

METHODOLOGY TO ASSESS THE SEISMIC HAZARD OF THE URBAN AND RURAL AREA TO AMBATO CITY IN A DETERMINISTIC WAY

Roberto Aguiar ^(1,2), Paola Serrano ⁽³⁾

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

⁽²⁾ Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

⁽³⁾ Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. pcserrano@espe.edu.ec

Received: May 2020. Accepted: November 2020. Published: December 2020

ABSTRACT

The seismic microzonation of the urban area of Ambato, was made in 2018, in a probabilistic and a deterministic way. This last form of calculation is the one presented in the first part of the article; for this purpose, 3 geological faults and 3 strong motion equations were considered.

Therefore, thinking of incorporating the rural area than is approximately four times than the urban area, 4 more geological faults and 3 new attenuation models have been incorporated. In such a way that the Methodology of calculation of the seismic hazard in a deterministic way of the urban and rural area of Ambato considers 7 geological faults and 6 strong motion equations. It is a preliminary work that has the character of an exploratory since it requires studies of geophysics, geotechnics, and geology in rural areas.

Keywords: Seismic hazard in a deterministic way, Strong motion equations, Control spectra, Horizontal component

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ÁREA URBANA Y RURAL DE LA CIUDAD DE AMBATO EN FORMA DETERMINÍSTICA

RESUMEN

La microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato fue realizada en 2018, en forma probabilística y en forma determinística. Esta última forma de cálculo es la que se presenta en la primera parte del artículo; para el efecto se consideraron 3 fallas geológicas y 3 ecuaciones de movimientos fuertes.

Por lo tanto, pensando en incorporar el área rural que aproximadamente es cuatro veces el área urbana, se han incorporado 4 fallas geológicas más y 3 nuevos modelos de atenuación. De tal manera que la Metodología de cálculo de la peligrosidad sísmica en forma determinística del área urbana y rural de Ambato considera 7 fallas geológicas y 6 ecuaciones de movimientos fuertes. Es un trabajo preliminar que tiene el carácter de exploratorio ya que hacen falta estudios de geofísica, geotécnica y geológicos en el área rural.

Palabras Claves: Peligrosidad sísmica en forma determinística. Ecuaciones de movimientos fuertes, espectros de control, componente horizontal

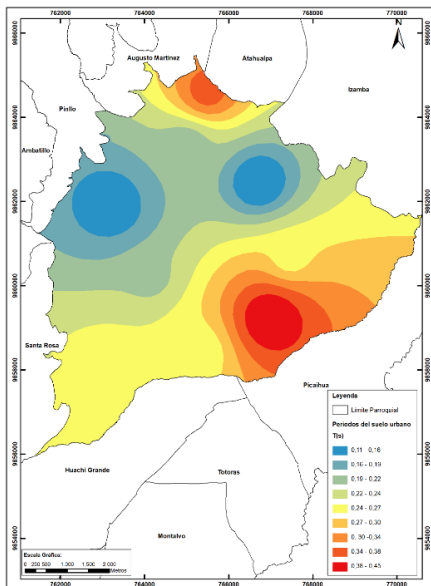
1. INTRODUCCIÓN

La mejor forma de mitigación de los desastres naturales es proporcionar al Proyectista Estructural información confiable sobre los espectros que debe considerar en el diseño sísmico de las estructuras, la misma que sea obtenida en base a la mejor información: geológica y sísmica existente a la fecha (2020). Un factor fundamental es que en los *modelos de atenuación de los movimientos del suelo* también conocidos como *ecuaciones de movimientos fuertes* estén más apegados al entorno en el cual se halla la ciudad de Ambato, como el ambiente tectónico sea similar al sitio de estudio o el rango de aplicabilidad el modelo sea lo suficientemente amplio.

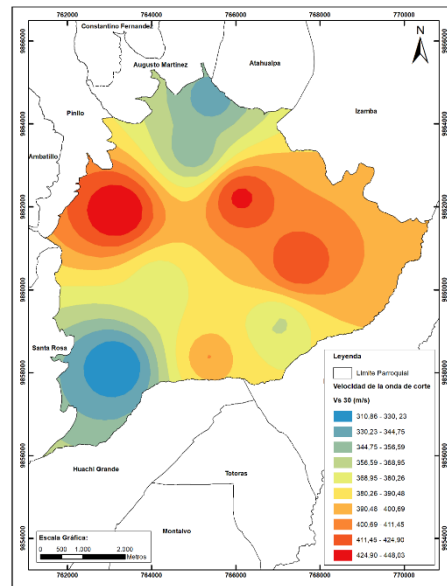
En este contexto, se debe manifestar que Ambato, se encuentra cerca de los volcanes Tungurahua y Cotopaxi. Por lo tanto, se debe utilizar un modelo de atenuación de movimiento del suelo, que tome en cuenta esta variable. La mayor parte de modelos existentes, no toman en cuenta la presencia de los volcanes, en el cálculo de la ley de atenuación o de los espectros de respuesta.

Un modelo que si considera la presencia de los volcanes en el estudio de peligrosidad sísmica es el de Zhao *et al.* (2016) que será considerado en el estudio para determinar espectros ante la componente horizontal de movimiento del suelo.

Pero no se debe pensar que los estudios de peligrosidad sísmica van a servir únicamente a las nuevas construcciones, nada más falso, los estudios sirven fundamentalmente para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras existentes.



(a)



(b)

Figura 1 Estudios de Peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato; a) Períodos de vibración del suelo; b) Velocidad de la onda de corte en los 30 primeros metros. Fuente: Bonifaz y Haro (2018).

Con esta introducción a continuación se indica el estado del arte sobre peligrosidad sísmica, **en el área urbana** de la ciudad de Ambato y para ello se debe indicar los trabajos realizados por Aguiar y Rivas (2018), destacando que estos fueron respaldados por una serie de estudios que se indican a continuación y cuyo detalle de cálculo están inmersos en la referencia indicada.

En la figura 1 a, se muestra las curvas de igual período de vibración del suelo, destacando que estos varían desde 0.1 s, hasta 0.45 s., por lo que, desde el punto de vista estructural, son buenos suelos. Para que se entienda mejor se debe indicar que en la ciudad de Guayaquil los períodos de vibración del suelo llegan a 4 segundos, donde la amplificación de las ondas sísmicas será considerable.

En la figura 1 b, se muestran las curvas con igual velocidad de la onda de corte en los primeros 30 metros V_{s30} , que varían entre 300 y 450 m/s, que se pueden catalogar como buenos suelos. Se debe indicar que existen puntos muy localizados donde V_{s30} es muy bajo que corresponden a rellenos de quebradas, pero no son representativos, con respecto al área de la ciudad de Ambato, por lo que no se ha colocado un valor menor de V_{s30} .

Para poder clasificar los perfiles de suelo sísmico de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 se necesita conocer otras variables, la principal el número de golpes del ensayo de penetración estándar N_{60} , los mismos que fueron realizados por AOC Ingeniería (2018); se determinó también el esfuerzo de corte del suelo, el ángulo de fricción interna, la cohesión de los suelos y las propiedades mecánicas del suelo. En base a toda esa información y a la indicada en la figura 1, se obtuvo la clasificación de los suelos que se presenta en la figura 2.

Con los periodos de vibración, encontrados en la ciudad de Ambato se ha elaborado curvas que tienen igual periodo, presentadas en la figura 1a. La mayor parte de la ciudad tiene periodos del suelo inferior a 0.27 segundos, además se presenta que todos los suelos tienen velocidades V_{s30} , mayores a 300 m/s, lo que significa desde el punto de vista de la ingeniería sísmica que se trata de suelos buenos.

Con el fin de analizar la zona rural de la provincia se clasifico a los suelos tipo "C", y suelo tipo "D" para determinar los espectros de control, mediante un estudio de peligrosidad sísmica Determinístico; para el efecto en cada perfil de suelo, se construyó una malla de puntos equidistantes cada 500 metros y se clasificó de acuerdo al tipo de suelo, se halló espectros en cada punto, se considera que una de las tres fallas genera un sismo de magnitud máxima, se analizan sus valores y se analiza que falla genera las mayores ordenadas espectrales, determinando espectros promedios en cada perfil de suelo.

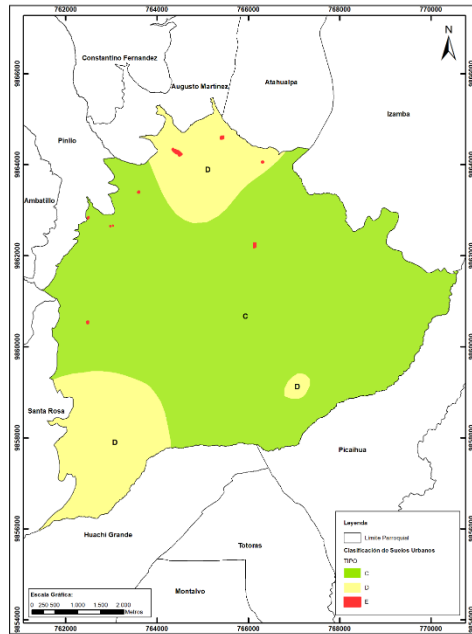


Figura 2 Clasificación de los suelos de la ciudad de Ambato desde el punto de vista de la Peligrosidad Sísmica. Fuente: Aguiar y Rivas (2018).

2. SELECCIÓN DE FALLAS ACTIVAS

Existen dos metodologías para evaluar la peligrosidad sísmica de una región, la una denominada **probabilística** en que se trabajan con zonas fuentes y la otra llamada **determinística** en que se trabaja con cierto número de fallas geológicas. En este trabajo, el cálculo de la peligrosidad sísmica se lo hace en forma determinística utilizando para el efecto las fallas corticales.

Se decidió trabajar con las fallas corticales, a la vista de los resultados encontrados en la desagregación de la peligrosidad sísmica para la ciudad de Ambato que se presenta en la figura 3, para el PGA y para un período de 1 s., para un período de retorno PR de 475 años, en la cual se observa que para el PGA son importantes las fallas corticales y son más importantes aún para otros períodos de vibración.

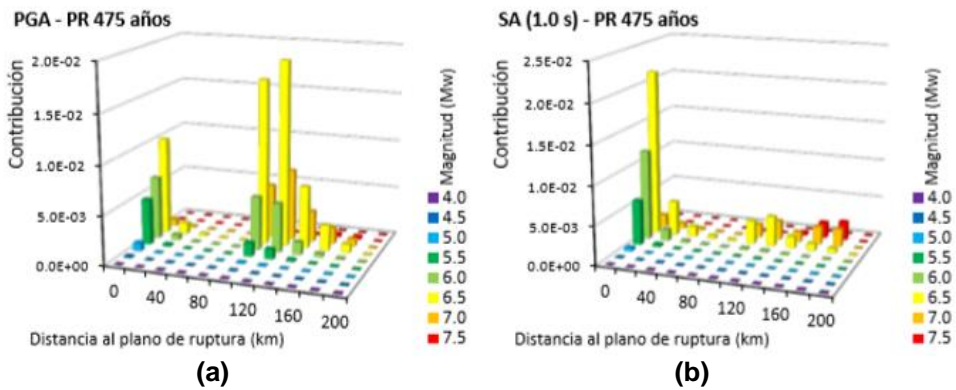


Figura 3 Resultados de la desagregación de la Peligrosidad Sísmica para la ciudad de Ambato, para un período de retorno PR de 475 años; a) Valores para el PGA; b) Valores para un período de 1 s. Fuente: Aguiar y Rivas (2018).

Al observar la figura 3 a, se podría pensar en considerar también los sismos de subducción (Interfase) ya que la contribución inclusive es mayor que la proveniente de sismos corticales, pero para períodos diferentes de cero como el mostrado en la figura 3 b, la contribución notable al cálculo de la peligrosidad sísmica de Ambato viene dada por sismos corticales; este comportamiento se repite para otros períodos y para PR de 975 y 2475 años. Por esto se decidió trabajar con sismos asociados a fallas geológicas locales, ya que estos van a causar más daño en las estructuras, por estar más próximos a las fallas.

En la actualidad, los análisis de peligro sísmico, tanto probabilístico como deterministas, requieren una evaluación del potencial de movimiento de origen tectónico futuro en la región ya que es cada vez más frecuente la inclusión de un modelo de fallas activas. Seleccionando todas las fuentes que pueden generar futuros sismos.

El hecho de conocer directamente las fallas como fuentes sísmicas, permite incorporar nuevos parámetros al cálculo probabilista de la peligrosidad, como los mecanismos focales, geometría del plano de ruptura, tasas de deslizamiento, periodos de recurrencia, etc. Se analizará más adelante

De acuerdo con los principios geológicos que se están desarrollando, el planteamiento que se sigue al modelizar las fallas como fuentes sísmicas independientes, en lugar de utilizar zonas sismogénicas, incide en dos aspectos: El cambio de la geometría de la fuente sísmica es decir las fallas entran en el cálculo como elementos independientes, ya sea como áreas que define el plano de falla o como líneas que definen la traza de la falla proyectada en la superficie y en segundo lugar el cambio de la fuente de información para caracterizar el potencial sísmico, la caracterización del potencial sísmico se efectúa a través de la tasa de ocurrencia de sismos $\dot{N}(m)$ y la proporción de estos en función de su tamaño β , por lo que la fuente básica es el catálogo sísmico, en el caso de las fallas los parámetros que caracterizan el potencial sísmico son difícilmente extraíbles del catálogo sísmico para cada falla individual y se derivan de las características físicas de la falla. (Rivas, 2014)

Al considerarse una falla como fuente sísmica activa e independiente, se modeliza el plano de la falla en el que se asume que se produce la ruptura, sabiendo que se generaran superficies irregulares de ruptura, al no poseer de forma precisa los datos geométricos de la falla de manera general se utiliza un plano rectangular. Los parámetros geométricos que se utilizan para tal modelización se muestran en la figura 4.

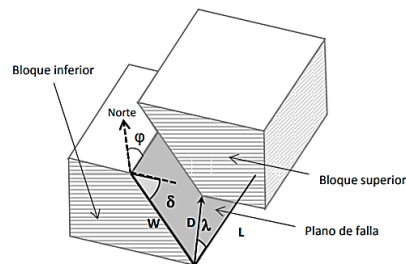


Figura 4 Geometría y parámetros de la falla. Fuente: Rivas (2014).

Donde: L es el largo de la falla; W es el ancho; D es el desplazamiento co-sísmico; θ el azimut que varía entre 0 y 360° ; δ el ángulo de buzamiento que varía entre 0 y 90° , también conocido como *dip*; λ es el vector de deslizamiento que se encuentra entre 0 y 90°

La ciudad de Ambato ubicada en la provincia de Tungurahua, en una zona volcánica y sísmicamente activa, para esto vasta ver la figura 5, en que se presentan las fallas geológicas que atraviesan o están muy cerca de área urbana y rural de la ciudad de Ambato, con círculo negro se indican las fallas capaces que pueden generar sismos de magnitud ≥ 6 y con círculo rojo las que pueden producir un sismo de magnitud ≥ 6.5 . De estas, tres son las más preocupantes (para evaluar la peligrosidad sísmica en el área urbana) y son las mostradas en la figura 6; son las fallas de: Ambato, Huachi y Totora. Ahora, para evaluar la peligrosidad sísmica en el área urbana y rural de la ciudad de Ambato, se debe considerar las 7 fallas que están indicadas en la figura 7

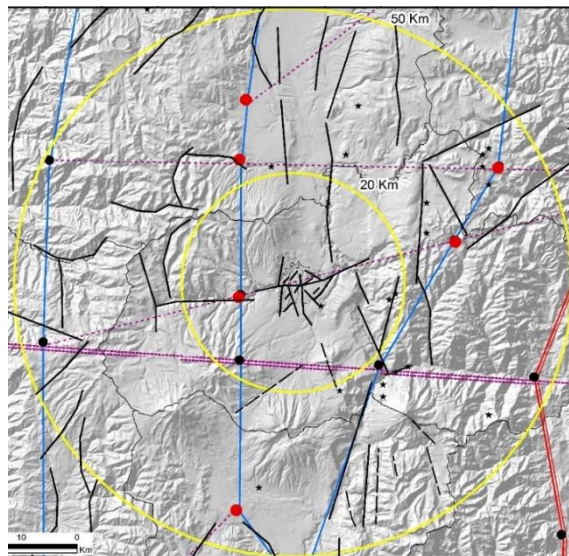


Figura 5 Fallas geológicas en radios de 20 y 50 km, que pueden afectar al área urbana y rural de la ciudad de Ambato. Los nudos capaces de generar terremotos con $M \geq 6$ son indicados con el círculo negro, mientras que los nudos capaces de generar terremotos con $M \geq 6.5$ son indicados con el círculo rojo. Fuente: Chunga y Mulas (2018)

El área rural de la ciudad de Ambato es por lo menos unas cuatro veces que el área urbana, por este motivo no se puede evaluar la peligrosidad sísmica solo con las fallas mostradas en la figura 6. Esas están muy bien para solo el área urbana (Aguiar y Rivas, 2018).

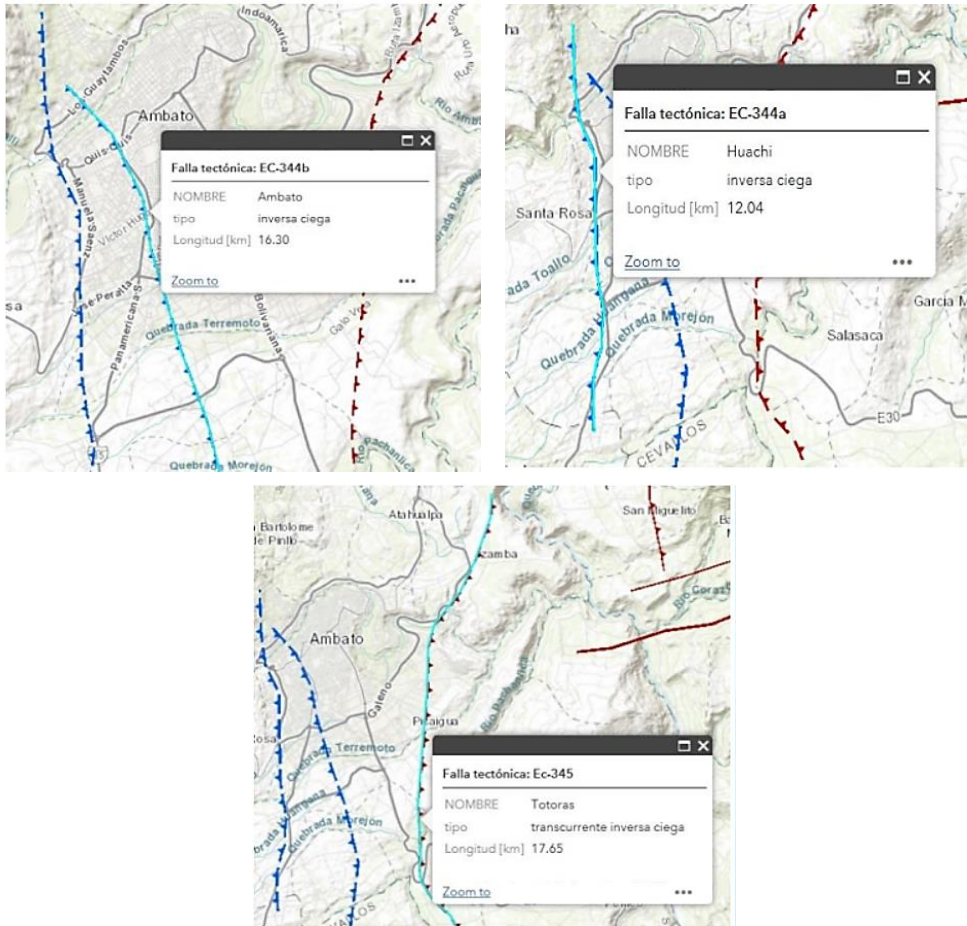


Figura 6 Fallas geológicas seleccionadas en el estudio de peligrosidad sísmica del área urbana de Ambato. Fuente: Chunga y Mulas (2018); Eguez (2003).

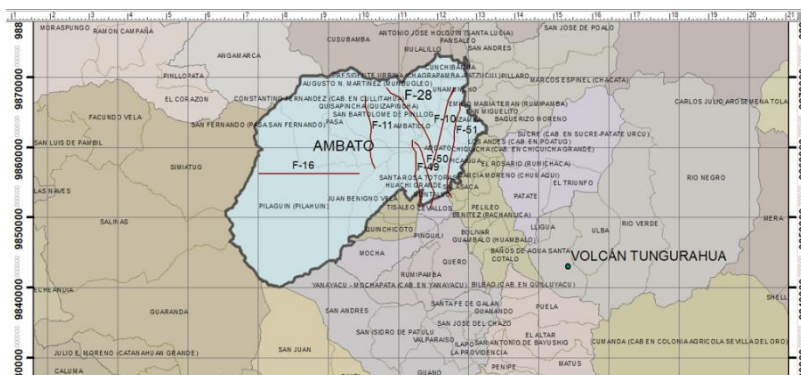


Figura 7 Fallas geológicas seleccionadas en el estudio para evaluar la peligrosidad sísmica del área urbana y rural de Ambato.

A más de los resultados encontrados en la desagregación de la peligrosidad sísmica (figura 3) vale la pena recordar que el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 ($M=7.8$) en la ciudad de Ambato fue sentido como un sismo de baja intensidad que no causó daño en las estructuras. En cambio, si se registra un sismo de magnitud 6, en una de las fallas ciegas de la ciudad, el daño será cuantioso.

En la tabla 1, se presentan las fallas que van a considerarse en el Método Determinístico para hallar los espectros ante la componente horizontal de movimiento del suelo. Ahí se indica la magnitud máxima esperada en cada falla hallada con las ecuaciones (1) y (2) propuestas por Leonard (2010) y la ecuación (3) de Wells & Coppersmith (1994); para calcular la magnitud se ha utilizado como parámetro el área (A) y la longitud de rotura en la superficie de la falla (L). Se encontró la magnitud con cada una de las ecuaciones, se obtuvo un promedio y se redondeó al valor inmediatamente superior.

$$M_w = 1.52 \log(L) + 4.4 \quad (1)$$

$$M_w = 1.0 \log(A) + 4.0 \quad (2)$$

$$M_w = 1.22 \log(L) + 5.0 \quad (3)$$

Tabla 1 Parámetros de las Fallas ciegas que atraviesan el área urbana y rural de la ciudad de Ambato.

FALLA	δ	λ	M	L (Km)	A (Km ²)	W (Km)	TIPO
Ambato	45	90	6.5	16.3	97.80	6	Inversa Ciega
Huachi	45	90	6.3	12.04	72.24	6	Inversa Ciega
Totoras	45	90	6.5	17.65	105.90	6	Transcurrentes Inversa Ciega
F-10	45	90	6.1	15.0	120	8	Inversa
F11	45	90	6.6	11.0	99	9	Inversa
F-16	85	5	6.2	18.0	144	8	Cizalla Dextral
F-28	45	90	6.0	13.0	91	7	Normal

3. CÁLCULO DEL PERÍODO DE RECURRENCIA

Ahora bien, interesa conocer el período de recurrencia de estos sismos de magnitud máxima y para ello se tienen dos formas, a saber: i) Método del Terremoto Característico; ii) Método de Gutenberg y Richter modificado, los mismos que se exponen a continuación.

3.1 Método del Terremoto Característico

El modelo de terremoto característico (TC) supone que en la falla solamente se producen rupturas completas de todo el plano de falla o segmento, por tanto, la falla solo rompe en forma de sismos de la misma magnitud, siendo esta la magnitud máxima. El modelo TC es un modelo simple que iguala el momento sísmico

acumulado en la falla durante un tiempo de recurrencia al momento sísmico liberado en el máximo terremoto de la falla. (Rivas, 2014)

Por medio de la expresión de Hanks y Kanamori (1979), se puede establecer una relación entre el momento sísmico y la magnitud máxima de dicho terremoto expresada en magnitud momento M_w , la cual permite conocer la magnitud máxima que se espera en la fuente y la energía que se libera en el terremoto.

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7 \quad \rightarrow M_0 = 10^{\frac{(M_w + 10.7)3}{2}} \quad (4)$$

Haciendo una suposición de que en todo el plano de falla se está acumulando energía uniformemente, la tasa de momento sísmico \dot{M}_0 que se acumula en la falla está relacionada con la tasa de deslizamiento anual de la falla \dot{u} según la ecuación de Brune (1968).

$$\dot{M}_0 = \mu \dot{u} A \quad (5)$$

Donde μ es el módulo de rigidez o de cizalla ($\mu \approx 3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$), \dot{u} es la tasa de deslizamiento y A es el área del plano de falla.

El modelo TC es un modelo totalmente periódico, en el que la energía acumulada es igual a la energía liberada en el TC. Por lo tanto, conociendo el M_0 que se liberaría en el terremoto y la tasa de acumulación anual de momento sísmico de la falla \dot{M}_0 , se puede conocer el período de recurrencia T_r , es decir el tiempo que transcurre entre dos eventos característicos con la siguiente ecuación.

$$T_r = \frac{M_0}{\dot{M}_0} \quad (6)$$

En la tabla 2 se presenta el Período de Recurrencia hallado con el modelo del Terremoto Característico, para las fallas que se han indicado en la tabla 1 y figura 7, trabajando con una tasa de movimiento de 3.5 mm/año y un módulo de deformación en roca de $3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$.

Tabla 2 Períodos de recurrencia encontrados con el Método del Terremoto Característico para las fallas consideradas en el estudio.

Falla	M_0 (Dyn*cm)	M_0 (N*m)	$A=L*w$ (m^2)	\dot{M}_0 (kgf m/año)	\dot{M}_0 (N m /año)	T_r (años)
Huachi	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$72.24*10^6$	$7.585*10^{15}$	$7.585*10^{16}$	425.1
Ambato	$6.3*10^{25}$	$6.3*10^{18}$	$97.8*10^6$	$1.027*10^{15}$	$1.027*10^{16}$	626.5
Totora	$6.3*10^{25}$	$6.3*10^{18}$	$105.9*10^6$	$1.112*10^{15}$	$1.112*10^{16}$	578.6
F10	$4.47*10^{25}$	$4.47*10^{18}$	$120*10^6$	$1.260*10^{15}$	$1.260*10^{16}$	361.5
F11	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$99*10^6$	$1.040*10^{15}$	$1.040*10^{16}$	310.2
F16	$6.31*10^{25}$	$6.31*10^{18}$	$144*10^6$	$1.512*10^{15}$	$1.512*10^{16}$	425.5
F28	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$91*10^6$	$9.555*10^{15}$	$9.555*10^{16}$	337.4

3.2 Modelo de Gutenberg y Richter modificado

Con el propósito de determinar períodos de recurrencia, para una falla geológica, otros autores contemplan a la utilización de otros modelos como es el de Gutenberg y Richter modificado, la cual establece una proporción constante entre el número de sismos grandes y pequeños para una zona y en un periodo, con la posibilidad de que **la falla produzca terremotos de diferente magnitud con periodos de ocurrencia diferentes.**

Siendo formulada por Charles Francis Richter y Beno Gutenberg en 1944 y modificadas por Consentino *et al.* (1977), en la cual se integró parámetros como; la tasa acumulada de sismos ($\dot{N}_{(m)}$), la tasa acumulada de sismos de magnitud mayor o igual a M_{min} ($\dot{N}_{M_{min}}$), mostrada en la siguiente ecuación:

$$\dot{N}_{(m)} = \dot{N}_{M_{min}} * \left[\frac{e^{-\beta(m)} - e^{-\beta(M_{max})}}{e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})}} \right] \quad (7)$$

$$\dot{N}_{M_{min}} = \frac{\dot{M}_0 (\bar{d} - \beta) (e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})}{\beta [e^{-\beta M_{max}} M_0(M_{max}) - e^{-\beta M_{min}} M_0(M_{min})]} \quad (8)$$

$$M_0(M_{min}) = e^{(\bar{c} + \bar{d} M_{min})} \quad M_0(M_{max}) = e^{(\bar{c} + \bar{d} M_{max})} \quad (9)$$

$$\bar{c} = 16.05 * \ln(10) \quad \bar{d} = 1.5 * \ln(10) \quad (10)$$

La tasa acumulada de momento sísmico será liberada por medio de sismos de diferente magnitud, las cuales varían desde una magnitud mínima M_{min} , hasta una magnitud máxima M_{max} , la cual viene definida por el tamaño del plano de falla. Aguiar *et al.* (2015).

Las fallas indicadas en la figura 7, se encuentran en la zona fuente 6, conocida como *Falla de Pallatanga*, del modelo de Beauval *et al.* (2018). Se hace referencia a este trabajo ya que se va a trabajar con los parámetros de sismicidad $a = 2.8012$; $b = 0.73$, del modelo clásico de Gutenberg y Richter $\log N = a - b M$. Los valores anotados fueron hallados para la zona fuente 6.

Tabla 3 Período de recurrencia, hallada con el modelo de GR modificado en la falla Ambato.

m	TASA ANUAL ACUMULADA $\dot{N}_{(m)}$	TASA ANUAL NO ACUMULADA $\hat{N}_{(m)}$	PERÍODO DE RECURRENCIA
4.5	0.0490	0.0289	34.65
5.0	0.0201	0.0125	80.31
5.5	0.0077	0.0054	186.11
6.0	0.0023	0.0023	431.28
6.5	0.0000	0.0001	676.45

En la tabla 3, se presenta el cálculo del período de recurrencia, en la falla Ambato y a continuación se describe su contenido, para entender la forma de cálculo. En la primera columna se presenta la magnitud (m) considerada; en la segunda columna la tasa anual acumulada $\dot{N}(m)$ de sismos mayor a la magnitud (m); en la tercera columna, la tasa anual $\hat{N}(m)$ no acumulada de sismos que se obtiene restando la tasa anual acumulada de dos magnitudes consecutivas, finalmente se tiene el período de recurrencia que no es más que la inversa de la tasa anual no acumulada.

Tabla 4 Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas de Huachi y Totora.

Falla de Huachi				Falla de Totoras			
m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r	m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r
4.5	0.0510	0.0305	32.82	4.5	0.0530	0.0312	32.04
5.0	0.0205	0.0131	76.05	5.0	0.0218	0.0135	74.25
5.5	0.0074	0.0057	176.24	5.5	0.0083	0.0058	172.06
6.0	0.0017	0.0017	276.43	6.0	0.0025	0.0025	398.73
6.3	0.0000	0.0000	336.54	6.5	0.0000	0.0000	625.40

Tabla 5 Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F10 y F11.

Falla F10				Falla F11			
m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r	m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r
4.5	0.0720	0.0427	23.43	4.5	0.0700	0.0418	23.91
5.0	0.0293	0.0184	54.30	5.0	0.0282	0.0180	55.41
5.5	0.0109	0.0079	125.82	5.5	0.0101	0.0078	128.40
6.0	0.0030	0.0030	338.63	6.0	0.0023	0.0023	201.40
6.4	0.0000	0.0000	551.44	6.3	0.0000	0.0000	274.40

Tabla 6 Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F16 y F28.

Falla F16				Falla F28			
m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r	m	$\dot{N}(m)$	$\hat{N}(m)$	T_r
4.5	0.0720	0.0424	23.58	4.5	0.0650	0.0388	25.75
5.0	0.0296	0.0183	54.65	5.0	0.0262	0.0168	59.67
5.5	0.0113	0.0079	126.66	5.5	0.0094	0.0072	138.28
6.0	0.0034	0.0034	293.51	6.0	0.0022	0.0022	216.89
6.5	0.0000	0.0000	460.37	6.3	0.0000	0.0000	295.50

En las tablas 4 a 6 se presenta el período de retorno para las otras 6 fallas. El período de recurrencia para tener un sismo con magnitud máxima en alguna de

las fallas que pueden afectar al área urbana y rural de Ambato varía entre 274 y 676 años.

4. ECUACIONES DE MOVIMIENTOS FUERTES

Las ecuaciones de predicción de movimientos fuertes, en español o **Ground Motion Prediction Equations** GMPEs, son fundamentales para la realización de estudios de peligrosidad sísmica, es así que día a día aparecen nuevas contribuciones científicas para tratar de predecir la atenuación del movimiento del suelo con la distancia, es complejo el tema ya que hay demasiadas variables involucradas en el cálculo.

Estas ecuaciones son semi empíricas que tienen un gran conocimiento de propagación de ondas y una gran cantidad de registros sísmicos, por la gran cantidad de terremotos que se registran en el mundo, un nuevo sismo aporta con una gran cantidad de registros de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del suelo, en las diferentes estaciones donde se encuentran los equipos. Información que para los científicos es fundamental para mejorar sus modelos de predicción. En Douglas (2019) se presenta un resumen muy corto de cada modelo publicado entre 1964 y 2019, es un libro de 641 páginas.

De tal manera, que la primera actividad que se debe hacer es imponerse criterios, para seleccionar de entre tantos modelos de movimientos fuertes, cuáles son los más adecuados teniendo en cuenta la realidad sísmica del Ecuador, el tipo de suelo que se tiene en la sierra, por ejemplo, predomina la “cangahua” entonces se deberán buscar modelos cuya base de datos sean en ese tipo de suelo.

Para el estudio de peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato, se hizo este estudio (Aguiar y Rivas, 2018) y se seleccionaron los siguientes modelos: Campbell y Bozorgnia (2014), que se abreviará C&B; Abrahamson, Silva y Kamai (2014) ASK; Chou y Youngs (2014) CY.

Ahora, a esta lista para el estudio de la peligrosidad sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato se añaden los modelos de Zhao *et al.* (2016) porque buena parte de la base de datos son en cangahua. Este es el modelo más difícil de los 6 que se van a utilizar y es un contraste con el modelo muy elemental de Zhao *et al.* (2006). En el nuevo modelo incorporan entre sus variables el vulcanismo, esto lo hace más interesante ya que es uno de los pocos modelos que existen en el mundo que consideran a los volcanes.

La lista de modelos de movimientos fuertes se complementa con los trabajos de Boore y Atkinson (2008) B&A, y el modelo de Idriss (2014) que se llamará con el nombre del autor.

Por lo tanto, se consideran 6 modelos para encontrar las aceleraciones espectrales en el área urbana y rural de Ambato, empleando la metodología determinística.

Los tres primeros modelos están detallados en Aguiar y Rivas (2018); Aguiar (2016) por lo que se decidió en este artículo presentar sus ecuaciones de

cálculo, sin entrar en mayor detalle y presentar tablas-comparativas, que ayuden a tener una idea de estos modelos.

- **Modelo de: Campbell y Bozorgnia (2014)**

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (11)$$

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; 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.

- **Modelo de: Abrahamson, Silva y Kamai (2014)**

$\ln Y =$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(M, R_{rup}) + F_{RV} \cdot f_7(M) + F_N \cdot f_8(M) + F_{AS} \cdot f_{11}(CR_{jb}) \\ + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) + F_{HW} \cdot f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) \\ + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30}) + Regional(V_{s30}, R_{rup}) \end{array} \right. \quad (12)$$

Donde f_1 es una función de magnitud y distancia; f_7 y f_8 son funciones del tipo de falla; f_{11} es una función de réplicas; f_5 es una función de sitio en función de V_{s30} ; f_4 es una función de hanginwall; f_6 es una función de Z_{TOR} que es la profundidad al borde superior del plano de ruptura; f_{10} es una función del efecto de cuenca; *Regional* es una función que permite trabajar mediante variables indicadoras con datos de determinadas regiones del mundo de donde proviene la información sísmica.

- **Modelo de Chou y Youngs (2014)**

La mayor parte de funciones que intervienen en su evaluación son similares a la de los modelos anteriores. Un aspecto fundamental de este modelo y que no consideran los modelos anteriores es la directividad de las ondas sísmicas en la función Δ_{DPP} .

Este modelo a más de Z_{TOR} , considera la función ΔZ_{TOR} que ayuda a definir de mejor forma al primer valor considerando el valor medio de esta profundidad en función del tipo de falla y de la magnitud.

A continuación, se indica la ecuación de cálculo para hallar Y_{ref} que es la aceleración en roca expresada como una fracción de la gravedad.

$$\begin{aligned}
\ln(Y_{refi}) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 * \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RVI} \\
& + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 * \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMI} \\
& + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 * \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{TORi} \\
& + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 * \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos \delta_i)^2 \\
& + c_2(M_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_m - M_i)}) \\
& + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 * \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
& + (c_{4a} - c_4) \ln \left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + C_{RB}^2} \right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUPij} \\
& + c_8 \max \left(1 - \frac{\max(R_{RUPij} - 40, 0)}{30}, 0 \right) \min \left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1 \right) e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta_{DPPij} \\
& + c_9 F_{HWij} \cos \delta_i \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh \left(\frac{R_{xij}}{c_{9b}} \right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{JBij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\}
\end{aligned} \tag{13}$$

- **Modelo de Boore y Atkinson (2008)**

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{s30}, R_{JB}, M) \tag{14}$$

Donde F_M es una función de magnitud; F_D es la función de distancia; F_S es la función de sitio. En este modelo al igual que en los anteriores se trabaja con R_{JB} es la distancia Joyner-Boore, definida como la distancia más cercana a la proyección en la superficie de la falla, la cual es aproximadamente igual a la distancia epicentral para eventos de magnitud seis.

- **Modelo de Idriss (2014)**

$$\ln(Y) = \alpha_1 + \alpha_2(M) + \alpha_3(8.5 - M)^2 - (\beta_1 + \beta_2 M) * \ln(R_{rup} + 10) + \varepsilon \ln(V_{s30}) + \gamma R_{rup} + \varphi F \tag{15}$$

En forma explícita no se indican las funciones, pero se ve que es función de la magnitud; de la distancia (R_{rup}), de los efectos de sitio con el parámetro (V_{s30}) y

el tipo de falla mediante la variable indicadora F que puede valer: 0 (Falla transcurrente); 1 (Falla Normal); 2 (Falla Inversa); 3 (Inversa oblicua); 4 (Normal oblicua); en este sentido este modelo permite considerar 5 tipos de fallas, es más específico que los otros en cuanto se refiere al tipo de falla.

- **Modelo de Zhao *et al.* (2016)**

El modelo presenta dos ecuaciones una para sismos de corteza (fuente menor a 25 km) y otra para sismos de manto superior (fuente mayor a 25 km)

Sismos de corteza

$$\begin{aligned} \log_e(y_{i,j}) = & f_{mcr} + g_{cr} \log_e(r_{i,j}) \\ & + g_{crL} \log_e(x_{i,j} + 200.0) + g_N(x_{i,j}) + e_{cr}x_{i,j} + e_{cr}^v x_{i,j}^v + \gamma_{cr} \\ & + \log_e(A^{cr}) + \xi_{i,j} + \eta_i \end{aligned} \quad (16)$$

Sismos de manto superior

$$\begin{aligned} \log_e(y_{i,j}) = & f_{mum} + g_{um} \log_e(r_{i,j}) \\ & + g_{crL} \log_e(x_{i,j} + 200.0) + g_N(x_{i,j}) + e_{um}x_{i,j} + e_{cr}^v x_{i,j}^v + \gamma_{cr} \\ & + \log_e(A^{um}) + \xi_{i,j} + \eta_i \end{aligned} \quad (17)$$

El subíndice cr indica que se trata de sismos de corteza y el subíndice um de manto superior, con esta aclaración se indican las funciones sin el subíndice; f_m representa el efecto de fuente que es función de la magnitud, de la profundidad focal y del tipo de falla; g_{cr}, g_{um} es la tasa de atenuación geométrica que es función de la distancia y la magnitud, el modelo considera ecuaciones para el campo cercano (g_N) y para larga distancia (g_{crL}); e_{cr}, e_{um} , es la tasa de atenuación anelástica; e_{cr}^v es la tasa de atenuación anelástica asociada con la ruta volcánica (esto se comenta más adelante); A^{cr}, A^{um} , son funciones de sitio.

Por ser este modelo más reciente, en comparación con los otros que se han presentado en este apartado, vale la pena mencionar dos aspectos que se consideran importantes, ellos son:

La clasificación de los suelos, que ellos consideran en su estudio, que se indica en la tabla 7. Al margen del tema que se está tratando, es importante ver que, en la clasificación de los perfiles de suelo sísmico a más de la velocidad de la onda de corte, incorporan el período del suelo como variable fundamental. Esto es fundamental ya que se puede tener un suelo que de acuerdo al V_{s30} clasifique como tipo C (NEC-15) que es bueno, pero si tiene períodos altos, va a ver amplificación de las ondas sísmicas.

Tabla 7 Clasificación de suelos considerada por Zhao *et al.* (2015) y similitud con NEHRP

Perfil de suelo	Descripción	Período	V_{s30} (m/s)	perfil de suelo NEHRP
SC I	Roca	$T < 0.2 s$	$V_{s30} > 600$	A+B+C
SC II	Suelo Duro	$0.2 \leq T < 0.4 s$	$300 < V_{s30} \leq 600$	C
SC III	Suelo Mediano	$0.4 \leq T < 0.6 s$	$200 < V_{s30} \leq 300$	D
SC IV	Suelo suave	$T \geq 0.6 s$	$V_{s30} \leq 200$	E+F
SC IV1		$0.6 \leq T < 1.0 s$	$120 < V_{s30} \leq 200$	E
SC IV2		$T \geq 1.0 s$	$V_{s30} \leq 120$	F

En la puntilla de Bahía de Caráquez en Ecuador se dio que los suelos, por el valor del V_{s30} son tipo C (clasificación de NEC-15), pero tienen períodos de suelo altos alrededor de 0.9 s, lo que ocasionó amplificación de las ondas sísmicas y con ello se tuvo gran daño en las estructuras durante el terremoto de Pedernales de 2016. Aguiar (2017)

Otro aspecto importante del modelo de Zhao *et al.* (2016) tiene que ver con la consideración del vulcanismo en el modelo, para ello se definen 4 casos, que se muestran en la figura 8, y en forma resumida son: i) Epicentro fuera de la zona volcánica (ZV) y estación o punto de interés dentro de ZV; ii) Estación y epicentro dentro de ZV; iii) Epicentro en ZV y estación fuera de ZV; iv) Estación y epicentro fuera de ZV pero que atraviesa la ZV. En todos los casos la distancia x^v queda dentro de ZV.

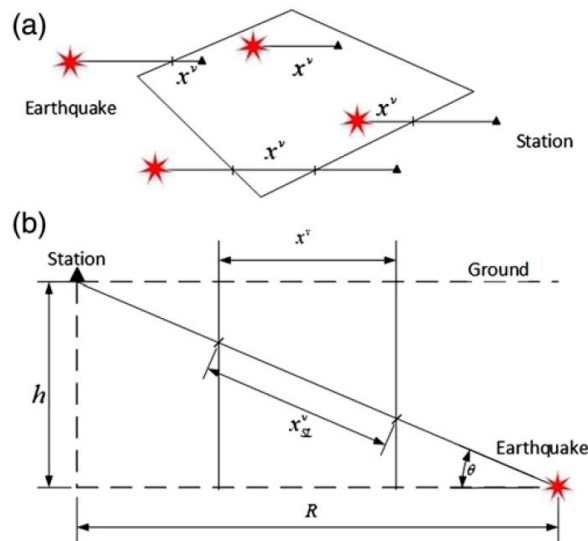


Figura 8 a) Definición de la trayectoria volcánica para cuatro casos; b) Distancia volcánica horizontal e inclinada.

En la figura 7, se ve que las parroquias urbanas y rurales de la ciudad de Ambato se hallan bastante distantes del Volcán Tungurahua, con lo que la Zona Volcánica no llega a la ciudad. En caso de una erupción lo

que llega es ceniza volcánica. Sin embargo, de esto el modelo recomienda que como mínimo $x^v = 12 \text{ km.}$, cantidad que se consideró en el cálculo para hallar espectros.

Ahora, con toda la información indicada en el presente apartado, en la tabla 8 se indican las variables involucradas en su formulación con el propósito de ver cuál es la más completa. Para no alargar el texto, en la columna uno, se tiene el parámetro M se debe interpretar como que, si el modelo considera la función de magnitud, en este caso todos lo consideran.

Tabla 8 Parámetros básicos que consideran los modelos seleccionados para el estudio.

Parámetro	C&B-14	C&Y-14	ASK-14	Zhao-16	B&A-08	Idris-14
M	X	X	X	X	X	X
Z_{TOR}	X	X	X	---	---	---
F_{RV}, F_{NM}, SS	X	X	X	X	X	X
R_{rup}	X	X	X	X	---	X
R_{JB}	X	X	X	X	X	---
R_x	X	X	X	X	---	X
R_{yo}	---	---	X	---	---	---
F_{HW}	X	X	X	---	X	---
V_{s30}	X	X	X	X	---	X
$Z_{2.5}(X); Z_1(XX)$	X	XX	XX	---	XX	---
Z_{hyp}	X	X	---	X	---	X
X^v	---	---	---	X	---	---

El significado de los parámetros indicados en la tabla 8, es el siguiente: M es la función de magnitud; Z_{TOR} es la distancia desde la superficie al borde superior de la falla; F_{RV} función de falla inversa; F_{NM} es la función de falla normal; SS es la función de falla transcurrente; R_{rup} es la distancia del sitio de interés al plano de falla o la distancia más corta a la falla; R_{JB} es la distancia en el plano horizontal desde el sitio a la parte inferior de la falla, ver figura 8; R_x es la distancia horizontal desde el sitio a la parte superior de la falla; R_{yo} es la distancia al final de la ruptura, paralela a la falla; F_{HW} es la función de Hanging Wall; V_{s30} es la velocidad de la onda de corte en los 30 primeros metros; $Z_{2.5}, Z_1$, es la profundidad a la cual la velocidad de la onda de corte es 2500 m/s, o 1000 m/s; Z_{hyp} es la profundidad al hipocentro; X^v es la distancia entre el epicentro y el sitio en la Zona Volcánica.

Se recomienda mirar con detenimiento la figura 9 en que se presentan algunas de las variables involucradas en las ecuaciones de movimientos fuertes que se han presentado.

Por otra parte, en el Anexo 1, se indica la base de datos, consideradas en cada modelo.

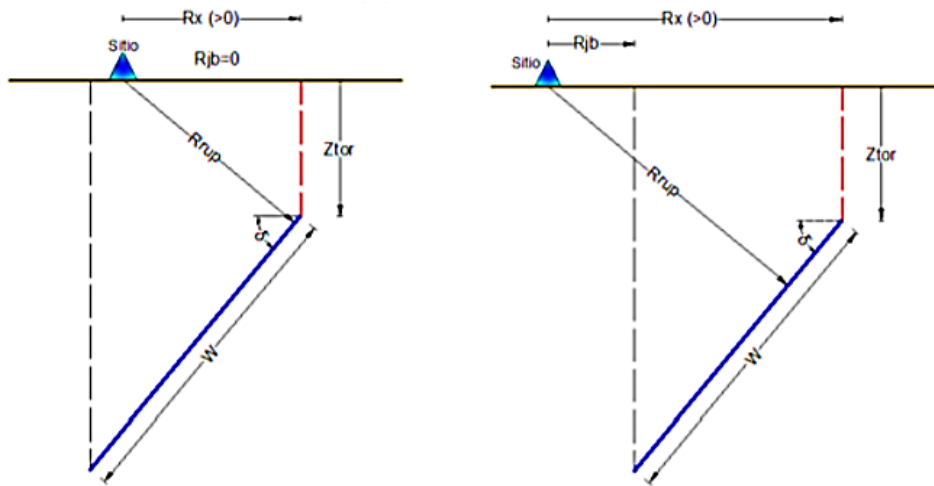


Figura 9 Algunas de las variables involucradas en los modelos de movimientos fuertes.

5. MALLA DE PUNTOS CONSIDERADA EN EL ESTUDIO

En la microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato se clasificaron los suelos de acuerdo al NEC-15, por ello los puntos que se presentan en la figura 10, con color verde-amarillo corresponden al perfil de suelos C. (Aguiar y Rivas, 2018)

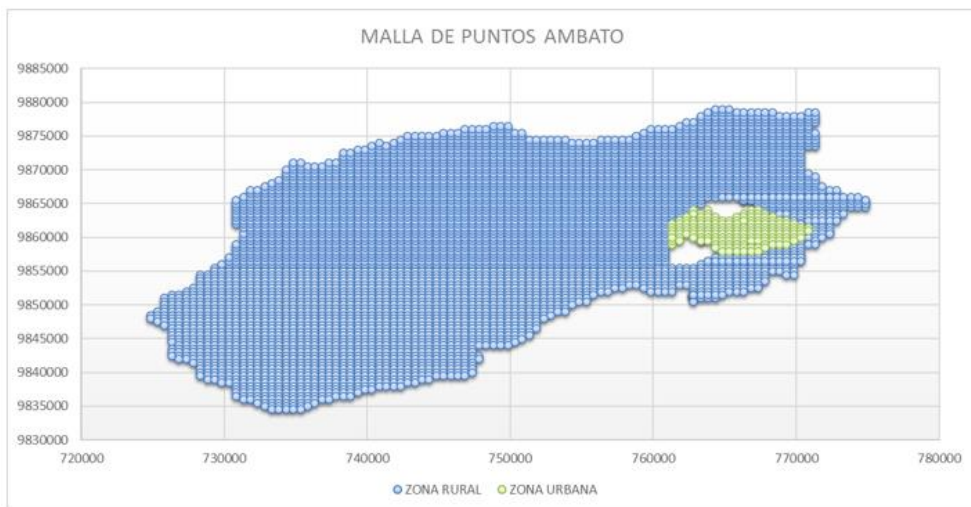


Figura 10 Malla considerada en el estudio; con color azul se indica el área rural y con verde amarillo el área urbana de la ciudad de Ambato.

Para el área rural, no se han realizado estudios geofísicos y geotécnicos que permitan clasificar los suelos, por lo que se asume que todos son perfiles de suelo C. Con esta acotación, en la figura 10 se presenta la malla de puntos en las

que se obtuvieron espectros de respuesta para 5% de amortiguamiento utilizando las ecuaciones de movimientos fuertes indicadas en el apartado anterior.

La separación de los puntos de la malla es de 500 m, en los dos sentidos, se encontró espectros en cada punto, considerando que un sismo de magnitud máxima (ver tabla 1) luego se obtuvo un promedio para tres casos: i) Considerando solo los puntos del área urbana; ii) Lo propio, pero del área rural; y iii) Todos los puntos de la malla; espectros que se presentan en el siguiente apartado.

6. RESULTADOS

En la figura 11 a, se presentan los espectros promedios, encontrados con cada uno de los modelos seleccionados en el área urbana, ante un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato y en la figura 11 b, se tiene los espectros promedios para el área rural. Al estar la falla Ambato más cerca del área urbana las ordenadas espectrales son mayores.

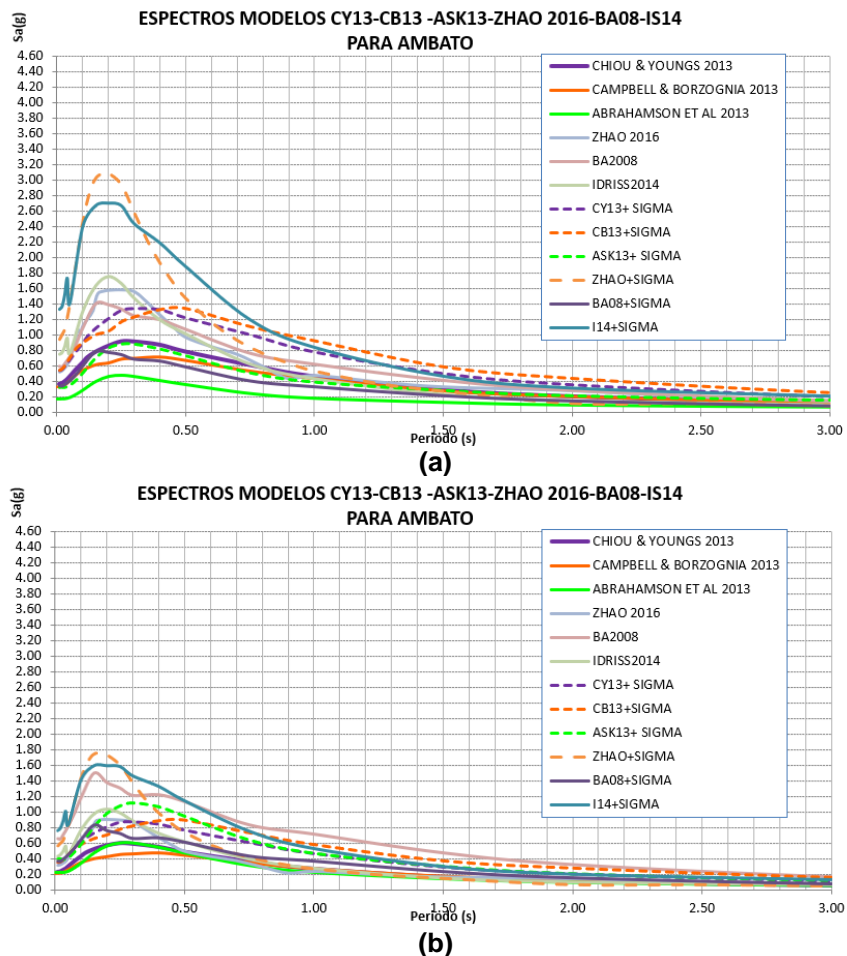


Figura 11 Espectros para un sismo de magnitud 6.5 en la falla Ambato; a) Área Urbana; b) Área Rural.

En la figura 11, se ha presentado espectros medios, cuyo nivel de confianza es del 54% y espectros medios más una desviación estándar que tiene una confiabilidad del 84%. Por cierto, en las ecuaciones 11 a 17, no se colocó la incertidumbre de los modelos que se los cubre con la desviación estándar.

En caso de generarse un sismo de magnitud 6.3, en la falla Huachi, los espectros promedios que se esperan en el área urbana y rural de la ciudad se indican en la figura 12 a, y b, respectivamente.

Nuevamente por la cercanía de la falla Huachi al área urbana los espectros son mayores (figura 12 a) que los del área rural (figura 12 b) Esto significa que habrá mayor daño en el área urbana que en la rural, ante un sismo asociado a la falla Huachi.

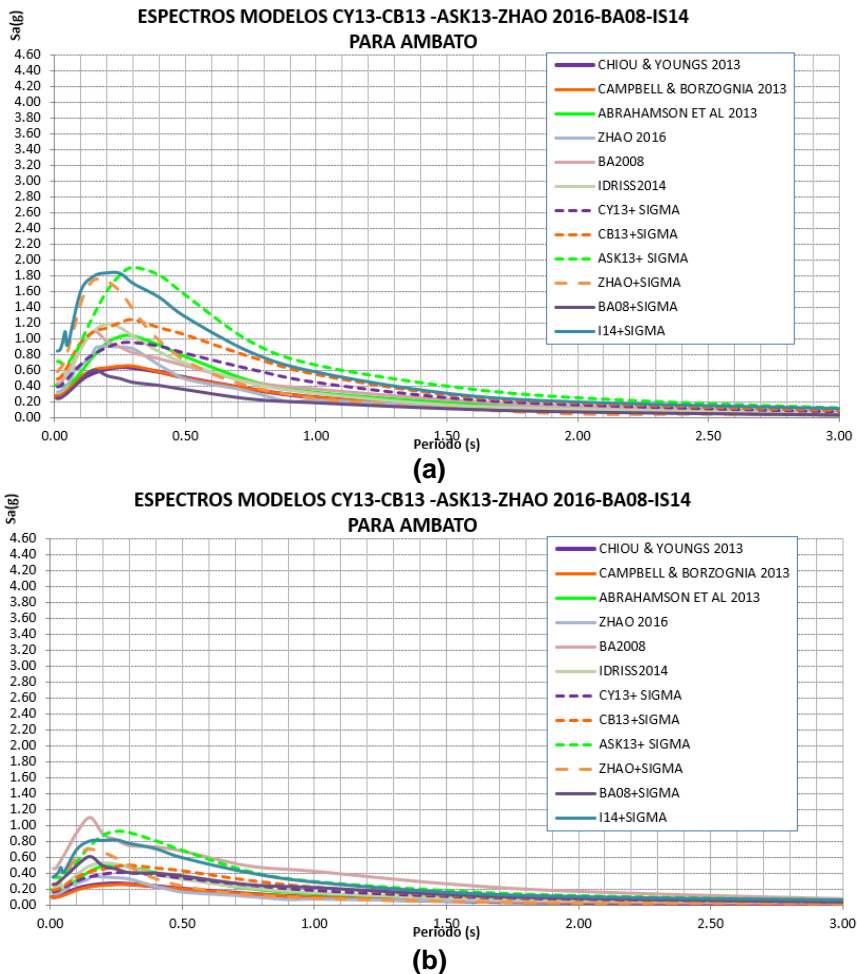


Figura 12 Espectros para un sismo de magnitud 6.3 en la falla Huachi; a) Área Urbana; b) Área Rural.

Ahora, en la figura 13, se presentan los espectros de respuesta elásticos para el caso de que se produzca un sismo de magnitud 6.5; los espectros de la figura 13 a, son para el área urbana y los de la 13 b, para el área rural.

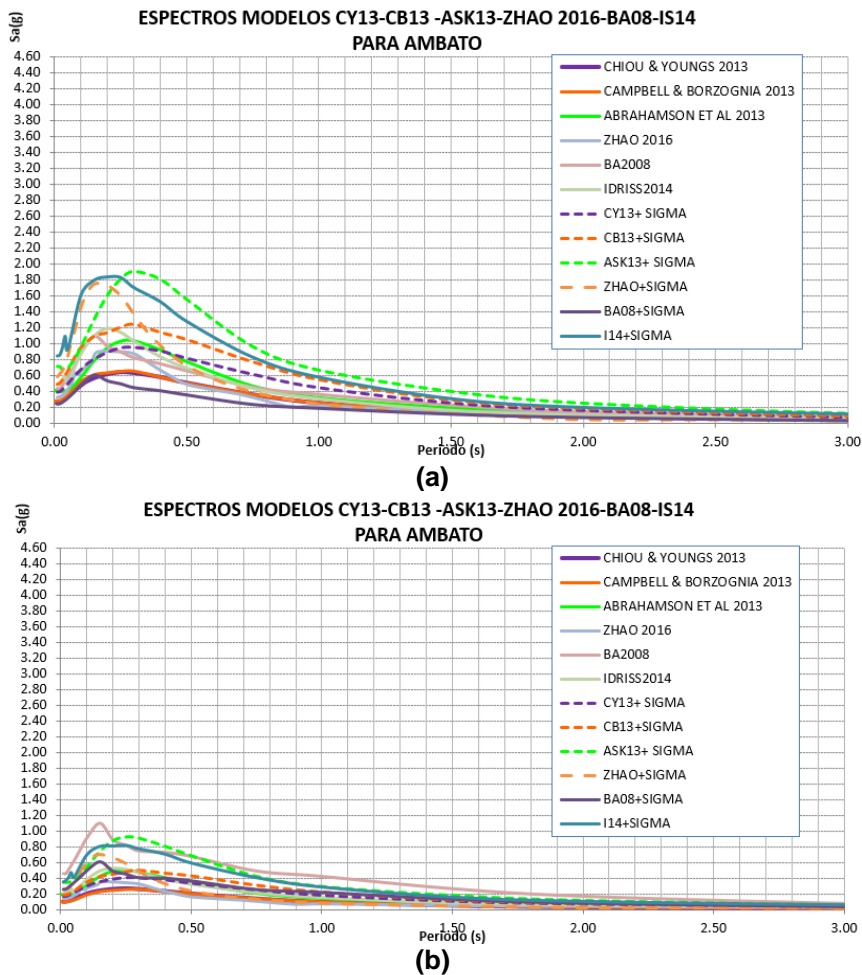


Figura 13 Espectros para un sismo de magnitud 6.5 en la falla Totora; a) Área Urbana; b) Área Rural.

Las tres fallas: Ambato, Huachi y Totora, se consideraron en el estudio de microzonificación sísmica del área urbana en 2018, y se ve en las figuras 11 a 13, que estas fallas no generan espectros altos en el área rural.

Ahora se van a considerar otras fallas, algunas de ellas se encuentran en el límite del área urbana como son las fallas F10 y F11. En la figura 14 se presentan los espectros asociados a la Falla F10; como se encuentra en el límite entre el área urbana y rural sus espectros son parecidos en estas dos áreas y tiene menores valores a las encontradas con las tres fallas precedentes, de tal manera que estuvo bien no considerarla en el estudio realizado en 2018, para el área urbana.

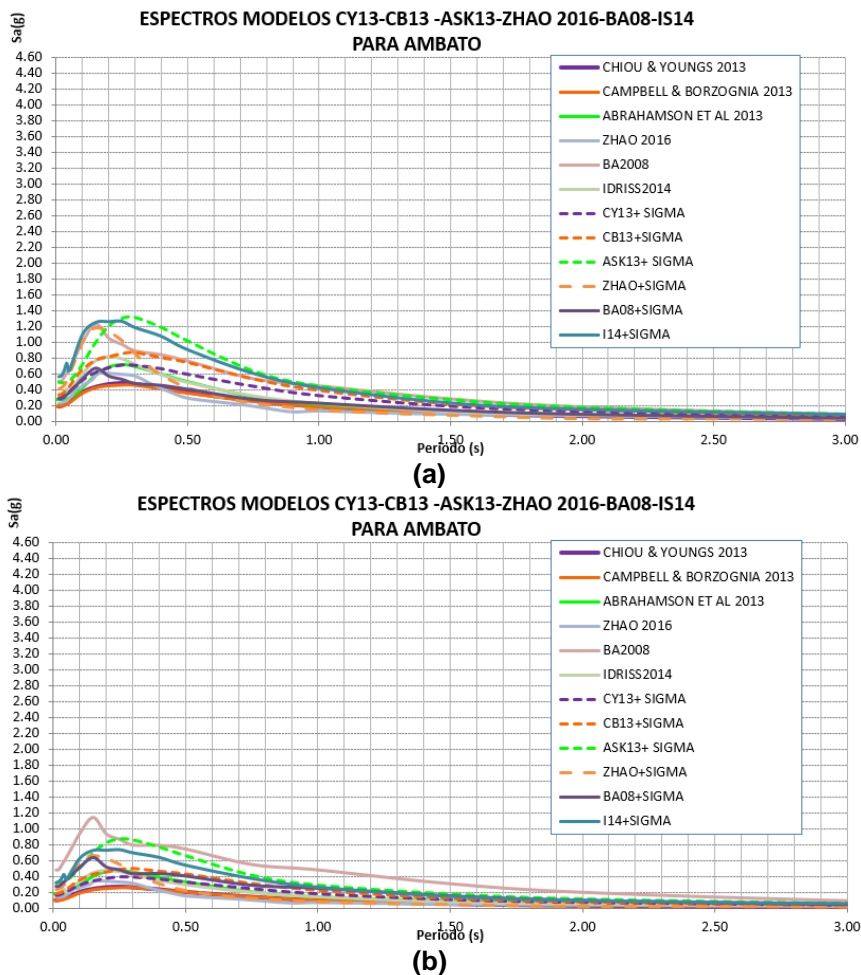


Figura 14 Espectros para un sismo de magnitud 6.1 en la falla F10; a) Área Urbana; b) Área Rural.

La falla F11, si presenta valores altos de los espectros que son comparables con los espectros de las fallas de Ambato, Huachi y Totorá. Esto no se esperaba y vale la pena actualizar el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Ambato, habida cuenta que se dispone de una clasificación de los suelos.

Para el área rural, no se dispone de estudios geofísicos y geotécnicos que permitan saber con detalle los sitios donde se tienen suelos C, D, E. En este artículo se ha considerado que toda el área rural es tipo C, porque el objetivo es ver cuál es el comportamiento de otros modelos de movimientos fuertes y la gran expectativa que se tenía es el modelo de Zhao *et al.* (2016), que dicho sea de paso es el modelo más complejo de los 6 utilizados en el estudio.

Para valores medios, confiabilidad del 50% (sin desviación estándar) la ecuación de Zhao *et al.* (2016) reporta ordenadas espectrales que se encuentran por la media a las que se hallan con los otros modelos, tal vez un poco menos de la media, pero para confiabilidad de 84% (con desviación estándar) están un poco más arriba de la media.

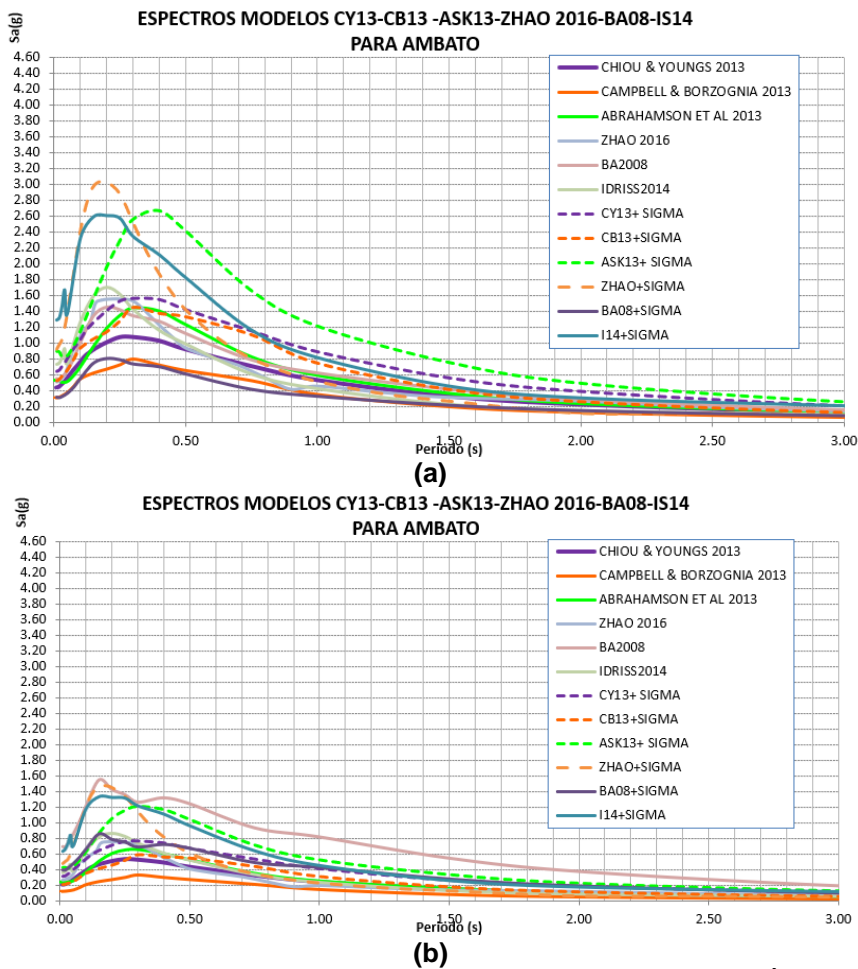


Figura 15 Espectros para un sismo de magnitud 6.6 en la falla F11; a) Área Urbana; b) Área Rural.

Los espectros que se generan con las diferentes ecuaciones de movimientos fuertes ante un sismo en la falla F16, de magnitud 6.2, se observan en la figura 16 a, para el área urbana y en la figura 16 b, para el área rural. Al comparar estos grupos de espectros se ve que los del área rural, son ligeramente mayores a los del área urbana.

Los espectros del área urbana hallados con un sismo en la falla F16 son menores a los obtenidos en la microzonificación sísmica de Ambato de 2018.

Tanto para el área urbana como rural, los espectros más altos se hallan con el modelo de Idris (2014) este comportamiento también se lo ha observado en los espectros generados por sismos en las otras fallas consideradas en el estudio.

Para el área rural los espectros obtenidos ante un sismo de magnitud 6.2 en la falla F16 son los más altos, con las 7 fallas consideradas en el estudio.

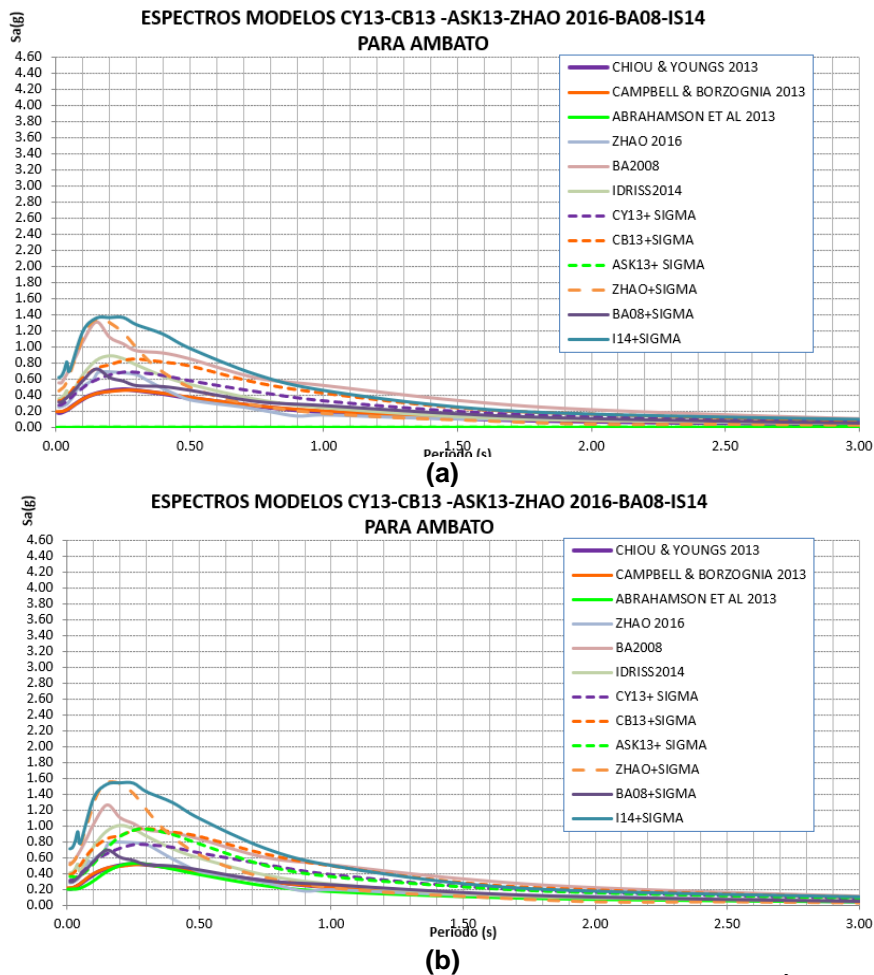


Figura 16 Espectros para un sismo de magnitud 6.2 en la falla F16; a) Área Urbana; b) Área Rural.

Resta por indicar los espectros promedios que se obtienen a partir de un sismo de magnitud 6, en la falla F28. En la figura 17 a, se ven los espectros para el área urbana, los mismos que son comparables a los encontrados en la microzonificación sísmica de 2018, para el área urbana.

Para el área rural, son bajos los espectros generados por un hipotético sismo en la falla F28.

En todas las fallas se consideró que el hipocentro de los sismos se da en el punto medio del volumen de litósfera de la falla. Se encontró los espectros en cada punto de las mallas, para la magnitud máxima esperada en cada falla y después se obtuvieron los espectros promedios, de tal manera que es un trabajo largo.

Se utilizó un programa desarrollado en EXCEL por varios autores, la primera de ellas fue Rivas (2014); después Trujillo (2015) lo adaptó a las fallas ciegas de Quito; luego Quizanga (2015) como parte de su Maestría en Ciencias, hizo significativos aportes todo a las fallas de Quito; nuevamente Quizanga (2018)

trabajó con este programa, pero esta vez adaptado a las fallas de Ambato, Huachi y Totoras. Finalmente, Serrano (2020) ha incorporado las fallas F10, F11, F16 y F28; al igual que las ecuaciones de movimientos fuertes de Boore y Atkinson (2008), Zhao *et al.* (2016) e Idriss (2014).

En todo este largo recorrido de la evolución del programa, acorde al desarrollo científico, el primero de los autores de este artículo ha estado supervisando el desarrollo y analizando los nuevos modelos a utilizar. De tal manera que el programa tiene un sustento bastante sólido.

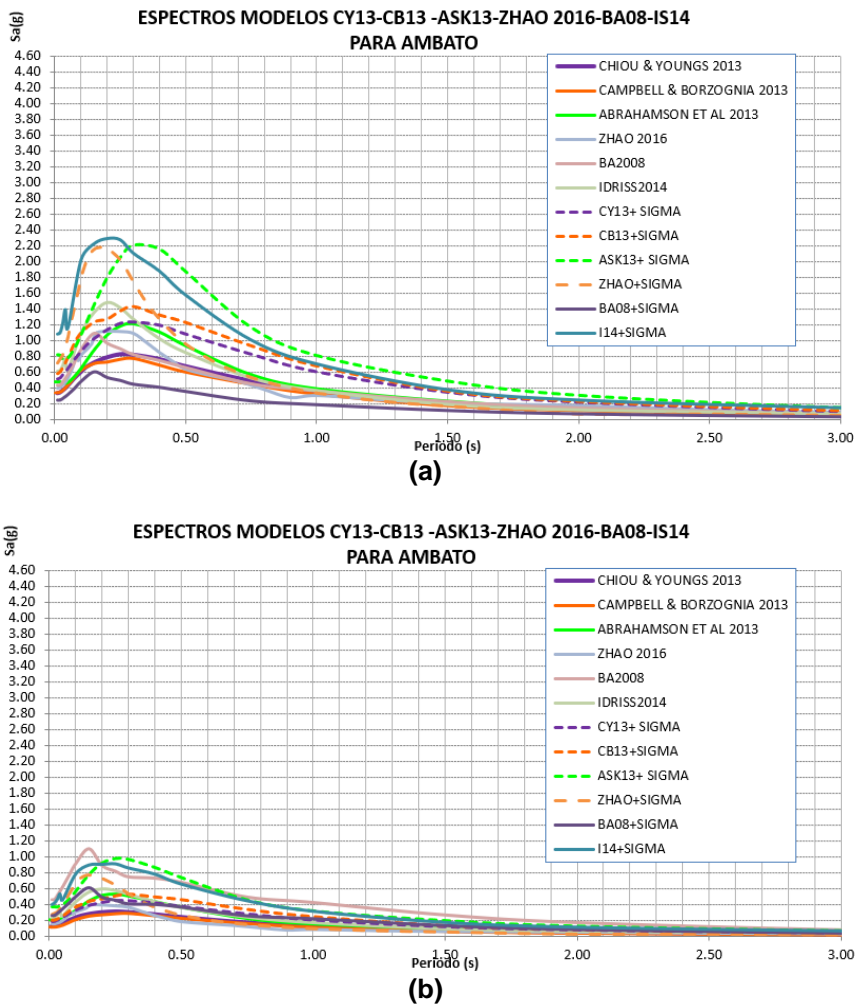


Figura 17 Espectros para un sismo de magnitud 6.0 en la falla F28; a) Área Urbana; b) Área Rural.

7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En el 2018, se realizó la microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato, para lo cual se conformó un equipo de trabajo multidisciplinario y se hizo un gran trabajo de campo en el área de la geofísica, geotécnica y la geología; este trabajo sirvió de base para la clasificación sísmica de los suelos y para los estudios de peligrosidad sísmica en forma probabilística y determinística para encontrar espectros de diseño y máximo considerado de: aceleraciones para la componente horizontal y vertical del movimiento del suelo, así como para obtener espectros de desplazamiento. Aguiar y Rivas (2018)

Ahora, se retomó el tema en forma exploratoria por decirlo de alguna manera incorporando el área rural de la ciudad de Ambato, que prácticamente es cuatro veces el área urbana y se encuentra muy poblada.

Es exploratoria porque no se han realizado estudios preliminares básicos indicados en el primer párrafo de este apartado, por lo que se decidió suponer que toda el área rural es un perfil de suelo C; lo que interesaba es mostrar la metodología de cálculo de la peligrosidad sísmica en forma determinística, incorporar nuevas fallas al modelo, determinar los períodos de recurrencia con dos métodos a saber el del terremoto característico y el de Gutenberg y Richter modificado.

Se ha incorporado nuevas ecuaciones de movimientos fuertes de tal manera que este momento se disponen de 6 ecuaciones, a pesar de que se obtuvieron resultados razonables se va a eliminar uno de los modelos e incorporar otro, para de esta forma ampliar en un futuro cercano la microzonificación sísmica del área urbana y rural de Ambato.

REFERENCIA

1. Abrahamson, N., Silva, W., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 Ground Motion relation for active Crustal Regions. 1025-1053.
2. Aguiar, R. (2015). Espectros de Control para la ciudad de Quito, Centro Internacional de Métodos Numéricos. Universidad Politécnica de Caluña.
3. Aguiar, R., & Rivas, A. (2018). Microzonificación Sísmica de Ambato. Quito : Instituto Panamericano de Geografía e Historia .
4. Aguiar, R., Quizanga , D., & Chicaiza, A. (2017). Espectros de Control para el Valle de los Chillos. Ciencia , 81-85.
5. Bonifaz H., y Haro J., (2018), *Estudio Geofísico para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ambato*, Informe de Consultoría.
5. Boore, D., & Atkinson, G. (February de 2008). Ground Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Engineering Research Institute, 24, 99-138.
6. Campell, k., Borzorgnia, Y., & Eeri, M. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA,PGV, and 5% Damped Linear AccelerationResponse Spectra. 1087-1115..

7. Chiou, J., & Youngs, R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. 1117-1153.
9. Chunga K., y Mulas F., (2018). *Estudio Geológico para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ambato.*, Informe de Consultoría, consta en Capítulo 6 de Aguiar y Rivas (2018)
8. Coppersmith, J., & Donald, L. (1994). New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement .
9. Diaz, D. (2013). Incidencia de la utilización de la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA) en los valores máximos de aceleración sísmica pico (PGA) en Colombia . Bogotá .
10. Dowswell, B. (2011). Connection Design For Steel Structures, Structural Design Solutions.
11. Eguez, A., Alvarado , A., & Yepes, H. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and its offshore regions.
12. Idriss I., (2014). *NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes.* Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 1-57.
13. Leonar M., "Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width average displacement and moment release", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100 (5A)**, 1971-1988
14. NEC-15 (20015), *Norma Ecuatoriana de la CONstrucción SE-DS. Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*, 138 p. Quito.
15. Quizanga D., (2015). *Espectros específicos para la ciudad de Quito en función de las fallas ciegas inversas*, Tesis para obtener el título de Master en Ciencias. Politécnica Nacional.
16. Quizanga D., (2018) *Programa en EXCEL para encontrar espectros en forma determinística para el área urbana de la ciudad de Ambato.*
13. Real, E. (2013). Analisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el periodo 2000-2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos. Quito.
14. Rivas, A. (2014). Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de Peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. Madrid .
15. Rivas A., (2014). *Programa en EXCEL para evaluar la peligrosidad sísmica de Quito en forma determinística.* Informe de Trabajo, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito.
15. Schmidt, V. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. 32.
16. Serrano P., (2020) *Incorporación del área rural y nuevos modelos de ecuaciones de movimientos fuertes al programa en EXCEL que sirve para evaluar la Peligrosidad Sísmica de Ambato en forma determinística.*
17. Trujillo S., (2015), *Espectros de Control para el Centro Norte de Quito.*, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí.
18. Zhao J., Zhou S., Zhou J., Zhao Z., Zhang H., Zhang Y., Gao P., Lan X., Rhoades D., Fukushima Y., Somerville P., and Irikura K., (2016), "Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation

- Functions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106 (4)**, 1552-1569
19. Zhao J., Zhou S., Gao P., Long T., Zhang Y., Thio H., Lu M., and Rhoades A., (2015), "An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness-of-fit for ground-motion prediction equations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105 (5)**, 2750-2763

Anexo 1 Base de datos de los modelos considerados

Parámetro	C&B -2014	C&Y -2014	ASK -2014	Z et al. -2016	B&A -2008	I -2014
Magnitud Mínima	3.30	3.50	3.00	x	5.00	5.00
Magnitud Máxima	8.50	8.00	8.50	x	8.50	8.50
Magnitud máxima falla transcurrente	8.50	8.50	8.50	x	8.50	8.50
Magnitud máxima falla inversa	8.00	8.00	8.50	x	8.50	8.00
Magnitud máxima falla normal	7.50	8.00	8.50	x	7.00	8.00
Número de registros de fallas Normales	8313	12,244	26	1658	x	70
Número de registros de fallas Inversas	322	2,587	79	3117	x	1490
Número de registros de fallas transcurrentes	1561	x	221	1182	x	899
Datos de Sismos	California, wordwide earthquakes	California	California, Japón, China, Taiwan	J, USA, Iran	California	California, Taiwan, USA, Canada, Georgia, Greece, Iran, Italy Mexico, Turkey
R _{rup} (Km)	(0 - 300)	(0 - 300)	(0 - 300)	x	(0 - 400)	(0.2 - 175)
V _{s30} (m/s)	(150-1500)	(180-1500)	(180-1500)	$200 \leq V_{s30}$ > 600	$180 \leq V_{s30}$ > 1300	$450 \leq V_{s30}$ > 1200
Z _{TOR} (Km)	≤ 20	≤ 20	≤ 20	x	x	x
Z _{HYP} (Km)	≤ 20	x	x	x	x	x
Z _{2.5} - Z ₁₀ (Km)	(0 - 10)	(0 - 10)	x	x	(0 - 3)	x

