



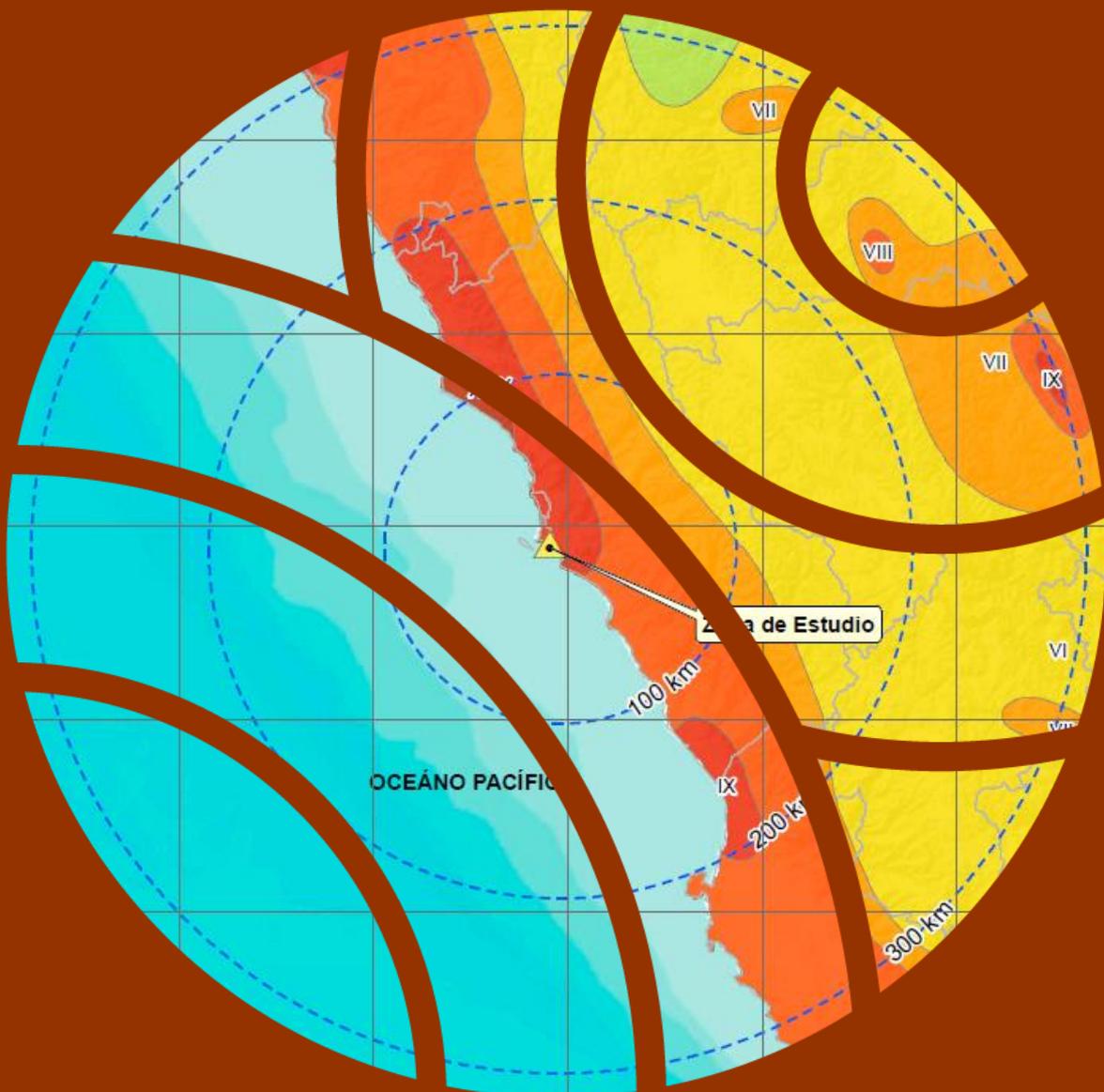
PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTUDIO DEL PELIGRO SÍSMICO EN LA ZONA DE ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE - LIMA

Informe Técnico N°017-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú
Julio 2021

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Estudio del peligro sísmico en la zona de acantilados de la Costa Verde - Lima

Autor

Instituto Geofísico del Perú

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ESTUDIO DEL PELIGRO SÍSMICO EN LA ZONA DE
ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE
-LIMA-**

Lima – Perú
Julio, 2021

RESUMEN

Se presenta los resultados del análisis de peligro sísmico probabilístico (PSHA por sus siglas en inglés) para la zona de los acantilados de la Costa Verde considerando 6 puntos de control representativos dentro del área de estudio:

Punto	Distrito	WGS 84 Zona 18S	
		Longitud (°)	Latitud (°)
P1	San Miguel	-77.093	-12.088
P2	Magdalena del Mar	-77.067	-12.101
P3	San Isidro	-77.056	-12.109
P4	Miraflores	-77.040	-12.124
P5	Barranco	-77.024	-12.147
P6	Chorrillos	-77.028	-12.166

El modelo sismotectónico empleado corresponde al propuesto por Aguilar et al. (2017) y consta en total de 02 fuentes de subducción interfase, 02 fuentes de subducción intraplaca intermedia, 05 fuentes de subducción intraplaca profunda y 05 fuentes corticales. La base de datos utilizada ha sido completada hasta enero del 2020.

Las aceleraciones máximas horizontales de sitio han sido obtenidas considerando un suelo tipo B ($V_{s_{30}} > 760$ m/s) según el ASCE-7, 2016 *Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures* (2017) y un factor de amortiguamiento de 5% para eventos sísmicos para periodos de 475, 975 y 2475 años de periodo de retorno. Los resultados del análisis probabilístico fueron obtenidos considerando las aceleraciones espectrales para los periodos $T = 0.00$ s, 0.20 s y 1.00 s; y que pueden emplearse con estándares sísmicos nacionales e internacionales, tales como: La E-030-2018 Norma Técnica Peruana de Diseño Sismorresistente, ASCE-7-16 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (2017).

Los resultados obtenidos para el análisis del Peligro Sísmico Probabilístico – Suelo Tipo B (ASCE 7-16) por distrito son:

Sitio	Periodo de Retorno	PGA (g)	0.20 s	1.00 s
San Miguel	475	475	0.525	1.162
	1000	1000	0.694	1.549
	2475	2475	0.935	2.120
Magdalena del Mar	475	475	0.523	1.162
	1000	1000	0.691	1.539
	2475	2475	0.931	2.110
San Isidro	475	475	0.523	1.162
	1000	1000	0.690	1.539
	2475	2475	0.930	2.110
Miraflores	475	475	0.522	1.152
	1000	1000	0.689	1.539
	2475	2475	0.929	2.110
Barranco	475	475	0.522	1.152
	1000	1000	0.689	1.539
	2475	2475	0.929	2.110
Chorrillos	475	475	0.524	1.162
	1000	1000	0.692	1.539
	2475	2475	0.933	2.110

Por otro lado, considerando que el área de estudio se ubica en la Zona 1 (Norma E.030 – 2018) y en la cual, el factor Z específico es mayor que 0.45 en todos los puntos de control, se deberá emplear el Z específico del sitio, así como los factores de amplificación por tipo de suelo e importancia de las estructuras correspondientes para los proyectos que se diseñen bajo los lineamientos de dicha normativa.

Finalmente, la evaluación y análisis de peligro sísmico está sujeta a desarrollos constantes como parte de la ciencia e ingeniería en las metodologías y estándares de la práctica actual, por lo que los valores calculados en este informe están sujetos a nuevas actualizaciones. En tal sentido, ZER Geosystem recomienda actualizar los resultados del presente informe, por lo menos cada 5 años o al momento que nueva información sismotectónica se encuentre disponible o se desarrollen nuevas y avanzadas teorías científicas para el desarrollo y análisis de peligro sísmico.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Generalidades

1.2.- Objetivos

1.3.- Alcance

2.- CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA REGIÓN

2.1.- Zona I

2.2.- Zona II

2.2.1.- Cordillera Occidental

2.2.2.- Altiplano

2.2.3.- Cordillera Oriental

3.- MARCO NEOTECTÓNICO

3.1.- Emplazamiento Tectónico Regional

3.1.1.- Zonificación Tectónica

3.1.2.- Sistemas de Fallas en la Región Central del Perú

4.- MARCO SISMOTECTÓNICO

4.1.- Eventos de Subducción

4.1.1.- Sismicidad de Interfase – Segmento Central

4.1.2.- Sismicidad Intraplaca

4.2.- Historia Sísmica de la Región en Estudio

4.3.- Sismicidad Instrumental en el Área de Influencia

5.- CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS

5.1.- Catálogo Sísmico

5.2.- Evaluación de Integridad del Catálogo

5.3.- Modelos Sismotectónicos o Fuentes Sismogénicas

5.4.- Parámetros de Fuentes y Recurrencia de Sismos

6.- ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO (GMPE)

6.1.- Ecuaciones de Movimiento para Sismos de Subducción

6.1.1.- Modelo de Predicción de Movimiento de Youngs et al.
(1997)

6.1.2.- Modelo de Predicción de Movimiento de Zhao et al.
(2006)

6.1.3.- Modelo de Predicción de Movimiento de BC Hydro
(2016)

6.2.- Ecuaciones de Movimiento de sismos de Corteza

6.2.1.- Modelo de Predicción del Movimiento de Boore et al.
(2014)

6.2.2.- Modelo de Predicción de Movimiento de Chiou & Youngs
(2014)

6.2.3.- Modelo de Predicción de Movimiento de Abrahamson &
Silva. (2014)

6.2.4.- Modelo de Predicción de Movimiento de Bozorgnia &
Campbell (2014)

7.- EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

7.1.- Árbol Lógico de Decisión

7.1.1.- Eventos de Interfase

7.1.2.- Eventos de Intraplaca

7.1.3.- Eventos Corticales

7.2.- Evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico

7.2.1.- Resultados del Peligro Sísmico Probabilístico

8.- COEFICIENTE SÍSMICO HORIZONTAL

8.1.1.- Hynes y Franklin (1984)

8.1.2.- Saragoni (1993)

8.1.3.- Enfoque basado en el cálculo de los desplazamientos
permanentes

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

Cuadros

Cuadro 4.1	Sismos Significativos
Cuadro 5.1	Intervalo de tiempo con periodos completos para los sismos históricos
Cuadro 6.1	Esquema de clasificación Geomatrix 3rd Letter
Cuadro 6.2	Coefficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Youngs et al. (1997)
Cuadro 6.3	Esquema de clasificación de Molas & Yamazaki (1995)
Cuadro 6.4	Coefficientes del modelo de aceleración espectral a nivel de roca (Suelo tipo B) propuesto por Zhao et al. (2006)
Cuadro 6.5	Coefficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016)
Cuadro 6.6	Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo
Cuadro 6.7	Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo
Cuadro 6.8	Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo
Cuadro 6.9	Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo
Cuadro 6.10	Coefficientes de respuesta media
Cuadro 6.11	Coefficientes de respuesta media
Cuadro 6.12	Coefficientes de respuesta de suelo lineal y no lineal
Cuadro 6.13	Coefficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical
Cuadro 6.14	Coefficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical
Cuadro 6.15	Coefficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical
Cuadro 6.16	Coefficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical
Cuadro 7.1	Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de interfase
Cuadro 7.2	Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de intraplaca
Cuadro 7.3	Valores de Ponderación del Árbol Lógico de Decisión
Cuadro 7.4	Resumen de aceleraciones con $\xi=5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B ($V_{s30}>760$ m/s)

Figuras

Figura 2 1	Principales Unidades Geomorfológicas del Perú (Dalmayrac et al. 1981; Tavera y Buforn, 1998)
Figura 3 1	Corriente de Convección en el Manto
Figura 3 2	Actividad sísmica en el mundo 2002-2011 ($M>3$)
Figura 3 3	Placas tectónicas en las que está dividida la superficie terrestre
Figura 3 4	Zona de Subducción y Tipos de Sismos (Kuroiwa, 2002).
Figura 3 5	Proceso de subducción en la zona de estudio
Figura 4 1	Configuración sismotectónica de la zona de subducción sudamericana, segmento central y sur (Villegas et al. 2016)

- Figura 4 2 Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en la zona del proyecto.
Figura 5 1 Integridad del Catálogo Sísmico por el Método de Stepp (1972). Aguilar et. al. (2017).
Figura 5 2 Fuentes sismogénicas influyentes en la zona de estudio
Figura 7 1 Mapa de isoaceleraciones para un $T_r=475$ años, $T=0.00s$, Suelo tipo B
Figura 7 2 Mapa de isoaceleraciones para un $T_r=2475$ años, $T=0.00s$, Suelo tipo B

Anexos

- Anexo 1. Sísmicidad Histórica de la Región
Anexo 2. Curvas Isosistas
Anexo 3. Análisis Probabilístico

Planos

- Plano P-01. Ubicación de la Zona de Estudio
Plano P-02. Fuentes Sismogénicas influyentes en la Zona de Estudio
Plano P-03. Densidad Sísmica Superficial y profunda
Plano P-04. Neotectónica Regional
Plano P-05. Sismotectónica Regional
Plano P-06. Sección Transversal de Subducción
Plano P-07. Distribución de Máximas Intensidades Observadas
Plano P-08. Mapa de Isoaceleraciones para 475 años de periodo de retorno, $T=0.00s$.
Plano P-09. Mapa de Isoaceleraciones para 475 años de periodo de retorno, $T=0.20s$.
Plano P-010. Mapa de Isoaceleraciones para 475 años de periodo de retorno, $T=1.00s$.
Plano P-011. Mapa de Isoaceleraciones para 2475 años de periodo de retorno, $T=0.00s$.
Plano P-012. Mapa de Isoaceleraciones para 2475 años de periodo de retorno, $T=0.20s$.
Plano P-013. Mapa de Isoaceleraciones para 2475 años de periodo de retorno, $T=1.00s$.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Generalidades

El Instituto Geofísico del Perú (referida en adelante como IGP) ha solicitado a la empresa ZER Geosystem Perú S.A.C. (referida en adelante como el consultor) realizar el estudio del peligro sísmico en la zona de acantilados de la Costa Verde, conformado en el litoral, entre los distritos de San Miguel, Magdalena, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. El presente informe resume las tareas llevadas a cabo en dicho estudio, los cuales comprenden el desarrollo del cálculo de peligro sísmico por el método probabilístico.

1.2.- Objetivos

El objetivo principal del estudio es realizar el análisis de peligro sísmico para la zona de estudio, que defina los parámetros de diseño sismorresistente del área de estudio, en base a los estándares de normativas nacionales e internacionales aplicados a este tipo de proyectos.

1.3.- Alcance

El alcance general del presente estudio de peligro sísmico se detalla a continuación:

- Revisión de la información tectónica disponible.
- Análisis de la sismicidad histórica.
- Caracterización de las fuentes sismogénicas.
- Análisis del movimiento sísmico del suelo (método probabilístico).

- Determinación de espectros de peligro uniforme con 5 % de amortiguamiento en roca (suelo tipo B) considerando periodos de retorno de 475, 1000 y 2475 años.
- Mapa de isoaceleraciones para los periodos de retorno de 475 y 2475 años, evaluados para los periodos de 0.00s, 0.20s y 1.00s.
- Generación de mapas de las principales fuentes sismogénicas, fallas regionales, sismicidad histórica y densidad sísmica dentro de los 500 km desde la zona del proyecto.

2.- CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA REGIÓN

La zonificación morfológica de la región en estudio está basada en la zonificación propuesta por Tavera y Buforn (1998), Tavera (1999) y Bernal y Tavera (2002). De acuerdo a esta referencia, la morfología regional del territorio peruano se puede agrupar en las siguientes tres grandes zonas (Figura 2.1).

- Zona I : Franja Costera
- Zona II : Cordillera Occidental, el Altiplano y la Cordillera Oriental
- Zona III: Subandina

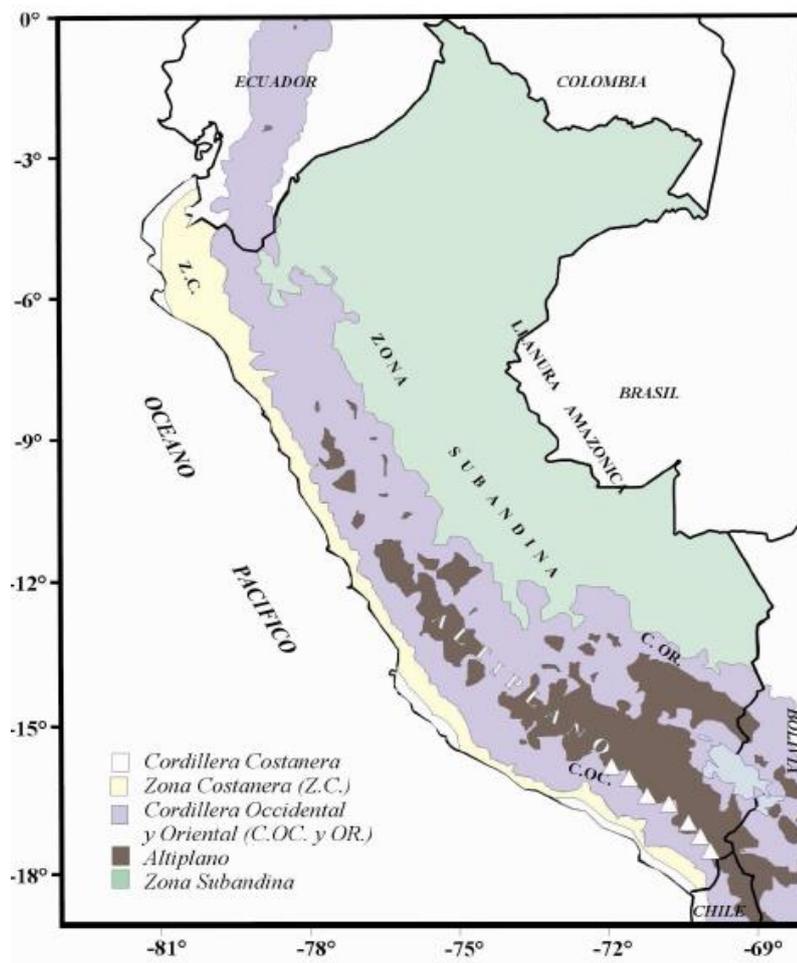


Figura 2.1.- Principales unidades geomorfológicas del Perú (Dalmayrac et al, 1982; Tavera y Buforn, 1998)

Esta clasificación simplifica las características de topografía, geología, geomorfología, clima y de mecánica de rocas predominantes en la región, que tienen influencia en la respuesta sísmica del terreno de cimentación, así como en el comportamiento dinámico de las estructuras proyectadas. La descripción de la zona donde se localiza el área de estudio se describe a continuación:

2.1.- Zona I

Está conformada por la Franja Costera, consistente en una delgada franja de terreno limitada por el oeste con el litoral y por el este con el Batolito Costanero. Se extiende de norte a sur con un ancho de 40 km a 50 km y está formado en su mayoría por el basamento fuertemente plegado que está sujeto a deformaciones desde el Precámbrico.

En esta zona las laderas de los cerros son suaves y la mayor parte del suelo y subsuelo son sedimentos cuaternarios de limos, arenas y arcillas que cubren formaciones rocosas principalmente volcánicas, así como extensas terrazas formadas por gravas, gravas arenosas sueltas y saturadas. En este tipo de terreno y especialmente en los lechos de los ríos se puede presentar el fenómeno de licuación tanto en arenas como en gravas, (Martínez, A., 1996).

La condición de aridez de la costa es favorable, sin embargo, en algunas zonas puede existir la influencia de la migración de arenas eólicas y en épocas de lluvias extraordinarias como las generadas por los Fenómenos El Niño y la Niña ocurridas en los últimos años, se pueden generar asentamientos con deformaciones superficiales importantes. El área de estudio se ubica en esta zona. En general, la morfología del territorio peruano se puede apreciar en la Figura 2.1. En esta imagen se puede visualizar que la zona de estudio se encuentra influenciada principalmente bajo la presencia de la Franja Costera.

2.1.- Zona II

En esta zona se han agrupado tres de las zonas propuestas por Tavera y Buforn (1998), que atraviesan el Perú longitudinalmente y tienen un ancho de más de 320 km. Las características de las condiciones locales de esta zona son: las elevaciones, zonas en plena evolución, levantamiento del macizo del Batolito y la erosión de los valles. Las laderas en esta zona son muy empinadas, con ángulos mayores de 45°, por lo cual presentan peligro de derrumbes y deslizamientos. La alternación de las rocas por su gran variedad y diferentes resistencias al ataque de las aguas de lluvia y las bajas temperaturas, los huaycos de las torrenteras y la formación de numerosas cárcavas son fenómenos frecuentes en esta zona que requieren medidas de prevención y mitigación. Las características de estas geoformas son:

2.2.1.- Cordillera Occidental: En esta zona se desarrolla el mayor volumen del Batolito Plutónico y de rocas volcánicas, que van en forma continua desde Venezuela hasta Tierra del Fuego en Chile. En el Perú, está comprendida entre el Batolito costanero al Oeste y la zona del Altiplano al Este, cuyas partes más altas llegan a alturas de 5,000 msnm en la región central del país. Conforme se extiende hacia el Sur aumenta notoriamente el ancho de esta cordillera y el volcanismo se presenta a partir de la latitud 13° hacia el Sur por decenas de kilómetros.

2.2.2.- Altiplano: Se encuentra entre las cordilleras occidental y oriental. En la región sur tiene un ancho de 200 km y en la región central se caracteriza por tener mesetas con un ancho de 10 km a 50 km, a unos 3,000 m de altura, para luego desaparecer hacia el Norte, aproximadamente a los 9° de latitud sur. Esta unidad está formada por una serie de cuencas intra-montañas y altas mesetas que se prolongan hasta el altiplano de Bolivia. Toda esta región ha sido

fuertemente afectada por los plegamientos y las fallas generadas por la contracción del Neógeno (Macharé, et al. 2003).

El problema de las fluctuaciones fuertes de temperaturas, que alcanzan valores menores a -10°C , produce el efecto capilar y el congelamiento del agua capilar conduce a una acción de erosión física al alterar las rocas más fuertes y frescas en su estado masivo (Martínez, 2001).

2.2.3.- Cordillera Oriental: Esta unidad en promedio es menos elevada que la Cordillera Occidental, su altura promedio es de 3,700 a 4,000 msnm. Se ubica entre el Altiplano y la zona Subandina. Está compuesta por una zona externa de plegamientos en la cual la estructura geológica es el extremo de un anticlinal que buza en sentido contrario de la dirección de las formaciones del plegamiento. Una característica de la región centro-sur, a la altura de las latitudes 12°S a 13°S , es que la Cordillera Oriental toma una dirección E-W para luego continuar paralelo a las unidades anteriores. Esta característica es más acentuada en la llamada deflexión de Abancay.

El comportamiento de los suelos y rocas es muy diferente que en la zona costanera, pues los intensos efectos por el ataque de las bajas temperaturas hacen que las rocas se disgreguen con fracturas y fisuras que las reducen a suelos residuales. Este efecto se manifiesta principalmente en las rocas volcánicas como los tufos riolíticos, traquitas, andesitas y rocas ígneas como el granito, la granodiorita, etc. Los cambios de temperatura en el día son suficientes para destruir cualquier tipo de roca.

A manera general, la morfología del territorio peruano se puede apreciar en la Figura 2.1. En esta imagen se puede visualizar que la zona de estudio se encuentra influenciada principalmente bajo la presencia de la Franja Costera.

3.- MARCO NEOTECTÓNICO

3.1.- Emplazamiento Tectónico Regional

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que hay en la Tierra, formando parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. El marco tectónico regional a mayor escala está gobernado por la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana.

El borde entre la placa de Nazca y la Placa Sudamericana en esta región está marcada por la fosa Perú–Chile, la cual se encuentra a 225 km al oeste de la costa peruana. La continua subducción de la placa de Nazca a lo largo de la fosa Perú–Chile es la principal fuente de generación de grandes sismos ($M > 7.0$) en esta región. La margen oeste de la Placa Sudamericana se caracteriza por su corta planicie costera, las elevadas montañas de su cordillera oriental y occidental y las numerosas fallas y pliegues que enmarcan el límite este de los Andes en el Perú.

La teoría que postula esta relación es la Tectónica de Placas o Tectónica Global (Isacks et al. 1968). La idea básica de la teoría de la Tectónica de Placas es que la envoltura más superficial de la tierra sólida llamada Litósfera (desde la superficie hasta los primeros 100 km de profundidad) está dividida en varias placas rígidas que crecen a lo largo de estrechas cadenas meso-oceánicas casi lineales; dichas placas son transportadas en otra envoltura menos rígida, la cual es conocida como la Astenósfera y son comprimidas o destruidas en los límites compresionales de interacción, donde la corteza terrestre es comprimida en cadenas montañosas o donde existen fosas marinas (Berrocal et al. 1974, 1975).

El mecanismo básico que causa el movimiento de las placas no se conoce, pero se afirma que es debido a corrientes de convección o

movimientos del manto plástico y caliente de la Tierra y también a los efectos gravitacionales y de rotación (ver Figura 3.1).

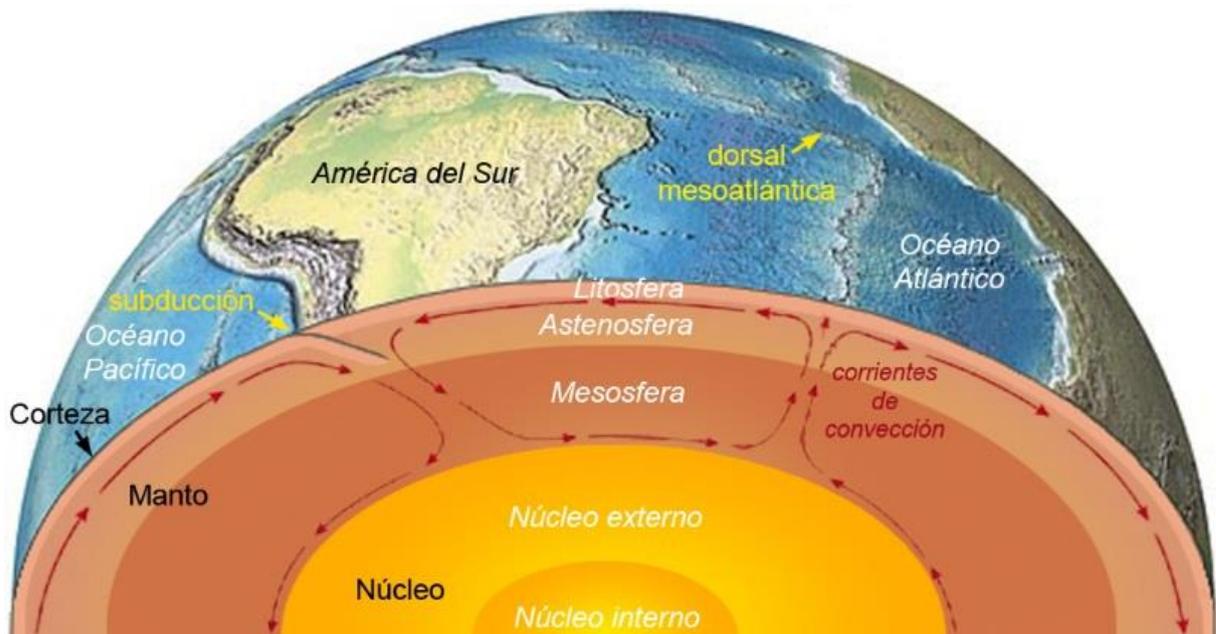


Figura 3.1.- Corrientes de convección en el Manto

Los límites o bordes de las placas raramente coinciden con las márgenes continentales, pudiendo ser de tres tipos:

- Según cordilleras axiales, donde las placas divergen una de otra y en donde se genera un nuevo suelo oceánico.
- Según fallas de transformación a lo largo de las cuales las placas se deslizan una respecto a la otra.
- Según zonas de subducción, en donde las placas convergen y una de ellas se sumerge bajo el borde delantero de la suprayacente.

Siendo esta última (zonas de subducción) el límite de placas que gobierna la sismicidad de la zona de estudio.

Por otro lado, se ha observado que la mayor parte de la actividad tectónica en el mundo se concentra a lo largo de los bordes de estas placas (ver Figuras 3.2 – 3.3). El frotamiento mutuo de estas placas produce los

terremotos, por lo que la localización de éstos delimitará los bordes de las mismas.

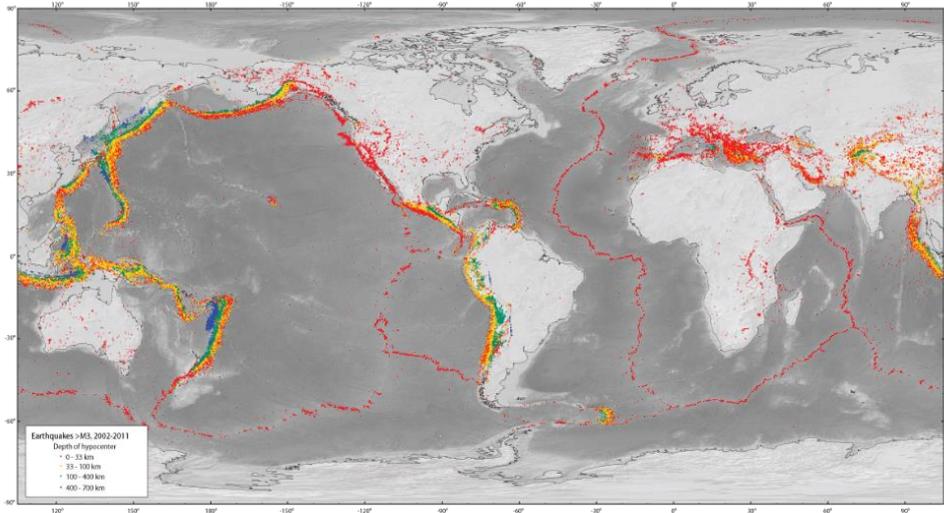


Figura 3.2.- Actividad sísmica en el mundo 2002-2011 ($M > 3$)

La margen continental occidental de Sudamérica, donde la placa oceánica de Nazca está subduciendo por debajo de la placa continental Sudamericana, es uno de los mayores bordes de placa en la Tierra.

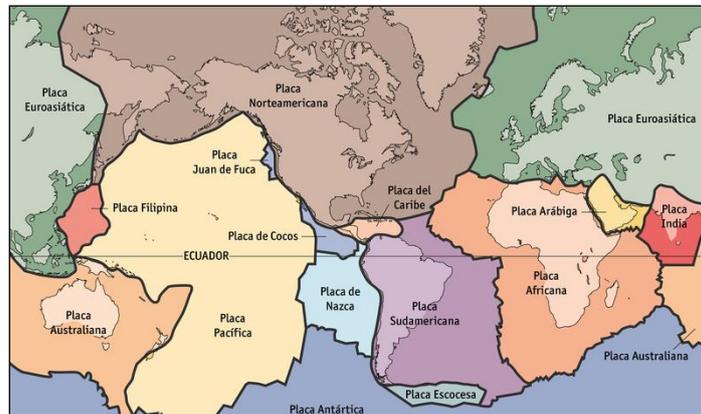


Figura 3.3.- Placas tectónicas en las que está dividida la superficie terrestre

La placa Sudamericana crece de la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste con una velocidad de 2 cm a 3 cm por año y se encuentra con la placa de Nazca en su extremo occidental, constituido por la costa sudamericana del Pacífico (Figura 3.4). Por otro lado, la placa de Nazca crece de la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental y

avanza hacia el este con una velocidad de aproximadamente 5 cm a 10 cm por año, subduciendo debajo de la placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 cm a 12 cm por año (Berrocal et al. 1975).



Figura 3.4.- Zona de subducción y tipos de sismos (Kuroiwa, 2002)

Como resultado del encuentro de la placa Sudamericana y la placa de Nazca y la subducción de esta última, han sido formadas la Cadena Andina y la Fosa Perú-Chile en diferentes etapas evolutivas. La subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana fue modelada por Cahill e Isacks (1992) y el Servicio Geológico Nacional de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés, 2011), donde se muestra que la placa de Nazca subduce debajo de la placa Sudamericana con un ángulo de 12° hasta la profundidad de 20 a 25 km, a partir de donde, la placa tiende a flexionarse suavemente hacia abajo con un ángulo de 20° .

A una profundidad cercana a los 100 km, la placa que subduce cambia de inclinación y continúa de manera casi subhorizontal en dirección al este por casi 500 km hasta que abruptamente comienza un descenso a más de 600 km de profundidad, debajo de la frontera Perú-Brasil y noroeste de Argentina, lo cual es confirmado por la distribución espacial de los

hipocentros, aun cuando existe cierta controversia debido a la ausencia de actividad sísmica entre los 300 km y 500 km de profundidad (Berrocal et al. 1975, Cahill e Isacks 1992; Stauder 1975; USGS, 2011).

Específicamente en la zona de estudio, la subducción superficial tiene un ángulo aproximado de 15° en la zona de interfase hasta una profundidad promedio de 80 km, posteriormente la inclinación de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana se va tornando subhorizontal alcanzando una distancia de 200 km a 350 km desde la fosa, para luego subducir hasta los 700 km de profundidad (Figura 3.5).

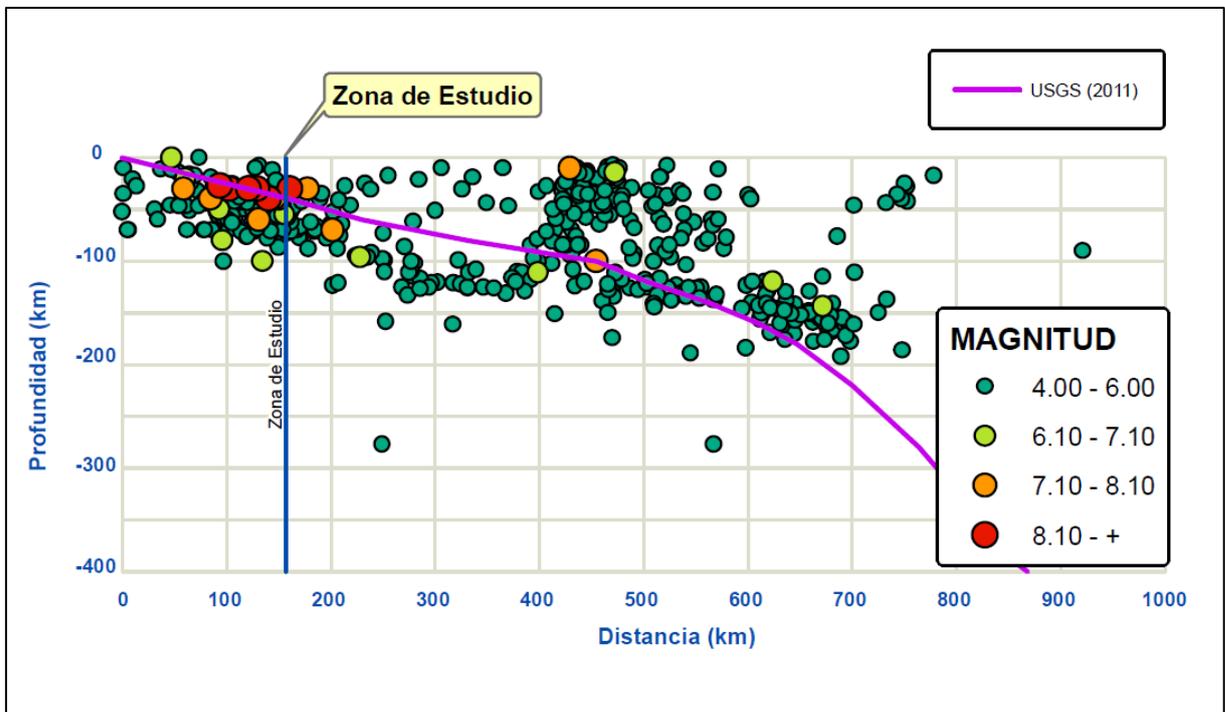


Figura 3.5.- Proceso de subducción en la zona de estudio

Algunos trabajos de sismotectónica en Sudamérica han señalado ciertas discontinuidades de carácter regional, que dividen el panorama tectónico de esta región en varias provincias tectónicas. Dichas provincias están separadas por discontinuidades laterales (Berrocal, 1974) o por "zonas de transición" sismotectónica (Deza y Carbonell, 1978), todas ellas normales a la zona de subducción o formando un ángulo grande con ésta. Estas

provincias tectónicas tienen características específicas que influyen en la actividad sísmica que ocurre en cada una de ellas.

3.1.1.- Zonificación Tectónica: En el Perú, la deformación cuaternaria de la corteza es generada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, cuyos efectos se concentran en el proceso de orogénesis de los Andes. Los Andes Peruanos se ubican en la zona central de la Cordillera de los Andes, que se extiende desde el golfo de Guayaquil (4° S) hasta el golfo de Penas en Chile (46°30' S). En los Andes Peruanos se pueden distinguir dos zonas en función a la geometría de la subducción, los cuales son conocidos como Sector Norte y Sector Central.

Durante el Mesozoico temprano, el Sector Norte (4° S a 14° S), fue dominado por un tectonismo extensional y la subducción, subsecuentemente, la migración de la deformación hacia el este elevó los Andes Peruanos como resultado de un proceso de subducción plano y poco profundo.

El resultado del engrosamiento de la corteza dio origen a la Cordillera Blanca, donde se presentan un número significativo de fallas normales activas, así como también a una importante actividad sísmica superficial que caracteriza a la Cordillera Oriental y a la zona Subandina, donde la deformación es dominada por fallas relacionadas a las estructuras de plegamientos. Un comportamiento atípico es la falta de actividad volcánica en este sector (Macharé et al. 2003).

El proceso de colisión de la placa de Nazca y la placa continental Sudamericana es causante de todos los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente, dentro de los cuales se puede mencionar los siguientes (Pomachagua, 2000):

La Fosa Marina: *La fosa marina indica de norte a sur y paralelo al litoral costero, el límite de contacto entre la placa oceánica y la placa continental. Este límite tiene la forma de una fosa de gran extensión, la misma que alcanza profundidades de hasta 8 000 m. Esta fosa está formada por sedimentos que han sido depositados sobre rocas pre-existentes.*

La Cordillera Andina: *La Cordillera Andina se ha formado como producto del proceso de compresión entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana en diferentes procesos orogénicos. Esta cordillera se encuentra conformada en general por rocas ígneas plutónicas que afloraron a la superficie terrestre por procesos tectónicos. La Cordillera Andina se distribuye en el Perú de norte a sur, alcanzando un ancho de 50 km aproximadamente en las regiones norte y centro, y hasta de 300 km en la región sur. Así mismo, la Cordillera Andina se orienta en promedio en dirección NW-SE, aunque a la altura de la latitud 13° S ésta se orienta en dirección E-W, a lo largo de la deflexión de Abancay.*

Los Sistemas de Fallas: *Los diferentes sistemas de fallas que se distribuyen en la zona continental se han formado como un efecto secundario de la colisión de la placa oceánica con la placa continental. Este proceso generó la presencia de plegamientos y fracturas en la corteza terrestre. Los sistemas de fallas mayormente se localizan en el altiplano y en la región Subandina de norte a sur, así como también en los pies de las cordilleras o nevados y entre los límites de la Cordillera Occidental y la zona costera.*

3.1.2.- Sistemas de Fallas en la Región Central del Perú: Las fallas son producidas por la ruptura de una parte de la corteza, lo que ocasiona una discontinuidad en la estructura geológica. Existen tres tipos de fallas en función de su geometría, estos son: fallas normales,

que indican alargamiento de la corteza, fallas inversas, que indican acortamiento de la corteza, y fallas de desplazamiento o transcurrentes, que indican desplazamiento paralelo al rumbo de la falla.

El plano P-04 Neotectónica Regional muestra las características neotectónicas de la región en estudio, donde se indica la ubicación del proyecto. Cabe mencionar que la delimitación de estas estructuras geológicas es de carácter regional, por lo que muchas de las fallas representadas en estos mapas corresponden a los alineamientos principales de los sistemas de fallas identificadas e inferidas en los estudios de neotectónica disponibles.

4.- MARCO SISMOTECTÓNICO

El marco sismotectónico del área de proyecto está dominado por la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa Sudamericana. La zona de subducción se origina a cierta distancia de la costa en la fosa Perú–Chile y la placa de subducción Nazca se extiende hacia el este, debajo del borde occidental de la placa Sudamericana. La subducción debajo del borde continental ha venido produciéndose durante, por lo menos, 100 millones de años, y el acortamiento cortical y adición magmática del volcanismo de arco que se producen simultáneamente en el interior de la placa emergente han dado como resultado una corteza continental gruesa y la formación de la Cordillera de los Andes (Jordan et al. 1983).

Para visualizar la actividad sísmica de la región en estudio y su correlación con la tectónica regional, se han elaborado el Plano P-04 Neotectónica Regional y el Plano P-05 Sismotectónica Regional, en ellos se muestran los rasgos neotectónicos indicados por Sébrier et al. (1982) para el Perú, así como los hipocentros del Catálogo Sísmico empleado para este estudio.

4.1.- Eventos de Subducción

En el Cuadro 4.1 se muestra algunos de los sismos históricos más significativos que han ocurrido en la zona del segmento Central del Perú que se encuentran más próximos a la zona de estudio.

Cuadro 4.1.- Sismos significativos

Año	M ⁽¹⁾	Estilo	Profundidad (km) ⁽²⁾	Longitud de Ruptura Mínima (km) ⁽³⁾	Referencias
Sismos de Interfase en la Zona de Subducción					
Segmento Central					
1586	8.1-8.5	Inverso (Thrust)	60	175	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Silgado 1985
1664	7.5-7.8	Inverso (Thrust)	15	75	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Silgado 1985
1678	7.7-8.0	Inverso (Thrust)	40	100-150	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Silgado 1985
1687	8.4-9.0	Inverso (Thrust)	30	300	Beck y Nishenko 1990; Dorbath <i>et al.</i> 1990; NGDC; Silgado 1985
1746	8.6-8.8	Inverso (Thrust)	30	350	Beck y Nishenko 1990; Dorbath <i>et al.</i> 1990; Silgado 1986
1940	8.1-8.2	Inverso (Thrust)	60	180	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Kanamori 1977
1942	8.2	Inverso (Thrust)	60	200	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Kanamori 1977
1966	8.1	Inverso (Thrust)	38	100	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Kanamori 1977
1974	8.1	Inverso (Thrust)	9-22	140	Dorbath <i>et al.</i> 1990; Kanamori 1977; Langer y Spence 1995
1996	7.7-7.9	Inverso (Thrust)	33	<200	Chateleain <i>et al.</i> 1997
Sismos de Intraplaca en la Zona de Subducción					
1970	7.8-8.0	Normal	43-64	130	Abe 1972; Kanamori 1977; Lomnitz 1971; Silgado 1985
1994	8.2	Inverso (Reverse)	631	90	Jimenez 2014

⁽¹⁾Los estimados de magnitud derivan de diversas escalas de magnitud que incluyen la magnitud de onda superficial (Ms) y la magnitud de momento (Mw). En algunos casos, la Mw fue estimada a partir de la liberación del momento sísmico al comparar las alturas del recorrido del tsunami (Beck y Nishenko, 1990).

⁽²⁾Profundidades focales estimadas a partir de la base de datos de sismicidad histórica del Centro Geodésicos. En lugar de utilizar datos de solución de planos de falla, se empleó profundidades focales para inferir los mecanismos de fuentes de sismos históricos que se produjeron previamente a los inicios del Siglo XX cuando se recopiló datos instrumentales de sismicidad en primer lugar.

⁽³⁾Longitud de ruptura mínima basada en la intensidad de las vibraciones documentadas para sismos históricos (Dorbath et al. 1990). Los estimados de la longitud de ruptura para los eventos de interfase e intraplaca se basaron en el momento sísmico.

4.1.1.- Sismicidad de Interfase – Segmento Central: Seis grandes sismos (Mw 7.7 a 8.2) ocurrieron en el segmento central en el periodo entre 1940 y 1966. Estos sismos, que ocurrieron a lapsos de 14 años en promedio, fueron precedidos por cerca de 200 años de inactividad sísmica. Una serie previa de 14 sismos (Mw 7.5 a 9.0+) ocurrió entre 1550 y 1750 con intervalo de recurrencia promedio de aproximadamente 14 años. Las series más tempranas de sismos

incluyeron grandes sismos en 1687 (M_w 8.4 a 9.0) y 1746 (M_w 8.6 a 8.8), que son los más grandes eventos documentados de haber ocurrido en el segmento central (Beck y Nishenko 1990; Dorbath et al. 1990). Este intervalo irregular de recurrencia sugiere que la recurrencia de grandes y amplios sismos de interfase en el segmento central puede agruparse en el tiempo. Por ejemplo, el intervalo entre grandes sismos históricos es de alrededor de 60 años (1687 a 1796), pero 260 años han pasado desde el evento de 1746, el evento más grande registrado. El evento más reciente que ha ocurrido en este segmento fue el del 15 de agosto de 2007 con M_w 7.9 (Figura 4.1).

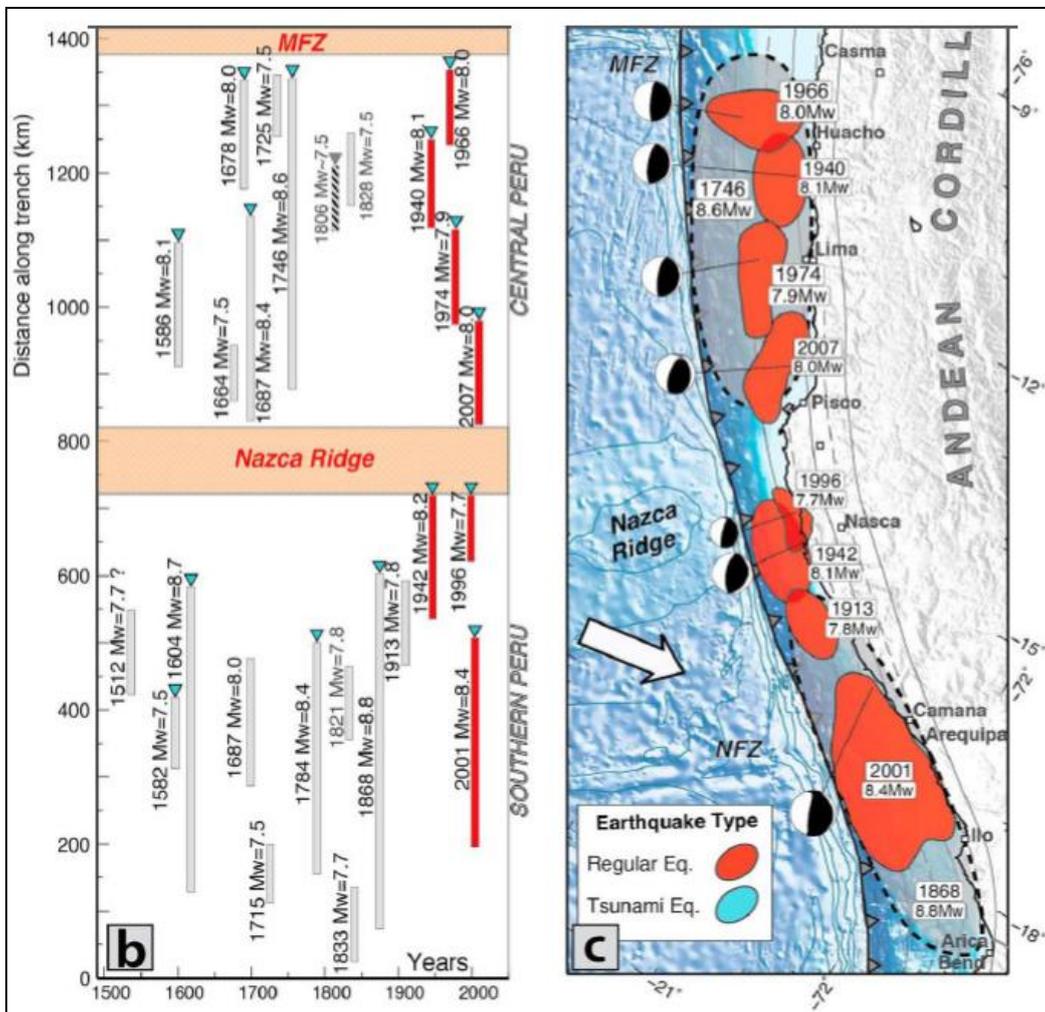


Figura 4.1.- Configuración sismotectónica de la zona de subducción sudamericana, segmento central y sur (Villegas et al. 2016)

4.1.2.- Sismicidad Intraplaca: El evento intraplaca de 1970 listado en el cuadro 4.1, es uno de los sismos intraplaca poco profundos de mayor magnitud que jamás se hayan registrado y se considera que este evento representa la máxima magnitud para eventos intraplaca poco profundos. La magnitud reportada del evento de 1970 en la literatura es de 7.8 Mw a 8.0 Mw con una profundidad focal de casi 70 km. Pese a que este evento ocurrió en el segmento central, se ha considerado conservadoramente elevar el parámetro sismológico de magnitud máxima (M_{max}) para los eventos del segmento sur puesto que en esta zona no se tiene información instrumental o histórica de grandes eventos.

4.2.- Historia Sísmica de la Región en Estudio

Para la región en la cual se encuentra el proyecto se presenta la recopilación de Silgado (1969, 1973, 1978 y 1992) sobre los principales eventos sísmicos ocurridos en el Perú desde el año 1513. Este trabajo constituye una fuente de información básica para el conocimiento de las intensidades sísmicas de los sismos históricos. Alva et al. (1984), basándose en esta fuente, ha elaborado el Plano P-07 Distribución de Máximas Intensidades Observadas, ver Figura 4.2.

De acuerdo con la historia sísmica de la región de estudio se concluye que en los últimos 400 años han ocurrido sismos con intensidades de hasta X (MMI) dentro de los primeros 100 km alrededor de la zona del proyecto.

En el Anexo 1 Sismicidad Histórica de la Región se presente una descripción resumida de los sismos que han ocurrido en el área de influencia del Proyecto. Este anexo está basado fundamentalmente en el trabajo de Silgado y en el Proyecto SISRA (Sismicidad de la Región Andina), patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), el cual ha sido posteriormente actualizado por el Instituto Geofísico del Perú. Así

mismo, se incluye la descripción de los sismos recientes ocurridos en la región en estudio y que se consideran significativos para los fines de este estudio.

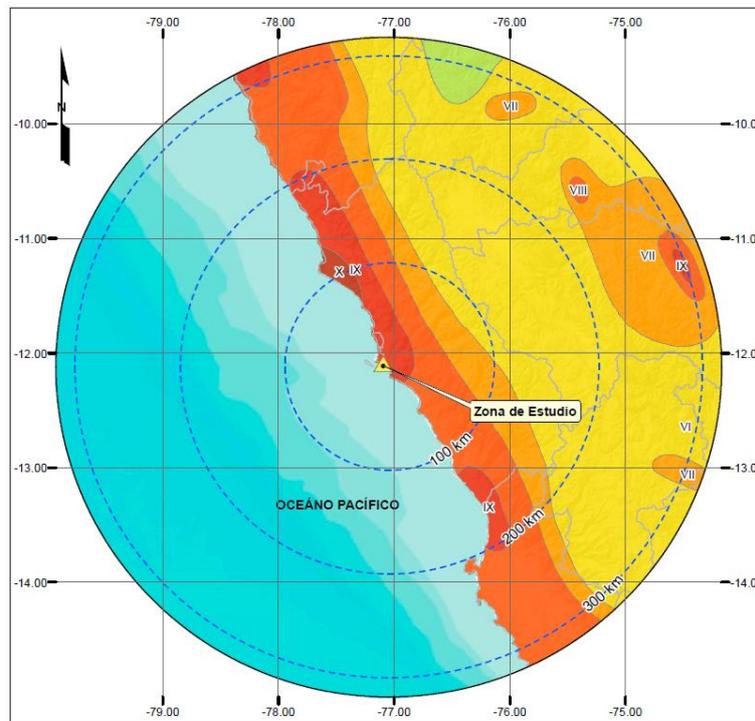


Figura 4.2.- Máximas intensidades sísmicas observadas en la zona de proyecto

En el Anexo 2 Curvas de Isosistas de presentan los mapas de Isosistas compilados por Alva Hurtado (2004) y de publicaciones del Instituto Geofísico del Perú, los cuales corresponden a los siguientes sismos ocurridos en la región centro y sur del Perú y que han influenciado en el área en estudio: 09 de julio de 1586, 20 de octubre de 1687, el 29 de octubre de 1746, 01 de noviembre de 1947, el 17 de octubre de 1966, el 31 de mayo de 1970, el 15 de octubre del 2007 y otros.

4.3.- Sismicidad Instrumental en el Área de Influencia

La calidad de la información sísmica instrumental en el Perú mejora ostensiblemente a partir del año 1963 con la instalación de la red sismográfica mundial. En consecuencia, la información consignada en los

catálogos sísmicos se agrupa en los siguientes tres períodos de obtención de datos sismológicos:

- *Antes de 1900: datos históricos descriptivos de sismos destructores,*
- *1900 a 1963: datos instrumentales aproximados, y*
- *1963 a la actualidad: datos aproximados precisos.*

La información sismológica ha sido obtenida del Catálogo Sísmico revisado y actualizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el cual es una versión revisada del Catálogo Sísmico del Proyecto SISRA – 1982 (Sismicidad de la Región Andina) para el periodo 1471–1982, y elaborado por el propio IGP para el periodo 1982–2001. Esta información ha sido complementada hasta el año 2020 utilizando la información del Catálogo Sísmico del National Earthquake Information Center (NEIC); del International Seismological Center (ISC); el catálogo sísmico del United States Geological Survey (USGS); el catálogo del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); y el catálogo del Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) para lo cual se ha uniformizado las magnitudes utilizadas a Magnitud Momento (M_w).

5.- CARACTERÍSTICAS DE FUENTES SISMOGÉNICAS

5.1.- Catálogo Sísmico

Para este análisis se ha utilizado el catálogo sísmico para el Perú, que fue compilado utilizando los catálogos del Instituto Geofísico del Perú (IGP); el catálogo del International Seismological Centre (ISC); el catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC) del United States Geological Survey (USGS); el catálogo del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el catálogo del Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) actualizado hasta enero del año 2020, entre los meridianos 66° W y 84° W Greenwich y los paralelos 2° N y 24° S y magnitudes momento $M_w \geq 4.0$ hasta $M_w = 8.8$. El catálogo sísmico fue analizado gráfica y estadísticamente considerando el tiempo, la profundidad y la magnitud de los eventos sísmicos registrados en el área de influencia de la zona de estudio.

Debido a la gran importancia de tener un parámetro uniforme y homogéneo para comparar el tamaño de los sismos en la evaluación del peligro sísmico, el catálogo sísmico compilado fue examinado minuciosamente, homogenizando las magnitudes a M_w y eliminando los eventos registrados con magnitud cero o sin magnitud.

Para este fin, se ha considerado los valores de magnitud de ondas de cuerpo (mb) equivalentes a M_w si las magnitudes mb se encuentran dentro del intervalo de 4.0 a 6.0; los valores de magnitud de ondas de superficie (M_s) equivalentes a M_w si las magnitudes M_s se encuentran dentro del intervalo M_s de 5.0 a 8.0; y los valores de magnitud local (ML) equivalentes a M_w si las magnitudes ML se encuentran dentro del intervalo de 4.0 a 7.0 (Boore y Joyner, 1982). Para magnitudes reportadas fuera de estos intervalos, el proceso de conversión de magnitudes de diferentes escalas a magnitud momento (M_w) fue empleando las siguientes relaciones:

Para eventos con magnitudes m_b (ondas de cuerpo) reportadas, M_s es calculado usando las expresiones dadas por el GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program):

$$\begin{aligned} M_s &= 1.644 m_b - 3.753 & m_b < 5.9 \\ M_s &= 2.763 m_b - 10.301 & m_b \geq 5.9 \end{aligned}$$

Para eventos con magnitudes M_s (ondas superficiales) reportadas u obtenidas, M_w es calculado usando las expresiones dadas por el ISC (International Seismological Center; Scordilis, 2006):

$$\begin{aligned} M_w &= 0.67 (\pm 0.005) M_s + 2.07 (\pm 0.03) & 3.0 \leq M_s \leq 6.1 \\ M_w &= 0.99 (\pm 0.02) M_s + 0.08 (\pm 0.13) & 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \end{aligned}$$

Definidas las fuentes sismogénicas, se dividió el catálogo sísmico en función al número de fuentes sismogénicas, determinándose de esta manera los eventos delimitados en cada fuente. Dado que el proceso de Poisson postula la utilización de datos mutuamente independientes, se procedió a eliminar los eventos sísmicos catalogados como réplicas y los eventos antecesores al evento principal. El Catálogo Sísmico empleado fue depurado mediante las metodologías propuestas por Reasenberg (1985) y Maeda (1996) y finalmente, se realizó un análisis exhaustivo espacial – temporal con el propósito de eliminar aquellos eventos sísmicos del catálogo que refieren al mismo sismo.

5.2.- Evaluación de Integridad del Catálogo

El catálogo sísmico para el Perú empieza en el año 1471; sin embargo, el primer evento para el cual el catálogo fue considerado completo fue uno en 1555 (es decir, eventos anteriores a 1555 fueron menores a M 8.0). Los

detalles sobre cómo se evaluó la integridad del catálogo son presentados en el siguiente párrafo.

La evaluación fue realizada usando un método desarrollado por Stepp (1972), que incluyó la generación de gráficas de integridad para inspeccionar visualmente la tasa de eventos sobre los años. Las gráficas fueron desarrolladas empezando en una magnitud mínima de 4.0 y realizado para cada 1.0 unidades de magnitud. Los eventos de grandes magnitudes ($M_w \geq 8.1$) fueron ubicados juntos dentro un rango único, dado que este tipo de eventos es muy escaso.

En base a la evaluación de la integridad del catálogo mediante el método propuesto por Stepp (1972), el catálogo es considerado completo desde 1964; para $M < 5.0$, desde 1960; para $5.1 \leq M < 6.0$, desde 1954; para $6.1 \leq M < 7.0$, desde 1906; para $7.1 \leq M < 8.0$. El catálogo en su totalidad se asumió completo para $M \geq 8.1$ desde 1555 (Cuadro 5.1).

El gráfico de integridad del catálogo desarrollado para este estudio se presenta en la Figura 5.1.

Cuadro 5.1.- Intervalo de tiempo con periodos completos para los sismos históricos

Rango de Magnitudes [M_w]	Tiempo considerado de completitud [Años]
≤ 5.0	56
5.1 – 6.0	60
6.1 – 7.0	66
7.1 – 8.0	114
≥ 8.1	465

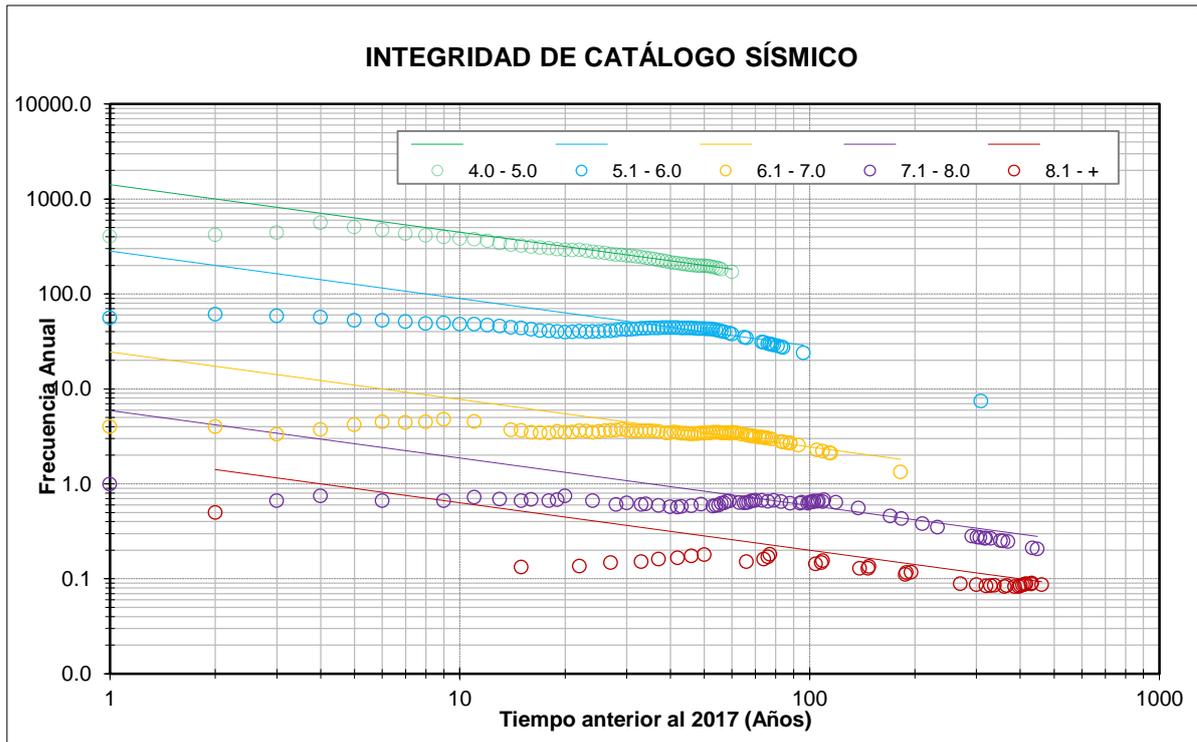


Figura 5.1.- Integridad del catálogo sísmico por el método de Stepp (1972), Aguilar et al. (2017)

5.3.- Modelos Sismotectónicos o Fuentes Sismogénicas

Posteriormente se evalúan los parámetros sismológicos de las fuentes influyentes en el área de estudio, dentro de un radio de 500 km (dentro del rango válido de distancias para los modelos de atenuación considerados en este estudio), dichas fuentes se muestran en la Figura 5.2.

Para dividir la sismicidad en cada fuente sísmica se empleó la ubicación del sismo, su profundidad, y mecanismo focal. Para ello se siguió el siguiente criterio:

- Para aquellos eventos que caen únicamente dentro de las fuentes F-3 y F-4, en los primeros 55 km de profundidad en el área de subducción fueron asumidos como sismos de interfase, para los sismos que escapan a dicho rango se revisó el catálogo de Centroide de Momento Tensor (CMT) (Dziewonski, Chou y Woodhouse, 1981 Ekström, Nettles y Dziewonski, 2012) y

aquellos eventos que tenían un mecanismo inverso fueron asignados como interfase y aquellos que tenían mecanismo normal fueron asignados como intraplaca. Si el mecanismo focal no estaba disponible, los eventos con profundidades mayores a 55 km fueron asignados como intraplaca.

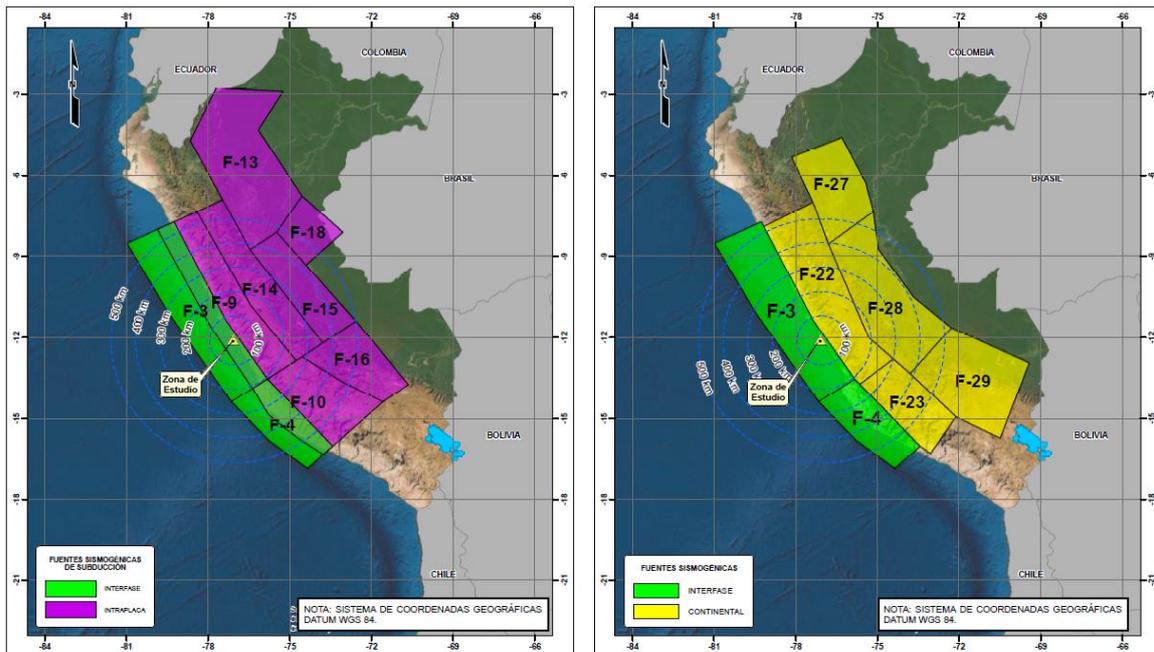


Figura 5.2.- Fuentes sismogénicas influyentes en la zona de estudio

- Los sismos ubicados dentro del área de traslape entre las fuentes (interfase) F-3 y F-4 con las fuentes F-9 y F-10 (intraplaca) y de profundidad menor a 55 km fueron asumidos como interfase.
- Los sismos ubicados dentro de F-22, F-23, F-27, F-28 y F-29 de profundidad menor a 40 km fueron asumidos como corticales.
- Las magnitudes mayores a M_w 6.0 fueron revisadas en base al mecanismo, ubicación, y cualquier otra información disponible para verificar que fueran correctamente asignados.
- Los datos sin una profundidad definida y aquellos eventos con profundidades por defecto (p. ej.: 33 km) no fueron tomados en consideración.

5.4.- Parámetros de Fuentes y Recurrencia de Sismos

Luego de caracterizar las fuentes sísmicas en función de sus geometrías, características geológicas y espaciales, se realiza la determinación de los requerimientos del análisis probabilísticos y determinísticos de peligro sísmico:

- *Evaluación de las magnitudes máximas y mínimas de cada fuente sísmogénica*
- *Selección de los parámetros necesarios para la evaluación determinística del peligro.*
- *Selección de los parámetros de recurrencia sísmica necesarios para la evaluación probabilística del peligro usando el modelo doblemente truncado de Gutenberg y Richter.*

Las relaciones de recurrencia sísmica representan la frecuencia de ocurrencia de sismos en una fuente. Estas relaciones son parámetros de entrada fundamentales para un análisis de peligro sísmico probabilístico. Para este estudio se utilizó el modelo de Gutenberg y Richter doblemente truncado. Este modelo también conocido como el Modelo exponencial se representa en su forma más básica por:

$$\log \lambda_m = a - bm$$

Donde:

- *a Representa la tasa de actividad de la fuente entendida como la tasa absoluta de recurrencia de terremotos con magnitudes mayores a cero.*
- *b Está relacionado a la probabilidad relativa de sismos con diferentes magnitudes.*

- λ_m Tasa o relación anual de excedencia, entendida como el número acumulativo de sismos de magnitudes mayores a la magnitud "m".

El modelo exponencial truncado a menudo se escribe de la siguiente manera:

$$\lambda m = v_0 \cdot \exp(-\beta m)$$

Donde:

- $v_0 = 10^a$
- $\beta = b \cdot \ln(10) \cong 2.3 b$

Las magnitudes de los sismos se distribuyen exponencialmente, lo cual implica que la tasa de recurrencia es mayor en sismos de menor magnitud. A pesar de que la relación de recurrencia sísmica puede ser aplicada a un infinito rango de magnitudes, es común limitar dichos valores sólo entre las magnitudes máxima y mínima registradas.

Para el cálculo de la tasa, se ha determinado los periodos de completitud del catálogo sísmico por rangos de magnitudes mencionados anteriormente. Los parámetros de recurrencia sísmica, para diferentes periodos de observación y diferentes magnitudes, se obtuvieron con el método propuesto por Weichert (1980). La metodología se basa en la estimación de la máxima probabilidad de los parámetros N_0 y β , de la relación $\text{Log}(N) = N_0 \exp(-\beta m)$, ésta es extendida al caso de un grupo de eventos de magnitud con diferentes periodos de observación.

Integrando bajo los intervalos de magnitud, nos lleva a la función de probabilidad L, para n_i eventos, de magnitud clase m_i :

$$L(\beta | n_i, m_i, t_i) = \frac{N!}{\prod_i n_i!} \prod_i p_i^{n_i}$$

Donde:

$$p_i = \frac{t_i \exp(-\beta m_i)}{t_j \exp(-\beta m_j)}$$

Los máximos o mínimos de $\ln(N)$ son obtenidos de:

$$\frac{\sum_i t_i m_i \exp(-\beta m_i)}{\sum_j t_j \exp(-\beta m_j)} = \frac{\sum n_i m_i}{N} = \bar{m}$$

Donde el valor de β se halla por métodos iterativos. La siguiente ecuación determina la tasa, que está definida como el número de sismos por tiempo. Para diferentes periodos de tiempos, la tasa está expresada por:

$$N_a = N \sum_i \exp(-\beta m_i) / \sum_j t_j \exp(-\beta m_j)$$

Nota: Para idénticos periodos de tiempo (t_i) la tasa está dada por N/t .

6.- ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO (GMPE)

Las ecuaciones de predicción del movimiento (GMPE por sus siglas en inglés) son expresiones matemáticas que estiman la propagación de las ondas sísmicas desde una fuente al área del proyecto. Varios factores se combinan para controlar la amplitud o intensidad, incluyendo refracción, reflexión, difracción, propagación geométrica y absorción.

Las GMPE's estiman el movimiento del suelo como una función de la magnitud, distancia, y condiciones del lugar (p. ej. suelo, roca, o V_{s30}). Las relaciones son derivadas por ajuste de ecuaciones para datos obtenidos de la instrumentación de movimientos del suelo para una región específica. Algunas relaciones, tales como el modelo del BC Hydro (2016), incluyen rupturas simuladas para aproximar el movimiento del suelo cuando no se disponen de datos.

6.1.- Ecuaciones de Movimiento para Sismos de Subducción

Para este análisis, los movimientos de interfase e intraplaca se modelaron utilizando las relaciones desarrolladas por Youngs et al. (1997); Zhao et al. (2006); y BC Hydro (2016). Estas GMPE's se seleccionaron en base a su aplicabilidad en el área del proyecto, dado que dichas leyes son válidas para rangos de periodos espectrales diferidos.

6.1.1.- Modelo de Predicción de Movimiento de Youngs *et al.* (1997)

Youngs *et al.* (1997) desarrollaron modelos de predicción del movimiento para zonas de subducción de sismos de interfase e intraplaca, usando datos de sismos registrados en Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú (14 registros) y las islas Salomón, para

distancias entre 10 y 500 km, teniendo en cuenta las características del sitio. Además, comentan que la aplicación de esta GMPE es apropiada para sismos de magnitud 5.0 a más.

Además, definieron las características del sitio en tres grupos: roca, suelo duro poco profundo y suelo profundo, consideraron eventos en roca a todos aquellos con velocidad de ondas de corte cercanos a los 750 m/s, eventos en suelo profundo aquellos con distancias a la roca mayores a 20 m y con velocidades de corte entre 180 y 360 m/s, y eventos en suelo poco profundo aquellos donde la profundidad del suelo es menor a 20 m (Cuadro 6.1).

Se utilizó la magnitud Momento M_w (Hanks y Kanamori, 1979) para la medida del evento. La localización epicentral, profundidad, magnitud y mecanismo focal fueron obtenidos de publicaciones especiales o del Harvard Centroid Moment Tensor Solutions.

- *Las relaciones propuestas por Youngs et al. (1997) corresponden a un amortiguamiento de 5 %. En este estudio se ha utilizado las relaciones de atenuación para ordenadas espectrales propuesta por Youngs et al. (1997) para roca.*

Cuadro 6.1. - Esquema de clasificación Geomatrix 3rd Letter

Tipo del Suelo	Nombre del Suelo	Velocidad de onda de corte, \bar{v}_s (m/s)	Comparativa Clasificación ASCE / AASHTO
A	Roca	$\bar{v}_s > 750$	B
B	Suelo rígido superficial	$360 < \bar{v}_s \leq 750$	C
C	Suelo profundo	$180 < \bar{v}_s \leq 360$	D
D	Suelo firme	$\bar{v}_s \leq 180$	E

La relación para ordenadas espectrales propuesta por Youngs en roca es:

$$\ln(Sa) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818 \times e^{0.554M}) + 0.00607H + Z_T$$

Con desviación estándar de

$$\ln(Sa) = C_4 + C_5 \times M$$

Donde:

- Sa Aceleración espectral expresada en g.
- M Magnitud de momento sísmico Mw.
- r_{rup} Distancia más cercana al área de ruptura en km.
- H Profundidad focal en km.
- Z_T 0 para sismos de interfase, 1 para sismos de intraplaca.

El *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* presenta los coeficientes de la ley de atenuación de aceleración espectral en roca propuesta por Youngs *et al.* (1997).

Cuadro 6.2.- Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Youngs *et al.* (1997)

Periodo (s)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
0.000	0.000	0.0000	-2.552	1.45	-0.1
0.075	1.275	0.0000	-2.707	1.45	-0.1
0.100	1.188	-0.0011	-2.655	1.45	-0.1
0.200	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.1
0.300	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.1
0.400	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.1
0.500	-0.400	-0.0048	-2.360	1.45	-0.1
0.750	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.1
1.000	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.1
1.500	-2.634	-0.0073	-2.160	1.50	-0.1
2.000	-3.328	-0.0080	-2.107	1.55	-0.1
3.000	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1

6.1.2.- Modelo de Predicción de Movimiento de Zhao *et al.* (2006)

Zhao *et al.* (2006) propusieron una ley de atenuación para zonas de subducción de sismos de interfase e intraplaca, usando datos de sismos registrados básicamente en Japón (basado en data sísmica adquirida hasta el 2003), Irán y la zona oeste de Estados Unidos con un total de 4726 sismos para mecanismos de subducción de corteza superficial, interfase e intraplaca.

Zhao *et al.* (2006) usaron cuatro clasificaciones de sitio, SC I, II, III y IV, correspondientes aproximadamente a cuatro clases, roca, suelo duro, suelo medio, y suelo suelto, definido por Molas & Yamazaki (1995). Se consideró eventos en roca a todos aquellos con velocidades de corte cercanos a los 600 m/s, eventos en suelos duro con velocidades de corte entre los 300 y 600 m/s, eventos en suelos medio con velocidades entre 200 y 300 m/s y eventos en suelos suelto con velocidades menores a 200 m/s (Cuadro 6.3).

Cuadro 6.3.- Esquema de clasificación de Molas & Yamazaki (1995)

Tipo del Suelo	Nombre del Suelo	V_{30} calculado del periodo de sitio (m/s)	Comparativa Clasificación ASCE / AASHTO
Hard Rock	Roca dura	$V_{30} > 1100$	A + B
SC I	Roca	$V_{30} > 600$	B + C
SC II	Suelo duro	$300 < V_{30} \leq 600$	C + D
SC III	Suelo medio	$200 < V_{30} \leq 300$	D
SC IV	Suelo suelto	$V_{30} \leq 200$	E + F

La relación para ordenadas espectrales propuesta por Zhao *et al.* (2006) en roca es:

$$\log_e(y_{i,j}) = aM_{wi} + bx_{i,j} - \log_e(r_{i,j}) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I - S_S + S_{SL} \log_e(x_{i,j}) + C_k + \xi_{i,j} + \eta_i$$

$$r_{i,j} = x_{i,j} + c \exp(dM_{wi})r_i$$

Donde:

- y Es el valor del PGA (en gals) considerando el 5 % de amortiguamiento de aceleración en espectro de respuesta para un periodo espectral T .
- M_w Magnitud momento.
- x Es la distancia a la fuente (km).
- h profundidad focal (km).

Además, el parámetro de falla-reversa F_R aplica únicamente para eventos continentales o de corteza superficial con mecanismo de falla reversa y es 0 (cero) para cualquier otro tipo de evento diferente. El parámetro tectónico por el tipo de fuente S_I aplica para eventos de interfase y adquiere el valor de 0 (cero) para cualquier otro evento, y SS aplica a eventos de intraplaca únicamente y es cero para cualquier otro tipo de evento. SSL es un factor independiente de la magnitud de los sismos el cual conduce a una modificación referente a los eventos de intraplaca. C_k es el término que involucra a la clase del sitio (tipo de suelo). En este caso, el modelo de Zhao et al. (2006) fue empleada considerando un suelo tipo B (roca, donde $C_k=C1$).

El subscrito i denota el número del evento y j denota el número de registro del evento i . El coeficiente h_c es la constante de profundidad, donde h es más grande que h_c , el término $e^{(h-h_c)}$ tiene un efecto que depende de δ_h que toma el valor de cero para $h < h_c$ y 1 para $h > h_c$. Cuando h es más grande que 125 km, $h=125$ km es seleccionado. Finalmente, el factor η_i es una variable aleatoria que refiere al error del intra-evento.

Adicional a ello, los coeficientes asignados para los diversos periodos estructurales que conforman los espectros de peligro uniforme (21 periodos) son presentados en el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4.- Coeficientes del modelo de aceleración espectral a nivel de roca (Suelo tipo B) propuesto por Zhao et al. (2006)

Periodo	A	B	C	D	E	F _R	S ₁	S ₅	S _{SL}	C1
PGA	1.101	-0.00564	0.0055	1.080	0.01412	0.251	0.000	2.607	-0.528	1.111
0.05	1.076	-0.00671	0.0075	1.060	0.01463	0.251	0.000	2.764	-0.551	1.684
0.10	1.118	-0.00787	0.0090	1.083	0.01423	0.240	0.000	2.156	-0.420	2.061
0.15	1.134	-0.00722	0.0100	1.053	0.01509	0.251	0.000	2.161	-0.431	1.916
0.20	1.147	-0.00659	0.0120	1.014	0.01462	0.260	0.000	1.901	-0.372	1.669
0.25	1.149	-0.00564	0.0140	0.966	0.01459	0.269	0.000	1.814	-0.360	1.468
0.30	1.163	-0.00590	0.0150	0.934	0.01458	0.259	0.000	2.181	-0.450	1.172
0.40	1.200	-0.00422	0.0100	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506	0.655
0.50	1.250	-0.00338	0.0060	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554	0.071
0.60	1.293	-0.00282	0.0030	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575	-0.429
0.70	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.220	-0.146	2.654	-0.572	-0.866
0.80	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.480	-0.540	-1.325
0.90	1.433	-0.00232	0.0020	1.109	0.00972	0.220	-0.206	2.332	-0.522	-1.732
1.00	1.479	-0.00220	0.0020	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509	-2.152
1.25	1.551	-0.00207	0.0020	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469	-2.923
1.50	1.621	-0.00224	0.0020	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379	-3.548
2.00	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248	-4.410
2.50	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221	-5.049
3.00	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263	-5.431
4.00	1.826	-0.00195	0.0040	1.044	0.00590	0.353	-0.390	0.561	-0.169	-6.181
5.00	1.825	-0.00237	0.0050	1.065	0.00510	0.248	-0.498	0.225	-0.120	-6.347

6.1.3.- Modelo de Predicción de Movimiento de BC Hydro (2016)

En el 2007, BC Hydro, el principal dueño de presas en Columbia Británica, Canadá, comenzó la mayor actualización de evaluación de peligro sísmico en las zonas de presas. Un tema clave fue los movimientos de sismos de zonas largas de subducción en Cascadia. Las nuevas ecuaciones de predicción de movimientos (GMPE's) desarrolladas como parte del estudio de Abrahamson *et al.* (2016) está descrito a detalle en BC Hydro (2012).

Para el estudio de BC Hydro (2012), los datos de movimiento inicial fueron tomados de Atkinson y Boore (2003, 2008), que incluye una compilación de datos de Crouse et al. (1988), Crouse (1991) y Youngs et al. (1997). Adicionalmente, los datos de movimientos de subducción fueron obtenidos de eventos en Japón (Zhao, 2008), Taiwán (Cheng, 2008), Sudamérica y América Central (Pacific Engineering, 2008) y México (Macías-Carrasco, 2008).

Los datos totales consisten en 9946 registros de pares de movimientos (dos componentes horizontales) de 292 sismos de zona de subducción. Un total de 3557 pares de registros son de 163 eventos de interface y 6389 pares de registros son de 129 eventos en intraplaca.

Para una distancia menor a 100 km, el modelo de BC Hydro predice movimientos medianos que caen dentro del rango de las actuales GMPE's. A largas distancias, el modelo de BC Hydro predice bajos movimientos basados en atenuaciones fuertes. Para largas distancias y magnitudes, el modelo BC Hydro tiende a limitar el rango del modelo de predicción GMPE para eventos intraplaca.

Una estimación del V_{s30} fue desarrollado para cada estación en el conjunto de datos. En algunos casos, los valores medidos V_{s30} estaban disponibles, pero, para la mayoría de las estaciones, se utilizaron las correlaciones entre las clasificaciones de sitio y los valores medios V_{s30} para estimar V_{s30} .

De las evaluaciones realizadas, la forma funcional fue usada para el análisis de regresión:

$$\ln(Sa_{Interface}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30})$$

$$\ln(Sa_{Slab}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3 (M - 7.8)) \ln(R_{hyp0} + C_4 \exp(\theta_9 (M - 6))) \\ + \theta_6 R_{hyp0} + \theta_{10} F_{event} + f_{mag}(M) + f_{depth}(Z_h) + f_{FABA}(R_{hyp0}) \\ + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30})$$

Donde

- Sa aceleración espectral en unidades de g
- M Magnitud de momento
- Z_h Profundidad hipocentral (km)
- F_{event} 0 para eventos de interface, 1 para eventos de intraplaca
- F_{FABA} 0 para antearco o sitios desconocidos, 1 para tras-arco

El factor de magnitud está dado por:

$$f_{mag}(M) = \theta_4 (M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_{13} (10 - M)^2 \text{ para } M \leq C_1 + \Delta C_1$$

$$f_{mag}(M) = \theta_5 (M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_{13} (10 - M)^2 \text{ para } M > C_1 + \Delta C_1$$

Donde $C_1 = 7.8$

El factor de profundidad está dado por:

$$f_{depth}(Z_h) = \theta_{11} (\min(Z_h, 120) - 60) F_{event}$$

El factor de ajuste por fuente de ante-arco/tras-arco está dado por:

$$f_{FABA}(R) = \theta_7 + \theta_8 \ln\left(\frac{\max(R_{hyp0}, 85)}{40}\right) F_{FABA} \text{ para } F_{event} = 1$$

$$f_{FABA}(R) = \theta_{15} + \theta_{16} \ln\left(\frac{\max(R_{hyp0}, 100)}{40}\right) F_{FABA} \text{ para } F_{event} = 0$$

El factor de respuesta de sitio está dado por:

$$f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30}) = \theta_{12} \ln\left(\frac{V_s^*}{V_{lin}}\right) - b \ln(PGA_{1100} + C) - b \ln\left(PGA_{1100} + C \left(\frac{V_s^*}{V_{lin}}\right)^n\right) \text{ para } V_{S30}$$

$$< V_{lin}$$

$$f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30}) = \theta_{12} \ln\left(\frac{V_s^*}{V_{lin}}\right) + b \ln\left(\frac{V_s^*}{V_{lin}}\right) \text{ para } V_{S30} \geq V_{lin}$$

Donde:

$$PGA_{1000} = \text{Valor intermedio PGA para } V_{S30} \geq 1000 \text{ m/s}$$

$$V_s^* = 1000 \text{ para } V_{S30} > 1000 \text{ m/s}$$

$$V_s^* = V_{S30} \text{ para } V_{S30} \leq 1000 \text{ m/s}$$

Cuadro 6.5.- Coeficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016)

Periodo	Vlin	b	θ1	θ2	θ6	θ7	θ8	θ10	θ11
0.000	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130
0.020	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130
0.050	1053.5	-1.346	4.5371	-1.400	-0.0012	1.2536	-1.65	3.37	0.0130
0.075	1085.7	-1.471	5.0733	-1.450	-0.0012	1.4175	-1.80	3.37	0.0130
0.100	1032.5	-1.624	5.2892	-1.450	-0.0012	1.3997	-1.80	3.33	0.0130
0.150	877.6	-1.931	5.4563	-1.450	-0.0014	1.3582	-1.69	3.25	0.0130
0.200	748.2	-2.188	5.2684	-1.400	-0.0018	1.1648	-1.49	3.03	0.0129
0.250	654.3	-2.381	5.0594	-1.350	-0.0023	0.9940	-1.30	2.80	0.0129
0.300	587.1	-2.518	4.7945	-1.280	-0.0027	0.8821	-1.18	2.59	0.0128
0.400	503.0	-2.657	4.4644	-1.180	-0.0035	0.7046	-0.98	2.20	0.0127
0.500	456.6	-2.669	4.0181	-1.080	-0.0044	0.5799	-0.82	1.92	0.0125
0.600	430.3	-2.599	3.6055	-0.990	-0.0050	0.5021	-0.70	1.70	0.0124
0.750	410.5	-2.401	3.2174	-0.910	-0.0058	0.3687	-0.54	1.42	0.0120
1.000	400.0	-1.955	2.7981	-0.850	-0.0062	0.1746	-0.34	1.10	0.0114
1.500	400.0	-1.025	2.0123	-0.770	-0.0064	-0.0820	-0.05	0.70	0.0100
2.000	400.0	-0.299	1.4128	-0.710	-0.0064	-0.2821	0.12	0.70	0.0085
2.500	400.0	0.000	0.9976	-0.670	-0.0064	-0.4108	0.25	0.70	0.0069
3.000	400.0	0.000	0.6443	-0.640	-0.0064	-0.4466	0.30	0.70	0.0054
4.000	400.0	0.000	0.0657	-0.580	-0.0064	-0.4344	0.30	0.70	0.0027
5.000	400.0	0.000	-0.4624	-0.540	-0.0064	-0.4368	0.30	0.70	0.0005
6.000	400.0	0.000	-0.9809	-0.500	-0.0064	-0.4586	0.30	0.70	-0.0013
7.500	400.0	0.000	-1.6017	-0.460	-0.0064	-0.4433	0.30	0.70	-0.0033
10.000	400.0	0.000	-2.2937	-0.400	-0.0064	-0.4828	0.30	0.70	-0.0060

6.2.- Ecuaciones de Movimiento de sismos de Corteza

Para las fallas corticales, se emplearon los modelos del NGA (Nueva Generación de relaciones de Atenuación): Abrahamson & Silva (2014 – 2015); Campbell & Bozorgnia (2014); Boore et. al. (2014) y Chiou & Youngs (2014).

6.2.1.- Modelo de Predicción del Movimiento de Boore et al. (2014)

Este modelo forma parte del proyecto NGA-West2 (Bozorgnia et al. 2014). Al igual que con los otros GMPE NGA-West2, se empleó la base de datos descrita por Ancheta et al. (2014), la cual se deriva de una base de datos global con eventos en un rango de magnitud de 3.0–7.9. en el que los movimientos de terreno se toman como el componente horizontal promedio. El modelo es aplicable para terremotos de M 3.0 a M 8.5 (excepto por la falta de restricción para $M > 7$ eventos de deslizamiento normal), a distancias de 0 a 400 km, en sitios con V_{S30} en el rango de 150 m/s a 1 500 m/s, y para períodos espectrales (T) de 0.01–10 s.

Las predicciones del movimiento del suelo vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$\ln(Y) = F_E(M, mech) + F_P(R_{JB}, M, region) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M, region, z_1) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{S30})$$

Donde:

- $\ln(Y)$ Representa el logaritmo natural de la intensidad (PGA, PGV o PSA)
- F_E, F_P, F_S Representan funciones de fuente (evento,
- M, R_{JB}, z_1 Parámetros de predicción
- $mech$ Parámetro de mecanismo focal
- $region$ Parámetro de corrección regional
- U, SS, NS, RS Parámetros ficticios que dependen del mecanismo focal del evento

La función de fuente F_E viene dada por:

$$F_E(M, mech) = e_0U + e_1SS + e_2NS + e_3RS + e_4(M - M_h) + e_5(M - M_h)^2 \quad M \leq M_h$$

$$F_E(M, mech) = e_0U + e_1SS + e_2NS + e_3RS + e_6(M - M_h) \quad M > M_h$$

La función de fuente F_P viene dada por:

$$F_P(R_{JB}, M, region) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln(R/R_{ref}) + (c_3 + \Delta c_3)(R - R_{ref})$$

Donde:

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$$

La función de fuente F_S viene dada por:

$$F_S(V_{S30}, R_{JB}, M, region, z_1) = \ln(F_{lin}) + \ln(F_{nl}) + F_{\delta z_1}(\delta z_1)$$

Donde:

- F_{lin} Componente lineal de la amplificación
- F_{nl} Componente no lineal de la amplificación
- $F_{\delta z_1}$ Representa el efecto de la profundidad del basamento

La componente lineal de la amplificación describe el escalamiento del movimiento en base a las velocidades de ondas de corte V_{s30} para condiciones de respuesta de sitio lineales.

$$\ln(F_{lin}) = c \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}}\right) \quad V_{S30} \leq V_C$$

$$\ln(F_{lin}) = c \ln\left(\frac{V_C}{V_{ref}}\right) \quad V_{S30} > V_C$$

La componente no lineal se representa por:

$$\ln(F_{nl}) = f_1 + f_2 \ln\left(\frac{PGA_r + f_3}{f_3}\right)$$

$$f_2 = f_4 [\exp\{f_5(\min(V_{S30}, 760) - 360)\} - \exp\{f_5(760 - 360)\}]$$

Donde:

- c Componente que describe el escalamiento por V_{s30}
- V_C Velocidad límite hasta la cual aplica la amplificación
- V_{ref} Es la condición del sitio para la cual la amplificación es la unidad
- f_i Son coeficientes del modelo

6.2.2.- Modelo de Predicción de Movimiento de Chiou & Youngs (2014)

Chiou & Youngs han desarrollado una actualización de su modelo realizado el 2008 para la máxima aceleración del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales de respuesta horizontal (5 % de amortiguamiento) causados por sismos continentales. La evaluación preliminar de la data de NGA-West2 indica la necesidad de incluir la regionalización para el reporte de diferencias regionales en la atenuación por distancia y respuesta del suelo de la fuente distante. La base de datos para la actualización del modelo fue restringida principalmente para movimientos de campos libres de sismos corticales en California. La data de 18 buenos registros de sismos $M \geq 6$ que ocurrieron fuera de California se añadió para complementar la data de California.

Anteriormente, desarrollaron el compilado de las ecuaciones usando la data para distancias de 70 km o menos. Esta restricción de la data pretendía eludir las consecuencias no deseadas del muestreo en la amplitud del movimiento causado por el truncamiento de datos a amplitudes bajas y grandes distancias. En esta actualización, en vez de aplicar un truncamiento uniforme de distancia para todos los sismos, se usó la distancia máxima empleable ($R_{m\acute{a}x}$) para cada sismo para tomar ventaja de la data empleable a distancias mayores a 70 km.

Las relaciones del 2008 no modelan explícitamente los efectos de directividad. En cambio, fueron aplicados como un factor posterior, pues incorporar el efecto de directividad como parte de la actualización fue el objetivo principal de estas nuevas ecuaciones. Entre las cinco parametrizaciones de directividad discutido en Spudich et al. (2013), escogieron el parámetro de punto directo (DPP) como el vaticinador del efecto de directividad.

La formulación revisada de la ecuación de predicción de movimiento está dada por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{refij}) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{Rvi} + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMI} \\
 & + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{TORi} \\
 & + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos\delta_i)^2 + c_2(M_i - 6) \\
 & + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \times \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUPij} \\
 & + c_8 \max\left(1 - \frac{\max(R_{RUPij} - 40.0)}{30}, 0\right) \times \min\left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta DPP_{ij} \\
 & + c_9 F_{HWij} \cos\delta_i \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{Xij}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{Jbij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\} \\
 \ln(y_{ij}) = & \ln(y_{refij}) + \eta_i + \phi_1 \times \min\left(\ln\left(\frac{V_{S30j}}{1130}\right)\right) \\
 & + \phi_2 \left(e^{\phi_3(\min(V_{S30j}, 1130) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)} \right) \ln\left(\frac{y_{refij} e^{\eta_i} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \phi_5 (1 - e^{-\Delta Z_{1.0j}/\phi_6}) + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}$$

Los coeficientes empleados en el modelo se muestran en el Cuadro 6.6, Cuadro 6.7, Cuadro 6.8 y en el Cuadro 6.9. Además, las variables e predicción de las ecuaciones presentadas son:

- M Magnitud momento.
- R_{RUP} Distancia más cercana (km) al plano de ruptura.
- R_{JB} Distancia más cercana (km) a la proyección de la superficie del plano de ruptura.
- R_X Coordenada de sitio (km) medida perpendicularmente al origen del evento desde la línea de falla.
- F_{HW} Muro colgante: 1 para $R_X \geq 0$ y 0 para $R_X < 0$.
- δ Ángulo de inclinación de la falla.

Cuadro 6.6.- Coeficientes del modelo $\ln(y_{ret})$ dependientes del periodo

Periodo	c_1	c_{1a}	c_{1b}	c_{1c}	c_{1d}	c_n	c_M	c_3
PGA	-1.5065	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	16.0875	4.9993	1.9636
0.020	-1.4798	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	15.7118	4.9993	1.9636
0.030	-1.2972	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	15.8819	4.9993	1.9636
0.040	-1.1007	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	16.4556	4.9993	1.9636
0.050	-0.9292	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	17.6453	4.9993	1.9636
0.075	-0.6580	0.1650	-0.2540	0.1650	0.2540	20.1772	5.0031	1.9636
0.100	-0.5613	0.1650	-0.2530	0.1650	0.2530	19.9992	5.0172	1.9636
0.120	-0.5342	0.1650	-0.2520	0.1650	0.2520	18.7106	5.0315	1.9795
0.150	-0.5462	0.1650	-0.2500	0.1650	0.2500	16.6246	5.0547	2.0362
0.170	-0.5858	0.1650	-0.2480	0.1650	0.2480	15.3709	5.0704	2.0823
0.200	-0.6798	0.1650	-0.2449	0.1650	0.2449	13.7012	5.0939	2.1521
0.250	-0.8663	0.1650	-0.2382	0.1650	0.2382	11.2667	5.1315	2.2574
0.300	-1.0514	0.1650	-0.2313	0.1650	0.2313	9.1908	5.1670	2.3440
0.400	-1.3794	0.1650	-0.2146	0.1650	0.2146	6.5459	5.2317	2.4709
0.500	-1.6508	0.1650	-0.1972	0.1650	0.1972	5.2305	5.2893	2.5567
0.75	-2.1511	0.1650	-0.1620	0.1650	0.1620	3.7896	5.4109	2.6812
1.000	-2.5365	0.1650	-0.1400	0.1650	0.1400	3.3024	5.5106	2.7474
1.500	-3.0686	0.1650	-0.1184	0.1650	0.1184	2.8498	5.6705	2.8161
2.000	-3.4148	0.1645	-0.1100	0.1645	0.1100	2.5417	5.7981	2.8514
3.000	-3.9013	0.1168	-0.1040	0.1168	0.1040	2.1488	5.9983	2.8875
4.000	-4.2466	0.0732	-0.1020	0.0732	0.1020	1.8957	6.1552	2.9058
5.000	-4.5143	0.0484	-0.1010	0.0484	0.1010	1.7228	6.2856	2.9169
7.500	-5.0009	0.0220	-0.1010	0.0220	0.1010	1.5737	6.5428	2.9320
10.000	-5.3461	0.0124	-0.1000	0.0124	0.1000	1.5265	6.7415	2.9396

Cuadro 6.7.- Coeficientes del modelo $\ln(y_{rel})$ dependientes del periodo

Periodo	c_5	c_{HM}	c_6	c_7	c_{7b}	c_8	c_{8b}
PGA	6.4551	3.0956	0.4908	0.0352	0.0462	0.0000	0.4833
0.020	6.4551	3.0963	0.4925	0.0352	0.0472	0.0000	1.2144
0.030	6.4551	3.0974	0.4992	0.0352	0.0533	0.0000	1.6421
0.040	6.4551	3.0988	0.5037	0.0352	0.0596	0.0000	1.9456
0.050	6.4551	3.1011	0.5048	0.0352	0.0639	0.0000	2.1810
0.075	6.4551	3.1094	0.5048	0.0352	0.0630	0.0000	2.6087
0.100	6.8305	3.2381	0.5048	0.0352	0.0532	0.0000	2.9122
0.120	7.1333	3.3407	0.5048	0.0352	0.0452	0.0000	3.1045
0.150	7.3621	3.4300	0.5045	0.0352	0.0345	0.0000	3.3399
0.170	7.4365	3.4688	0.5036	0.0352	0.0283	0.0000	3.4719
0.200	7.4972	3.5146	0.5016	0.0352	0.0202	0.0000	3.6434
0.250	7.5416	3.5746	0.4971	0.0352	0.0090	0.0000	3.8787
0.300	7.5600	3.6232	0.4919	0.0352	-0.0004	0.0000	4.0711
0.400	7.5735	3.6945	0.4807	0.0352	-0.0155	0.0000	4.3745
0.500	7.5778	3.7401	0.4707	0.0352	-0.0278	0.0991	4.6099
0.750	7.5808	3.7941	0.4575	0.0352	-0.0477	0.1982	5.0376
1.000	7.5814	3.8144	0.4522	0.0352	-0.0559	0.2154	5.3411
1.500	7.5817	3.8284	0.4501	0.0352	-0.0630	0.2154	5.7688
2.000	7.5818	3.8330	0.4500	0.0352	-0.0665	0.2154	6.0723
3.000	7.5818	3.8361	0.4500	0.0160	-0.0516	0.2154	6.5000
4.000	7.5818	3.8369	0.4500	0.0062	-0.0448	0.2154	6.8035
5.000	7.5818	3.8376	0.4500	0.0029	-0.0424	0.2154	7.0389
7.500	7.5818	3.8380	0.4500	0.0007	-0.0348	0.2154	7.4666
10.000	7.5818	3.8380	0.4500	0.0003	-0.0253	0.2154	7.7700

- Z_{TOR} Profundidad (km) a la parte superior del plano de ruptura.
- ΔZ_{TOR} Z_{TOR} centrado en el promedio, dependientes de M.
- F_{RV} Fallamiento inverso: 1 para $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ$ (combinación de inverso e inverso oblicuo), 0 para el resto; λ es el ángulo de ataque.
- F_{NM} Fallamiento normal: 1 para $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ$ (excluyendo normal oblicuo), 0 para el resto.
- V_{S30} Tiempo de viaje promedio para las velocidades de ondas de corte (m/s) de los primeros 30 m de suelo.
- $Z_{1.0}$ Profundidad (m) hasta la velocidad de onda de corte de 1.0 km/s.

- $\Delta Z_{1.0}$ $Z_{1.0}$ centrado en el promedio de $Z_{1.0}$ dependientes de V_{S30} .
- D_{PP} Parámetro de punto directo para el efecto de directividad.
- ΔD_{PP} D_{PP} centrado en el promedio D_{PP} del sitio y sismo específico.

Cuadro 6.8.- Coeficientes del modelo $\ln(y_{rel})$ dependientes del periodo

Periodo	c_g	c_{ga}	c_{gb}	c_{11b}	c_{g1}	c_{g2}	c_{g3}
PGA	0.9228	0.1202	6.8607	-0.4536	-0.0071	-0.0068	4.2542
0.020	0.9296	0.1217	6.8697	-0.4536	-0.0072	-0.0068	4.2386
0.030	0.9396	0.1194	6.9113	-0.4536	-0.0079	-0.0068	4.2519
0.040	0.9661	0.1166	7.0271	-0.4536	-0.0083	-0.0068	4.2960
0.050	0.9794	0.1176	7.0959	-0.4536	-0.0087	-0.0068	4.3578
0.075	1.0260	0.1171	7.3298	-0.4536	-0.0095	-0.0062	4.5455
0.100	1.0177	0.1146	7.2588	-0.4536	-0.0098	-0.0053	4.7603
0.120	1.0008	0.1128	7.2372	-0.4536	-0.0099	-0.0047	4.8963
0.150	0.9801	0.1106	7.2109	-0.4536	-0.0099	-0.0038	5.0644
0.170	0.9652	0.1150	7.2491	-0.4536	-0.0098	-0.0033	5.1371
0.200	0.9459	0.1208	7.2988	-0.4440	-0.0095	-0.0027	5.1880
0.250	0.9196	0.1208	7.3691	-0.3539	-0.0089	-0.0021	5.2164
0.300	0.8829	0.1175	6.8789	-0.2688	-0.0083	-0.0018	5.1954
0.400	0.8302	0.1060	6.5334	-0.1793	-0.0073	-0.0013	5.0899
0.500	0.7884	0.1061	6.5260	-0.1428	-0.0065	-0.0011	4.7854
0.750	0.6754	0.1000	6.5000	-0.1138	-0.0051	-0.0011	4.3304
1.000	0.6196	0.1000	6.5000	-0.1062	-0.0043	-0.0012	4.1667
1.500	0.5101	0.1000	6.5000	-0.1020	-0.0030	-0.0017	4.0029
2.000	0.3917	0.1000	6.5000	-0.1009	-0.0023	-0.0023	3.8949
3.000	0.1244	0.1000	6.5000	-0.1003	-0.0013	-0.0033	3.7928
4.000	0.0086	0.1000	6.5000	-0.1001	-0.0011	-0.0036	3.7443
5.000	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1001	-0.0010	-0.0036	3.7090
7.500	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1000	-0.0010	-0.0037	3.6632
10.000	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1000	-0.0010	-0.0037	3.6230

6.2.3.- Modelo de Predicción de Movimiento de Abrahamson & Silva. (2014)

Los modelos empíricos de predicción de movimiento para el componente horizontal promedio de sismos corticales en regiones tectónicas activas son derivadas usando la base de datos PEER NGA-

West2. Este modelo es aplicable a magnitudes entre 3.0 a 8.5, distancias entre 0 a 300 km, y periodos espectrales de 0 a 10 s. Los parámetros de ingreso del modelo son los mismos usados por Abrahamson & Silva (2008), con las siguientes excepciones: el nivel de ingreso de datos para efectos no lineales está basado en la aceleración espectral en el periodo de interés en vez del PGA; y el escalamiento de la distancia para el efecto de Hanging Wall (HW – bloque de roca que descansa sobre una falla inclinada) de los extremos de la ruptura incluye una dependencia en el azimut de la fuente de sitio.

Cuadro 6.9.- Coeficientes del modelo $\ln(y_{rel})$ dependientes del periodo

Periodo	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6
PGA	-0.5210	-0.1417	-0.007010	0.102151	0.0000	300
0.020	-0.5055	-0.1364	-0.007279	0.108360	0.0000	300
0.030	-0.4368	-0.1403	-0.007354	0.119888	0.0000	300
0.040	-0.3752	-0.1591	-0.006977	0.133641	0.0000	300
0.050	-0.3469	-0.1862	-0.006467	0.148927	0.0000	300
0.075	-0.3747	-0.2538	-0.005734	0.190596	0.0000	300
0.100	-0.4440	-0.2943	-0.005604	0.230662	0.0000	300
0.120	-0.4895	-0.3077	-0.005696	0.253169	0.0000	300
0.150	-0.5477	-0.3113	-0.005845	0.266468	0.0000	300
0.170	-0.5922	-0.3062	-0.005959	0.265060	0.0000	300
0.200	-0.6693	-0.2927	-0.006141	0.255253	0.0000	300
0.250	-0.7766	-0.2662	-0.006439	0.231541	0.0000	300
0.300	-0.8501	-0.2405	-0.006704	0.207277	0.0010	300
0.400	-0.9431	-0.1975	-0.007125	0.165464	0.0040	300
0.500	-1.0044	-0.1633	-0.007435	0.133828	0.0100	300
0.750	-1.0602	-0.1028	-0.008120	0.085153	0.0340	300
1.000	-1.0941	-0.0699	-0.008444	0.058595	0.0670	300
1.500	-1.1142	-0.0425	-0.007707	0.031787	0.1430	300
2.000	-1.1154	-0.0302	-0.004792	0.019716	0.2030	300
3.000	-1.1081	-0.0129	-0.001828	0.009643	0.2770	300
4.000	-1.0603	-0.0016	-0.001523	0.005379	0.3090	300
5.000	-0.9872	0.0000	-0.001440	0.003223	0.3210	300
7.500	-0.8274	0.0000	-0.001369	0.001134	0.3290	300
10.000	-0.7053	0.0000	-0.001361	0.000515	0.3300	300

Las diferencias regionales en la atenuación de distancia y longitud y escalamiento V_{S30} entre California, Japón, China y Taiwán son incluidos. El escalamiento para el efecto HW es mejorado usando restricciones de simulaciones numéricas. La desviación estándar es dependiente de la magnitud, con magnitudes más pequeñas que conducen a desviaciones estándar más largas en periodos cortos, pero desviaciones estándar más pequeñas a largos periodos. Los efectos de directividad no son incluidos mediante parámetros explícitos, pero son capturados por la variabilidad de los datos empíricos.

La data final consiste en 15750 registros de 329 sismos, de los cuales 221 son eventos de desgarre, 79 de los cuales son eventos inversos (ambos cubriendo el rango entero de magnitudes) y 29 son eventos normales, mayormente entre $4.6 < M < 6.0$.

Existen cuatro diferencias fundamentales en la forma de funcionamiento de las ecuaciones comparadas con las realizadas el 2008: (1) el modelo está extendido para magnitudes pequeñas; (2) el escalado del HW está mejor sintetizado por las simulaciones; (3) se ha incluido las diferencias regionales en la atenuación de largas distancias; y (4) las diferencias regionales en el escalado de V_{S30} han sido incluidas.

El modelo para ecuación de predicción de movimiento está dado por:

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{RUP}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{JB}) + f_5(\widehat{S}a_{1180}, V_{S30}) \\ & + F_{HW}f_4(R_{JB}, R_{RUP}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_1(M, R_{RUP}) \\ & + f_{10}(Z_1, V_{S30}) + Regional(V_{S30}, R_{RUP}) \end{aligned}$$

Las definiciones de los parámetros usados en el análisis de regresión son:

- M Magnitud momento
- C_{RJB} Centroide RJB
- Z_{TOR} Profundidad hasta la parte superior de la ruptura (km)
- F_{RV} Indicador para sismos de falla inversa
- F_N Indicador para sismos de falla normal
- F_{AS} Indicador para réplicas
- R_{RUP} Distancia de la ruptura (km)
- V_{S30} Velocidad de ondas de corte para los superiores
30 m (m/s)
- Z_1 Profundidad hasta la $V_S = 1.0$ km/s en el sitio (m)
- $\widehat{S}a_{1180}$ Mediana del pico de aceleración espectral (g) para
 $Vs30 = 1180$ m/s
- F_{HW} Indicador para sitios de 'hanging wall'
- R_{JB} Distancia Joyner-Boore (km)
- R_x Distancia horizontal (km) desde el límite superior
de ruptura
- R_{y0} Distancia horizontal hasta el final de la ruptura medida
en forma paralela a la fuente
- dip Inclinación de la falla en grados
- W Ancho de la ruptura de buzamiento (km)

La forma básica de la dependencia de magnitud y distancia para sismos corticales se presenta:

$$f_1 = \left\{ \begin{array}{l} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} \quad \text{para } M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} \quad \text{para } M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + a_6(M - M_2) \\ + a_7(M - M_2)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} \quad \text{para } M < M_2 \end{array} \right.$$

Donde:

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

El término que ha sido añadido a R_{RUP} dentro de la raíz cuadrada se refiere típicamente como “profundidad ficticia”, debido a la forma en que afecta al término distancia.

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

Gracias al modelo de estilo de fallamiento (SOF) se encontró que el factor de la diferencia entre movimiento del suelo para diferentes estilos de fallas no fue visto para largos grupos de magnitudes pequeñas de la data de California.

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

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

El modelo para la dependencia de V_{S30} de la amplificación de sitio es similar a los realizado en el 2008, pero ahora se usa la aceleración espectral media en roca dura ($\widehat{S}a_{1180}$) en vez de PGA para definir la fuerza de la sacudida.

$$f_5(\widehat{S}a_{1180}, V_{S30}) = \begin{cases} (a_{10} + bn) \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right) & \text{para } V_{S30} \geq V_{Lin} \\ (a_{10}) \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right) - b \ln(\widehat{S}a_{1180} + c) + b \ln\left(\widehat{S}a_{1180} + c \left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right)^n\right) & \text{para } V_{S30} < V_{Lin} \end{cases}$$

$$V_{S30}^* = \begin{cases} V_{S30} & \text{para } V_{S30} < V_1 \\ V_1 & \text{para } V_{S30} \geq V_1 \end{cases}$$

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

Los coeficientes empleados en el modelo se muestran en el Cuadro 6.10, Cuadro 6.11 y el Cuadro 6.12.

Cuadro 6.10. - Coeficientes de respuesta media

Periodo	c_4	M_1	M_2	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
PGA	4.50	6.75	5.00	0.587	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.02	4.50	6.75	5.00	0.598	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.03	4.50	6.75	5.00	0.602	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.05	4.50	6.75	5.00	0.707	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.08	4.50	6.75	5.00	0.973	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.10	4.50	6.75	5.00	1.169	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.15	4.50	6.75	5.00	1.442	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.20	4.50	6.75	5.00	1.637	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.25	4.50	6.75	5.00	1.701	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.30	4.50	6.75	5.00	1.712	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.40	4.50	6.75	5.00	1.662	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.50	4.50	6.75	5.00	1.571	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.75	4.50	6.75	5.00	1.299	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
1.00	4.50	6.75	5.00	1.043	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
1.50	4.50	6.75	5.00	0.665	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
2.00	4.50	6.75	5.00	0.329	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
3.00	4.50	6.82	5.00	-0.060	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
4.00	4.50	6.92	5.00	-0.299	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
5.00	4.50	7.00	5.00	-0.562	-0.765	0.275	-0.1	-0.41
6.00	4.50	7.06	5.00	-0.875	-0.711	0.275	-0.1	-0.41
7.50	4.50	7.15	5.00	-1.303	-0.634	0.275	-0.1	-0.41
10.00	4.50	7.25	5.00	-1.928	-0.529	0.275	-0.1	-0.41

Cuadro 6.11.- Coeficientes de respuesta media

Periodo	α_6	α_8	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{17}
PGA	2.154	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0072
0.02	2.146	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0073
0.03	2.157	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0075
0.05	2.085	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0080
0.08	2.029	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0089
0.10	2.041	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0095
0.15	2.121	-0.022	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0095
0.20	2.224	-0.030	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0086
0.25	2.312	-0.038	0.00	-0.1	0.60	-0.24	1.10	-0.0074
0.30	2.338	-0.045	0.00	-0.1	0.60	-0.19	1.03	-0.0064
0.40	2.469	-0.055	0.00	-0.1	0.58	-0.11	0.92	-0.0043
0.50	2.559	-0.065	0.00	-0.1	0.56	-0.04	0.84	-0.0032
0.75	2.682	-0.095	0.00	-0.1	0.53	0.07	0.68	-0.0025
1.00	2.763	-0.110	0.00	-0.1	0.50	0.15	0.57	-0.0025
1.50	2.836	-0.124	0.00	-0.1	0.42	0.27	0.42	-0.0022
2.00	2.897	-0.138	0.00	-0.1	0.35	0.35	0.31	-0.0019
3.00	2.906	-0.172	0.00	-0.1	0.20	0.46	0.16	-0.0015
4.00	2.889	-0.197	0.00	-0.1	0.00	0.54	0.05	-0.0010
5.00	2.898	-0.218	0.00	-0.1	0.00	0.61	-0.04	-0.0010
6.00	2.896	-0.235	0.00	-0.1	0.00	0.65	-0.11	-0.0010
7.50	2.870	-0.255	0.00	-0.1	0.00	0.72	-0.19	-0.0010
10.00	2.843	-0.285	0.00	-0.1	0.00	0.80	-0.30	-0.0010

Cuadro 6.12.- Coeficientes de respuesta de suelo lineal y no lineal

Periodo	α_{10}	V_{Lin}	b	n	c	α_{43}	α_{44}	α_{45}	α_{46}
PGA	1.735	660	-1.47	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.02	1.718	680	-1.46	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.03	1.615	770	-1.39	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.05	1.358	915	-1.22	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.08	1.258	960	-1.15	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.10	1.310	910	-1.23	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.15	1.660	740	-1.59	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.20	2.220	590	-2.01	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.03
0.25	2.770	495	-2.41	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	0.00
0.30	3.250	430	-2.76	1.5	2.4	0.10	0.05	0.03	0.03
0.40	3.990	360	-3.28	1.5	2.4	0.10	0.07	0.06	0.06
0.50	4.450	340	-3.60	1.5	2.4	0.10	0.10	0.10	0.09
0.75	4.750	330	-3.80	1.5	2.4	0.14	0.14	0.14	0.13
1.00	4.300	330	-3.50	1.5	2.4	0.17	0.17	0.17	0.14
1.50	2.600	330	-2.40	1.5	2.4	0.22	0.21	0.20	0.16
2.00	0.550	330	-1.00	1.5	2.4	0.26	0.25	0.22	0.16
3.00	-0.950	330	0.00	1.5	2.4	0.34	0.30	0.23	0.16
4.00	-0.950	330	0.00	1.5	2.4	0.41	0.32	0.23	0.14
5.00	-0.930	330	0.00	1.5	2.4	0.51	0.32	0.22	0.13
6.00	-0.910	330	0.00	1.5	2.4	0.55	0.32	0.20	0.10
7.50	-0.870	330	0.00	1.5	2.4	0.49	0.28	0.17	0.09
10.00	-0.800	330	0.00	1.5	2.4	0.42	0.22	0.14	0.08

6.2.4.- Modelo de Predicción de Movimiento de Bozorgnia & Campbell (2014)

El desarrollo de este modelo empírico de movimiento NGA-West2 Bozorgnia-Campbell analizado para la componente vertical del PGA, PGV, y amortiguamiento elástico de 5% de respuesta de aceleración espectral (PSA) en rangos de periodos verticales de 0.01 a 10.00 segundos. En el desarrollo se usó la extensa base de datos mundial PEER NGA-West2. Para el nuevo GMM vertical se consideró válido para sismos corticales en regiones tectónicas activas para rangos de magnitud de 3.3 a 8.5 Mw, dependiendo del tipo de falla, y distancias tan lejanas como 300 km de la falla.

La data entera de NGA-West2 incluye más de 21000 registros de tres componentes de sismos continentales en regiones tectónicas activas con magnitudes de rangos de 3.0 a 7.9 Mw. Además la base de datos incluye registros de distancias mayores de 100 km, el límite práctico que se usó para este estudio fue de 500 km en términos de distancia más cercana al plano de la falla de ruptura (R_{RUP}).

La forma general de funcionamiento para el GMM vertical está dada por la expresión:

$$\ln Y_V = \begin{cases} \ln PGA & PSA < PGA \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn}; & otherwise \end{cases}$$

Donde $\ln Y_V$ es el logaritmo natural de la predicción media de la GMIM vertical de interés, definido como PGA (g), PGV (cm/s), y PSA (g), y los términos 'f' representa el escalamiento de los GMIM con la magnitud del sismo, atenuación geométrica, tipo de fallamiento, geometría del 'hanging wall', respuesta de sitio, respuesta de área, profundidad hipocentral, inclinación de falla y atenuación inelástica, respectivamente.

Magnitud

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

Atenuación Geométrica:

$$f_{dis} = (c_5 + c_6 M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_7^2} \right)$$

Tipo de Fallamiento:

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M}$$

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

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

Hanging-Wall:

$$f_{hng} = c_{10} f_{hng,R_X} f_{hng,R_{RUP}} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta}$$

$$f_{hng,R_X} = \begin{cases} 0; & R_X < 0 \\ f_1(R_X); & 0 \leq R_X < R_1 \\ \text{máx}[f_2(R_X), 0]; & R_X \geq R_1 \end{cases}$$

$$f_1(R_X) = h_1 + h_2(R_X/R_1) + h_3(R_X/R_1)^2$$

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

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

$$R_2 = 62M - 350$$

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

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

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

Respuesta de sitio superficial:

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

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

$$f_{site,J} = \begin{cases} (c_{12} + k_2 n) \left[\ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right) - \ln\left(\frac{200}{k_1}\right) \right]; & V_{S30} \leq 200 \\ (c_{13} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right); & \text{Todos } V_{S30} \end{cases}$$

Respuesta de área:

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

Profundidad hipocentral:

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

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

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

Inclinación de falla:

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

Atenuación Inelástica:

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

Las definiciones de las variables de predicción aparecen en las ecuaciones dadas en las secciones anteriores como sigue:

- M Magnitud momento
- R_{RUP} Distancia (km) más cercana al plano de la falla de ruptura cosísmica
- R_{JB} Distancia (km) más cercana a la proyección de la superficie del plano de la falla de ruptura cosísmica
- R_X Distancia (km) más cercana a la proyección de la superficie vertical al límite superior la falla de ruptura cosísmica medida perpendicularmente a su promedio de fuente
- W Ancho (km) de la inclinación inferior al plano de ruptura de la falla.
- λ Ángulo (°) de ataque definido por el promedio de ángulos de medida de deslizamiento en el plano de ruptura entre la dirección de golpe al vector de deslizamiento.
- F_{RV} Indicador variable que representa la falla inversa e inversa oblicua, donde $F_{RV} = 1$ para $30^\circ < \lambda < 150^\circ$
 $F_{RV} = 0$ para el resto
- F_{NM} Indicador variable que representa la falla normal y normal oblicua, donde $F_{NM} = 1$ para $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$ y
 $F_{NM} = 0$ para el resto
- Z_{TOR} Profundidad (km) a la parte superior del plano de ruptura de la falla

- δ Ángulo ($^{\circ}$) promedio de inclinación del plano de ruptura de la falla medido desde un plano horizontal
- V_{S30} Tiempo promedio de la velocidad (m/s) de ondas de corte los primeros 30 m del sitio
- A_{1100} Es el PGA (g) vertical estimado medio en roca con $V_{S30} = 1100$ m/s
- S_j Indicador variable de los efectos de sitio regional representativo, donde $S_j = 1$ para sitios localizados en Japón y $S_j = 0$ para el resto
- $Z_{2.5}$ Profundidad (km) a los 2.5 km/s de velocidad de ondas de corte debajo del sitio
- Z_{HYP} Profundidad (km) hipocentral del sismo medido desde el nivel del mar.

Los coeficientes empleados en el modelo se muestran en el Cuadro 6.13, Cuadro 6.14, Cuadro 6.15 y el Cuadro 6.16.

Cuadro 6.13.- Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	c ₀	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
PGA	-4.729	0.984	0.537	-1.499	-0.443	-2.666	0.214	7.166
0.010	-4.674	0.977	0.533	-1.485	-0.445	-2.665	0.214	7.136
0.020	-4.548	0.976	0.549	-1.488	-0.453	-2.699	0.215	6.936
0.030	-4.050	0.931	0.628	-1.494	-0.464	-2.772	0.216	7.235
0.050	-3.435	0.887	0.674	-1.388	-0.552	-2.760	0.202	8.334
0.075	-3.435	0.902	0.726	-1.469	-0.543	-2.575	0.177	8.761
0.100	-3.930	0.993	0.698	-1.572	-0.470	-2.461	0.166	9.049
0.150	-5.505	1.267	0.510	-1.669	-0.452	-2.349	0.164	8.633
0.200	-6.280	1.366	0.447	-1.750	-0.435	-2.335	0.175	8.742
0.250	-6.789	1.458	0.274	-1.711	-0.410	-2.332	0.183	8.400
0.300	-7.400	1.528	0.193	-1.770	-0.305	-2.297	0.190	7.643
0.400	-8.750	1.739	-0.020	-1.594	-0.446	-2.219	0.185	7.059
0.500	-9.740	1.872	-0.121	-1.577	-0.489	-2.205	0.191	6.375
0.750	-11.050	2.021	-0.042	-1.757	-0.530	-2.143	0.188	5.166
1.000	-12.184	2.180	-0.069	-1.707	-0.624	-2.092	0.176	5.642
1.500	-13.451	2.270	0.047	-1.621	-0.686	-1.913	0.144	5.963
2.000	-13.700	2.271	0.149	-1.512	-0.840	-1.882	0.126	7.584
3.000	-13.900	2.150	0.368	-1.315	-0.890	-1.789	0.105	8.645
4.000	-14.594	2.132	0.726	-1.506	-0.885	-1.781	0.100	10.204
5.000	-15.634	2.116	1.027	-1.721	-0.878	-1.690	0.098	8.386
7.500	-17.129	2.223	0.169	-0.756	-1.077	-1.721	0.125	5.779
10.000	-17.657	2.132	0.367	-0.800	-1.282	-1.948	0.163	4.135

Cuadro 6.14. - Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	c ₈	c ₉	c ₁₀	c ₁₁	c ₁₂	c ₁₃	c ₁₄	c ₁₅
PGA	0.000	-0.230	0.759	-0.356	1.019	0.373	-0.117	-0.097
0.010	0.000	-0.229	0.759	-0.354	1.015	0.372	-0.119	-0.094
0.020	0.000	-0.270	0.768	-0.344	0.950	0.400	-0.145	-0.081
0.030	0.000	-0.315	0.766	-0.297	1.056	0.394	-0.196	-0.091
0.050	0.000	-0.329	0.764	-0.363	1.316	0.422	-0.187	-0.290
0.075	0.000	-0.290	0.795	-0.427	1.758	0.336	-0.095	-0.261
0.100	0.000	-0.203	0.842	-0.429	1.411	0.314	-0.100	-0.091
0.150	0.000	-0.203	0.736	-0.421	1.227	0.289	0.002	-0.092
0.200	0.000	-0.203	0.801	-0.429	0.987	0.290	0.040	-0.081
0.250	0.000	-0.203	0.715	-0.438	0.577	0.303	0.047	0.011
0.300	0.000	-0.203	0.708	-0.421	0.279	0.336	0.026	0.092
0.400	0.000	-0.203	0.683	-0.401	0.358	0.358	0.061	0.122
0.500	0.000	-0.203	0.704	-0.417	0.229	0.432	0.090	0.287
0.750	0.016	-0.203	0.602	-0.490	0.574	0.459	0.178	0.292
1.000	0.032	-0.115	0.394	-0.539	0.980	0.442	0.239	0.316
1.500	0.128	-0.005	0.328	-0.611	0.819	0.520	0.276	0.450
2.000	0.255	0.120	0.112	-0.630	0.044	0.566	0.305	0.424
3.000	0.284	0.170	0.011	-0.562	-0.396	0.562	0.348	0.300
4.000	0.261	0.170	0.000	-0.537	0.001	0.515	0.353	0.257
5.000	0.282	0.177	0.000	-0.442	-0.592	0.511	0.304	0.170
7.500	0.387	0.383	0.000	-0.343	-1.138	0.575	0.168	0.219
10.000	0.322	0.334	0.000	-0.199	-0.325	0.324	0.169	0.127

Cuadro 6.15.- Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	c ₁₆	c ₁₇	c ₁₈	c ₁₉	c ₂₀	Δc ₂₀ (JI)	Δc ₂₀ (CH)	k ₁
PGA	0.0	0.1020	0.0442	0.00784	-0.0053	-0.0018	0.0039	865
0.010	0.0	0.1026	0.0452	0.00784	-0.0053	-0.0018	0.0039	865
0.020	0.0	0.1059	0.0427	0.00786	-0.0052	-0.0018	0.0036	865
0.030	0.0	0.1175	0.0410	0.00815	-0.0052	-0.0020	0.0033	908
0.050	0.0	0.1238	0.0408	0.00783	-0.0062	-0.0026	0.0039	1054
0.075	0.0	0.1088	0.0516	0.00726	-0.0072	-0.0021	0.0048	1086
0.100	0.0	0.0918	0.0559	0.00644	-0.0072	-0.0018	0.0050	1032
0.150	0.0	0.0720	0.0447	0.00745	-0.0066	-0.0018	0.0048	878
0.200	0.0	0.0602	0.0485	0.00789	-0.0056	-0.0022	0.0041	748
0.250	0.0	0.0500	0.0416	0.00629	-0.0049	-0.0025	0.0034	654
0.300	0.0	0.0382	0.0438	0.00524	-0.0046	-0.0027	0.0031	587
0.400	0.0	0.0264	0.0307	0.00522	-0.0037	-0.0024	0.0024	503
0.500	0.0	0.0163	0.0287	0.00539	-0.0031	-0.0025	0.0021	457
0.750	0.0	-0.0016	0.0277	0.00501	-0.0021	-0.0025	0.0020	410
1.000	0.0	-0.0072	0.0277	0.00506	-0.0012	-0.0023	0.0012	400
1.500	0.0	-0.0262	0.0293	0.00353	-0.0004	-0.0013	0.0004	400
2.000	0.0	-0.0408	0.0221	0.00220	0.0000	-0.0004	0.0000	400
3.000	0.0	-0.0512	0.0321	-0.00137	0.0000	0.0000	0.0000	400
4.000	0.0	-0.0567	0.0225	0.00053	0.0000	0.0000	0.0000	400
5.000	0.0	-0.0429	0.0237	0.00233	0.0000	0.0000	0.0000	400
7.500	0.0	-0.0308	0.0171	-0.00298	0.0000	0.0000	0.0000	400
10.000	0.0	0.0067	-0.0017	0.00092	0.0000	0.0000	0.0000	400

Cuadro 6.16.- Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	k_2	k_3	a_2	h_1	h_2	h_3	h_5	h_6
PGA	0.0	0.0	0.167	0.241	1.474	-0.715	-0.337	-0.270
0.010	0.0	0.0	0.168	0.242	1.471	-0.714	-0.336	-0.270
0.020	0.0	0.0	0.166	0.244	1.467	-0.711	-0.339	-0.263
0.030	0.0	0.0	0.167	0.246	1.467	-0.713	-0.338	-0.259
0.050	0.0	0.0	0.173	0.251	1.449	-0.701	-0.338	-0.263
0.075	0.0	0.0	0.198	0.260	1.435	-0.695	-0.347	-0.219
0.100	0.0	0.0	0.174	0.259	1.449	-0.708	-0.391	-0.201
0.150	0.0	0.0	0.198	0.254	1.461	-0.715	-0.449	-0.099
0.200	0.0	0.0	0.204	0.237	1.484	-0.721	-0.393	-0.198
0.250	0.0	0.0	0.185	0.206	1.581	-0.787	-0.339	-0.210
0.300	0.0	0.0	0.164	0.210	1.586	-0.795	-0.447	-0.121
0.400	0.0	0.0	0.160	0.226	1.544	-0.770	-0.525	-0.086
0.500	0.0	0.0	0.184	0.217	1.554	-0.770	-0.407	-0.281
0.750	0.0	0.0	0.216	0.154	1.626	-0.780	-0.371	-0.285
1.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
1.500	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
2.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
3.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
4.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
5.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
7.500	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
10.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756

7.- EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

En el presente estudio se realiza el análisis de peligro sísmico para un suelo tipo B o Roca para ambos métodos, probabilístico y determinístico.

7.1.- Árbol Lógico de Decisión

7.1.1.- Eventos de Interfase: El modelo BC Hydro se basa en una gran base de datos que incluye todos los datos utilizados para desarrollar las relaciones de Zhao et al. (2006), Atkinson y Macías (2009), y Youngs et al. (1997). El modelo BC Hydro también usa simulaciones numéricas para limitar la extrapolación de magnitudes hasta eventos con una magnitud de M 9.0, en el Cuadro 7.1, se muestran los valores recomendados para controlar las extrapolaciones a grandes magnitudes para los eventos de interfase.

Cuadro 7.1.- Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de interfase

Periodo (s)	$\Delta C1$		
	Lower Value	Central Value	Upper Value
PGA	0.0	0.2	0.4
0.3	0.0	0.2	0.4
0.5	-0.1	0.1	0.3
1.0	-0.2	0.0	0.2
2.0	-0.3	-0.1	0.1
3.0-10.0	-0.4	-0.2	0.0

Las GMPE's seleccionadas han sido ponderadas para que el modelo BC Hydro represente aproximadamente la condición mediana, y también para que otros modelos capten el rango de potenciales valores. Para las GMPE's seleccionadas, 60 % de la ponderación fue asignada al modelo BC Hydro (dividido en tres opciones de extrapolación a grandes

magnitudes) y el 40 % restante se distribuyó entre Zhao et al. (2006) y Youngs *et al.* (1997).

7.1.2.- Eventos de Intraplaca: Todas las GMPE's utilizadas en este análisis ofrecen resultados similares en el rango de Mw 6.0 – 7.0 para los eventos intraplaca ya que los conjuntos de datos sobre movimiento de suelo para estos eventos son amplios. Una consideración importante al aplicar estas GMPE's es la forma en la que los modelos extrapolan eventos de $M > 8.0$. Los modelos de BC Hydro (2016) y Zhao et al. (2006) tienen una fuerte extrapolación a magnitudes grandes, lo cual conlleva a tener fuertes movimientos de suelo para eventos de magnitud superior a 8.0.

Con el fin de controlar la extrapolación en eventos de intraplaca, BC Hydro recomienda utilizar el valor de $\Delta C1 = -0.3$ para todos los periodos espectrales para eventos de este tipo. Adicionalmente, para capturar la incertidumbre epistémica se recomienda un rango adicional del $\Delta C1$ de ± 0.2 además del valor central de $\Delta C1 = -0.3$ (es decir, menor $\Delta C1 = -0.5$, centro $\Delta C1 = -0.3$ y superior $\Delta C1 = -0.1$) para capturar la incertidumbre epistémica en la gran escala de magnitud de los eventos de intraplaca.

Cuadro 7.2.- Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de intraplaca

Periodo (s)	$\Delta C1$		
	Lower Value	Central Value	Upper Value
All Periods	-0.5	-0.3	-0.1

7.1.3.- Eventos Corticales: El modelo de Sadigh et al. (1997) y las Relaciones de Atenuación NGA fueron utilizadas como GMPE para las fallas corticales y la zona de fuentes de fondo. Las GMPE's fueron igualmente ponderadas. Las ecuaciones que se implementaron en este estudio emplean la mejor información disponible, ya que estos modelos han demostrado ser aplicables a nivel mundial.

El Cuadro 7.3 se resumen las ponderaciones asociadas a cada modelo de predicción de movimiento del suelo, tanto de subducción como de corteza.

Cuadro 7.3.- Valores de Ponderación del Árbol Lógico de Decisión

Modelo de Predicción del Movimiento		Interfase	Intraplaca	Corteza
		Valor de ponderación asociado		
BC Hydro	$\Delta C1 = \text{Lower Values for each Period}$	0.2	N/A	N/A
	$\Delta C1 = \text{Central Values for each Period}$	0.2	N/A	N/A
	$\Delta C1 = \text{Upper Values for each Period}$	0.2	N/A	N/A
	Lower Value $\Delta C1 = -0.5$	N/A	0.2	N/A
	Central Value $\Delta C1 = -0.3$	N/A	0.2	N/A
	Upper Value $\Delta C1 = -0.1$	N/A	0.2	N/A
Zhao <i>et al.</i> (2006)		0.2	0.2	N/A
Youngs <i>et al.</i> (1997)		0.2	0.2	N/A
Atkinson & Boore (2014)		N/A	N/A	0.25
Chiou & Young (2014)		N/A	N/A	0.25
Abrahamson & Silva (2014)		N/A	N/A	0.25
Boore <i>et al.</i> (2014)		N/A	N/A	0.25

7.2.- Evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, el peligro sísmico puede calcularse considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas analizadas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se proyectará la estructura.

Un PSHA puede describirse como un procedimiento compuesto por cuatro pasos (Kramer, 1996):

- Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, asignando una distribución de probabilidad a cada zona de fuente.
- Caracterización de la recurrencia sísmica.

- Determinación del movimiento de suelo producido en el área del proyecto por sismos de cualquier magnitud posible que ocurren en cualquier punto posible en cada zona de fuente.
- Cálculo de la probabilidad de que el parámetro de movimiento de suelos sea excedido durante un periodo determinado de tiempo dadas las incertidumbres en la ubicación sísmica, magnitud de sismo y parámetros del movimiento de suelos.

La evaluación del peligro sísmico por el método probabilístico ha sido desarrollada en base a la metodología propuesta por Cornell (1968), en este método se define el peligro sísmico como la probabilidad de excedencia de que ocurra un movimiento fuerte del terreno de cierta intensidad en un sitio dado dentro de un periodo de tiempo determinado T (tiempo de exposición sísmica o vida útil de la estructura). El periodo de retorno T_r , que equivale al inverso de la probabilidad anual de excedencia se expresa como:

$$T_r = - \frac{T}{\ln(1 - P(Z > z))}$$

Donde;

- Z : Movimiento del terreno
- $P(Z > z)$: Probabilidad de excedencia deseada durante el tiempo de exposición T

En un análisis probabilístico del peligro sísmico, la ocurrencia temporal de sismos es comúnmente descrita por el modelo de Poisson el cual provee una manera sencilla de evaluar las probabilidades de eventos durante un intervalo de tiempo determinado; para el empleo de este modelo se deberá considerar que la ocurrencia de los eventos sísmicos responde a una distribución de Poisson, lo que implica suponer lo siguiente:

- Los eventos sísmicos analizados son independientes en el tiempo, es decir, que el número de ocurrencias de eventos sísmicos en un

intervalo de tiempo es independiente del número de eventos que ocurre en cualquier otro intervalo de tiempo.

- La probabilidad de ocurrencia durante un intervalo de tiempo muy corto es proporcional a la longitud del intervalo de tiempo.
- La probabilidad de que ocurra más de un evento sísmico durante un intervalo de tiempo muy corto es nula.

Estas suposiciones correspondientes a la distribución de Poisson no se ajustan a la ocurrencia de eventos de baja magnitud, sin embargo, representan adecuadamente la ocurrencia de los movimientos grandes, que son los de mayor interés para fines ingenieriles. En consecuencia, el modelo de distribución de Poisson es apropiado para evaluar el peligro sísmico probabilísticamente.

En su forma más general, la Ley de Poisson es expresada de la siguiente manera:

$$P_n(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}$$

Donde:

- $P_n(t)$: es la probabilidad de que haya eventos en un período de tiempo t ;
- n : es el número de eventos; y
- λ : es la razón de ocurrencia por unidad de tiempo.
- $\lambda \tau$: es el número esperado de eventos ocurridos

Luego, la forma funcional de la integral de peligro sísmico debido a la generación de eventos sísmicos en un conjunto de N fuentes sísmicas es la siguiente:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \iiint P_i [y > Y | m, r, \varepsilon] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) f_{\varepsilon_i}(\varepsilon) dm dr d\varepsilon$$

Donde las integrales tienen como límites las magnitudes y distancias máximas-mínimas de la fuente y los valores en los que se trunca la GMPE (proporcional al número de desviaciones estándar de la GMPE).

En la ecuación previa, $\lambda(y > Y)$ representa la tasa anual de excedencia del nivel de movimiento Y debido a la ocurrencia de sismos en las N fuentes, que es suma de las tasas anuales de excedencia $\lambda_i(y > Y)$ en cada una de las fuentes (las cuales representan una tasa anual de ocurrencia de sismos ν_i).

Los cálculos de este informe se llevaron a cabo utilizando el programa R-Crisis v 20.1.0, el cual fue desarrollado por Ordaz (2015). El proceso de verificación numérica de las versiones anteriores se llevó a cabo mediante la adopción como herramientas de las pruebas desarrolladas en un proyecto patrocinado por el *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER) por Thomas et al. (2010).

7.2.1.- Resultados del Peligro Sísmico Probabilístico: El peligro sísmico probabilístico calcula la frecuencia anual de exceder un nivel de movimiento de suelos específico. Los movimientos de suelo en el área del proyecto son calculados para el componente horizontal promedio de movimiento en términos de Aceleración Pico del Terreno (PGA, por su sigla en inglés) y la Respuesta de Aceleración Espectral (S_A) a un 5 % de atenuación para periodos de oscilación entre 0.01 y 3.00 segundos. En el Cuadro 7.4 se aprecia los resultados de la evaluación probabilística del peligro sísmico obtenidos con el programa R-CRISIS correspondiente a las máximas aceleraciones horizontales esperadas en el punto de análisis, en la zona de estudio, para suelo tipo B ($V_{s30} > 760$ m/s, Roca).

Cuadro 7.4. - Resumen de aceleraciones con $\xi = 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B ($V_{s30} > 760$ m/s)

Sitio	Periodo de Retorno	PGA (g)	0.20 s	1.00 s	1.50 s	2.00 s	3.00 s
San Miguel	475	0.525	1.162	0.363	0.231	0.164	0.092
	1000	0.694	1.549	0.485	0.312	0.223	0.125
	2475	0.935	2.120	0.659	0.432	0.311	0.175
Magdalena del mar	475	0.523	1.162	0.361	0.230	0.163	0.092
	1000	0.691	1.539	0.482	0.311	0.222	0.124
	2475	0.931	2.110	0.654	0.430	0.309	0.174
San Isidro	475	0.523	1.162	0.360	0.230	0.163	0.092
	1000	0.690	1.539	0.482	0.310	0.221	0.124
	2475	0.930	2.110	0.653	0.429	0.309	0.174
Miraflores	475	0.522	1.152	0.359	0.229	0.163	0.091
	1000	0.689	1.539	0.481	0.309	0.221	0.124
	2475	0.929	2.110	0.652	0.429	0.308	0.173
Barranco	475	0.522	1.152	0.359	0.229	0.163	0.091
	1000	0.689	1.539	0.480	0.309	0.221	0.124
	2475	0.929	2.110	0.651	0.428	0.308	0.173
Chorrillos	475	0.524	1.162	0.361	0.230	0.163	0.092
	1000	0.692	1.539	0.483	0.311	0.222	0.124
	2475	0.933	2.110	0.655	0.431	0.310	0.174

En el Anexo 3 Análisis Probabilístico se muestra las curvas de probabilidad anual de excedencia, así como los espectros de peligro uniforme desarrollados para los siete periodos de retorno seleccionados: 475 años, 975 años y 2475 años de periodo de retorno.

A partir de un análisis de peligro sísmico local, se estableció una grilla de puntos y las curvas de isoaceleraciones, el resultado final se puede observar en los mapas de isoaceleraciones mostrados en los planos P-08 al P-13, ver Figura 7.1 y Figura 7.2.

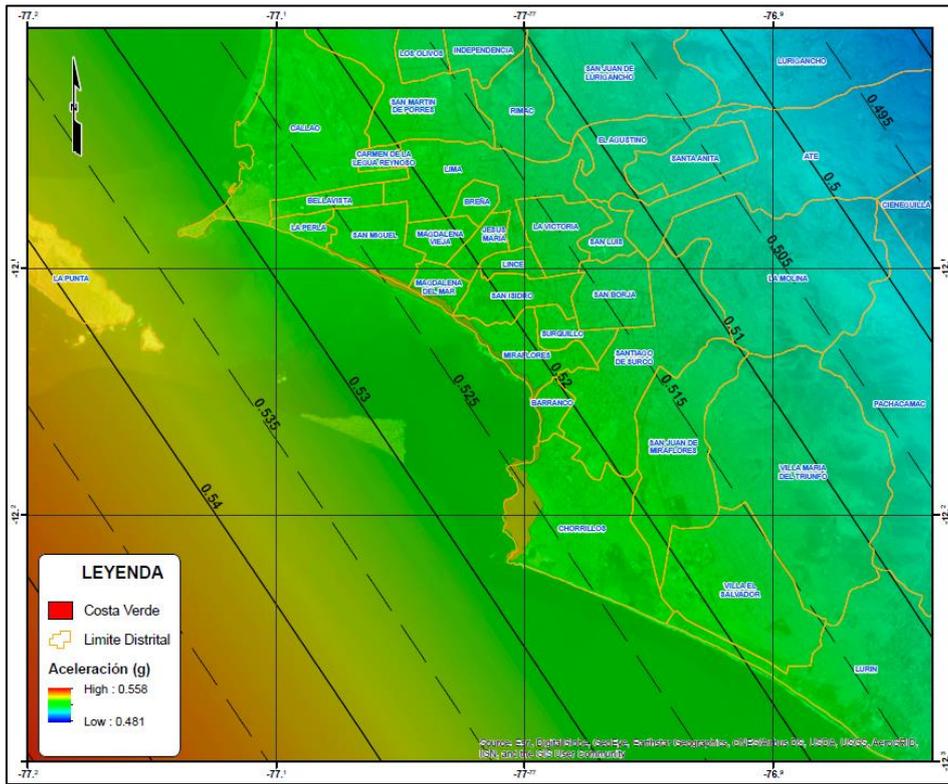


Figura 7.1.- Mapa de isoaceleraciones para un $T_r=475$ años, $T=0.00s$, Suelo tipo B

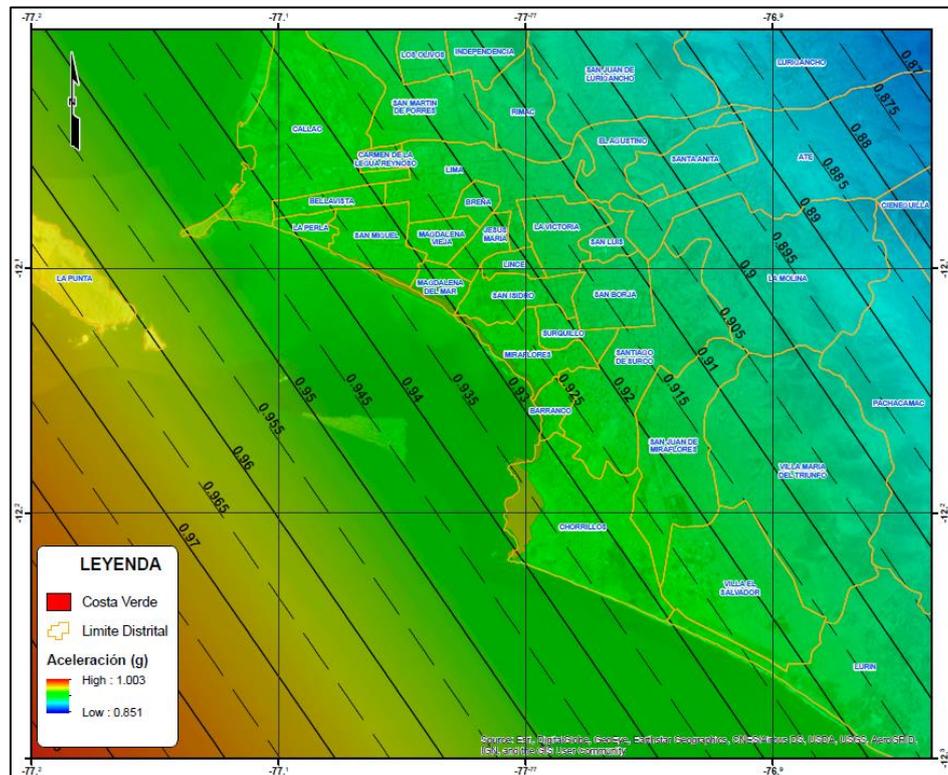


Figura 7.2.- Mapa de isoaceleraciones para un $T_r=2475$ años, $T=0.00s$, Suelo tipo B

8.- COEFICIENTE SÍSMICO HORIZONTAL

En el Perú no existen normativas que definan los coeficientes pseudo-estáticos a emplearse en un análisis de estabilidad, por lo que los coeficientes utilizados varían de acuerdo al criterio y experiencia del diseñador. Bajo esta premisa en el presente estudio se expone un criterio ampliamente aceptado en la comunidad científica para tales como las expresiones de Hynes y Franklin (1984) y el de Saragoni (1993).

8.1.- Hynes y Franklin (1984)

En caso de utilizar métodos pseudo-estáticos de análisis para el diseño de muros y taludes, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*, Hynes y Franklin, 1984) sugiere el empleo de un coeficiente sísmico horizontal equivalente al 50 % de la aceleración pico de diseño (PGA).

$$k = 0.50 * \frac{a_{max}}{g}$$

La recomendación del USACE está basada en la aplicación del método de Newmark para calcular desplazamientos permanentes en presas de tierra utilizando más de 350 registros sísmicos, concluyéndose que estas estructuras analizadas con el método pseudo-estático con factores de seguridad mayores que 1.0 utilizando un coeficiente sísmico horizontal de 50 % del valor del PGA, no desarrollan deformaciones mayores a 1.0 m, el cual es un valor arbitrario que puede ser tolerado por presas de tierra, sin representar una amenaza a la integridad del reservorio.

8.2.- Saragoni (1993)

$$k = 0.30 * \frac{a_{max}}{g} ; \text{ si } a_{max} < 6.6 \frac{m}{s^2} \text{ ó } 0.67g$$

$$k = 0.22 * \left(\frac{a_{max}}{g} \right)^{\frac{1}{3}} ; \text{ si } a_{max} \geq 6.6 \frac{m}{s^2} \text{ ó } 0.67g$$

Donde a_{max} representa a la aceleración pico del suelo (PGA) y g corresponde a la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

8.3.- Enfoque basado en el cálculo de los desplazamientos permanentes

El coeficiente sísmico usado en análisis pseudo estáticos de estabilidad de taludes es típicamente tomado como una porción del coeficiente sísmico máximo debido a que excede ligeramente la máxima resistencia por sismo por algunos instantes en los cuales se permite una pequeña acumulación de desplazamientos permanentes.

Bray & Travararou (2009) propusieron una base para la selección de un coeficiente sísmico (k) para ser empleado en los análisis pseudoestáticos de estabilidad de taludes, basados en los resultados de los estudios de Bray & Travararou (2009) sobre el análisis de desplazamientos permanentes empleando sismos de corteza. Recientemente, Bray, Macedo y Travararou (2017) realizan un trabajo similar enfocado a los desplazamientos permanentes de subducción interfase.

En estas metodologías, intervienen además el periodo degradado de vibración de la estructura de tierra, el coeficiente sísmico de fluencia K_y y el desplazamiento máximo tolerable por dichas estructuras. En base a esto, se propone una función de probabilidad de obtención de desplazamiento mayor que cierto valor permisible, el cual se dará para un determinado valor de coeficiente sísmico k . De esta manera se obtiene un valor más racional del coeficiente sísmico a emplear en los análisis pseudoestáticos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La distribución espacial de los sismos instrumentales indica una mayor actividad sísmica de la zona de subducción en la costa. La subducción de la Placa de Nazca próxima y más influyente a la zona de estudio muestra que las profundidades focales de los sismos de subducción aumentan siguiendo el buzamiento del contacto. La zona de estudio, la subducción superficial tiene un ángulo aproximado de 15° en la zona de interfase hasta una profundidad promedio de 80 km, posteriormente la inclinación de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana se va tornando subhorizontal alcanzando una distancia de 200 km a 350 km desde la fosa, para luego subducir hasta los 700 km de profundidad.

- En este estudio se ha utilizado el modelo sismotectónico desarrollado por Aguilar et al. (2017) que se enmarca en un radio de 500 km desde la zona de la zona de estudio. Dicho modelo está basado en la información sísmica instrumental e histórica, la geometría de subducción desarrollada en el mismo trabajo mediante interpolación de hipocentros y la geometría desarrollada por la USGS (2011).

- Las fuentes utilizadas en el presente proyecto constan de 02 fuentes de subducción de interfase (F-3 y F-4), 02 de subducción intraplaca intermedia (F-9, F-10); 05 fuentes de subducción intraplaca profunda (F-13, F-14, F-15, F-16 y F-18) y 05 fuentes corticales de fondo (F-22, F-23, F-27, F-28 y F-29). Las geometrías de estas últimas fueron estimadas y fueron consideradas con el fin de incluir posibles fallas geológicas no identificadas.

- Los niveles de aceleración con periodo de retorno de 475 años para un suelo Tipo B ($V_{s30} > 760$ m/s) muestran valores entre 0.522 - 0.525 g para la aceleración máxima (PGA) y entre 1.152 - 1.162 g y 0.359 - 0.363 g para la aceleración espectral con periodo de vibración de 0.20 s y 1.00 s respectivamente.

- Se presentan espectros de peligro uniforme para un suelo Tipo B según clasificación de sitio definido por el ASCE-7, 2016, los cuales podrán ser usados de manera referencial en el área del proyecto, dada las condiciones locales del terreno de fundación, dichos valores de aceleración de diseño propuesto no reflejan la amplificación local del suelo. En caso de que estructuras geotécnicas se proyecten sobre suelos distintos a un suelo Tipo B, se recomienda realizar un análisis de respuesta de sitio.

- Las conclusiones y recomendaciones del presente informe son aplicables solo y exclusivamente para el proyecto materia de evaluación en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson. N., Gregor. N., & Addo. K. (2015), "BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes", *Earthquake Spectra Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, Vol. 32, N° 1, pp. 23-44. A
- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., y Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1025-1055.
- Aguilar et al. (2017) "Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Peruvian Territory", 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago de Chile, Chile.
- Alva Hurtado J. E. (2004), "Banco de Datos de Mapas de Isosistas en el Perú", Página web del CISMID – FIC – UNI (http://www.cismid-uni.org/p_acelerograf/index.htm).
- Alva Hurtado J. E., Meneses J. y Guzmán V. (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.
- American Society of Civil Engineers - Structural Engineering Institute (2017), "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures"
- Barazangi M., Isacks B. (1976) "Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America: *Geology*, 4: 686-692.
- Bernal I., Tavera H., Antayhua Y. (2002) "Zonas sismogénicas en el Perú: volúmenes de deformación, gráficos polares y zonificación preliminar", *Bol. Soc. Geológica del Perú*, Vol. 93, p. 31-44.
- Berrocal J., (1974), "South American Seismotectonics from SAAS data",

Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Edinburg.

Boatwright, J; Boore, D. (1982), "Analysis of the ground accelerations radiated by the 1980 Livermore Valley earthquake for directivity and dynamic source characteristics", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, N° 1, pp. 43-64.

Bommer, J. J., (2002), "Deterministic vs. Probabilistic Seismic Hazard Assessment: An Exaggerated and Obstructive Dichotomy", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Special Issue 1, pp. 43 – 73, Imperial College Press.

Boore, D. (1983), "Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, Num. 6, pp. 1865-1894.

Boore, D.; Joyner, W. (1982), "The empirical prediction of ground motion", *Seismological Society of America*, Vol. 72, N° 6, pp. S43-S60.

Boore, D.; Joyner, W. (1984), "A note on the use of random vibratory theory to predict peak amplitudes of transient signals", *Seismological Society of America*, Vol. 74, N° 6, pp. 2035-2039.

Brian S.-J. Chiou and Robert R. Youngs (2014) Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra: August 2014*, Vol. 30, No. 3, pp. 1117-1153.

Bray, J. D., and Travararou, T. (2009) "Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation," *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, Vol. 135, No. 9, pp. 1336-1340.

Bray, J.D., Macedo, J., and Travararou, T. (2018) "Simplified Procedure for Estimating Seismic Slope Displacements for Subduction Zone

Earthquakes," J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, V. 144(3): 04017124.

Campbell KW, 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, PEER Report 2013/06.

Cahill, T., Isacks, B. (1992), "Seismicity and shape of the subducted Nazca plate", Journal of Geophysical Research, Vol. 97, N° B12, pp 17503-17529.

Castillo J. (1993), "Peligro Sísmico en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Christophersen A., Gerstenberger M. C., Rhoades D. A., Stirling M. W. (2011), "Quantifying the effect of declustering on probabilistic seismic hazard", Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, Auckland, New Zealand.

CMT (Global Centroid Moment Tensor Project).
<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 58, N°5 pg. 1538-1606.

Deza E. (1969), "Estudio Preliminar Sobre las Zonas de Transición que Separan Posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de Sudamérica: Zona de Transición en el Perú", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.

Dimaté C., Drake L., Yopez H., Ocola L., Rendon H., Grünthal G., Giardini D. (1999), "Seismic hazard assessment in the Northern Andes (PILOTO Project)", Annali di Geofisica, Vol. 42, Num. 6, pp. 1039 –

1055.

Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificaciones E.030, SENCICO 2018.

Dorbath, L., Cisternas, A. y Dorbath, C. (1990) "Assessment of the Size of large and Great Historical Earthquakes in Peru". BSSA, 80, pp 551-576.

Esteva, L. (1970), "Criterios para la Construcción de Espectros de Diseño", Publicación N 19 del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Seismic Hazard Analysis".

[www.bssconline.org/FEMA451B/Topic%205/Topic%205A/Topic05a-Seismic HazardAnalysisHandouts.pdf](http://www.bssconline.org/FEMA451B/Topic%205/Topic%205A/Topic05a-SeismicHazardAnalysisHandouts.pdf), 2007

Gamarra, C. A. (2010), "Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Grange, F. et al (1984), "Tectonics implications of the microearthquake seismicity and fault plane Solutions in the Southern Peru", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, pp 6139-6152.

Gregor, N., Abrahamson, N. A., Atkinson, G. M., Boore, D. M., Bozorgnia, Y., Campbell, K. W., Chiou, B., Idriss, I. M., Kamai, R., Seyhan, E., Silva, W., Stewart, J. P., y Youngs, R. (2014). Comparison of NGA-West2 GMPE's. Earthquake Spectra, 30(3), 1179-1197.

Gutenberg, B. (1945), "Magnitude determination for deep-focus earthquakes", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 35, pp. 117-130.

- Gutenberg, B.; Richter, C. (1956), "Earthquake magnitude: intensity, energy, and acceleration", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 46, pp. 104-145.
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Markatis, A., McCoy, E. y Mendis, R. (2006) "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets". Journal of Earthquake Engineering, Special Issue, accepted for publication.
- Hanks, T., McGuire, R. (1981), "The character of high frequency strong ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, pp. 2071-2095.
- Hynes-Griffin, M.E., Franklin, A.G., 1984. "Rationalizing the Seismic Coefficient Method. Miscellaneous" Paper GL-84-13, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Instituto Geofísico del Perú. (2001), "Catálogo Sísmico del Perú 1471 – 1982: Versión Revisada y Actualizada". Lima, Perú.
- International Building Code, (2012), International Code Council, Mayo 2011
- International Standard IEC 61400-1:2005-08, Wind Turbines – Part 2: Design Requirements.
- Isacks B., Oliver J. y Sykes L.R., (1968), "Seismology and Global Tectonics", Journal of Geophysical Research, Vol 73, N°18, págs. 5855-5899.
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., and Ando, C.J., (1983). Andean Tectonics Related to Geometry of the Subducted Nazca Plate. Geological Society of America Bulletin, v. 94, p. 341-361.

- Joyner, W.; Boore, D. (1988), "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion", Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, pp. 43-102, ASCE, New York.
- Kramer, S. L., (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Macharé J., Fenton, C., Machette, M., Lavenu, A., Costa, C. and Dart, R., (2003), "Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Peru and its Offshore Regions", Open-File Report 03-451, US Geological Survey, USA.
- Maeda, K. (1996). "The Use of Foreshocks in Probabilistic Prediction along the Japan and Kuril Trenches", Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 1A, pp. 242-254.
- McGuire, R., (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute, MNO-10.
- Marsan D., Lengliné O. (2008), "Extending Earthquakes' Reach Through Cascading", Science Vol. 319, pp. 1076 – 1079.
- Nick Gregor, Norman A. Abrahamson, Gail M. Atkinson, David M. Boore, Yousef Bozorgnia, Kenneth W. Campbell, Brian S.-J. Chiou, I. M. Idriss, Ronnie Kamai, Emel Seyhan, Walter Silva, Jonathan P. Stewart, and Robert Youngs (2014) Comparison of NGA-West2 GMPE's. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 1179-1197.
- Norman Abrahamson, Nicholas Gregor, and Kofi Addo (2016) BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. Earthquake Spectra: February 2016, Vol. 32, No. 1, pp. 23-44.
- Norman A. Abrahamson, Walter J. Silva, and Ronnie Kamai (2014) Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal

Regions. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 1025-1055.

Norman Abrahamson and Walter Silva (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. Earthquake Spectra: February 2008, Vol. 24, No. 1, pp. 67-97.

Norman A. Abrahamson and Julian J. Bommer (2005) Probability and Uncertainty in Seismic Hazard Analysis. Earthquake Spectra: May 2005, Vol. 21, No. 2, pp. 603-607.

Ordaz M. (1992), "Estimación de movimientos fuertes ante temblores de subducción", Tesis Doctoral, División de Estudios Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad nacional Autónoma de México.

Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. (2015) "Program for Computing Seismic Hazard: CRISIS 2015 ver 2.2", Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Patwardhan K.; Sadigh I. M.; Idriss and Youngs R. (1978). "Attenuation of Strong Motion Effect of Site Conditions. Transmission Path Characteristics and Focal Depths", submitted to the Bull Seismological Society of America.

Petersen M., Harmsen S., Haller K., Mueller C., Luco N., Hayes G., Dewey J. and Rukstales K. (2010), "Preliminary Seismic Hazard Model for South America", Conferencia: Sismología en Sudamérica y los mecanismos de prevención y mitigación del peligro y riesgo sísmico, Daniel Huaco Editor, Lima, Perú.

Pomachagua O. (2000), "Características Generales de la Tectónica y Sismicidad de Perú", Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP, pp. 93 – 104. Lima, Perú.

Reasenberg P. (1985), "Second-Order Moment of Central California Seismicity", Journal of Geophysical Research, Vol. 90, Num. B7,

pp. 5479 – 5495.

Sadigh K. Chang C., Egan J., Makdisi F., Youngs R. R., (1997), "Attenuation Relationship for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data", *Seismological Research Letters*, Volume 68, Number 1, January/February.

Saragoni, R. (1993). Análisis de riesgo sísmico para la reconstrucción del Puerto de Valparaíso. 6^{tas} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Vol 2, 165- 178.

Scordilis E. (2006), "Empirical global relations converting Ms and mb to moment magnitude", *Journal of Seismology*, Vol. 10, pp. 225-236.

Sebrier M., Huamán D., Blanc J. L., Macharé J., Bonnot D. y Cabrera J. (1982), "Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E., (1969). "Sismicidad de la Región Occidental de la América del Sur entre los paralelos 2° y 18° Latitud Sur", Primer Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, págs. 33-44.

Silgado, E. (1973). Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú 1955- 1970. *Geofísica Panamericana*, 2, 179-243.

Silgado E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

Silgado E. (1992), "Investigación de Sismicidad Histórica en la América del Sur en los Siglos XVI, XVII, XVIII y XIX", CONCYTEC, Lima, Perú.

SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur" Vol. 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.

Slemmons D. (1982), "Magnitude of Active Faults", U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, USA.

- Stepp J. (1972), "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard", International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Vol. 2., pp. 897 – 909.
- Tavera H. (1998), "Mecanismo Focal de Terremotos en Perú y Sismotectónica", Tesis para Optar el Grado de Doctor en Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, España.
- Tavera H. y Buforn E (1998), "Sismicidad y Sismotectónica de Perú", Física de la Tierra, N° 10, pp. 187 – 219. España.
- Tavera H., Vilca R. y Marín G. (2006), "Inferences on the Geometry of the Nazca Plate in Northwestern Peru Based on Data Collected by a Local Seismograph Network", Earth Science Research Journal, Vol. 10, N° 1, pp. 15 – 24.
- Timothy D. Ancheta, Robert B. Darragh, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, Walter J. Silva, Brian S.-J. Chiou, Katie E. Wooddell, Robert W. Graves, Albert R. Kottke, David M. Boore, Tadahiro Kishida, and Jennifer L. Donahue (2014) NGA-West2 Database. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 989-1005.
- Thomas et al. (2010) "Verification of Probabilistic Seismic Hazard Analysis Computer Programs", Pacific Earthquake Engineering Research (PEER), California, USA.
- USGS (2011). "Slab model for Subduction Zones".
<http://earthquake.usgs.gov/research/data/slab/>
- Wells, D. L., and K. J. Coppersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area,

- and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 4, 974-1002.
- Wyss, M., (1979). Estimating Maximum Expected Magnitude of Earthquakes from Fault Dimensions. *Geology* 7, p. 336-340.
- Weichert D. (1980), "Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 70, Num. 4, pp. 1337 – 1346.
- Wiemer S. (2001), "A software package to analyze seismicity: ZMAP", *Seismological Research Letter*, Vol. 72, Num. 2, pp. 375 – 383.
- Willemann R., Storchak D. (2001), "Data Collection at the International Seismological Centre", *Seismological Research Letter*, Vol. 72, Num. 4, pp. 440 – 453.
- Youngs, R. R., Chiou. S. J., Silva, W. J. and Humprey, J. R. (1997), "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, Numb. 1, Pp. 58 – 73, USA.
- Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., et al. (2006), "Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 898 – 913, June 2006, doi: 10.1785/0120050122.
- Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D. (2002), "Stochastic Declustering of Space-Time Earthquake Occurrences", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 97, Num. 458, pp. 369 – 380.
- Jonathan D. Bray and Thaleia Travararou. (2002), "Stochastic Declustering of Space-Time Earthquake Occurrences", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 97, Num. 458, pp. 369 – 380.

ANEXO 1.-SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA REGIÓN

Relación de Sismos Históricos

- **Sismo del 15 de noviembre de 1555**, ocurrió el temblor más fuerte desde la fundación de Lima, que causó muchos desperfectos en las edificaciones. Intensidad: VII (MMI) en Lima.
- **Sismo del 9 de julio de 1586**, a las 19:00 horas: Terremoto que destruyó Lima, con 14 a 22 víctimas. Tsunami en Callao y otros lugares. Fue sentido desde Trujillo hasta Caravelí, así como en Huánuco y Cuzco. Por 60 días se dejaron sentir las réplicas. Intensidades: Lima IX (MMI), Ica VI (MMI) y Trujillo III (MMI).
- **Sismo del 13 de noviembre de 1655**, a las 14:38 horas: Fuerte sismo que derrumbó muchas casas y edificios en Lima. Graves daños en el Presidio de la Isla San Lorenzo. Un muerto. Intensidades: San Lorenzo y Callao IX (MMI) y Lima VIII (MMI).
- **Sismo del 20 de octubre de 1687**, dos sismos en Lima a las 04:15 y 05:30 horas. La ciudad de Lima quedó muy dañada. Los estragos fueron grandes en el Callao y alrededores. Entre Ica y Cañete se formaron grietas en el subsuelo. Más de 100 muertos. Tsunami en el Callao. Intensidades: Cañete IX (MMI), Ica VIII (MMI), Lima y Callao VII (MMI).
- **Sismo del 28 de octubre de 1746**, a las 22:30 horas: Destrucción de casi la totalidad de casas y edificios en Lima y Callao. Murieron más de 1100 personas en Lima. Destrucción de 44,000 km². Sentido en Guayaquil, en la confluencia del río Marañón con el Huallaga, en Huancavelica (muy fuerte). En Lucanas (Ayacucho) hubo agrietamientos del terreno y deslizamientos. Se sintió en Cuzco y Tacna. Un tsunami de grandes proporciones inundó el Callao hasta 6 Km, matando casi toda la población y destruyendo Guañape y Punta Caballas. Intensidad de X (MMI) en Chancay y Huaral, IX –X (MMI) en Lima, Barranca y Pativilca, VIII (MMI) en Huaylas y la Cordillera Negra, VII (MMI) en Lucanas, Huancavelica y Pisco.
- **Sismo del 04 de Julio de 1839**, a las 19:30 horas: Terremoto en Chanchamayo. Ocasionó la caída de personas sentadas y sacó de su lecho al Río Aynamayo, cambiando su curso. Intensidad Chanchamayo VI – VII (MMI).
- **Sismo del 4 de marzo de 1904**, a las 05:17 horas: Fuerte movimiento sísmico en la ciudad de Lima. Intensidad aproximada:

- VII – VIII (MMI). En Pacasmayo y Chosica VI (MMI). Fue sentido en Casma, Trujillo, Huánuco, Pisco y Ayacucho III (MMI).
- **Sismo del 23 de febrero de 1907**, a las 15:17 horas: Fuerte movimiento sísmico percibido en un área aproximada de 106,000 km². Intenso en Matucana, Mala, Cañete, Chinchá, Pisco, Ica, Huancavelica y Puquio (Grado V). Menos intenso en Lima, Ancón y Huacho.
 - **Sismo del 16 de noviembre de 1907**, a las 05:10 horas: Temblor sentido en la costa entre Lambayeque y Casma, en la región central de Tarma, Cerro de Pasco, Huánuco y en la selva entre Masisea y puerto Bermúdez. Intensidad de V (MMI).
 - **Sismo del 12 de abril de 1909**, a las 03:05 horas: Fuerte movimiento de tierra que conmovió casi toda la región central del país; a lo largo de la costa fue percibido desde Salaverry a Ica. En la montaña en Puerto Bermúdez. En Lima fue de grado V RF; en la Hacienda Andahuasi, Huacho, causó averías y en Matucana daños mayores. La intensidad máxima se estimó en grado VI RF y el epicentro fue fijado en una región de los Andes, al NE de Lima.
 - **Sismo del 11 de marzo de 1926**, a las 06:20 horas: Fuerte sismo en la ciudad de Lima, se produjeron derrumbes en la ruta del ferrocarril central. Intensidad en Lima V – VI (MMI).
 - **Sismo del 17 de mayo de 1928**, a las 05:55 horas: Fuerte temblor en Cerro de Pasco, Cuzco, Macusani y Paucartambo. En este último lugar se produjeron derrumbes.
 - **Sismo del 19 de enero de 1932**, a las 21:33 horas. Violento sismo que causó muchos daños en Huacho, Lima. Se estima una intensidad de VI – VII (MMI) en Lima.
 - **Sismo del 05 de agosto de 1933**, a las 21:55 horas: Sismo en Lima, ligeros daños en casas antiguas. Rotura de vidrios en Ica. Sentido entre Huacho y Pisco en la costa, en Cerro de Pasco y otros pueblos de la Cordillera Central y en Puerto Bermúdez. Intensidades: Lima VI (MMI), Huacho e Ica V (MMI), Cerro de Pasco III (MMI) y Puerto Bermúdez II (MMI).
 - **Sismo del 24 de diciembre de 1937**, a las 01:23 horas: terremoto en las vertientes orientales de la Cordillera Central. Afectó Huancabamba y Oxapampa. En el Valle de Chontabamba, fueron 34 las casas completamente destruidas: en Oxapampa 7, en Progreso 23, en San David 10 y en Huancabamba 18. El movimiento sísmico fue sentido fuerte en San Ramón, La merced, Pozuso, Tarma en la Unión y Llata (Huánuco). Intensidades: Chontabamba IX (MMI), Huancabamba y Oxapampa VIII (MMI).

- **Sismo del 2 de Julio de 1938**, a las 06:06 y 06:57 horas: La ciudad de Tarma y poblaciones situadas en los valles del Mantaro y Chanchamayo fueron sacudidos por dos violentos sismos. El segundo sismo causó el derrumbe de varios cerros en Tarma. Intensidad: VII (MMI) en Tarma, V (MMI) en Huancayo, Jauja, La Merced y Oxapampa.
- **Sismo del 24 de mayo de 1940**, a las 11:35 horas: Terremoto de grado VIII (MMI) en Lima, fue sentido desde Guayaquil en el norte hasta Arica en el sur, hubo tsunami, causó 179 muertos y 3500 heridos. Intensidad de VI (MMI) en el Callejón de Huaylas, V (MMI) en Trujillo, IV (MMI) en Paita y Piura.
- **Sismo del 15 de junio de 1945**, a las 04:10 horas: Temblor muy fuerte en Lima, causó cuarteaduras en el barrio obrero del Rímac. Sentido desde Supe hasta Pisco en la costa, en Canta, Matucana, Morococha, Casapalca y Huaytará en el interior. Intensidad en Lima V (MMI).
- **Sismo del 21 de agosto de 1945**, a las 11:30 horas: Sismo en la Sierra Central y vertientes orientales de los Andes. Intensidades: en Cerro de Pasco y San Ramón V (MMI), en Lata y Huánuco IV (MMI). En las ciudades de la costa, entre Lima y Mala se sintió ligeramente estimándose un área aproximada de percepción a unos 210,000 km².
- **Sismo del 01 de noviembre de 1947**, a las 09:50 horas: Terremoto en la zona central del Perú. Hubo 200 muertos en Satipo, Andamarca, Acobamba, La Merced, Vitor, Comas y Perené. Daños pronunciados en Satipo, donde se desplomaron paredes gruesas de ladrillo. En La Merced quedaron inhabitables las casas de adobe, el mismo efecto se observó en otros pueblos del departamento de Junín. Jauja y Cerro de Pasco sufrieron numerosos desperfectos en sus casas de adobe. Infinidad de derrumbes entre San Ramón y Satipo. La carretera a Satipo fue destruida en varios tramos. Sentido en casi todo el territorio peruano. Intensidades: X (MMI) en Satipo, en Acobamba, La Merced, Vitor VII (MMI), en Huánuco, Cerro de Pasco, Huancayo, Puerto Ocopa VI (MMI).
- **Sismo del 10 de diciembre de 1950**, a las 21:50 horas: Fuerte temblor que ocasionó en la ciudad de Ica la muerte de 4 personas y averías de consideración en algunas edificaciones de adobe. Sobre el terreno provocó la abertura de grietas en algunos terrenos de sembríos, de los cuales surgió agua hasta una hora después del sismo. El sismo se sintió en una extensión de 490,000 km², que comprendió las ciudades de Chimbote, Huaraz y

Cajamarca al Norte, Cerro de Pasco, Satipo, Gran Pajonal al Noreste, Cusco al Este y Moquegua al Sur. Intensidades: Ica VII, Pisco V, Nazca V, Lima IV.

- **Sismo del 15 de enero de 1960**, a las 04:30 horas: Fuerte temblor en Lima y el sur. Provocó el derrumbe de casas en Nazca, Ica y Huancavelica. Intensidades: Palpa y Nazca VII, en Ica, Huancavelica y Huaytará VI, en Lima IV.
- Sismo del 3 de marzo de 1962, a las 19:41 horas: Fuerte sismo en el anexo de Yungul, Distrito de Ulcumayo, provincia de Junín, situado en una zona boscosa de las vertientes orientales de los Andes. Destrucción y agrietamiento de las partes altas. Intensidad VI –VII (MMI).
- **Sismo del 17 de octubre de 1966**, a las 16:41 horas: Fue uno de los más destructores ocurridos en Lima después del sismo de 1940. Cien personas muertas. Fue destructor a lo largo de la franja litoral entre Lima y Supe. La intensidad máxima se estimó en VIII (MMI). La aceleración producida en Lima fue de 0.4 g. Intensidades: VIII (MMI) en Huacho, Huaura, Chancay, Puente Piedra y Supe, VII (MMI) el Lima y Cajatambo, VI (MMI) en Chimbote, Virú y V (MMI) en Trujillo.
- **Sismo del 23 de Julio de 1969**, a las 22:00 horas: Sismo superficial que causó ligeros daños en las construcciones rurales de Chilifruta, Lampa, Pomamanta y Parihuanca en Junín. Después del sismo se observó un desplazamiento vertical del terreno en las faldas del nevado Huaytapallana. Intensidad de XI (MMI) en Huaytapallana.
- **Sismo del 1 de octubre de 1969**, a las 00:06 horas: Nuevo sismo que afectó las mismas poblaciones anteriores. Intensidad de V (MMI) en Huancayo. La falla causada por el sismo anterior fue reactivada, alcanzando una extensión de 16 Km, con desplazamiento vertical máximo de 1.6 m. y horizontal de 0.7 m. Intensidad de XI (MMI) en Huaytapallana y V MMI en la ciudad de Huancayo.
- **Sismo del 31 de mayo de 1970**, a las 15:23 horas: Fue uno de los sismos más catastróficos ocurridos en el Perú, murieron 50,000 personas, desaparecieron 20,000 y quedaron heridos 150,000, según informe CRYRSA. Con la evaluación de daños que esta entidad realizó se puede tener una idea de la catástrofe.
 - 60,000 viviendas necesitan reconstrucción.

- 38 poblaciones fueron afectadas, 15 quedaron con viviendas destruidas en más del 80%, el resto sufrió daños de consideración.
 - En 18 ciudades con un total de 309,000 habitantes los alcantarillados quedaron destruidos.
 - 6,730 aulas fueron destruidas.
 - La capacidad de energía eléctrica de Ancash y La Libertad quedó reducida a un 10%, por la serie de daños causados en la Central Hidroeléctrica de Huallanca.
 - Quedaron dañadas las facilidades para irrigar 110,000 hectáreas.
 - El 77% de los caminos de La Libertad y Ancash se interrumpieron, así como el 40% de los existentes en Chancay y Cajatambo.
 - Dentro de las características del sismo, se puede mencionar que, en la zona de la costa cercana al epicentro, se produjeron los fenómenos de licitación, deslizamiento de los taludes de la cordillera y el gran aluvión que arrasó con la ciudad de Yungay al desprenderse la cornisa norte del nevado Huascarán, arrastrando piedras, nieve y lodo.
 - En el Callejón de Huaylas los deslizamientos y escarpas fueron muchos, a la altura de Recuay se represó el río Santa, en la zona de la costa se agrietó el suelo con eyección de agua, arena y lodo, hasta una altura de un metro.
 - El sismo fue sentido desde Tumbes hasta Ica y desde la costa hasta Iquitos, produciéndose intensidades de IX (MMI) en Casma y Chimbote, VIII (MMI) en el Callejón de Huaylas y VII (MMI) en Trujillo, Moche y Paramonga.
- **Sismo del 10 de junio de 1971**, a las 01:47 horas: Deterioró varias casas rurales antiguas en Pasco. Sentido fuerte en Huánuco, Junín, Chincha e Ica. En Lima se estimó una intensidad de III – IV (MMI). Sentido en los departamentos de Ancash, La Libertad, Amazonas, San Martín y en Yurimaguas, Orellana, Pucallpa, Contamáná e Iquitos. Intensidad V – VI en Cerro de Pasco y V (MMI) en Huánuco.
 - **Sismo del 3 de octubre de 1974**, a las 19:01 horas: Sismo en Lima, Mala, Cañete, Chincha y Pisco. Fuerte temblor que duró cerca de dos minutos y afectó casas antiguas de adobe y quincha en el área litoral entre 12° y 14° S. En Lima sufrieron daños edificios públicos, iglesias, monumentos históricos, en varios

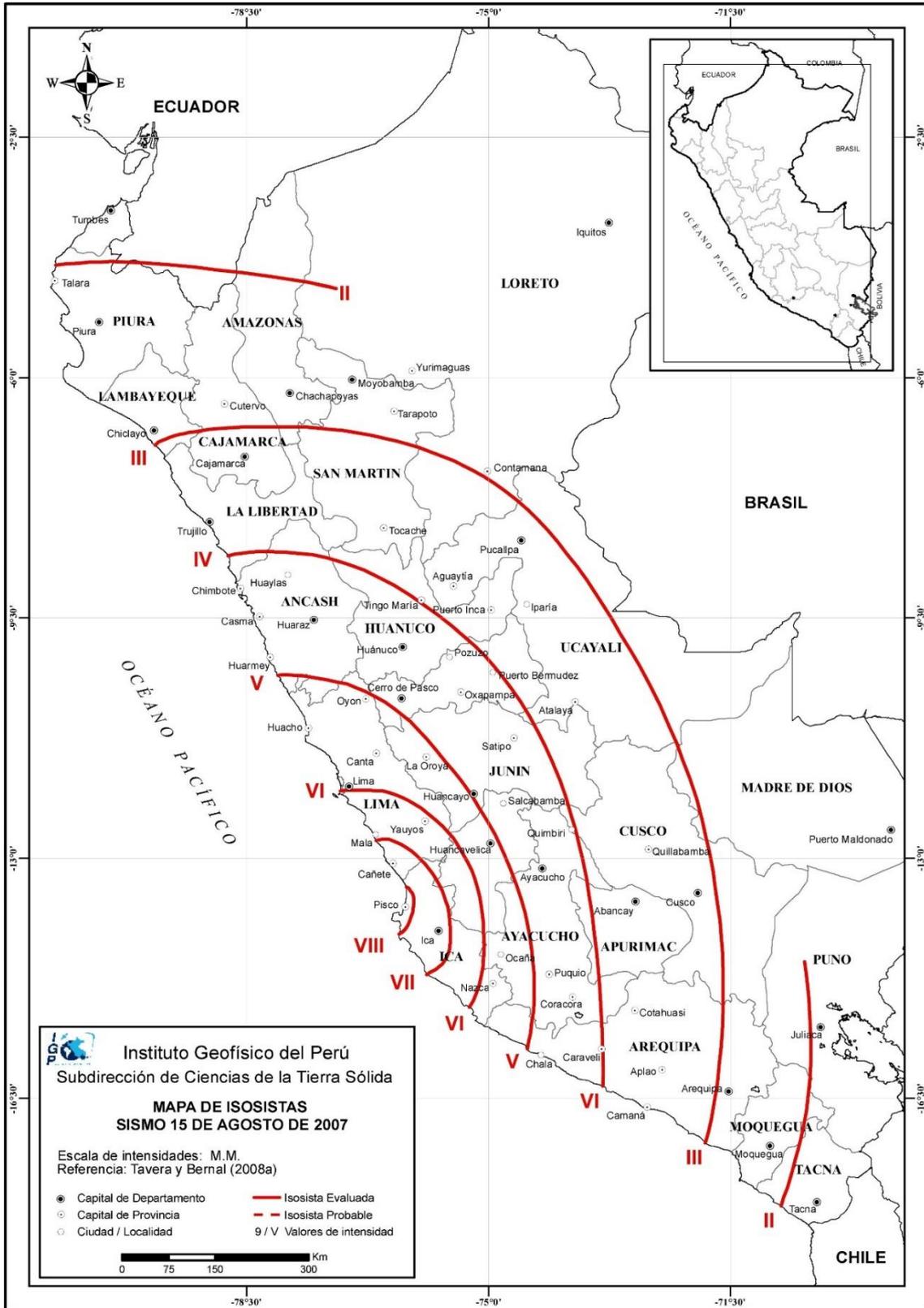
barrios con diferente intensidad entre V y VII (MMI), en locales próximos a cerros y de suelo poco consolidado (La Molina), se observaron intensidades de VII – IX (MMI) como consecuencia de la amplificación de las vibraciones causadas por el terreno. Se produjeron 78 muertos y 2,550 heridos en Lima; entre Mala y Pisco: 13 muertos y numerosos heridos.

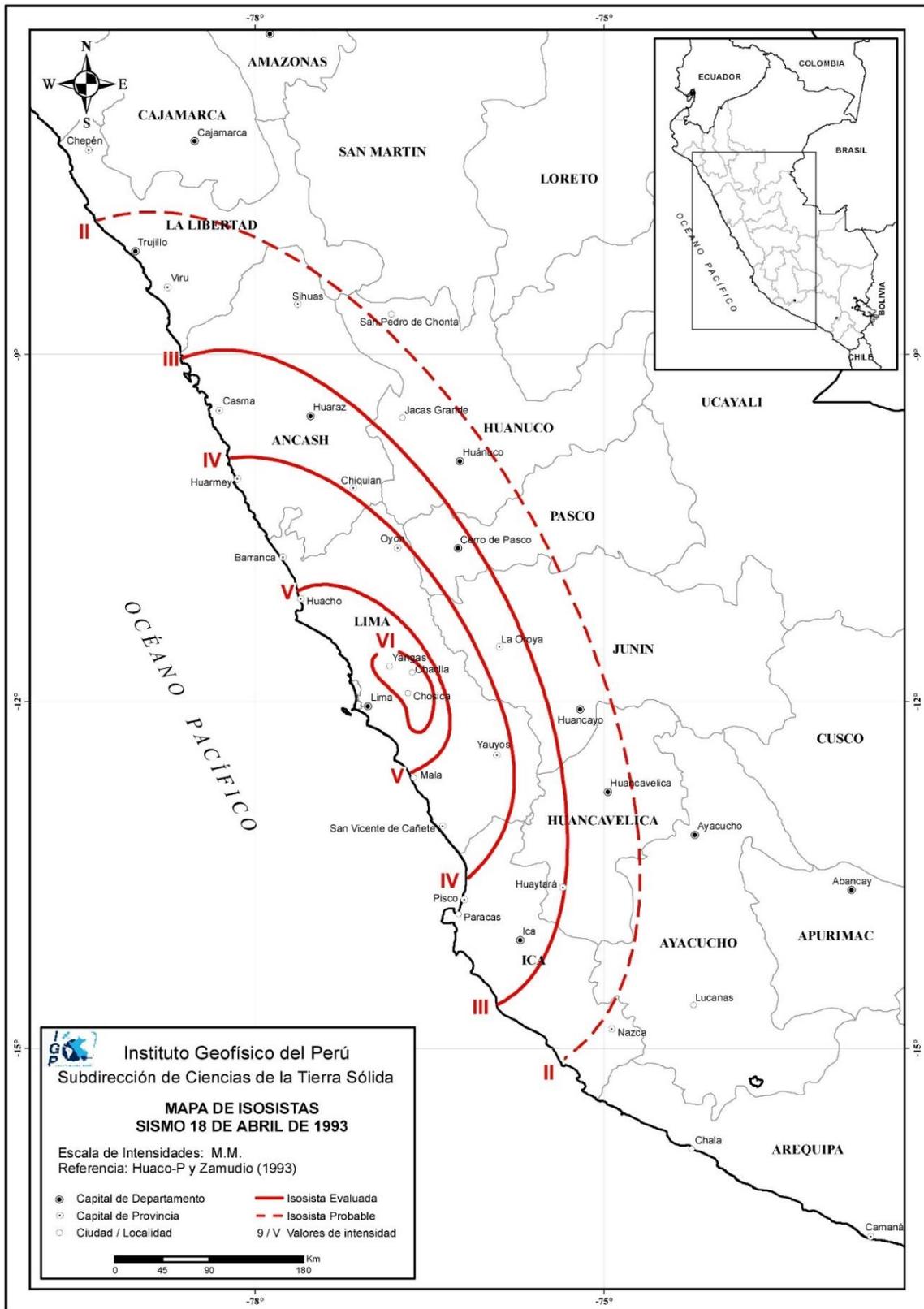
- **Sismo del 18 de abril de 1993**, a las 04:16 horas. Se produjo un fuerte sismo que sacudió la ciudad de Lima y alrededores, en un radio de aproximadamente de 140 km. El sismo originó daños considerables en las viviendas construidas con materiales inestables, en los alrededores de la ciudad y las zonas altas de Lima; ocasionando la muerte de 8 personas y 55 heridos. Este terremoto fue uno de los de mayor magnitud, después del terremoto del 03 de octubre de 1974. El epicentro se localizó a 55 Km. al Nor Este de la ciudad de Lima. (localidades de Arahua y Lachaqui – Canta). No se registró ninguna réplica. Magnitud 5.8 Mb.
- **Sismo del 12 de noviembre de 1996**, a las 16:59 horas ocurrió un sismo de magnitud 7.7 Mw que afectó principalmente a la localidad de Nasca, Departamento de Ica. El epicentro del terremoto llamado "Terremoto de Nasca" fue localizado a 135 km al Sur-Oeste de la localidad de Nazca. Este terremoto fue acompañado de una serie de 150 réplicas durante las primeras 24 horas causando alarma en las localidades de Nazca, Palpa, Ica, Acari y Llauca, las mismas que soportaron intensidades máximas de VII (MMI) durante el terremoto principal. Se reportó 17 personas muertas, 1500 heridos y 100,000 damnificados. En cuando a infraestructura más de 5,000 viviendas fueron destruidas, 12,000 afectadas. El costo económico de perdidas fue del orden de 42 millones de dólares.
- **El 15 de Agosto de 2007**, a la 18 horas y 40 minutos (hora local), la zona sur de la región central de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 7.0ML (Richter) que en algunos segundos produjo muerte y destrucción en las ciudades de Pisco, Ica y Chíncha en donde se evaluaron intensidades máximas de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM).El terremoto produjo intensidades de V (MM) en la ciudad de Lima y fue sentido hasta las ciudades de Piura, Arequipa, Cusco y Pucallpa con intensidades del orden de II-III (MM).

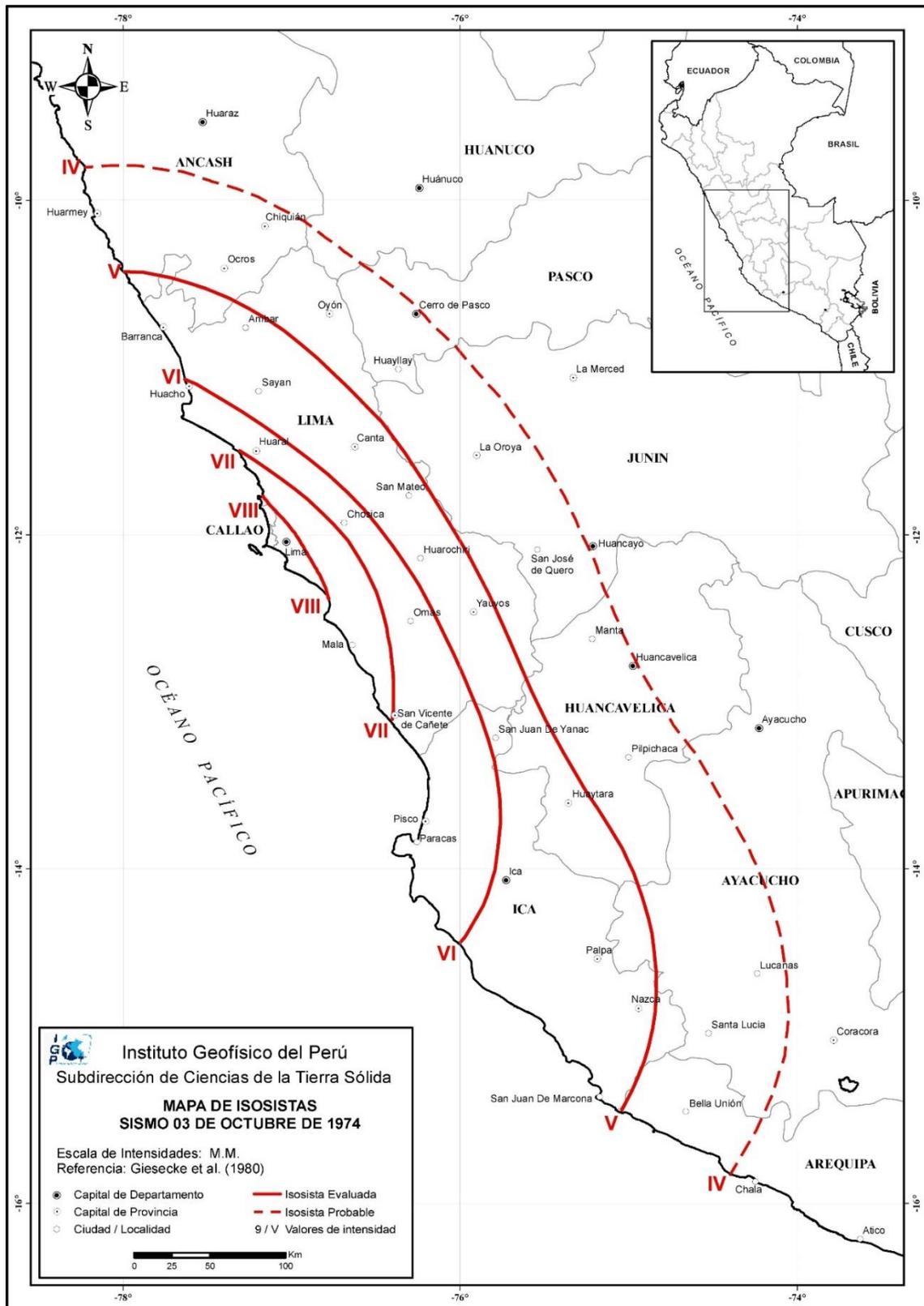
Este sismo tuvo como características principales su gran duración y el aparente proceso complejo de ruptura que experimento, para luego ser seguido por un gran número de réplicas con magnitudes

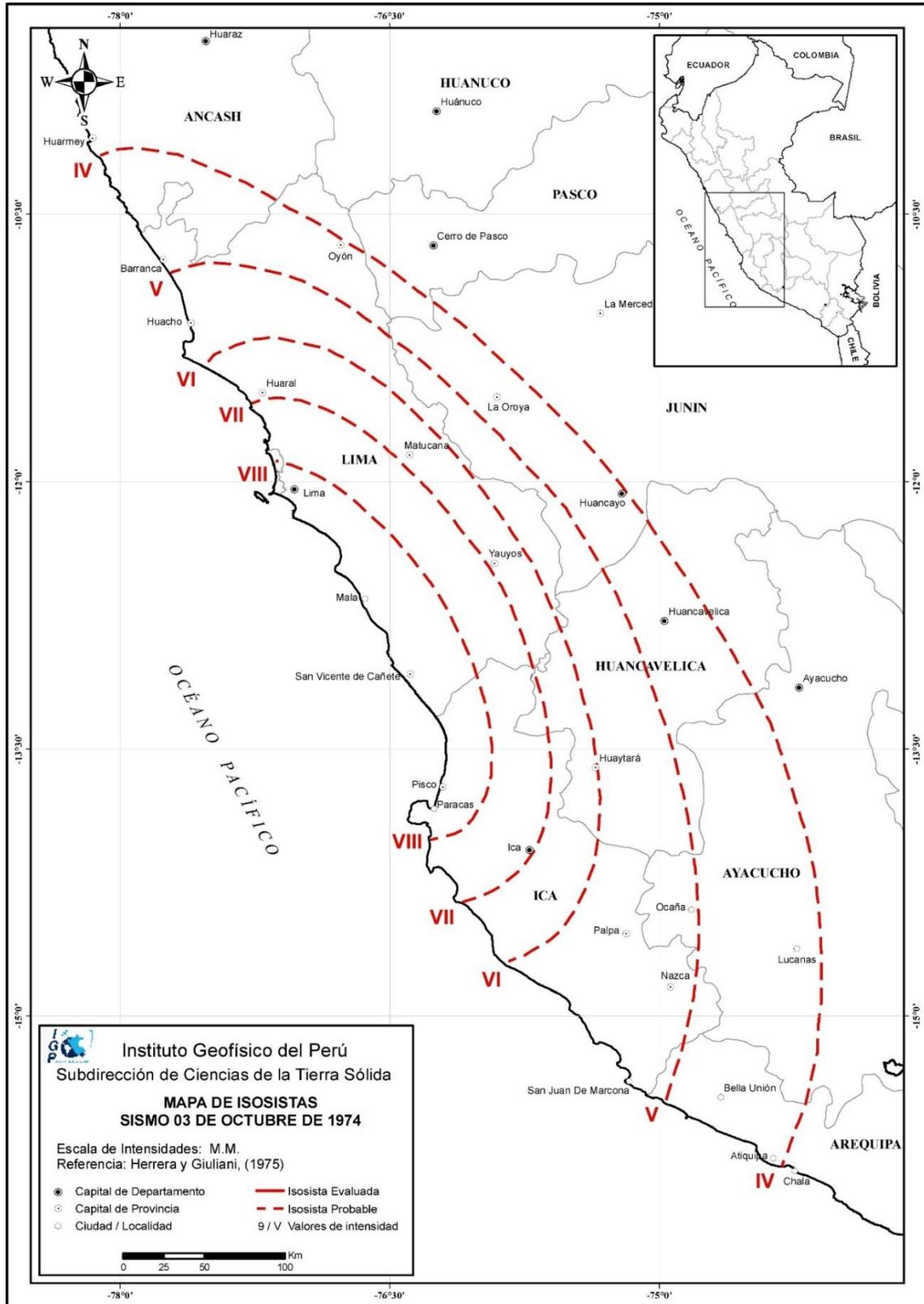
que no sobrepasaron el grado 6.5ML. En este estudio se resume las principales características del terremoto en relación a sus parámetros hipocentrales, orientación de la fuente, réplicas e intensidades regionales. El terremoto del 15 de agosto se constituye como el de mayor magnitud y duración ocurrida en esta región en los últimos 100 años.

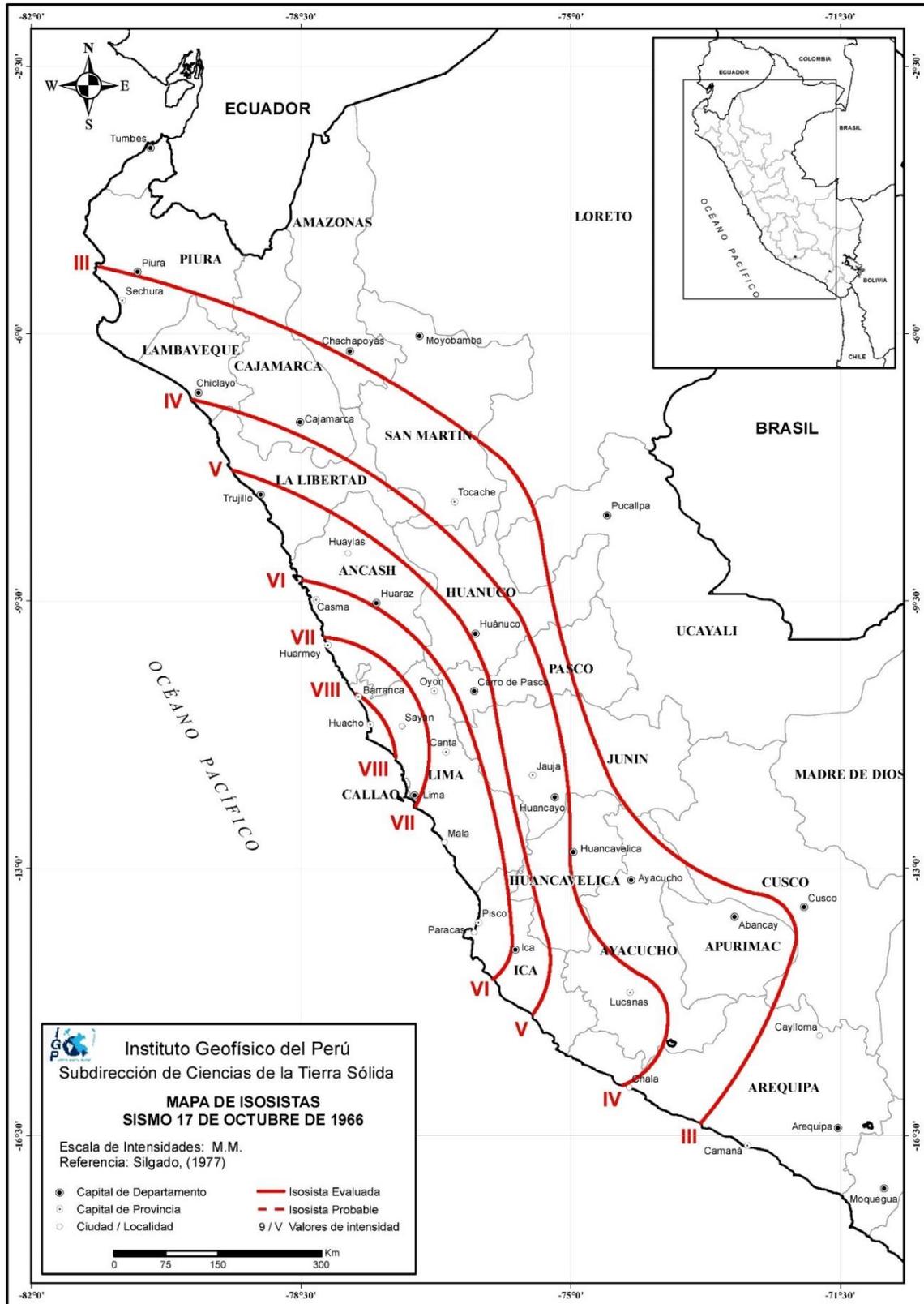
ANEXO 2.- CURVAS ISOSISTAS

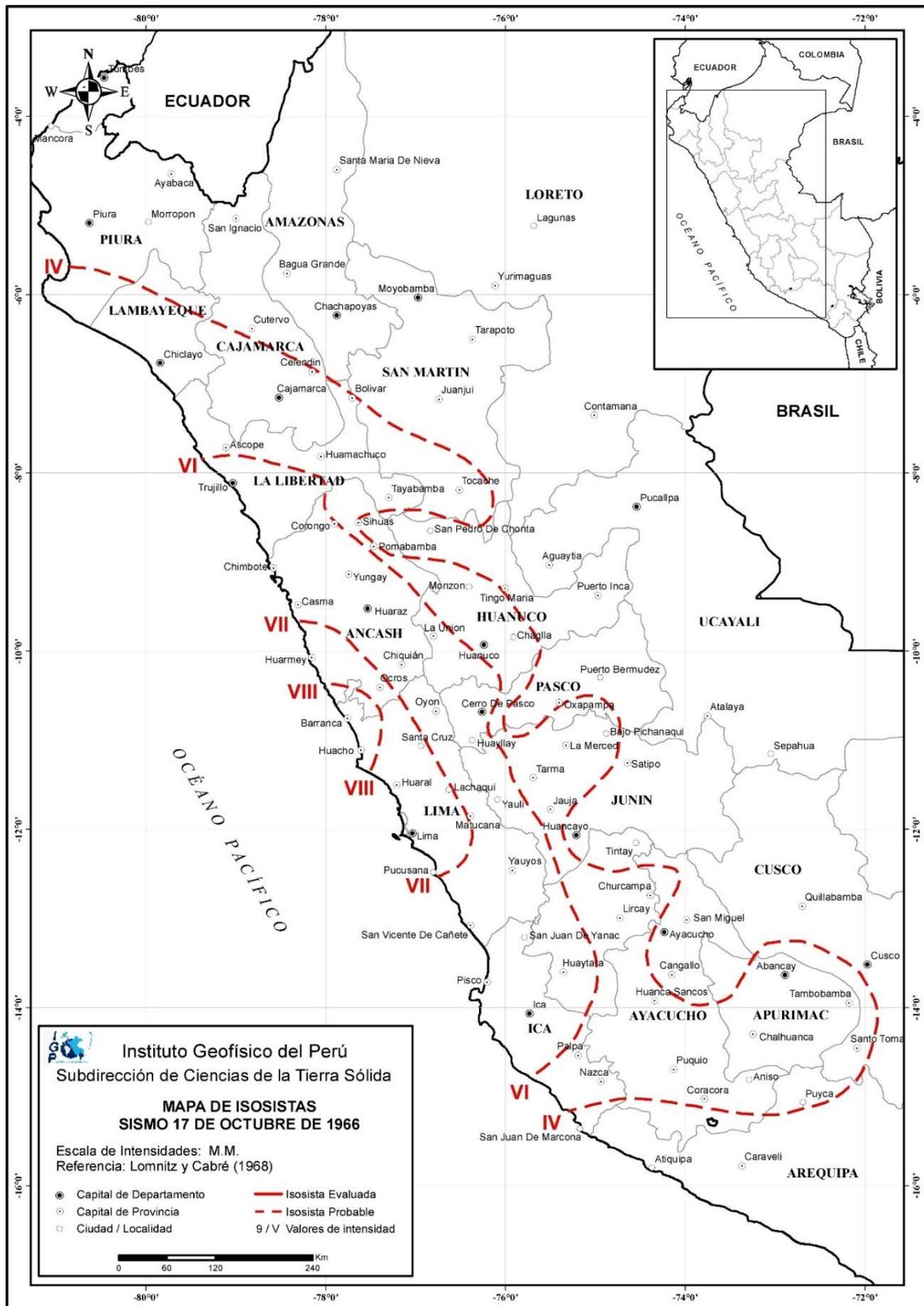


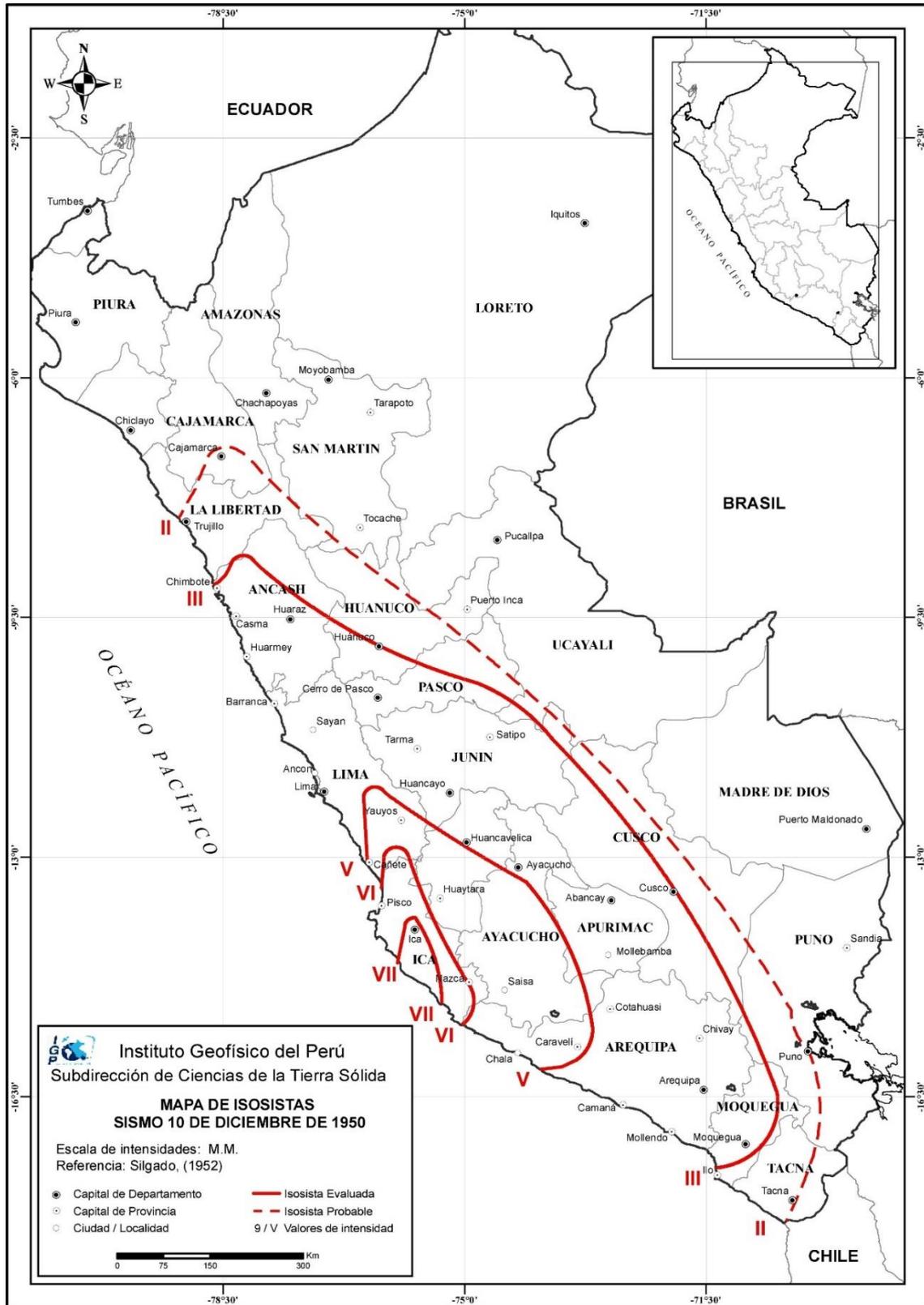


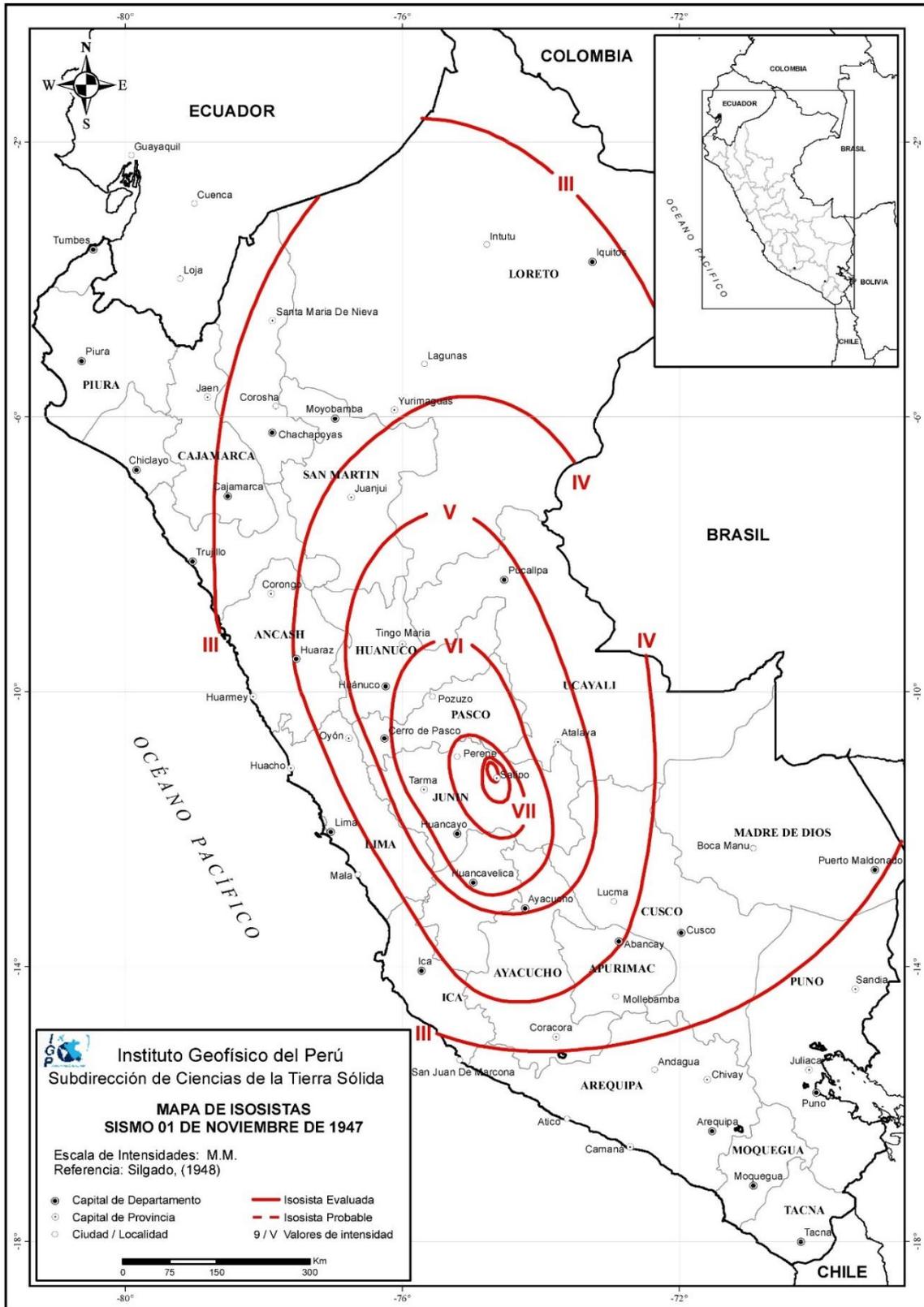


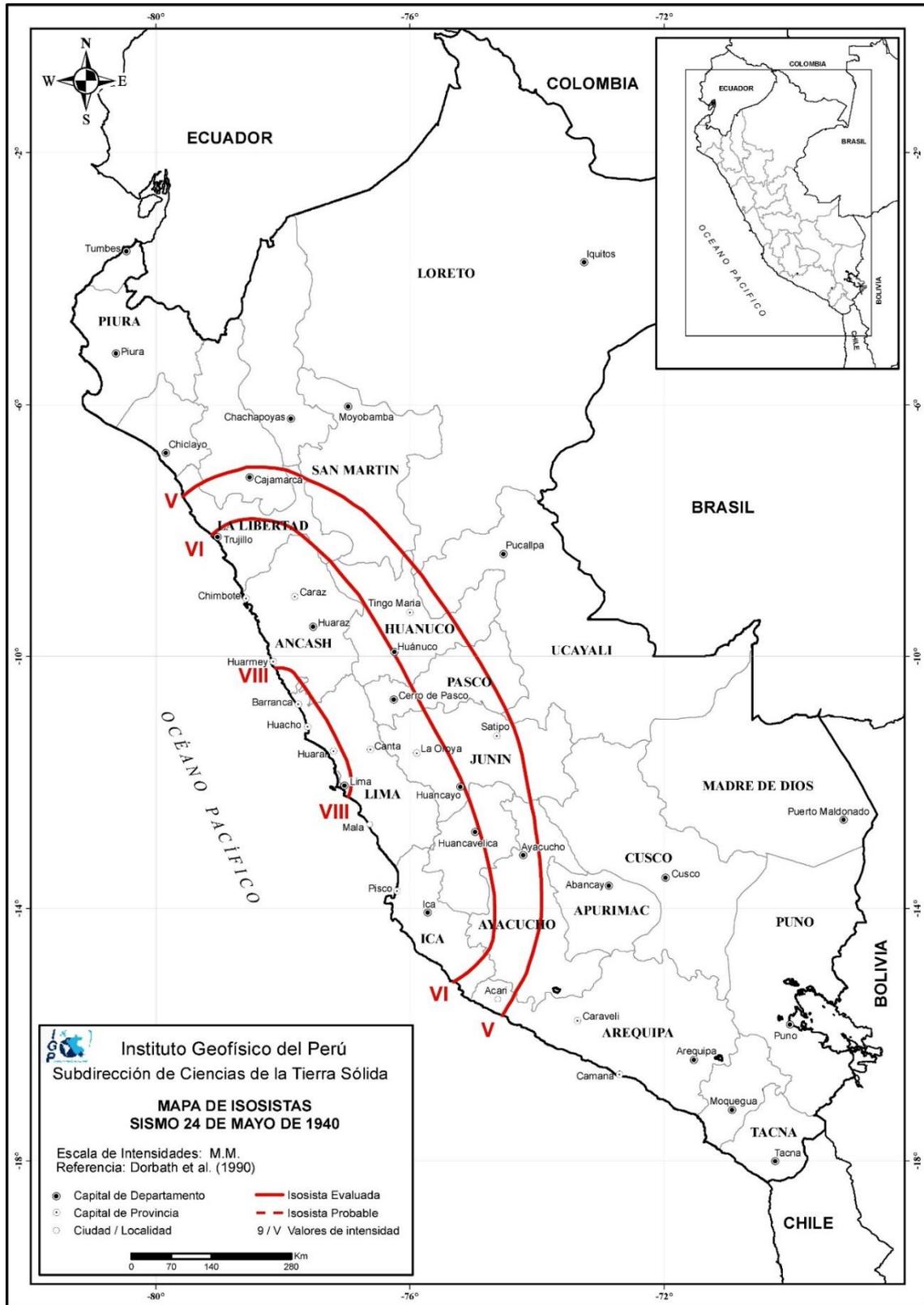


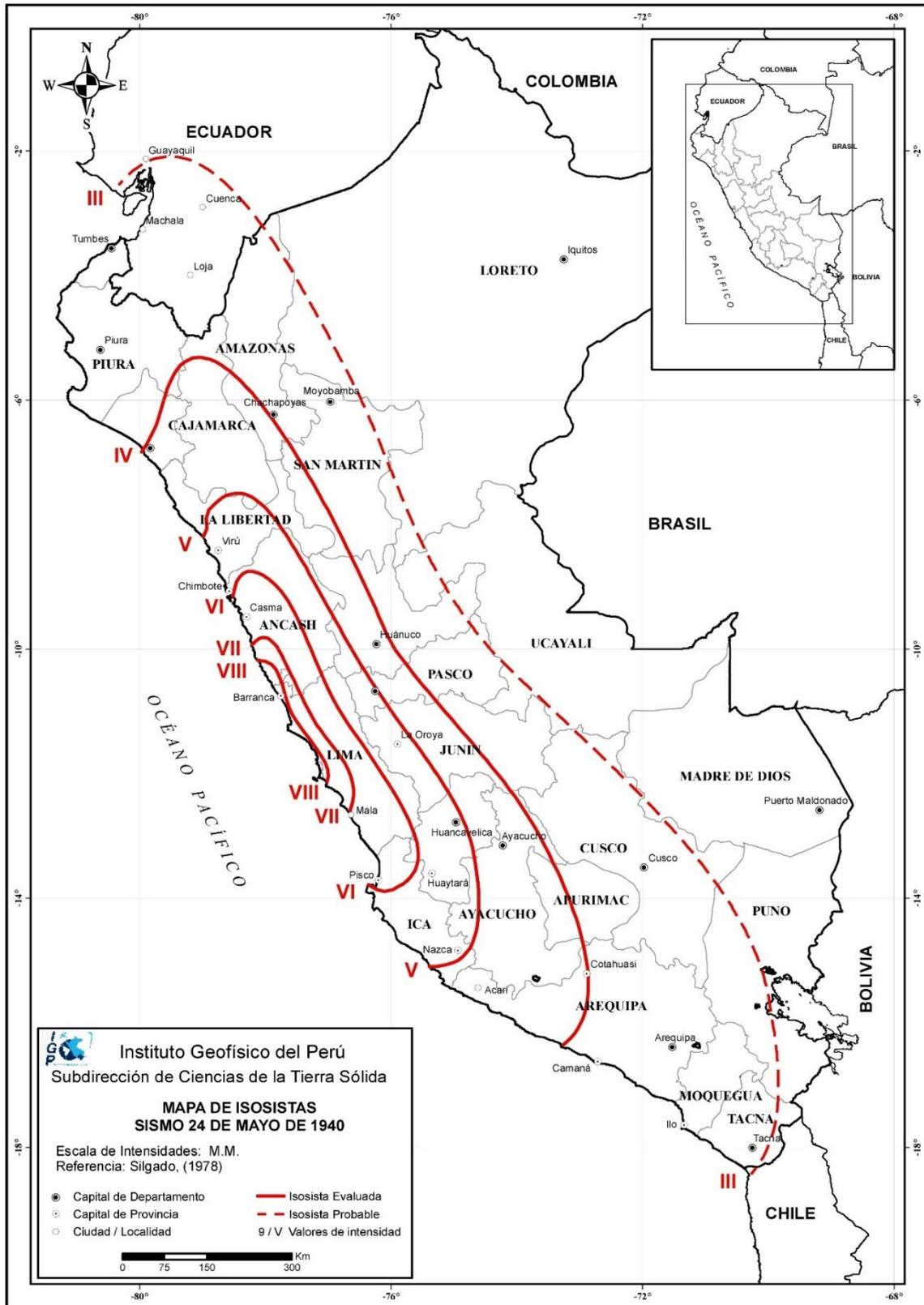


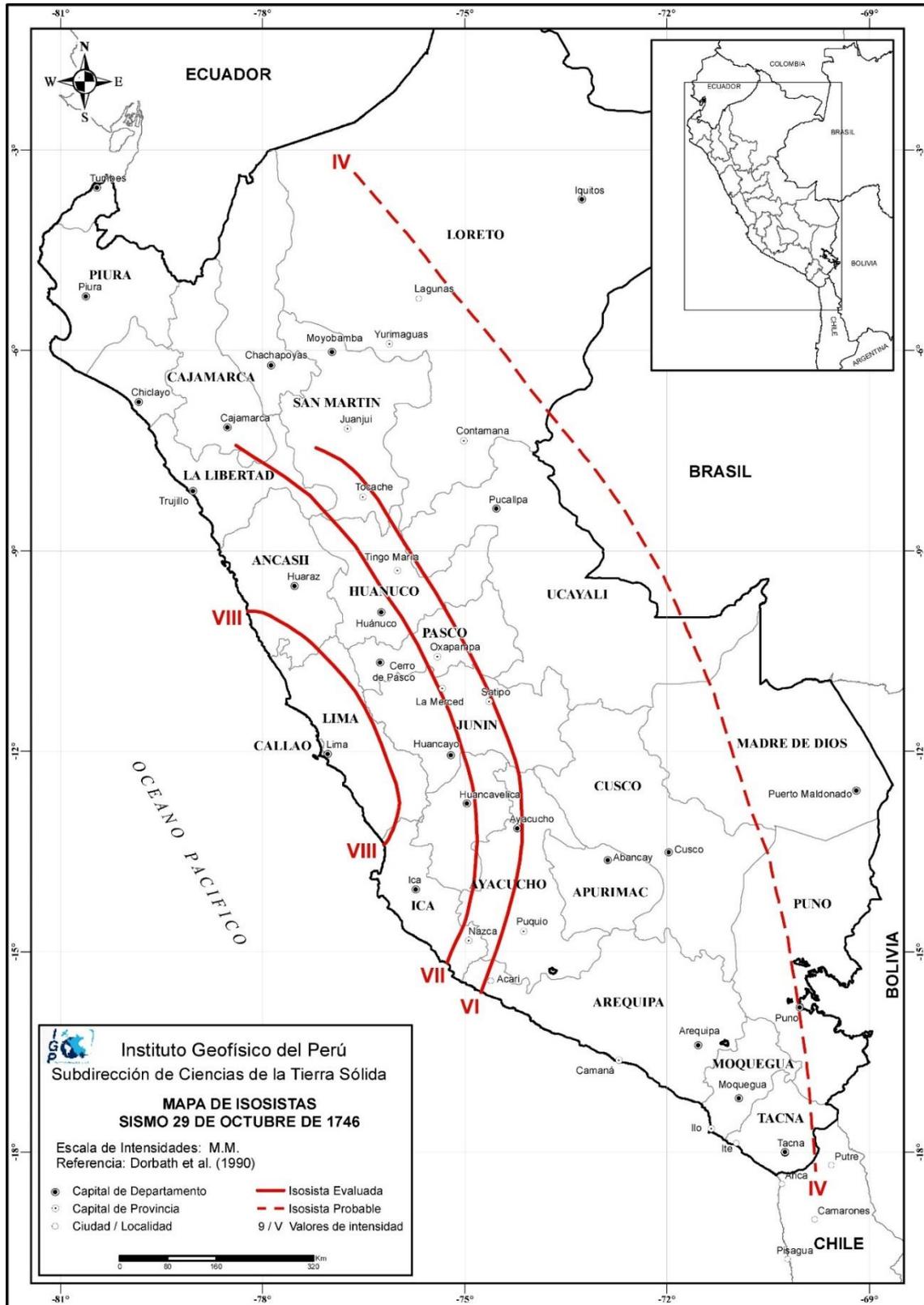


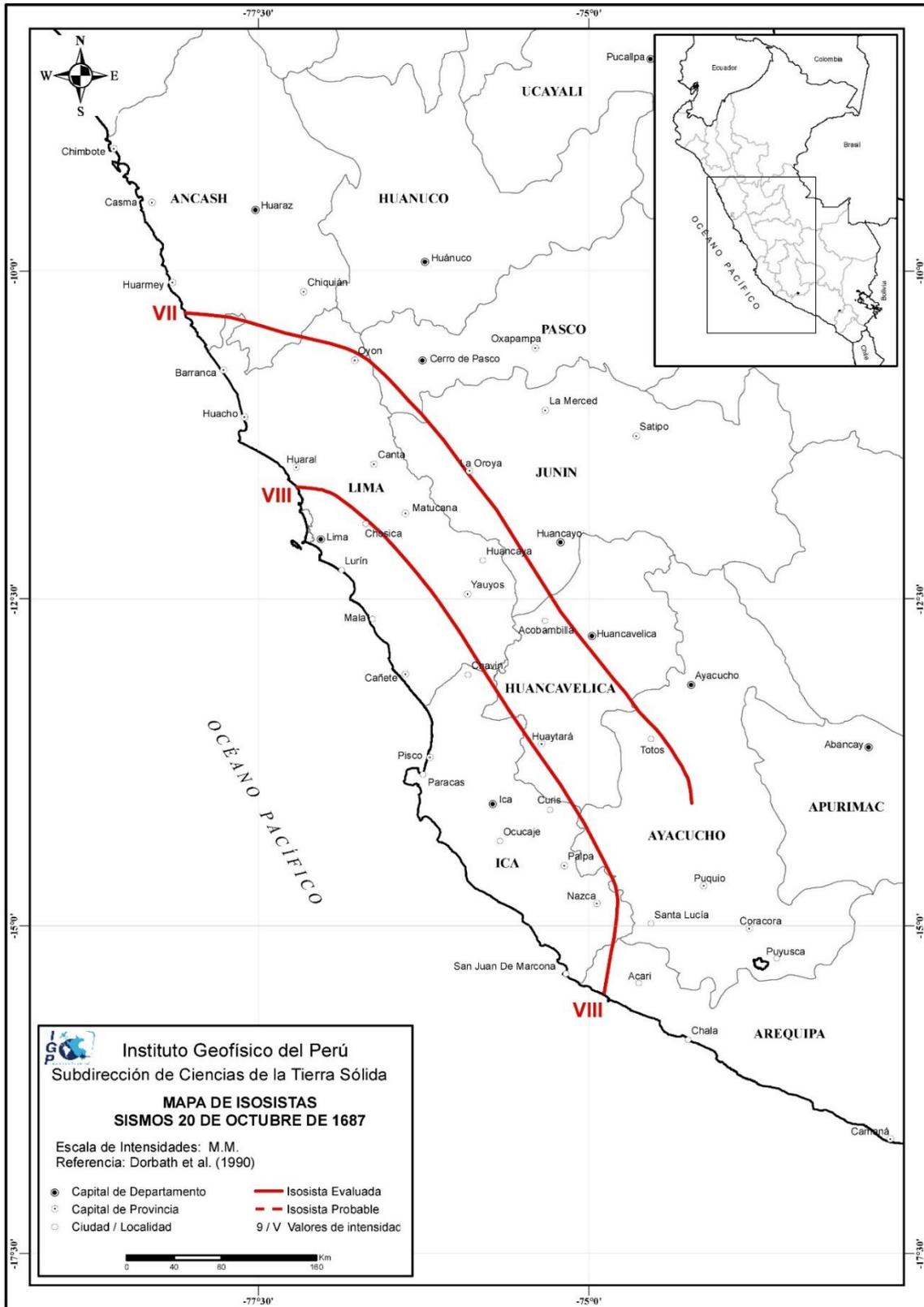


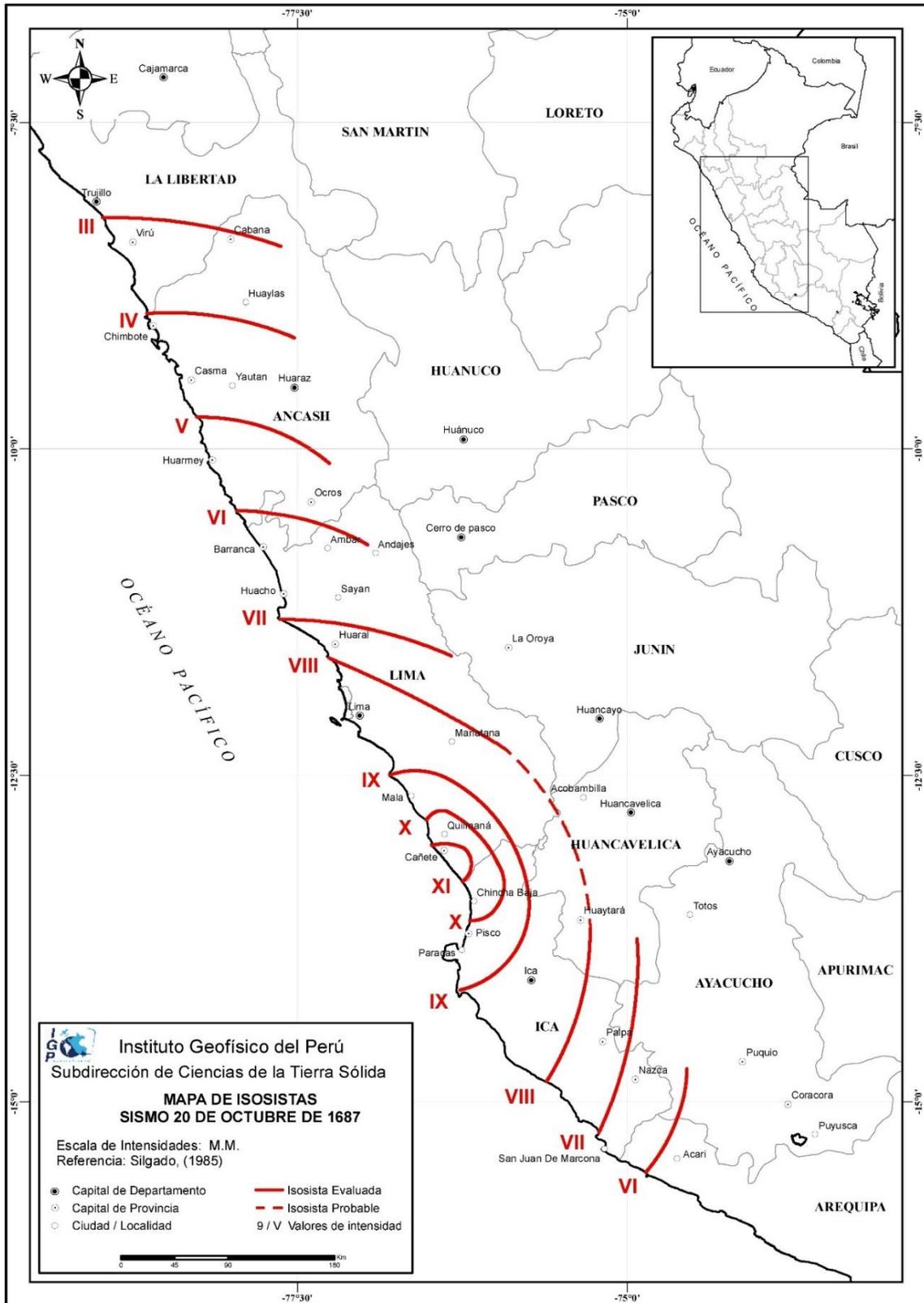


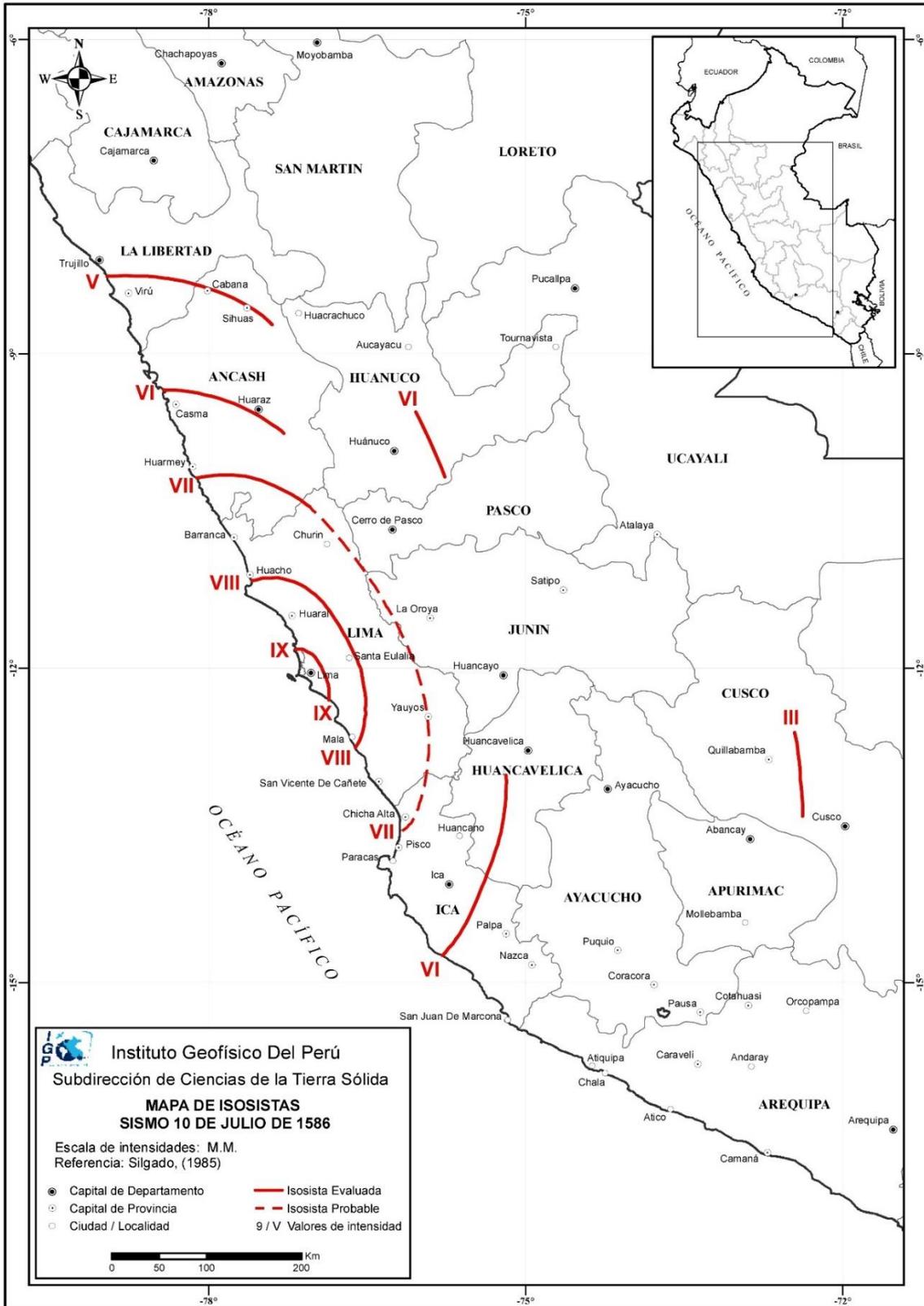




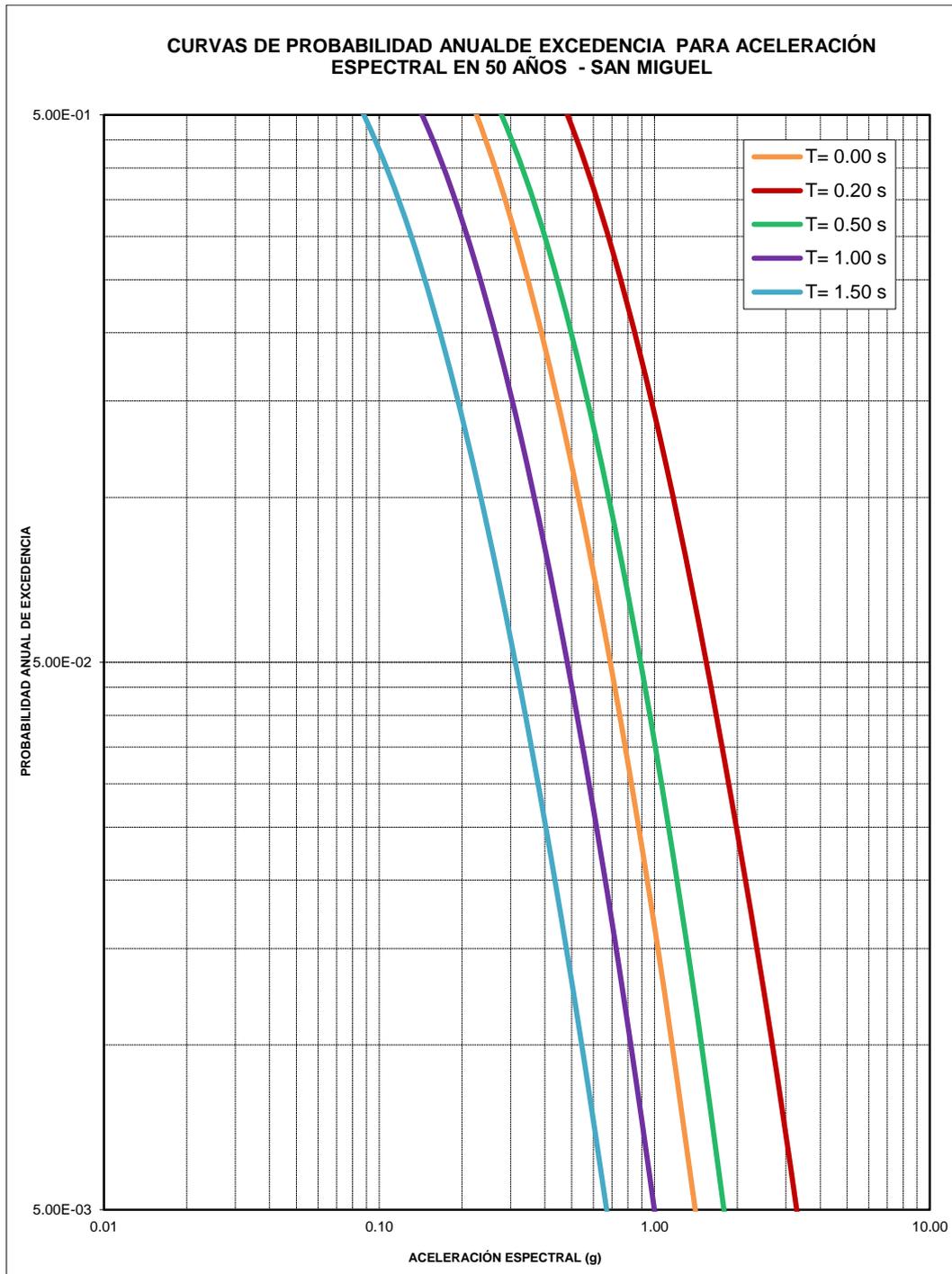






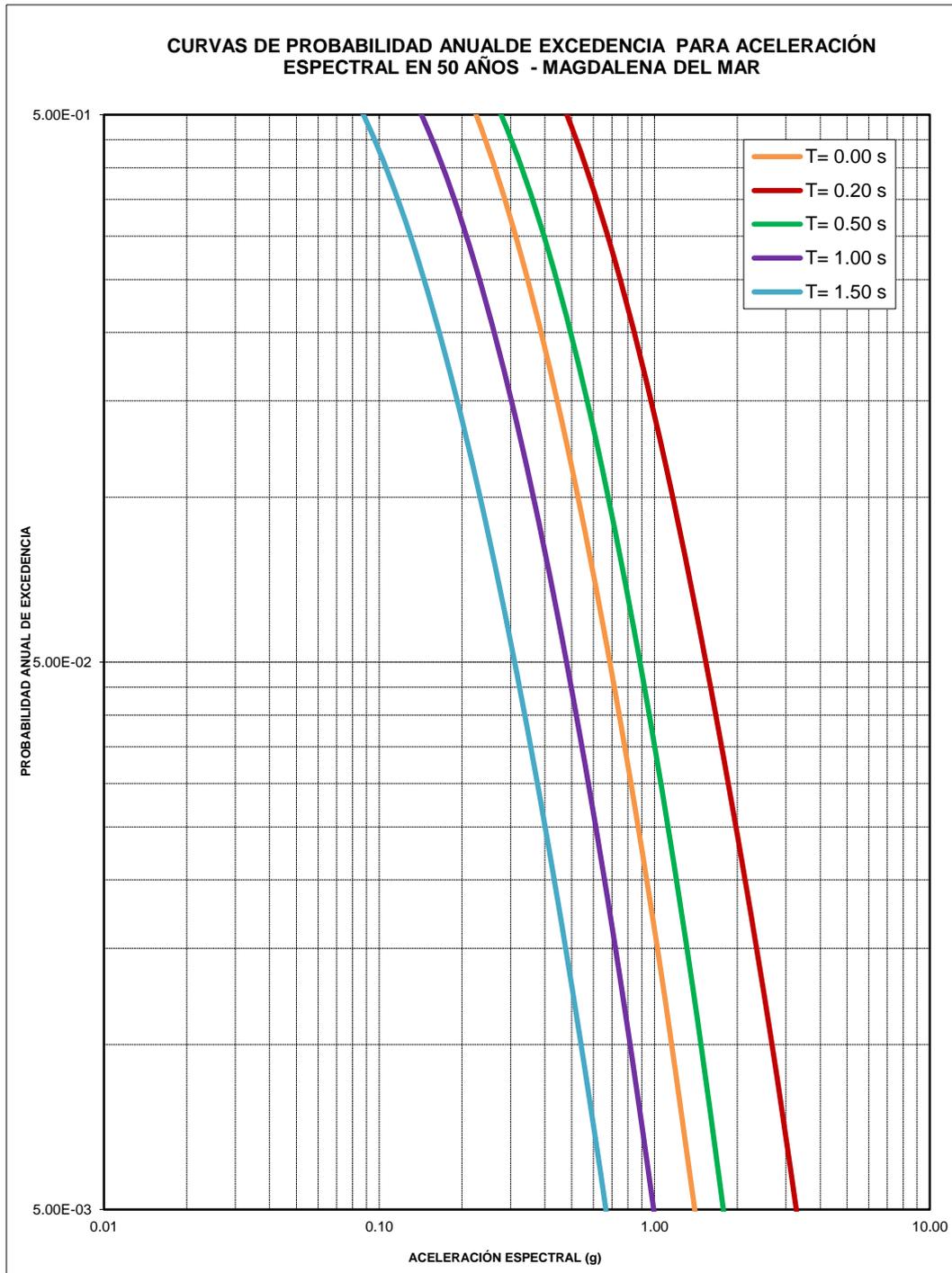


ANEXO 3.- ANÁLISIS PROBABILÍSTICO



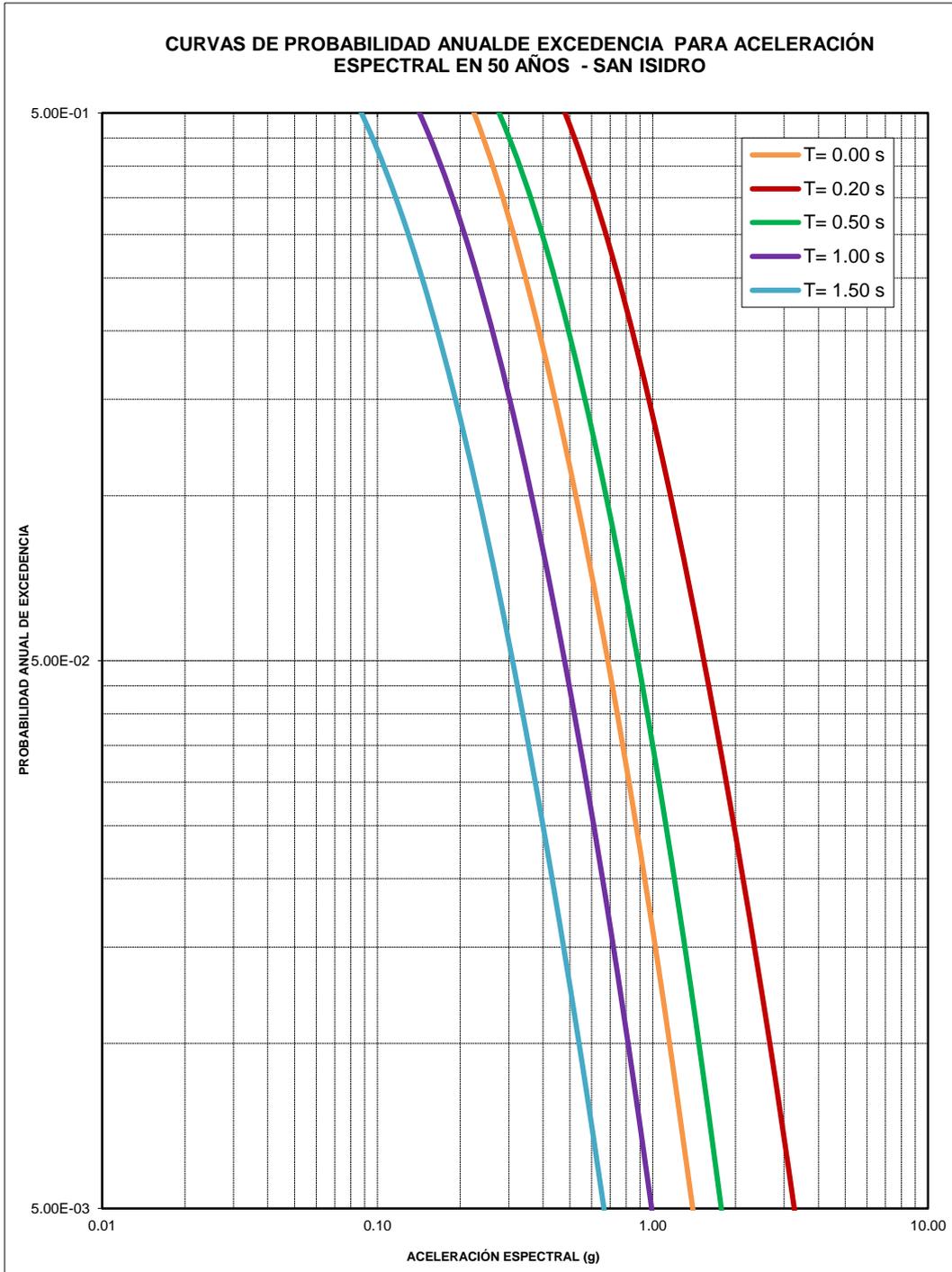
Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. 3.93 E-1 en 50 años ($Tr = 100$ años)
 - P.E. 1.81 E-1 en 50 años ($Tr = 250$ años)
 - P.E. 10.0 E-1 en 50 años ($Tr = 475$ años)
 - P.E. 5.00 E-2 en 50 años ($Tr = 975$ años)
 - P.E. 2.00 E-2 en 50 años ($Tr = 2475$ años)
 - P.E. 1.00 E-2 en 50 años ($Tr = 5000$ años)
 - P.E. 0.50 E-2 en 50 años ($Tr = 10\,000$ años)



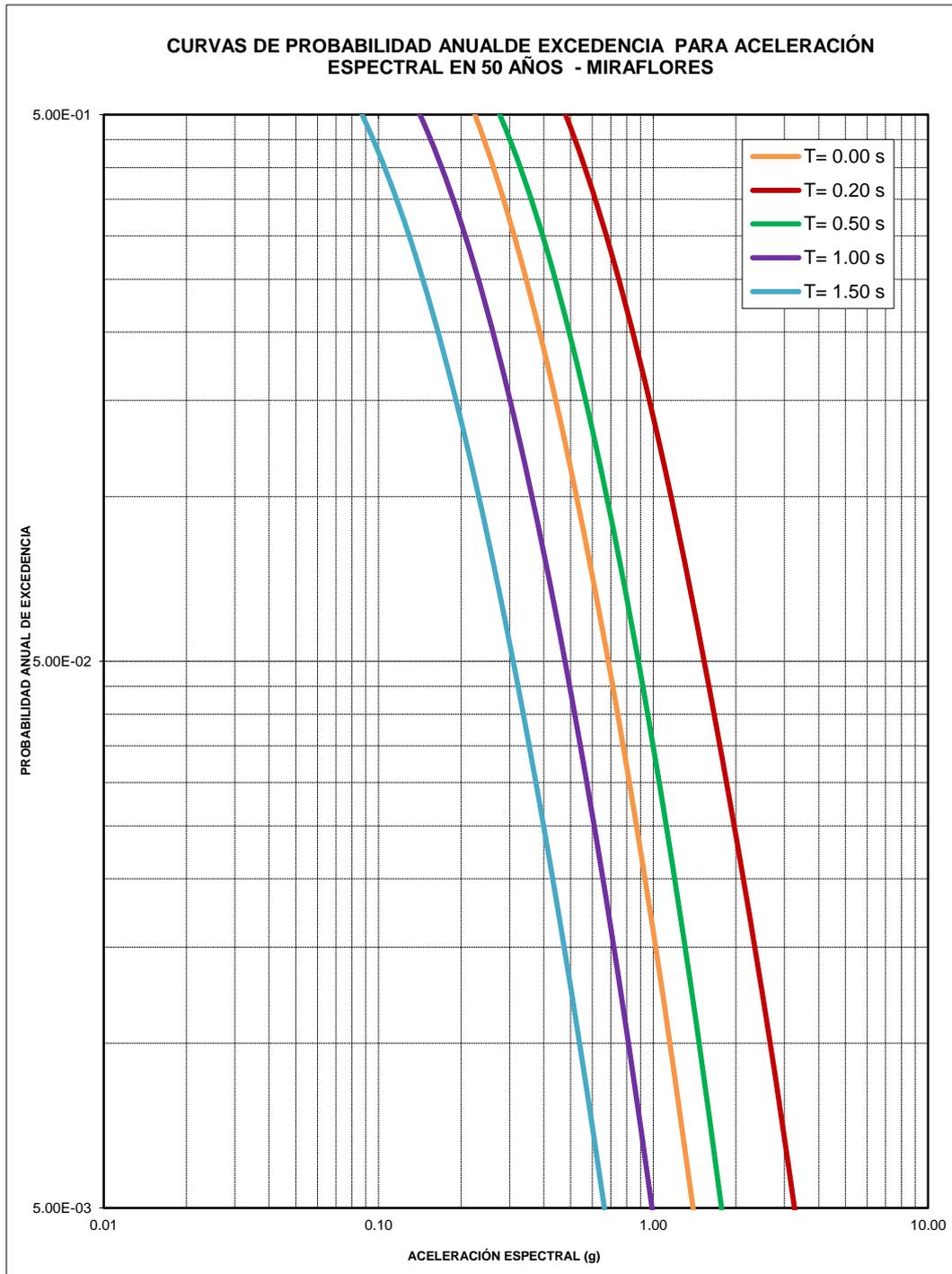
Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. $3.93 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 100$ años)
 - P.E. $1.81 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 250$ años)
 - P.E. $10.0 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 475$ años)
 - P.E. $5.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 975$ años)
 - P.E. $2.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 2475$ años)
 - P.E. $1.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 5000$ años)
 - P.E. $0.50 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 10\,000$ años)



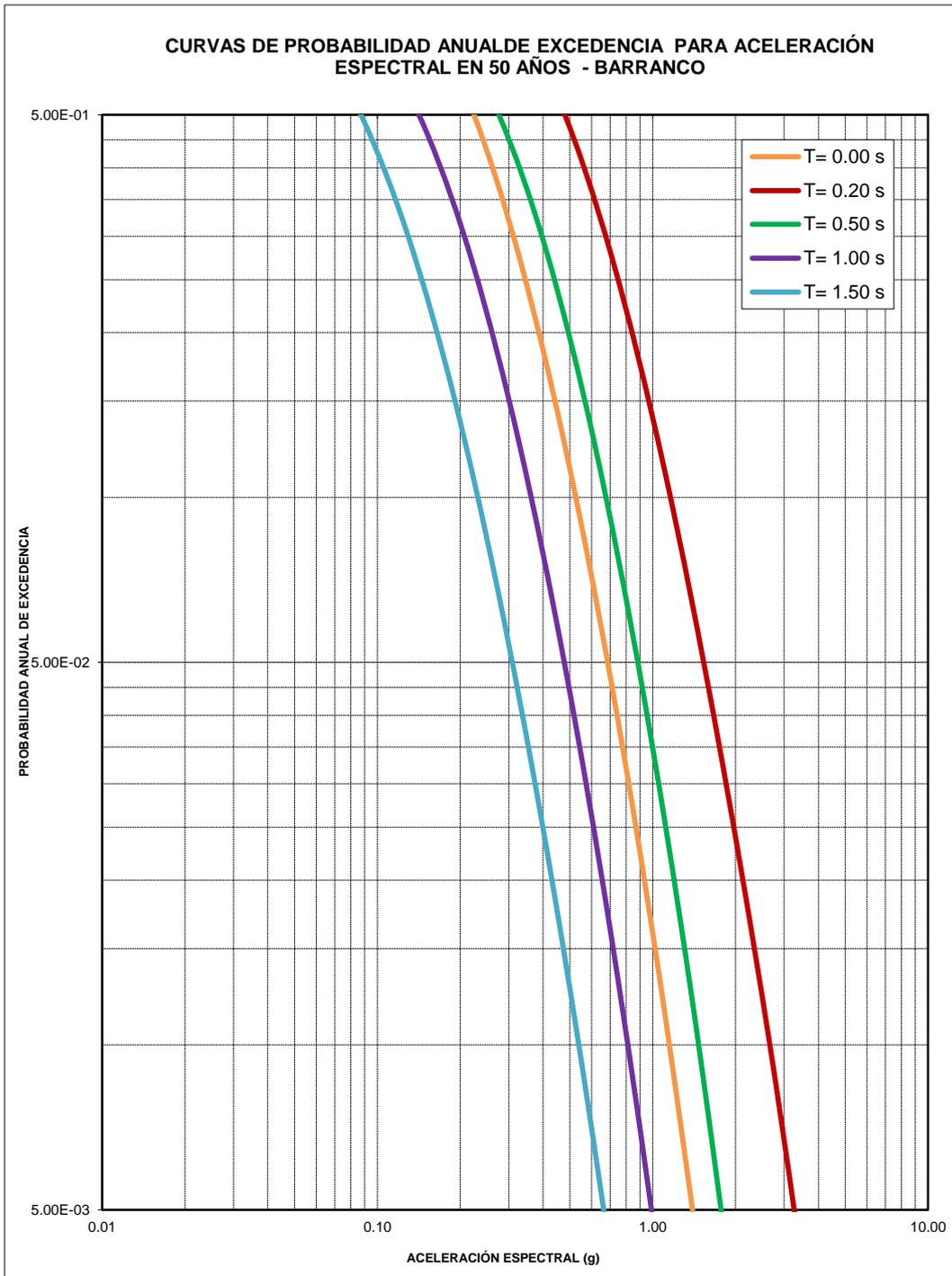
Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. $3.93 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 100$ años)
 - P.E. $1.81 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 250$ años)
 - P.E. $10.0 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 475$ años)
 - P.E. $5.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 975$ años)
 - P.E. $2.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 2475$ años)
 - P.E. $1.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 5000$ años)
 - P.E. $0.50 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 10\,000$ años)



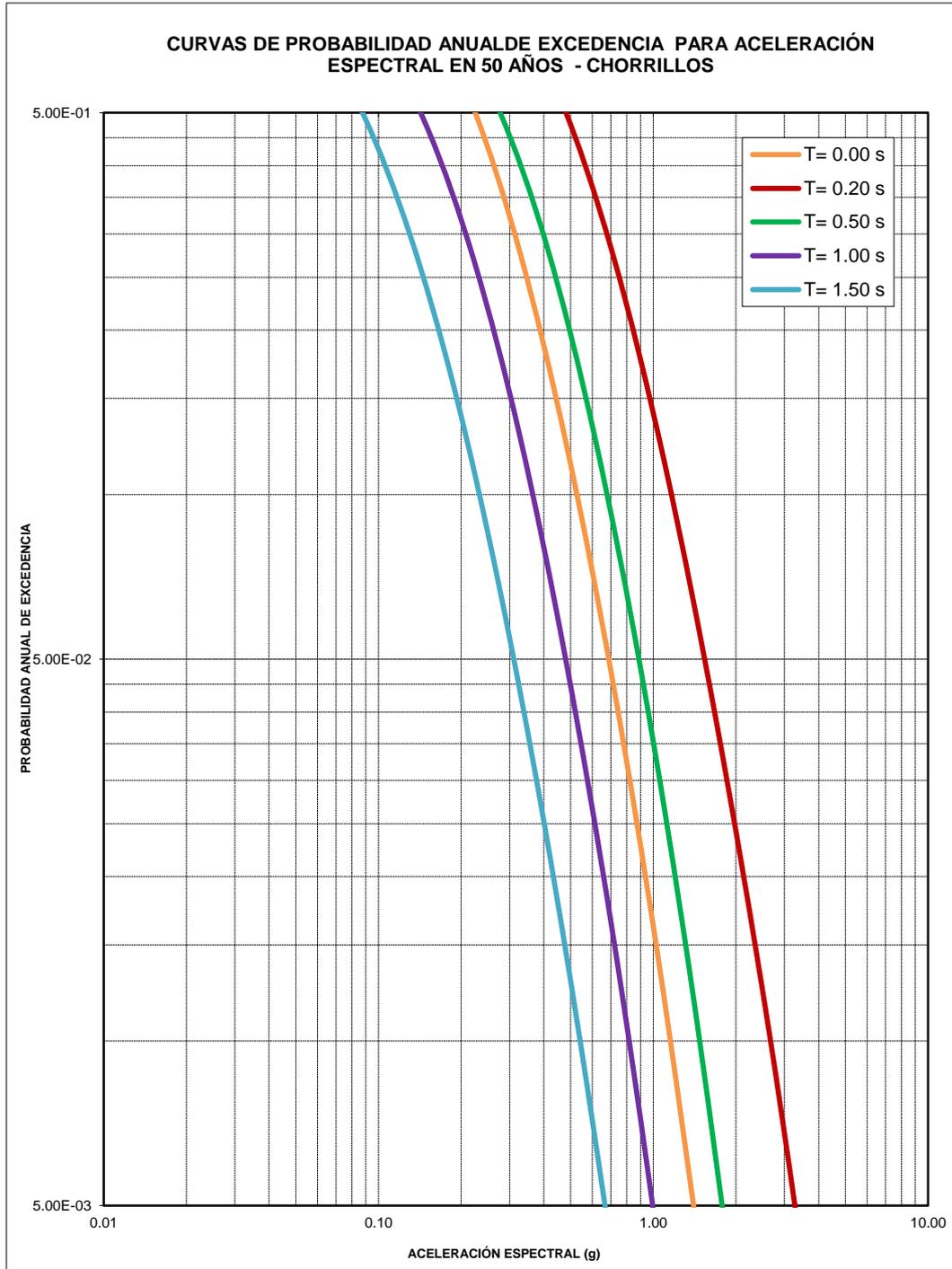
Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. $3.93 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 100$ años)
 - P.E. $1.81 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 250$ años)
 - P.E. $10.0 \text{ E-}1$ en 50 años ($T_r = 475$ años)
 - P.E. $5.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 975$ años)
 - P.E. $2.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 2475$ años)
 - P.E. $1.00 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 5000$ años)
 - P.E. $0.50 \text{ E-}2$ en 50 años ($T_r = 10\,000$ años)



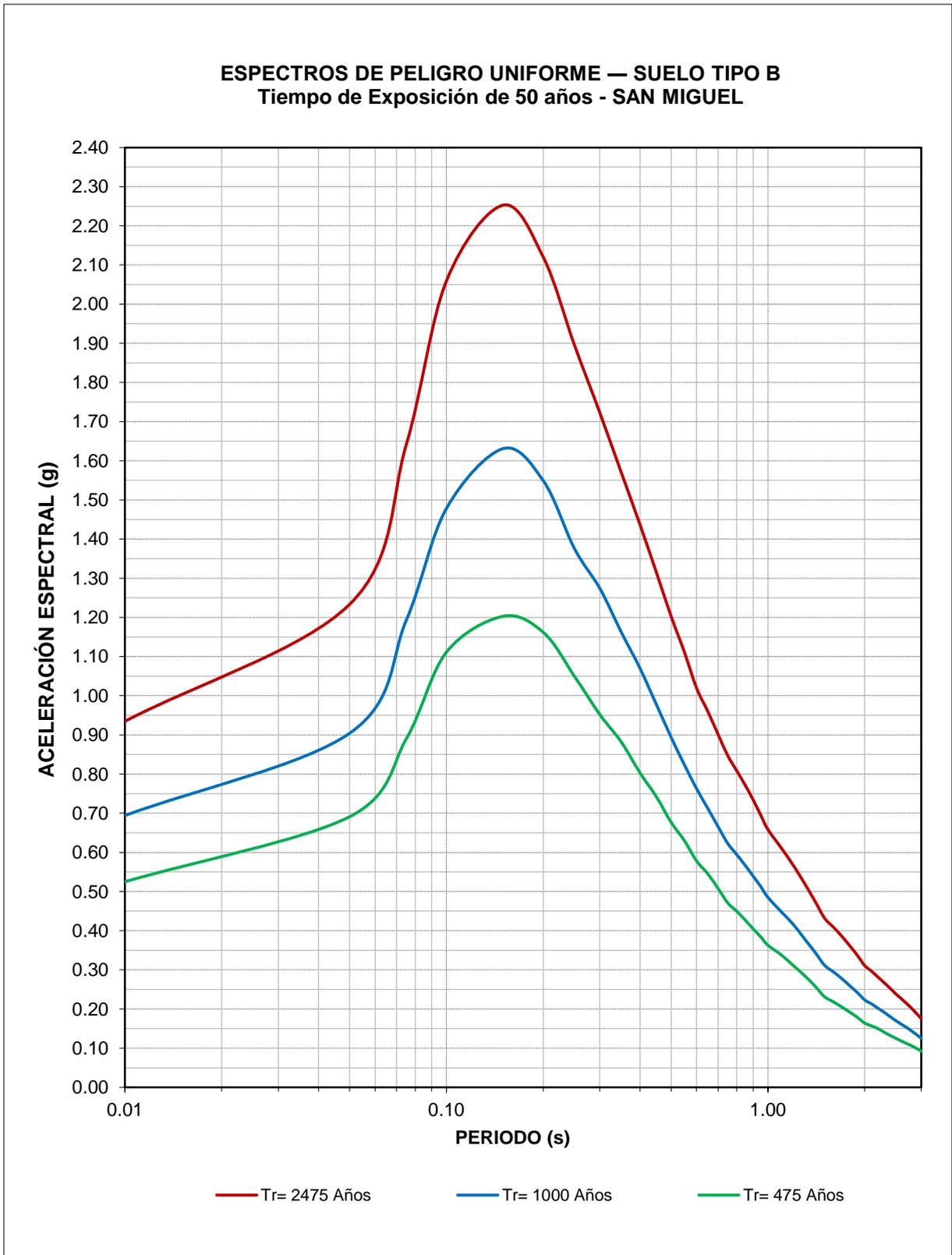
Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. 3.93 E-1 en 50 años ($Tr = 100$ años)
 - P.E. 1.81 E-1 en 50 años ($Tr = 250$ años)
 - P.E. 10.0 E-1 en 50 años ($Tr = 475$ años)
 - P.E. 5.00 E-2 en 50 años ($Tr = 975$ años)
 - P.E. 2.00 E-2 en 50 años ($Tr = 2475$ años)
 - P.E. 1.00 E-2 en 50 años ($Tr = 5000$ años)
 - P.E. 0.50 E-2 en 50 años ($Tr = 10\ 000$ años)



Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Las curvas de Probabilidad Anual de Excedencia están ponderadas según los pesos asignados en el acápite 7.2.
 - P.E. 3.93 E-1 en 50 años ($T_r = 100$ años)
 - P.E. 1.81 E-1 en 50 años ($T_r = 250$ años)
 - P.E. 10.0 E-1 en 50 años ($T_r = 475$ años)
 - P.E. 5.00 E-2 en 50 años ($T_r = 975$ años)
 - P.E. 2.00 E-2 en 50 años ($T_r = 2475$ años)
 - P.E. 1.00 E-2 en 50 años ($T_r = 5000$ años)
 - P.E. 0.50 E-2 en 50 años ($T_r = 10\,000$ años)

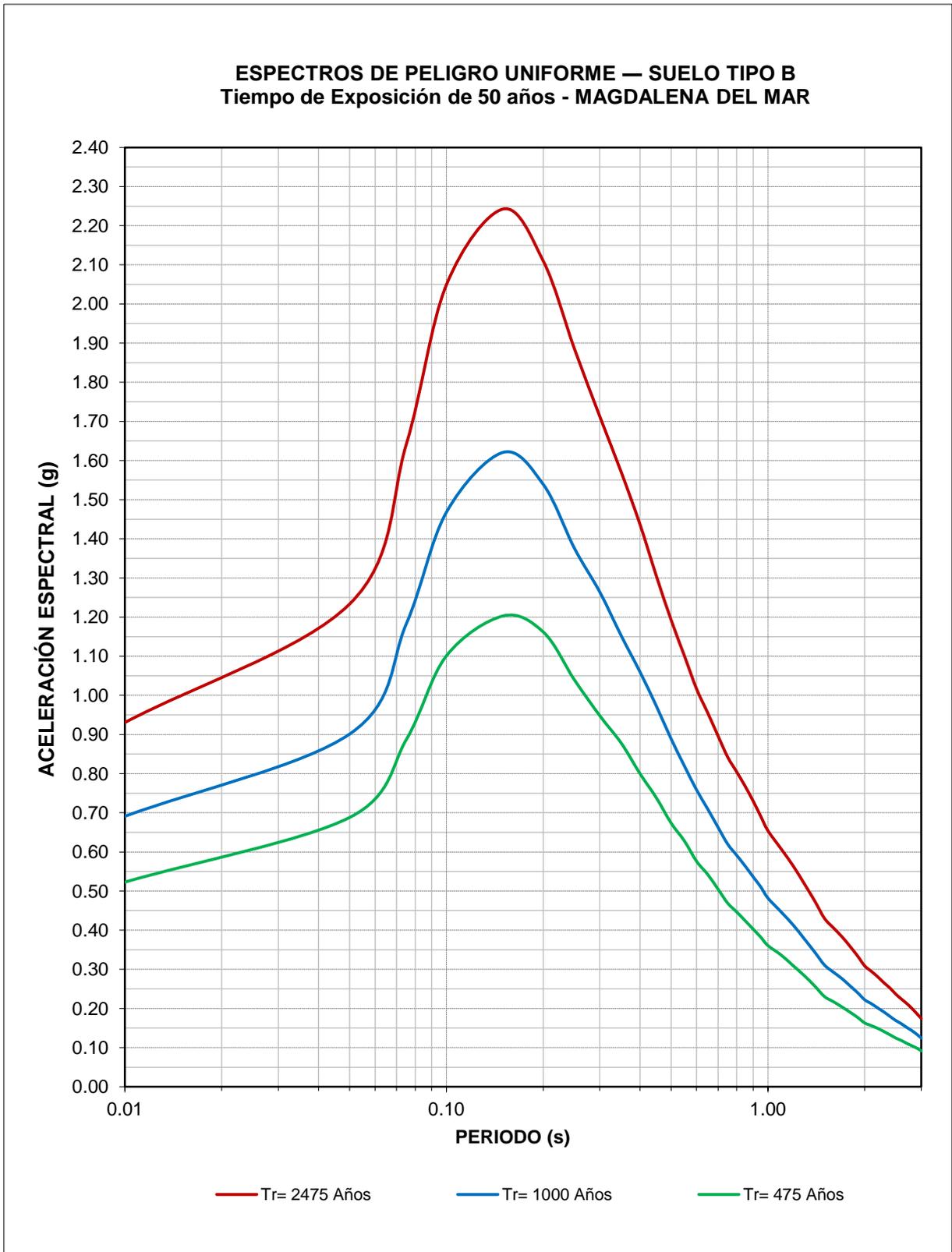


Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi=5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – SAN MIGUEL**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.525	0.694	0.935
0.05	0.691	0.904	1.233
0.075	0.890	1.193	1.641
0.1	1.111	1.478	2.059
0.15	1.203	1.631	2.253
0.2	1.162	1.549	2.120
0.25	1.050	1.376	1.896
0.3	0.952	1.274	1.723
0.35	0.882	1.162	1.570
0.4	0.803	1.070	1.437
0.45	0.742	0.978	1.315
0.5	0.677	0.894	1.203
0.55	0.630	0.824	1.111
0.6	0.578	0.762	1.019
0.65	0.545	0.713	0.960
0.7	0.508	0.666	0.901
0.75	0.471	0.623	0.847
0.8	0.450	0.594	0.808
0.85	0.427	0.567	0.772
0.9	0.405	0.539	0.734
0.95	0.384	0.513	0.695
1	0.363	0.485	0.659
1.1	0.338	0.449	0.612
1.2	0.311	0.416	0.567
1.3	0.285	0.379	0.521
1.4	0.259	0.346	0.476
1.5	0.231	0.312	0.432
1.6	0.218	0.295	0.409
1.7	0.205	0.277	0.385
1.8	0.192	0.259	0.361
1.9	0.178	0.242	0.336
2	0.164	0.223	0.311
2.1	0.157	0.213	0.297
2.2	0.150	0.202	0.281
2.3	0.141	0.192	0.267
2.4	0.133	0.180	0.253
2.5	0.125	0.170	0.239
2.6	0.118	0.161	0.226
2.7	0.112	0.153	0.214
2.8	0.106	0.144	0.202
2.9	0.099	0.135	0.189
3	0.092	0.125	0.175

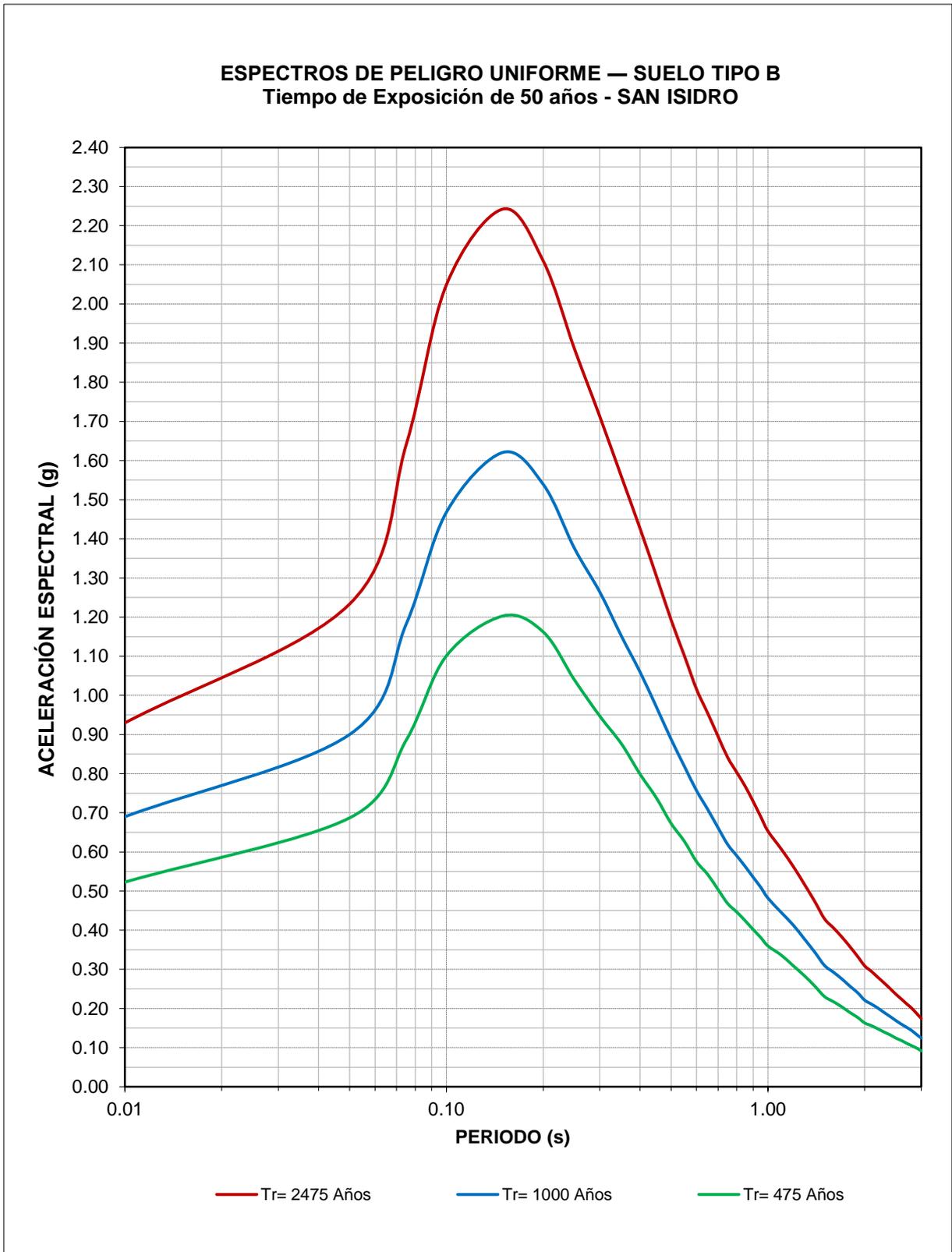


Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi= 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – MAGDALENA DEL MAR**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.523	0.691	0.931
0.05	0.688	0.901	1.233
0.075	0.887	1.182	1.641
0.1	1.101	1.468	2.049
0.15	1.203	1.621	2.243
0.2	1.162	1.539	2.110
0.25	1.040	1.376	1.886
0.3	0.948	1.264	1.713
0.35	0.878	1.152	1.570
0.4	0.800	1.060	1.437
0.45	0.738	0.972	1.305
0.5	0.674	0.889	1.193
0.55	0.628	0.820	1.101
0.6	0.576	0.758	1.016
0.65	0.542	0.709	0.955
0.7	0.505	0.663	0.896
0.75	0.469	0.620	0.842
0.8	0.446	0.591	0.804
0.85	0.424	0.564	0.768
0.9	0.403	0.536	0.730
0.95	0.382	0.511	0.691
1	0.361	0.482	0.654
1.1	0.336	0.446	0.608
1.2	0.309	0.413	0.564
1.3	0.283	0.377	0.518
1.4	0.257	0.344	0.474
1.5	0.230	0.311	0.430
1.6	0.217	0.293	0.406
1.7	0.204	0.276	0.383
1.8	0.191	0.258	0.359
1.9	0.177	0.241	0.334
2	0.163	0.222	0.309
2.1	0.156	0.212	0.295
2.2	0.149	0.201	0.280
2.3	0.141	0.191	0.265
2.4	0.133	0.179	0.252
2.5	0.124	0.169	0.236
2.6	0.118	0.161	0.224
2.7	0.111	0.152	0.213
2.8	0.105	0.144	0.201
2.9	0.099	0.135	0.188
3	0.092	0.124	0.174

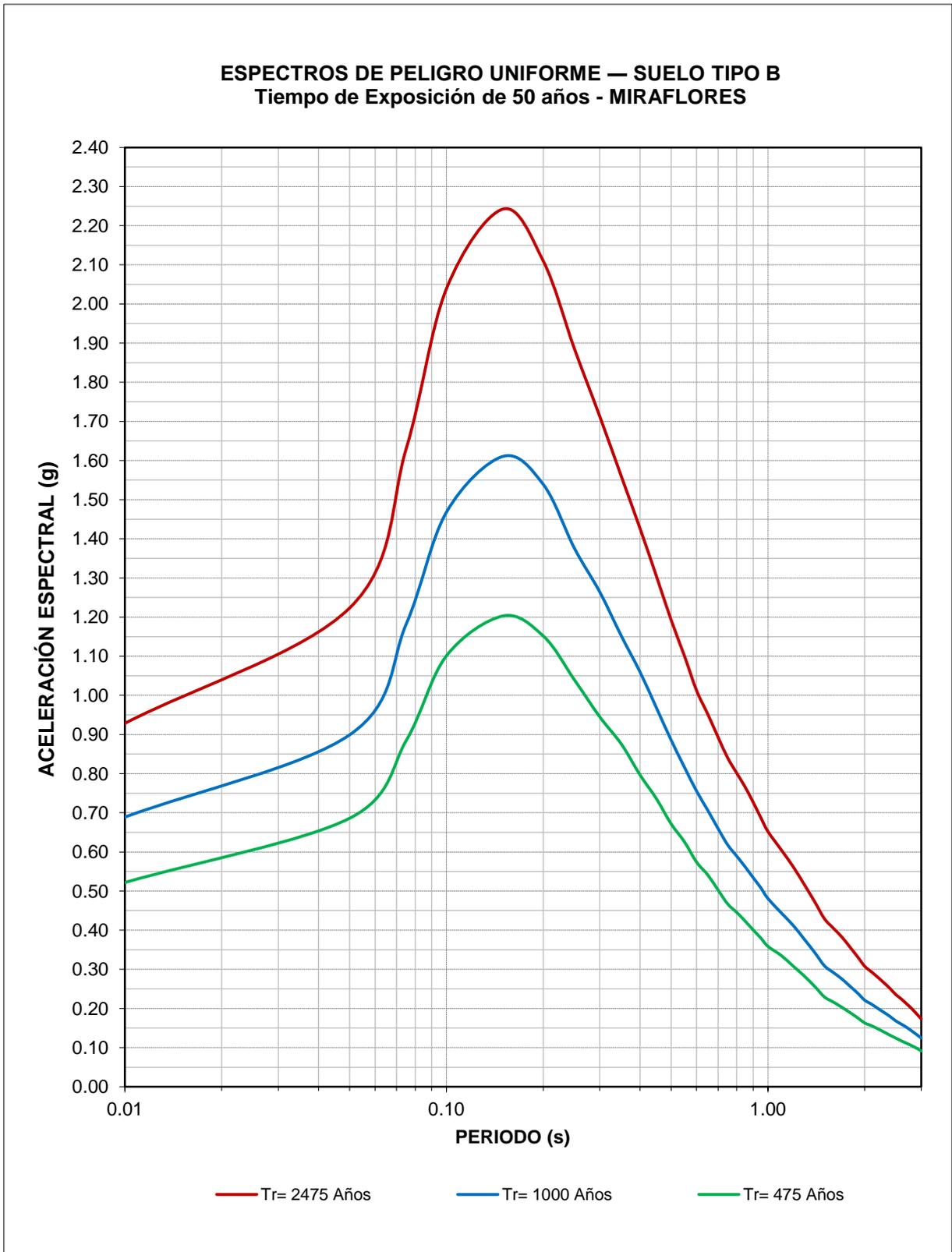


Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi= 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – SAN ISIDRO**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.523	0.690	0.930
0.05	0.687	0.900	1.233
0.075	0.886	1.182	1.641
0.1	1.101	1.468	2.049
0.15	1.203	1.621	2.243
0.2	1.162	1.539	2.110
0.25	1.040	1.376	1.886
0.3	0.947	1.264	1.713
0.35	0.877	1.152	1.560
0.4	0.799	1.060	1.427
0.45	0.738	0.970	1.305
0.5	0.673	0.888	1.193
0.55	0.627	0.819	1.101
0.6	0.575	0.756	1.015
0.65	0.542	0.708	0.954
0.7	0.504	0.662	0.895
0.75	0.468	0.619	0.841
0.8	0.446	0.590	0.803
0.85	0.424	0.563	0.768
0.9	0.402	0.535	0.729
0.95	0.381	0.510	0.690
1	0.360	0.482	0.653
1.1	0.336	0.445	0.608
1.2	0.309	0.413	0.563
1.3	0.283	0.377	0.517
1.4	0.257	0.344	0.473
1.5	0.230	0.310	0.429
1.6	0.217	0.293	0.406
1.7	0.204	0.275	0.382
1.8	0.190	0.257	0.358
1.9	0.177	0.241	0.333
2	0.163	0.221	0.309
2.1	0.156	0.211	0.295
2.2	0.148	0.201	0.279
2.3	0.140	0.190	0.265
2.4	0.133	0.179	0.251
2.5	0.124	0.169	0.236
2.6	0.118	0.160	0.224
2.7	0.111	0.152	0.212
2.8	0.105	0.144	0.201
2.9	0.099	0.134	0.188
3	0.092	0.124	0.174

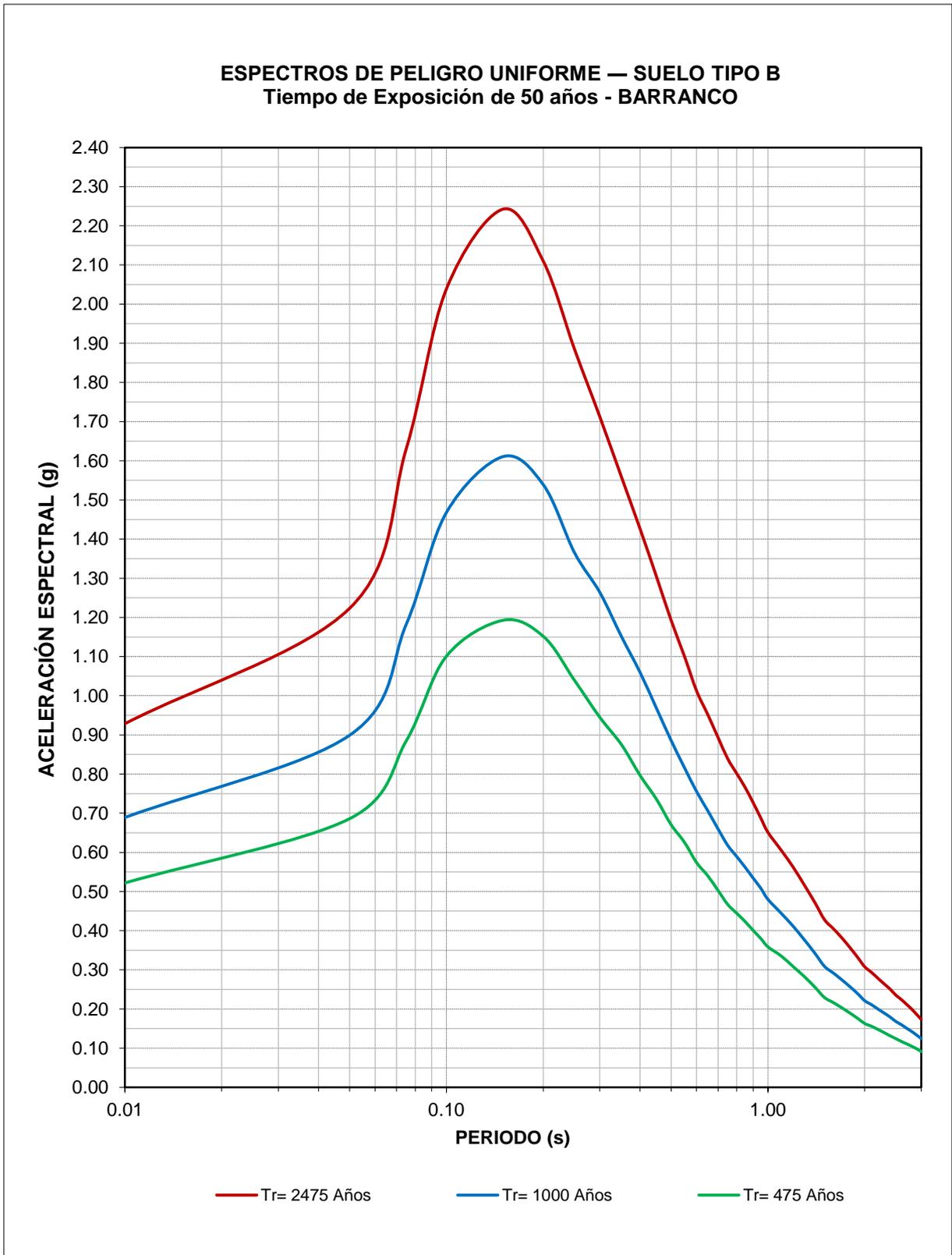


Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi= 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – MIRAFLORES**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.522	0.689	0.929
0.05	0.686	0.899	1.223
0.075	0.885	1.182	1.631
0.1	1.101	1.468	2.039
0.15	1.203	1.611	2.243
0.2	1.152	1.539	2.110
0.25	1.040	1.376	1.886
0.3	0.945	1.264	1.713
0.35	0.876	1.152	1.560
0.4	0.797	1.060	1.427
0.45	0.736	0.968	1.305
0.5	0.672	0.886	1.193
0.55	0.626	0.817	1.101
0.6	0.574	0.755	1.012
0.65	0.541	0.706	0.952
0.7	0.503	0.660	0.893
0.75	0.467	0.618	0.840
0.8	0.445	0.589	0.801
0.85	0.423	0.562	0.766
0.9	0.401	0.534	0.727
0.95	0.380	0.509	0.688
1	0.359	0.481	0.652
1.1	0.335	0.444	0.606
1.2	0.308	0.412	0.562
1.3	0.282	0.376	0.516
1.4	0.256	0.343	0.472
1.5	0.229	0.309	0.429
1.6	0.216	0.292	0.405
1.7	0.203	0.275	0.382
1.8	0.190	0.257	0.357
1.9	0.176	0.240	0.332
2	0.163	0.221	0.308
2.1	0.156	0.211	0.294
2.2	0.148	0.200	0.279
2.3	0.140	0.190	0.265
2.4	0.131	0.179	0.251
2.5	0.124	0.168	0.235
2.6	0.117	0.160	0.224
2.7	0.111	0.152	0.212
2.8	0.105	0.143	0.200
2.9	0.099	0.134	0.187
3	0.091	0.124	0.173

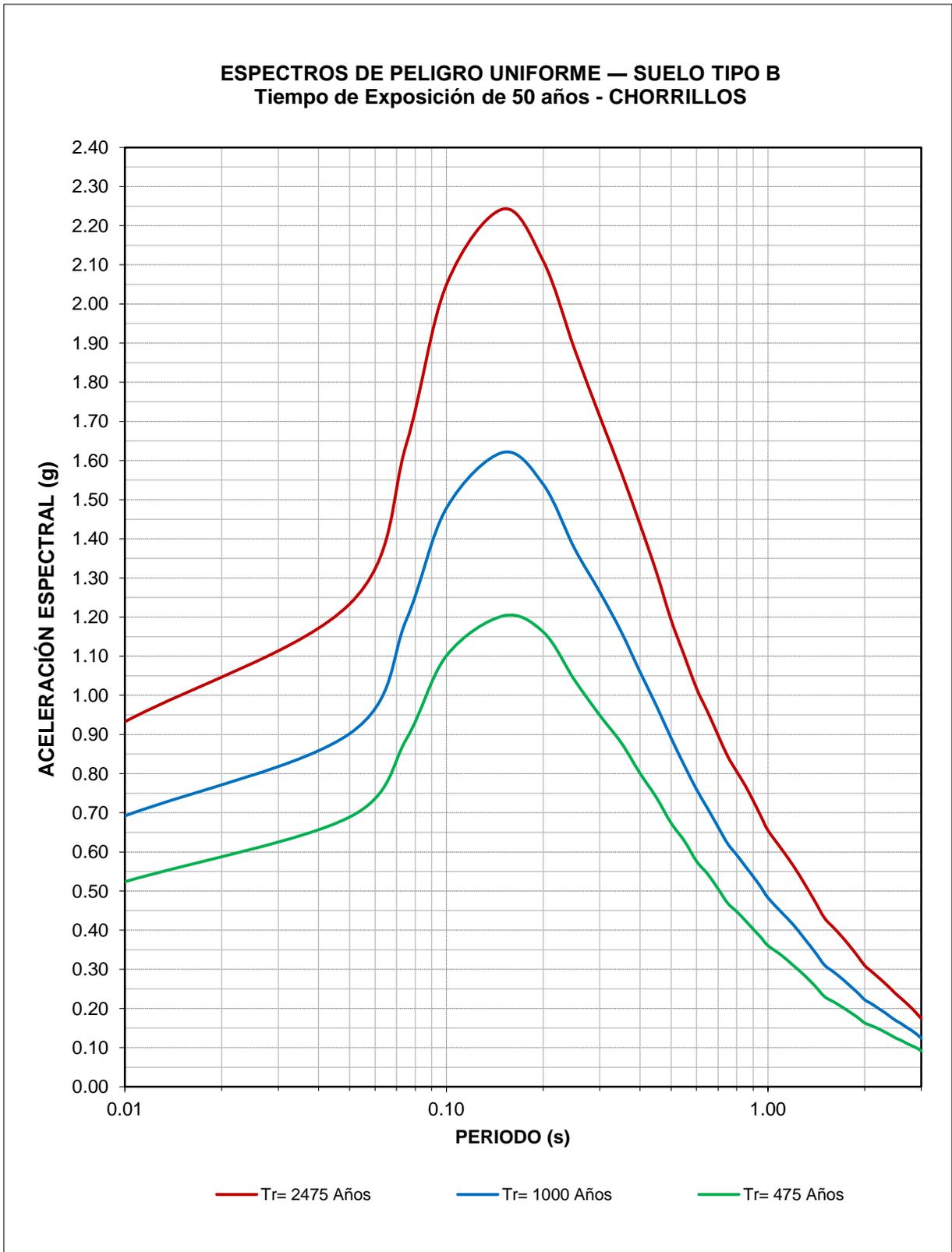


Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi= 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – BARRANCO**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.522	0.689	0.929
0.05	0.686	0.899	1.223
0.075	0.885	1.182	1.631
0.1	1.101	1.468	2.039
0.15	1.193	1.611	2.243
0.2	1.152	1.539	2.110
0.25	1.040	1.366	1.886
0.3	0.945	1.264	1.713
0.35	0.876	1.152	1.560
0.4	0.797	1.060	1.427
0.45	0.736	0.968	1.305
0.5	0.671	0.886	1.193
0.55	0.626	0.817	1.101
0.6	0.574	0.755	1.012
0.65	0.540	0.706	0.952
0.7	0.503	0.660	0.893
0.75	0.467	0.618	0.839
0.8	0.444	0.589	0.801
0.85	0.423	0.562	0.766
0.9	0.401	0.534	0.727
0.95	0.380	0.509	0.688
1	0.359	0.480	0.651
1.1	0.335	0.444	0.606
1.2	0.308	0.411	0.562
1.3	0.282	0.376	0.516
1.4	0.256	0.343	0.472
1.5	0.229	0.309	0.428
1.6	0.216	0.292	0.405
1.7	0.203	0.274	0.381
1.8	0.190	0.257	0.357
1.9	0.176	0.240	0.332
2	0.163	0.221	0.308
2.1	0.156	0.211	0.294
2.2	0.148	0.200	0.278
2.3	0.140	0.190	0.264
2.4	0.131	0.179	0.251
2.5	0.124	0.168	0.235
2.6	0.117	0.160	0.224
2.7	0.111	0.151	0.212
2.8	0.105	0.143	0.200
2.9	0.099	0.134	0.187
3	0.091	0.124	0.173



Nota:

- Valores de aceleración espectral en suelo Tipo B ($V_s \geq 760$ m/s)
- Los periodos de retorno se consideran con un tiempo de exposición de 50 años.
- Los espectros están ponderados según los pesos asignados en el acápite 7.2.

**Resumen de aceleraciones con $\xi= 5\%$ obtenido del PSHA Suelo tipo B
($V_{s30} \geq 760$ m/s)
Costa Verde – CHORRILLOS**

Periodo Estructural (s)	Periodo de Retorno (Años)		
	475	1000	2475
0	0.524	0.692	0.933
0.05	0.689	0.902	1.233
0.075	0.888	1.193	1.641
0.1	1.101	1.478	2.049
0.15	1.203	1.621	2.243
0.2	1.162	1.539	2.110
0.25	1.040	1.376	1.886
0.3	0.949	1.264	1.713
0.35	0.879	1.162	1.570
0.4	0.801	1.060	1.437
0.45	0.739	0.973	1.315
0.5	0.674	0.891	1.193
0.55	0.628	0.821	1.101
0.6	0.576	0.759	1.017
0.65	0.543	0.710	0.957
0.7	0.506	0.664	0.898
0.75	0.469	0.621	0.844
0.8	0.448	0.592	0.805
0.85	0.425	0.564	0.770
0.9	0.403	0.537	0.731
0.95	0.382	0.511	0.692
1	0.361	0.483	0.655
1.1	0.336	0.446	0.609
1.2	0.310	0.414	0.565
1.3	0.284	0.378	0.519
1.4	0.258	0.345	0.474
1.5	0.230	0.311	0.431
1.6	0.217	0.294	0.407
1.7	0.204	0.276	0.383
1.8	0.191	0.258	0.359
1.9	0.177	0.241	0.334
2	0.163	0.222	0.310
2.1	0.156	0.212	0.295
2.2	0.149	0.201	0.280
2.3	0.141	0.191	0.266
2.4	0.133	0.179	0.252
2.5	0.124	0.169	0.238
2.6	0.118	0.161	0.225
2.7	0.111	0.152	0.213
2.8	0.105	0.144	0.201
2.9	0.099	0.135	0.188
3	0.092	0.124	0.174

PLANOS

