinco Parroquias del Centro Norte de Quito, a saber: Rumipamba, Belisario Quevedo, Mariscal Sucre, Iñaquito y Jipijapa; asociados al sismo máximo probable generados en el segmento de falla que está más cerca y es el denominado Ilumbisí-La Bota, con cada uno de los modelos indicados en el párrafo anterior y se encontrarán espectros ponderados para un nivel de confiabilidad del 84%. Las ordenadas espectrales que se hallan son mayores a las ordenadas espectrales que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011 y los que se obtienen con los factores de sitio hallados en el estudio de Microzonificación Sísmica de Quito por ERN en el 2012.

Palabras Claves: Movimientos Fuertes; Espectros de Respuesta; Microzonificación Sísmica de Quito.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se indica que en 1587 un sismo, asociado a las fallas ciegas de Quito, de magnitud 6.4 (Beuval *et al.* 2010) afectó a la recién fundada ciudad de Quito 1534, no se tiene idea de las aceleraciones del suelo que se registraron en ese evento y peor aún de sus espectros. Por este motivo es necesario buscar un escenario similar en tipo de suelo y fallas geológicas donde se tengan registros sísmicos para poder comparar las formas

No existe un lugar en el mundo que tenga la misma topografía de Quito, tipo de suelo, fallas ciegas inversas con una tasa de movimiento entre 3 y 4 mm por año, donde se haya registrado un sismo de 6.4; no lo hay pero uno parecido si se tiene recordando que el objetivo es tener una idea de las aceleraciones máximas espectrales.

Se considera que un escenario similar es el sismo registrado el 22 de febrero de 2011 en la isla sur de Nueva Zelanda, a 6 km., de la ciudad de Christchurch con una profundidad focal de 5 km., y una magnitud de 6.2. El sismo está asociado a fallas ciegas inversa oblicua con un ángulo de buzamiento de 70 grados y la tasa de movimiento de esta falla se encuentra entre 1 y 2 mm por año. La mayor parte de los suelos de Christchurch son tipo D, similar a Quito, con velocidades de la onda de corte en los primeros 30 m., alrededor de los 300 m/s. (Elwood, 2013)

En la figura 1, se indican los epicentros de 3 sismos que han afectado a Christchurch y son los registrados el 4 de septiembre de 2010 (Mw=7.1) a 40 km., de la ciudad; el del 22 de febrero de 2011 (Mw=6.2) y el 13 de junio de 2011 (Mw=6.0). Algunos investigadores indican que los dos últimos sismos son réplicas del sismo de magnitud 7.1, que no causó tanto daño como el segundo sismo por encontrarse éste más cercano a la ciudad y con foco muy superficial.

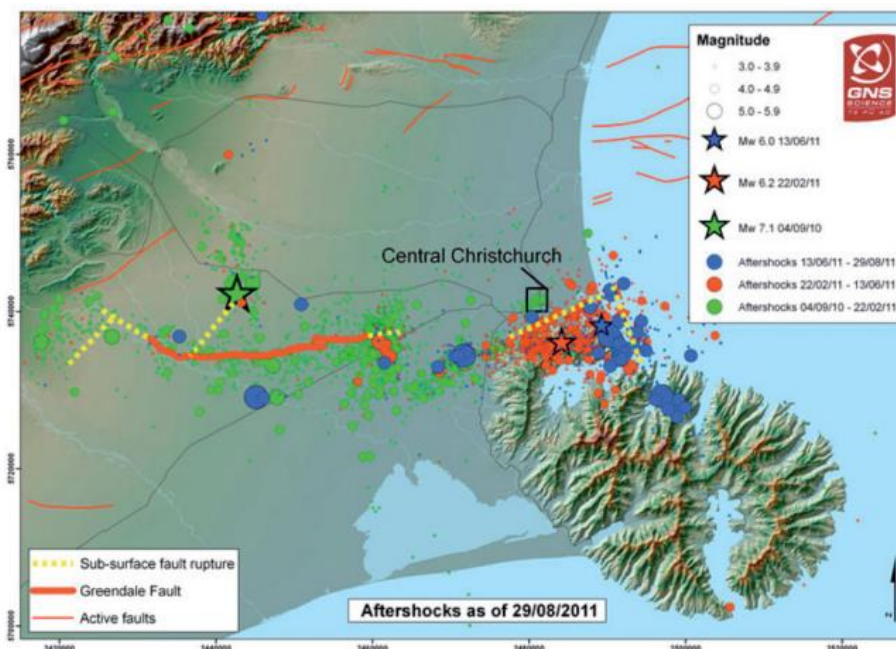


Figura 1 Sismos de nueva Zelanda, registrados el 4 de septiembre de 2010 (Mw=7.1); el 22 de febrero de 2011 (Mw=6.2) y el 13 de junio de 2011 (Mw=6.0)

En la figura 1, se observa la traza de las fallas de ruptura de estos sismos, la gran sismicidad que se ha tenido desde septiembre de 2010 hasta junio de 2011 y en un rectángulo se muestra la zona central de negocios de la ciudad, donde se produjo el mayor daño.

La fase intensa del sismo del 22 de febrero de 2011, que se está analizando tuvo una corta duración de 10 seg., característico de los sismos impulsivos y aceleraciones verticales muy altas, en algunos sitios registrados son mayores a las aceleraciones horizontales como se observa en la figura

2, cerca del epicentro la aceleración llegó a 2.2 g . Siendo g la aceleración de la gravedad. En la zona de negocios la aceleración máxima horizontal se halla entre 0.4 y 0.7 g .

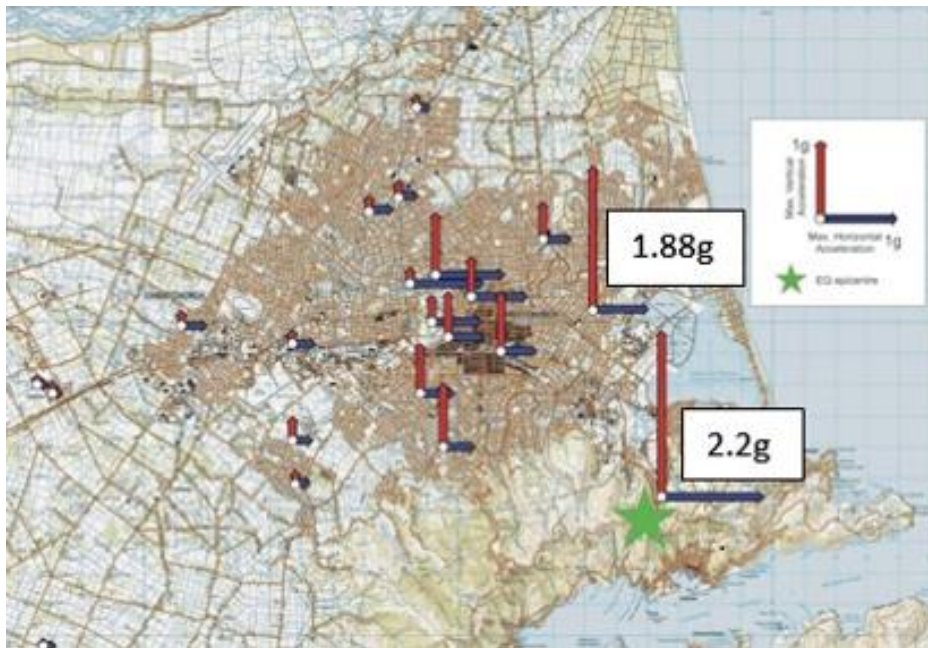


Figura 2 Aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 22 de febrero de 2011.

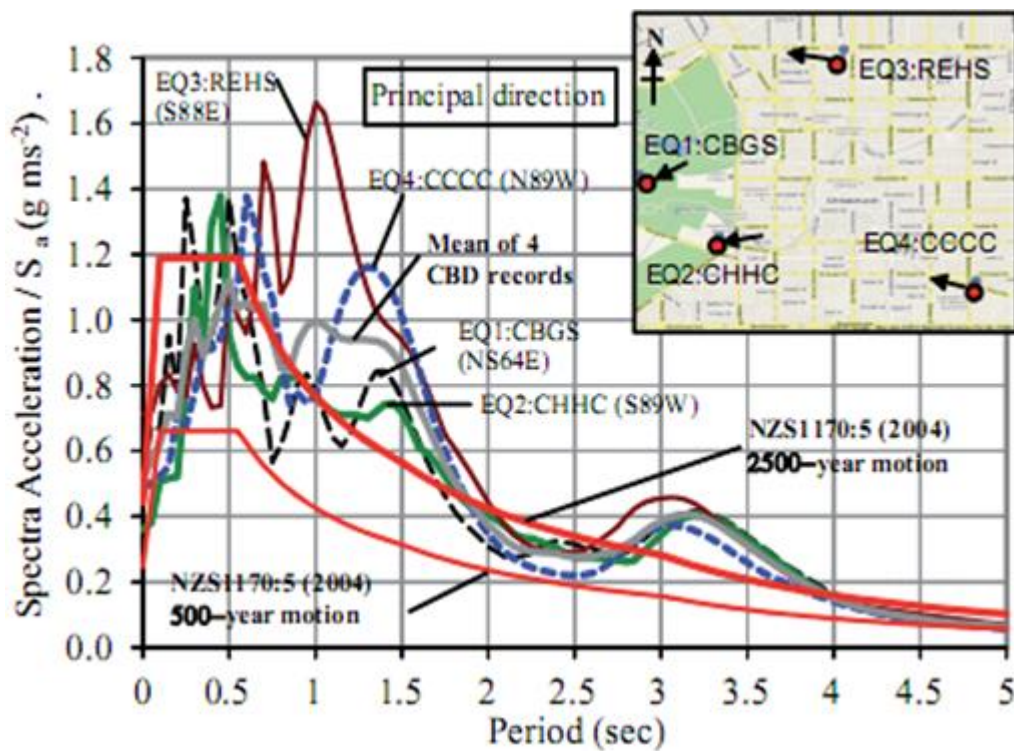


Figura 3 Espectros de la componente Este-Oeste, obtenidos en la zona comercial de Christchurch, durante el sismo del 22 de febrero de 2011 y los que se hallan con la norma de Nueva Zelanda NZS1170:5 de 2004, en perfil de suelo tipo D, para períodos de recurrencia de 500 y 2500 años. (Kam & Pampanin, 2011).

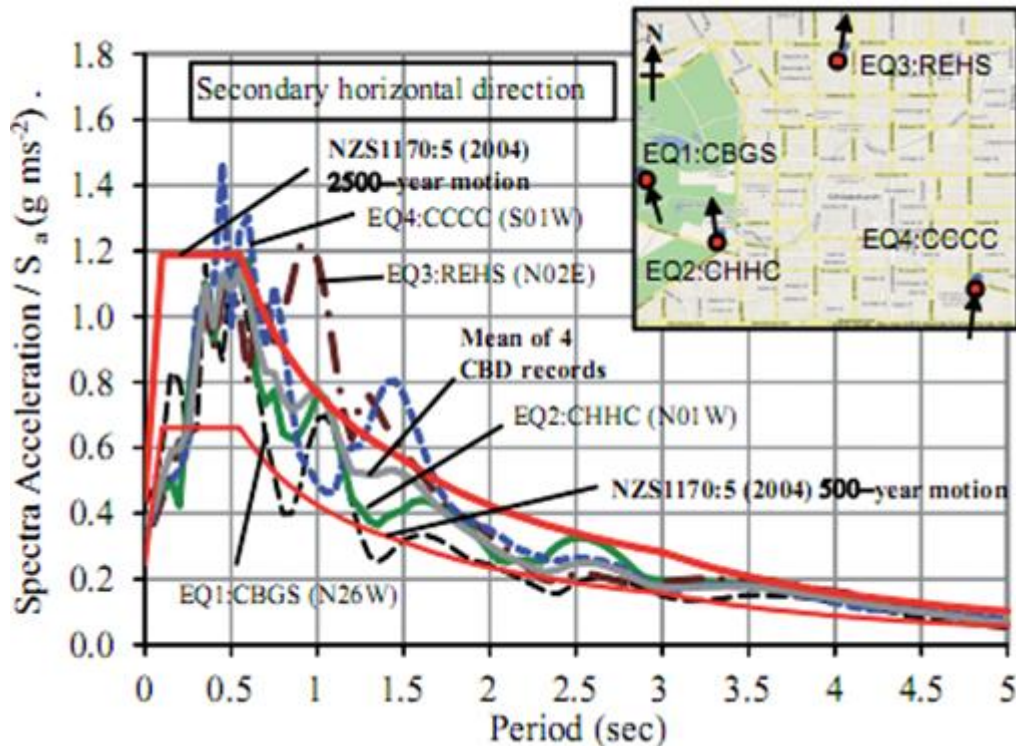


Figura 4 Espectros de la componente Norte-Sur, obtenidos en la zona comercial de Christchurch, durante el sismo del 22 de febrero de 2011 y los que se hallan con la norma de Nueva Zelanda NZS1170:5 de 2004, en perfil de suelo tipo D, para períodos de recurrencia de 500 y 2500 años. (Kam & Pampanin, 2011).

En las figuras 3 y 4 se presentan los espectros hallados con cuatro registros obtenidos en la zona comercial de Christchurch, el espectro promedio de estos espectros y los que se obtienen aplicando la Norma de Nueva Zelanda NZS1170:5 de 2004, para períodos de retorno de 500 y 2500 para un perfil de suelo tipo D. La figura 3 corresponde a los espectros hallados con los registros de la componente E-W y la figura 4 con la componente N-S.

En las dos figuras se aprecia que los espectros promedios tienen ordenadas espectrales mayores a las que se hallan con la norma sísmica NZS, para un período de retorno de 500 años y están cubiertas bastante bien con el espectro cuyo período de retorno es 2500 años. Se destaca que el espectro promedio tiene un nivel de confianza del 50% y como se aprecia en las figuras 3 y 4, existe una gran cantidad de aceleraciones espectrales que superan el espectro promedio y el correspondiente a un período de retorno de 2500 años.

Lo importante de haber presentado los espectros del sismo del 22 de febrero de 2011, es ver que para valores de PGA entre 0.4 y 0.7 g , las ordenadas del espectro llegan a tener valores mayores a 1.6 g . Esto a una distancia epicentral de 6 Km., es lógico pensar que si ésta distancia disminuye las ordenadas espectrales aumentan; comentario que se debe tener presente cuando se indiquen los espectros hallados sobre las fallas ciegas de Quito.

2. SEGMENTOS DE FALLAS

Una buena parte de la ciudad de Quito se halla sobre un sistema de fallas ciegas bastante complejas, sin embargo de ello y con el propósito de tener modelos que permitan obtener en primer lugar parámetros sísmológicos y en segundo lugar espectros para ser utilizados en el diseño sísmico de estructuras, se han definido por el momento 5 segmentos denominados de sur a norte de la siguiente manera: Puengasi; Ilumbisi-La Bota (ILB); Carcelén el Inca (CEI); Bellavista-Catequilla (BC) y Tangahuilla.

En la tabla 1 se indican algunos de los parámetros sismológicos que han sido determinados por Alvarado *et al.* 2014. En la primera columna se identifica el segmento de falla, cuyas proyecciones en el plano horizontal están indicadas en la figura 5; en la segunda columna se presenta el área de ruptura encontrada en función de la longitud de la superficie de ruptura que se indica en la cuarta columna y del ancho del plano de falla; en la tercera columna se tiene la magnitud máxima esperada hallada en función del área de ruptura (RA, del inglés *Rupture Area*); en la quinta la magnitud encontrada en base a la longitud de ruptura (SRL, del inglés *Surface Rupture Length*); estas dos magnitudes han sido obtenidas aplicando las ecuaciones de Leonard (2010).

Tabla 1 Períodos de Recurrencia, hallados con modelo de Terremoto Característico (modificado de Alvarado *et al.*, 2014).

Segmento	Área ruptura (km) ²	Magnitud (RA)	Longitud de Superficie de Ruptura (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

Finalmente, en la última columna de la tabla 1 se tiene el período de recurrencia de cada uno de los segmentos de falla, aplicando el modelo de Terremoto Característico (Wesnousky, 1986), en la que se aprecia que éste período se encuentra entre 105 y 188 años. Redondeando la última cantidad se puede decir que el período de recurrencia es de alrededor de 200 años.

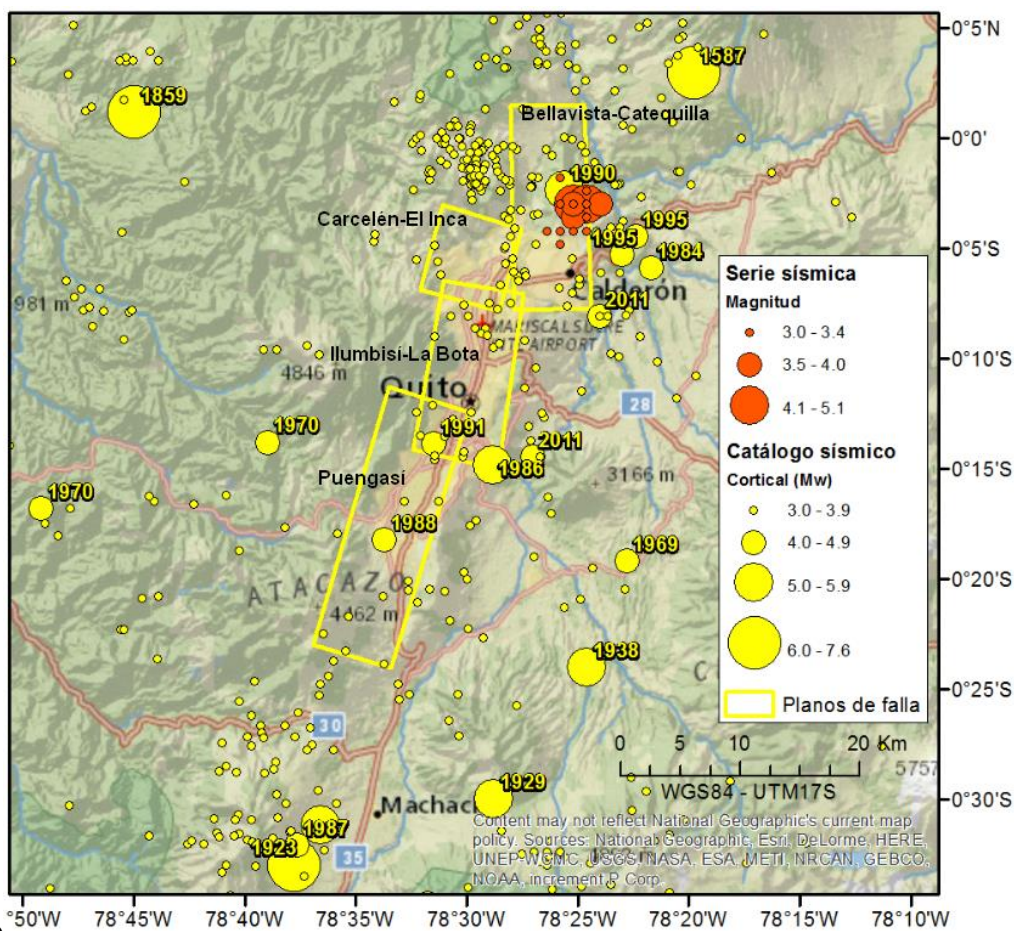


Figura 5 Proyección en el plano horizontal de los segmentos de las fallas ciegas de Quito.

Por otra parte, en la parte superior de la figura 5 aparece el epicentro del sismo de 1587, que tuvo una magnitud de 6.4 (Beuval *et al.* 2010) que a la fecha es el de mayor magnitud registrado en las fallas ciegas de Quito. Si se considera que el período de recurrencia hallado con el modelo de Terremoto Característico es alrededor de 200 años, significa que al 2014 se debieron haberse registrado dos sismos de magnitud 6.4, lo que no ha sucedido. Se puede emitir dos comentarios al respecto, uno de ellos es que el modelo de Terremoto Característico reporta valores bajos del período de recurrencia por la hipótesis del modelo y la otra es que se está acumulando energía ya que las fallas ciegas de Quito, continúan moviéndose entre 3 y 4 mm., por año.

El último comentario es una alerta para los Proyectistas Estructurales, que sepan que al no haberse registrado sismos fuertes de magnitud mayor a 6 asociados a las fallas ciegas de Quito se tiene una alta probabilidad de que se presente en los próximos años ya que se ha sobrepasado el período de recurrencia y lo mejor es obtener espectros asociados a cada uno de los segmentos de las fallas indicadas en la figura 5.

3. AREA DE ESTUDIO

Una de las zonas donde se han concentrado la mayor cantidad de edificios de altura es el Centro Norte, por ese motivo interesa conocer las formas espectrales en las parroquias de: Rumipamba, Belisario Quevedo, Mariscal Sucre, Iñaquito y Jipijapa, que en total cubren un área aproximada de 48 km². En la figura 6 se indica el área de estudio que fue expandida un poco más ya que para el cálculo de los espectros se hizo una malla rectangular que cubra las cinco parroquias, con la expansión se cubre parte de las parroquias de Cochapanba, Concepcion, Kenedy, San Isidro del Inca y Cumbaya.

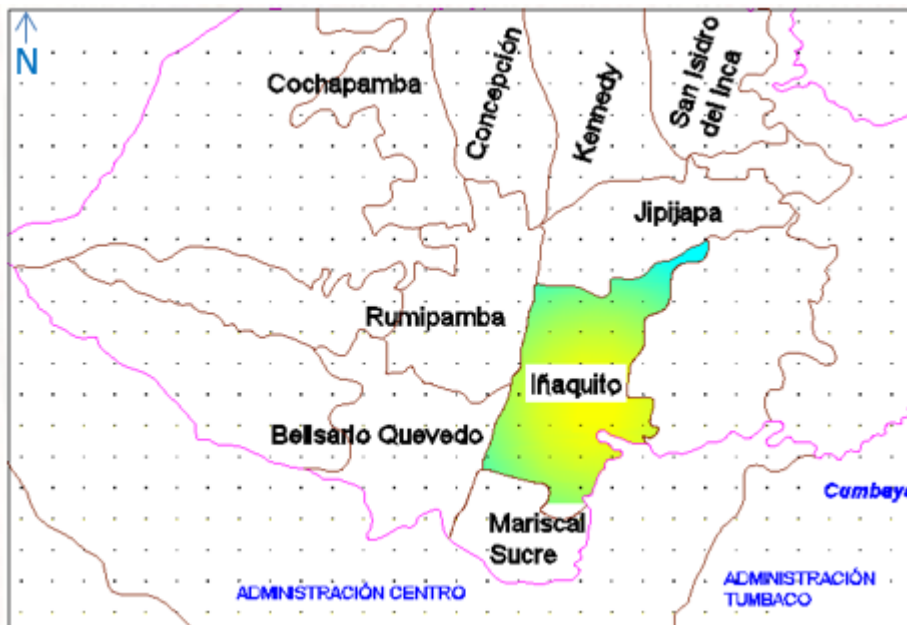


Figura 6 Área de estudio del Centro Norte de Quito.

Las fallas ciegas de Quito, son inversas consecuencia de ello se tienen las lomas de Ilumbisí-La Bota, que aparece en primer plano en la figura 7 y más al fondo las Lomas de Puengasí, pero nótese que estas lomas no están alineadas lo que significa que a más de ello existe una falla transcurrente que originó este desplazamiento lateral. (Peñafiel 2013).

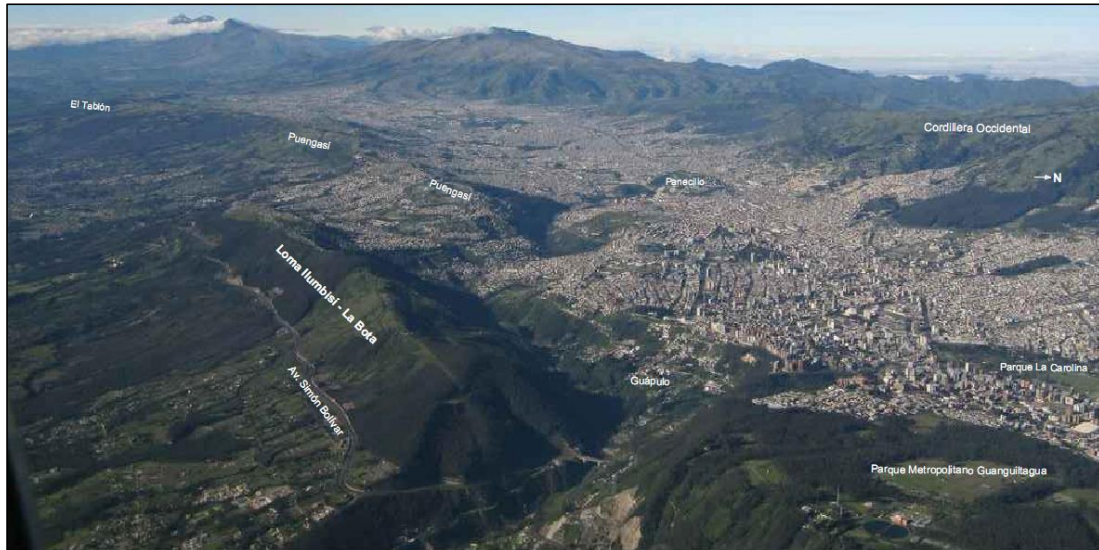


Figura 7 Loma de Ilumbisi-La Bota, en primer plano y la Loma de Puengasí al fondo

En la figura 7, al lado izquierdo de la Loma de Ilumbisi-La Bota se aprecia la Av. Simón Bolívar y el inicio de los Valles de Tumbaco y más al Sur el de los Chillos que se encuentran 400 m., más debajo de la altura de Quito. Al lado derecho y a las faldas de la loma se encuentra el Santuario de Guápulo y se aprecia parte del Parque La Carolina que forma parte de la Parroquia de Ñaquito. De tal forma que los espectros para el Centro Norte de Quito tendrán como fuente principal el segmento Ilumbisi-La Bota, ver figura 5.

4. MODELOS DE MOVIMIENTOS FUERTES

En el estudio se consideraron los siguientes modelos de movimientos fuertes: Campbell y Borzognia (2013); Abrahamson, Silva y Kamai (2013); y el modelo de Zhao *et al.* (2006). Los dos primeros modelos permiten obtener espectros para fallas corticales; en cambio con el modelo de Zhao *et al.* (2006) se puede hallar espectros para tres tipos de fuentes sísmicas: corticales, interfase e intraplaca.

La base de datos de los dos primeros modelos es la de PEER NGA-West2, que contiene más de 21000 acelerogramas, para las tres componentes de movimiento del suelo, de sismos registrados en diferentes partes del mundo, con magnitudes variando entre 3 y 7.9; de esta gran cantidad, C & B (2013) seleccionaron 15521 registros pertenecientes a 322 sismos; mientras que ASK (2013) trabajaron con 15749 registros de 326 sismos. En los dos modelos se tiene una base de datos muy importante por este motivo son ecuaciones de movimiento de suelo acreditadas, que tienen un sustento estadístico y científico.

Por otra parte, el modelo de Zhao *et al.* (2013) fue obtenido a partir de 4726 registros de los cuales 4518 son de sismos de Japón y la cantidad restante fue registrada en Irán y el oeste de los Estados Unidos.

4.1 Modelo de Campbell y Borzognia (2013)

La ecuación de C & B (2013) con la que se halla leyes de atenuación del movimiento del suelo o espectros elásticos para un 5% de amortiguamiento es la siguiente.

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (1)$$

Donde Y es la aceleración espectral expresada como una fracción de la gravedad; f_{mag} es una función de la magnitud M_w ; f_{dis} es una función de la magnitud y de la distancia del sitio al plano de ruptura R_{rup} ; f_{flt} depende de la magnitud y del tipo de falla; f_{hng} es una función que depende del efecto hanginwall, la ciudad de Quito se encuentra en el bloque que se está levantando; f_{site} es una

función que toma en cuenta los efectos de sitio y depende fundamentalmente de V_{s30} velocidad de la onda de corte en los primeros 30 metros; f_{sed} es una función que toma en cuenta el efecto de cuenca, depende de $Z_{2.5}$ que es la profundidad donde la velocidad de la onda de corte es 2.5 km/s; f_{hyp} es una función que depende de la profundidad focal Z_{hyp} ; f_{dip} es una función que depende del ángulo de buzamiento de la falla δ y de la magnitud; f_{atn} es una función de la atenuación anelástica. A continuación se describen cada una de las funciones del modelo de C & B (2013)

- **Función de magnitud**

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1.M; & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1.M + c_2.(M - 4.5); & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1.M + c_2.(M - 4.5) + c_3.(M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1.M + c_2.(M - 4.5) + c_3.(M - 5.5) + c_4.(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (2)$$

En la tabla 2 se presentan los coeficientes c_0 a c_4 que intervienen en la ecuación (2) para diferentes valores de períodos. Se indican los coeficientes hasta c_{11} que intervienen en otras funciones que se verán posteriormente.

- **Función de atenuación geométrica**

$$f_{dis} = (c_5 + c_6.M) \cdot \ln\left(\sqrt{R_{rup}^2 + c_7^2}\right) \quad (3)$$

- **Función del tipo de falla**

$$f_{fit} = f_{fit,F} \cdot f_{fit,M}$$

$$f_{fit,F} = c_8.F_{RV} + c_9.F_{NM} \quad (4)$$

Si se tiene una falla inversa $F_{RV} = 1$, $F_{NM} = 0$. Ahora si la falla es normal $F_{NM} = 1$, $F_{RV} = 0$

$$f_{fit,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases} \quad (5)$$

- **Función de Hanging Wall**

$$f_{hng} = c_{10} \cdot f_{hng,Rx} \cdot f_{hng,Rrup} \cdot f_{hng,M} \cdot f_{hng,Z} \cdot f_{hng,\xi} \quad (6)$$

$$f_{hng,Rx} = \begin{cases} 0; & R_x < 0 \\ f_1(R_x); & 0 \leq R_x < R_1 \\ \max[f_2(R_x), 0]; & R_x \geq R_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_1(R_x) = h_1 + h_2.(R_x/R_1) + h_3.(R_x/R_1)^2 \quad (8)$$

$$f_2(R_x) = h_4 + h_5 \cdot \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right) + h_6 \cdot \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right)^2 \quad (9)$$

$$R_1 = W \cdot \cos(\delta) \quad (10)$$

$$R_2 = 62.M - 350 \quad (11)$$

$$f_{hng,Rrup} = \begin{cases} 1; & R_{rup} = 0 \\ (R_{rup} - R_{jb}) / R_{rup}; & R_{rup} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 5.5 \\ (M - 5.5) [1 + a_2.(M - 6.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ 1 + a_2.(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_{hng,z} = \begin{cases} 1 - 0.06 Z_{tor}; & Z_{tor} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{tor} > 16.66 \end{cases} \quad (14)$$

$$f_{hng,\delta} = (90 - \delta) / 45 \quad (15)$$

Tabla 2 Coeficientes c_i del modelo de C & B (2013)

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

- **Función de respuesta de sitio**

$$f_{\text{site}} = f_{\text{site,G}} + S_j \cdot f_{\text{site,J}} \quad (16)$$

$$f_{\text{site,G}} = \begin{cases} c_{11} \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) + k_2 \cdot \left\{ \ln\left[A_{1100} + c \cdot \left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right)^n\right] - \ln[A_{1100} + c] \right\}; & V_{s30} \leq k_1 \\ (c_{11} + k_2 \cdot n) \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & V_{s30} > k_1 \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{\text{site,J}} = \begin{cases} (c_{12} + k_2 \cdot n) \cdot \left[\ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) - \ln\left(\frac{200}{k_1}\right) \right]; & V_{s30} \leq 200 \\ (c_{13} + k_2 \cdot n) \cdot \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & \text{demás } V_{s30} \end{cases} \quad (18)$$

El valor de $c = 1.88$; $n = 1.18$ son valores que no dependen del período y consideran el comportamiento no lineal del suelo conjuntamente con los valores k_i . Los coeficientes c_i se hallan en las tablas 2 y 3; los coeficientes k_i se presentan en la tabla 3. Si $S_j = 1$ las funciones de sitio corresponden a los datos obtenidos en Japón; para cualquier otro lugar se trabaja con $S_j = 0$.

Tabla 3 Coeficientes c_i y k_i del modelo de C & B (2013)

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).

- **Función de efecto de cuenca**

$$f_{sed} = \begin{cases} (C_{14} + C_{15} \cdot S_j) \cdot (Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ C_{16} \cdot k_3 \cdot e^{-0.75 [1 - \exp(-0.25 \cdot \{Z_{2.5} - 3\})]}; & Z_{2.5} > 3 \end{cases} \quad (19)$$

Donde $Z_{2.5}$ es la profundidad en km., donde la velocidad de la onda de corte es 2500 m/s. Por otra parte S_j es la variable indicadora si vale 1 se trabaja con coeficientes de Japón. Para otros sitios $S_j = 0$

- **Función de profundidad focal**

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} \cdot f_{hyp,M} \quad (20)$$

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{hyp} \leq 7 \\ Z_{hyp} - 7; & 7 < Z_{hyp} \leq 20 \\ 13; & Z_{hyp} > 20 \end{cases} \quad (21)$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} C_{17}; & M \leq 5.5 \\ [C_{17} + (C_{18} - C_{17}) \cdot (M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ C_{18}; & M > 6.5 \end{cases} \quad (22)$$

- **Función del ángulo de buzamiento**

$$f_{dip} = \begin{cases} C_{19} \cdot \delta; & M \leq 4.5 \\ C_{19} \cdot (5.5 - M) \cdot \delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases} \quad (23)$$

- **Función de atenuación anelástica**

$$f_{atn} = \begin{cases} (C_{20} + \Delta C_{20}) \cdot (R_{rup} - 80); & R_{rup} > 80 \\ 0; & R_{rup} \leq 80 \end{cases} \quad (24)$$

Los coeficientes para la atenuación anelástica de la ecuación (24) se indican en la tabla 4. Para ΔC_{20} se tienen valores obtenidos a partir de registros de California CA, Japón JP y China CH, como se aprecia en la tabla 4.

Finalmente, se debe determinar el campo de aplicación de las ecuaciones de C & B (2013). La magnitud debe ser mayor a 3; la magnitud máxima para fallas transcurrentes es 8.5; para fallas inversas es 8 y para fallas normales 7.5; la distancia R_{rup} tiene que ser menor a 300 km.; la velocidad de la onda de corte V_{s30} debe estar comprendida entre 150 y 1500 m/s, la clasificación de los suelos se realiza de acuerdo a la guía NEHRP desde A hasta E; la profundidad de

sedimentos debe ser menor a 10 km. EL valor de Z_{TOR} menor a 20 km; la profundidad focal menor a 20 km; el ángulo de buzamiento δ debe estar entre 15 y 90 grados.

Tabla 4 Coeficientes para la atenuación anelástica del modelo de C & B (2013)

T (seg)	c_{20}	Δc_{20}		
		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).

4.2 Modelo de Abrahamson, Silva y Kamai (2013)

La ecuación del modelo de ASK (2013) con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento es la siguiente.

$$\ln Y = \begin{cases} f_1(M, R_{rup}) + F_{RV} \cdot f_7(M) + F_N \cdot f_8(M) + F_{AS} \cdot f_{11}(CR_{jb}) \\ + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) + F_{HW} \cdot f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, \text{dip}, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) \\ + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30}) + \text{Regional}(V_{s30}, R_{rup}) \end{cases} \quad (25)$$

Donde Y es la aceleración espectral expresada como un coeficiente de la gravedad; el significado de las funciones que intervienen en su formulación se indica a continuación.

- **Función del modelo base**

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5 (M - M_1) + a_8 (8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3 (M - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & M > M_1 \\ a_1 + a_4 (M - M_1) + a_8 (8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3 (M - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4 (M_2 - M_1) + a_8 (8.5 - M_2)^2 + a_6 (M - M_2) + a_7 (M - M_2)^2 & M < M_2 \\ + [a_2 + a_3 (M_2 - M_1)] \ln(R) + a_{17} R_{rup}; & \end{cases} \quad (26)$$

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_{4M}^2} \quad (27)$$

$$c_{4M} (M) = \begin{cases} c_4; & M > 5 \\ c_4 - (c_4 - 1) (5 - M); & 4 < M \leq 5 \\ 1; & M \leq 4 \end{cases} \quad (28)$$

Únicamente con f_1 , calculaban en el 2003 la atenuación del suelo y el espectro para fallas transcurrentes, por ese motivo se conoce con el nombre de Modelo base. Algunos de los coeficientes, que dependen del período se indican en la tabla 5 y otros que no dependen del período se indican en la tabla 6. Posteriormente se presentarán más tablas con los coeficientes que faltan.

Tabla 5 Parámetros del modelo de ASK (2013)

T (seg)	V _{Lin}	b	c ₄	M ₁	a ₁	a ₂	a ₃	a ₆	a ₈
PGA	660	-1.47	6	6.75	0.464	-0.79	0.281	2.28	0
PGV	330	-2.02	3	6.75	6.168	-0.95	0.281	2.3	-0.12
0.01	660	-1.47	6	6.75	0.464	-0.79	0.281	2.28	0
0.02	680	-1.46	6	6.75	0.473	-0.79	0.281	2.28	0
0.03	770	-1.39	6	6.75	0.457	-0.79	0.281	2.25	0
0.05	800	-1.22	6	6.75	0.652	-0.79	0.281	2.18	0
0.075	800	-1.15	6	6.75	0.95	-0.79	0.278	2.13	0
0.1	800	-1.23	5.9	6.75	1.16	-0.79	0.27	2.14	0
0.15	740	-1.59	5.8	6.75	1.487	-0.79	0.258	2.19	-0.029
0.2	590	-2.01	5.7	6.75	1.712	-0.79	0.25	2.25	-0.05
0.25	495	-2.41	5.6	6.75	1.796	-0.79	0.242	2.3	-0.066
0.3	430	-2.76	5.5	6.75	1.849	-0.79	0.239	2.35	-0.079
0.4	360	-3.28	5.2	6.75	1.825	-0.79	0.231	2.45	-0.099
0.5	340	-3.6	4.8	6.75	1.768	-0.79	0.23	2.55	-0.115
0.75	330	-3.8	4.4	6.75	1.543	-0.79	0.23	2.65	-0.144
1	330	-3.5	4	6.75	1.292	-0.79	0.23	2.7	-0.165
1.5	330	-2.4	3.75	6.75	0.855	-0.79	0.23	2.75	-0.194
2	330	-1	3.5	6.75	0.521	-0.79	0.23	2.75	-0.214
3	330	0	3.25	6.82	0.16	-0.79	0.23	2.75	-0.243
4	330	0	3	6.92	-0.07	-0.79	0.23	2.75	-0.264
5	330	0	3	7	-0.41	-0.756	0.23	2.75	-0.27
6	330	0	3	7.06	-0.838	-0.7	0.23	2.75	-0.27
7.5	330	0	3	7.15	-1.433	-0.62	0.23	2.75	-0.27
10	330	0	3	7.25	-2.368	-0.515	0.23	2.75	-0.27

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

Tabla 6 Coeficientes independientes del período

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, & Kamai, 2013).

• **Función del tipo de falla**

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11}; & M > 5.0 \\ a_{11}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M < 4.0 \end{cases} \quad (29)$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12}; & M > 5.0 \\ a_{12}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M < 4.0 \end{cases} \quad (30)$$

Tabla 7 Coeficientes del modelo de ASK (2013)

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

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

En la ecuación (25) la variable indicadora $F_{RV} = 1$ para fallas inversas y $F_N = 1$ para fallas normales. En la tabla 7 se indican los coeficientes a_{11} y a_{12} que intervienen en el cálculo de las formas espectrales para fallas inversas y normales respectivamente. También se indica en la tabla 7 otros coeficientes que intervienen en otras funciones del modelo de ASK (2013)

- **Función de Réplicas**

De acuerdo al orden presentado en la ecuación (25) se tiene ahora la variable indicadora F_{AS} si vale 1, significa que se desea encontrar el espectro con los registros de réplicas; en este caso la función f_{11} es:

$$f_{11}(CR_{jb}) = \begin{cases} a_{14}; & CR_{jb} \leq 5 \\ a_{14} \left[1 - \frac{CR_{jb} - 5}{10} \right]; & 5 < CR_{jb} < 15 \\ 0; & CR_{jb} > 15 \end{cases} \quad (31)$$

Donde CR_{jb} es la distancia en km., desde el sitio hasta el centroide del plano de falla. El coeficiente a_{14} se indica en la tabla 7.

- **Función de sitio**

$$f_5(\hat{S}a_{1100}, V_{s30}^*) =$$

$$\begin{cases} (a_{10}) \ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right) - b \cdot \ln(\hat{S}a_{1100} + c) + b \cdot \ln\left(\hat{S}a_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right)^n\right); & V_{s30} < V_{Lin} \\ (a_{10} + b \cdot n) \ln\left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}}\right); & V_{s30} \geq V_{Lin} \end{cases} \quad (32)$$

$$V_{s30}^* = \begin{cases} V_{s30}; & V_{s30} < V_1 \\ V_1; & V_{s30} \geq V_1 \end{cases} \quad (33)$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500; & T \leq 0.5 \text{ seg} \\ \exp[-0.35 \ln\left(\frac{T}{0.5}\right) + \ln(1500)]; & 0.5 \text{ seg} < T < 3 \text{ seg} \\ 800; & T \geq 3 \text{ seg} \end{cases} \quad (34)$$

Donde V_{Lin} es la velocidad de la onda de corte indicada en la tabla 5, en esa misma tabla también se indica el valor del coeficiente b ; los coeficientes c, n que no dependen del período están indicados en la tabla 6. $\hat{S}a_{1100}$ es la aceleración en roca, expresada como un coeficiente de la gravedad y que se halla con la ecuación (25) pero con los coeficientes de roca.

- **Función de Hangin Wall**

$$f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, \text{dip}, Z_{TOR}, M) = a_{13} T_1(\text{dip}) \cdot T_2(M) \cdot T_3(R_x, W, \text{dip}) \cdot T_4(Z_{tor}) \cdot T_5(R_x, R_{y0}) \quad (35)$$

$$T_1(\text{dip}) = \begin{cases} (90 - \text{dip})/45 & ; & \text{dip} > 30 \\ 60/45; & & \text{dip} < 30 \end{cases} \quad (36)$$

$$T_2(M) = \begin{cases} 1 + a_{2HW}(M - 6.5); & M \geq 6.5 \\ 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - (1 - a_{2HW})(M - 6.5)^2; & 5.5 < M < 6.5 \\ 0; & M \leq 5.5 \end{cases} \quad (37)$$

$$T_3(R_x) = \begin{cases} h_1 + h_2(R_x/R_1) + h_3(R_x/R_1)^2; & R_x < R_1 \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}\right); & R_1 \leq R_x \leq R_2 \\ 0; & R_x > R_2 \end{cases} \quad (38)$$

$$T_4(Z_{TOR}) = \begin{cases} 1 - \frac{Z_{TOR}^2}{100}; & Z_{TOR} \leq 10 \text{ km} \\ 0; & Z_{TOR} > 10 \text{ km} \end{cases} \quad (39)$$

$$T_5(R_x, R_{y0}) = \begin{cases} 1; & R_{y0} < R_{y1} \\ 1 - \frac{R_{y0} - R_{y1}}{5}; & R_{y0} - R_{y1} < 5 \\ 0; & R_{y0} - R_{y1} \geq 5 \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= w \cos(\text{dip}) & R_2 &= 3R_1 & R_{y1} &= R_x \tan(20^\circ) \\ h_1 &= 0.25 & h_2 &= 1.5 & h_3 &= -0.75 & a_{2HW} &= 0.2 \end{aligned} \quad (41)$$

Si no se dispone de la distancia R_{y0} se puede calcular T_5 de la siguiente forma.

$$T_5(R_{jb}) = \begin{cases} 1; & R_{jb} = 0 \\ 1 - \frac{R_{jb}}{30}; & R_{jb} < 30 \\ 0; & R_{jb} \geq 30 \end{cases} \quad (42)$$

El coeficiente a_{13} está indicado en la tabla 7 y representa la máxima amplitud del efecto hanging wall, fue definido a partir de un sismo de magnitud 6.5, con un ángulo de buzamiento de 45 grados y con un valor $Z_{TOR} = 0$

- **Función Z_{TOR}**

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \left(\frac{Z_{TOR}}{20}\right); & Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15}; & Z_{TOR} \geq 20 \text{ km} \end{cases} \quad (43)$$

Donde a_{15} es el coeficiente indicado en la tabla 7 que es función del período; Z_{TOR} es la profundidad al borde superior del plano de ruptura.

- **Función de profundidad de cuenca**

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

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp\left(-\frac{7.67}{4} \ln\left(\frac{V_{s30}^4+610^4}{1360^4+610^4}\right)\right) \quad \text{Para California} \quad (45)$$

$$Z_{1,ref} = \frac{1}{1000} \exp\left(-\frac{5.23}{2} \ln\left(\frac{V_{s30}^2+412^2}{1360^2+412^2}\right)\right) \quad \text{Para Japón} \quad (46)$$

Donde Z_1 es la profundidad donde la velocidad de la onda de corte es de 1000 m/s., si se desconoce esta cantidad se puede considerar $Z_1 = Z_{1,ref}$. En la tabla 8 se indican los coeficiente de f_{10}

Tabla 8 Coeficientes para la función f_{10} .

T (seg)	a₄₃	a₄₄	a₄₅	a₄₆
PGA	0.1	0.05	0	-0.05
PGV	0.28	0.15	0.09	0.07
0.01	0.1	0.05	0	-0.05
0.02	0.1	0.05	0	-0.05
0.03	0.1	0.05	0	-0.05
0.05	0.1	0.05	0	-0.05
0.075	0.1	0.05	0	-0.05
0.1	0.1	0.05	0	-0.05
0.15	0.1	0.05	0	-0.05
0.2	0.1	0.05	0	-0.03
0.25	0.1	0.05	0	0
0.3	0.1	0.05	0.03	0.03
0.4	0.1	0.07	0.06	0.06
0.5	0.1	0.1	0.1	0.09
0.75	0.14	0.14	0.14	0.13
1	0.17	0.17	0.17	0.14
1.5	0.22	0.21	0.2	0.16
2	0.26	0.25	0.22	0.16
3	0.34	0.3	0.23	0.16
4	0.41	0.32	0.23	0.14
5	0.51	0.32	0.22	0.13
6	0.55	0.32	0.2	0.1
7.5	0.55	0.29	0.17	0.08
10	0.42	0.22	0.14	0.08

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

- **Función de regionalización**

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

$$F_{TW} (f_{12} (V_{s30}) + a_{25} \cdot R_{rup}) + F_{CN} (a_{28} \cdot R_{rup}) + F_{JP} (f_{13} (V_{s30}) + a_{29} \cdot R_{rup}); \quad (47)$$

$$f_{12} (V_{s30}) = a_{31} \ln \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{Lin}} \right); \quad (48)$$

$$f_{13} (V_{s30}) = \begin{cases} a_{36}; & V_{s30} < 200 \text{ m/s} \\ a_{37}; & 200 \leq V_{s30} < 300 \text{ m/s} \\ a_{38}; & 300 \leq V_{s30} < 400 \text{ m/s} \\ a_{39}; & 400 \leq V_{s30} < 500 \text{ m/s} \\ a_{40}; & 500 \leq V_{s30} < 700 \text{ m/s} \\ a_{41}; & 700 \leq V_{s30} < 1000 \text{ m/s} \\ a_{42}; & V_{s30} \geq 1000 \text{ m/s} \end{cases} \quad (49)$$

Donde F_{TW} ; F_{CN} ; F_{JP} , son variables indicadoras para Taiwan, China y Japón. Si se desea trabajar con los datos de Taiwan se tendrá $F_{TW} = 1$ y las restantes variables indicadoras cero.

Tabla 9 Coeficientes para el ajuste de V_{s30} , para 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)

En la tabla 9 se indican los coeficientes para el cálculo de $f_{13}(V_{s30})$, no consta el valor de a_{39} que vale cero; con estos valores se considera la amplificación de sitio con respecto al modelo base. Los coeficientes de la tabla 10 son para la función indicada en la ecuación (47).

Tabla 10 Coeficientes para Taiwán, China y Japón.

T (seg)	a₂₅	a₂₈	a₂₉	a₃₁
PGA	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
PGV	-0.0001	0.0005	-0.0037	-0.1462
0.01	-0.0015	0.0025	-0.0034	-0.1503
0.02	-0.0015	0.0024	-0.0033	-0.1479
0.03	-0.0016	0.0023	-0.0034	-0.1447
0.05	-0.002	0.0027	-0.0033	-0.1326
0.075	-0.0027	0.0032	-0.0029	-0.1353
0.1	-0.0033	0.0036	-0.0025	-0.1128
0.15	-0.0035	0.0033	-0.0025	0.0383
0.2	-0.0033	0.0027	-0.0031	0.0775
0.25	-0.0029	0.0024	-0.0036	0.0741
0.3	-0.0027	0.002	-0.0039	0.2548
0.4	-0.0023	0.001	-0.0048	0.2136
0.5	-0.002	0.0008	-0.005	0.1542
0.75	-0.001	0.0007	-0.0041	0.0787
1	-0.0005	0.0007	-0.0032	0.0476
1.5	-0.0004	0.0006	-0.002	-0.0163
2	-0.0002	0.0003	-0.0017	-0.1203
3	0	0	-0.002	-0.2719
4	0	0	-0.002	-0.2958
5	0	0	-0.002	-0.2718
6	0	0	-0.002	-0.2517
7.5	0	0	-0.002	-0.1337
10	0	0	-0.002	-0.0216

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

En la formulación del modelo ASK (2013) las variables utilizadas que todavía no se han definido son: R_{jb} (km) es la distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie (distancia Joyner-Boore) cuando el sitio se encuentra sobre el plano de ruptura esta variable vale cero; R_x (km) es la distancia más cercana al borde superior del plano de ruptura medido perpendicularmente desde la dirección del rumbo promedio, R_x es negativo en la dirección foot-wall (bloque deprimido) y positivo en hanging-wall (bloque levantado) Ancheta *et al.* 2013.

Otras variables no definidas son R_{y0} (km) es la distancia horizontal fuera del borde del plano de ruptura medido paralelamente a la dirección del rumbo; para sitios ubicados a lo largo de la ruptura $R_{y0} = 0$; dip o δ ($^\circ$) es el ángulo de buzamiento promedio del plano de ruptura; λ ($^\circ$) rake es el ángulo promedio de deslizamiento, medido en el plano de ruptura entre la dirección del rumbo y el vector de deslizamiento, para fallas inversas $30^\circ < \lambda < 150^\circ$, para falla normales y normales oblicuas se tiene $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$.

4.3 Modelo de Zhao *et al.* (2006)

El modelo de Zhao *et al.* (2006) permite encontrar espectros y leyes de atenuación de movimiento del suelo para tres fuentes sísmicas, a saber: fallamiento cortical; interfase e intraplaca. En este sentido ésta es una ventaja del modelo de Z (2006) en relación a los modelos de C & B (2013) y ASK (2013) pero la desventaja es que la base de datos la constituyen en su mayor parte sismos registrados en Japón desde 1968 hasta el 2003.

Tabla 11 Base de datos del modelo de Zhao *et al.* (2006)

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
Total de cada tipo de fuente	1285	1508	1725	4518
<i>Irán y oeste de USA:</i>				
Inverso	123	12		135
Transcurrente	73			73
Total de cada tipo de fuente	196	12		208
Total de cada tipo de fuente de todas las regiones	1481	1520	1725	4726

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

En la tabla 12 se presenta la clasificación de los suelos del modelo de Z (2006) la misma que se la ha realizado en función de la velocidad de la onda de corte V_{s30} , se tienen 5 tipos de suelo desde roca dura hasta un suelo suave, ésta clasificación de suelos es un dato del modelo. En la última columna de la tabla 12 se indica una equivalencia del tipo del suelo con la guía NEHRP.

Tabla 12 Clasificación de suelos del modelo de Zhao *et al.* (2006)

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

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

La ecuación con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento o leyes de atenuación con el modelo de Z (2006) es la siguiente.

$$\ln(Y_{i,j}) = a.Mw_i + b.X_{i,j} - \log_e(r_{i,j}) + e(h - hc). \delta h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \cdot \log_e(X_{i,j}) + C_k \quad (50)$$

$$r_{i,j} = X_{i,j} + c. \exp(d.Mw_i) \quad (51)$$

Donde Y es el valor de la aceleración en gals; M_w es la magnitud; X (km) es la distancia más cercana al plano de ruptura (R_{rup}); h (km) es la profundidad focal que no debe superar los 125 km., (Z_{hyp}); h_c (km) es una constante que vale 15 km.; δh es una variable indicadora que vale cero cuando $h < h_c$ y vale uno cuando $h \geq h_c$; F_R es un parámetro indicador que vale uno para fallas inversas en eventos corticales y vale para los otros indicadores que definen otros tipos de falla, en la tabla 13 se indican los valores de F_R que prácticamente está alrededor de 0.25; S_I es un parámetro indicador para sismos cuya fuente es la subducción interplaca (ver tabla 13) y vale cero para los otros indicadores; S_S es un parámetro indicador para sismos de subducción intraplaca (ver tabla 13) y vale cero para los otros indicadores; S_{SL} es un parámetro independiente de la magnitud que considera una onda sísmica compleja en eventos intraplaca (ver tabla 13); C_k parámetro que considera efectos de sitio (ver tabla 14) los valores de C_H , corresponden a roca, C_1, C_2, C_3, C_4 a suelos tipo SC I, SC II, SC III y SC IV (ver tabla 12); los restantes coeficientes de ecuación (50) están indicados en la tabla 13.

Tabla 13 Coeficientes del modelo de Zhao *et al* (2006)

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

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

Las tres últimas columnas de la tabla 14, corresponde a las incertidumbres del modelo. Se destaca que en la presentación de los modelos de C & B (2013); ASK (2013) y Z (2006) no se han indicado las ecuaciones con las que se obtienen las incertidumbres para no alargar la exposición pero si fueron consideradas en la evaluación de los espectros.

Tabla 14 Coeficientes C_k y desviaciones estándar del modelo de Zhao *et al.* (2006)

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

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

5. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS

En el apartado anterior se indicó el significado de cada una de las variables que intervienen en los modelos de C & B (2013) y ASK (2013) sin embargo de ello en la figura 8 se presenta en forma gráfica el significado de algunas de las variables, aplicadas al centro norte de Quito y considerando el segmento de falla Ilumbisí-La Bota (ILB)

El centro norte se encuentra en el bloque levantado (HW) y los valles en el bloque deprimido (FW). Las figuras que se encuentran en la parte superior, corresponde al caso de un punto de interés que se encuentra sobre el plano de falla. En este caso $R_{JB} = 0$; se ilustra las variables R_x , Z_{TOR} y el ángulo de buzamiento δ .

Las gráficas que se encuentran en la parte inferior de la figura 8, ilustran que R_{rup} es la distancia desde el punto de interés al plano de falla; se aprecia además la variable R_{jb} para un punto interior y para un punto exterior al plano de falla; se indica además el ancho del plano de falla W y la variable R_x .

En la figura 9 se presenta en forma de un diagrama de flujo, el trabajo realizado en este artículo para encontrar los espectros en cada uno de los puntos de la malla. Se inicia con la definición de la magnitud máxima esperada que en este caso es $M_w = 6.2$ (Tabla 1)

Posteriormente para cada punto de la malla, se determina las distancias que intervienen en la formulación de cada uno de los modelos: R_{rup} , R_x , R_{jb} . Luego se debe determinar la velocidad de la onda de corte V_{s30} de cada punto; estos valores fueron obtenidos del estudio de microzonificación sísmica de Quito (Aguiar 2013).

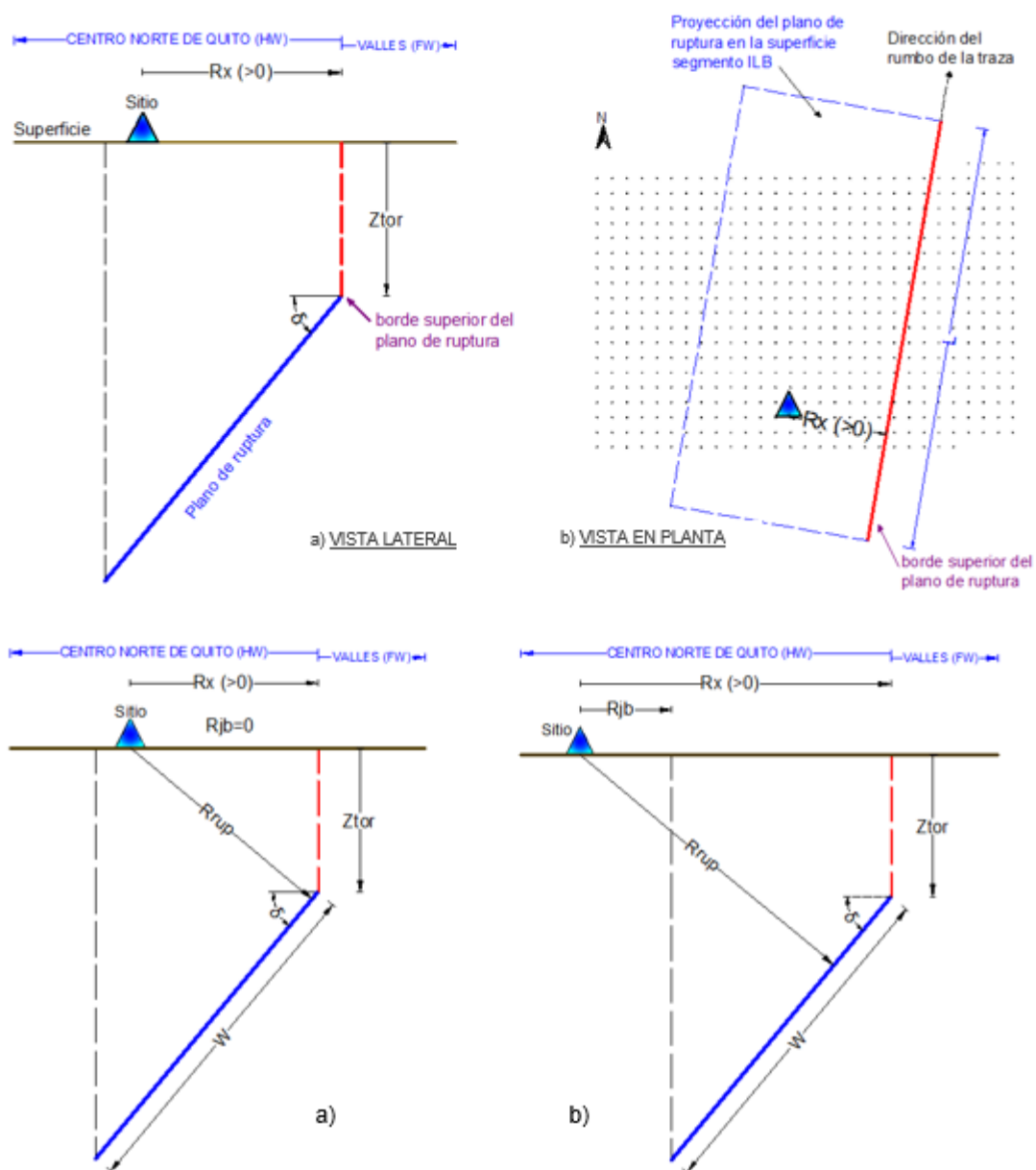


Figura 8 Visualización de las variables de los modelos de C & B (2013) y ASK (2013).

Se determinan los parámetros geológicos que definen la falla como: ángulo rake; ángulo de buzamiento; ancho de la falla; profundidad hipocentral y profundidad Z_{TOR} .

Se encuentran los espectros aplicando los modelos de: C & B (2013); ASK (2013); Z (2013) considerando la incertidumbre (σ). Se destaca que la incertidumbre que reporta el modelo de Z (2013) es mayor que las incertidumbres halladas con los otros modelos, por este motivo no se obtuvo un espectro promedio con los tres modelos sino que se halló un espectro ponderado de la siguiente manera: 30% del modelo de Z (2013), 35% del modelo de C & B (2013) y 35% del modelo ASK (2013).

Finalmente se comparó la forma del espectro ponderado con lo que se obtiene al aplicar el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 con los factores de sitio encontrados en el estudio de microzonificación sísmica de Quito (ERN 2012) y para el caso de los valles con los factores de sitio del NEC-11

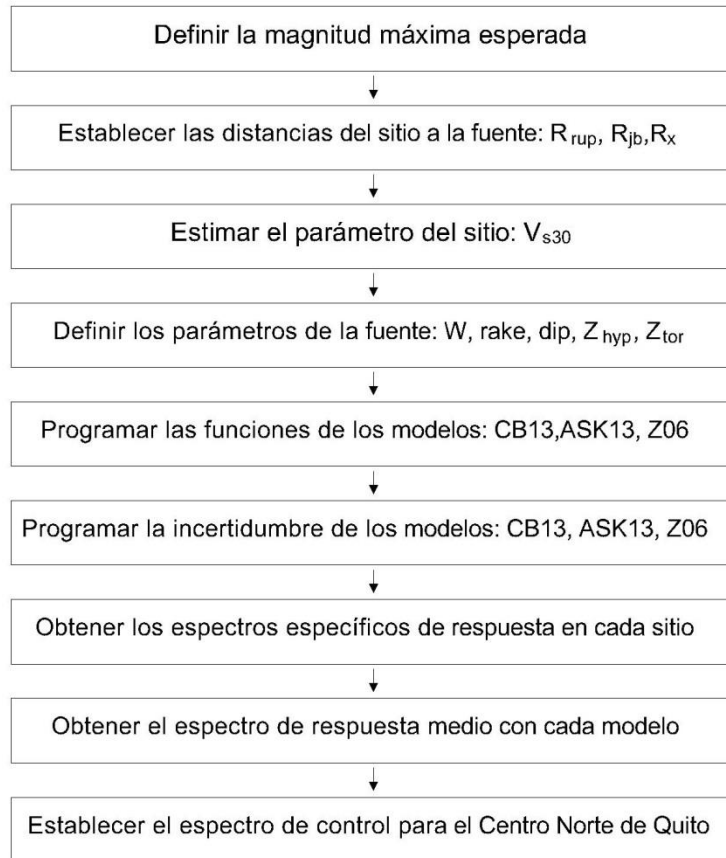


Figura 9 Descripción del procedimiento de cálculo. Trujillo (2014)

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Evidentemente que los puntos que se hallan sobre el segmento ILB, en la parte superior de la loma serán los de mayor peligrosidad y los que se hallan más alejados hacia el Pichincha tendrán menor peligrosidad. Con esta acotación en la figura 10 se presentan cuatro zonas identificadas de 1 a 4; la número 1 es la que reporta mayores ordenadas espectrales y la número 4 la de menores ordenadas espectrales.

En las figuras 11 a 14 se presentan los espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento encontrando que las formas espectrales que se hallan con los modelos de C & B (2013) y ASK (2013) son bastante parecidas, por un lado y que el espectro que se halla con el modelo de Z (2006) reporta mayores valores para la zona de períodos cortos.

En cada una de las zonas se halló el espectro ponderado y se lo comparó con los espectros que reporta el NEC-11 y ERN-12; que tienen un período de retorno de 475 años. Esta comparación se realiza en las figuras 15 a 18 y en todos los casos se observa que para períodos cortos, las ordenadas del espectro promedio son mayores a las que reportan el NEC-11 y ERN-12.

Por lo tanto, los espectros de diseño elástico que reportan el NEC-11 y ERN-12, subestiman la peligrosidad sísmica de Quito en caso de registrarse un sismo de magnitud 6.2 en la falla ILB y esto es debido a que son sismos superficiales.

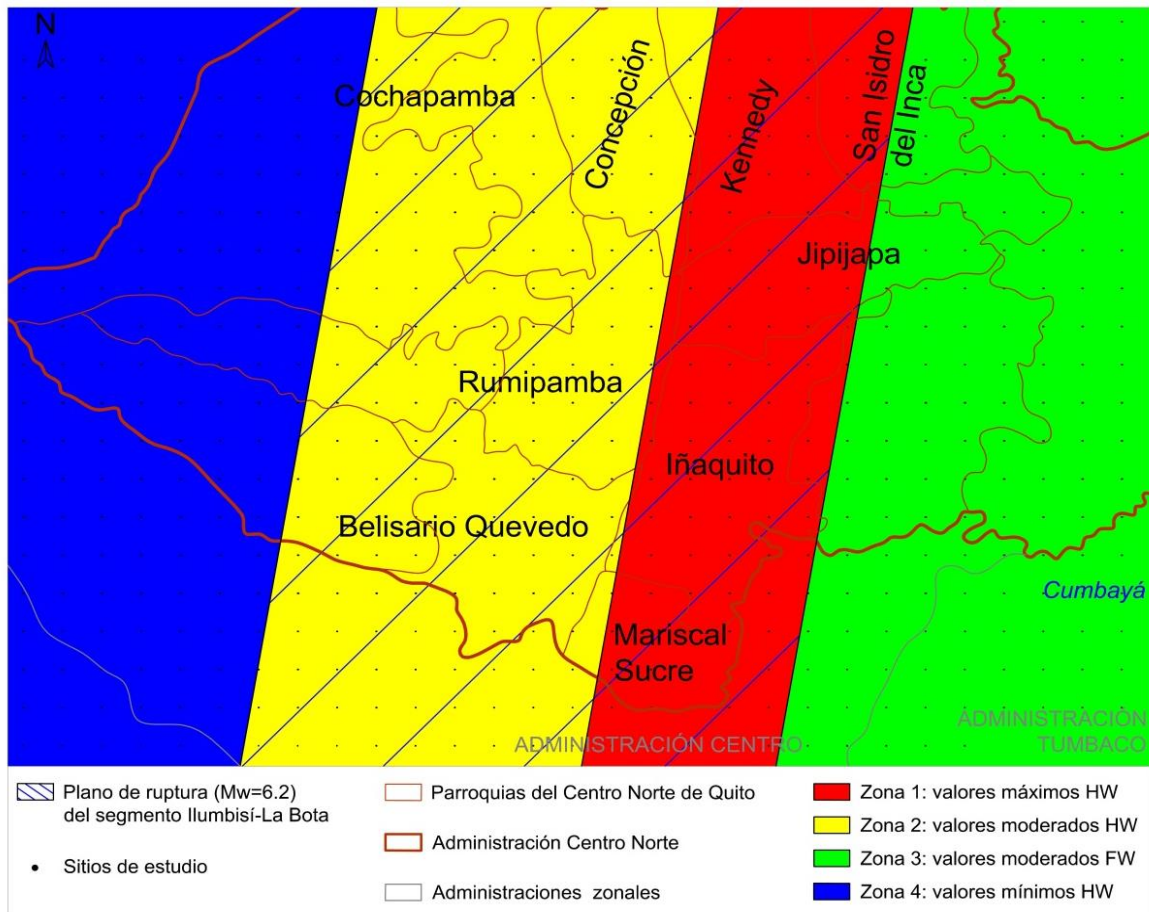


Figura 10 Microzonificación del Centro Norte de Quito

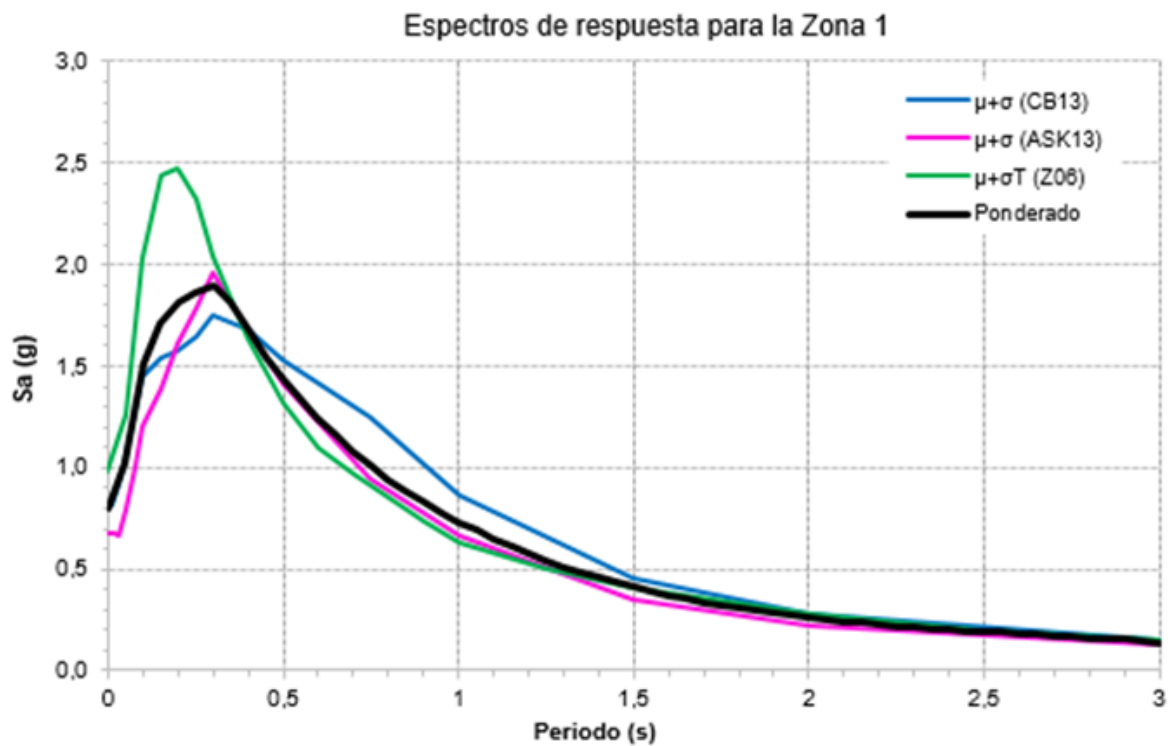


Figura 11 Espectros encontrados para la Zona 1 con los modelos de C & B (2013), ASK (2013), Z (2013) y espectro ponderado.

Espectros de respuesta para la Zona 2

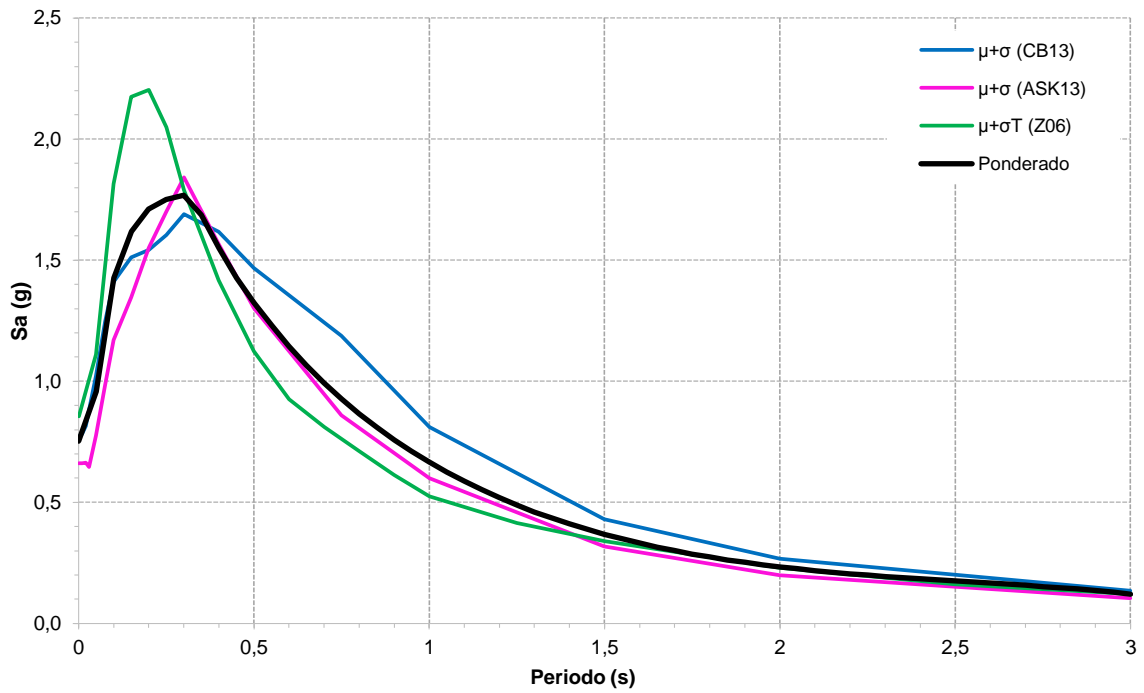


Figura 12 Espectros encontrados para la Zona 2 con los modelos de C & B (2013), ASK (2013), Z (2013) y espectro ponderado.

Espectros de respuesta para la Zona 3

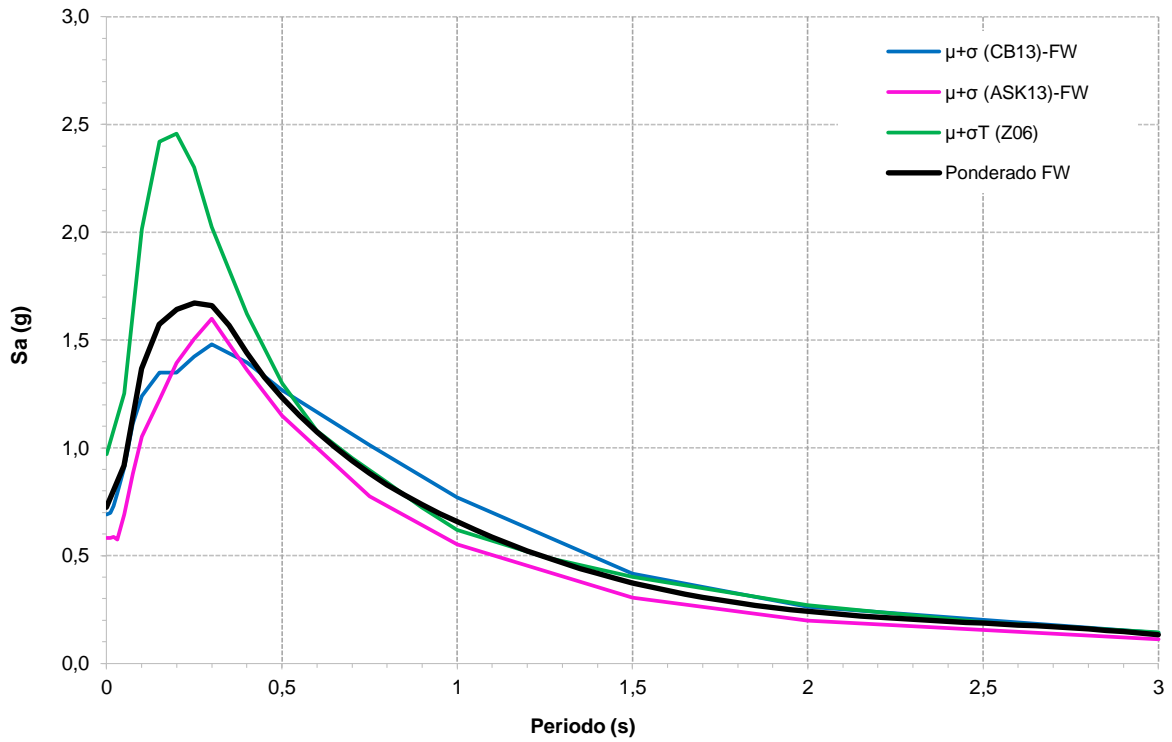


Figura 13 Espectros encontrados para la Zona 3 con los modelos de C & B (2013), ASK (2013), Z (2013) y espectro ponderado.

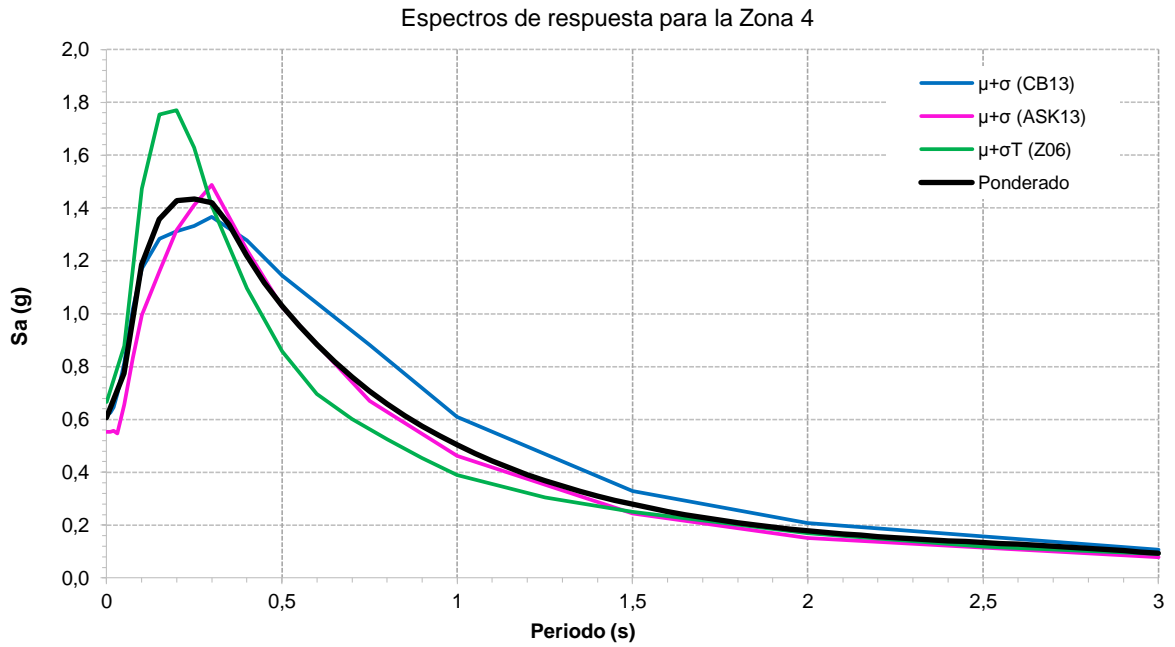


Figura 14 Espectros encontrados para la **Zona 4** con los modelos de C & B (2013), ASK (2013), Z (2013) y espectro ponderado.

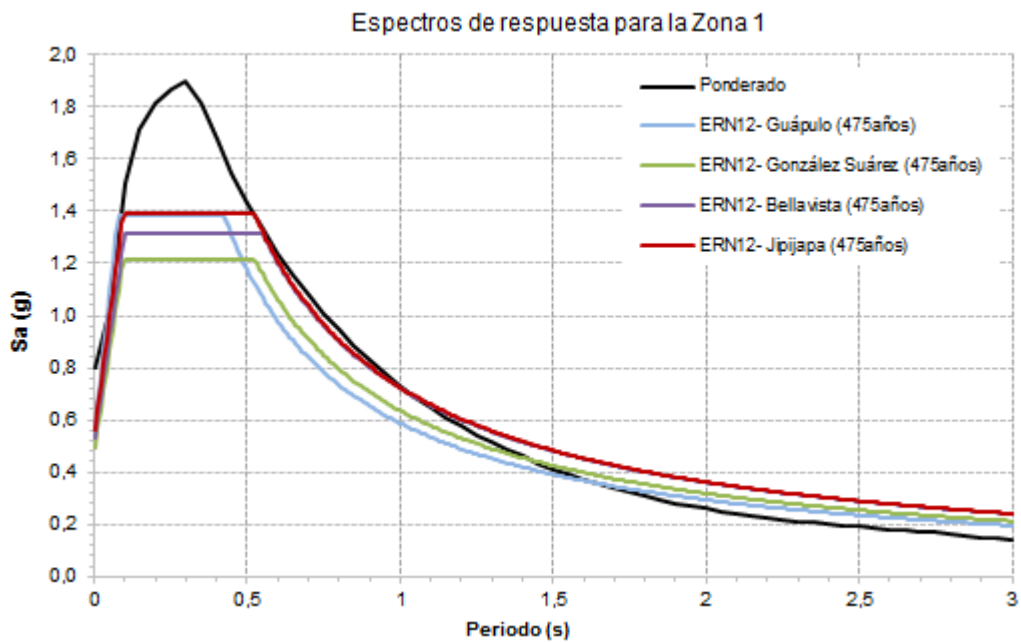


Figura 15 Espectro ponderado encontrado en el estudio para la **Zona 1** y los Espectros que se hallan al aplicar los factores de sitio de la Microzonificación sísmica de Quito. (ERN-12)

Espectros de respuesta para la Zona 2

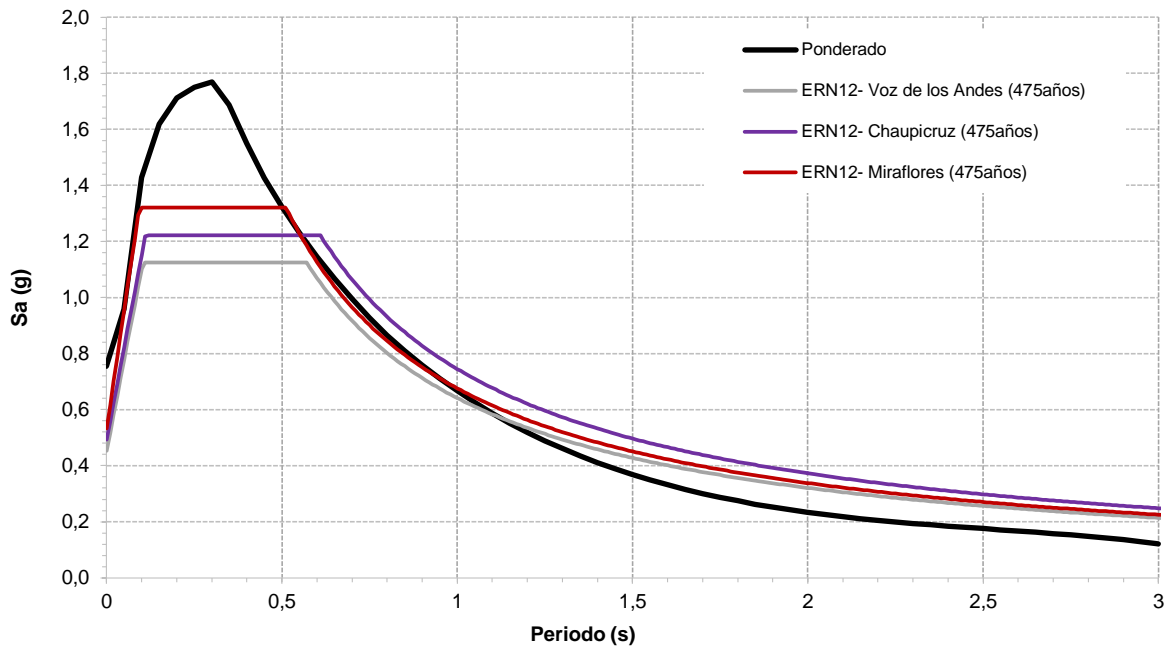


Figura 16 Espectro ponderado encontrado en el estudio para la Zona 2 y los Espectros que se hallan al aplicar los factores de sitio de la Microzonificación sísmica de Quito. (ERN-12)

Espectros de respuesta para la Zona 3

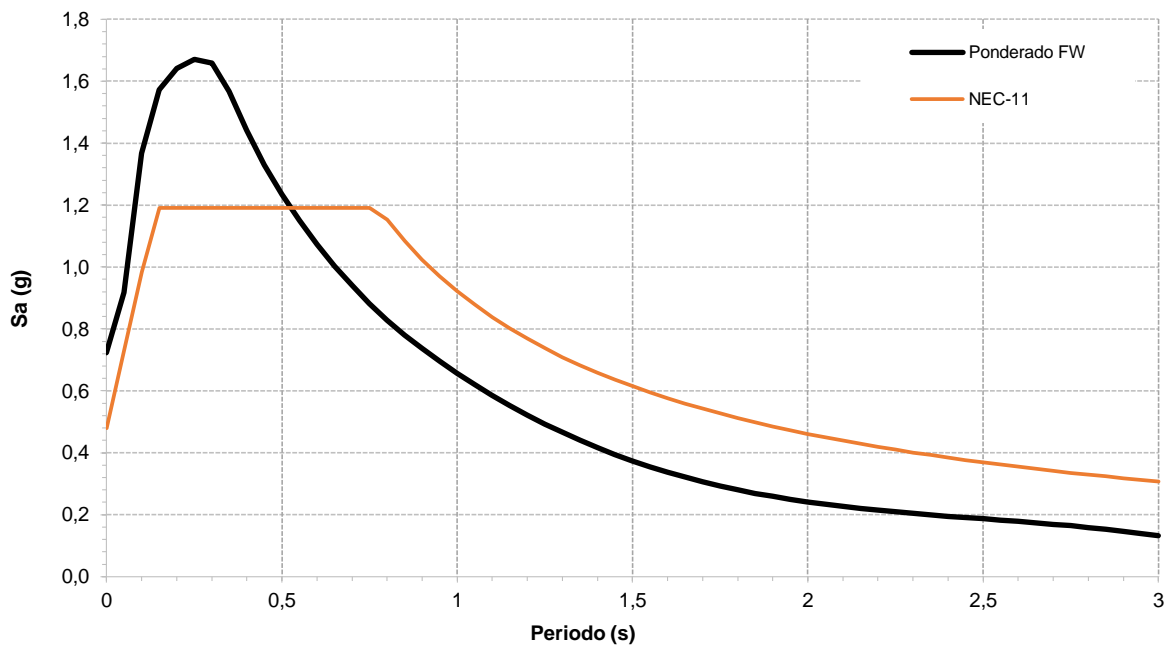


Figura 17 Espectro ponderado encontrado en el estudio para la Zona 3 y los Espectros que se hallan al aplicar los factores de sitio de la Microzonificación sísmica de Quito. (ERN-12)

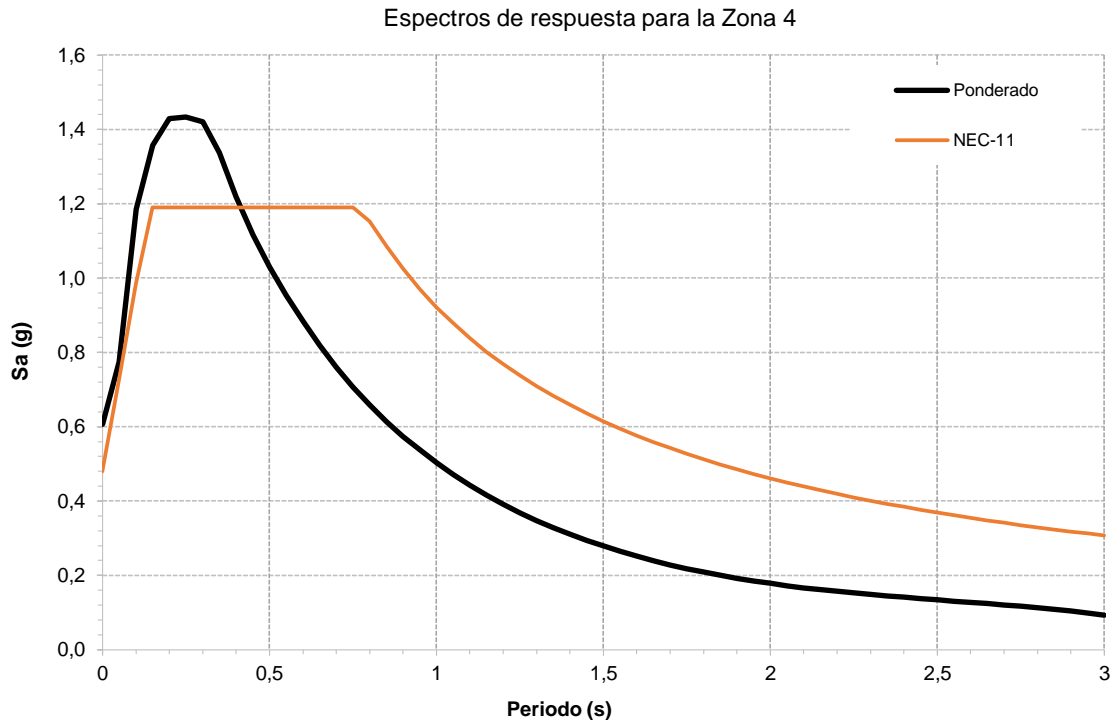


Figura 18 Espectro ponderado encontrado en el estudio para la **Zona 4** y los Espectros que se hallan al aplicar los factores de sitio de la Microzonificación sísmica de Quito. (ERN-12)

7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se inició el artículo presentando los espectros de respuesta elástica hallados con los registros del sismo de Nueva Zelanda del 22 de febrero de 2011 y que tuvo una magnitud de 6.2. Este sismo está asociado a una falla ciega sobre la que se encuentra la ciudad de Christchurch y la profundidad focal fue de 5 km. Las ordenadas espectrales de este sismo en la zona de períodos cortos sobrepasan a las estipuladas en la normativa sísmica de NSZ de 2004.

Posteriormente, en una fotografía de la ciudad de Quito, se indican los segmentos de fallas de Puengasí al Sur y de Ilumbisí-La Bota en el Centro Norte, para ver que buena parte de la ciudad se encuentra sobre el complejo sistema de fallas ciegas de Quito y que tiene un gran peligro sísmico toda vez que en 1587 se registró un sismo de magnitud 6.4 que puede volver a repetirse en un futuro, razón por la cual es necesario encontrar espectros de respuesta asociados a cada uno de los segmentos de las fallas ciegas de Quito.

En el presente estudio se encontró espectros para el Centro Norte de Quito, teniendo como fuente sísmica el segmento de Ilumbisí-La Bota que puede generar un sismo de 6.2 de magnitud y con foco superficial que está alrededor de los 10 km. Se determinó los espectros aplicando tres modelos de movimientos fuertes y son los desarrollados por Campbell y Borzognia (2013); Abrahamsom, Silva y Kamai (2013) y el de Zhao *et al.* (2006).

Del estudio realizado para el Centro Norte de Quito se definieron cuatro zonas y para cada una de ellas se determinó un espectro de respuesta, el mismo que es mayor al que se halla con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 o al que se obtiene con los factores de sitio hallados en el estudio de Microzonificación Sísmica de Quito ERN-12, es mayor únicamente en la zona de períodos cortos, menor a 0.5 seg.

Por lo tanto para la zona de períodos cortos (períodos menores a 0.5 s.) los espectros de diseño elástico que se hallan con el NEC-11 o ERN-12 para el Centro Norte de Quito, subestiman la peligrosidad sísmica.

REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Silva W., Kamai R. (2013), *Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 143 p.
2. Aguiar, R. (2013). *Microzonificación Sísmica de Quito*. Primera Edición. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Ecuador, 212 p., Quito.
3. Aguiar R., Rivas A., Benito M., Gaspar J., Trujillo S., Arciniegas S., Villalba P., Parra H. (2014), "Aceleraciones registradas y calculadas del sismo del 12 de agosto de 2014 en Quito". *Revista Ciencia*, **16 (2)**, 139-1153.
4. Alvarado A., Audin L., Nocquet M., Lagreulet S., Segovia M., Font Y., Lamarque G., Yepes H., Mothes P., Rolandone F., Jarrín P., and Quidelleur X., (2014), "Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity", *Tectonics, AGUPLICATIONS*, 17 p., Article online.
5. Ancheta T., Darragh R., Stewart J., Seyhan E., Silva W., Chiou B., Wooddell K., Graves R., Kottke A., Boore D., Kishida T., Donahue J., (2013), *PEER NGA-West2 Database. Report PEER 2013/03*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
6. Beauval C., Yepes H., Bakun W., Egred J., Alvarado A., and Singaicho, J. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International* **181**, 1613-1633.
7. Bozorgnia, Y., Abrahamson, N., Al Atick, L., Ancheta, T., Atkinson, G., Baker, J., Rezaeian. (2014). *NGA-West2 Research Project*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
8. BSSC. (2003). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)*. Washington D.C: National Institute of Building Sciences.
9. 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.
10. Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), *NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging fro 0.01 to 10 sec*, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER*, 75 p.
11. Elwood, K. (2013). *Performance of concrete buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake and implications for Canadian codes*. *Canadian Journal of Civil Engineering* 40, 759-776.
12. 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.
13. Kamai R., Abrahamson N., Silva W. (2013), *Nonlinear horizontal site response for the NGA-West2 project. Report PEER 2013/12*, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER*.
14. Kam, W.Y., Pampanin, S. (2011). *The seismic performance of RC buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake*. *Structural Concrete* **12 (4)**, 223-233.

15. Leonard M., (2010), "Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100 (SA)**, 1971-1988.
16. NZS. (2004). *Structural design actions, Part 5: earthquake actions New Zealand*. NZS 1170.5, Standards New Zealand, Wellington, N.Z.. 82 p.
17. Peñafiel L., (2009), *Geología y análisis del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del sur de Quito*, Tesis de grado para obtener el título d Ingeniera Geóloga. Escuela Politécnica Nacional, 169 p., Quito.
18. Wesnousky S., (1986), *Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazard in California*, J. Geophys. Res., **91 (B12)**, 12587-12631.
19. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K., Thio H., Somerville P., Fukushima Y., and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96 (3)**, 898-913.