

## **DETERMINATION OF SPECTROS AND EARTHQUAKES FOR THE DESIGN OF QUININDÉ HOSPITAL WITH SEISMIC ISOLATORS**

**R. Aguiar<sup>(1,2)</sup>, A. Rivas-Medina<sup>(3)</sup>, E. Iza<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. [raguiar@espe.edu.ec](mailto:raguiar@espe.edu.ec); [eiza@espe.edu.ec](mailto:eiza@espe.edu.ec)

<sup>(2)</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta Ecuador.

<sup>(3)</sup> Departamento de Cs. Geodésicas y Geomática, Universidad de Concepción – Campus Los Ángeles, Los Ángeles, Chile. [alricivas@udec.cl](mailto:alricivas@udec.cl)

Received: October 2017. Accepted: December 2017

### **ABSTRACT**

The Quinindé Hospital will be built with seismic isolators, for this reason in the study of seismic hazard for the project site spectra of uniform seismic risk are obtained, for return periods of 475, 975 and 2475 years and in each of They are reached until 5 seconds of period.

On the other hand, 18 ground acceleration records of 6 earthquakes have been selected, the same ones that have been scaled to the acceleration spectra, found in the Seismic Hazard study.

**Key Words:** Seismic Hazard. Spectral scaling. Seismic isolators

## **DETERMINACIÓN DE ESPECTROS Y SISMOS PARA EL DISEÑO DE HOSPITAL DE QUININDÉ CON AISLADORES SÍSMICOS**

### **RESUMEN**

Se va a construir el Hospital de Quinindé con aisladores sísmicos, por esa razón en el estudio de Peligrosidad Sísmica para el sitio del proyecto se obtienen espectros de riesgo sísmico uniforme, para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años y en cada uno de ellos se alcanza hasta los 5 segundos de período.

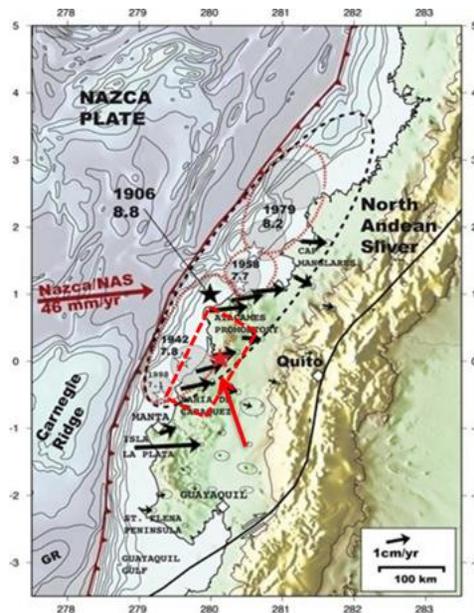
Por otra parte, se han seleccionado 18 registros de aceleración del suelo de 6 sismos los mismos que han sido escalados a los espectros de aceleraciones, encontrados en el estudio de Peligrosidad Sísmica.

**Palabras Claves:** Peligrosidad Sísmica. Escalamiento de Espectros. Aisladores Sísmicos

## 1. INTRODUCCIÓN

La zona costera norte del Ecuador es la que mayor acoplamiento tiene entre la placa de Nazca que se desplaza de izquierda a derecha y la placa americana que se desplaza en sentido contrario, esto ha dado origen a la zona de subducción en que la placa de Nazca se introduce bajo la placa americana.

En esta zona se dio en 1906, el mayor terremoto registrado en el Ecuador de magnitud 8.8, en la figura 1 se aprecia su epicentro y el área de ruptura de este terremoto; tiene igual magnitud que el terremoto de Chile de 2010 y en ese país solo colapsó un edificio de altura durante el sismo, que fue el Alto Río ubicado en Concepción (Aguiar, 2010; Saragoni, 2011). Lo importante es reconocer que el Ecuador tiene un gran peligro sísmico y se deben diseñar las estructuras en forma adecuada esto implica conocer de la mejor manera los sismos de diseño y para ello se deben hacer estudios de peligrosidad sísmica.



**Figura 1** Sismos fuertes registrados en la zona costera norte del Ecuador.

Fuente: Nocquet *et al.* (2014)

En la figura 1, se aprecia que después del sismo de 1906 se registró el sismo de Jama de 1942 que tuvo una magnitud de 7.8; igual magnitud que el sismo de Pedernales de 2016, en el que colapsaron una gran cantidad de edificios porque se construyen estructuras flexibles (Aguiar *et al.* 2016). Entre 1906 y 1942 se tiene 36 años y si se multiplica esta cantidad por 46 mm, (velocidad promedio de desplazamiento de la placa de Nazca, Nocquet *et al.* 2014) se encuentra que la corteza se deformó 1.65 m.

Ahora bien, en la figura 1, se observa que el epicentro del sismo de 2016 es muy cercano al de 1942 y tienen la misma magnitud de 7.8. Entre 2016 y 1942 se tiene 74 años y al multiplicar por 46 mm, se tiene que la deformación de la

corteza es 3.40 m. De tal manera que a igual magnitud de los sismos la deformación de la corteza ha sido diferente; esto nos conduce a pensar varias cosas, la primera que el movimiento de 46 mm, al año, no es un valor constante, de ahí que una línea de investigación es medir la deformación del suelo para lo cual se tienen equipos instalados en varios sitios del País, habrá años en que se tenga mayor desplazamiento y otros menos.

Al tratar de explicar por qué se tiene dos sismos de igual magnitud (el de 1942 y 2016) con diferente deformación del suelo, se está pensando en el modelo del Terremoto Característico (Wesnousky *et al.* 1983) que considera que el tiempo de recurrencia entre dos eventos de igual magnitud es constante, sin tomar en cuenta que entre 1942 y 2016 se tuvo en esa zona el sismo de 1998 en Bahía de Caráquez de magnitud 7.2, con lo que se liberó parcialmente la energía acumulada.

Pero para centrar la atención en la gran sismicidad de la zona norte se debe indicar que a más de los sismos indicados de 1906 (8.8), 1942 (7.8), 1998 (7.2) y 2016 (7.8) se registraron un poco más al norte los sismos de Esmeraldas de 1958 de magnitud 7.7 y el sismo de Colombia-Ecuador de 1979 de magnitud 8.2. En total se han registrado 6 sismos interplaca de bajo ángulo de buzamiento de magnitud mayor a 7, en la zona costera norte del Ecuador en un lapso de 110 años, lo que da una media de 18 años.

Esto es muy preocupante porque en el sismo de 1998 de Bahía de Caráquez de magnitud 7.2; los proyectistas estructurales que diseñaron las construcciones de la mencionada ciudad, reprobaron, debido a que durante el terremoto, colapsó el Edificio Calipso de 6 pisos y posteriormente derrocaron algunos edificios más entre ellos el Karina de 5 pisos y Los Corales de 5 pisos (Aguiar *et al.* 1998).

No hay cultura de reforzar los edificios, las construcciones que se comportaron aparentemente bien durante el sismo de 1998 no fueron reforzadas lo único que hicieron fue reconstruir la mampostería y durante el sismo de 2016, colapsaron basta citar dos estructuras: Cabo Coral un edificio de altura que sufrió daño en el sismo de 1998 y no hicieron nada por arreglarlo, después del terremoto de 2016 lo derrocaron; otro ejemplo es el edificio Cedeño de pocos pisos que soportó el sismo de 1998 y lo derrocaron después del sismo de 2016.

Luego del sismo de 2016, la mayor parte de las estructuras de la ciudad de Manta han sido solo reparadas. Si una estructura tiene gran daño en la mampostería de seguro que tiene daño en la estructura, que a lo mejor no es visible o si lo es, la gente piensa que solo es a nivel de enlucido (Aguiar *et al.* 2017, a, b).

Si se sabe que en 18 años o un poco más o un poco menos se va a tener otro sismo fuerte, lo menos que se debe hacer es reforzar las estructuras. Es un gran riesgo el que se tiene. Pero esto no es solo se da en el Ecuador, se acaba de presentar en Ciudad de México, donde las estructuras que aparentemente no tuvieron daño en el sismo de 1985 han colapsado durante el terremoto de 2017; esto llevando a hablar de *daño acumulado* (Rodríguez, 2017).

## 2. ESPECTROS DEL SISMO DE 2016

Para reforzar una estructura importante o diseñar una nueva como es el caso del Hospital de Quinindé, que dicho sea de paso se va a construir con aisladores sísmicos, se debe hacer estudios de peligrosidad sísmica y no limitarse a utilizar los espectros que recomienda la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015 (NEC-15) porque se vio en el sismo de 2016 que las ordenadas espectrales de este terremoto fueron mayores que las recomendadas en el NEC-15.

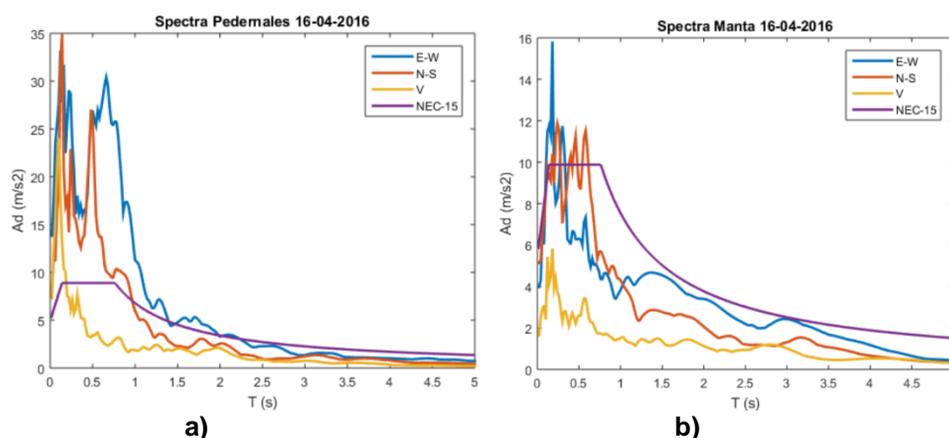
En la figura 2, se presenta el epicentro del terremoto de 2016 y registros de aceleraciones y el PGA (Aceleración máxima del registro) en algunas ciudades entre ellas Pedernales (APED) donde se tuvo un PGA igual a  $1.413 g$ , valor demasiado alto. Nótese que en Chone (ACHN) el PGA es  $0.367 g$ , disminuyó considerablemente pero más al Sur en Manta (AMNT) volvió a subir a  $0.504 g$ ; lo que significa que hubo varios procesos de ruptura hacia el sur. En la parte norte de Pedernales los registros de aceleraciones fueron más bajos pero de mayor duración; Quinindé se halla aproximadamente a la altura del epicentro pero más a la derecha.



**Figura 2** Valores de PGA en estaciones: APED (Pedernales); ACHN (Chone); AMNT (Manta); AGYE (Guayaquil). Fuente: IG (2016)

En la figura 3 a, se tienen los espectros hallados para un factor de amortiguamiento del 5%, en Pedernales (terremoto de 2016) y el que recomienda el NEC-15 para un perfil de suelo tipo D, se ve que los espectros elásticos del terremoto tienen ordenadas espectrales mucho más altas que el reportado por NEC-15. Se observa también que el espectro de la componente vertical es más grande que los otros dos espectros de movimiento horizontal, para la zona de períodos cortos menores a 0.15 s.

En el caso de Manta –figura 3 b- los espectros de la componente horizontal son más altos que los del NEC-15 pero no es tanta la diferencia como en el caso de los hallados en la zona epicentral (Pedernales).



**Figura 3** Espectros del terremoto de 2016 y recomendados por NEC-15; a) Pedernales; b) Manta.

Por todo esto se piensa que el terremoto del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8, fue el sismo de diseño, existen algunas personas que no lo creen así a pesar de que se está observando que las ordenadas espectrales del terremoto superaron los valores del espectro del NEC-15

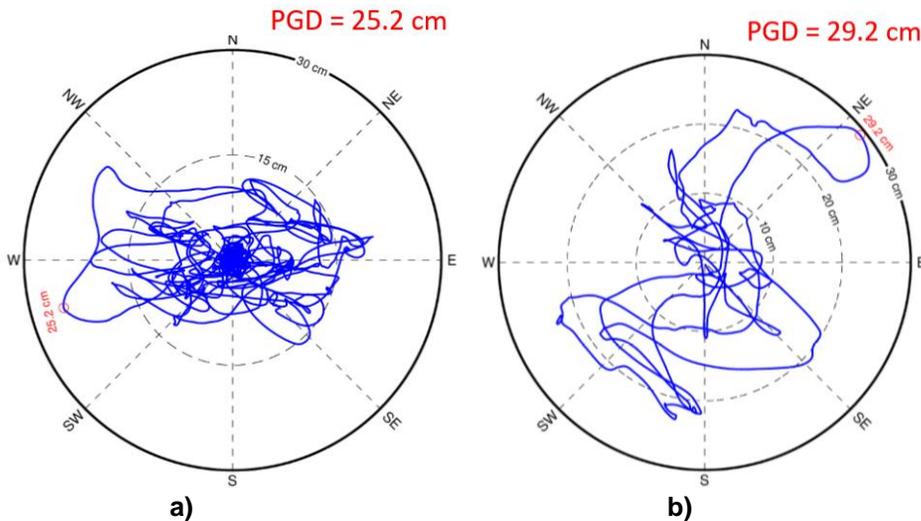
Con estos espectros era lógico esperar que exista daño en las estructuras diseñadas en la forma convencional, sin aisladores ni disipadores de energía sísmicos. No se diseñó con los espectros elásticos del NEC-15 indicados en la figura 3 sino con unos espectros divididos para un valor de  $R$  que es el factor de reducción de las fuerzas sísmicas y que está alrededor de 6. Entonces por un momento divide para 6 los espectros que se hallan con líneas uniformes (NEC-15) y si se compara estos valores con los espectros del terremoto, se concluye que se diseñó con fuerzas sísmicas extremadamente bajas.

Al diseñar con fuerzas extremadamente bajas se espera que la estructura no colapse ante un terremoto de esta naturaleza pero si va a tener cierto grado de daño en los elementos estructurales y mayor daño en los elementos no estructurales por eso se diseñó por ductilidad, para que la estructura sea capaz de ingresar en el rango no lineal en forma adecuada. Pero los dueños de los apartamentos de un edificio desconocen la filosofía de diseño y no aceptan ningún tipo de daño, de tal forma que cuando ven paredes dañadas y que algunas vigas se han fisurado piensan que el edificio no sirve y simplemente han aceptado informes en que les recomiendan derrocar el edificio. Aguiar, (2017).

Si no se quiere daño en la estructura, se debe diseñar con aisladores sísmicos, como es el caso del nuevo hospital de Quinindé pero hay que hacerlo bien y eso implica empezar realizando un estudio de peligrosidad sísmica y un buen estudio de suelos.

En base a los registros de las aceleraciones se obtuvo integrando registros de velocidades y de desplazamientos. Con los últimos son muy interesantes los gráficos que muestran la trayectoria del desplazamiento durante el terremoto de 2016; en la figura 4 a, se tiene para Pedernales y en la figura 4 b, para Manta. El PGD (desplazamiento máximo) de manta es 29.2 cm, y el de

Pedernales 25.2 cm. Estas cantidades, se debe tener muy en cuenta, ya que los aisladores deben estar en capacidad de desplazarse más de las cantidades indicadas.



**Figura 4** Resultantes de desplazamiento hallados con los registros de las estaciones de: a) Pedernales; b) Manta. Fuente: Malhotra (2016)

Se había indicado que el terremoto de 2016, se puede considerar como el *sismo de diseño*. Ahora bien el *sismo máximo considerado* se puede considerar que es igual a 1.5 veces el sismo de diseño. Por lo tanto, al multiplicar los desplazamientos PGD indicados en la figura 4 por 1.5, se encuentra a groso modo que el desplazamiento lateral para el sismo máximo considerado es del orden de 45 cm. Por lo tanto, los aisladores deben tener una capacidad mínima de desplazamiento lateral de 45 cm.

### 3. RESULTADOS ESPERADOS DE UN ESTUDIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

Los estudios de peligrosidad sísmica suelen terminar con la curva de peligrosidad sísmica que permite obtener espectros de peligro sísmico uniforme para los períodos de retorno que se requieran.

En este contexto, hay dos cosas que se deben tener en cuenta, la primera es que para calcular la peligrosidad se debe seleccionar una o varias ecuaciones de movimientos fuertes que antes solían llamarse leyes de atenuación del movimiento del suelo. Existe gran preocupación a nivel mundial en mejorar año a año estos modelos con los nuevos sismos que se van registrando en diferentes sitios del planeta, lo que permite tener mayor conocimiento de causa. No es exageración indicar que año a año los mismos autores van perfeccionando sus ecuaciones de movimientos fuertes basta ver los trabajos de: Campbell y Borzognia (2013); Campbell y Borzognia (2014); Chiu B., Youngs R., (2013); Chiu B., Youngs R., (2014), entre otros.

Estos modelos de movimientos fuertes, presentan tablas para diferentes períodos, para obtener leyes de atenuación del movimiento del suelo o para obtener espectros de respuesta elásticos para 5% de amortiguamiento. Son los datos de estas tablas los que van cambiando conforme se registra un nuevo sismo en el mundo y no cambian en todas las tablas o en todos los períodos, no, pero son cambios mínimos que uno debe ir actualizando la nueva información.

En Douglas (2016) se encuentra una lista de la gran cantidad de modelos que existen en el mundo sobre ecuaciones de movimientos fuertes, de esa gran lista se debe seleccionar el modelo o los modelos que se van a utilizar en el estudio de peligrosidad sísmica, para ello se fija previamente algunos criterios de selección. En el caso de estructuras con aisladores sísmicos uno de los criterios es que la base de datos llegue hasta períodos de 5 segundos y esto no es fácil ya que la mayor parte de modelos tienen datos para obtener espectros hasta 3 segundos.

Las estructuras con aisladores sísmicos tienen un período fundamental que está alrededor de los 2.5 segundos para el *sismo de diseño*,  $T_{DE}$  y un período mayor para el *sismo máximo considerado*,  $T_{MCE}$ . Por lo tanto, las ecuaciones de movimientos fuertes que se seleccionen deben tener datos hasta los 5 segundos.

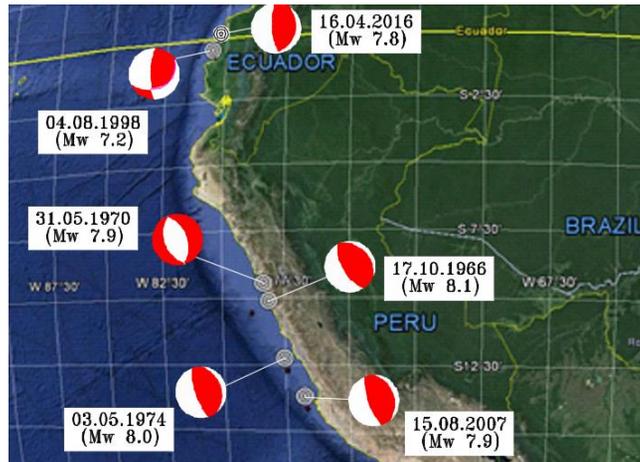
En base a los espectros obtenidos del estudio de peligrosidad sísmica se deben encontrar acelerogramas con los cuales se va a encontrar la respuesta no lineal de la estructura con aisladores sísmicos (parece ser que lo que se indica es válido solo para estructuras con aisladores, no, es válido para cualquier tipo de estructura en que se desea realizar un muy buen diseño ingenieril, que incluya hallar la respuesta no lineal).

Los sismos que se seleccionen para ser utilizados en el diseño del Hospital de Quinindé, tienen que ser compatibles con la tectónica de placas del País y para ello que mejor utilizar registros de sismos ocurridos en el Ecuador y Perú. Esto llamará la atención de algunos Proyectistas que piensan que mejor es utilizar sismos registrados en los Estados Unidos porque provienen de un País desarrollado pero esta idea es incorrecta porque esos responden a una tectónica diferente a la de Ecuador.

Se decidió trabajar con dos sismos de Ecuador, que son el de Bahía de Caráquez de 1998 (magnitud 7.2) cuyo registro de aceleraciones fue obtenido en Guayaquil y con el terremoto de Pedernales de 2016 (magnitud 7.8) con los registros hallados en: Portoviejo, Manta, Chone y Pedernales. Es decir, de Ecuador se está trabajando con registros de 5 estaciones y al considerar que en cada estación se tienen dos componentes (NS y EW) se tiene un total de 10 registros.

De igual manera, se decidió trabajar con 4 sismos de Perú y son los registrados en 1966 (magnitud 8.1) causó gran daño en Lima y Callao, fallecieron 220 personas y 1800 heridos, se registró a las 16h21; el sismo de 1970 (magnitud 7.9) generó la avalancha de Ancash que dejó 25000 muertos, nunca se sabrá la cifra exacta de fallecidos; el sismo de 1974 (magnitud 8.0) se registró a las 9h21 en un día no laborable, hubo gran daño desde Lima hasta Pisco, fallecieron 252 personas y 3600 heridos. Nótese que en Perú se dieron tres terremotos de

magnitud comprendida entre 7.9 y 8.1, cada 4 años, la población esperaba otro sismo en 1978, ventajosamente no se dio, se registró 33 años después en 2007 (magnitud 7.9) que destruyó varias poblaciones, a este sismo se le conoce con el nombre del terremoto de Pisco, debido a que destruyó esta ciudad, prácticamente terminó con todas las construcciones de adobe, parecía una ciudad después de una guerra, el terremoto se produjo a las 18h40 (hora local) y perdieron la vida 595 personas y 2291 heridos.



**Figura 5** Sismos considerados que serán considerados en el diseño sísmico de Hospital de Quinindé.

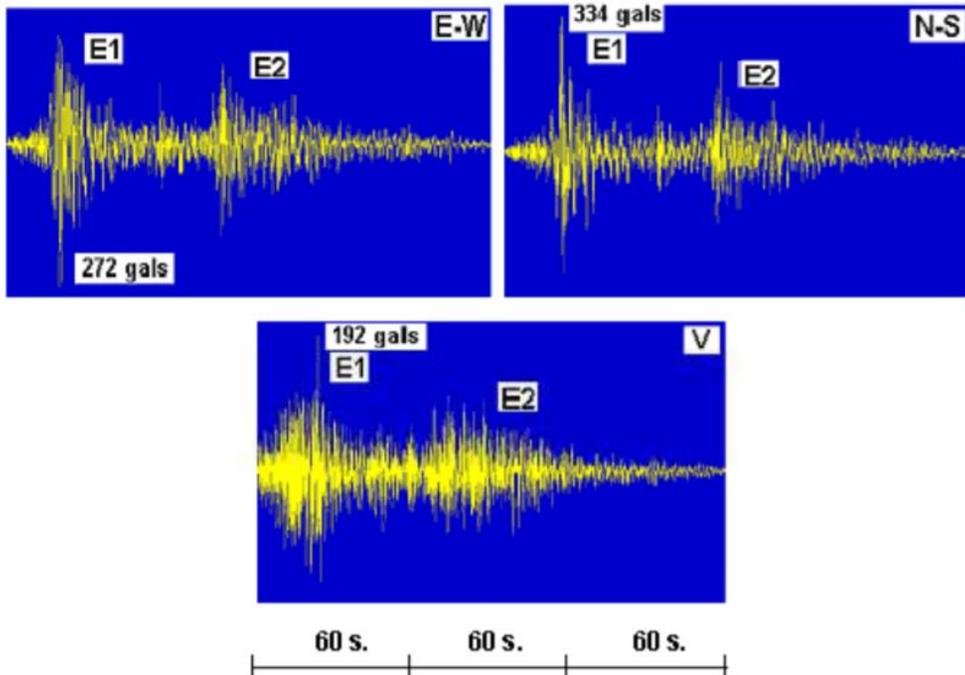
En la figura 5 se presentan los sismos que han sido considerados, en el estudio, se indica también su mecanismo focal. Todos estos sismos son interplaca de bajo ángulo de buzamiento, que tienen características especiales, la primera es que son sismos largos, el de Ecuador de 2016, duró 50 segundos, el de Perú de 2016 duró 175 segundos, para tener una idea de la duración de los mismos. Algunos de estos sismos han presentado dos fases intensas, como sucedió con el de Ecuador de 1998 y el de Perú de 2007.

Dos fases intensas, significa que se registró el terremoto y cuando parecía que estaba terminándose nuevamente volvió a mover la tierra como si fuera un nuevo terremoto; en la figura 6 se observan los registros de aceleraciones del suelo del terremoto de Pisco de 2007, obtenidos en la ciudad de Ica, en un perfil de suelo tipo D. En el terremoto de Ecuador de 2016, se tuvo una sola fase pero de larga duración.

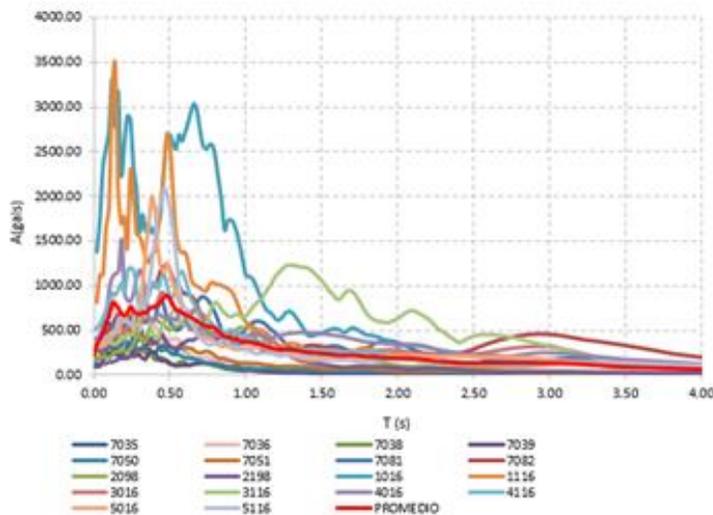
Si la magnitud es mayor a 7.8, los sismos interplaca de bajo ángulo de buzamiento (tipo thrust) causan daño en sitios bastante lejanos (En el sismo de 2016 de Ecuador, se tuvo mucho daño en Manta y Portoviejo, situados a más de 170 km, de la zona epicentral).

Para los sismos, cuyo epicentro se ha indicado en la figura 5, se deberá encontrar la respuesta no lineal del Hospital de Quinindé con aisladores sísmicos. Ahora bien si con los registros obtenidos se encuentran sus espectros de respuesta elásticos para 5% de amortiguamiento, se tiene las espectros indicados

en la figura 7, se aprecia que para un período  $T = 0$  s, las ordenadas espectrales empiezan en diferentes valores (PGA).



**Figura 6** Registro de aceleraciones en la ciudad de Ica, durante el sismo de Pisco de 2007. Fuente: Aguiar (2010)



**Figura 7** Espectros de respuesta elástica de aceleraciones de sismos considerados y espectro promedio.

Para la identificación de los registros de Ecuador, se utilizó la siguiente nomenclatura, el primer dígito define la ciudad, el segundo la componente del

movimiento del suelo y los dos restantes dígitos corresponde a los dos últimos números del año en que fue registrado el sismo.

Para las ciudades se identifica con 1 para Pedernales; 2 Bahía; 3 Chone; 4 Manta; 5 Portoviejo. Ahora, para la dirección es 0 para la componente E-W; 1 para la componente N-S. Con esta acotación en la tabla 1, se indican los sismos utilizados.

**Tabla 1** Identificación de registros de aceleración del suelo.

Código	Lugar	Comp.	Fecha	Magnitud
2098	Ecuador-Bahía de Caráquez	EW	04/08/1998	7.2
2198	Ecuador-Bahía de Caráquez	NS	04/08/1998	7.2
1016	Ecuador-Pedernales	EW	16/04/2016	7.8
1116	Ecuador-Pedernales	NS	16/04/2016	7.8
3016	Ecuador-Chone	EW	16/04/2016	7.8
3116	Ecuador-Chone	NS	16/04/2016	7.8
4016	Ecuador-Manta	EW	16/04/2016	7.8
4116	Ecuador-Manta	NS	16/04/2016	7.8
5016	Ecuador-Portoviejo	EW	16/04/2016	7.8
5116	Ecuador-Portoviejo	NS	16/04/2016	7.8
7035	Perú-Huacho	EW	17/10/1966	8.1
7036	Perú-Huacho	NS	17/10/1966	8.1
7038	Perú-Chimbote	EW	31/05/1970	7.9
7039	Perú-Chimbote	NS	31/05/1970	7.9
7050	Perú-Lima	EW	03/05/1974	8.0
7051	Perú-Lima	NS	03/05/1974	8.0
7081	Perú-Ica	EW	15/08/2007	7.9
7082	Perú-Ica	NS	15/08/2007	7.9

#### 4. ESTIMACIÓN PROBABILISTA DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN QUININDÉ

La concepción probabilista de la peligrosidad sísmica permite hacer estimaciones de las curvas de peligrosidad y los espectros de peligrosidad uniforme considerando la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno ( $Y$ ), como resultado de la acción de terremotos en un área de influencia durante un período de tiempo especificado ( $t$ ). Matemáticamente, la peligrosidad  $H$  queda definida por la expresión (1).

$$H = P [y > Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E] \quad (1)$$

Donde  $Y$  es el nivel de movimiento cuya probabilidad de excedencia se evalúa, en el emplazamiento  $E$  (Quinindé), y  $t$  es el periodo de exposición o intervalo de tiempo durante el cual se calcula la probabilidad de que se produzca. Para este estudio la peligrosidad se estima para un periodo de  $t=50$  años, suponiendo una probabilidad de excedencia del 10, 5 y 2 %, lo que corresponde con periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.

Para ello debe partirse de una modelización de todas las fuentes sísmicas activas que pueden afectar al emplazamiento de estudio. Éstas son las fuentes

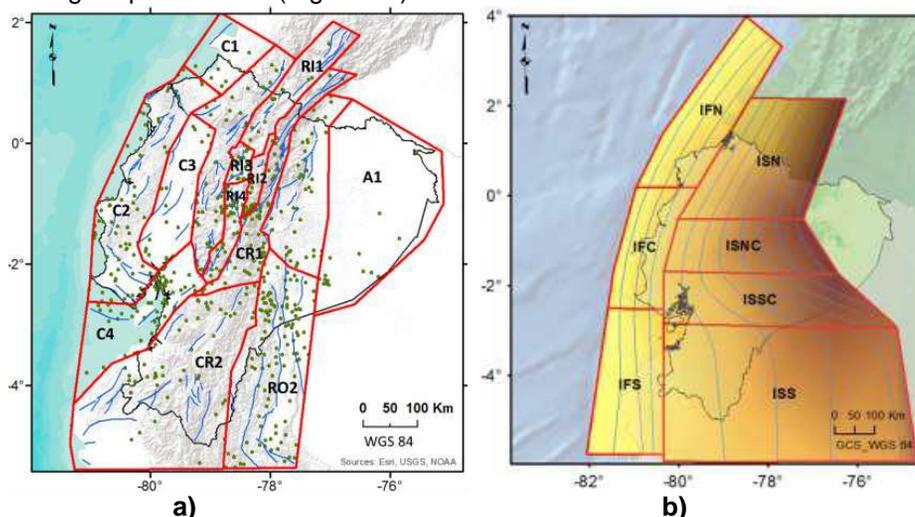
de cortical, relacionadas con los sismos superficiales asociados a las fallas de la corteza, y las fuentes de subducción, relacionadas con los grandes sismos de subducción interfase y los sismos profundos de subducción intraplaca.

Además, se debe seleccionar un conjunto de ecuaciones de predicción del movimiento fuerte que ayuden a entender cómo puede atenuarse la onda sísmica desde la fuente al emplazamiento. Finalmente, también debe incluirse en el cálculo la respuesta del suelo o efecto que tendrán las características geotécnicas del suelo que se encuentra debajo de la estructura en las aceleraciones que se registren en el emplazamiento.

#### 4.1. Fuentes sísmicas

Para este estudio se ha considerado la zonificación sismogénica publicada en Parra (2016), donde el autor establece una zonificación diferente para los 3 regímenes tectónicos de Ecuador.

Para el caso de las fuentes de Cortical, se diferencian 14 zonas que cubren todo el territorio nacional y que corresponden con los sismos que se generan en la corteza continental debido a las fallas superficiales activas (Figura 8a). Para las fuentes de Subducción Interfase, se identifican 3 zonas sismogénicas que corresponden con la actividad sísmica asociada a la zona de subducción más superficial, caracterizada por generar los megaterremotos ( $M > 8.0$ ) con mecanismo inverso que suelen generarse a lo largo del Cinturón Circumpacífico (Figura 8b). Y para las fuentes de Subducción Intraplaca, se identifican 4 zonas sismogénicas que corresponden con la actividad sísmica asociada a la zona de subducción más profunda (a partir de 40 km de profundidad), caracterizada por generar terremotos de magnitud moderada y alta, pero a gran profundidad (Figura 8b).



**Figura 8.** Geometría de la zonificación sísmica de cortical (a), interfase e intraplaca (b) (Parra, 2016)

En la Tabla 2 se muestran los modelos de recurrencia sísmica estimados en Parra (2016) para las fuentes de cortical y subducción, respectivamente. En

todas las zonas se ajustó un modelo de GR a partir del catálogo de eventos sísmicos. Como puede observarse, para dos zonas de cortical (C2 y C4) y dos zonas de subducción interfase (IFN e IFC) se realizó un ajuste con dos pendientes en diferentes magnitudes.

**Tabla 2.** Parámetros de ajuste de la recta Gutenberg-Richter (GR) (Parra, 2016)

Zona	Código	Mmin	Mmax	N(Mmin)	$\beta$
<i>Cortical</i>					
Región Amazónica	A1	4.0	5.0	0.38	2.43
Costa 1	C1	4.0	5.9	0.32	1.99
Costa 2 <sup>a</sup>	C2A	4.0	4.8	2.54	2.96
Costa 2B	C2B	4.9	6.8	0.27	1.59
Costa 3	C3	4.0	7.0	0.68	3.03
Costa 4 <sup>a</sup>	C4A	4.0	4.6	1.82	3.33
Costa 4B	C4B	4.7	6.9	0.24	2.30
Western Cordillera	CO1	4.0	6.7	1.31	2.88
Cordillera Real 1	CR1	4.0	6.8	1.51	1.86
Cordillera Real 2	CR2	4.0	6.9	1.55	3.45
Región Interandina 1	RI1	4.0	6.9	0.26	0.98
Región Interandina 2	RI2	4.0	5.8	0.62	3.77
Región Interandina 3	RI3	4.0	6.6	0.34	1.47
Región Interandina 4	RI4	4.0	6.7	0.60	1.60
Región Oriental 1	RO1	4.0	6.8	1.40	2.83
Región Oriental 2	RO2	4.0	7.1	2.95	2.15
<i>Interfase</i>					
Interfase Norte A	IFN_A	4.0	5.9	6.61	1.87
Interfase Norte B	IFN_B	6.0	8.8	0.14	1.00
Interfase Centro A	IFC_A	4.0	5.3	4.48	2.09
Interfase Centro B	IFC_B	5.4	7.9	0.24	1.30
Interfase Sur	IFS	4.0	7.5	6.21	1.87
<i>Interfase</i>					
In-slab Norte	ISN	4.0	7.2	0.69	1.54
In-slab Norte Centro	ISNC	4.0	7.0	2.65	1.64
In-slab Sur Centro	ISSC	4.0	7.5	4.44	1.82
In-slab Sur	ISS	4.0	7.7	6.41	1.67

#### 4.2. Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte

Con respecto a la caracterización de la atenuación de la onda, donde se modela el comportamiento de las ondas sísmicas desde la fuente al emplazamiento de estudio, lo habitual es emplear ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (GMPEs - *Ground Motion Prediction Equation*) empíricas. Lo ideal es poder desarrollar un modelo propio de cada zona con una base de datos de registros acelerométricos instrumentales. En regiones donde no se dispone de suficientes datos como para obtener un modelo con suficiente robustez, lo usual es emplear un modelo desarrollado para otra zona con afinidad tectónica y sísmica al área de estudio.

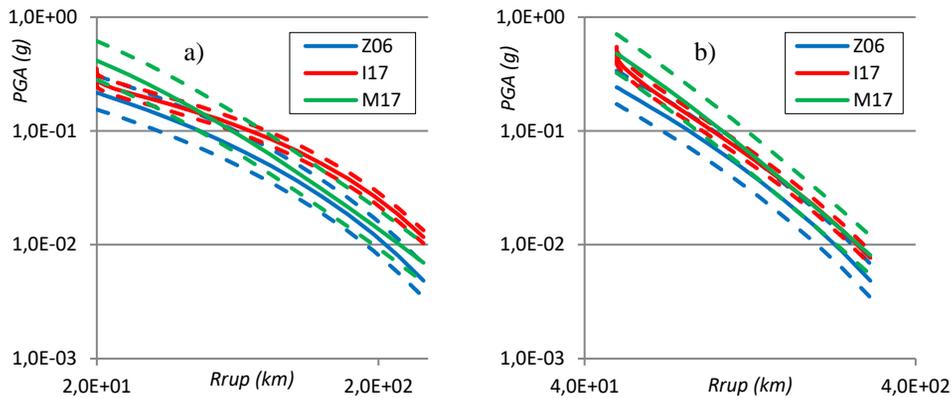
En la actualidad, la literatura científica ofrece un gran número de estos modelos empíricos, de amplia robustez, para ser aplicados en estudios de peligrosidad sísmica dependiendo del régimen tectónico en el que han sido desarrollados y los rangos de magnitud y distancia que cubren. Si se analizan los modelos para zonas de subducción que se han desarrollado en los últimos 10 años en diferentes partes del mundo pueden identificarse algunos modelos desarrollados a partir de datos de Japón (Zhao *et al.* 2006; Morikawa and Fujiwara, 2013 y Ghofrani and Atkinson, 2014); de datos de Taiwán (Lin and Lee, 2008); de Nueva Zelanda (McVerry *et al.* 2006); de México (Jaimes *et al.* 2006, 2015; Arroyo *et al.*, 2010) o de Chile (Montalva *et al.* 2017 y Idrini *et al.* 2017) entre otros.

La selección del modelo más idóneo para emplear en un estudio depende de las características de cada región y el régimen tectónico asociado. En este sentido, Cotton *et al.* (2006) y Bommer *et al.* (2010) muestran algunos criterios a tener en cuenta para seleccionar los modelos más idóneos para cada región, entre ellos cabe destacar que:

- El modelo se derive de un ambiente tectónico similar al de la zona de aplicación.
- El conjunto de datos utilizado para obtener el modelo se presente en un formato accesible para su uso; el requisito mínimo sería una tabla con los terremotos y sus características, junto con el número de registros de cada evento.
- El modelo proporcione predicciones espectrales para una gama amplia de los períodos de respuesta, es este acaso, se necesitan modelos que predigan como mínimo aceleraciones asociadas a un periodo de 5 segundos.
- La forma funcional sea completa en cuanto a variables o dependencias no lineales de la magnitud.
- El rango de aplicabilidad del modelo sea lo suficientemente amplio como para no recurrir a las extrapolaciones o, al menos, limitarlas lo máximo posible.

De acuerdo a los criterios anteriores, para este estudio se ha seleccionado el modelo desarrollado con datos japoneses de Zhao *et al.* (2006) (Z06), que ofrece ecuaciones para sismos de cortical y subducción interfase e intraplaca, y los últimos modelos chilenos de subducción, Montalva *et al.* 2017 (M17) y Idrini *et al.* 2017 (I17), por su proximidad y semejanza al área de estudio.

En la Figura 9 se muestran las aceleraciones PGA (g) predichas por los dos modelos ( $\mu \pm \sigma$ ) para un sismo de magnitud Mw7.0 a diferentes distancias en Interfase e intraplaca.



**Figura 9.** Curvas de atenuación predichas por los tres modelos para un sismo de 7.0, a) para un sismo de interfase a 20 km de profundidad y b) para un sismo de interplaca a 50 km de profundidad.

### 4.3. Efecto de sitio

Se denomina efecto de sitio o efecto local a la modificación de la amplitud, duración y contenido frecuencial de la onda sísmica debido al tipo de suelo que hay en un emplazamiento de estudio. Ésta variación en la onda dependerá de las características geotécnicas del suelo, un suelo duro (tipo roca) generará poco efecto de sitio, mientras que un suelo blando (tipo arcillas o limos) generará un mayor efecto. La estimación de este efecto es de gran relevancia, sobre todo cuando tenemos zonas con grandes cuencas sedimentarias.

El parámetro que suele emplearse para caracterizar la dureza o no del suelo es la  $V_{s30}$  (Velocidad de la onda de cizalla en los 30 m primeros de suelo), cuanto más duro sea el suelo mayor será la velocidad y, viceversa, cuanto más blando sea el suelo menor será la velocidad a la que viaja dicha onda. A partir del valor de la  $V_{s30}$  o una clasificación posterior que se haga del tipo de suelo, se deben asignar factores de amplificación para cada aceleración espectral.

De todas las clasificaciones y factores de amplificación propuestos en la literatura, la clasificación del National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP 2003, NEHRP 2009) son las más utilizadas y ampliamente valoradas.

El NEHRP 2009 propone una clasificación del suelo en 5 categorías diferentes, que oscilan desde roca dura (A), con velocidades de  $V_{s30}$  superiores a 1500 m/s, hasta suelos muy blandos (E), con velocidades de  $V_{s30}$  inferiores a 180 m/s (Tabla 3).

**Tabla 3** Clasificación de suelos del NHERP, 2009 a partir de los valores de  $V_{s30}$

Categoría	$V_{s30}$
A	$V_{s30} > 1500$ m/s
B	$760$ m/s $< V_{s30} \leq 1500$ m/s
C	$360$ m/s $< V_{s30} \leq 760$ m/s
D	$180$ m/s $< V_{s30} \leq 360$ m/s
E	$V_{s30} \leq 180$ m/s

Para estimar los espectros con este efecto se considerarán los factores de amplificación recomendados por el NEHRP, 2009 para PGA, cortos periodos y largos periodos del movimiento en función del valor de la aceleración en roca (Tabla 4).

**Tabla 4** Factores de amplificación para diferentes tipos de suelo, PGA y periodos cortos y valores de aceleración base en g

	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA PGA				
	PGA ≤ 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA CORTOS PERIODOS				
	Ss ≤ 0.25	Ss = 0.5	Ss = 0.75	Ss = 1.0	Ss ≥ 1.25
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA LARGOS PERIODOS				
	S1 ≤ 0.1	S1 = 0.2	S1 = 0.3	S1 = 0.4	S1 ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

Como puede observarse, el factor de amplificación para cada tipo de suelo (tanto para cortos como largos periodos) depende del valor de aceleración de entrada (sin aplicar el efecto de sitio), de forma que el factor de amplificación varía en función de este valor de aceleración de entrada. Para aquellos valores de aceleración intermedios, se propone una interpolación lineal para la obtención del factor de amplificación.

Para el caso de PGA y movimientos de cortos periodos el factor de amplificación varía de 0.8 a 2.5, siendo este valor máximo de 2.5 la amplificación que sufriría el tipo de suelo más blando para un movimiento con una baja aceleración. Para el caso de periodos largos, los factores de amplificación oscilan de 0.8 a 3.5.

#### 4.4. Implementación del cálculo

La peligrosidad sísmica se ha estimado en términos de los siguientes parámetros de movimiento: aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales SA referentes a 9 periodos estructurales T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 segundos, todas ellas expresadas en g. Estas aceleraciones representarán el movimiento esperado con probabilidad de excedencia del 10, 5 y 2 % en 50 años,

lo que se corresponde con los periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente, tal como establecen la mayor parte de las normativas relacionadas con el diseño sismorresistente de estructuras convencionales y de especial importancia.

Las aceleraciones resultantes serán estimadas en emplazamientos genéricos para suelo duro (categoría B en el NEHRP 2009 y NEC-15), considerando que en dichos emplazamientos debe calcularse posteriormente el efecto local atendiendo a esta aceleración de referencia. Posteriormente, se aplicarán los factores de amplificación propuestos por el NEHRP 2009 para obtener las aceleraciones en suelos categoría D. (Anexo 1)

El programa que se utilizará para desarrollar el cálculo probabilista de la peligrosidad será el Software libre CRISIS2012 v5.0 (Ordaz *et al.*, 2013).

Los modelos de movimiento fuerte son incorporados al cálculo por medio de un árbol lógico compuesto de tres ramas igualmente ponderadas (Tabla 5).

**Tabla 5** Combinación en un árbol lógico de los modelos de movimiento fuerte seleccionado para los tres regímenes tectónicos.

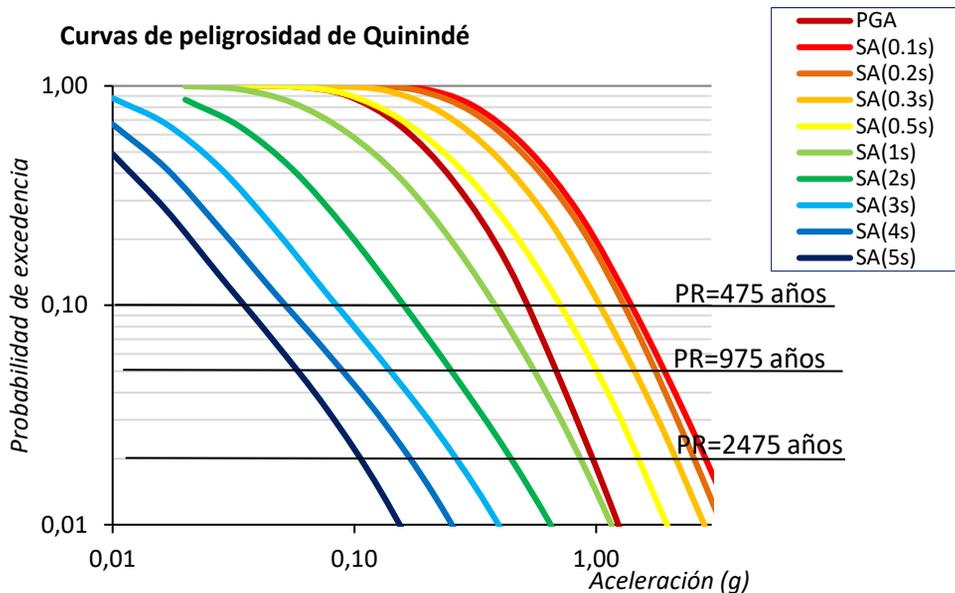
RAMA	CORTICAL	INTERFASE	INSLAB
Rama ZZZ	Z06	Z06	Z06
Rama ZMM	Z06	M17	M17
Rama ZII	Z06	I17	I17

## 4.5. Resultados de peligrosidad

Como resultados de peligrosidad se han estimado las curvas de peligrosidad, los espectros UHS para suelo tipo D y la desagregación de la peligrosidad donde puede identificarse qué sismo (M,R) contribuye más a la peligrosidad del emplazamiento.

### 4.5.1. Curvas de peligrosidad

Como resultado del estudio de peligrosidad en un emplazamiento se obtienen las denominadas curvas de peligrosidad, que expresan la probabilidad anual de excedencia de varios niveles del parámetro de movimiento en cuestión. Como el movimiento sísmico se puede representar mediante diversos parámetros, como la aceleración máxima del terreno (PGA) o las aceleraciones espectrales de periodo T (SA(T)), se pueden determinar para un mismo emplazamiento tantas curvas de peligrosidad como parámetros de movimiento se hayan estimado en los cálculos, en este estudio se obtendrán 10 curvas de peligrosidad para el emplazamiento (Figura 10). Es frecuente representar estas curvas en función del periodo de retorno, que se define como la inversa de la probabilidad anual de excedencia.



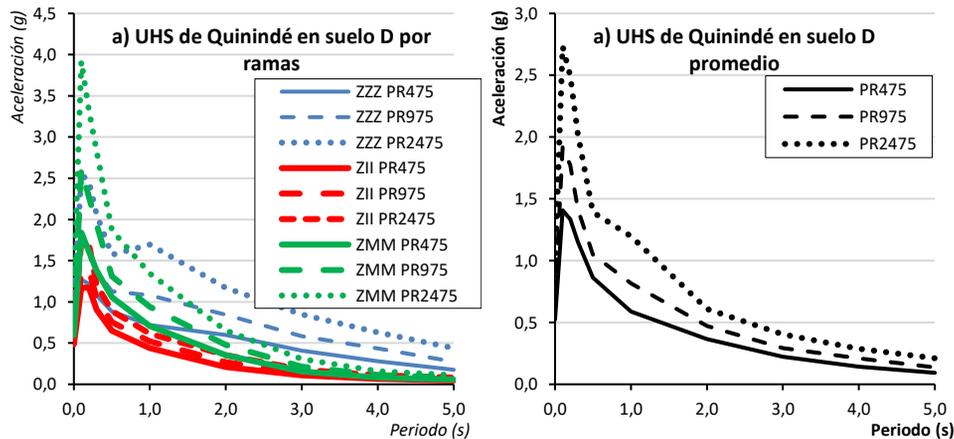
**Figura 10** Curvas de peligrosidad promedio en el emplazamiento de Quinindé para un suelo B (NEC15).

#### 4.5.2. Espectros UHS

Otro resultado de un estudio de peligrosidad, que se puede obtener cuando se calcula la probabilidad de excedencia de varios parámetros de movimiento (típicamente aceleraciones espectrales de diferentes periodos y PGA), es el denominado espectro de peligrosidad uniforme, o espectro UHS (del inglés *Uniform Hazard Spectrum*). El espectro UHS se construye punto a punto para un periodo de retorno prefijado, con valores de aceleración espectral (se considera que la PGA es la aceleración espectral de periodo igual a cero) para distintos periodos o frecuencias estructurales, todos ellos estimados para la misma probabilidad de excedencia.

Para incorporar el efecto de sitio en este cálculo, se considerará que el emplazamiento está ubicado en suelos de categoría D del NEHRP (2009). Para estimar los espectros con este efecto se considerarán los factores de amplificación recomendados por el NEHRP (2009) para PGA, cortos y largos periodos del movimiento en función del valor de la aceleración en roca (Tabla 5 y 6)

En la Figura 11 se muestran los UHS estimados para un suelo D (NEHRP, 2009) en el emplazamiento de Quinindé.



**Figura 11.** Espectros de peligrosidad uniforme (UHS) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años en el emplazamiento de Quinindé para un suelo D (NEC15). a) Espectros asociados a las ramas de cálculo. b) Espectros promedio de cálculo

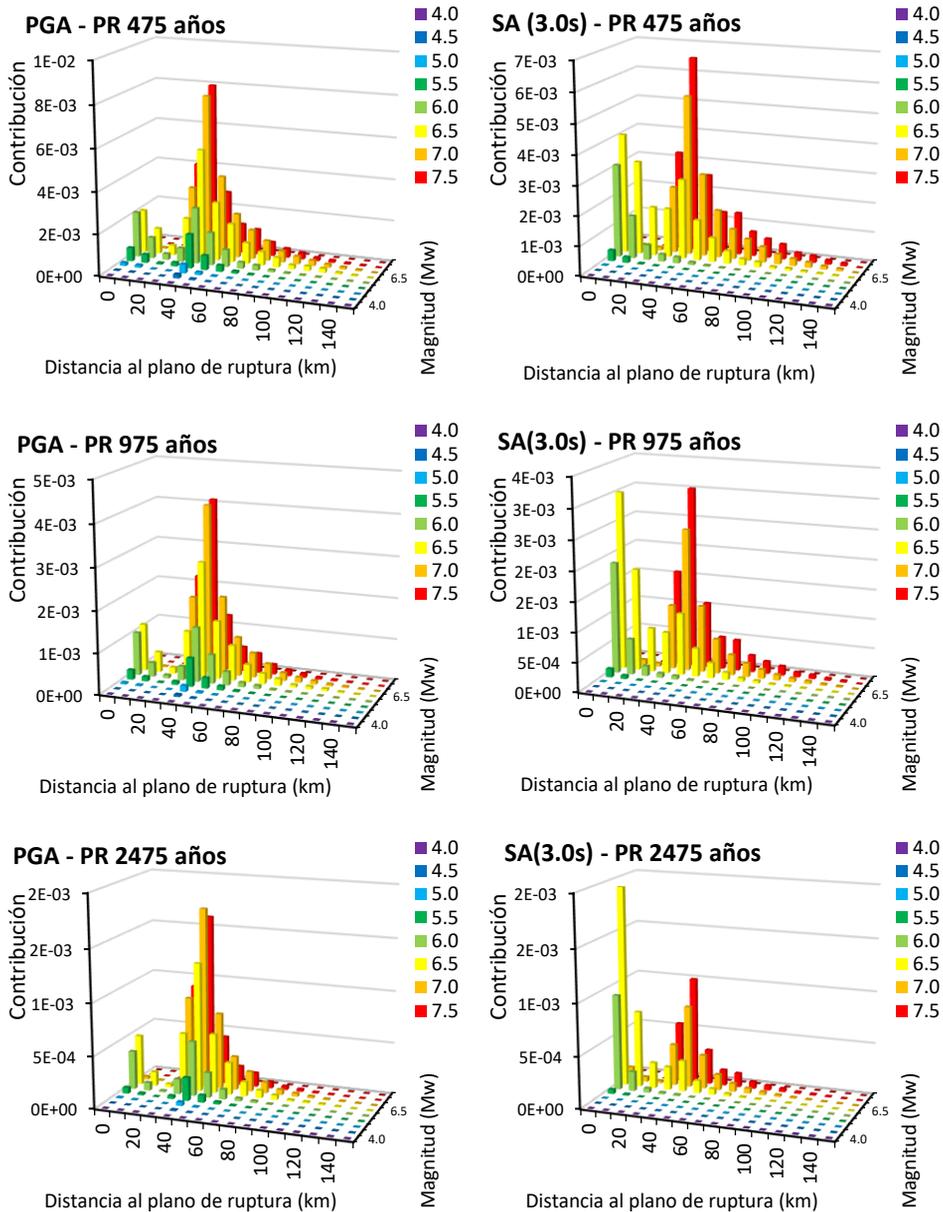
Como puede observarse, la rama que mayor peligrosidad ofrece en la zona de estudio es la ZMM para cortos periodos (inferiores a 1.0 seg) y la rama de ZZZ para los largos periodos (iguales o superiores a 1.0 seg). Manteniéndose la rama ZII como la menos conservadora en todo el espectro. En el Anexo 2, se indica los valores de los espectros indicados en la figura 11b, que son los espectros resultantes para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.

#### 4.5.3. Desagregación de la peligrosidad

Las curvas de peligrosidad y el espectro UHS, como resultado de la evaluación probabilista de la peligrosidad, representan la probabilidad de excedencia de un nivel del movimiento del suelo a causa de la ocurrencia de terremotos en cualquiera de las fuentes sísmicas modelizadas cercanas al sitio. Por lo tanto, integran la acción de todas las fuentes que puedan presentar excedencia de un determinado movimiento en el emplazamiento en cuestión. Sin embargo, estas curvas no dan información específica sobre las características del sismo (tamaño y localización) que con mayor probabilidad causará la excedencia del movimiento de referencia en el emplazamiento.

En este sentido, la desagregación de la peligrosidad tiene como objetivo identificar que terremoto, denominado sismo de control, está contribuyendo más a la excedencia del movimiento en cuestión. Para ello, se realiza una descomposición de la peligrosidad total en contribuciones parciales, identificando que combinación magnitud-distancia está contribuyendo más a la excedencia del movimiento total. Con ello se logra identificar escenarios sísmicos asociados a las probabilidades de los movimientos que generan.

Para esta aplicación, se ha desarrollado la desagregación de la peligrosidad en los dos emplazamientos de estudio, para dos niveles de aceleración asociados a los periodos de vibración corto (PGA) y largos (SA(3.0s)) periodos y los tres periodos de retorno (475, 975 y 2475 años) (Figura 12).



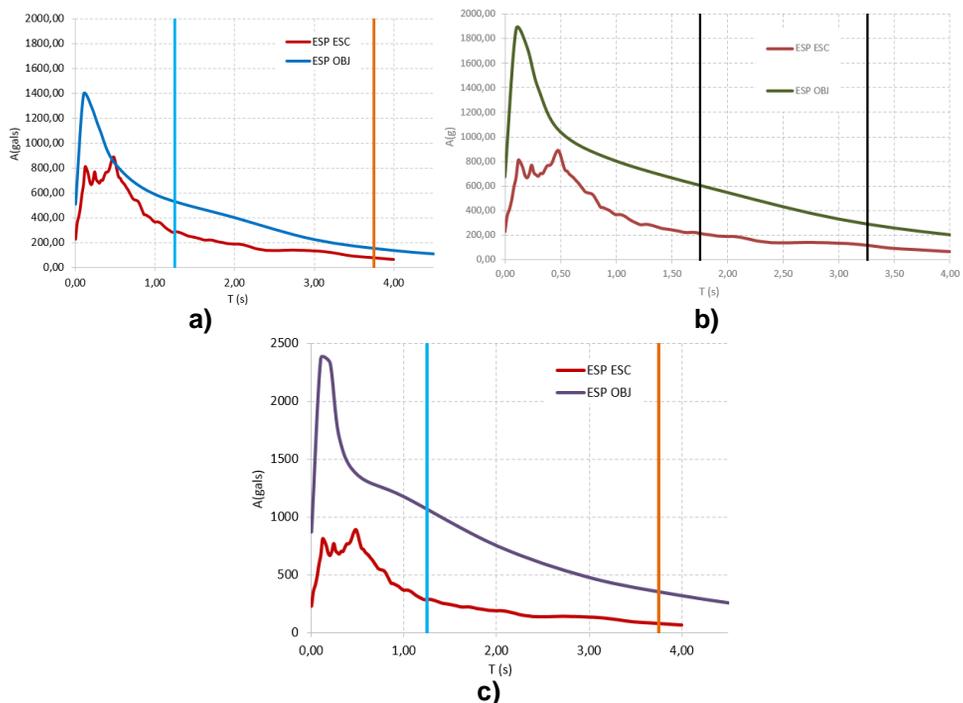
**Figura 12.** Gráficas de desagregación obtenidas en el programa de cálculo CRISIS para periodos cortos y lagos en el emplazamiento de Quindé, considerando los tres periodos de retorno, en la rama ZMM.

Los resultados de la desagregación muestran que para el emplazamiento de Quindé, para PGA y periodos largos SA(3.0s), el sismo de control corresponde, en su mayoría, con un terremoto de magnitud 7.5 a una distancia entre 40 km del plano de ruptura. Se aprecia otra contribución importante asociada a un sismo de control de 6.0-6.5 a corta distancia (aproximadamente 10 km), esta contribución es especialmente relevante para los periodos largos. La primera de las contribuciones, (M,D)=(7.5,40), está asociada a una fuente de subducción

interfase, mientras que la segunda contribución,  $(M,D)=(6.0,10)$ , está asociada a una fuente cortical.

## 5. ESCALAMIENTO DE SISMOS

En la figura 5 se indicó los sismos que van a ser considerados para encontrar la respuesta no lineal del Hospital de Quinindé, con aisladores sísmicos y en la figura 7 se presentan los espectros de respuesta elástica de cada uno de ellos y el espectro promedio. Por otra parte en la figura 11 b, se presentan los espectros encontrados en el estudio de peligrosidad sísmica para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.



**Figura 13** Espectro a escalar (ESP ESC) y espectros encontrados en estudio de peligrosidad sísmica (ESP OBJ); a) Espectro objetivo para 475 años; b) Espectro objetivo para 975 años; c) Espectro objetivo para 2475 años.

En la figura 13, se presentan los espectros de peligro sísmico uniforme encontrados en el estudio para períodos de retorno de: 475, 975 y 2475 años (identificados como ESP OBJ) también se indican el espectro promedio de la figura 7.

Los registros de aceleraciones del suelo, con los que se halló el espectro promedio deben multiplicarse por algunos factores para que el espectro promedio resultante sea mayor o igual (estrictamente es solo mayor) que el espectro hallado en el estudio de peligrosidad sísmica (ESP OBJ). Pero debe ser mayor en un intervalo de períodos.

Para estructuras con aisladores sísmicos el ASCE 10, recomienda que el intervalo se encuentre entre:

$$0.5 T_{DE} \leq T \leq 1.25 T_{MCE} \quad (2)$$

Donde  $T$  es el período;  $T_{DE}$  es el período de la estructura con aisladores asociado al sismo de diseño;  $T_{MCE}$  es el período asociado al sismo máximo considerado. Se estima que  $T_{DE} = 2.5 \text{ s}$ ;  $T_{MCE} = 3.0 \text{ s}$ . (Con los sismos encontrados en el estudio de peligrosidad sísmica se diseñó los aisladores y se encontró que los períodos para los sismos indicados están alrededor de los valores indicados). Las líneas verticales que se encuentran en los espectros de la figura 13, definen el rango de períodos en los que se debe escalar el espectro promedio de los sismos considerados.

Existen algunos modelos de escalamiento de sismos; se decidió trabajar con el propuesto por el ASCE-10 (NIST, 2011), teniendo en cuenta los resultados de la desagregación (Estudio de Peligrosidad Sísmica) en que se indica que el probable sismo tiene magnitud de 7.5 y la fuente se encuentra a una distancia de 40 Km. Por esto se seleccionaron solo sismos de subducción de bajo ángulo de buzamiento. Quinindé no se encuentra a menos de 10 km., de la fuente por lo que no es necesario trabajar con registros longitudinal y transversal a la falla, se trabaja con la componente E-W y N-S, de los registros.

Se trabaja con el modelo de Promedios ponderados en que básicamente se determinan dos factores denominados  $F_j$ ,  $y$ ,  $F_1$

$$F_j = \frac{\sum_1^n W_i * A(T_i) * \sqrt{Ax^2(T_i) + Ay^2(T_i)}}{\sum_1^n W_i * (Ax^2(T_i) + Ay^2(T_i))} \quad (3)$$

Donde  $W_i$  son los pesos;  $A(T_i)$  es la aceleración del espectro objetivo para el período  $T_i$ ;  $Ax^2(T_i)$  es la aceleración del espectro promedio a escalar de la componente E-W, en el período  $T_i$ ;  $Ay^2(T_i)$  es similar al anterior pero de la componente N-S;  $n$  es el número de sismos considerados. Vale la pena aclarar la variable  $n$ , para estudio es igual a 9, a pesar de que se está trabajando con 6 sismos, la razón es que para el terremoto de Ecuador de 2016, se están considerando los registros de 4 estaciones.

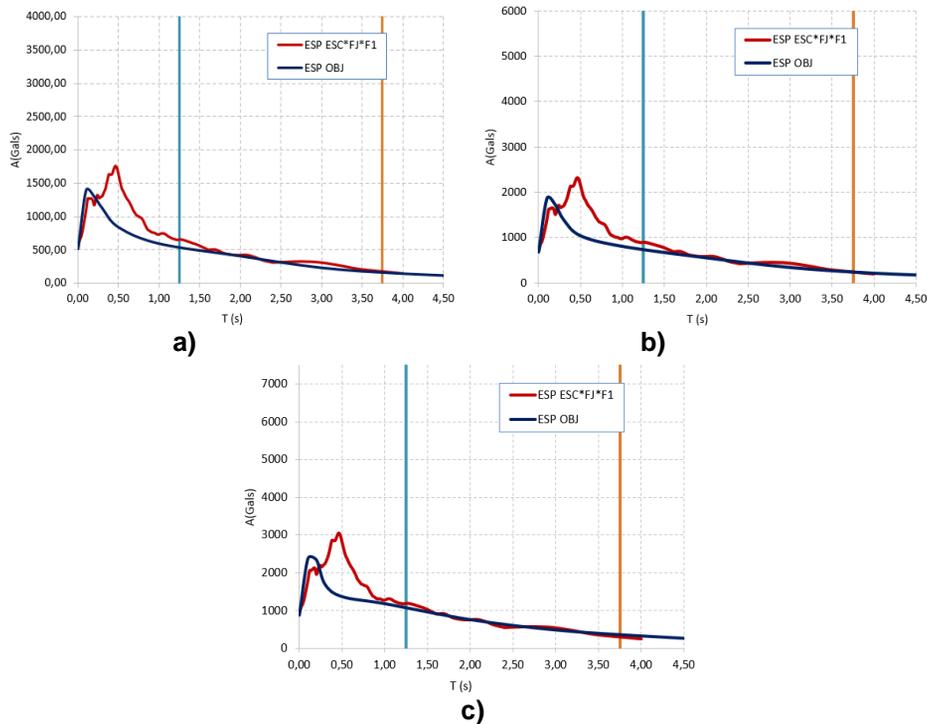
En este estudio, para los pesos  $W_i$  se decidió trabajar con 4 períodos (se pudo considerar más puntos) que son: 0.2, 1.0, 2.0, y 3.0 segundos; los pesos  $W_i$  que se dieron fueron: 0.1, 0.1, 0.4 y 0.4. De tal manera que se dio mayor ponderación para las aceleraciones espectrales asociadas a los períodos de 2 y 3 segundos, debido a que en este rango se halla el período de vibración de la estructura con aisladores sísmicos. El factor de escalamiento  $F$ , se encuentra con la siguiente expresión.

$$F = F_j * F_1 \quad (4)$$

El factor  $F_1$  se determina para cada sismo pero observando la gráfica del espectro escalado que se tiene al multiplicar por  $F_j$ . El factor  $F_1$ , es tal que haga

cumplir que el espectro escalado final sea mayor que el espectro objetivo en el rango de interés.

En la figura 14, se presentan los espectros promedios escalados, se aprecia que ligeramente son mayores a los espectros objetivos. Alguien puede decir que el espectro escalado debe estar más arriba del espectro objetivo, numéricamente es muy fácil hacerlo pero con los resultados indicados para el espectro con período de retorno de 475 años, los registros de aceleraciones del sismo de Ecuador de 2016, que son muy altos se deben multiplicar por un número que está alrededor de 2; para 975 años se debe multiplicar por un valor aproximado de 2.5, y para 2475 años por un valor alrededor de 3.25.



**Figura 14** Espectro promedio escalado; a) Para período de retorno de 475 años; b) Para período de retorno de 975 años; c) Para período de retorno de 2475 años.

En la tabla 6, se indican los factores de escalamiento encontrados en el estudio. Se ha denominado EQ1 al sismo de Perú de 1966; EQ2 (Perú 1970); EQ3 (Perú 1974); EQ4 (Perú 2007); EQ5 (Ecuador 1998); EQ6 (Manta, Ecuador 2016); EQ7 (Chone, Ecuador 2016); EQ8 (Portoviejo, Ecuador 2016); Pedernales, Ecuador 2016).

**Tabla 6** Factores de escalamiento encontrados en el estudio.

Sismo	$T_r = 475$ años	$T_r = 975$ años	$T_r = 2475$ años
EQ1	3.20	3.50	3.70
EQ2	4.00	4.20	4.40
EQ3	3.10	3.60	4.00
EQ4	1.00	1.15	1.25
EQ5	1.71	2.09	3.26
EQ6	1.50	2.17	3.03
EQ7	1.89	2.71	3.77
EQ8	2.15	2.77	4.13
EQ9	0.55	1.00	1.25

## 6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Para cualquier Proyecto importante, es necesario realizar estudios de peligrosidad sísmica para poder determinar los espectros de diseño y máximo considerado, caso contrario no se realizará en forma adecuada el diseño a pesar de que se utilicen programas altamente sofisticados.

El estudio de peligrosidad sísmica realizado reportó tres espectros de aceleraciones, para la componente horizontal de movimiento del suelo, asociado a los siguientes períodos de retorno: 475, 975 y 2475 años.

Por otra parte, se seleccionaron seis sismos con 18 registros de aceleración del suelo, los mismos que han sido escalados a los espectros obtenidos en el estudio de peligrosidad sísmica y se han determinado factores de escalamiento por los cuales deberán multiplicarse los registros para realizar el análisis sísmico no lineal de la estructura del Hospital de Quinindé con aisladores sísmicos.

## REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Gregor N., and Addo K., (2016) "BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes", *Earthquake Spectra*.
2. 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.
3. Abrahamson N., Silva W., Kamai R., (2014), "Summary of the ASK14 ground motion relation for active cristal regions", *Earthquake Spectra*, **30 (3)**, 1025-1055.
4. Aguiar R., Andrango K., Araujo A., Aroca J., Arostegui M., Burbano A., Bustamante L., Calderón D., Calderón H., Cando D., Cevallos A., Chamorro M., Chipantiza K., Criollo D., Erazo J., Estacio S., Gaibor K., Guacho J., Hidalgo J., Luje D., Morejón E., Nacevilla L., Rueda J., (2017 a), "Comportamiento estructural de Edificios afectados por el terremoto de 2016 en Manta. Primera Parte", *Revista Ciencia*, **19, 3**, 237-261.

5. Aguiar R., Cevallos A., Sornoza M., Iglesias M., Loor E., López L., Salguero W., Quijije V., Pata K., Prado V., Bravo G., Chica G., Manner S., Briones A., Zambrano L., Ayala F., Cobeña E., Novoa M., Ostaíza K., Solórzano M., Villacrés B., Luzardo D., Zambrano E., Mero M., Mero R., Mero J., Intriago M., Castro D., (2017,1), "Comportamiento estructural de edificios afectados por el terremoto de 2016 en Manta. Segunda Parte", *Revista Ciencia*, **19 (3)**, 249-286.
6. Aguiar R., (2017), "No se acepta el diseño por ductilidad. Caso del Edificio Fragata que incursionó en el rango no lineal", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **22 (3)**, 327-391.
7. Aguiar R., (2011), *El mega sismo de Chile de 2010 y lecciones para el Ecuador*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, 177 pp.
8. Aguiar R., (2010), "Análisis de tres sismos interplaca tipo thrust registrados en: Chile 2010, Perú 2007 y Ecuador 1998", *Revista Sul-Americana de Engenharia Estructural*, **7, (3)**, 74-104.
9. Aguiar R. Torres M., Romo M., Caiza P., (1998), *El sismo de Bahía*, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, 125 pp.
10. Aguilar Z., (2016), *Aspectos sismológicos del terremoto de Muisne del 16/04/2016*, Conferencia dictada en el Colegio del Perú. Consejo Departamental de Lima. Capítulo de Ingeniería Civil, Lima.
11. Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14(4), 769-785.
12. ASCE/SEI 7-10 (2010), *Minimum design loads for buildings and other Structures*, American Society of Civil Engineers, 247 p.
13. Bommer, J. J., Douglas, J., Scherbaum, F., Cotton, F., Bungum, H., & Fäh, D. (2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 81(5), 783-793.
14. Bozorgnia y Campbell, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions. Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 85-123 p.
15. Campbell K., Bozorgnia Y., (2014), "NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra", *Earthquake Spectra*, **30 (3)**, 1087-1115
16. Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), *NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 75 p. University of California, Berkeley, CA.
17. Chou B., Youngs R, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions. Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 127-160 p.
18. Chou B., Youngs R., (2013), *Update of the Chou and Youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra*, *PEER Report 2013/07*, 105 p., Pacific

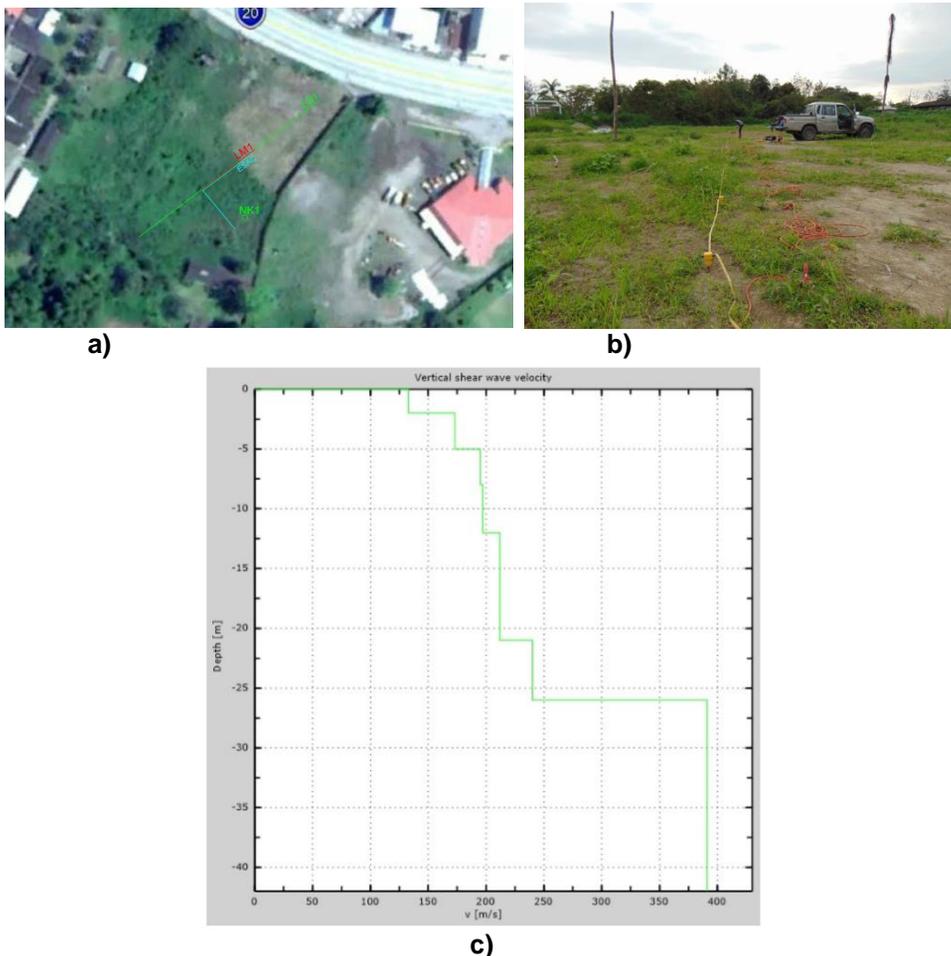
- Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
19. Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J., & Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, 10(2), 137-156.
  20. Douglas (2016), *Ground motion prediction equations 1964-2016*, [www.gmpe.org.uk/](http://www.gmpe.org.uk/)
  21. Geo & Geo (2017), *Prospección geofísica en el terreno para la construcción del nuevo hospital en Quinindé*, Geología, Geofísica y Geotecnia, 17 pp.
  22. Ghofrani, H., & Atkinson, G. M. (2014). Ground-motion prediction equations for interface earthquakes of M7 to M9 based on empirical data from Japan. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(2), 549-571.
  23. Gülerce Z., Kamai R., Abrahamson N., Silva W., (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions., Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 3-48p.
  24. Haendel A., Specht S., Kuehn N., and Scherbaum F., (2015), "Mixture of ground-motion prediction equations as backbone models for a logic tree: an application to the subduction zone in Northern Chile", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **13 (2)**, 483-501.
  25. Idini, B., Rojas, F., & Ruiz, S. (2017) Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bull Earthquake Eng.* 15: 1853.
  26. Jaimes, M. A., Ramirez-Gaytán, A., & Reinoso, E. (2015). Ground-Motion Prediction Model From Intermediate-Depth Intraslab Earthquakes at the Hill and Lake-Bed Zones of Mexico City. *Journal of Earthquake Engineering*, 19(8), 1260-1278.
  27. Jaimes, M. A., Reinoso, E., & Ordaz, M. (2006). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake. *Journal of earthquake engineering*, 10(06), 887-902.
  28. Lin, P. S., & Lee, C. T. (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 220-240.
  29. Malhotra P., (2016), *Ground motion records from M=7.8 Ecuador Earthquake of abril 16, 2016*, Strong Motions Inc.
  30. McVerry, G. H., Zhao, J. X., Abrahamson, N. A., & Somerville, P. G. (2006). New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 39(1), 1-58.
  31. Montalva, G., Bastías, N. & Rodriguez-Marek A. (2017). Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 107 (2): 901–911.

32. Morikawa, N., & Fujiwara, H. (2013). A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake. *Journal of Disaster Research*, **8** (5), 878-888.
33. NEC-15 (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción, SE-DS, Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*. 138 p. Quito.
34. NEHRP (2009), Council, B. S. S., (2009), *NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures*, Federal Emergency Management Agency.
35. NIST (2011), *Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses*, National Institute of Standards and Technology NIST. U.S. Department of Commerce.
36. Nocquet J., Jarrin P., Vallee M., Mothes P., Grandin R., Rolandone F., Yepes H., Font Y., Fuentes D., Régnier M., Laurendeau A., Cisneros D., Hernandez S., Sladen A., Singaicho J., Mora H., Gómez J., Montes L., and Charvis P., (2016), "Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales Earthquake", *Nature Geoscience*, **10** (2), 145-149.
37. Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V., and Maletti C., (2013), "CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment", *Seismological Research Letters*, **84** (3), 495-504.
38. Parra H., (2016), *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
39. Rodríguez M., (2017), *Interpretación de los daños y colapsos en edificaciones observadas en la ciudad de México en el terremoto del 19 de septiembre 2017*, Informe Preliminar, 20 pp, México.
40. Saragoni R., (2011), "El mega terremoto de Maule de 2010: una lección de buena ingeniería pero con sorpresas y nuevos desafíos", *Revista Anales, Séptima Serie* N. 1, 35-56, Chile.
41. Wesnousky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K. and Matsuda T. (1983). Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *Journal of Geophysical Research*. 88: 9331-9340.
42. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Ouchi T., Takahashi T., ... 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.

## ANEXO 1

### ESTUDIOS GEOFÍSICOS

En una línea sísmica LS1 (figura A 1 a) de 115 m, de longitud se colocaron 24 geófonos espaciados cada 5 m, (figura A 1 b) y se realizaron 7 shots (impactos) mediante voladura y se obtuvo las velocidades de la onda de corte indicadas en la figura A 1 c, con estos valores se halló que la velocidad de la onda de corte en los 30 primeros metros  $V_{s30} = 211 \text{ m/s}$ . De acuerdo a la clasificación de suelos del NEC-15, corresponde a un perfil de suelo tipo D.



**Figura A1** Estudio geofísico; a) Identificación de Línea Sísmica en el terreno del futuro Hospital de Quinindé; b) Instalación de 24 geófonos; c) Resultados de la velocidad de la onda de corte. Fuente: Geo & Geo (2017).

Por otra parte, aplicando el Método de Nakamura, se encontró que el período de vibración del suelo es 0.4 segundos. Geo & Geo (2017).

## ANEXO 2

### ACELERACIONES ESPECTRALES HALLADAS EN EL ESTUDIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA PARA HOSPITAL DE QUININDE EN SUELO TIPO D

**Tabla A2** Ordenadas Espectrales expresadas en función de la gravedad, para el sitio del Hospital de Quinindé.

$T$ (s)	$T_r = 475$ (g)	$T_r = 975$ (g)	$T_r = 2475$ (g)
0.0	0.52	0.69	0.89
0.1	1.42	1.91	2.42
0.2	1.32	1.76	2.38
0.3	1.14	1.42	1.72
0.5	0.85	1.06	1.39
1.0	0.60	0.82	1.20
2.0	0.41	0.56	0.77
3.0	0.23	0.34	0.49
4.0	0.14	0.21	0.33
5.0	0.09	0.14	0.21