

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

DIRECCIÓN GENERAL DEL OBSERVATORIO AMBIENTAL

GERENCIA DE GEOLOGÍA
ÁREA DE SISMOLOGÍA

Estimación de Efectos de Sitio a través de
Modelos Empíricos

Presenta:

Luis Ernesto Mixco Durán
Especialista 1 - Sismólogo

Febrero de 2020

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	SISTEMATIZACIÓN DE MÉTODOS EMPÍRICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE EFECTOS DE SITIO	6
3.	APLICACIÓN PARA SISTEMATIZACIÓN DE MÉTODOS EMPÍRICOS.....	8
3.1.	TÉCNICA DE COCIENTES ESPECTRALES CON RESPECTO A UN SITIO DE REFERENCIA- SSR – HS/HR – BORCHERDT	8
3.1.1.	AUTOMATIZACIÓN DE SSR	11
3.2.	TÉCNICA DE COCIENTES ESPECTRALES UTILIZANDO NAKAMURA (H/V) CON REGISTROS ACELEROGRÁFICOS - HVSR	21
3.2.1.	AUTOMATIZACIÓN DE HVSR	24
3.3.	TÉCNICA DE SELECCIÓN ÓPTIMA DE MODELOS DE ATENUACIÓN – METODOLOGÍA SHAKEMAP	29
3.3.1.	TEORÍA SOBRE SHAKEMAP	31
3.3.2.	TEORÍA DE VARIABILIDAD DE GMPES	34
3.3.3.	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN DE GMPES	36
3.3.4.	MAPA DE VS30.....	38
3.3.4.1.	ANÁLISIS DE RANKEO	39
3.3.4.2.	VEROSIMILITUD LOGARÍTMICA (LLH).....	40
3.3.4.3.	DISTANCIA EUCLEDIANA.....	40
3.3.5.	AUTOMATIZACIÓN DE TÉCNICA DE AJUSTE ÓPTIMO	41
3.3.5.1.	PROCEDIMIENTO	42
3.3.5.2.	EJEMPLO DE RESULTADOS	45
3.3.5.2.1.	RESULTADOS: GRUPO 2.....	45
3.3.5.2.2.	RESULTADOS: GRUPO 3.....	55
4.	GENERACIÓN DE FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN EMPÍRICAS	62
4.1.	FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN: SUELO TIPO BC	63
4.2.	FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN: SUELO TIPO C.....	65
4.3.	FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN: SUELO TIPO CD	66
4.4.	FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN: SUELO TIPO D	68
4.5.	TABLAS DE FACTORES DE AMPLIFICACIÓN	69
4.5.1.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA PGA [0.01 SEG].....	70
4.5.2.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.1 SEG].....	70
4.5.3.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.2 SEG]	70
4.5.4.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.3 SEG]	71
4.5.5.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.5 SEG]	71
4.5.6.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.6 SEG]	71
4.5.7.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [0.8 SEG]	72
4.5.8.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [1.0 SEG].....	72
4.5.9.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [1.5 SEG].....	72
4.5.10.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [2.0 SEG]	73
4.5.11.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [2.5 SEG]	73
4.5.12.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA SA [3.0 SEG]	73
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	74
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79



1. Introducción

Los terremotos son considerados como uno de los fenómenos naturales que producen mayor destrucción, con respecto a pérdidas humanas y materiales. Su relación directa se asocia comúnmente con daños en componentes estructurales de viviendas y edificios que albergan a las personas.

El Salvador, en las últimas cuatro décadas, ha sufrido los efectos de terremotos de las dos principales fuentes sísmicas que afectan al país, estos son los terremotos superficiales debido a la activación de fallas geológicas locales (eventos de 1965 y 1986) y terremotos en el mar debido a procesos de subducción (eventos del 2001). Este tipo de terremotos ha expuesto la considerable amenaza sísmica que existe en el país como también la alta vulnerabilidad sísmica que presentan las edificaciones.

Por lo tanto, para llevar a cabo el diseño estructural de una edificación bajo una filosofía de diseño sismorresistente, es crucial conocer la amenaza sísmica, traducida en el nivel de aceleración del terreno donde se emplazará dicha estructura, a la cual se verá sometida en un tiempo de exposición dado (comúnmente de 50 años, vida útil de una edificación).

Es importante reconocer que uno de los factores que afecta la respuesta estructural de diferentes tipologías o configuraciones constructivas, es el grado de amplificación que poseen las capas superiores del subsuelo donde éstas se encuentran emplazadas. Lo anterior, ha sido evidenciado anteriormente en terremotos importantes (1986 y 2001), donde la distribución geográfica de los daños parece correlacionarse adecuadamente con dicha amplificación. Sobre todo, en un país como El Salvador, en el cual existe un ambiente geológico complejo, que históricamente ha sido escenario de múltiples erupciones volcánicas, de las cuales se derivan estratos de suelos con propiedades mecánicas y dinámicas variadas, donde figuran suelos blandos y poco consolidados que ayudan a amplificar las ondas sísmicas en su trayectoria hacia la superficie.

Como se conoce, para lograr predecir el movimiento sísmico de determinado lugar, se utilizan las ecuaciones de predicción de movimiento del terreno (conocidas también como leyes de atenuación), las cuales intrínsecamente consideran los parámetros de la fuente sísmica y de la atenuación de la energía sísmica a medida se propaga desde la fuente al lugar de interés (el cual se asume que se cimienta sobre un subsuelo rocoso, y por lo tanto, se estima que es de referencia). Sin embargo, no ha sido hasta años recientes, que en la forma de estas ecuaciones, se incluyen consideraciones respecto a la amplificación del terreno (en términos del parámetro de V_{s30} , velocidad de corte promedio de los primeros 30 metros superiores); tratando de integrar el efecto de las irregularidades estratigráficas del subsuelo traducidas en capas heterogéneas desde un punto de vista geotécnico y geológico, lo cual incide notablemente en el comportamiento dinámico de la estructura de suelo.

Esta consideración del efecto de amplificación se le conoce como de: Contraste de impedancias, cuya definición radica en el producto de la densidad del suelo por la velocidad de propagación (ya sea a través de ondas primarias y secundarias) entre capas consecuentes. Este concepto adquiere mayor relevancia cuando se calcula en capas más superficiales, donde comúnmente coexisten materiales más blandos y por ende velocidades de propagación más lentas, obligando (que por conservación del flujo de energía) las amplitudes de éstas aumenten cerca de la superficie.

Por otro lado, además del contraste de impedancias, también se encuentra el efecto de amplificación debido a la topografía o geometría irregular de la superficie del terreno; cuyo valor alcanza relevancia sobre laderas que presentan cambios súbitos de pendientes, es decir, entre muy bajas a muy altas; donde las ondas sísmicas de cuerpo (que poseen múltiples ángulos de incidencia) pueden sufrir considerables reflexiones y difracciones, quedando atrapadas ondas sísmicas superficiales en las capas superiores; ayudando a amplificar la respuesta del suelo. Lo anterior, es un ambiente propicio para que un deslizamiento de tierra pudiese llegar a ser activado, tal como ocurrió (como uno de tantos factores) en la zona de la cordillera de Las Colinas, el pasado terremoto del 13 de enero de 2001.

Entre los objetivos de este documento es realizar una descripción del desarrollo de la sistematización de **métodos empíricos** para la determinación de amplificaciones por efectos de sitio, la cual se planea ejecutarse dentro de la plataforma previamente mencionada. Lo anterior, se ejecutará utilizando los diferentes registros acelerográficos de El Salvador y tres diferentes técnicas para la estimación de efectos de sitio bajo un enfoque empírico, estas son las siguientes:

- a) HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) en dos ventanas de tiempo de cada registro (Ondas S y Coda);
- b) SSR: H/H_{ref} - Borchardt (tomando de referencia de suelo firme la estación acelerográfica de Panchimalco), y
- c) Metodología de Modelos de Atenuación óptimos, la cual utilizará una reevaluación específica de los modelos de atenuación acorde al terremoto evaluado y la respectiva simulación en suelo firme para luego generar la función de transferencia empírica.

Esta última técnica, no ha sido utilizada por otros autores en la literatura, lo cual no proporciona un soporte fuerte a su aplicación. Sin embargo, se ha observado en su aplicación una muy buena correspondencia con la amplificación del terreno; por lo que se ha decidido a utilizarla, principalmente, en la determinación de factores de amplificación. Por otro lado, cabe mencionar, que no se ha abordado la técnica de

Inversión Paramétrica del espectro de amplitudes Fourier, la cual es muy utilizada en la actualidad para estimar el efecto de sitio utilizando registros acelerográficos, cuya especialidad es permitir la disociación de los efectos de la fuente sísmica y el trayecto en los registros. Se espera utilizar en otra actualización de este documento.

Dentro de la plataforma SIG/web sobre la consulta de base de datos acelerográfica de El Salvador, se han incorporado algunos resultados de estas herramientas, lo cual ha permitido procesar la información para la obtención de factores de amplificación para determinados períodos estructurales, que se interrelacionarán con los factores de amplificación obtenidos mediante la técnica de métodos analíticos; explicados en el documento: "Modelos analíticos para análisis de respuesta de sitio a nivel nacional y 16 sitios específicos"; elaborado por Luis Mixco del Observatorio Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

2. Sistematización de métodos empíricos para la determinación de efectos de sitio

El objetivo general de esta sección es poder caracterizar cada una de las estaciones acelerográficas y la respuesta dinámica que presenta el subsuelo donde se encuentran emplazadas, sometidas a diferentes terremotos con niveles de intensidad sísmica particulares. En la literatura se manejan para esta caracterización, dos metodologías: a) modelos analíticos y b) métodos empíricos. Estos últimos son los que se analizarán en este documento, los cuales se realizarán sobre la base de la información y distribución de frecuencias contenidas en los registros acelerográficos.

Es evidente que al tratarse de prácticas empíricas existe cierto sesgo en los resultados, los cuales se basaran en determinar amplificaciones relativas y variación en los períodos predominantes de vibración. Por lo anterior, se ha realizado un trabajo de consulta bibliográfica respecto al tema y conocer la manera como estos métodos podrían ser fiables en sus resultados.

Por otra parte, y antes de comenzar a enumerar y explicar cada una de las técnicas es importante definir sobre qué tipo de registros realizaremos los análisis, es decir, que subconjuntos de registros se emplearan para obtener de mejor manera los productos derivados del efecto de sitio.

Debido a que este trabajo se encuentra en el marco del proyecto del BID relacionado la actualización de normativa de diseño por sismo, éstas clasificaciones se harán con miras a obtener resultados (factores de amplificación) enfocados al diseño y serán sobre la base de considerar diferentes niveles de intensidad sísmica similares a los propuestos por el ASCE 7-16 en el capítulo 11, para ir clasificando los tipos de suelos respecto a estos niveles de intensidad sísmica. Lo anterior, se efectuará con la variante que el enfoque de

espectro de diseño sísmico será el de Multiperíodo y no precisamente de dos períodos, es decir, que se determinarán factores de amplificación para un total de 14 períodos estructurales: [0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0; segundos]

En estas clasificaciones del ASCE se utilizan 3 tipos de medidas de intensidad, estos son: PGA, S_s (aceleración espectral para corto período = 0.2 seg.) y S_1 (aceleración espectral para período largos = 1.0 seg.); los cuales son distribuidos por rangos de aceleraciones máximas del terreno (PGA) y espectrales del terremoto máximo considerado orientado al riesgo.

A continuación, en la figura 1 se muestran las tablas 11.8-1 (referidas al PGA), 11.4-1 (referidas al S_s) y tabla 11.4-2 (referidas al S_1).

TABLE 11.8-1 Site Coefficient F_{PGA}						
Mapped Maximum Considered Geometric Mean (MCE_G) Peak Ground Acceleration, PGA						
Site Class	PGA ≤ 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA = 0.5	PGA ≥ 0.6
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
E	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1
F	See Section 11.4.8					

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of PGA.

Table 11.4-1 Short-Period Site Coefficient, F_a						
Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE_R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period						
Site Class	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See	See	See
F	See	See	See	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8
	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_S .

Table 11.4-2 Long-Period Site Coefficient, F_v						
Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE_R) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period						
Site Class	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2 ^a	2.0 ^a	1.9 ^a	1.8 ^a	1.7 ^a
E	4.2	See	See	See	See	See
F	See	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8
	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8	Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_1 .
^aAlso, see requirements for site-specific ground motions in Section 11.4.8.

Figura 1. Rangos de aceleraciones espectrales y PGA provenientes del ASCE 7-16. Fuente: ASCE 7-16

Figura 1. Rangos de aceleraciones espectrales y PGA provenientes del ASCE 7-16. Fuente: ASCE 7-16

3. Aplicación para sistematización de métodos empíricos

Una vez definido lo anterior, se puede iniciar en la explicación de la sistematización de métodos empíricos para la determinación de amplificaciones por efectos de sitio, la cual planea ejecutarse utilizando los diferentes registros acelerográficos de El Salvador consolidados en la Plataforma RADES, y a su vez, diversos códigos en Python que ayudarán a obtener tanto, dichos factores de amplificación como períodos predominantes resultantes de cada una de las tres técnicas mostradas anteriormente.

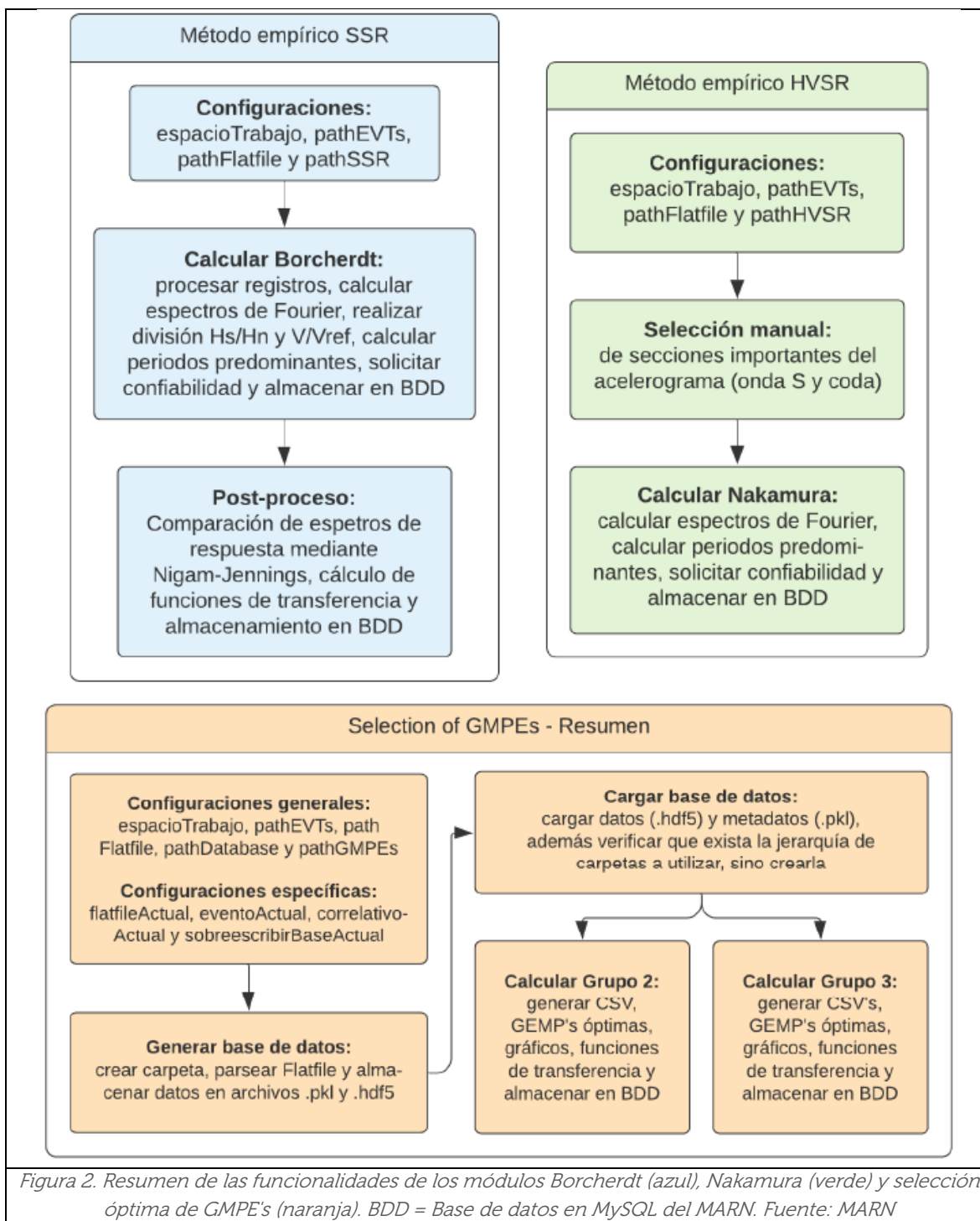
Un resumen gráfico de la funcionalidad y los productos que se obtendrán de cada uno de los scripts para cada técnica, se presenta a continuación en la figura 2, la cual se ha extraído del documento entregable preparado por el consultor del BID Lic. Ronaldo Canizales, llamado: "Sistematización de métodos empíricos para la determinación de amplificaciones por efectos de sitio".

Un aspecto esencial en el tratamiento de estas tres técnicas, es que se considera que únicamente **en el movimiento horizontal** se generaría la amplificación del terreno. Una explicación a lo anterior, obedece a la consideración en el análisis que las capas del subsuelo son también horizontales (donde en realidad no es así). Esta practicidad se alinea a lo estipulado por la Ley de Snell, donde conllevaría a que si una onda sísmica se propaga hacia la superficie atravesando estas interfaces entre capas, su dirección de propagación se aproximará a la componente vertical. Por lo tanto, para simplificar este análisis se trabajará mayoritariamente con la media geométrica de las componentes horizontales de los registros de movimiento fuerte.

3.1. Técnica de Cocientes espectrales con respecto a un sitio de referencia- SSR – H_s/H_r – Borchardt

El método de la razón espectral con respecto a un sitio de referencia, fue introducido por R. D. Borchardt en 1970, sobre la base de un estudio realizado en San Francisco, California. (Kattan, 2012). Esta ha sido considerada como una de las técnicas más confiables para estimar los efectos de sitio, ya que se evalúa exactamente su definición: la amplificación del movimiento sísmico observada en un sitio sobre sedimentos con respecto al movimiento registrado para el mismo sismo sobre roca dura.

Esta técnica se fundamenta en analizar registros sísmicos de dos estaciones para un mismo evento, una de interés (a la cual se requiere obtener el efecto de sitio) y otra de referencia (la que se ha comprobado que se encuentra sobre condiciones de suelo firme o roca). Estos registros se analizan en función de tres grupos de factores, en los cuales se asume una linealidad entre ellos y se puede realizar convolución entre los mismos. Estos factores son los siguientes: a) efectos asociados a la fuente, efectos asociados al trayecto por la corteza entre la fuente y el sitio de interés, y los efectos de sitio.



Sabiendo que los registros acelerográficos se encuentra en el dominio del tiempo, y se necesita conocer la distribución de frecuencias, se utiliza la Transformada de Fourier para obtener la convolución en el dominio de la frecuencia. En esta técnica se asume que la fuente y trayecto son idénticos para ambos registros ya que provienen de la misma fuente y no se encuentran tan alejadas elativamente a la distancia a la fuente. Por lo

tanto, al hacer el cociente espectral (del espectro de Fourier) de ambos registros se cancelan los factores de fuente y trayecto y quedarán únicamente los efectos del sitio.

Al realizar este cociente espectral (considerando las medias geométricas de sus componentes horizontales) proporcionaría una especie de función de transferencia, donde habitualmente se extrae la frecuencia predominante del terreno (en el eje de las abscisas), donde se podrían obtener mayores amplificaciones y ayudar al diseñador de alejarse de dichas frecuencias para evitar el fenómeno de resonancia.

De igual manera, se pueden extraer las amplificaciones relativas resultantes (en el eje de las ordenadas) derivadas del cociente, sin embargo, en la práctica no es recomendable hacerlo debido a que se deja de lado la influencia de la variación en contraste de velocidades (impedancia) de la onda de cuerpo (S) de los diferentes estratos; pudiendo **coexistir el atrapamiento de ondas superficiales que influirían notablemente en la amplificación**; obligando a que la componente vertical del registro acelerográfico también presente cierto grado de amplificación; quebrantando así las condiciones que plantea la técnica SSR.

Por lo tanto, **incluso para la selección de frecuencias dominantes** se debe tener especial cuidado en que la componente vertical no presente amplificaciones considerables, para así **catalogar que la estimación de la amplificación es confiable**. No obstante, se optó por registrar los factores de amplificación dados la concepción teórica de la misma técnica, ya que se evalúa exactamente su definición; solamente que en esta ocasión, se utilizarán los cocientes espectrales de aceleración y ya no los de Fourier, tal como fue realizado por los investigadores Dobry et al. 1999. Estos autores también afrontaron la aproximación que se hace en técnica SSR, la cual obedece que dependiendo de la fuente sísmica del evento analizado, así se podrá asumir si el trayecto puede sufrir cambios o no, y por ende la técnica podría quebrantarse.

Por lo que, tal como lo plantea, Kattan (2012) para los eventos de carácter cortical el trayecto pudiese afectar los registros debido a que en la realidad **no es frecuente encontrarse con afloramientos rocosos en las cercanías de los depósitos de suelo, sino que hasta profundidades mayores a las hipocentrales**.

Es por ello, que para enmendar relativamente esta desventaja de la proximidad de un evento, los autores Dobry et al. 1999 sugieren incluir en el uso de los cocientes espectrales de aceleración (con una pequeña modificación), el criterio de Borchardt (1994) estipulado 25 años después de su técnica original; **donde el denominador del cociente (atribuido a la aceleración espectral de la estación de referencia situada en suelo rocoso) fuera multiplicado por otro cociente que involucraría la relación entre las distancias hipocentrales (al evento sísmico en cuestión) entre la estación de análisis (situada en suelo) y la de referencia (situada en roca)**. (Power, M. et al. 2004)

Cabe destacar, que Borchardt en su estudio de 1994; en vez de utilizar las distancias hipocentrales, hizo uso de las distancias a las zona de máxima liberación de energía; sin embargo, Dobry et al. 1999 se dieron cuenta y validaron que esta pequeña modificación (al ser más fácil de obtener que la de energía máxima) no causaría una influencia significativa en el cálculo de los factores de amplificación. En definitiva, la ecuación para el cálculo de los factores de amplificación (F_a), traducidos en una nueva función de transferencia derivada de cocientes espectrales de aceleración, quedaría de finida de la siguiente manera:

$$F_a = \frac{\text{Aceleración espectral}_{\text{Suelo}}}{\text{Aceleración espectral}_{\text{Roca}} \times \left(\frac{\text{Distancia hipocentral}_{\text{Suelo}}}{\text{Distancia hipocentral}_{\text{Roca}}} \right)}$$

3.1.1. Automatización de SSR

En este apartado se presenta parte de la sistematización automática del cálculo de cocientes espectrales con respecto a una estación de referencia. Dicha estación ha sido elegida en base a un estudio [González et al. 2020] de medición de microtemores realizado por estudiantes de la Universidad Centroamericana (UCA) para optar al grado de Ingeniería Civil.

En este estudio se obtuvieron períodos predominantes para los lugares donde se emplazan las estaciones acelerográficas manejadas por el MARN, utilizando la técnica de Nakamura (H/V) o ruido ambiental; la cual define que la energía del microtemor consiste principalmente en ondas Rayleigh y la amplificación por efecto de sitio radica en la presencia de un suelo blando en la superficie y un suelo rocoso en su semiespacio (Lermo et al. 1993). Esta será abordada más adelante con mayor detalle.

La estación de referencia se ubica en la ciudad de Panchimalco en San Salvador, donde sus rocas volcánicas datan de la era geológica del Terciario (Salazar, 2007). Asimismo, la velocidad de corte a través de dichas rocas se ha caracterizado de 2100 m/s, de acuerdo al estudio de Faccioli et al., 1988). En la figura 3 se puede observar parte de los resultados obtenidos en el trabajo de graduación, tras efectuar el ensayo de ruido ambiental. En esta figura se aprecian los gráficos H/V para 4 sensores extraídos de un arreglo circular de 7 sensores. En todos, la frecuencia predominante es muy clara y ronda en promedio a los 12 Hz, equivalentes a un período de 0.0833 segundos; apuntando a un subsuelo superficial competente que podría considerarse como un suelo firme o roca blanda.

Cabe mencionar, que en este estudio [González et al. 2020], también se pudo estimar el perfil de velocidad de corte mediante la configuración de un arreglo sísmico basado en la observación de la componente vertical de microsismos con un arreglo circular de sensores. Dicho método tiene una alta eficiencia de observación porque permite el análisis de un rango amplio de longitudes de onda en un arreglo con un número

relativamente pequeño de sensores. Este método se llama *Círculo sin Centro* (*Centerless Circular Array*). De los resultados preliminares, se estima que la velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 30 metros, es mayor a los 500 m/s, justificando aún más la competencia de los estratos que posee el subsuelo de dicha estación de Panchimalco.

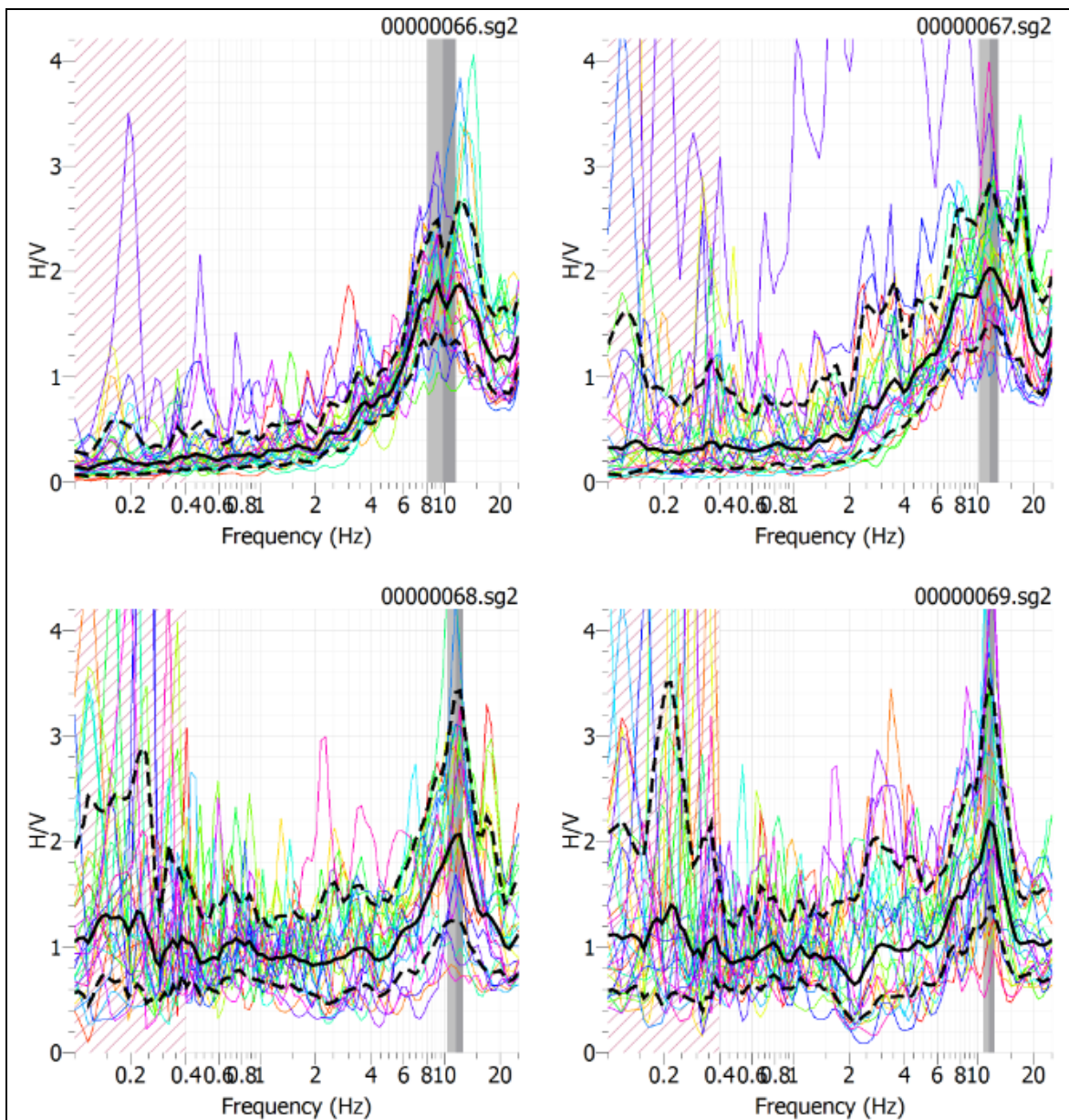


Figura 3. Gráficos de H/V en 4 sensores por la medición de microtremores o ruido ambiental, en las cercanías de la Unidad de Salud en Panchimalco. Fuente: González et al. 2020

Por otro lado, esta automatización se ha realizado a través de códigos escritos en lenguaje Python, utilizando algunas herramientas del *Strong Motion Toolkit* (SMTK) de GEM, lo cual ha permitido conectarse con la plataforma web de registros acelerográficos (RADES) y extraer de manera automática los registros de cada estación.

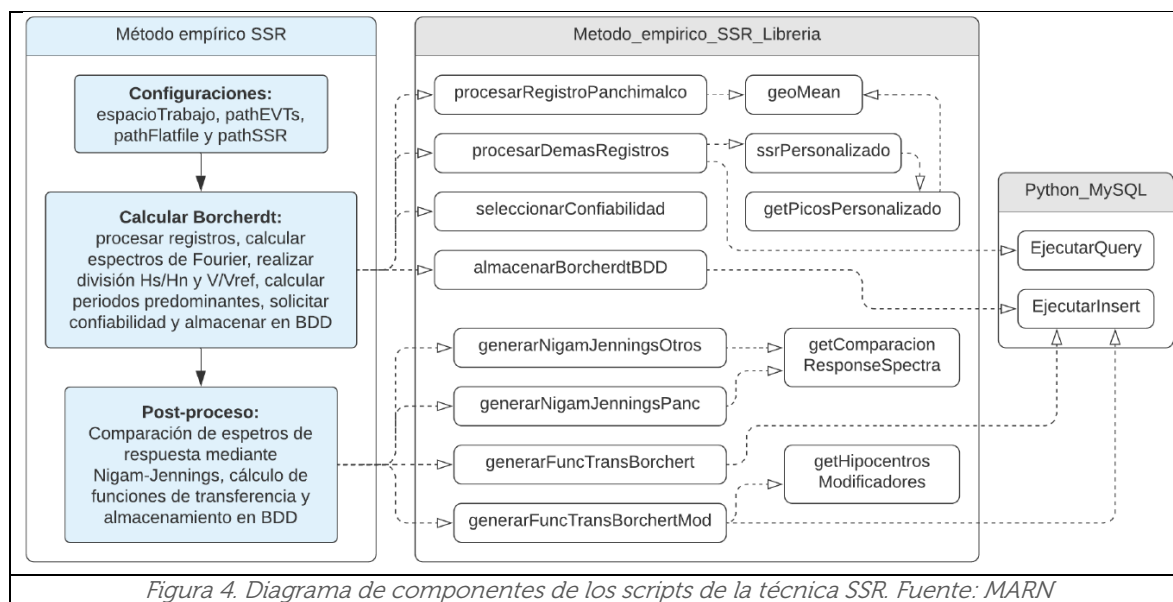
Básicamente, la automatización del método de Borchardt o técnica SSR buscará estimar períodos fundamentales para diferentes ventanas de frecuencia, utilizando los cocientes espectrales de Fourier de la media geométrica de las componentes horizontales de las estaciones involucradas (dándole mayor atención a las de interés ingenieril); así como también, el cálculo de factores de amplificación mediante los cocientes espectrales de aceleración y las modificaciones establecidas por Dobry et al 1999 y Borchardt 1994.

Respecto al porqué de utilizar ventanas de frecuencia (Panzera et al. 2013), es porque se tendrá un especial cuidado de poder discriminar aquellas donde se observe que la componente vertical se amplifica considerablemente en relación a la horizontal; lo cual como se dijo anteriormente, es asociado a la existencia de considerable contraste de impedancias de las ondas P, y donde se observen amplificaciones relativas muy grandes. Las ventanas de frecuencias son las siguientes:

- Alta frecuencia (10 – 25 Hertz) – Período Corto (0.04 – 0.10 segundos)
- Moderada frecuencia (1 – 10 Hertz) – Período Moderado (0.1 – 1.0 segundos)
- Baja frecuencia (0.5 – 1 Hertz) – Período Alto (1.0 – 2.0 segundos)
- Muy Baja frecuencia (0.1 – 0.5 Hertz) – Período Muy Alto (2.0 – 10 segundos)

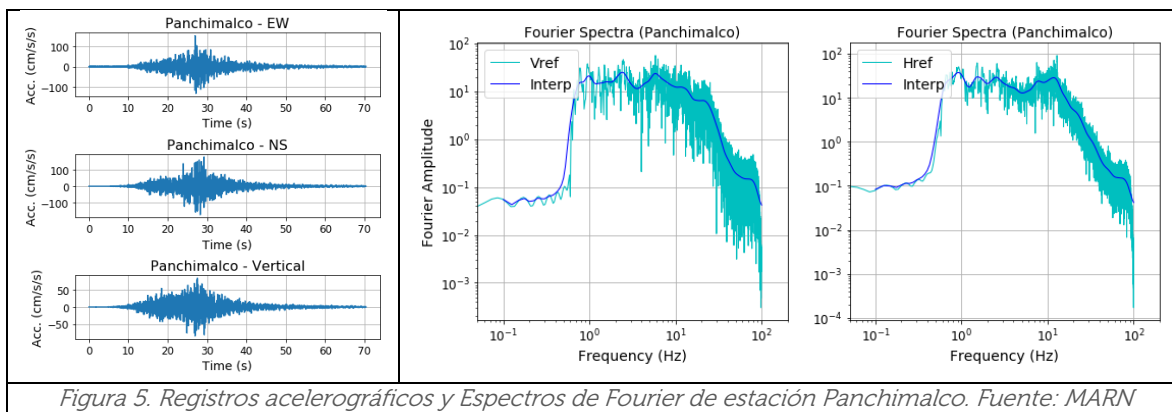
Cabe resaltar que la ventana (b) es la más importante, desde el punto de vista ingenieril.

Todo lo anterior, se ha considerado en la programación del script para obtener resultados que permitan al usuario interactuar con el código, logrando así estimar la confiabilidad de la frecuencia predominante y, consecuentemente, los factores de amplificación. En la figura 4, se observa un diagrama de componentes que integrará al script de esta técnica; donde la parte de las frecuencias predominantes se asocian al paso de “Calcular Borchardt” y los factores de amplificación al paso de “Post-Proceso”.

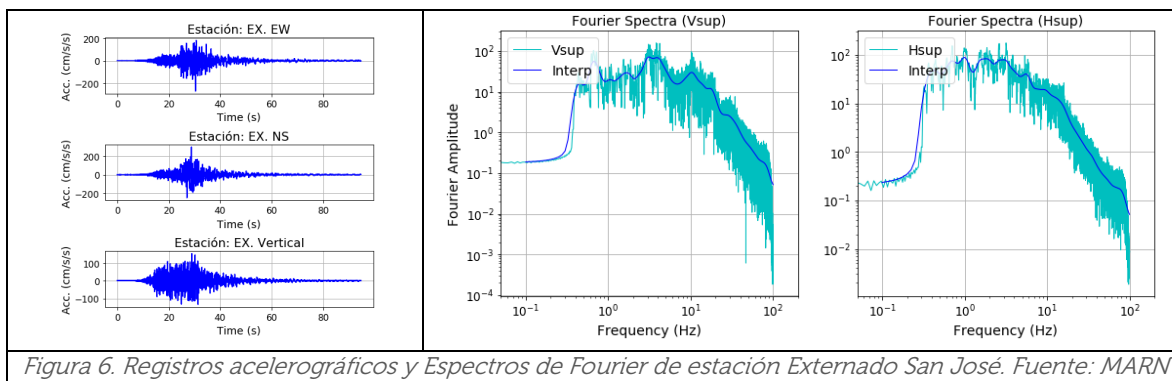


A continuación, se mostrará el procedimiento realizado para un evento sísmico y estaciones acelerográficas particulares, mostrando en todo momento el cumplimiento de los requisitos permitidos para la validez de la técnica SSR, junto con las modificaciones planteadas anteriormente en el apartado 3.1. Este evento será el sismo de subducción intraplaca del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7), donde en total se poseen 28 registros acelerográficos en superficie con importantes niveles de aceleración, y posibles evidencias de no linealidad del suelo asociada a cambios de periodos fundamentales.

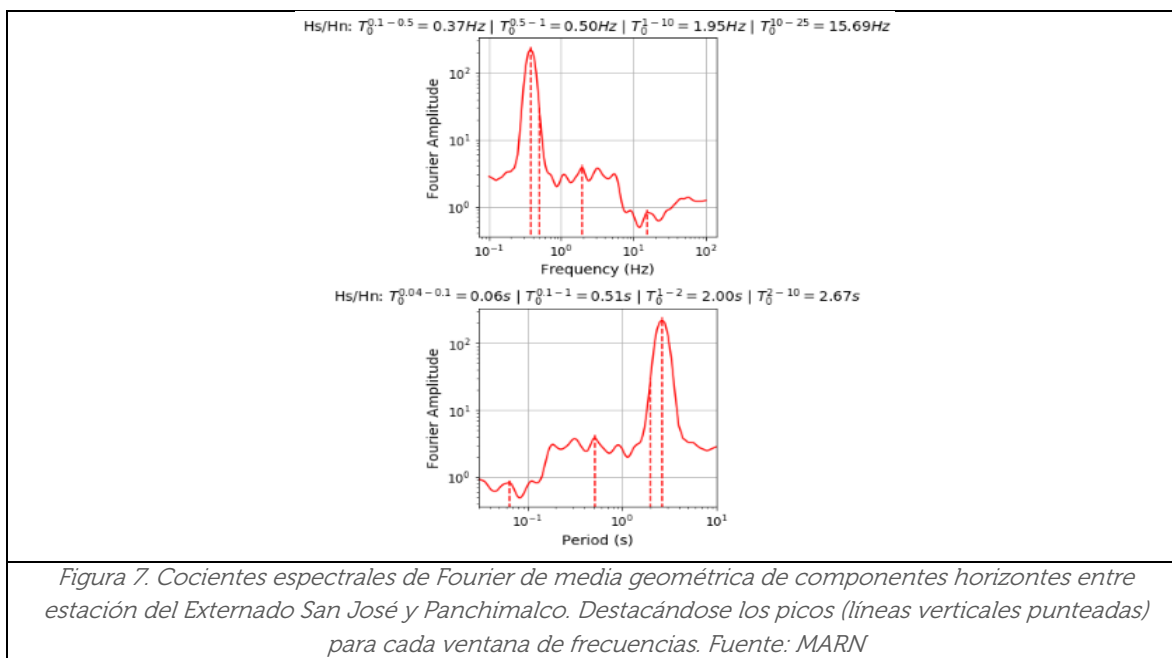
1. Calcular el espectro de amplitudes de Fourier (FAS) de la estación de referencia (Panchimalco), tanto para la media geométrica de las componentes horizontales como la vertical, y además utilizar un suavizado de la forma espectral, que permita definir de mejor manera las tendencias en sus amplitudes. Se utilizó el algoritmo de suavizado Konno y Ohmachi (1998) sobre el dominio del logaritmo de la frecuencia, con un coeficiente de ancho de banda de 40 y el suavizado fue aplicado en 3 ocasiones. Ver la figura 5.



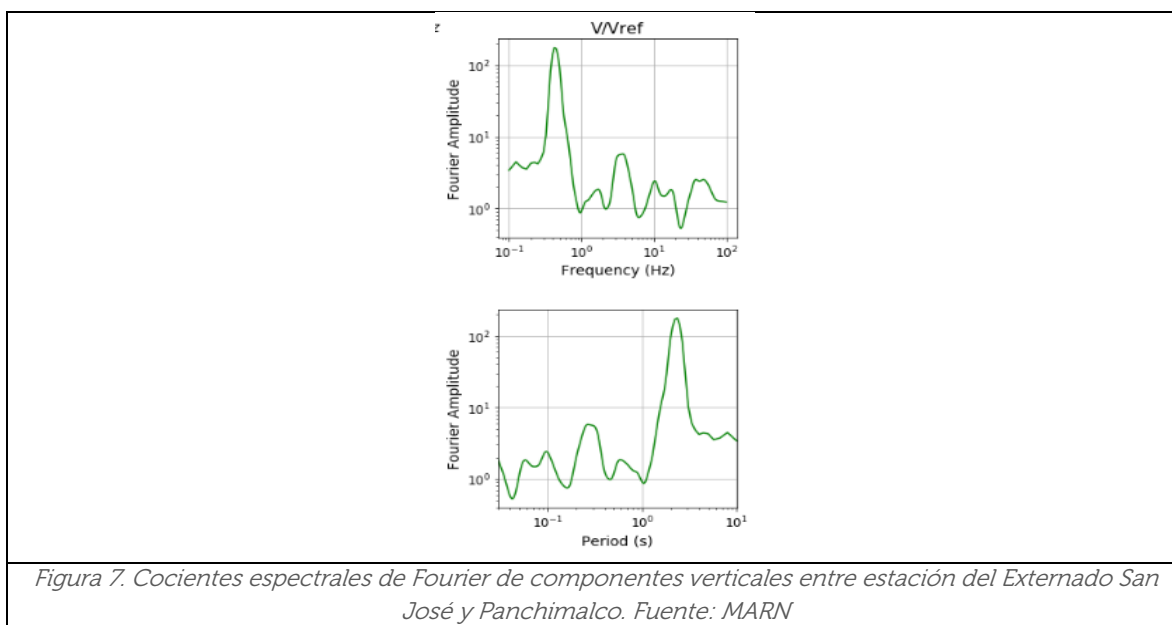
2. Calcular el espectro de amplitudes de Fourier (FAS) de la media geométrica de las componentes horizontales como la vertical de cada una de las estaciones; donde preferiblemente se cumplan los criterios relacionados a la distancia entre estaciones menor que la hipocentral, utilizando el mismo algoritmo de suavizado. Ver la figura 6.



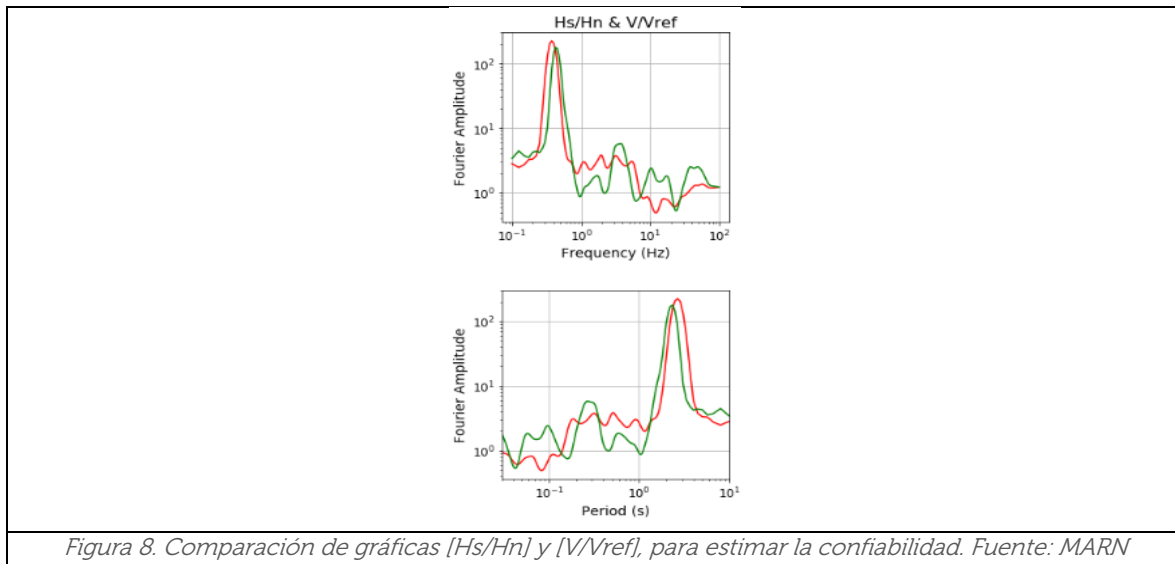
3. Calcular el cociente entre el FAS de la media geométrica de las componentes horizontales de cada una de las estaciones con la FAS de la media geométrica de las componentes horizontales de la estación de referencia. Ver la figura 7, donde arriba se muestran las ventanas de frecuencia y debajo de períodos. Adicionalmente, se marcan con líneas verticales punteadas, los picos en cada ventana.



4. Calcular el cociente entre el FAS de la componente vertical de cada una de las estaciones con la FAS de la componente vertical de la estación de referencia. Ver la figura 8. Lo anterior, con el objetivo de checar la amplificación de dicha componente.



5. Unir en la misma gráfica los resultados de los cocientes espectrales de Fourier de la media geométrica de las componentes horizontales (suelo y referencia [H_s/H_n], obtenidos en la figura 6) con la gráfica de cocientes espectrales de Fourier de las componentes verticales (suelo y referencia [V/V_{ref}], obtenidos en la figura 7); y observar para cada ventana de frecuencia (o de tiempo) la confiabilidad de la frecuencia predominante. Lo anterior se establecerá cuando se estime que la gráfica [V/V_{ref}] se mantenga estable y por debajo de la gráfica de [H_s/H_n], asumiendo que en esa ventana no existe amplificación de las componentes verticales y por ende alto contraste de impedancia de la onda P. Ver figura 8.



6. Seleccionar la ventana con mayor confiabilidad (Panzera et al. 2013), para extraer el valor de frecuencia predominante. En la figura 9, se pueden observar los resultados en la estación acelerográfica Externado San José, la cual se ubica en San Salvador y presenta unos valores de amplificación relativa considerables. Esto puede obedecer a que en dicha zona se presentan suelos blandos superficiales (especialmente por espesores de productos volcánicos poco consolidados como la Tierra Blanca Joven); los cuales habitualmente presentan períodos predominantes largos, logrando una buena correspondencia el período obtenido de 0.51 segundos. Cabe mencionar, que dentro de la misma ventana de frecuencias (1 a 10 Hertz) se observa un sector donde la componente vertical presenta una amplificación relativa a la obtenida con las componentes horizontales; es por ello, que fue estimada como No confiable (en recuadro gris) y solo fue seleccionado aquel sector donde la gráfica verde estuviera debajo de la roja. Adicionalmente, en la figura 10 se observan los resultados de la estación acelerográfica de Berlín, ubicada específicamente en la Planta de Explotación de Berlín, donde se presume (gracias a la consulta de perfiles litológicos de los pozos como el TR5) existencia de estratos muy competentes. Es por ello, que se obtiene un período predominante de 0.20 segundos, el cual está en consonancia con los períodos cortos que se obtendrían en este tipo de emplazamientos rocosos.

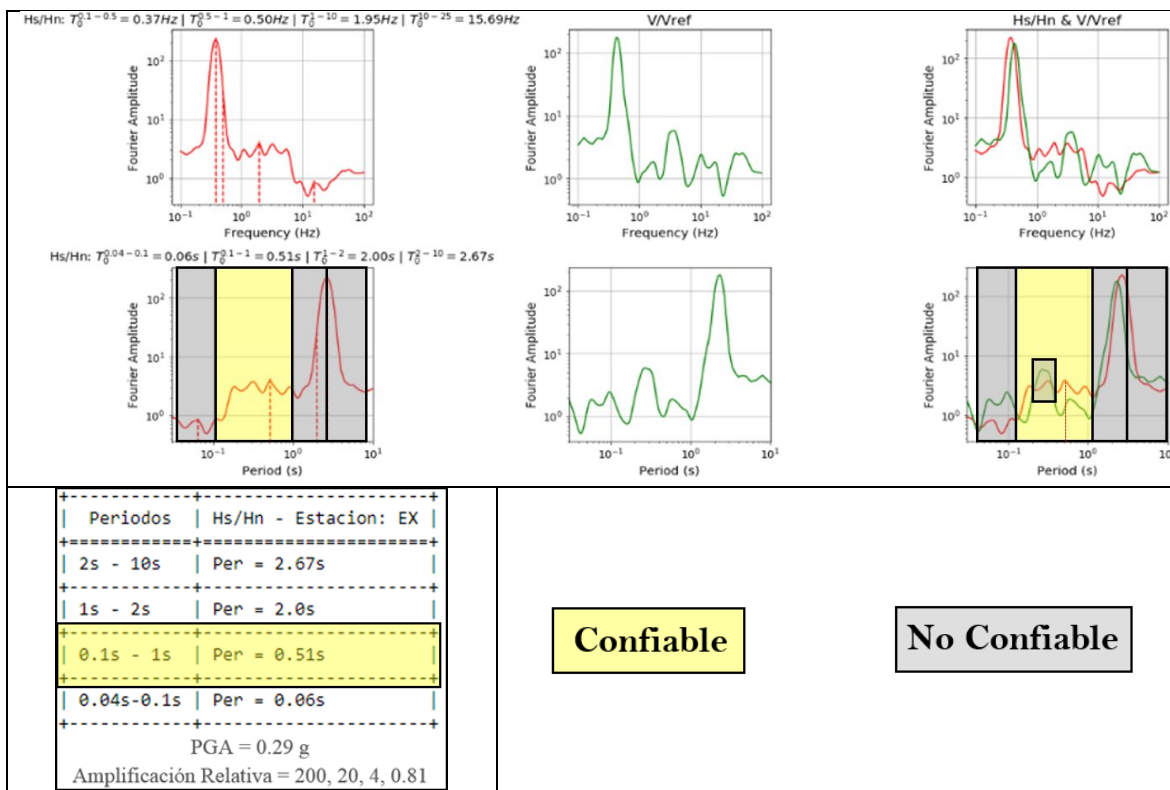


Figura 9. Resultado de período predominante en estación Externado San José. Fuente: MARN

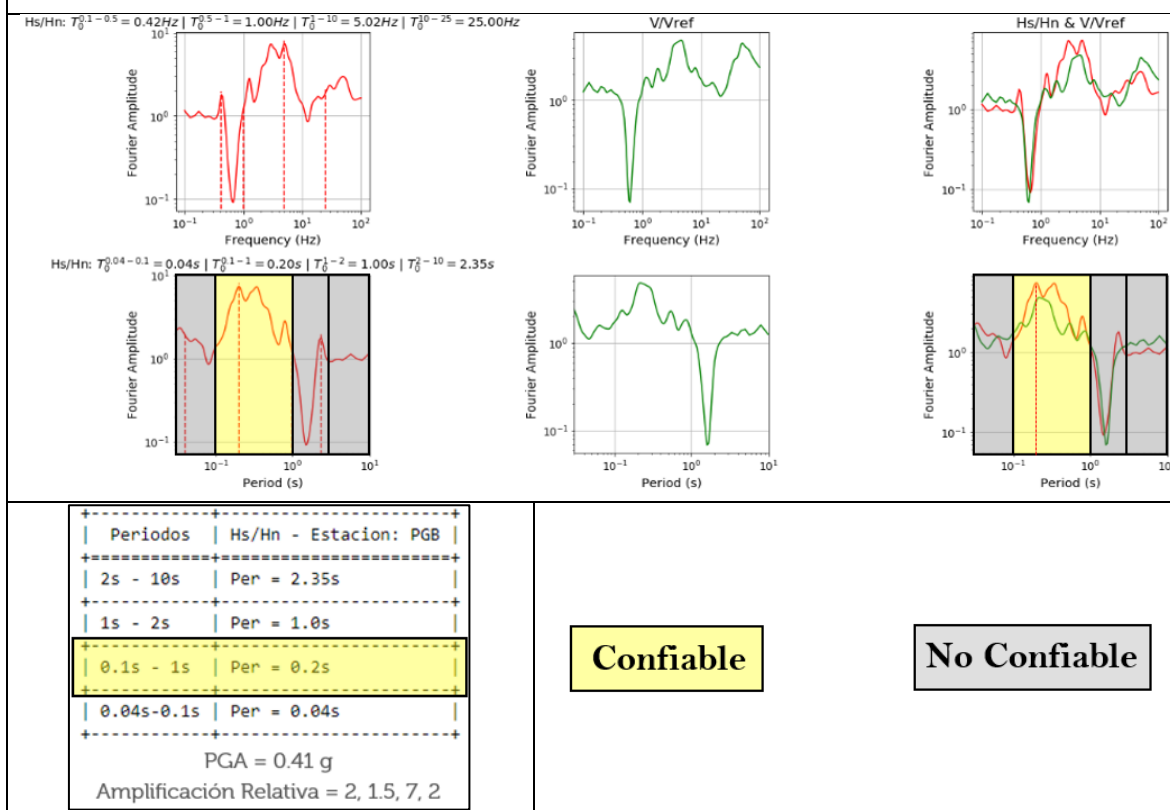


Figura 10. Resultado de período predominante en estación de Berlín. Fuente: MARN

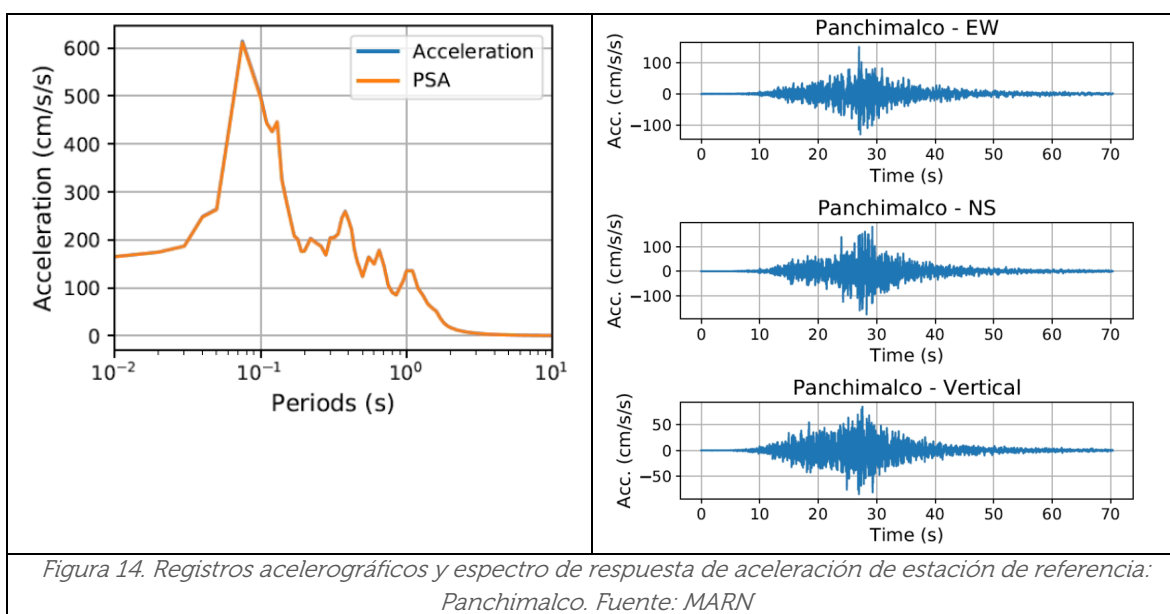
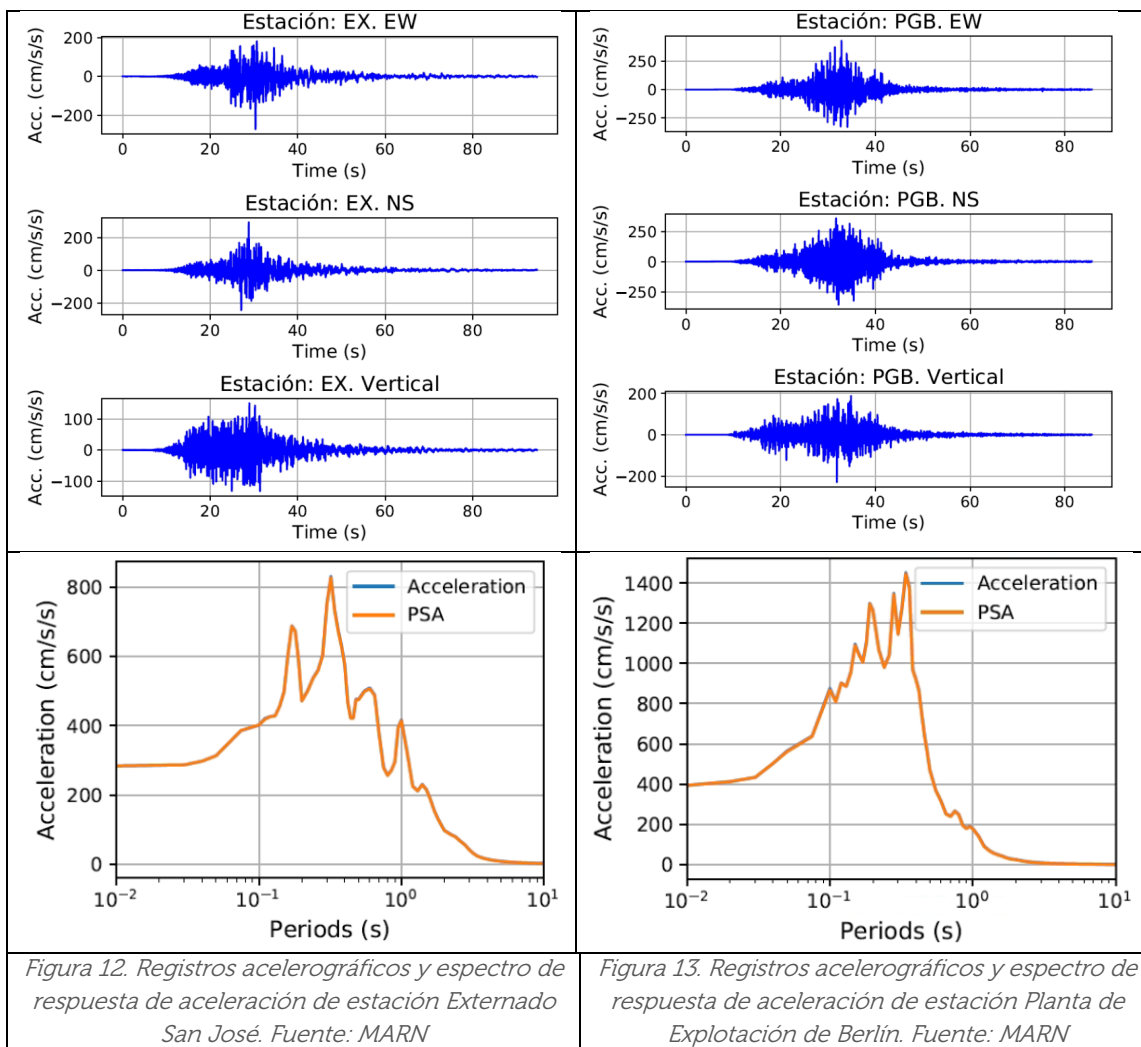
7. Registrar en la base de datos MySQL el período predominante (T0) o los rangos de T0 obtenidos, entre las ventanas frecuenciales. Es decir, que también pueden obtenerse más de un período predominante para cada estación, evidenciándose los diferentes modos de vibrar del suelo que pudiesen activarse durante un evento sísmico. Lo anterior, siempre y cuando el usuario haya establecido su confiabilidad. Ver figura 11.

El usuario deberá digitar el número uno si considera que dicho periodo es confiable, caso contrario deberá digitar el número cero. La Figura 11 muestra algunos registros almacenados en la base de datos MySQL.

<pre>-- Para la estación: NO -- ¿Considera el valor del periodo 0.04s-0.1s confiable? (1=SI, 0=NO) 1 ¿Considera el valor del periodo 0.1s - 1s confiable? (1=SI, 0=NO) 1 ¿Considera el valor del periodo 1s - 2s confiable? (1=SI, 0=NO) 1 ¿Considera el valor del periodo 2s - 10s confiable? (1=SI, 0=NO) 1</pre>										
id	id_reg_acc	per_004_01	con_004_01	per_01_1	con_01_1	per_1_2	con_1_2	per_2_10	con_2_10	
▶ 11	6976	2.501	0	2.000	0	0.500	1	0.050	0	
12	6980	2.354	1	2.000	1	0.817	1	0.100	0	
13	6976	2.501	1	2.000	1	0.500	1	0.050	1	
14	6980	2.354	0	2.000	0	0.817	0	0.100	0	
15	6976	2.501	0	2.000	0	0.500	0	0.050	0	
16	6980	2.354	0	2.000	0	0.817	0	0.100	0	

Figura 11. Ejemplo de registro en base de datos de Periodos predominantes por SSR. Fuente: MARN

8. Calcular en un Post-procesamiento los espectros de respuesta de aceleración, tanto de la estación de referencia (Panchimalco) como la estación en suelo o de análisis. De igual manera, se pueden extraer de los registros ya procesados y contenidos en la plataforma de registros acelerográficos (RADES). En las figura 12 y 13, se observan los espectros de respuesta de aceleración para las estaciones del Externado San José y de la Planta de Explotación de Berlín, junto a sus series de tiempo o registros acelerográficos; respectivamente. Por otro lado, en la figura 14 se observa el espectro de respuesta de aceleración de la estación de referencia de Panchimalco, junto a sus registros acelerográficos de las 3 componentes.
9. Determinar la función de transferencia para cada estación acelerográfica, derivada de los cocientes espectrales de aceleración; basados en la modificación propuesta por Dobry et al. 1999 y Borchardt 1994. Para efectos de comparación, se presenta en las figuras 15 y 16, las funciones de transferencia sin modificaciones (con la multiplicación del cociente de distancias hipocentrales al componente de aceleración espectral del sitio de referencia); y en las figuras 17 y 18, se presentan las funciones de transferencia ya modificadas, y de las cuales se extraerán para diferentes períodos estructurales el valor del factor de amplificación. Estos finalmente, serán registrados en la base de datos MySQL, para ser utilizados luego para conformar funciones de amplificación.



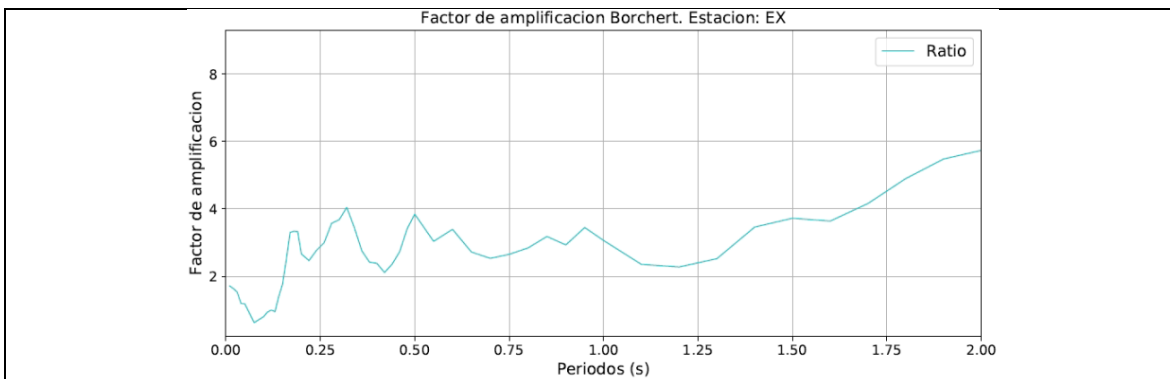


Figura 15. Función de transferencia No modificada por SSR de Externado San José. Fuente: MARN

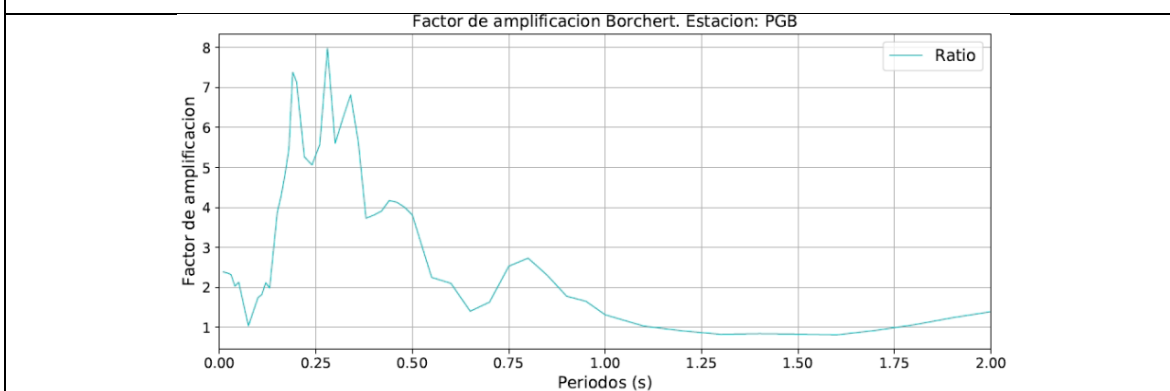


Figura 16. Función de transferencia No modificada por SSR de Planta de Berlín. Fuente: MARN

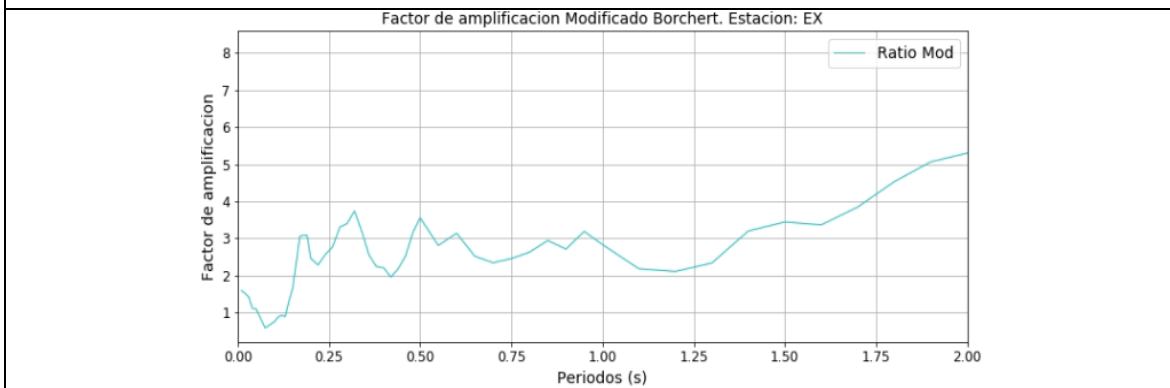


Figura 17. Función de transferencia Modificada por SSR de Externado San José. Fuente: MARN

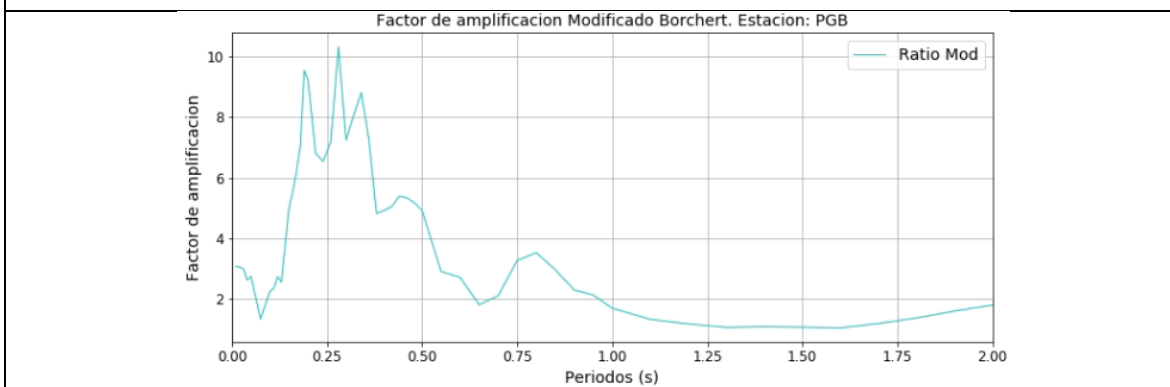


Figura 18. Función de transferencia Modificada por SSR de Planta de Berlín. Fuente: MARN

10. Almacenamiento en base de datos MySQL. En la figura 19, se observa un ejemplo de esta acción; destacándose ahí los períodos estructurales (desde 0.01 seg, asemejándose para el nivel de intensidad de PGA, hasta un valor de 2.0 segundos), para los cuales se extrae de la función de transferencia los factores de amplificación.

id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor	id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor
1755	6976	factorAmplBorchert	0.01	3.1358	1909	6976	factorAmplBorchertMod	0.01	3.6029
1756	6976	factorAmplBorchert	0.02	3.1812	1910	6976	factorAmplBorchertMod	0.02	3.6550
1757	6976	factorAmplBorchert	0.03	3.6699	1911	6976	factorAmplBorchertMod	0.03	4.2164
1758	6976	factorAmplBorchert	0.04	2.7485	1912	6976	factorAmplBorchertMod	0.04	3.1579
1759	6976	factorAmplBorchert	0.05	2.3231	1913	6976	factorAmplBorchertMod	0.05	2.6691
1760	6976	factorAmplBorchert	0.08	1.2342	1914	6976	factorAmplBorchertMod	0.08	1.4180
1761	6976	factorAmplBorchert	0.10	1.8626	1915	6976	factorAmplBorchertMod	0.10	2.1400
1762	6976	factorAmplBorchert	0.11	2.4048	1916	6976	factorAmplBorchertMod	0.11	2.7630
1763	6976	factorAmplBorchert	0.12	2.6115	1917	6976	factorAmplBorchertMod	0.12	3.0004
1764	6976	factorAmplBorchert	0.13	2.7836	1918	6976	factorAmplBorchertMod	0.13	3.1982
1765	6976	factorAmplBorchert	0.14	3.4861	1919	6976	factorAmplBorchertMod	0.14	4.0054
					1920	6976	factorAmplBorchertMod	0.15	5.0878

Figura 19. Ejemplo de registro en base de datos de Factores de amplificación por SSR, tanto los No modificados como los Modificados. Fuente: MARN

3.2. Técnica de Cocientes espectrales utilizando Nakamura (H/V) con registros acelerográficos - HVSR

El método de Yosio Nakamura dicta que es posible calcular el período predominante del suelo a partir de la relación del espectro de Fourier de la aceleración de la componente horizontal y el de la componente vertical, en una estación emplazada sobre sedimentos. La ventaja de este método es que puede aplicarse inclusive cuando solamente se tenga un registro acelerográfico en superficie (es posible prescindir de una estación de referencia como la de Panchimalco).

De acuerdo a Chávez-García y Montalva 2014, desde hace más de 40 años se ha comprobado que era posible deconvolucionar el componente vertical de los componentes horizontales; permitiendo eliminar la contribución de la fuente y el trayecto. Sin embargo, siempre es de considerar las limitaciones de acuerdo a las amplificaciones en las componentes verticales del registro acelerográfico.

En el caso de eventos lejanos, las ondas de cuerpo (ondas P y S) llegan al sitio de interés con un ángulo de incidencia vertical; por lo que el desplazamiento registrado (en sus tres componentes: radial, transversal y vertical) viene dado por la convolución entre la función temporal de la fuente sísmica de la onda sísmica incidente $[S(t)]$, la respuesta impulsional del instrumento del registro $[I(t)]$ y la respuesta impulsional de la estructura sedimentaria bajo la estación de interés $[E(t)]$ (Chávez-García y Montalva 2014).

Sin embargo, al ser telesismos se podría asumir que el desplazamiento **registrado en la componente vertical** es una estimación de la función de la fuente convolucionada por la respuesta instrumental, es decir, se podría remover el factor de la respuesta del suelo.

Ahora, si se acepta que la respuesta instrumental $[I(t)]$ es análoga en los tres componentes del movimiento, las funciones que describirían los efectos de la estructura sedimentaria $[E(t)]$ bajo el lugar del registro para los componentes horizontales, **pueden obtenerse al deconvolucionar los registros horizontales con el componente vertical**. Dado que el análisis se hace en el dominio de la frecuencia, dicha deconvolución se traduce en una división, obteniendo las siguientes expresiones:

$$E_{radial}(f) = \frac{\text{Desplazamiento}_{radial}(f)}{I(f) * S(f)} \cong \frac{\text{Desplazamiento}_{radial}(f)}{\text{Desplazamiento}_{vertical}(f)}$$

$$E_{transversal}(f) = \frac{\text{Desplazamiento}_{transversal}(f)}{I(f) * S(f)} \cong \frac{\text{Desplazamiento}_{transversal}(f)}{\text{Desplazamiento}_{vertical}(f)}$$

Fueron precisamente estas concepciones para estimar una función de transferencia y sus consecuentes efectos de sitio, lo que propusieron Lermo y Chávez-García en 1993; donde se establecía especialmente sobre el caso de ondas de cuerpo provenientes de telesismos, las cuales inciden verticalmente a las capas del suelo **y se ignora la contribución de las ondas superficiales**, cuando estas quedan atrapadas dentro de las capas superficiales. Lo anterior, ocurre principalmente con los sismos regionales y locales, y más aún al realizar ensayos de microtemores (o ruido ambiental) utilizando arreglos de sensores para aplicar la técnica de Nakamura (H/V).

De acuerdo al investigador Nakamura, Y. 1989, la energía sísmica se propaga predominantemente como ondas de Rayleigh. Por lo tanto, para el caso de una capa de suelo (o de varias capas de suelo) sobre un semiespacio de roca firme, se pueden considerar cuatro componentes de movimiento: los componentes horizontal y vertical en la superficie libre (H_s y V_s , respectivamente), y los mismos componentes en la base de la columna sedimentaria (H_B y V_B). (Chávez-García y Montalva 2014).

Dado que se supone que el movimiento en la base no estaría afectado por efectos de sitio, la estimación de la amplificación de interés ingenieril $[S_E(f)]$ **es el cociente entre el movimiento horizontal en la superficie $[H_s]$ con respecto al movimiento horizontal sin efectos de sitio supuesto en la base $[H_B]$** . Esta relación está dada por la siguiente expresión: (Chávez-García y Montalva 2014).

$$S_E(f) = \frac{H_s(f)}{H_B(f)}$$

Ahora, al seguir el razonamiento de Nakamura, Y. 1989, donde las ondas Rayleigh quedan atrapadas dentro de las capas superficiales de una columna de suelo, **estarían presentes en el componente vertical registrado en la superficie libre $[V_s]$, pero no en el componente vertical en roca $[V_B]$** . Pero, si se supone que el componente vertical de

las ondas de Rayleigh no es amplificado por las capas de suelo, entonces una estimación de la distribución de la energía de la fuente en el dominio de la frecuencia, es decir, del espectro de la fuente que excita el movimiento en la superficie [$A_s(f)$], puede obtenerse del cociente: (Chávez-García y Montalva 2014).

$$A_s(f) = \frac{V_s(f)}{V_B(f)}$$

Por ello, para lograr compensar [$S_E(f)$] por el efecto del espectro de la señal que excita el movimiento, calculamos una función de amplificación modificada [$S_M(f)$], dividiendo S_E por la estimación del espectro de la fuente A_s , como: (Chávez-García y Montalva 2014).

$$S_M(f) = \frac{S_E(f)}{A_s(f)} = \frac{\frac{H_s(f)}{H_B(f)}}{\frac{V_s(f)}{V_B(f)}} = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} * \frac{V_B(f)}{H_B(f)}$$

Al realizar una infinidad de ensayos de ruido sísmico, Nakamura pudo encontrar que para un amplio rango de frecuencias en sitios donde existe un sub-estrato firme y la propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones, la relación entre las componentes horizontal y vertical del basamento, **se podría aproximar a la unidad**.

$$\frac{H_B(f)}{V_B(f)} = 1 = \frac{V_B(f)}{H_B(f)}$$

Resultando, que la función de transferencia modificada de capas superficiales puede ser estimada solamente con los registros en superficie.

$$S_M(f) = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} * 1$$

En resumen, los cocientes espectrales de las amplitudes de Fourier de las movimientos de los componentes horizontal y vertical del basamento deben estar libres del efecto de las ondas Rayleigh; sin embargo, si estarían presentes tanto, en el componente vertical como en el horizontal registrados en la superficie libre, **con la variante que se asumiría que el efecto de dichas ondas sea equivalente en ambas componentes** (asumiendo también que no exista amplificación en la componente vertical debido al contraste de velocidades), **logrando que se remueva al realizar el respectivo cociente**.

Si los distintos medios del subsuelo no presentan contrastes en las velocidades para ondas P, el componente vertical contendrá fundamentalmente información de la fuente y el trayecto, pero no del sitio. El razonamiento es similar para el caso de ondas Rayleigh. Ello permite utilizar el componente vertical como referencia, con la misma base que los

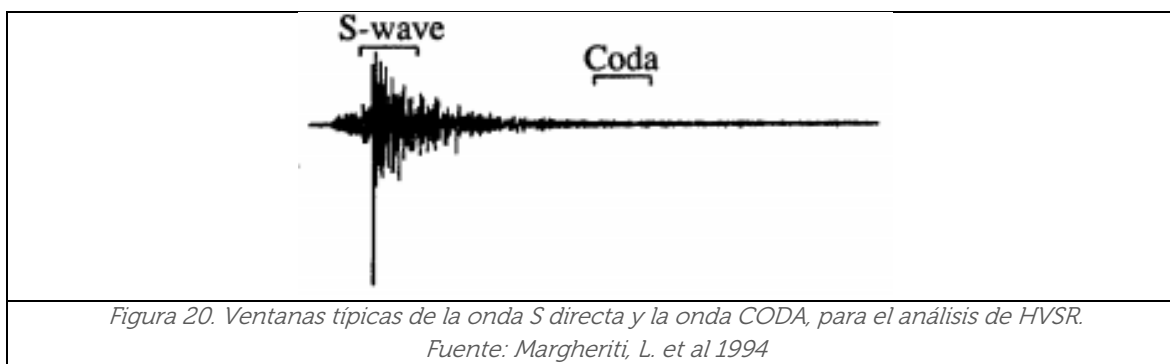
cocientes espectrales de la técnica de Borchardt, con respecto a una estación de referencia (Chávez-García y Montalva 2014)

3.2.1. Automatización de HVSR

La técnica de la razón espectral H/V originalmente planteada por Nakamura para analizar las ondas Rayleigh en los registros de microtemblores, ha sido ampliamente analizada para estimar funciones de transferencia empírica en registros acelerográficos; con la precaución inherente en su aplicación. Lo anterior, debido a que dichos registros presentan una mezcla de ondas de cuerpo y superficial a lo largo de toda su forma de onda; y no se podría llegar a tener control de una posible y no deseada amplificación en las componentes verticales de las ondas P o Rayleigh, lo cual obligaría a desplomar el supuesto de Nakamura y no poder utilizar esta técnica.

Es por ello, que en este apartado se detallará sobre la automatización de esta técnica de Nakamura para registros acelerográficos (HVSR); donde se abordaran y programaran los métodos más utilizados para considerar la información de la fase sísmica, que ayudarán a que las suposiciones de la técnica de Nakamura se sigan cumpliendo

Actualmente, estos métodos abarcan el análisis por ventanas en la forma de onda del registro acelerográfico, específicamente de la **parte intensa de las ondas S directa** (Lermo y Chávez-García, 1993) y la **sección coda**, la cual se atribuiría al final del registro, semejante a un escenario de ruido ambiental. (Margheriti, L. et al 1994). En la figura 20, se puede apreciar estas ventanas para realizar el análisis de HVSR.



Respecto a la utilización de la ventana de la onda S directa, acá se supone que se encontrarán en mayor medida ondas de cuerpo S y en menor medida ondas superficiales Rayleigh; descartando la injerencia de las ondas de cuerpo P, y la posibilidad de que dado un incremento de contraste de impedancias de dichas ondas P, puedan llegar a amplificar las componentes verticales de las ondas Rayleigh; y se desplome el supuesto de Nakamura. De igual manera, se garantiza que al utilizar en su mayoría las ondas S, **estas estarán contenidas en los componentes horizontales**, ofreciendo una mejor estimación en las amplificaciones locales.

Respecto a la utilización de la ventana de la CODA, se busca representar un escenario de medición de ruido ambiental o microtremores; donde exista un análisis explícito en la remoción del efecto de las ondas Rayleigh.

En ambos casos de selección de ventanas típicas, un escenario ideal, se buscaría remover por completo el modo de elipticidad de las ondas superficiales Rayleigh (su atrapamiento); para así garantizar que el valor de amplificación relativa sea confiable. Por otro lado, a pesar que esto no se consiga alcanzar, **las frecuencias predominantes siempre se lograran identificar** al realizar los cocientes espectrales H/V.

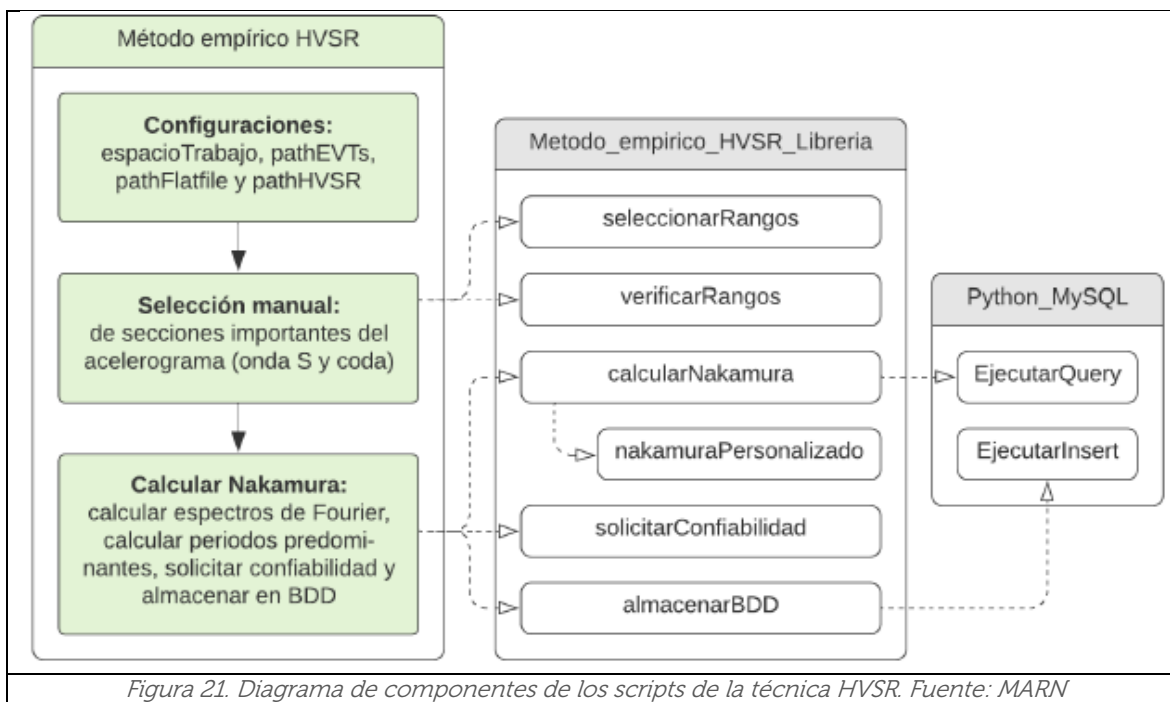
La automatización, al igual que la técnica SSR (explicada en el apartado 3.1.1) se ha realizado a través de códigos escritos en lenguaje Python, la utilización de algunas herramientas del *Strong Motion Toolkit* de GEM y mediante la conexión a la plataforma web de registros acelerográficos de El Salvador (RADES).

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los temas controversiales respecto al uso del HSVR (tanto en el ruido sísmico como en registros acelerográficos) para estimar el efecto de sitio, radica en la confiabilidad de los resultados; los cuales se asocian a la determinación de las frecuencias predominantes y las amplificaciones relativas; ambos extraídos de las funciones de transferencia resultantes.

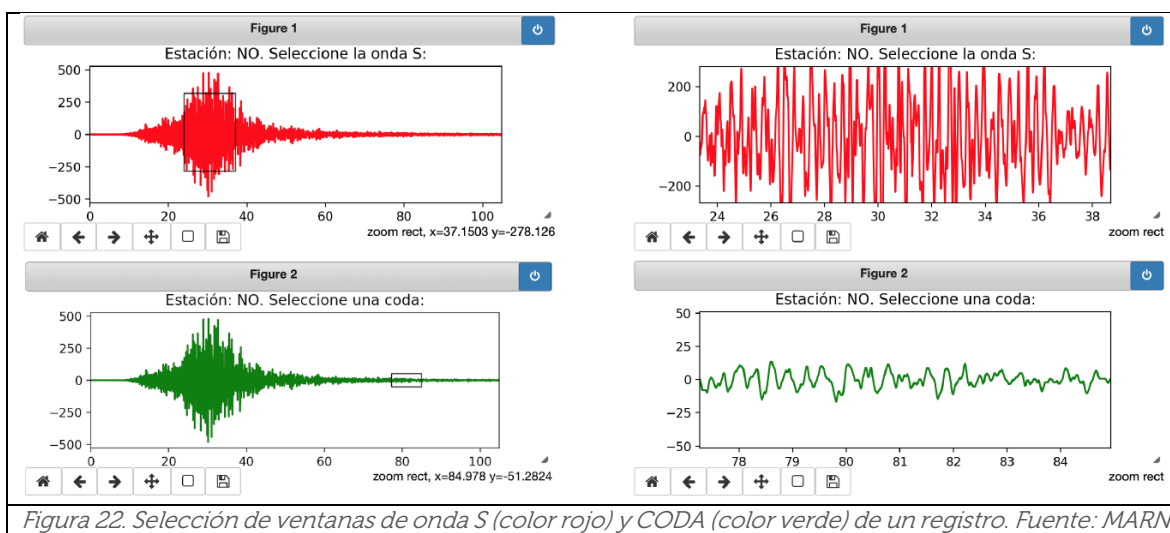
Básicamente, e independientemente se garantice la remoción completa relativa del efecto de las ondas Rayleigh, las frecuencias predominantes siempre son identificadas; por lo que este será nuestro objetivo en esta automatización; dejando de lado (por practicidad) de utilizar las amplificaciones relativas para poder derivar funciones de amplificación más adelante. No obstante, siempre se guardaran esos valores de amplificación en las bases de datos, para futuros análisis.

De igual forma como se hizo en la técnica de SSR, se harán uso de ventanas frecuenciales; tanto para extraer diferentes modos predominantes que se pudiesen activar, como con el fin de validar la confiabilidad del resultado. En la figura 21, se observa un diagrama de componentes que integrará al script de esta técnica; donde la parte de selección de las ventanas de la forma de onda del acelerograma (sección de parte intensa: onda S y sección de la CODA) se asocian al paso de "Selección manual" y el cálculo de las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas, al paso de "Calcular Nakamura"

A continuación, se mostrará el procedimiento realizado para un evento sísmico y estaciones acelerográficas particulares. Este evento será el sismo de subducción intraplaca del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7), donde en total se poseen 28 registros acelerográficos en superficie con importantes niveles de aceleración, y posibles evidencias de no linealidad del suelo asociada a cambios de periodos fundamentales



1. Se realiza una selección manual de las ventanas para la onda S y de la CODA de cada registro acelerográfico. Dado que cada registro posee 3 componentes, y para asegurar que la ventana sea similar en todos los casos, únicamente se seleccionará la ventana para una sola componente horizontal. En la figura 22, se puede apreciar esta aplicación para la estación de Santiago Nonualco (NO). En la parte izquierda de dicha figura se muestran las formas de ondas completas, donde para cada caso, se visualiza una sección en recuadro negro, la cual es dibujada por el usuario dentro del código; por otro lado, en la parte derecha de la figura se observan dichas secciones o ventanas amplificadas. Cabe mencionar, que no se podrán procesar ventanas que contengan menos de 512 datos



- Se muestra en una sola gráfica las 3 componentes de cada sección a procesar. Cada gráfica se almacena en formato de imagen. En la figura 23 se observa dicho proceso para la misma estación de Santiago Nonualco (NO); donde en azul se muestra la forma de onda completa, en rojo la ventana de las ondas S y en verde la sección correspondiente a la CODA. En el eje de las abscisas se puede observar el rango de tiempo donde la forma de onda fue cortada.

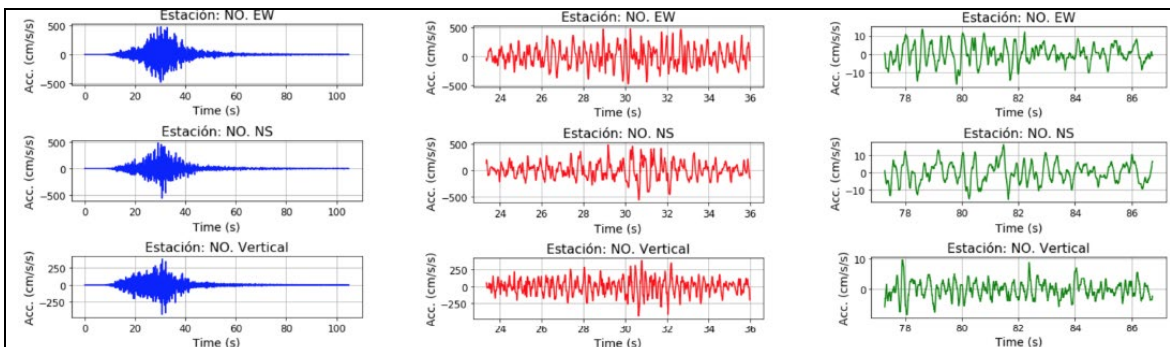


Figura 23. Detalle de las tres componentes para cada sección seleccionada Fuente: MARN

- Una vez teniendo los cortes de las ventanas necesarias, se determina la amplitud de espectros de Fourier (FAS) de la aceleración de los componentes horizontales y verticales de cada una de las tres secciones. A manera de comparación, también se efectuará el procedimiento para la forma de onda completa. En la figura 24, se observa este proceso. A la izquierda corresponde a la FAS de toda la onda, al centro la FAS de la onda S y a la derecha la FAS de la CODA.

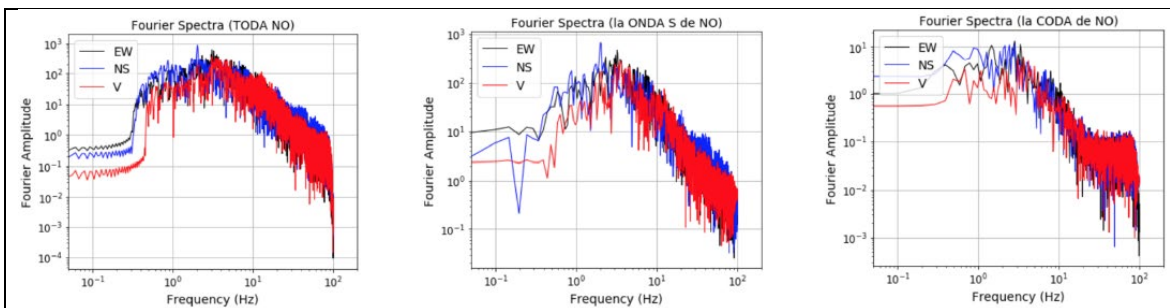


Figura 24. Espectros de Fourier de la aceleración de cada componente para cada sección. Fuente: MARN

- Se procede a determinar los cocientes espectrales de entre la FAS de la media geométrica de las componentes horizontales con la FAS del componente vertical. En las figura 25 y 26 se observan estos resultados en el dominio del tiempo; para las estaciones de Santiago Nonualco y Panchimalco, respectivamente. En las gráficas obtenidas es posible identificar varios períodos predominantes, separadas en las distintas ventanas frecuenciales (mencionadas anteriormente y utilizadas también en la técnica de SSR). Los períodos predominantes se destacan con líneas verticales punteadas de color rojo.

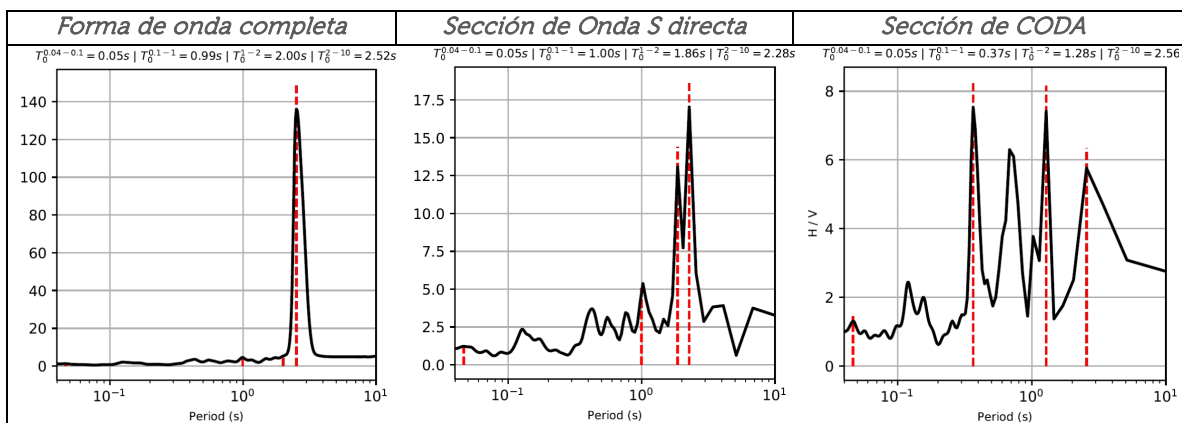


Figura 25. Estimación de períodos predominantes utilizando HVSR en las 4 ventanas frecuenciales, para la estación de Santiago Nonualco, durante el evento del 13 de enero de 2001. Fuente: MARN

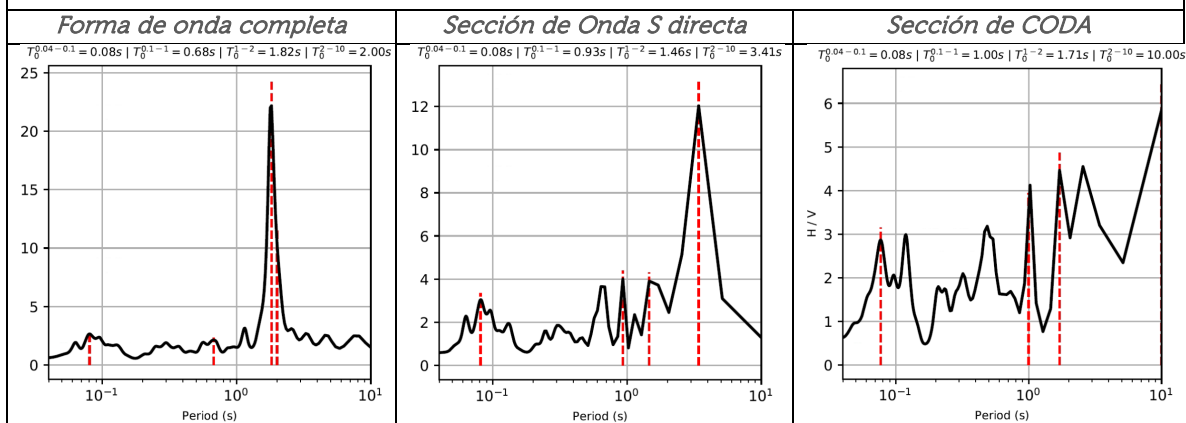


Figura 26. Estimación de períodos predominantes utilizando HVSR en las 4 ventanas frecuenciales, para la estación de Unidad de Salud Panchimalco, durante el evento del 13 de enero de 2001. Fuente: MARN

5. A continuación, se compactan los datos calculados en una sola tabla resumen que contiene ambas coordenadas de cada pico, tanto el periodo como su valor de amplificación relativa (H/V); esto para cada ventana de periodos y por cada sección procesada (toda la forma de onda, onda S y coda). En la figura 27 se observan dichos resultados para la estación de Santiago Nonualco.

Periodos	Todo	Onda S	Coda
2s - 10s	Per = 2.521s H/V = 136.047	Per = 2.276s H/V = 17.035	Per = 2.56s H/V = 5.758
1s - 2s	Per = 2.0s H/V = 5.264	Per = 1.862s H/V = 13.079	Per = 1.28s H/V = 7.414
0.1s - 1s	Per = 0.993s H/V = 4.556	Per = 1.0s H/V = 4.776	Per = 0.366s H/V = 7.534
0.04s-0.1s	Per = 0.046s H/V = 1.302	Per = 0.047s H/V = 1.225	Per = 0.047s H/V = 1.308

Figura 27. Tabla resumen de períodos predominantes y valores de la amplificación relativa (H/V) para la estación de Santiago Nonualco. Fuente: MARN

6. Al igual que en la técnica de SSR, Antes de almacenar estos datos en la base de datos MySQL, se solicita al usuario su estimación de la confiabilidad de cada uno de los períodos predominantes; el usuario debe digitar el número uno si considera que dicho periodo es confiable, caso contrario debe de digitar el número cero. La Figura 28 muestra algunos registros almacenados en la base de datos MySQL.

--- Para la estación: NO --- ONDA S --- ¿Considera los valores del periodo 0.04s-0.1s confiables? (1=SI, 0=NO) 0 ¿Considera los valores del periodo 0.1s - 1s confiables? (1=SI, 0=NO) 0 ¿Considera los valores del periodo 1s - 2s confiables? (1=SI, 0=NO) 0 ¿Considera los valores del periodo 2s - 10s confiables? (1=SI, 0=NO) 0														
id	id_reg_acc	tipo	per_004_01	hv_004_01	con_004_01	per_01_1	hv_01_1	con_01_1	per_1_2	hv_1_2	con_1_2	per_2_10	hv_2_10	con_2_10
10	6976	todo	0.046	1.302	1	0.993	4.556	1	2.000	5.264	1	2.521	136.047	1
11	6976	ondaS	0.046	1.380	0	0.975	5.022	0	1.862	5.398	0	2.276	4.869	0
12	6976	coda	0.100	1.636	1	0.731	6.513	0	1.280	3.084	1	2.560	5.917	0
13	6980	todo	0.076	2.227	1	1.000	3.641	1	1.655	2031.679	1	2.074	1310.757	1
14	6980	ondaS	0.080	2.322	0	1.000	6.767	0	1.463	33.859	0	2.000	11.699	0
15	6980	coda	0.100	1.689	1	0.602	6.401	0	2.000	34.665	1	2.560	90.471	0
16	6977	todo	0.081	2.658	1	0.677	2.138	0	1.820	22.175	1	2.000	10.475	0
17	6977	ondaS	0.081	3.119	1	0.931	4.959	1	1.707	17.588	1	5.120	26.455	1
18	6977	coda	0.074	2.494	0	0.731	2.478	0	1.138	3.418	0	10.000	3.043	0
19	6976	todo	0.046	1.302	0	0.993	4.556	0	2.000	5.264	0	2.521	136.047	0
20	6976	ondaS	0.047	1.225	0	1.000	4.776	0	1.862	13.079	0	2.276	17.035	0
21	6976	coda	0.047	1.308	1	0.366	7.534	1	1.280	7.414	1	2.560	5.758	1

Figura 28. Ejemplo de registro en base de datos de Períodos predominantes por HVSR. Fuente: MARN

3.3. Técnica de Selección óptima de Modelos de Atenuación – Metodología Shakemap

Esta técnica es considerada como una alternativa práctica en virtud de poder utilizar análisis estadísticos y probabilísticos que permitan la búsqueda en la reducción de los residuales que existen entre una observación real de movimiento fuerte con la de una predicción en determinado lugar, así como la reducción de las incertezas aleatorias inherentes a los modelos de atenuación, a partir de un modelo empírico de atenuación (GMPEs); para cada uno de los períodos estructurales de interés.

Con esta técnica se busca identificar para cada medida de intensidad (MeIn: PGA, SA) correspondiente a períodos estructurales, diferentes modelos de atenuación que optimicen la reducción entre el dato real y el predicho por la GMPE. De tal modo, que una vez identificados los modelos para cada una de las medidas, se realice una nueva evaluación de la misma ecuación para una condición de suelo firme; es decir, que en el factor de sitio que contenga el modelo se coloque un valor de Vs30 equivalente a 760 m/s. Cabe aclarar, que algunas GMPEs no poseen dicho factor de sitio, sin embargo, en las nuevas GMPEs, especialmente en las de la Nueva Generación (NGA), prácticamente todas presentan una consideración de amplificación. Por lo tanto, una vez evaluada la ecuación de predicción o GMPE para una condición de suelo firme; se pretende extraer ese valor de aceleración (asumiendo que se ha registrado en el suelo firme o roca).

Con este valor obtenido “hipotéticamente” registrado en roca (al realizar esta deconvolución empírica) se procede a estimar una función de transferencia empírica, determinada con el cociente entre el valor del registro real observado en superficie con el registro en roca (recién obtenido). Con esta función de transferencia se podrían obtener factores de amplificación directos que pudiesen combinarse con aquellos obtenidos en el otro trabajo, mediante el uso de modelos analíticos.

Cabe mencionar, que se está partiendo de la hipótesis de que el modelo de atenuación presentaría un ajuste óptimo para los valores de aceleración en superficie, sin embargo, en la realidad no casi siempre es así, debido a otras consideraciones, tales como el resultado de un efecto de sitio muy considerable que con dicho factor de Vs30 no se logre capturar esta amplificación o deamplificación; por otro lado, también efectos de directividad ocurridos durante el evento sísmico, produciendo modificaciones en las componentes de período largo y por lo tanto, obteniéndose ajustes pobres.

Para contrarrestar estos impases, se realizará una modificación al factor de amplificación. Este proceso radica en primero obtener la diferencia existente entre el valor real y predicho (por la GMPE) a nivel de superficie, a través del cociente entre ellos. Ese factor me indicará el residual existente en la predicción. Luego se obtiene el valor predicho deconvolucionado en roca (al colocar un Vs30 de 760 m/s), y se multiplica por el factor del residual calculado recientemente.

Este nuevo valor factorizado se convertiría en el denominador de la relación para calcular el factor de amplificación en el sitio (Fa); es decir, el cociente entre el valor observado real en superficie y el valor factorizado esperado registrado en roca. En la siguiente ecuación, se muestra dichos cálculo:

$$Fa = \frac{\text{Observado}_{superficie}}{\text{Predicho (GMPE)}_{roca} \times \left(\frac{\text{Observado}_{superficie}}{\text{Predicho (GMPE)}_{superficie}} \right)}$$

Más allá del cálculo del factor de amplificación, existen dos aspectos esenciales que hay que considerar con anterioridad para el desarrollo de esta técnica.

El primero se refiere a aplicar un criterio de exclusión (al igual que se hace en el estudios de amenaza sísmica) para rechazar modelos que tienen propiedades desfavorables; y que no se adecúen específicamente para las tres zonas con mayor influencia sísmica en El Salvador, las cuales son la: cortical, subducción interfase e intraplaca.

El segundo está relacionado precisamente a la predicción de la GMPE en superficie, lo cual estaría asociado al valor de Vs30 que se utilice en el emplazamiento de la estación acelerográfica en análisis. Para ello, se hará uso de un mapa de Vs30 de El Salvador, construido a través de la búsqueda y recopilación de información relacionada

principalmente en valores de velocidad de corte medidos directamente en pozos de perforación (realizadas por MARN, MOP, OPAMSS, CEL y empresas privadas), acompañada de información geológica en profundidad, estudios de microtrepidación, información litológica en superficie (afloramientos) en algunos sectores a nivel nacional suministrada por geólogos que han trabajado para la caracterización vulcanológica del país, y otros estudios de investigación afines a este mismo tema. Más adelante, se hablará con mayor detalle sobre este mapa.

Con esta inicial y breve descripción de la técnica, junto a sus aspectos esenciales a ser considerados, se procede a explicar más sobre su concepción y la teoría que está detrás de esta minimización de residuales. Cabe mencionar, **que esta técnica hace uso de las herramientas del *Strong Motion Toolkit* (SMTK) desarrolladas por expertos científicos del Global Earthquake Model (GEM)**, y que a todas luces se identifica que tienen relación muy estrecha con la filosofía empleada por el software ShakeMap desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (sus siglas en inglés, USGS).

A continuación, se hablará sobre los conceptos del software ShakeMap, para tener un concepto global de la terminología empleada en este documento y luego sobre las incertidumbres que deben ser consideradas al momento de utilizar los modelos GMPEs para la predicción del movimiento fuerte. Seguidamente se explicará la metodología con mayor detalle y el proceso para obtener las funciones de transferencia empíricas.

3.3.1. Teoría sobre ShakeMap

Prácticamente, con esta técnica se pretende reducir en lo mayor posible los residuales existentes en las ecuaciones de las GMPEs, siguiendo un poco la filosofía estipulada en la versión 3.5 del software ShakeMap. Actualmente, ya se tiene la versión 4 de este software, el cual posee cuantiosas mejoras en lo que respecta a la generación de mapas de intensidad sísmica y utilización de diferentes modelos de atenuación (GMPEs).

El software ShakeMap nace como un sistema integral para caracterizar rápidamente la extensión y distribución de la intensidad del movimiento fuerte del terreno después de un sismo fuerte. Tal como lo dicen los expertos, esta información es fundamental para medir la extensión de las áreas afectadas, determinar qué zonas son potencialmente más afectadas, permitir la estimación rápida de las pérdidas y destinar posibles equipos de ayuda a dichas áreas con mayor intensidad sísmica.

La versión 3.5 del ShakeMap tuvo su apogeo entre (2014-2018) y ha funcionado como una de las aplicaciones pilares de cualquier centro sismológico. Dada su configuración, presentaba muchas virtudes pero a su vez, diversas desventajas que hacían que limitara su aplicación en países con distintos ambientes tectónicos que los de Estados Unidos. Estas limitaciones radicaban tanto en el lenguaje de programación en el que fue

codificado (Perl) y los pocos modelos de atenuación que existían escritos en ese lenguaje; que si bien existían para fuentes sísmicas respectivas, sin embargo, se obligaba a utilizar siempre los mismos modelos, independientemente si los residuales encontrados en la predicción eran muy grandes.

Este impase era absorbido mediante la consideración de un proceso llamado: “ajuste de la variabilidad inter-evento”, el cual consistía en la práctica iterativa de minimización de una función de penalización. Esta función era propiamente el valor de la magnitud del sismo, la cual aumentaba o disminuía, respecto a la consecución de minimizar lo más posible el desajuste entre las observaciones y las predicciones con GMPes, centrándose solo en eliminar la incertidumbre entre eventos (inter-evento o *between-event*, en inglés), y que finalmente llevaba a calcular un valor llamado “Bias-Term, o Término de Sesgo”. Más adelante, se abordará el tema de las incertidumbres con mayor detalle.

Otra desventaja que es bien marcada en esta versión 3.5 del ShakeMap, es respecto a la limitación en proporcionar información del movimiento del suelo, solo para 5 medidas de intensidad (MeIn) específicas, tanto en el lugar de registro (valor real) como en las predicciones en otros sitios de interés (valor predicho).

Estas (MeIn) son las siguientes: MI, PGA, PGV, SA (0.3s), SA (1.0s) y SA (3.0s); donde MI es la intensidad macrosísmica, PGA es la aceleración máxima del terreno, PGV es la velocidad máxima del terreno, SA son las aceleraciones espectrales en períodos estructurales específicos. No obstante, en ocasiones y para diferentes propósitos estructurales es necesario estimar otras medidas para ubicaciones y períodos espectrales adicionales.

Cabe mencionar, que dentro del marco de aplicación de nuestra técnica de ajuste óptimo de los GMPes, nos centraremos a obtener las (MeIn) directamente a partir de las ecuaciones de predicción; y **solamente sobre el sitio donde se emplaza la estación acelerográfica**, donde se piensa obtener una función de transferencia empírica. Lógicamente, en ciertos casos cuando no se han evaluado coeficientes específicos para un período estructural, las mismas herramientas SMTK permiten realizar interpolaciones que permitirían obtener las (MeIn) específicas.

Con esta acción, se diferenciaría de la concepción establecida en la nueva actualización del software ShakeMap en su versión 4.0; donde a sabiendas que es una herramienta que busca emitir información temprana de intensidad, tanto en el punto de observación como en otros puntos del territorio, solo cuenta (en un archivo automatizado) con las (MeIn) observadas siguientes: MI, PGA, PGV, SA (0.3s), SA (1.0s) y SA (3.0s); por lo que no se calculan las otras deseadas. Es por ello que en ShakeMap 4.0 se logran estimar las medidas (MeIn) adicionales en el sitio de registro (no con las ecuaciones de GMPes), sino que con otro artificio innovador. Antes de explicar dicho artificio, es importante conocer

que el ShakeMap 4.0 se basa en el argumento que existen estudios empíricos que han demostrado que:

- a) Las medidas de intensidad (MeIn) del movimiento de suelo están correlacionados espacialmente, y
- b) Diferentes (MeIn) también están correlacionadas entre sí en la misma ubicación.
- c) Los logaritmos de las (MeIn) están distribuidos normalmente condicionados a parámetros de ruptura como la magnitud y la distancia (Jayaram y Baker, 2008).

Por lo tanto, estas características permiten aplicar una distribución estadística llamada: Normal multivariante condicional (MVN), donde las (MeIn) observadas en los sitios de interés, podrían ser determinadas en otros sitios, mediante el uso de un proceso de interpolación, aprovechando la correlación espacial existente [Worden, et al., 2018]

Sin embargo, una vez resuelto el problema de estimar (MeIn) reportadas en otras partes geográficas, la nueva pregunta sería: ¿cómo se resolvería el asunto de querer estimar, tanto en el mismo sitio de observación como en otros, diferentes tipos de (MeIn) que no han sido observados?; la respuesta nos lleva al artificio mencionado anteriormente, el cual se trata del uso de la técnica innovadora del profesor Jack W. Baker de la Universidad de Stanford, de Estados Unidos, llamada: Espectros Medios Condicionales (CMS, sus siglas en inglés).

Esta técnica desarrollada en el año 2011, proporciona una predicción más realista y menos conservadora de la respuesta del sistema ante un sismo [Baker, J. W., 2011]. Por tanto, el CMS se ajusta a una aceleración espectral condicionada a dicho período de interés, determinando los valores de otros períodos a través de factores de correlación. Estos factores de correlación indican cómo se relacionan en distintos periodos las diferencias entre los valores dados por un modelo de atenuación (GMPE), junto a su incerteza y el espectro de respuesta de aceleración de cada registro [López, I. A., 2016].

En definitiva, el CMS sostiene que la aceleración espectral para un periodo de interés estará mucho más relacionada (será parecida) con las aceleraciones espectrales de períodos cercanos a ella, y que dicha relación o semejanza de valores decae a medida que se aleja el par de valores de periodo que se están comparando [Carlton y Abrahamson, 2014].

Finalmente, como aclaración en esta versión de nuestra técnica de ajuste óptimo se prescindirá del uso del CMS para estimar las (MeIn) deseados; ya que en este caso, si se tiene tiempo suficiente para poder determinar, a través de las GMPEs y respectivas interpolaciones, las (MeIn) deseadas.

A continuación, se explicará con detalle las incertidumbres aleatorias, las cuales se encuentran asociadas a la variabilidad intrínseca que existe en los modelos de atenuación o ecuaciones de predicción (GMPEs).

3.3.2. Teoría de variabilidad de GMPEs

Es claro que cada una las GMPEs presentan una variabilidad (conocida como sigma: σ), la cual es comúnmente interpretada como variabilidad aleatoria (dispersión atribuida a la naturaleza aleatoria y complicada de los procesos físicos de generación y propagación de ondas sísmicas en el interior de la tierra). No obstante, otros estudios sugieren que esa interpretación puede mejorarse y considerar que una fracción de la variabilidad total puede atribuirse a una incerteza epistémica (incertidumbre que se puede resolver con la cantidad adecuada de conocimiento y datos) [Ktenidou, et al., 2018]

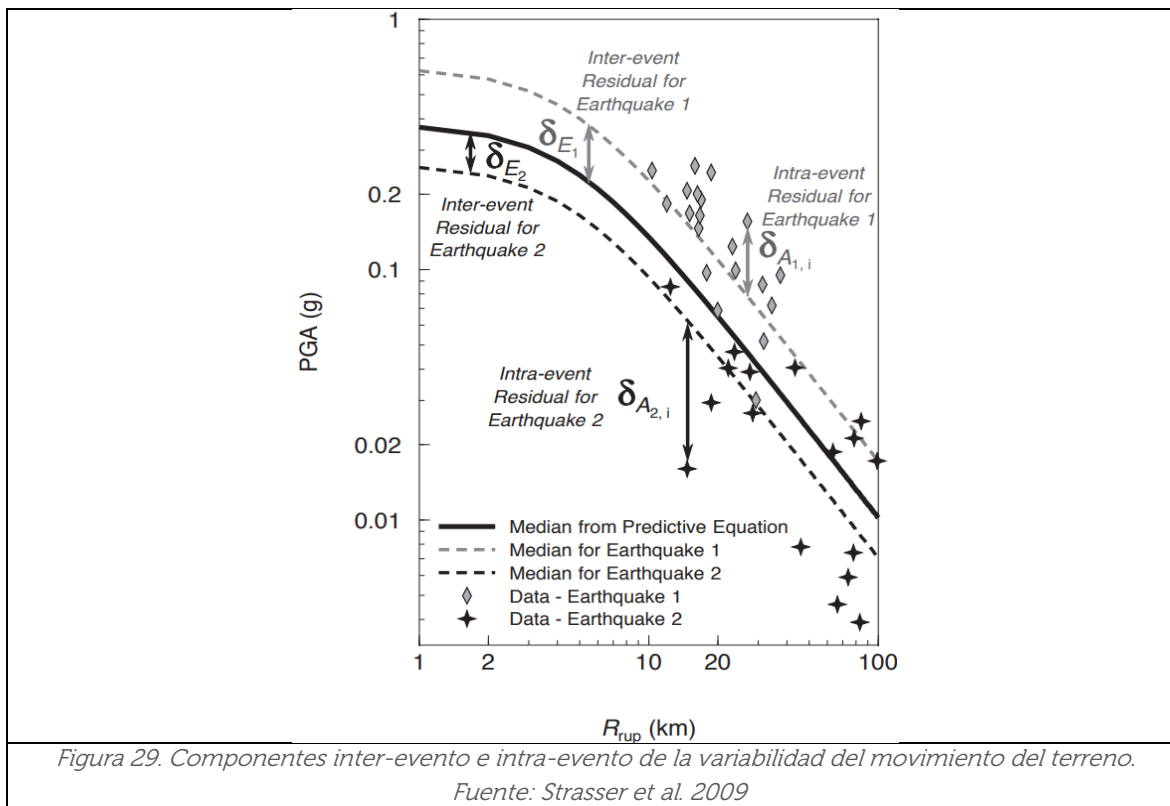
Lo anterior, es debido a que parte de la variabilidad en el movimiento del terreno es debido al trayecto y efectos de sitio (no solo por la fuente), la cual puede verse repetida en terremotos subsecuentes. Por lo que identificando y cuantificando esta fracción epistémica podría ayudar a disminuir los valores de variabilidad o sigma, tanto para derivar productos de amenaza sísmica como estimaciones empíricas del efecto de sitio.

Como se mencionó anteriormente, esta consideración epistémica ya se ve reflejada en el código de ShakeMap V 4.0, de una manera análoga a los análisis de peligrosidad sísmica probabilística donde se construyen diversas ramas de diferentes GMPEs ponderadas sobre árboles lógicos.

En este documento se enfocará en explicar únicamente la variabilidad aleatoria, tanto su derivación y los elementos que la componen. Cabe aclarar, que el asumir que la variabilidad del movimiento fuerte del terreno en un sitio en particular es igual que la desviación estándar (σ) de la GMPE, nos apegamos a seguir una hipótesis ergódica [Ktenidou, et al., 2018]; la cual estipula que a falta de datos en el tiempo es compensado con datos en el espacio, y que la variabilidad temporal y espacial de las propiedades (en este caso el movimiento del terreno) son consideradas iguales.

Aunado a lo anterior, los GMPE rara vez están limitados por datos de un sitio específico, a una falla o incluso a una región, porque generalmente se construyen sobre la base de más conjuntos globales de datos de regiones de **características sismotectónicas similares** (o no tan similares). Por lo anterior, en esta técnica de selección óptima de GMPEs se realizará teniendo el cuidado de seleccionar los ambientes tectónicos correspondientes a la naturaleza del registro acelerográfico. Sin embargo, a pesar de ello, y por el incremento de más datos de movimiento fuerte y más GMPEs a nivel mundial, se ha podido demostrar que la desviación estándar (σ) en un sitio específico es mucho menor que la variabilidad de la GMPE global.

Por tal sentido, la comunidad científica ha necesitado de dividir esta variabilidad aleatoria o sigma en dos componentes. De tal modo, es que se conocen la variabilidad inter-evento (o "between-event") e intra-evento (o "within event"). En la figura 29 se observa una representación de lo que significa cada una de estas incertezas [Strasser et al., 2009].

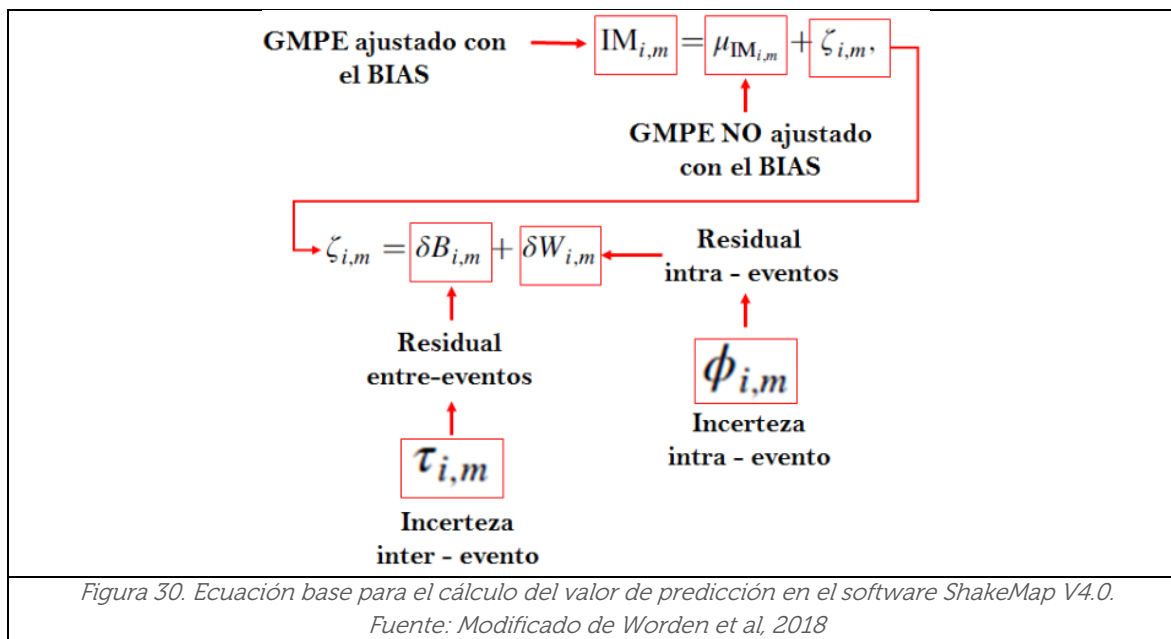


La variabilidad inter-evento "between-event" se observa en eventos de la misma magnitud y estilo de fallamiento y se atribuye a las diferencias en el proceso de ruptura de la fuente, como diferentes caídas de esfuerzos, velocidad de ruptura, velocidad de deslizamiento, etc.

La variabilidad intra-evento "within-event" es prácticamente la variabilidad espacial observada durante un evento específico entre sitios a la misma distancia de la fuente. Este último componente de (σ) se atribuye a fenómenos relacionados con la estructura geológica profunda y las características geotécnicas de los sitios, como la amplificación del movimiento del suelo, la atenuación cerca de la superficie, los efectos de propagación y la respuesta no lineal del sitio.

Estas variabilidades se asocian matemáticamente en Residuales. Por lo general, se supone que los residuales inter e intra eventos no están correlacionados y, por lo tanto, la desviación estándar total se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertezas o desviación estándar inter e intra evento, comúnmente conocida como tau (τ) y phi (ϕ), respectivamente.

Para ejemplificar mejor estas incertezas del movimiento del terreno, en la figura 30, se muestra un resumen de las ecuaciones donde se emplean estas incertezas. Acá se considera al residual Inter-evento como el término BIAS o sesgo, el cual para puntos con observación se presenta con una media de cero y una desviación estándar: tau (τ). De igual manera se considera para los residuales intra-evento. Para mayor información consultar [Worden et al., 2018].



3.3.3. Criterios de exclusión de GMPEs

Como se ha enfatizado anteriormente, esta técnica hace uso de las herramientas del *Strong Motion Toolkit* (SMTK) desarrolladas por expertos científicos del Global Earthquake Model (GEM).

Una de las ventajas que ofrece este conjunto de herramientas (SMTK), es que se puede tener acceso a una librería grande de ecuaciones de predicción (GMPE) recientes, las cuales han sido desarrolladas alrededor del mundo, para fuentes sísmicas específicas. Este catálogo de modelos es integrado por el Global Earthquake Model (GEM) en su motor de amenaza sísmica llamado "OpenQuake", el cual se encuentra muy bien referenciado bibliográficamente, con los artículos de los autores de dichas GMPEs.

Es importante mencionar, que cada uno de estos modelos posee sus propias características relacionadas a sus magnitudes, estilos de fallamiento, efecto de sitio y distancias máximas asociadas. Éstas últimas, puede variar su tipo, ya que pueden ser desde distancias sencillas (como las epicentrales e hipocentrales) como distancias medidas hasta áreas de ruptura determinadas para ciertos eventos (como lo son la distancia de Ruptura y Joyner & Boore).

Sin embargo, como se decía anteriormente, para mantener una congruencia con la selección de los GMPEs, se debe llevar a cabo un proceso de exclusión de modelos, que presentan en su concepción propiedades desfavorables que se alejen de la realidad tectónica de nuestro país.

Por lo general, esto se hace antes de las comparaciones de datos observados con las predicciones de los modelos, con el fin que los GMPE inadecuados no se consideren en análisis posteriores. Los criterios de exclusión comúnmente utilizados se describen en Cotton et al. (2006), quien propuso siete criterios de exclusión, y Bommer et al. (2010), quien revisó y amplió la lista y propuso diez criterios. El resumen de las propiedades de GMPE en <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.html> es muy útil para este proceso.

A continuación en la tabla 1, se presentan los criterios de exclusión de Cotton et al. (2006); los cuales fueron aplicados al listado de todas las GMPEs aplicadas a cada una de las fuentes sísmicas, disponibles en la librería de GEM – OpenQuake.

Tabla 1. Siete criterios de exclusión de GMPEs

No.	Criterios
1	El modelo es claramente de un régimen tectónico irrelevante
2	El modelo no está publicado en una revista internacional revisada por el PEER (Pacific Earthquake Engineering Research)
3	La documentación del modelo y su conjunto de datos subyacente es insuficiente.
4	El modelo ha sido reemplazado por publicaciones más recientes
5	El rango de frecuencia del modelo no es apropiado para aplicaciones de ingeniería.
6	El modelo tiene una forma funcional inadecuada
7	El método de regresión o los coeficientes de regresión se consideran inapropiados

Dentro de la librería de OpenQuake de GEM, se contabilizaron un total de 206 GMPEs asociadas al ambiente tectónico cortical, 45 a la subducción interfase y 100 a la subducción intraplaca. Al aplicar este criterio, resultaron un total de 136 GMPEs para la sismicidad cortical, 35 para subducción interfase y 80 para intraplaca.

Una vez hecha esta preselección, se tratará de no excluir ningún modelo, más que todo debido a la ausencia de parámetros focales y distancias específicas para resolver la ecuación de dichos modelos, durante la conformación de los archivos planos (*Flatfiles*) donde se condensará toda la información del terremoto y su asociación con los registros acelerográficos.

Por lo que, para solventar ese impase, dentro de los códigos a implementar con la técnica, se estimarán áreas de ruptura típicas para zonas corticales, de subducción (intraplaca e interfase) y sus estilos de fallamiento comunes y basándose en ecuaciones de escala respecto a su magnitud (como la de Wells & Coppersmith 1984 para sismos

superficiales). Acompañando a lo anterior, otra ventaja de estas herramientas, es que el proceso de estimación de áreas de ruptura y sus respectivas distancias, las calcula automáticamente; a través siempre de las librerías de OpenQuake, enfocado a la determinación de peligrosidad sísmica en un sitio determinado.

Finalmente, será este pool de GMPEs extraídas, las que se utilizarán para aplicar la técnica de ajuste óptimo. Cabe mencionar, que dentro del desarrollo de la técnica se buscará analizar la sensibilidad en la utilización de GMPEs que únicamente soportan distancias particulares, como lo son la de ruptura (Rrup), Hipocentral (Rhypo) y Epicentral (Repi). Aquellas que no son suministradas directamente en el archivo plano (*Flatfile*), son calculadas en base a un mecanismo de ruptura hipotético asociado a la fuente sísmica que se esté evaluando.

3.3.4. Mapa de Vs30

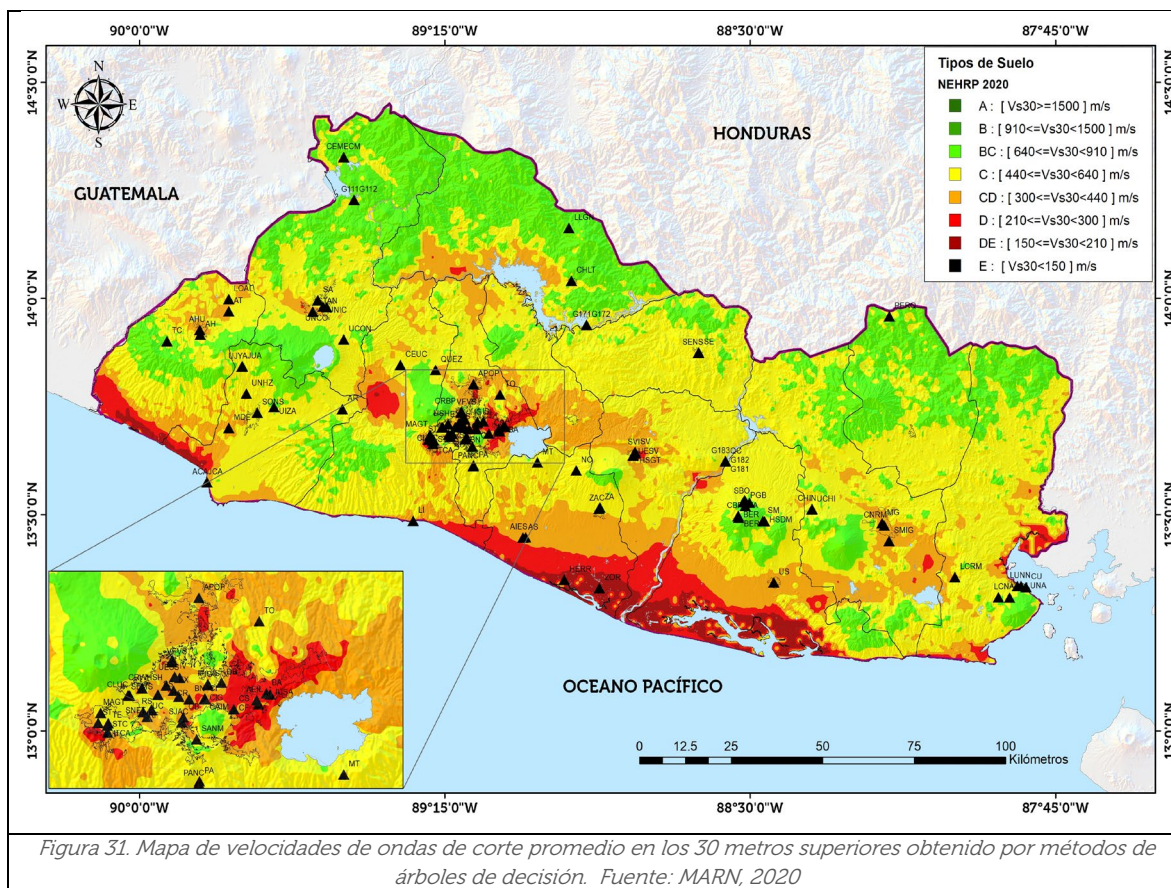
Respecto a la aproximación del tipo de suelo para cada estación acelerográfica, se ha obtenido mediante la utilización de un mapa de Vs30 de El Salvador.

Este mapa fue construido mediante la generación de modelos estadísticos espaciales que fueron configurados a través de la utilización de herramientas de aprendizaje supervisado (machine learning) manejando como variable objetivo el valor numérico de Vs30 (problema de regresión), o bien considerando variables categóricas como las clases de tipo de suelo, según la NEHRP 2020 (problema de clasificación). Se aplicaron las técnicas de los algoritmos de Random Forest con Predicción espacial (Rfsp) y la Técnica de redes de neuronas artificiales.

Mayor información se puede encontrar en el documento llamado "Generación de mapa de velocidades promedio a 30 metros de profundidad (Vs30) de El Salvador", desarrollado por investigadores del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales - MARN)

Finalmente, se obtuvo un mapa con una precisión del 70%, representando de manera óptima los valores de Vs30 sobre el territorio. Estos valores fueron traducidos de acuerdo a los rangos de velocidades establecidos en la clasificación de tipos de suelos según la NEHRP 2020. En la figura 31 se visualiza el mapa de Vs30 resultante.

Este mapa de Vs30 de El Salvador presenta una estimación robusta de los efectos de amplificación del suelo, convirtiéndose en una herramienta importante para propósitos de clasificación de tipos de suelo a nivel nacional. Se pretende que este mapa funcione como un diferenciador geográfico de tipos de suelo y que de manera general se logre agrupar geométricamente aquellos estratos de suelo que podrían tener un comportamiento homogéneo frente al paso y propagación de ondas sísmicas a lo largo de sus subunidades.



Tal como se observa en la figura 31, en base a las propiedades de los suelos, éstos pueden ser clasificados en los tipos de suelos A, B, BC, C, CD, D, DE, E o F, de acuerdo a la clasificación NEHRP 2020. Cabe destacar, que durante el proceso de recopilación de información y generación del mapa no se encontraron sitios íntegros con columnas de suelo clasificados como del tipo A y B. Por lo que, los productos de factores de amplificación fueron derivados a partir del tipo de suelo BC.

Es con esta información que se superpone la ubicación de las estaciones acelerográficas donde se tienen registros de las distintas fuentes (que se han instalado a través del tiempo, en total son 128 estaciones) y se extrae el dato de VS30 para luego ser colocado en el campo correspondiente en el flatfile, y que sea leído por la herramienta SMTK de GEM y se utilice en la selección de los GMPEs.

3.3.4.1. Análisis de Ranqueo

Las herramientas (SMTK) poseen diferentes métodos de ranqueo basados tanto en análisis de residuos como la consideración de la variabilidad aleatoria de la desviación estándar o errores nativos de cada modelo GMPE; con el objetivo de calcular la probabilidad de ocurrencia de los datos observados mediante el uso de una distribución de probabilidades de las GMPEs.

En fin, estas herramientas ayudan a no sólo explorar características particulares de los residuos de las GMPE evaluadas, sino también realizar un análisis cuantitativo del ajuste general de cada GMPE (desviaciones) con los datos observados de movimiento fuerte. Entre estos métodos de ranqueo se encuentra el llamado “Verosimilitud Logarítmica” (Log-likelihood [LLH], en inglés); y el método de la Distancia Euclidiana. Ambos, podrán ser utilizados dentro de la configuración de los códigos que formaran parte de nuestra técnica de ajuste de GMPEs.

Como se explicará más adelante, **los factores finales de amplificación que serán utilizados para que se concatenen con los que se han obtenido por métodos analíticos, serán aquellos derivados con el método de Verosimilitud logarítmica y aquellos que utilizan la distancia hipocentral en sus parámetros sísmicos.** A continuación, se detallarán los dos métodos de ranqueo.

3.3.4.2. Verosimilitud Logarítmica (LLH)

Este método fue propuesto por Scherbaum et al. (2009) llamado “Verosimilitud Logarítmica” (Log-likelihood [LLH], en inglés), el cual considera la probabilidad de que el valor absoluto de una muestra aleatoria de una distribución normalizada caiga dentro del intervalo entre el módulo de una observación particular y el infinito.

Aunado a lo anterior, este método ofrece la capacidad de ponderar cada uno de los modelos evaluados, lo cual ayudaría de gran manera en los análisis de incertidumbre epistémica como lo son las evaluaciones probabilísticas de amenaza sísmica. Esta ponderación es determinada mediante el cálculo de la verosimilitud logarítmica media de la muestra, **donde menor sea su valor, mayor será el peso que tendría una GMPE.**

3.3.4.3. Distancia Euclidiana

El segundo método a evaluar es el llamado “Ranqueo Basado en la Distancia Euclidiana” (EDR, en inglés), propuesto por Kale y Akkar, 2013, los cuales evaluaron **con más detenimiento el método LLH** propuesto Scherbaum e indicaron que **dicho método podría favorecer a modelos GMPEs que poseen valores de desviación estándar altas**, en gran parte debido al hecho de que registros (observaciones) atípicas son predichas con mayores probabilidades en tales modelos.

Tal como se menciona en el manual de OpenQuake, la Distancia Euclidiana Modificada (MDE, la probabilidad de ocurrencia total) como tal, no considera explícitamente el potencial en el valor medio del GMPE con respecto a las observaciones. Para cuantificar el nivel de sesgo en las predicciones de los valores medios se introduce un parámetro k , que es la relación de la distancia Euclidiana total entre los valores observados y los medios esperados del movimiento con respecto a la Distancia Euclidiana entre los valores esperados de movimiento y los valores observados, corregidos por un modelo predictivo derivado de una simple regresión lineal sobre los datos.

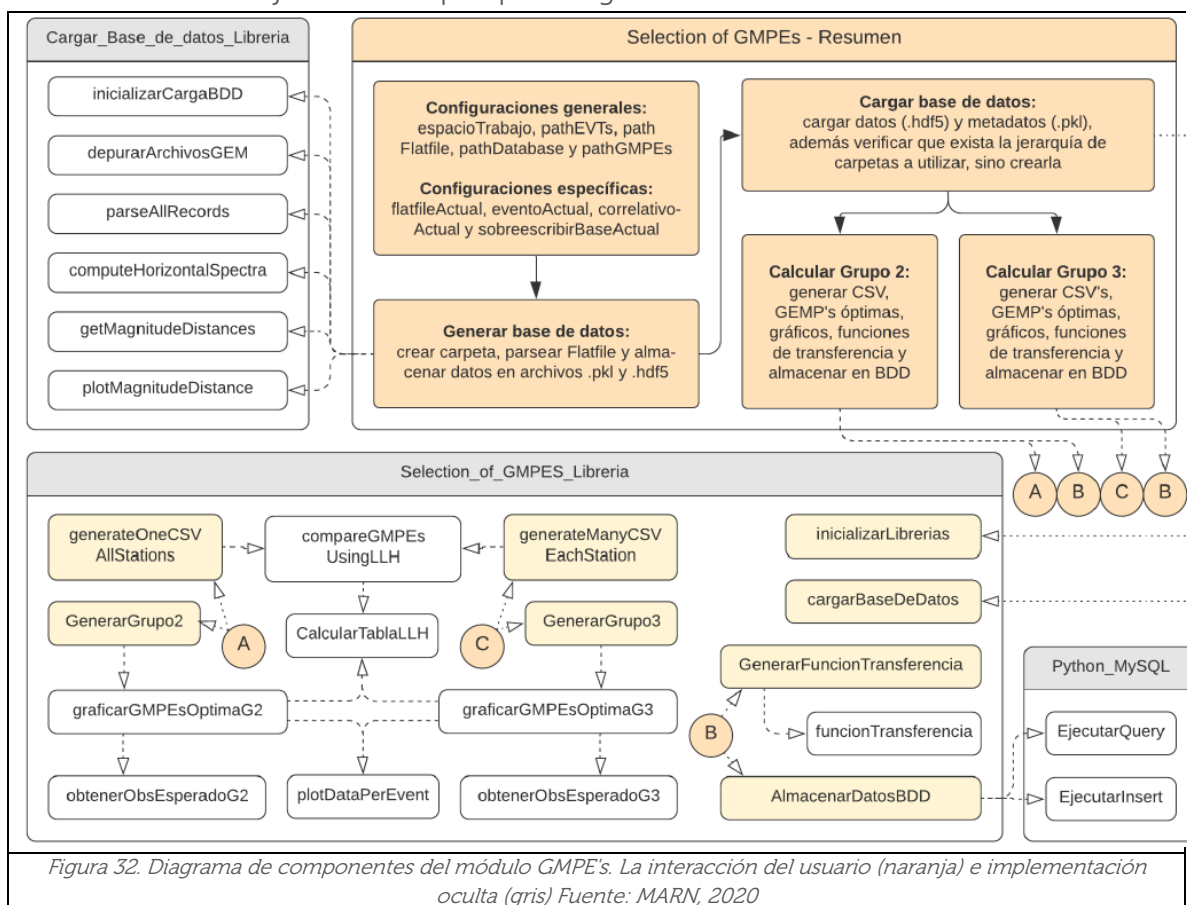
En definitiva, la suma de las Distancias Euclidianas modificadas representa la probabilidad general de las diferencias entre el movimiento observado y estimado en el suelo. En consecuencia, una suma más pequeña de los valores MDE indica una mejor representación del movimiento del suelo desde el modelo predictivo.

Para eliminar la dependencia del tamaño de la muestra, la suma de los valores de MDE se divide por el número de observaciones, para dar así la MDE media. Finalmente, para penalizar los modelos predictivos que muestran un mayor sesgo en las estimaciones medias, la media de MDE se multiplica por el parámetro k.; obteniendo el valor llamado EDR (*Euclidean Distance-Based Ranking*), el cual, como se dijo antes, el que resulte con menor valor, tendrá un mejor ajuste.

Este segundo paso, se realizará al igual que al anterior, para la intensidad de PGA; luego a medida se vaya depurando, se utilizarán los demás MeIns.

3.3.5. Automatización de técnica de ajuste óptimo

En este apartado se presenta la sistematización automática de la técnica de ajuste óptimo de modelos de atenuación. En la figura 32, se observa un diagrama de componentes que conformaran el conjunto de scripts que integraran de esta técnica.



Básicamente, como se planteaba al inicio en el apartado 3.3, esta técnica realizará un proceso inicial de búsqueda de GMPEs (con aquellos modelos resultantes después del criterio de exclusión, ver apartado 3.3.3) que se ajusten mejor al evento sísmico (**obtención de menores residuales, así como sus incertezas inter e intra evento**), ejecutándolo en cada estación acelerográfica (que ha registrado el evento) y para cada medida de intensidad sísmica (MeIn).

Seguidamente, una vez obtenido el modelo más acorde en cada estación (donde la predicción tendrá como base el mapa de Vs30), se procederá a estimar el valor “hipotético” de aceleración sobre una condición de suelo firme o roca blanda (Vs30 = 760 m/s), con el objetivo de poder tener los datos de entrada para calcular una función de transferencia empírica, extrayendo valores de amplificación para cada ordenada espectral considerada, los cuales serán utilizados para combinarse con aquellos obtenidos en el otro trabajo, mediante el uso de modelos analíticos.

Cabe mencionar, que se está partiendo de la hipótesis de que el modelo de atenuación presentaría un ajuste óptimo para los valores de aceleración en superficie, sin embargo, en la realidad no casi siempre es así, debido a otras consideraciones, tales como el resultado de un efecto de sitio muy considerable que con dicho factor de Vs30 no se logre capturar esta amplificación o deamplificación; por otro lado, también efectos de directividad ocurridos durante el evento sísmico, produciendo modificaciones en las componentes de período largo y por lo tanto, obteniéndose ajustes pobres.

Para contrarrestar estos impases, se realizará una modificación al factor de amplificación. Este proceso radica en primero obtener la diferencia existente entre el valor real y predicho (por la GMPE) a nivel de superficie, a través del cociente entre ellos. Ese factor me indicará el residual existente en la predicción. Luego se obtiene el valor predicho deconvolucionado en roca (al colocar un Vs30 de 760 m/s), y se multiplica por el factor del residual calculado recientemente.

Este nuevo valor factorizado se convertirá en el denominador de la relación para calcular el factor de amplificación en el sitio (Fa); es decir, el cociente entre el valor observado real en superficie y el valor factorizado esperado registrado en roca. En la siguiente ecuación, se muestra dichos cálculo:

$$Fa = \frac{\text{Observado}_{superficie}}{\text{Predicho (GMPE)}_{roca} \times \left(\frac{\text{Observado}_{superficie}}{\text{Predicho (GMPE)}_{superficie}} \right)}$$

3.3.5.1. Procedimiento

Al igual que las técnicas anteriores, se debe determinar inicialmente cuáles serán los subconjuntos de registros acelerográficos que se emplearán para el cálculo, con miras a

representar mejor el comportamiento dinámico del suelo y su correspondiente amplificación. Así que se separaran dichos registros por fuente sísmica, y así se obtendrán los *Flatfiles* correspondientes.

Sin embargo, en este procedimiento cabe mencionar, que **como se busca obtener funciones de transferencia empíricas propias de eventos específicos, y más aún, para estaciones específicas**, los subconjuntos de los registros acelerográficos se podrán obtener propiamente de eventos sísmicos particulares y analizar su estimación de efecto de sitio (tanto de manera general o específica por estación); teniendo siempre en consideración los niveles de aceleración (de cada tipo de intensidad sísmica) alcanzados en cada estación sísmica.

Es así como en esta técnica, se han visualizado 3 grupos o escalas para realizar los análisis de ajustes óptimos de GMPEs. A continuación, se detallan los grupos:

- a) **El primer grupo:** consiste en analizar una diversidad de eventos para una misma fuente sísmica. En este grupo se determinarán las mejores GMPEs que se ajusten al compilado de registros de la misma fuente, mediante el Ranqueo de los métodos probabilísticos como el LLH y Distancia Euclidiana. Seguidamente, se realizará una verificación y extracción de los residuales minimizados, mediante el análisis de residuales, identificando las incertezas inter-evento e intra-evento lo más posiblemente reducidas. **Este grupo es muy importante, pues se utiliza para obtener GMPEs globales para determinadas fuentes sísmicas que serán evaluadas en una evaluación probabilística de amenaza sísmica (PSHA)**, así como se realiza en el documento de evaluación de la amenaza. Se denomina como: Todo ($n \geq 1$, $st \geq 1$), donde n , es número de eventos y st , número de estaciones.
- b) **El segundo grupo:** se basa en analizar un solo evento (eliminando solamente la incerteza inter evento) y únicamente considerar la variabilidad entre los sitios donde se ubican las estaciones.

Por lo que, se procederá a realizar el análisis de Ranqueo mediante los métodos LLH y Distancia Euclidiana. Luego, al igual que el primer grupo se realizará un análisis de residuales, donde será evidente que no se tendrá información relacionada a la incerteza inter-evento. Se denomina como: Evento ($n=1$, $st \geq 1$), donde n , es número de eventos y st , número de estaciones.

- c) **El tercer grupo:** es el que proporcionará resultados con mayor detalle para el análisis particular del sitio. Debido a que en este grupo se analiza una estación en específico, **el método probabilístico de Distancia Euclidiana no podrá realizarse**, debido a que se necesita corregir la dependencia del tamaño de la

muestra con el factor de kappa, el cual necesita un número de registros para un mismo evento; **por lo que solo se estimarán los ajustes de los residuales con el método LLH.**

De la misma manera, se realizará un análisis de residuales, donde será evidente **que no se tendrá información relacionada tanto para la incerteza inter-evento como intra-evento; ya que fueron minimizadas.** Se denomina como: Estación ($n=1$, $st=1$), donde n , es número de eventos y st , número de estaciones.

Será precisamente este grupo 3, el que se utilizará para extraer los factores de amplificación. Es importante mencionar, que con este grupo se consumirá un mayor tiempo que los demás, debido a que se hará un análisis muy específico por estación, y más aún, se realizará para cada una de las medidas de intensidad (MeIn) asociadas a diferentes períodos estructurales de interés.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos considerados:

1. Se extraen los datos de un archivo Flatfile y se almacenan en una base de datos de formato Pickle, el cual es proporcionado en las herramientas del SMTK.
2. En esta técnica se han visualizado 3 escalas para realizar los análisis de ajustes óptimos. Se selecciona un grupo para llevar a cabo el análisis.
3. Se calculan las tres GMPEs que mejor se ajustan a los datos, utilizando los diferentes métodos LLH y Distancia Euclidiana, de acuerdo al grupo que se esté evaluando. Lo anterior se realiza para los siguientes criterios:
 - ✓ Por cada tipo de distancia: Ruptura (Rrup), Hipocentral (Rhypo) y Epicentral (Repi).
 - ✓ Por cada tipo de medida de intensidad (MEIN) de interés: PGA, SA(0.1s), SA(0.15s), SA(0.2s), ..., SA(3.0s). **Un total de 61 períodos estructurales, con un paso de 0.05 hasta 3.0 segundos.**
4. Se determinan por estación los valores predichos para cada MeIn con las tres GMPEs ajustadas (cuyos residuales han sido minimizados lo más posible), para cada tipo de distancia.
5. Una vez identificada la GMPE más adecuada de las tres para cada una de las distancias, se hace una nueva predicción del movimiento del terreno en el sitio de la estación, considerando una condición de suelo firme o roca blanda, es decir, colocando un valor de Vs30 de 760 m/s.

6. Este valor deconvolucionado se deberá multiplicar por el factor derivado del cociente entre el valor real y predicho (por la GMPE) a nivel de superficie; para compensar las incertidumbres en el aseguramiento del valor predicho posea un ajuste óptimo.
7. Finalmente, se realiza la división entre el valor observado o real del registro en superficie y el valor predicho con la GMPE ajustada en condiciones de suelo firme factorizado; obteniendo de esa manera el factor de amplificación empírico que será parte de las ordenadas de la función de transferencia.

3.3.5.2. Ejemplo de resultados

A continuación, se muestran los resultados solamente para el caso del grupo 2 y grupo 3, los cuales se desarrollarían utilizando el evento sísmico del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7), donde se tuvieron importantes niveles de aceleración, y posibles evidencias de no linealidad del suelo. Asimismo, este evento presenta información acelerográfica de un total de 28 estaciones, por lo que es necesario de realizar una automatización de la metodología, mediante la conformación de códigos computacionales.

3.3.5.2.1. Resultados: Grupo 2

Primeramente, se carga la base de datos de los 28 registros acelerográficos, junto con sus espectros de respuesta. Seguidamente, se obtienen las GMPEs del catálogo de GEM acorde al tipo de fuente sísmica (en este caso: Subducción Intraplaca) y el tipo de distancia a evaluar. Luego se realiza (primeramente) el análisis de LLH de ese evento con 28 registros y se extraen las 3 mejores GMPEs que se ajustan mejor a cada MeIn.

Asimismo, se registra la valoración del ranking entre los 3 modelos por medio de un peso en porcentaje ("Porc"). A continuación, en la tabla 2 se muestran los resultados utilizando el método de ranqueo de máxima verosimilitud (LLH) y en la tabla 3, los resultados utilizando el método de Distancia Euclidiana. En ambos ejemplos, solo se extraen los resultados solo para 10 medidas de intensidad (MeIn), no obstante, en el código real se obtienen un total de 61 MeIn, construyendo una función de transferencia más precisa.

Tabla 2. Resultados de GMPEs para el grupo 2 del evento del 13 de enero de 2001, para diferentes tipos de intensidad sísmica y tipos de distancia (Rrup: ruptura, Rhypo: hipocentral y Repi: epicentral), usando el método LLH

	['PGA']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [40.07, 30.24, 29.68]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [34.27, 33.69, 32.05]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Low'] Porc: [37.8, 36.84, 25.35]
	['SA(0.1)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'GarciaEtAl2005SSlab', 'ZhaoEtAl2006SSlab'] Porc: [38.67, 31.4, 29.93]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab'] Porc: [35.58, 32.63, 31.79]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [38.11, 37.62, 24.27]

	['SA(0.15)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [42.44, 29.51, 28.06]
Rhyppo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [35.71, 34.15, 30.14]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [38.17, 32.85, 28.98]
	['SA(0.2)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'YoungsEtAl1997SSlab'] Porc: [44.82, 29.57, 25.61]
Rhyppo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'MontalvaEtAl2017SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [35.48, 34.82, 29.71]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [37.96, 35.57, 26.47]
...	
	['SA(0.5)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008'] Porc: [38.24, 32.34, 29.43]
Rhyppo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [34.4, 33.06, 32.54]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [45.51, 35.48, 19.01]
...	
	['SA(1.0)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabBest'] Porc: [35.95, 33.04, 31.01]
Rhyppo	GMPEs: ['BCHydroSERASSlabHigh', 'BCHydroSERASSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [35.33, 32.59, 32.08]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [36.68, 35.43, 27.89]
...	
	['SA(1.5)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'YoungsEtAl1997SSlab', 'ZhaoEtAl2006SSlab'] Porc: [43.32, 28.48, 28.2]
Rhyppo	GMPEs: ['BCHydroSERASSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabLow'] Porc: [33.69, 33.56, 32.75]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [53.65, 32.18, 14.18]
...	
	['SA(2.0)']
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit'] Porc: [34.43, 33.61, 31.96]
Rhyppo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabLow', 'LinLee2008SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab'] Porc: [34.28, 32.95, 32.77]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [68.53, 24.85, 6.62]
...	
	['SA(2.5)']
Rrup	GMPEs: ['Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'Kanno2006Deep'] Porc: [37.56, 35.16, 27.28]
Rhyppo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'LinLee2008SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabLow'] Porc: [36.86, 31.95, 31.19]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [70.89, 23.43, 5.69]
...	
	['SA(3.0)']
Rrup	GMPEs: ['Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'GarciaEtAl2005SSlabVert'] Porc: [41.79, 36.46, 21.75]
Rhyppo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'LinLee2008SSlab'] Porc: [39.77, 30.39, 29.85]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [73.38, 21.84, 4.78]

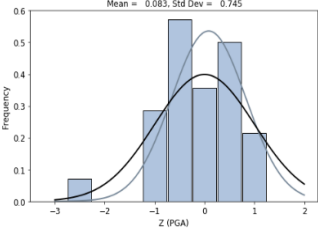
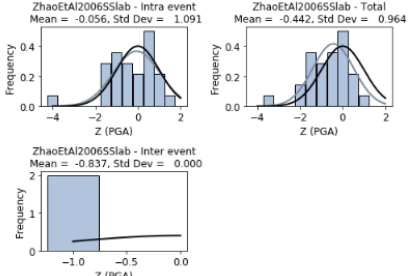
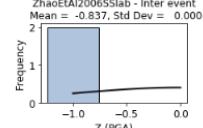
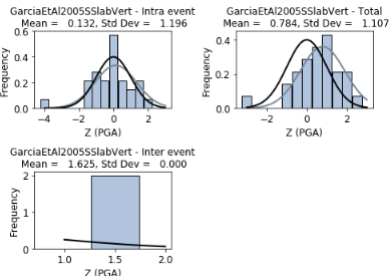
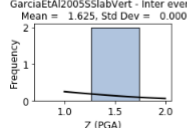
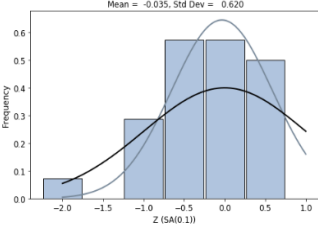
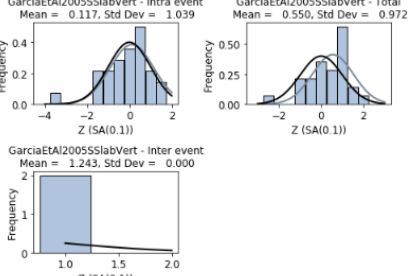
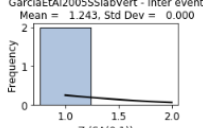
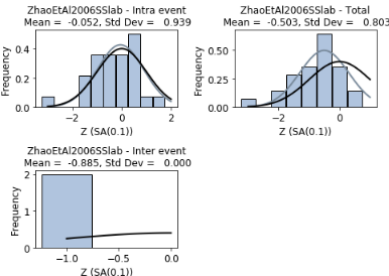
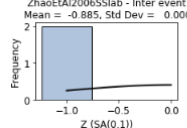
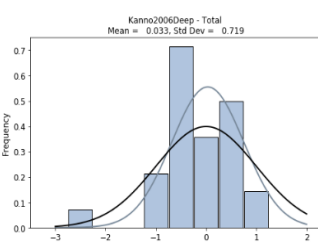
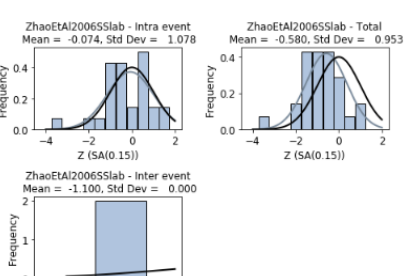
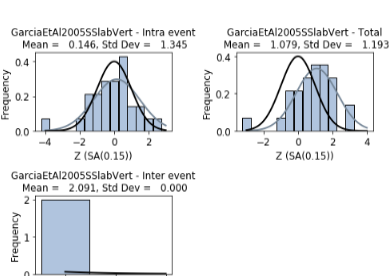
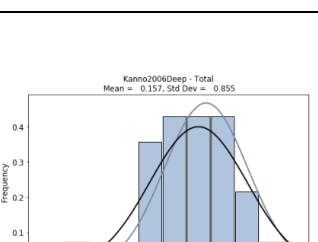
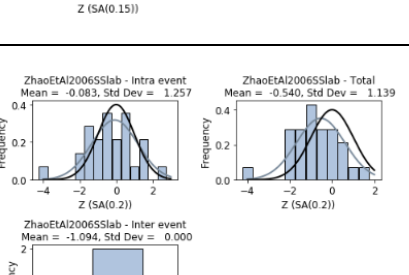
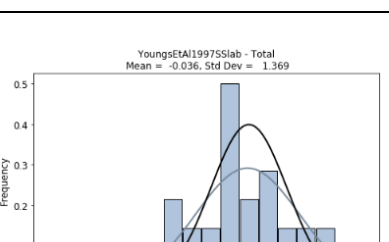
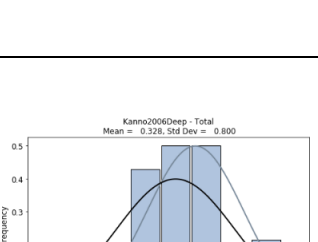
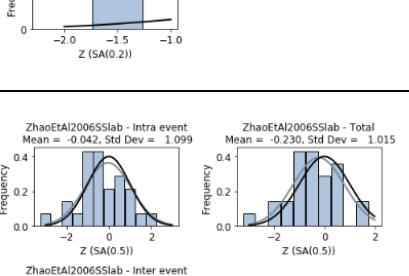
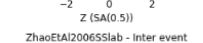
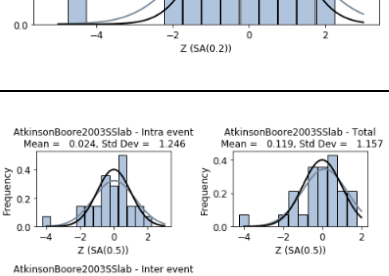
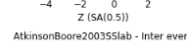
Tabla 3. Resultados de GMPEs para el grupo 2 del evento del 13 de enero de 2001, para diferentes tipos de intensidad sísmica y tipos de distancia (Rrup: ruptura, Rhyppo: hipocentral y Repi: epicentral), usando el método distancia euclidiana.

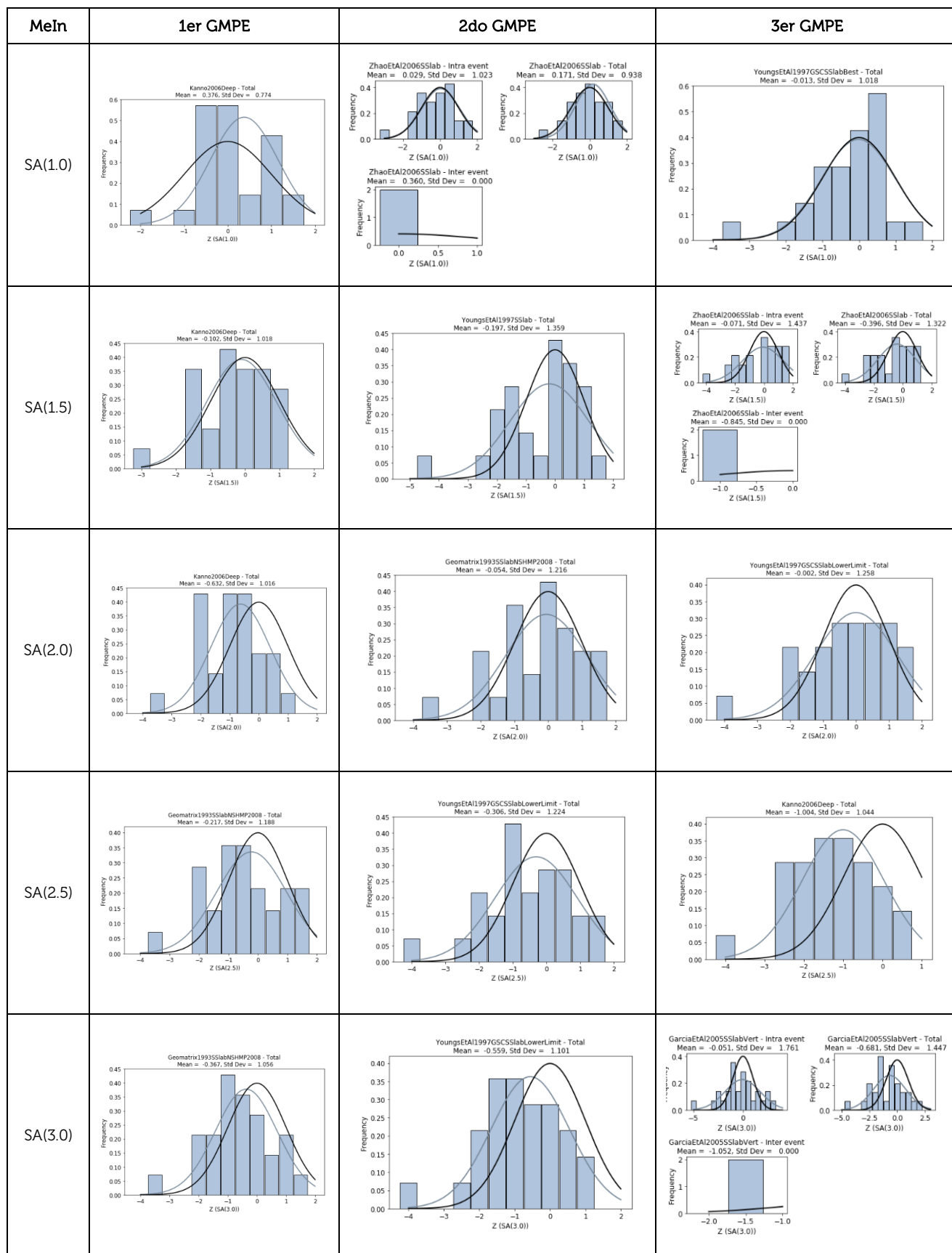
	['PGA']
Rrup	edr: 2.22 - Kanno2006Deep, edr: 3.07 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadia, edr: 3.23 - ZhaoEtAl2006SSlab
Rhyppo	edr: 2.21 - MontalvaEtAl2017SSlab, edr: 2.29 - BCHydroSERASSlabHigh, edr: 2.36 - MontalvaEtAl2016SSlab
Repi	edr: 1.62 - SSlabCan15Mid, edr: 1.66 - SSlabCan15Upp, edr: 2.18 - SSlabCan15Low

	['SA(0.1)']
Rrup	edr: 3.08 - Kanno2006Deep, edr: 3.79 - AtkinsonBoore2003SSlab, edr: 3.93 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadia
Rhypo	edr: 2.04 - MontalvaEtAl2017SSlab, edr: 2.31 - BCHydroSERASSlabHigh, edr: 2.42 - BCHydroSERASSlab
Repi	edr: 1.65 - SSlabCan15Upp, edr: 1.66 - SSlabCan15Mid, edr: 2.31 - SSlabCan15Low
	['SA(0.15)']
Rrup	edr: 2.68 - Kanno2006Deep, edr: 3.63 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadia, edr: 3.93 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008
Rhypo	edr: 2.59 - BCHydroSERASSlabHigh, edr: 2.70 - BCHydroSERASSlab, edr: 2.73 - MontalvaEtAl2017SSlab
Repi	edr: 1.91 - SSlabCan15Mid, edr: 2.12 - SSlabCan15Low, edr: 2.33 - SSlabCan15Upp
	['SA(0.2)']
Rrup	edr: 2.73 - Kanno2006Deep, edr: 3.79 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadia, edr: 4.07 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008
Rhypo	edr: 3.15 - BCHydroSERASSlabHigh, edr: 3.24 - BCHydroSERASSlab, edr: 3.29 - MontalvaEtAl2017SSlab
Repi	edr: 2.38 - SSlabCan15Mid, edr: 2.47 - SSlabCan15Low, edr: 2.93 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(0.5)']
Rrup	edr: 1.79 - ZhaoEtAl2006SSlab, edr: 2.04 - Kanno2006Deep, edr: 2.12 - AtkinsonBoore2003SSlabCascadia
Rhypo	edr: 2.30 - MontalvaEtAl2016SSlab, edr: 2.41 - AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh, edr: 2.41 - BCHydroSERASSlabHigh
Repi	edr: 1.48 - SSlabCan15Low, edr: 1.83 - SSlabCan15Mid, edr: 2.70 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(1.0)']
Rrup	edr: 1.66 - ZhaoEtAl2006SSlab, edr: 1.68 - AtkinsonBoore2003SSlab, edr: 1.71 - AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008
Rhypo	edr: 1.96 - BCHydroSERASSlabHigh, edr: 2.12 - AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh, edr: 2.16 - BCHydroSERASSlab
Repi	edr: 1.51 - SSlabCan15Mid, edr: 1.57 - SSlabCan15Low, edr: 1.97 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(1.5)']
Rrup	edr: 2.70 - Kanno2006Deep, edr: 3.48 - ZhaoEtAl2006SSlab, edr: 3.91 - AtkinsonBoore2003SSlabJapan
Rhypo	edr: 2.83 - LinLee2008SSlab, edr: 2.99 - AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh, edr: 3.05 - AbrahamsonEtAl2015SSlab
Repi	edr: 3.19 - SSlabCan15Low, edr: 4.15 - SSlabCan15Mid, edr: 5.69 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(2.0)']
Rrup	edr: 3.67 - Kanno2006Deep, edr: 5.23 - ZhaoEtAl2006SSlab, edr: 6.37 - AtkinsonBoore2003SSlabJapan
Rhypo	edr: 2.65 - LinLee2008SSlab, edr: 2.88 - MontalvaEtAl2016SSlab, edr: 2.92 - AbrahamsonEtAl2015SSlabLow
Repi	edr: 5.45 - SSlabCan15Low, edr: 7.55 - SSlabCan15Mid, edr: 10.29 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(2.5)']
Rrup	edr: 5.38 - Kanno2006Deep, edr: 6.96 - ZhaoEtAl2006SSlab, edr: 7.31 - YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit
Rhypo	edr: 3.28 - MontalvaEtAl2017SSlab, edr: 3.30 - LinLee2008SSlab, edr: 3.38 - MontalvaEtAl2016SSlab
Repi	edr: 6.32 - SSlabCan15Low, edr: 8.70 - SSlabCan15Mid, edr: 11.76 - SSlabCan15Upp
...	
	['SA(3.0)']
Rrup	edr: 6.65 - YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit, edr: 6.98 - Kanno2006Deep, edr: 8.33 - ZhaoEtAl2006SSlab
Rhypo	edr: 3.07 - MontalvaEtAl2017SSlab, edr: 3.38 - MontalvaEtAl2016SSlab, edr: 4.02 - LinLee2008SSlab
Repi	edr: 6.75 - SSlabCan15Low, edr: 9.36 - SSlabCan15Mid, edr: 12.65 - SSlabCan15Upp

A continuación, en la tabla 4 se muestran los resultados del análisis de residuos para las GMPEs que más se ajustaron mediante el método de LLH. Únicamente se mostrarán los resultados para la distancia de ruptura. Cabe mencionar, que para este evento sísmico si se registró el cálculo de la distancia de Ruptura, mediante la determinación del mecanismo y área de ruptura.

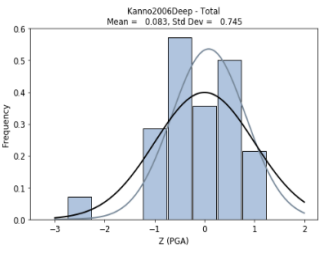
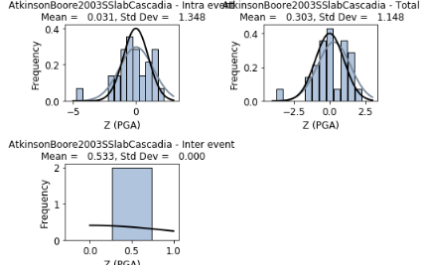
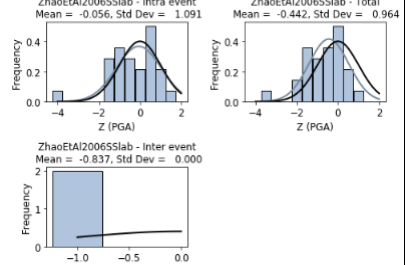
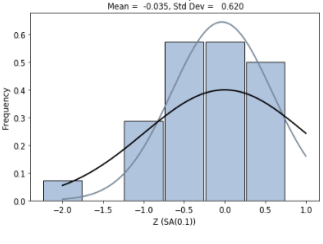
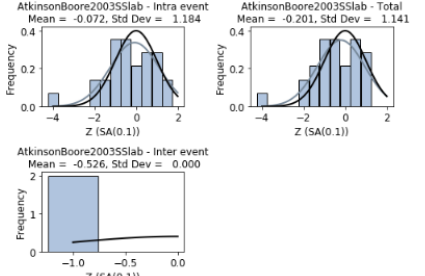
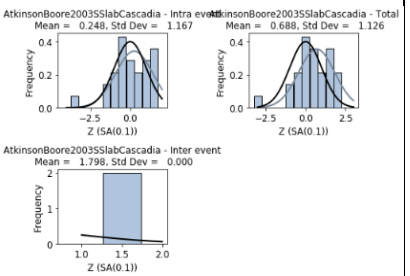
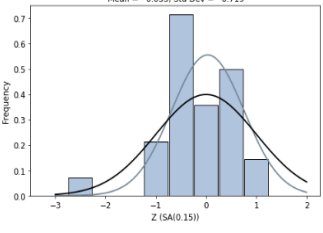
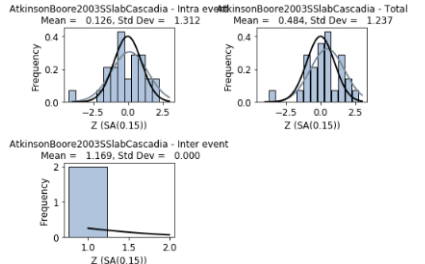
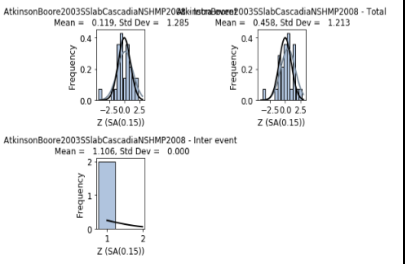
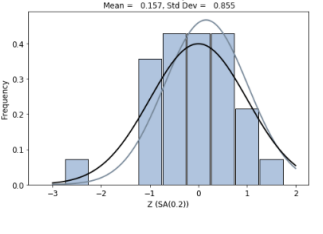
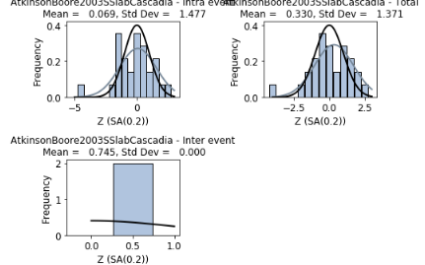
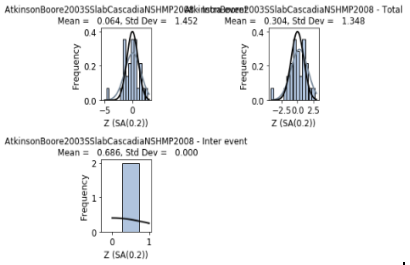
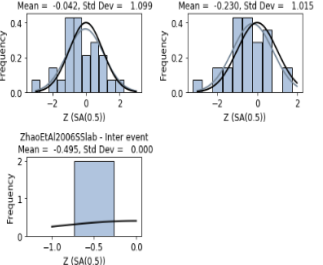
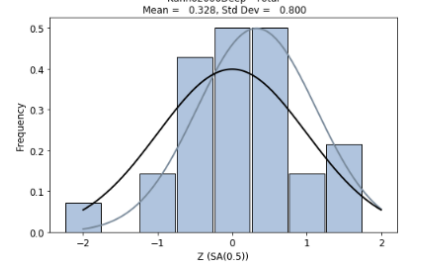
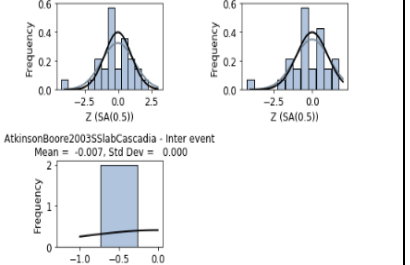
Tabla 4. Resultados de análisis de residuales para GMPES que mejor se ajustaron mediante el método de LLH.

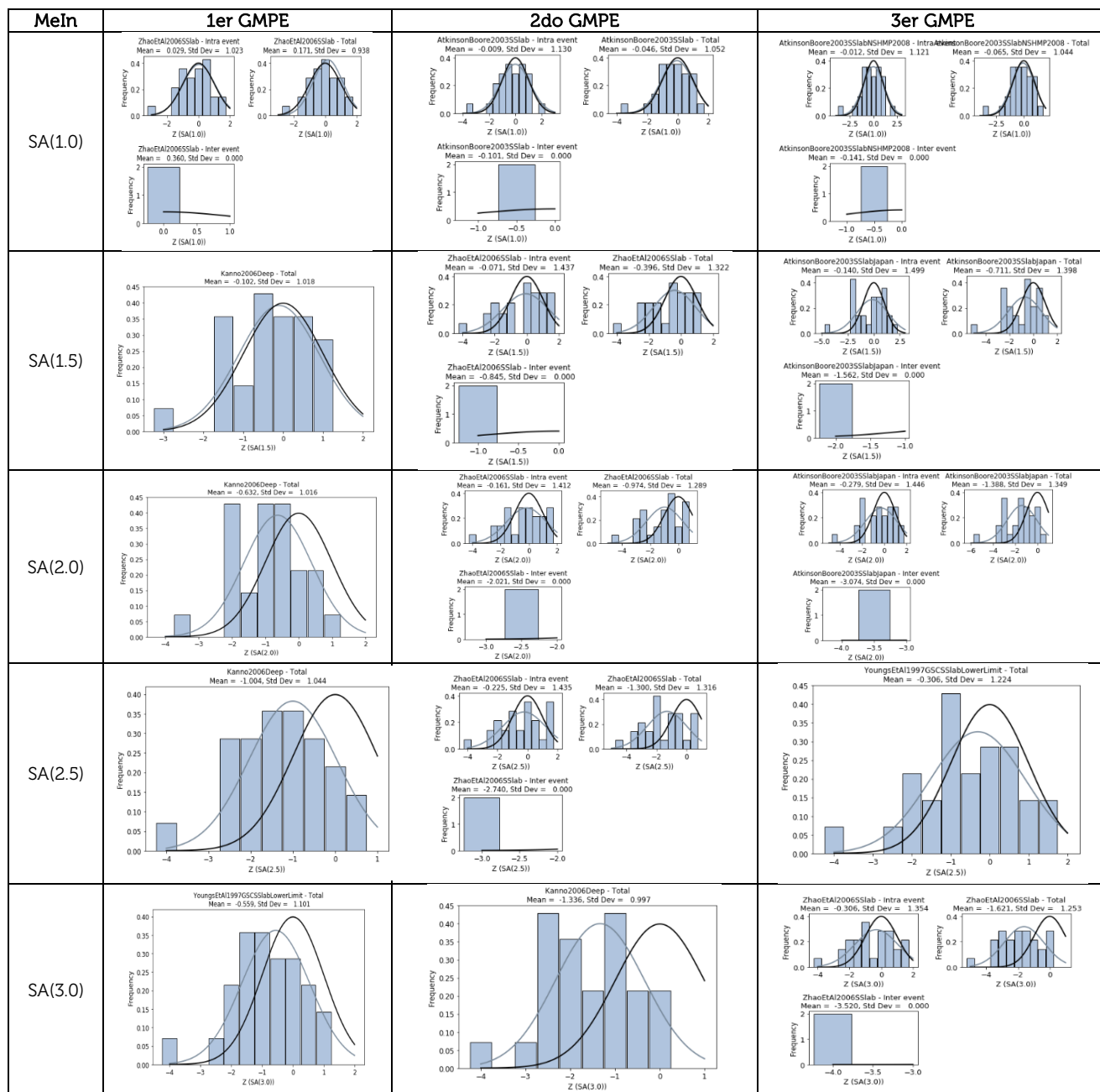
MeIn	1er GMPE	2do GMPE	3er GMPE
PGA]		 	 
SA(0.1)		 	 
SA(0.15)		 	 
SA(0.2)		 	
SA(0.5)		 	 



En la tabla 5 se muestran los resultados del análisis de residuos para las GMPEs que más se ajustaron mediante el método Distancia Euclidiana. De igual manera, solo se mostrarán los resultados para la distancia de ruptura.

Tabla 5. Resultados de análisis de residuales para GMPEs que mejor se ajustaron con método de distancia euclidiana.

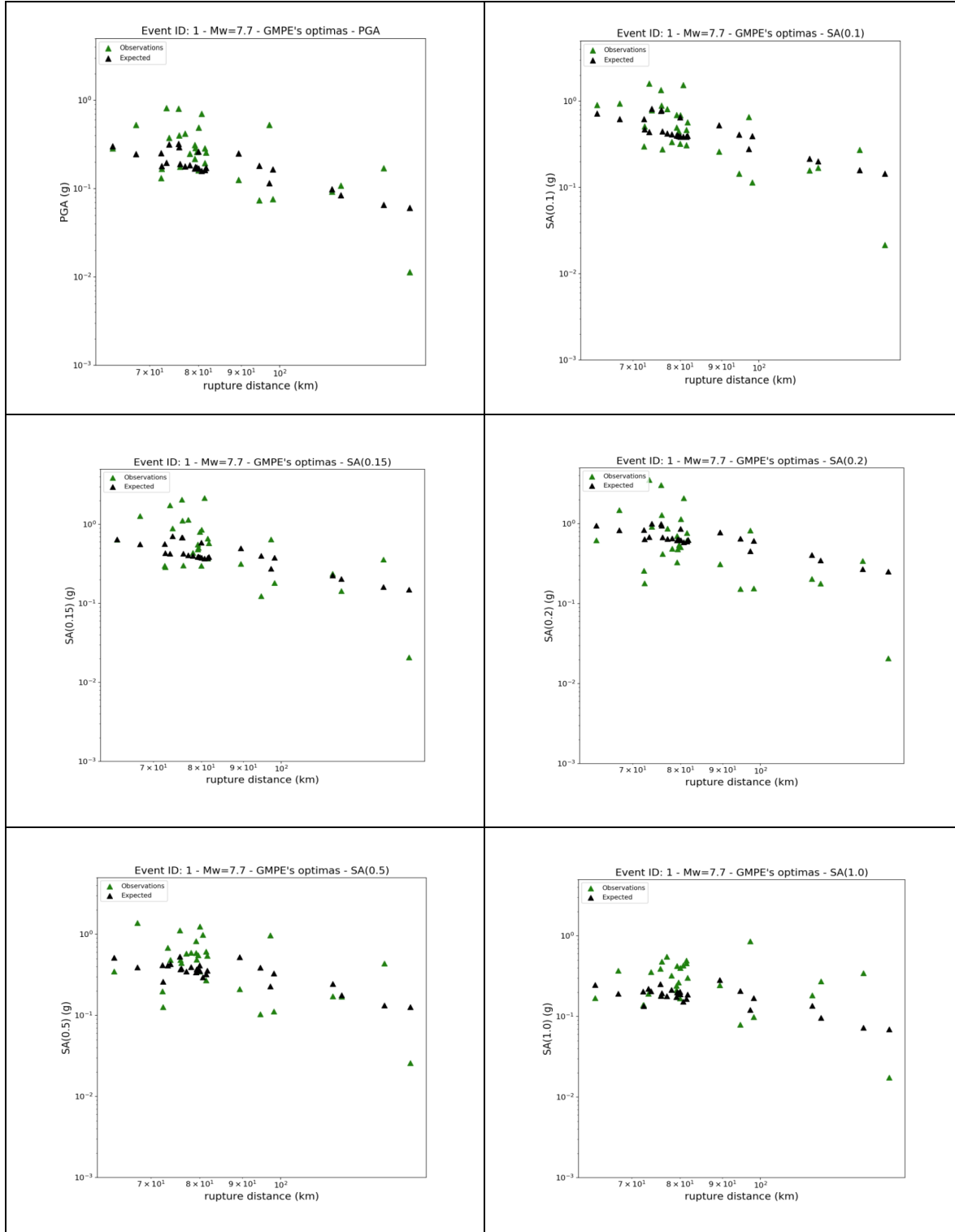
MeIn	1er GMPE	2do GMPE	3er GMPE
PGA			
SA(0.1)			
SA(0.15)			
SA(0.2)			
SA(0.5)			



Una vez visualizado los diferentes residuales, se puede deducir como las tendencias normales de los datos observados (curva celeste) se va acercando mejor a la curva de las GMPEs (curva negra, con media cero), viéndose más aproximada en la correspondiente a la 1er GMPE. *Por lo que con este verificamos y garantizamos que el proceso de ajuste está funcionando.*

Finalmente, para observar mejor los residuales de todas las estaciones correspondientes a la metodología del grupo 2, considerando diferentes MeIn, se dibuja una gráfica de puntos (MeIn vs Distancia de Ruptura), la cual se muestra en la figura 33. En esta figura

se puede apreciar que en este nivel de grupo 2, todavía no se alcanza a satisfacer un mínimo valor de residual entre lo observado (triángulos en verde) y lo predicho (triángulos en negro) en superficie; debido principalmente a la no total reducción de la incerteza intra-evento.



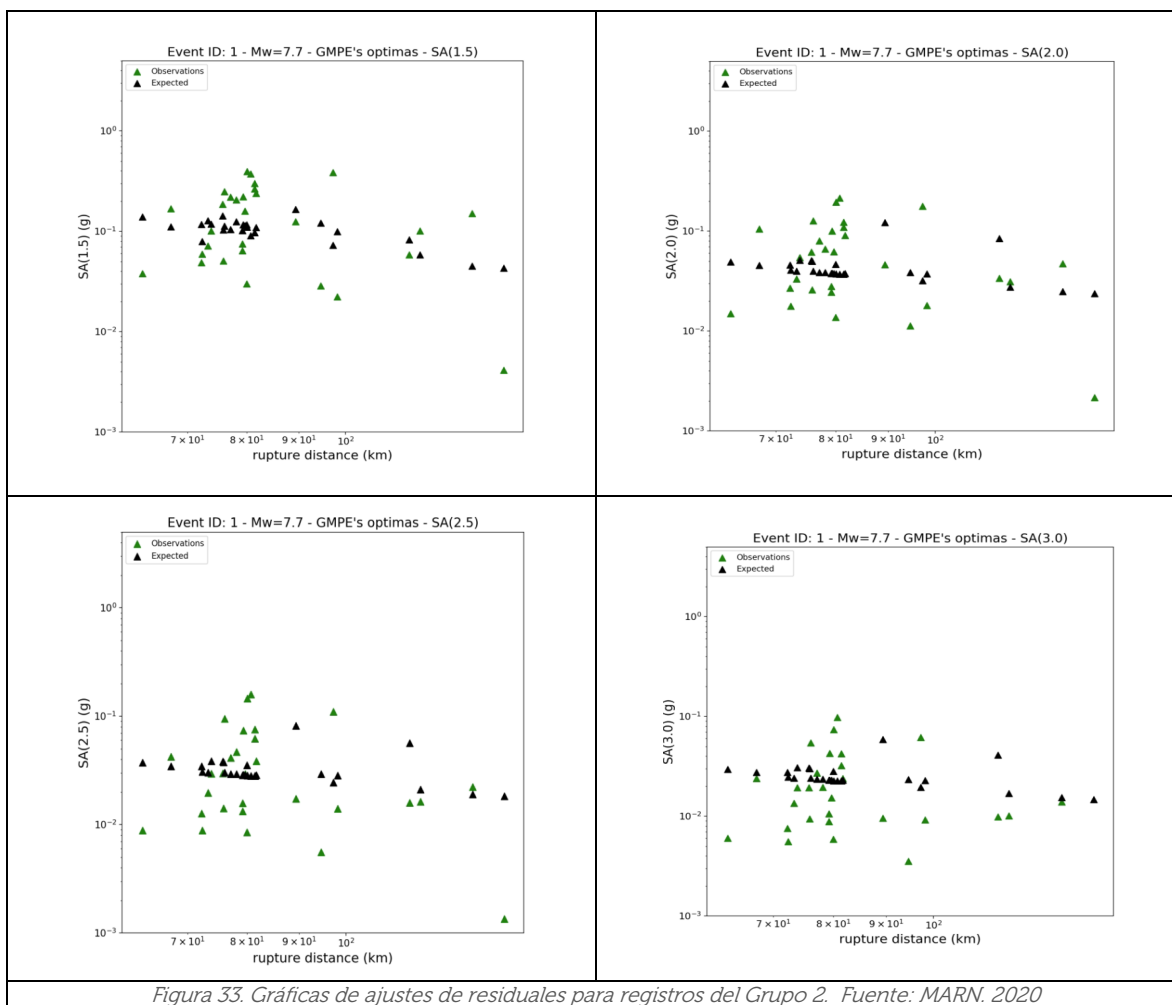


Figura 33. Gráficas de ajustes de residuales para registros del Grupo 2. Fuente: MARN. 2020

Una vez visualizado gráficamente los residuales entre los datos observados con los simulados en superficie, se identifica la mejor GMPE para una distancia en específico (ya sea la hipocentral: R_{hyp} y la de ruptura: R_{rup}) y se simula en roca para cada ordenada espectral ($MeIn$) en cada estación. Luego se procede a efectuar la factorización de este valor simulado en roca para considerar la diferencia existente entre la observación y predicción en superficie, y por último se obtiene la función de transferencia empírica.

En las figuras que van desde la 34 hasta la 37, se observan las diferentes funciones de transferencia para las estaciones sísmicas de San Bartolo (BA), Externado San José (EX), Santiago Nonualco (NO) y Panchimalco (PA), correspondientes al evento del 13 de enero de 2001, asociadas al nivel del Grupo 2.

No se mostrarán los 28 resultados del total de estaciones, para no extenderse mucho en el documento. Por otro lado, se mostraran para cada estación, los resultados obtenidos usando la distancia hipocentral (R_{hyp}) y la distancia de ruptura (R_{rup}), donde ésta última, sí fue calculada para este evento de Mw 7.7, y por ende, registrarse dentro de los archivos *Flatfiles* preparados para cada estación.

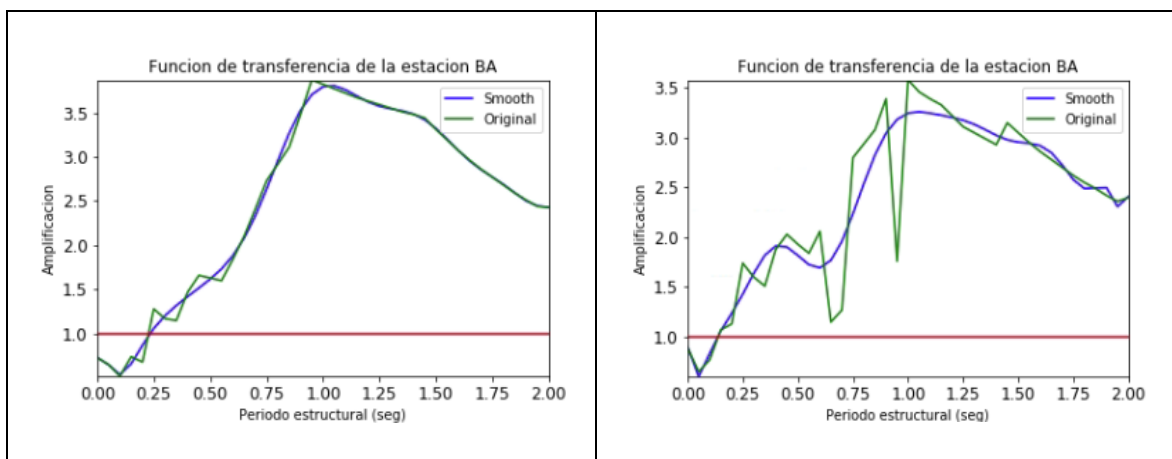


Figura 34. Función de transferencia empírica con técnica de ajuste óptimo de GMPE correspondiente al grupo 2, de la estación acelerográfica de San Bartolo (BA), debido al evento sísmico del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7). (Izquierda) resultado con distancia hipocentral [Rhyp] y (derecha) con distancia de ruptura [Rrup]. Fuente: MARN. 2020

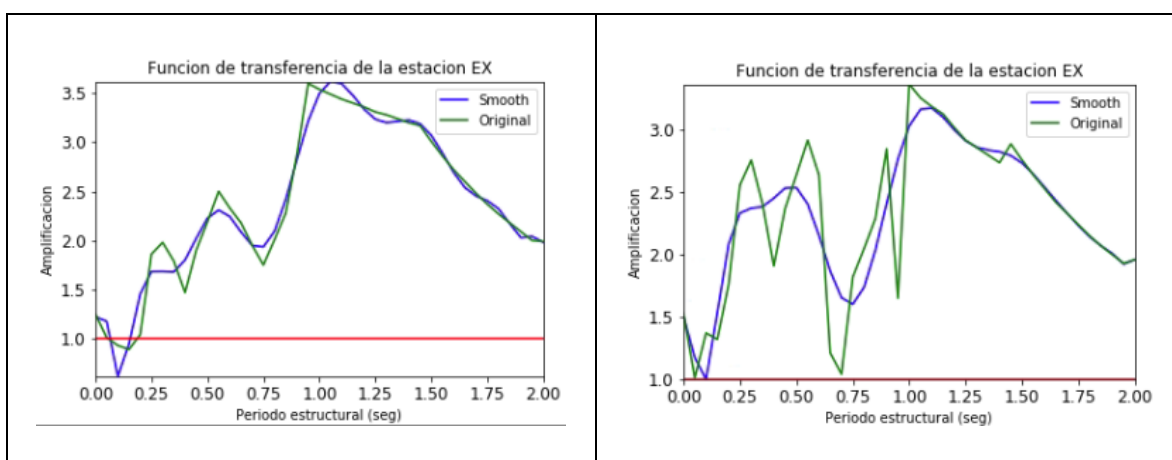


Figura 35. Función de transferencia empírica con técnica de ajuste óptimo de GMPE correspondiente al grupo 2, de la estación acelerográfica Externado S. José (EX), debido al evento sísmico del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7). (Izquierda) resultado con distancia hipocentral [Rhyp] y (derecha) con distancia de ruptura [Rrup]. Fuente: MARN. 2020

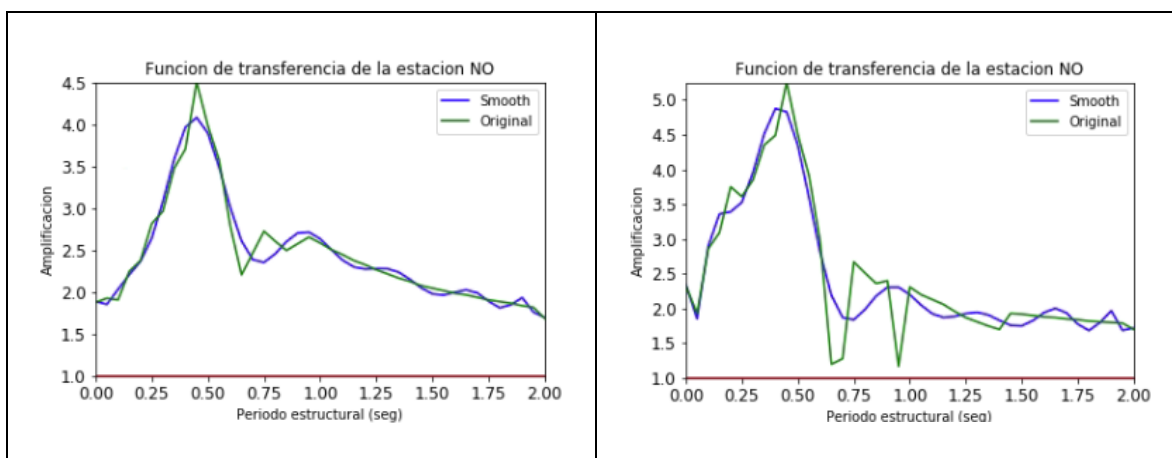
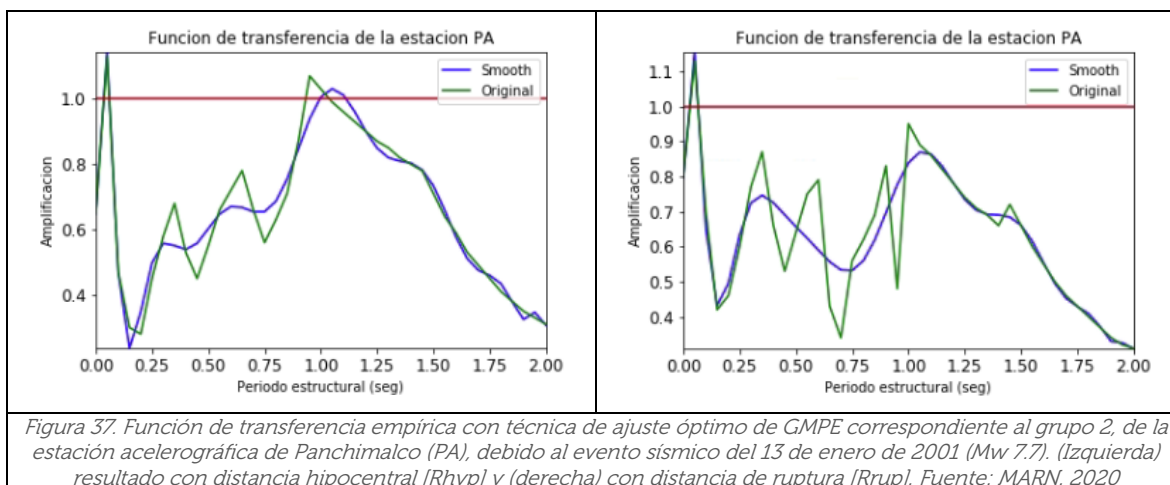


Figura 36. Función de transferencia empírica con técnica de ajuste óptimo de GMPE correspondiente al grupo 2, de la estación acelerográfica Stgo. Nonualco (NO), debido al evento sísmico del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7). (Izquierda) resultado con distancia hipocentral [Rhyp] y (derecha) con distancia de ruptura [Rrup]. Fuente: MARN. 2020



En las figuras anteriores, se observa una línea roja horizontal, que representa un factor de amplificación de 1, con el fin de tener una referencia sobre si existe amplificación o no en los diferentes periodos estructurales. La línea verde denota el cálculo directo del factor de amplificación, mientras que la línea azul representa un valor suavizado de dicho factor. Este último se estima podría ser más práctico y conservador al momento de aplicar dicha función. Sin embargo, para los análisis posteriores relacionados a construir funciones de amplificación, se utilizará el valor directo obtenido.

De igual manera, se observan congruencias respecto algunas estaciones de la cuales se conoce su contexto geológico donde se encuentran emplazadas. Por ejemplo, el caso de la estación de Panchimalco (PA), donde se tiene conocimiento de afloramientos rocosos en superficie y cálculos de periodos fundamentales (usando microtrepidación) menores a la unidad (ver apartado 3.2), es evidente la deamplificación a lo largo de la función de transferencia, es decir, que la mayoría de factores se encuentran por debajo de la unidad. Únicamente y en ambas distancias, para el periodo de 0.05 seg (cercano al obtenido donde ocurre resonancia, o su periodo predominante: 0.08 seg) se muestra un valor de 1.19, el cual no se considera grande, respecto a otro tipo de estaciones.

3.3.5.2.2. Resultados: Grupo 3

Como se mencionó anteriormente, **este tercer grupo proveerá resultados con mayor detalle para el análisis particular del sitio**. Debido a que en este grupo se analiza una estación en específico, el método probabilístico de Distancia Euclidiana no podrá realizarse; por lo que solo se estimarán los ajustes de los residuales con el método LLH.

A continuación, en la tabla 6 se muestran los resultados para cada una de las 28 estaciones acelerográficas del evento sísmico del 13 de enero de 2001 (Mw 7.7), únicamente para la intensidad sísmica (MeIn=PGA), donde se extraen las 3 mejores GMPEs. También, se registra la valoración del ranking entre los 3 modelos por medio de un peso en porcentaje ("Porc). En la práctica se realiza para todas las (MeIn) deseadas.

Tabla 6. Resultados de GMPEs para el grupo 3 del evento del 13 de enero de 2001, para el tipo de intensidad sísmica: PGA y para tipos de distancia (Rrup: ruptura, Rhypo: hipocentral y Repi: epicentral), usando el método LLH

1	['PGA'] – Santiago Nonualco (NO)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'Gupta2010SSlab', 'ZhaoEtAl2006SSlab'] Porc: [34.84, 33.16, 32.0]
Rhypo	GMPEs: ['SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [52.61, 29.15, 18.24]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [75.33, 20.89, 3.78]
2	['PGA'] – Tonacatepeque (TO)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997SSlab', 'Kanno2006Deep', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [33.67, 33.66, 32.67]
Rhypo	GMPEs: ['BCHydroSERASSlab', 'MontalvaEtAl2017SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabLow'] Porc: [33.39, 33.32, 33.29]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [41.85, 36.89, 21.26]
3	['PGA'] – Panchimalco (PA)
Rrup	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlabVert', 'Kanno2006Deep', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadia'] Porc: [33.38, 33.32, 33.29]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [35.71, 34.15, 30.14]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [37.98, 37.64, 24.38]
4	['PGA'] – La Libertad (LI)
Rrup	GMPEs: ['Gupta2010SSlab', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008'] Porc: [39.85, 37.87, 22.28]
Rhypo	GMPEs: ['SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [38.58, 35.53, 25.89]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [67.59, 25.92, 6.49]
5	['PGA'] – Armenia (AR)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008'] Porc: [34.29, 33.03, 32.67]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [36.71, 31.87, 31.42]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [49.97, 34.48, 15.55]
6	['PGA'] – Externado (EX)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabJapan', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008', 'ZhaoEtAl2006SSlab'] Porc: [33.48, 33.48, 33.04]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [36.53, 34.44, 29.03]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [64.33, 27.81, 7.86]
7	['PGA'] – San Bartolo (BA)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapan'] Porc: [33.59, 33.4, 33.01]
Rhypo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabHigh', 'MontalvaEtAl2017SSlab'] Porc: [33.91, 33.3, 32.79]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [38.2, 37.6, 24.19]
8	['PGA'] – Hospital San Rafael Santa Tecla (TE)
Rrup	GMPEs: ['Gupta2010SSlab', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'Kanno2006Deep'] Porc: [36.4, 36.14, 27.46]
Rhypo	GMPEs: ['SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [51.01, 29.65, 19.34]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [75.78, 20.57, 3.65]
9	['PGA'] – Zaragoza (ZA)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabBest', 'Kanno2006Deep', 'AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008'] Porc: [33.43, 33.41, 33.17]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [35.0, 33.66, 31.34]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [45.71, 35.88, 18.41]

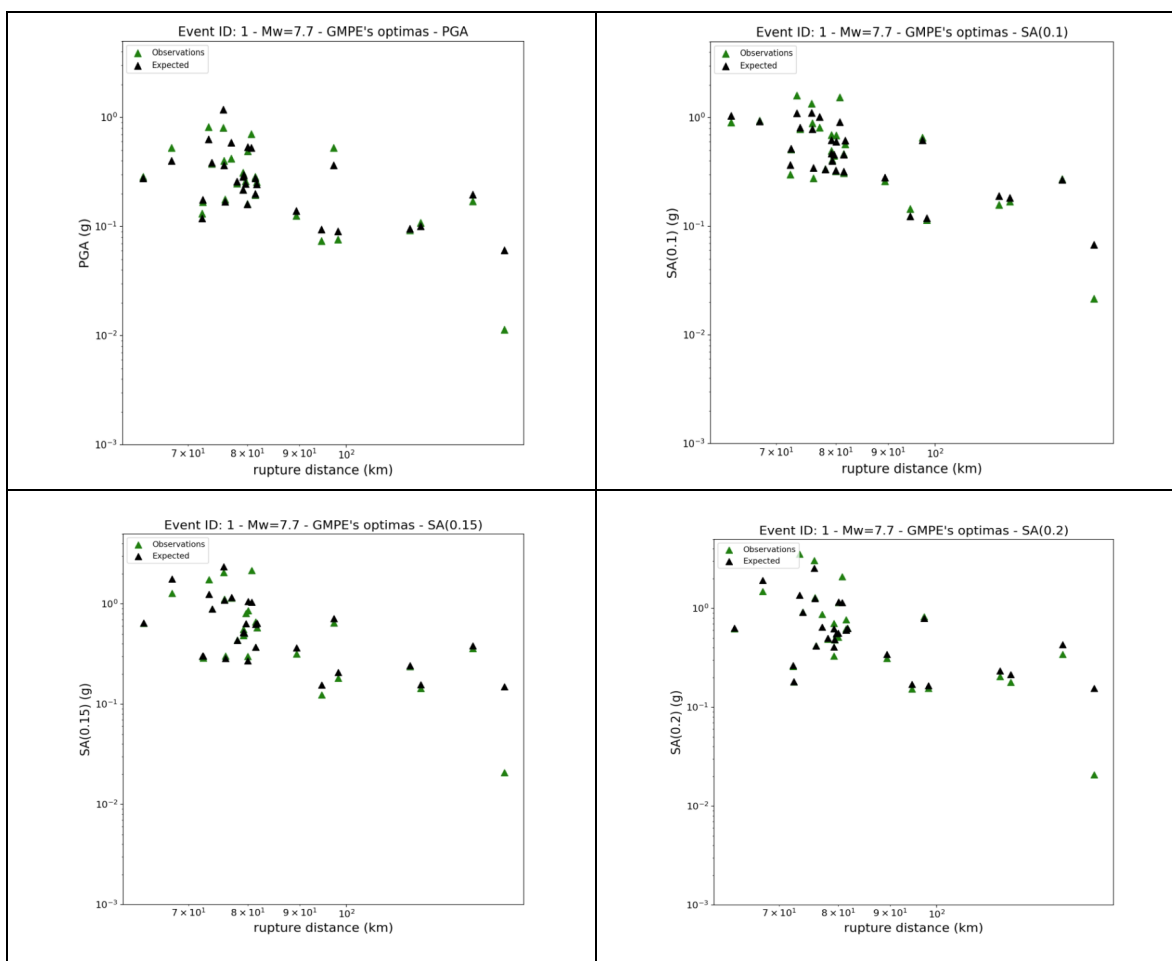
10	['PGA'] – Planta Central de Berlín (PGB)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabCascadia', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [33.34, 33.34, 33.32]
Rhypo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'GarciaEtAl2005SSlab', 'MontalvaEtAl2016SSlab'] Porc: [33.51, 33.48, 33.01]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [41.0, 37.08, 21.92]
...	
11	['PGA'] – Berlín (BER)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabJapan', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008', 'ZhaoEtAl2006SSlab'] Porc: [33.39, 33.39, 33.22]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'SkaratoudisEtAlSSlab2013', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [34.98, 34.69, 30.33]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [55.54, 32.24, 12.23]
...	
12	['PGA'] – Ahuachapán (AH)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997SSlab', 'Kanno2006Deep', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008'] Porc: [33.68, 33.25, 33.07]
Rhypo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [33.8, 33.18, 33.02]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [38.47, 37.56, 23.97]
...	
13	['PGA'] – Santiago de María (SM)
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabBest', 'YoungsEtAl1997SSlab'] Porc: [33.47, 33.46, 33.07]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [34.09, 33.72, 32.18]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [42.19, 36.81, 20.99]
...	
14	['PGA'] – Presa Quince de Septiembre (QC)
Rrup	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlab', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'GarciaEtAl2005SSlabVert'] Porc: [33.92, 33.09, 32.99]
Rhypo	GMPEs: ['BCHydroSERASSlabLow', 'MontalvaEtAl2017SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [33.59, 33.28, 33.13]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [43.57, 36.47, 19.95]
...	
15	['PGA'] – Puerto de Cutuco (CU)
Rrup	GMPEs: ['Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'Kanno2006Deep'] Porc: [35.13, 32.69, 32.17]
Rhypo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabLow', 'BCHydroSERASSlab', 'MontalvaEtAl2017SSlab'] Porc: [33.52, 33.47, 33.02]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Low'] Porc: [37.8, 36.91, 25.29]
...	
16	['PGA'] – CEPA Acajutla (CA)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabBest'] Porc: [33.33, 33.33, 33.33]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [35.75, 33.66, 30.59]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [53.65, 33.05, 13.3]
...	
17	['PGA'] – Sensuntepeque (SE)
Rrup	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadia', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008'] Porc: [33.34, 33.33, 33.33]
Rhypo	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabHigh'] Porc: [33.49, 33.29, 33.22]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [37.85, 37.66, 24.49]
...	
18	['PGA'] – CESSA - Metapán (CM)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadia', 'AtkinsonBoore2003SSlabCascadiaNSHMP2008'] Porc: [33.8, 33.1, 33.1]
Rhypo	GMPEs: ['AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh', 'BCHydroSERASSlabHigh', 'AbrahamsonEtAl2015SSlab'] Porc: [33.46, 33.29, 33.25]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Low'] Porc: [38.21, 31.69, 30.11]
...	
19	['PGA'] – Observatorio Sismológico - (OB)

Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [33.62, 33.55, 32.83]
Rhypo	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlabVert', 'GarciaEtAl2005SSlab', 'BCHydroSERASSlabLow'] Porc: [34.48, 33.74, 31.77]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [60.87, 29.68, 9.46]
...	
20	['PGA'] – Relaciones Exteriores Superficie - (RS)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit', 'Gupta2010SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabJapanNSHMP2008'] Porc: [35.44, 34.28, 30.28]
Rhypo	GMPEs: ['SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [52.76, 27.58, 19.65]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [78.16, 18.86, 2.98]
...	
21	['PGA'] – Relaciones Exteriores Fondo - (RF)
Rrup	GMPEs: ['Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit'] Porc: [33.47, 33.29, 33.24]
Rhypo	GMPEs: ['GarciaEtAl2005SSlabVert', 'LinLee2008SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlab'] Porc: [34.99, 34.63, 30.38]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [66.33, 26.66, 7.0]
...	
22	['PGA'] – Santa Tecla - (ST)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabJapan', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008'] Porc: [33.52, 33.49, 32.98]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [33.79, 33.34, 32.87]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [47.85, 35.21, 16.93]
...	
23	['PGA'] – Seminario San José de La Montaña - (SS)
Rrup	GMPEs: ['AtkinsonBoore2003SSlabJapan', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008'] Porc: [33.52, 33.49, 32.98]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2016SSlab', 'SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [33.79, 33.34, 32.87]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [47.85, 35.21, 16.93]
...	
24	['PGA'] – Ciudadela Don Bosco - (DB)
Rrup	GMPEs: ['Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'Kanno2006Deep'] Porc: [34.38, 32.98, 32.64]
Rhypo	GMPEs: ['LinLee2008SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'BCHydroSERASSlabLow'] Porc: [37.57, 35.47, 26.96]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [72.42, 22.86, 4.72]
...	
25	['PGA'] – Viveros de DUA Superficie - (VS)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'Geomatrix1993SSlabNSHMP2008'] Porc: [33.49, 33.26, 33.25]
Rhypo	GMPEs: ['BCHydroSERASSlabHigh', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabLow', 'GarciaEtAl2005SSlabVert'] Porc: [33.4, 33.37, 33.23]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Low'] Porc: [37.9, 36.1, 26.01]
...	
26	['PGA'] – Viveros de DUA Fondo - (VF)
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'GarciaEtAl2005SSlabVert'] Porc: [33.54, 33.48, 32.98]
Rhypo	GMPEs: ['LinLee2008SSlab', 'GarciaEtAl2005SSlabVert', 'BCHydroSERASSlabLow'] Porc: [36.19, 35.14, 28.68]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [61.53, 29.33, 9.14]
...	
27	['PGA'] – San Miguel - (MG)
Rrup	GMPEs: ['YoungsEtAl1997SSlab', 'ZhaoEtAl2006SSlab', 'AtkinsonBoore2003SSlabNSHMP2008'] Porc: [33.72, 33.19, 33.09]
Rhypo	GMPEs: ['SkarlatoudisEtAlSSlab2013', 'MontalvaEtAl2016SSlab', 'AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh'] Porc: [34.71, 33.13, 32.16]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Upp', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Low'] Porc: [64.74, 27.58, 7.68]
...	
28	['PGA'] – Santa Ana - (SA)
Rrup	GMPEs: ['Kanno2006Deep', 'Geomatrix1993SSlabNSHMP2008', 'GarciaEtAl2005SSlabVert'] Porc: [77.65, 12.22, 10.13]
Rhypo	GMPEs: ['MontalvaEtAl2017SSlab', 'BCHydroSERASSlabLow', 'BCHydroSERASSlab'] Porc: [49.19, 32.15, 18.66]
Repi	GMPEs: ['SSlabCan15Low', 'SSlabCan15Mid', 'SSlabCan15Upp'] Porc: [86.38, 12.45, 1.17]

De la tabla anterior, se puede observar que algunas de las estaciones acelerográficas comparten la mismas GMPEs, sin embargo, otras son totalmente diferentes; por lo que nos recuerda la incerteza epistémica que existe al predecir los valores de las aceleraciones.

Esto está también reflejado no solo en la intensidad sísmica de PGA, sino que también en las otras medidas de intensidad (MeIn) asociadas a las demás ordenadas espectrales. Por lo tanto, al llevar a cabo este ejercicio del grupo No.3 y con miras a obtener una función de transferencia empírica más apegada a la realidad (sopesando la estimación empírica del Vs30), **podríamos tener resultados más precisos de los factores de amplificación.**

Para observar mejor los residuales de todas las estaciones correspondientes a la metodología del grupo 3, considerando diferentes MeIn, se dibuja una gráfica de puntos (MeIn vs Distancia de Ruptura), la cual se muestra en la figura 38. En esta figura se puede apreciar que en este nivel de grupo 3, se alcanza a satisfacer con mucha más precisión (comparado con el grupo No.2) el valor de residual entre lo observado y lo predicho; debido principalmente a la consecuente reducción de la incerteza intra-evento.



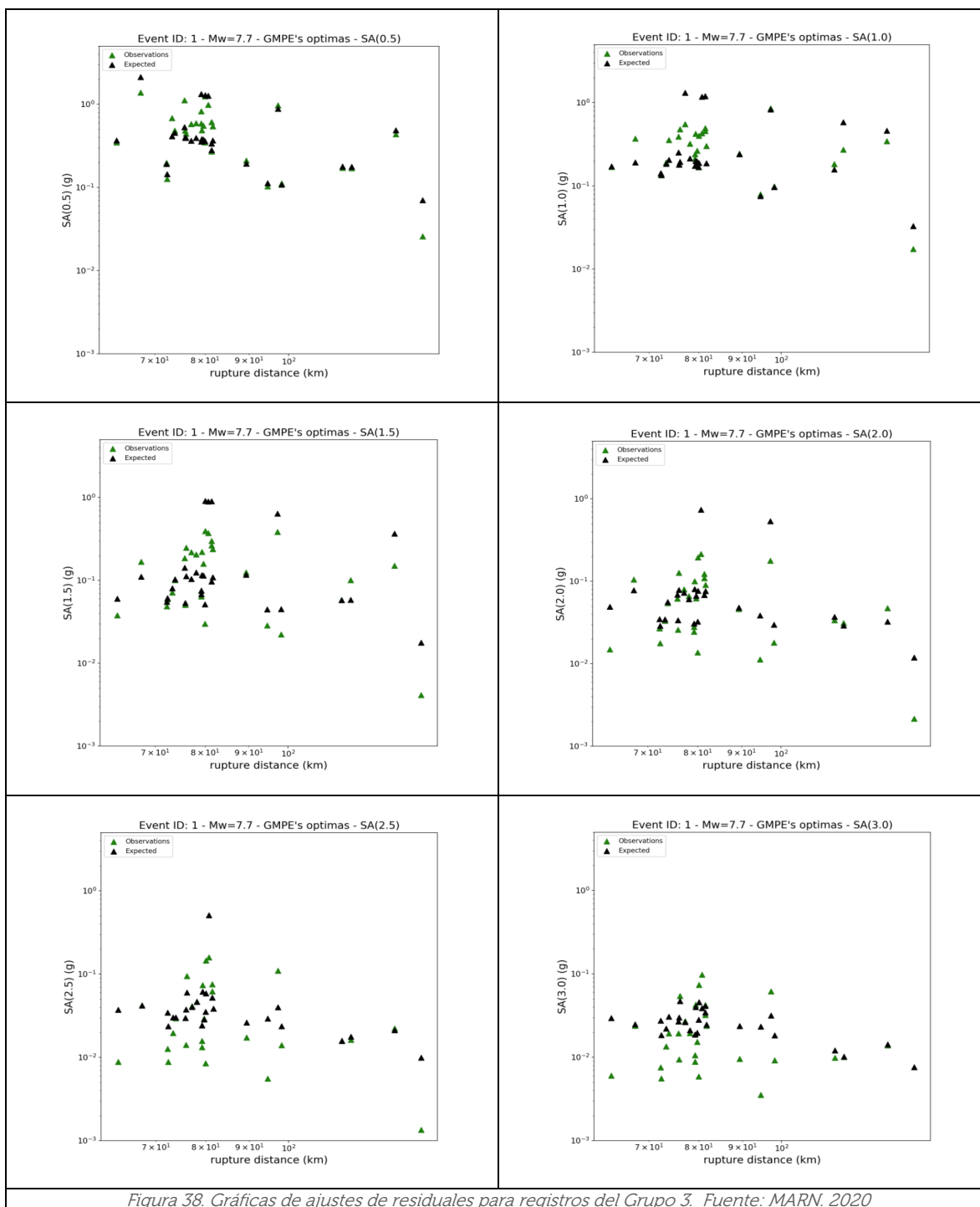
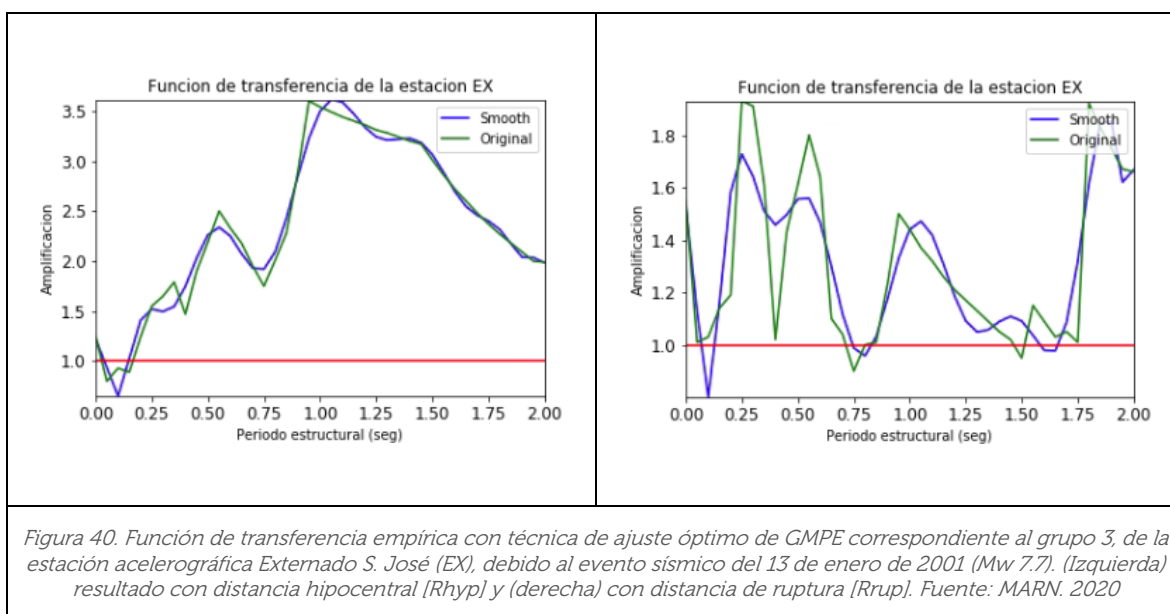
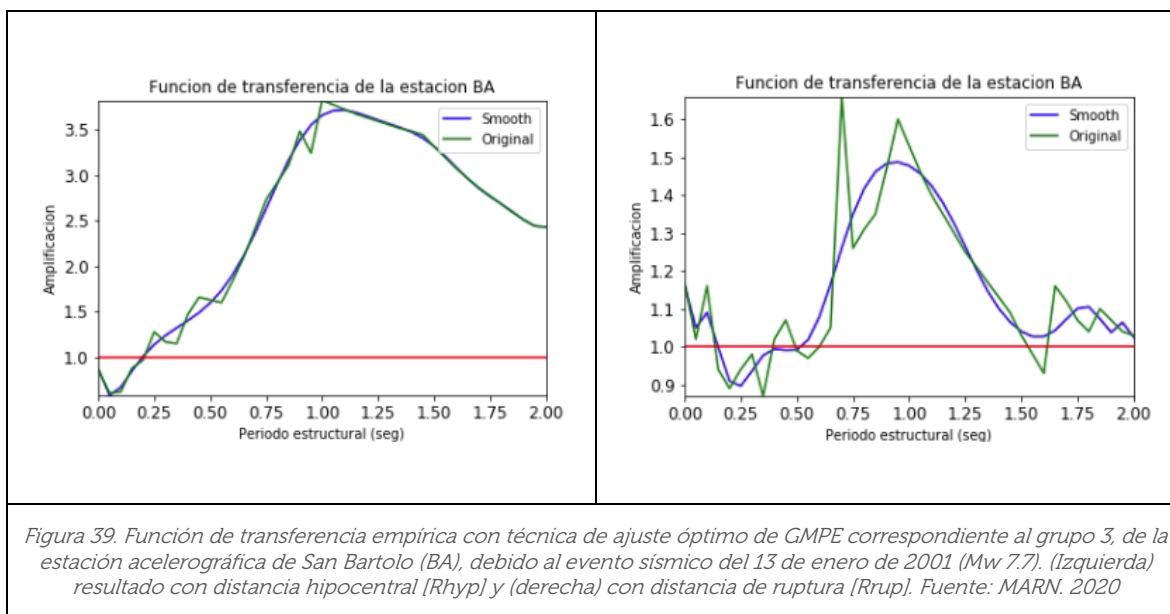


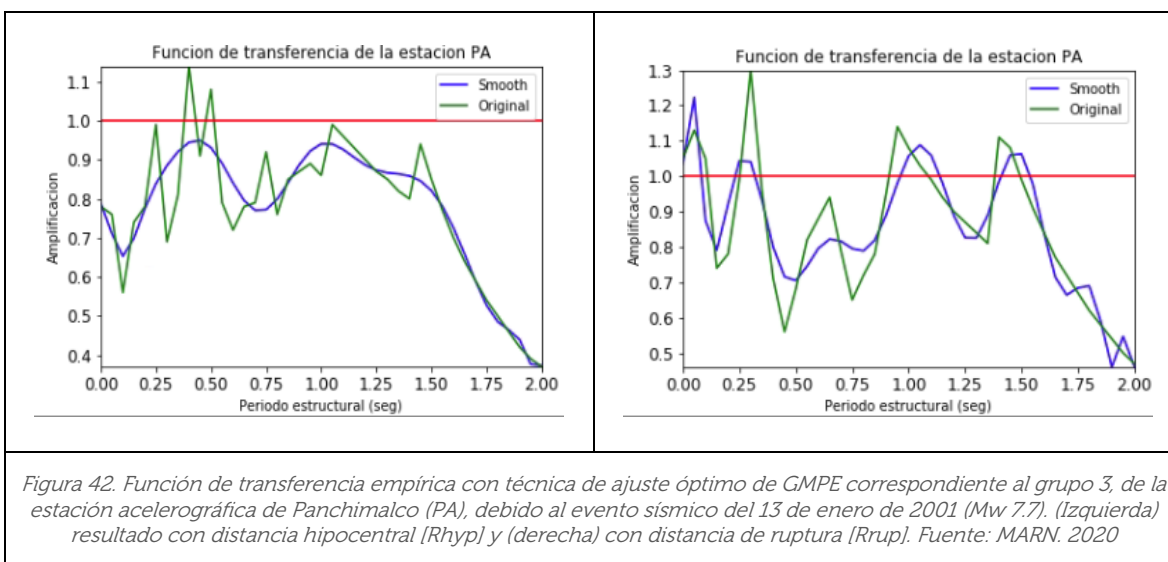
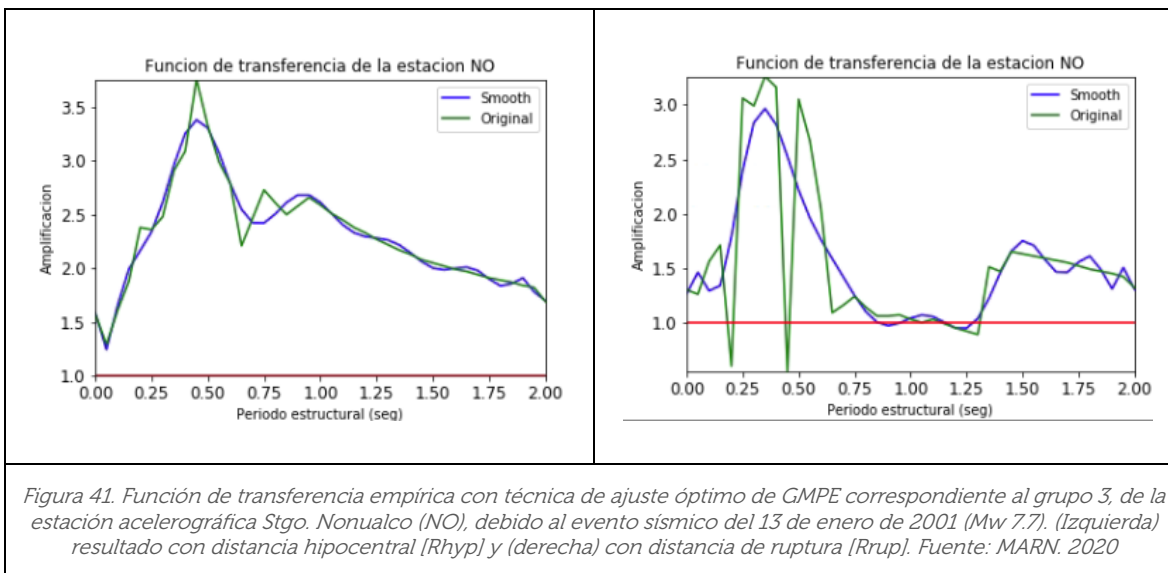
Figura 38. Gráficas de ajustes de residuales para registros del Grupo 3. Fuente: MARN. 2020

Una vez visualizado gráficamente los residuales entre los datos observados con los simulados en superficie, se identifica la mejor GMPE para una distancia en específico (ya sea la hipocentral: R_{hyp} y la de ruptura: R_{rup}) y se simula en roca para cada ordenada espectral ($MeIn$) en cada estación. Luego se procede a efectuar la factorización de este valor simulado en roca para considerar la diferencia existente entre la observación y predicción en superficie, y por último se obtiene la función de transferencia empírica.

En las figuras que van desde la 39 hasta la 42, se observan las diferentes funciones de transferencia para las estaciones sísmicas de San Bartolo (BA), Externado San José (EX), Santiago Nonualco (NO) y Panchimalco (PA), correspondientes al evento del 13 de enero de 2001, asociadas al nivel del Grupo 3.

No se mostrarán los 28 resultados del total de estaciones, para no extenderse mucho en el documento. Por otro lado, se mostraran para cada estación, los resultados obtenidos usando la distancia hipocentral (R_{hyp}) y la distancia de ruptura (R_{rup}), donde ésta última, sí fue calculada para este evento de Mw 7.7, y por ende, registrarse dentro de los archivos *Flatfiles* preparados para cada estación.





4. Generación de funciones de amplificación empíricas

Esta última sección abordará el post-procesamiento de los resultados correspondientes a las funciones de transferencia obtenidas a partir de las técnicas de Borchardt (SSR) y de ajustes óptimos de GMPEs, explicadas anteriormente. Este procesamiento se basará en determinar funciones de amplificación deterministas para cada tipo de suelo; la cual, en esta ocasión, se relacionará directamente con la aceleración en roca [S_a (g)] y no precisamente con el período estructural de la medida de intensidad (MeIn) asociada.

En total son catorce las medidas de intensidad y períodos asociados que han sido evaluados en este trabajo, a los cuales se les ha determinado sus factores de amplificación. Estos se definen a continuación: PGA, $SA(0.1s)$, $SA(0.2s)$, $SA(0.3s)$, $SA(0.5s)$, $SA(0.6s)$, $SA(0.8s)$, $SA(1.0s)$, $SA(1.5s)$, $SA(2.0s)$, $SA(2.5s)$, $SA(3.0s)$, $SA(3.5s)$ y $SA(4.0s)$.

Estas funciones se determinarán para los cinco tipos de suelo distribuidos a nivel nacional (BC, C, CD, D y DE), los cuales son separados de acuerdo al valor de V_{s30} y clasificación de tipo de suelo de cada estación acelerográfica, obtenido a raíz del mapa de V_{s30} , mostrado en el apartado 3.3.4. Cabe resaltar que el tipo de suelo DE no se pudo caracterizar, debido a que no se poseen estaciones acelerográficas emplazadas en ese tipo de suelo. Por lo que, únicamente se pudieron generar funciones de amplificación para los cuatro tipos de suelo restantes.

Esta función de amplificación, denominada $[F_a(t) = f(Sa_{roca}(g))]$, se obtendrá a través de la aplicación de un modelo de regresión cuadrática, que buscará ajustar todos los datos de las funciones de transferencia calculadas para cada tipo de suelo y cada una de las técnicas, es decir, para los catorce casos de resultados de funciones de transferencia.

En otras palabras, las funciones de transferencia serán integradas en tablas resumen constituidas por una serie de factores de amplificación para cada una de las 14 MeIn asociadas a un período estructural específico de interés ingenieril. Estos factores, a su vez, serán calculados en cada (MeIn) para una variedad de niveles de aceleración en roca firme, con el fin de representar la diversa gama de respuestas obtenidas en la evaluación probabilística de la amenaza sísmica sobre roca.

Posteriormente, dichos **factores de amplificación empíricos se mezclarán con los factores obtenidos a través de métodos analíticos** (desarrollados en otro documento) y se obtendrá un promedio entre ellos, para así obtener factores de amplificación finales que consideren la contribución de ambos métodos. A continuación, se muestran los resultados de las funciones de amplificación para los tipos de suelo, obtenidas con las técnicas de Borchardt (SSR) y ajuste de GMPEs óptimos.

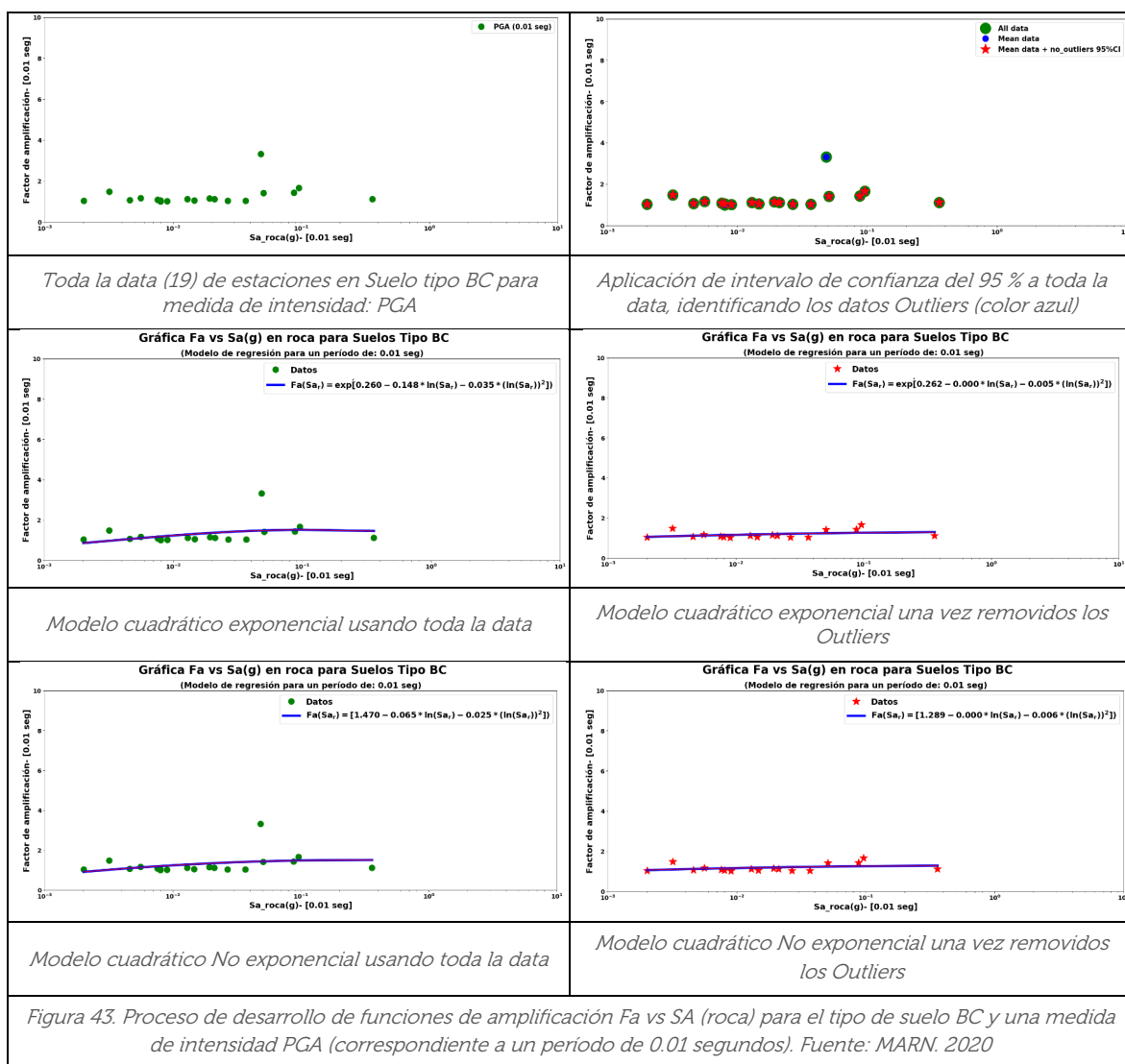
4.1. Funciones de amplificación: Suelo tipo BC

Para el caso de suelo tipo BC, se contabilizan un total de 4 estaciones acelerográficas que se han definido que se encuentran emplazadas en el mismo. Se han utilizado un total de 19 registros acelerográficos correspondientes a 16 eventos sísmicos, que abarcan 10 sismos corticales y 6 sismos de subducción intraplaca. Las aceleraciones máximas del terreno en superficie (PGA) oscilan entre 2 a 394 gales.

En la figura compuesta 43 se observa los resultados de funciones de amplificación para la medida de intensidad de PGA (0.01 seg). En el desarrollo de estas funciones se realiza un análisis estadístico de los datos, con el fin de eliminar valores atípicos de factores (conocidos como *Outliers*) que podrían afectar el valor promedio de la función. El artificio utilizado fue considerar un intervalo de confianza del 95%, se colocaron cuantiles de 0.025 y 0.975; de modo que al menos el 95% de la probabilidad de los factores de amplificación se encuentren dentro del área central de una distribución normal de datos.

Adicionalmente, se ejecutan tanto los análisis de las funciones de amplificación, considerando toda la data y utilizando la data que se mantienen al remover los “outliers”; expresando el ajuste de resultados, tanto con un modelo cuadrático exponencial y uno No exponencial; con el objetivo de tener diversos valores de amplificación y al final seleccionar el factor más conservador.

En la esquina superior derecha de las figuras donde se observa el ajuste, se encuentran las ecuaciones que explicarían la tendencia del modelo cuadrático. Por lo que esta ecuación se tabula en una hoja de cálculo y se determinan los valores de factores de amplificación para diferentes valores o niveles de intensidad (aceleración en roca).

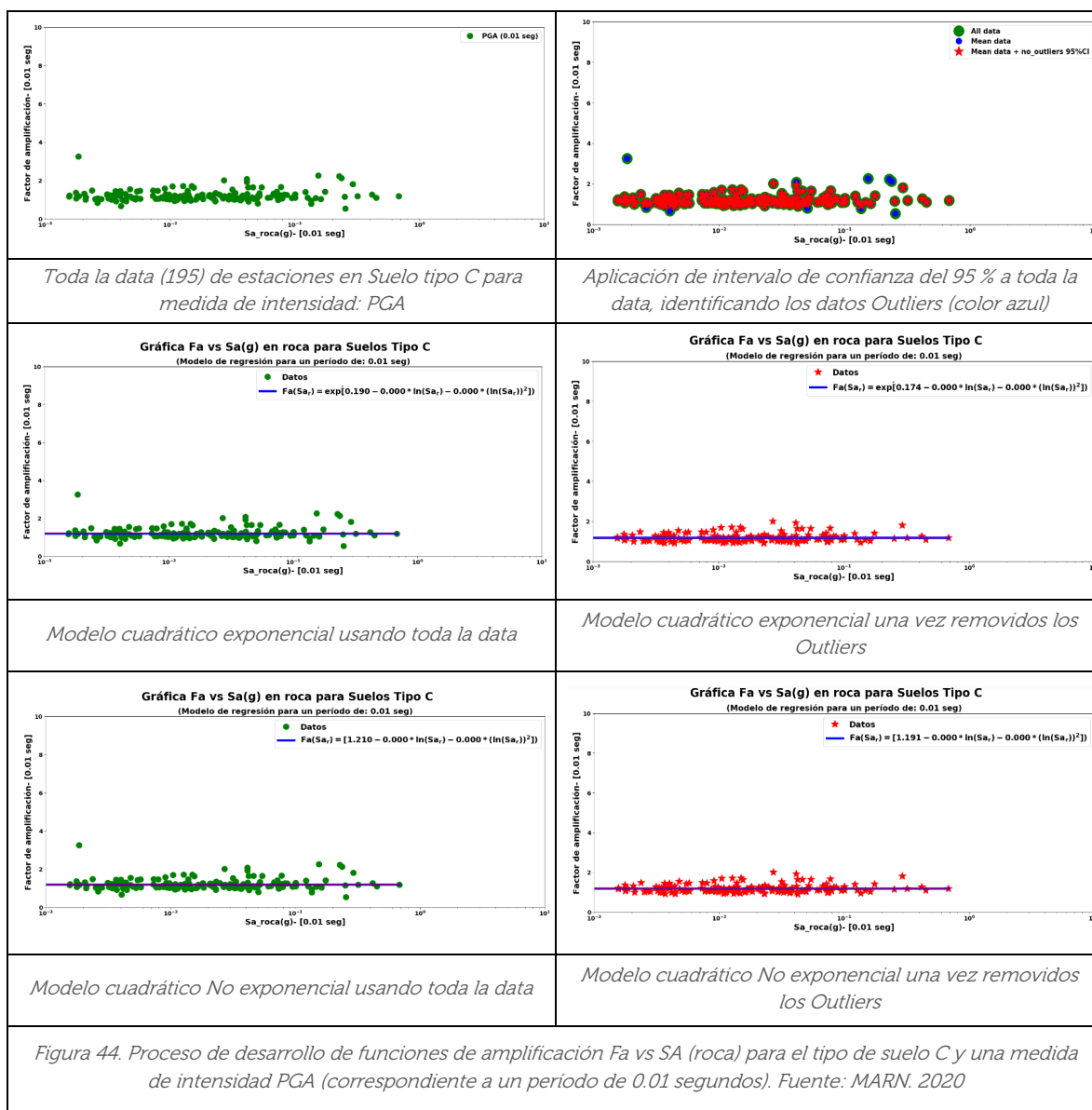


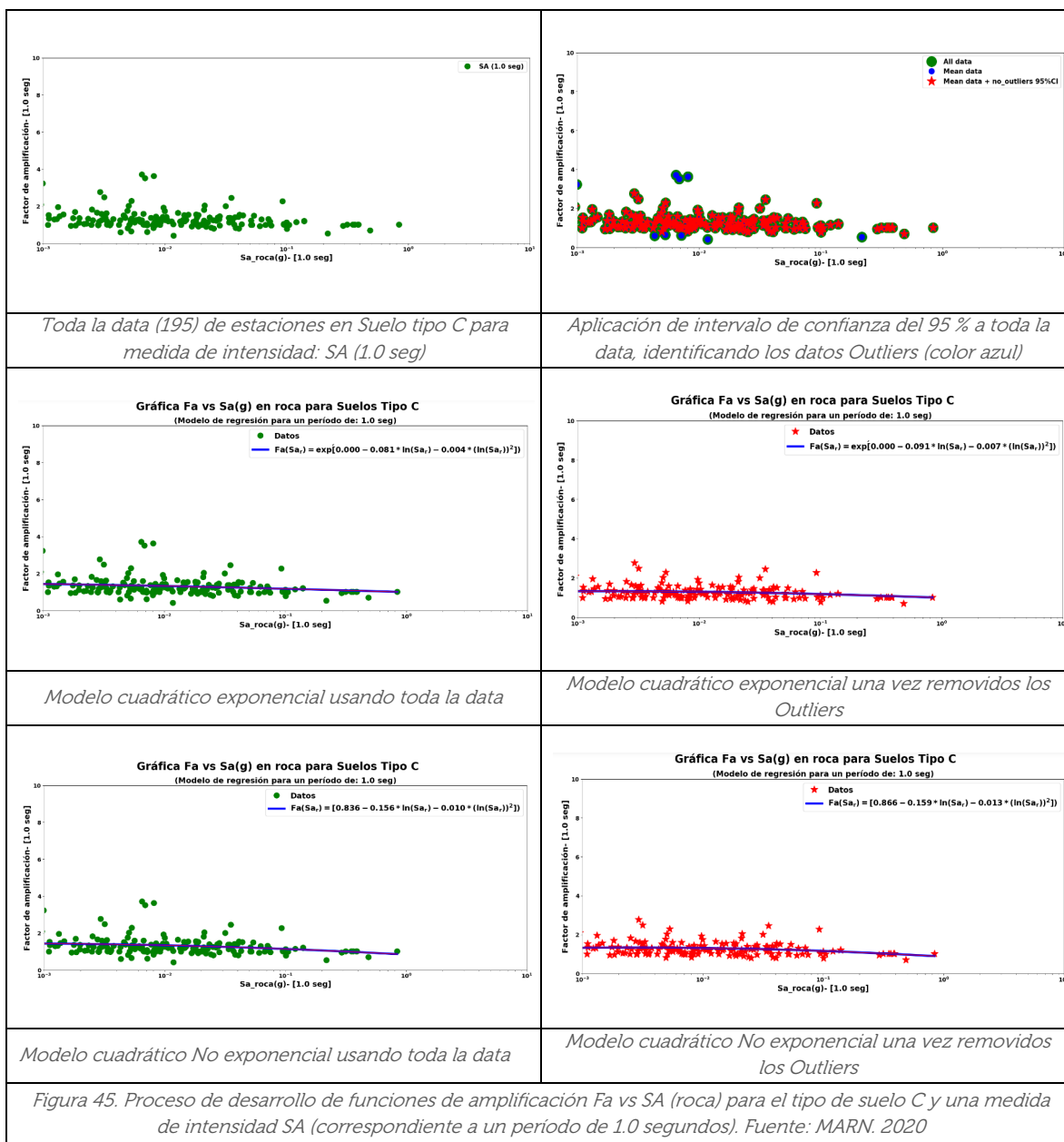
Este procedimiento se realizó para las medidas de intensidad restantes, obteniéndose una gama de factores de amplificación conservadores, que serán colocados en la tabla final de factores junto a los determinados por los modelos analíticos.

4.2. Funciones de amplificación: Suelo tipo C

Para el caso de suelo tipo C, se contabilizan un total de 34 estaciones acelerográficas que se han definido que se encuentran emplazadas en el mismo. Se han utilizado un total de 195 registros acelerográficos correspondientes a 50 eventos sísmicos, que abarcan 40 sismos corticales y 10 sismos de subducción intraplaca. Las aceleraciones máximas del terreno en superficie (PGA) oscilan entre 0.3 a 790 gales.

En las figura compuestas 44 y 45, se observan los resultados de funciones de amplificación para la medida de intensidad de PGA (0.01 seg) y SA (1.0 seg), respectivamente.

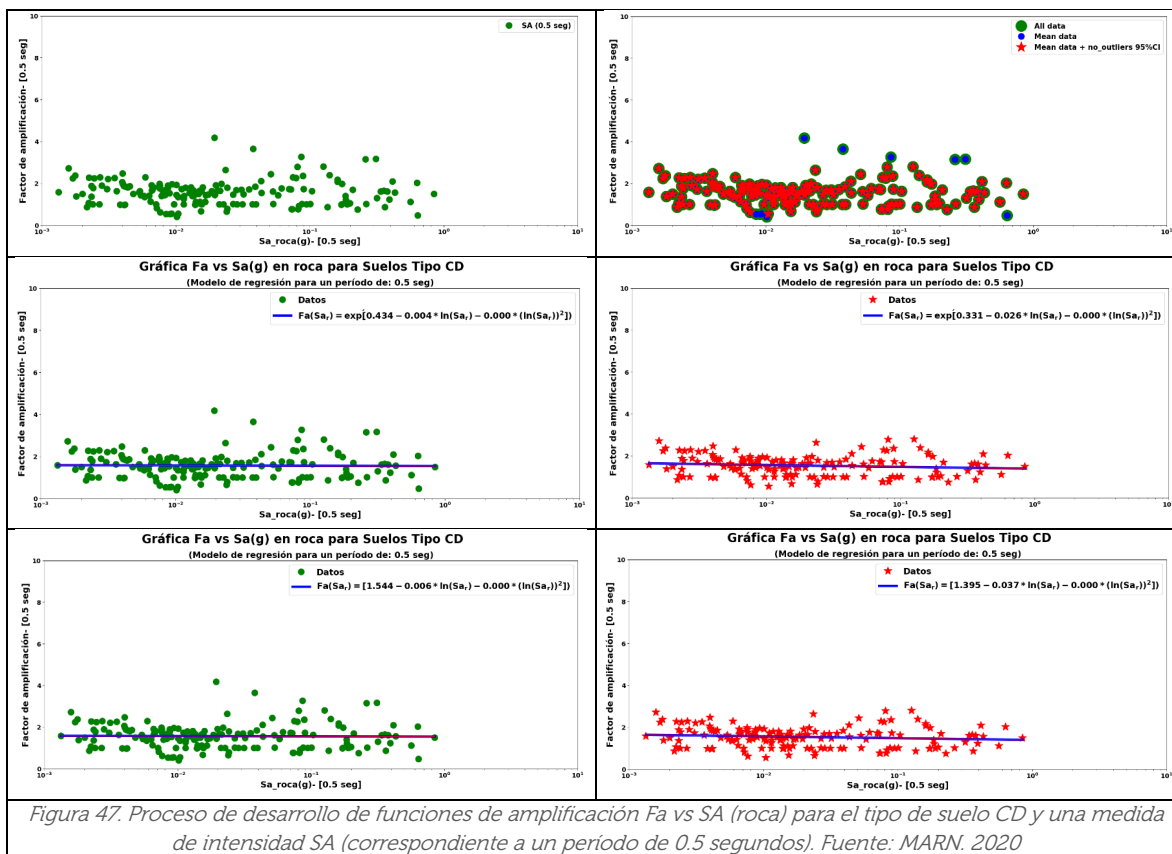
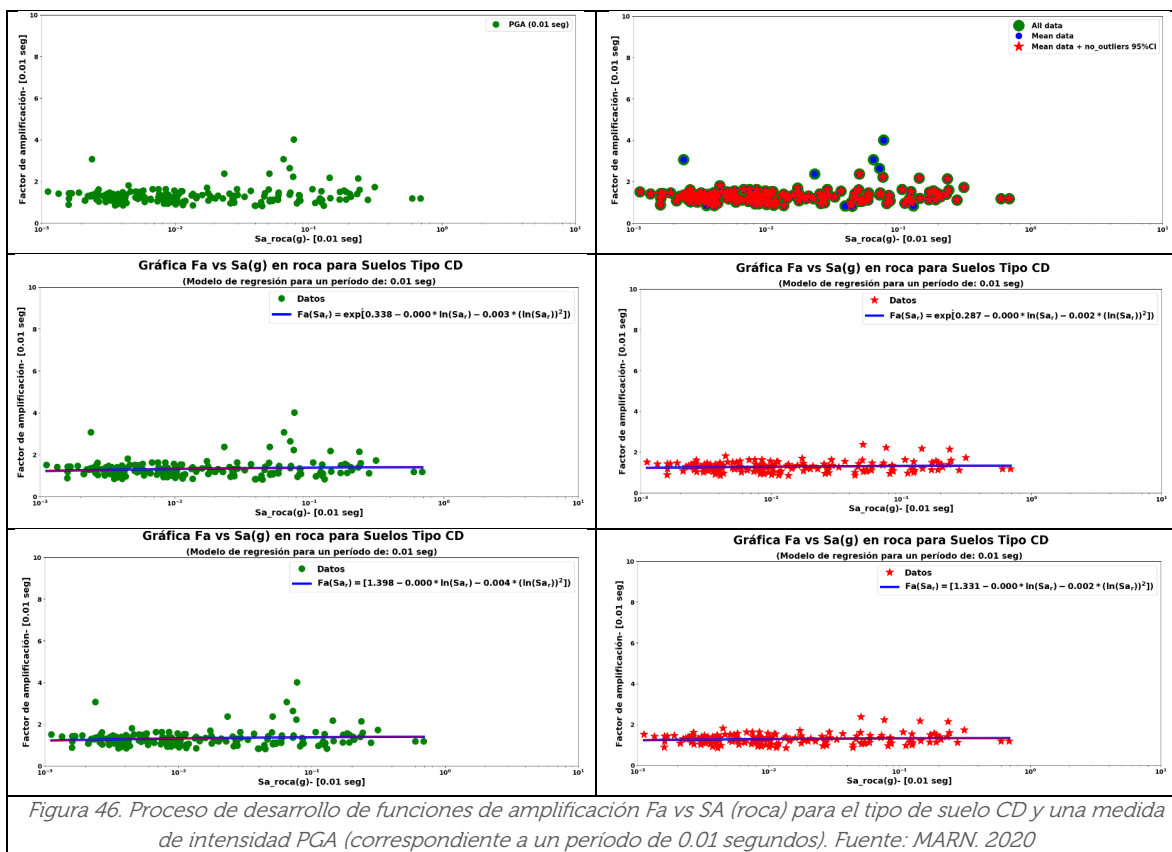




4.3. Funciones de amplificación: Suelo tipo CD

Para el caso de suelo tipo CD, se contabilizan un total de 34 estaciones acelerográficas que se han definido que se encuentran emplazadas en el mismo. Se han utilizado un total de 174 registros acelerográficos correspondientes a 44 eventos sísmicos, que abarcan 34 sismos corticales y 10 sismos de subducción intraplaca. Las aceleraciones máximas del terreno en superficie (PGA) oscilan entre 1.4 a 802 gales.

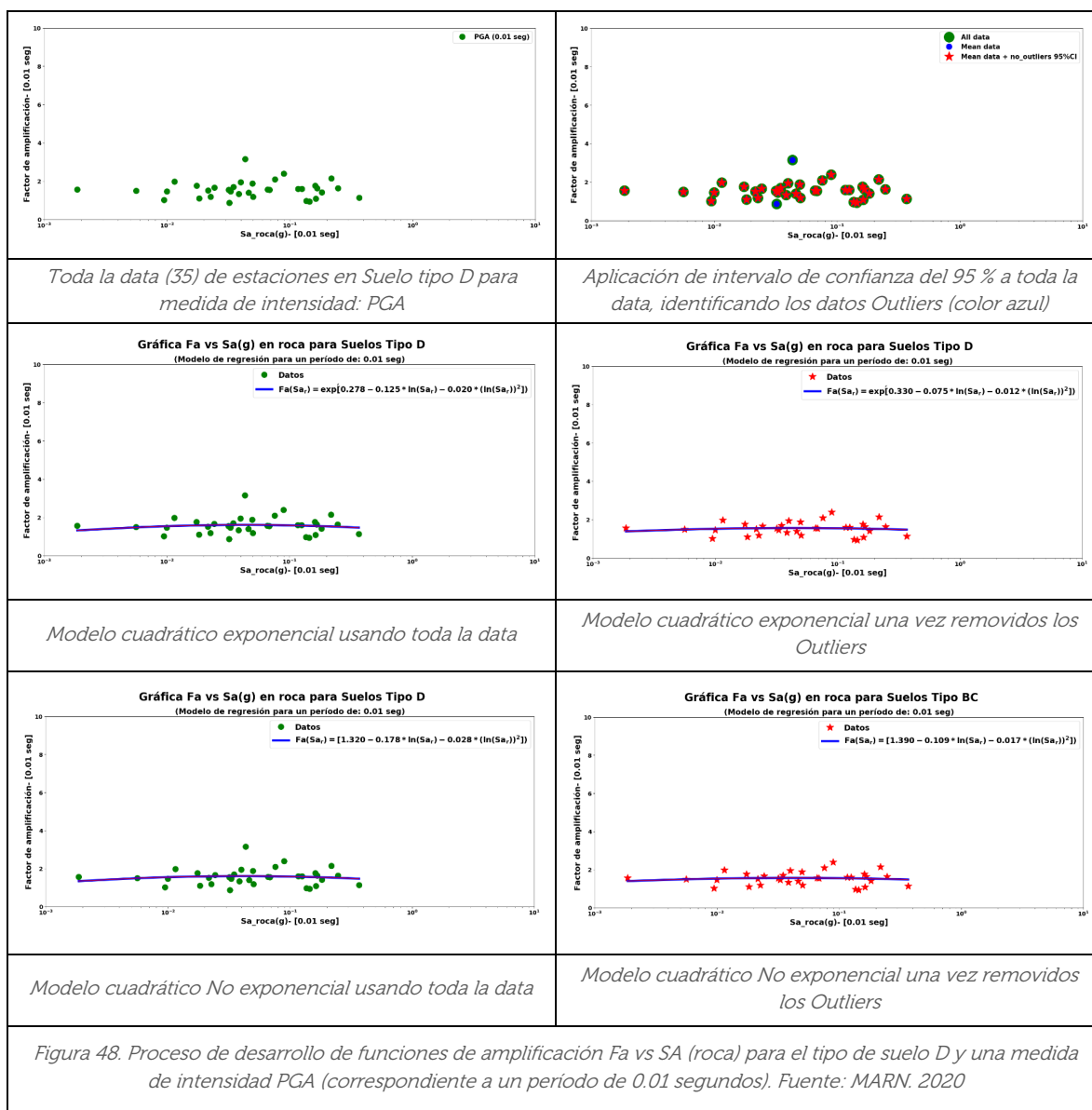
En las figura compuestas 46 y 47, se observan los resultados de funciones de amplificación para la medida de intensidad de PGA (0.01 seg) y SA (0.5 seg), respectivamente.



4.4. Funciones de amplificación: Suelo tipo D

Para el caso de suelo tipo D, se contabilizan un total de 8 estaciones acelerográficas que se han definido que se encuentran emplazadas en el mismo. Se han utilizado un total de 35 registros acelerográficos correspondientes a 28 eventos sísmicos, que abarcan 20 sismos corticales y 8 sismos de subducción intraplaca. Las aceleraciones máximas del terreno en superficie (PGA) oscilan entre 2.8 a 460 gales.

En las figura compuestas 48 y 49, se observan los resultados de funciones de amplificación para la medida de intensidad de PGA (0.01 seg) y SA (2.0 seg), respectivamente.



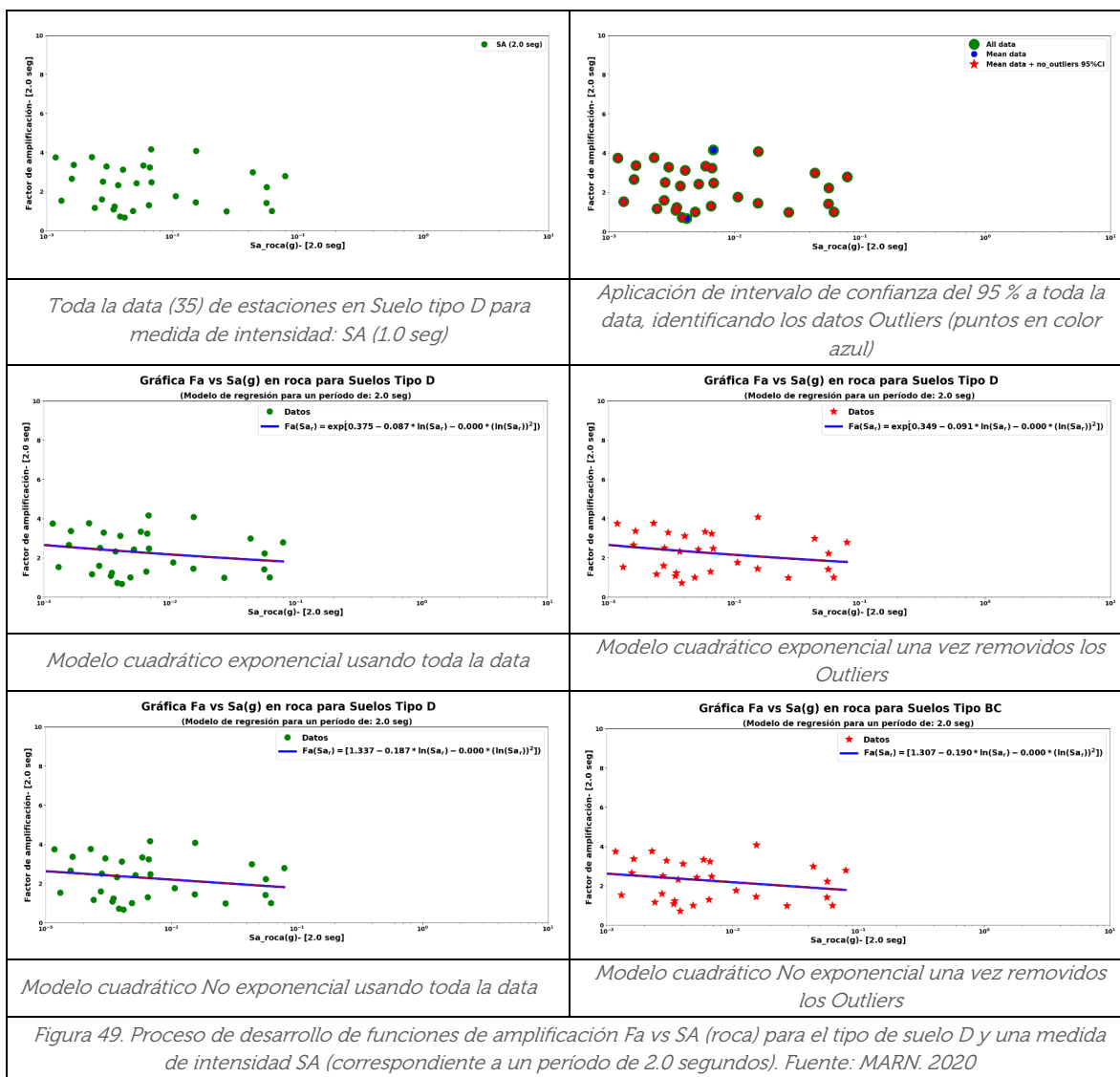


Figura 49. Proceso de desarrollo de funciones de amplificación Fa vs SA (roca) para el tipo de suelo D y una medida de intensidad SA (correspondiente a un periodo de 2.0 segundos). Fuente: MARN. 2020

4.5. Tablas de factores de amplificación

En los siguientes apartados se muestran los resultados de los factores de amplificación para cada tipo de suelo, cada medida de intensidad y períodos estructurales considerados, utilizando las funciones de amplificación deterministas anteriores. Cabe recordar, que no se lograron obtener factores de amplificación para los tipos de suelo DE y E, por lo que al realizar el promedio final con los obtenidos de modelos analíticos, se tomarán los valores de facto resultantes de este método.

Estos factores finales se multiplicarán al espectro de amenaza uniforme en superficie calculado inicialmente en roca y se obtendrá un espectro de amenaza uniforme en superficie. En un futuro, esta tarea se ejecutará de una manera interactiva, para que el usuario tenga la capacidad de obtener un espectro de diseño multiperíodo, acorde al tipo de suelo donde se estaría emplazando la estructura que será diseñada.

4.5.1. Factores de amplificación para PGA [0.01 seg]

	Aceleración máxima de terreno [PGA(0.01 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.15	1.25	1.28	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
C	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
CD	1.32	1.36	1.38	1.39	1.39	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
D	1.53	1.56	1.55	1.54	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.40	1.39	1.34	1.31

4.5.2. Factores de amplificación para SA [0.1 seg]

	Aceleración espectral de terreno [SA(0.1 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.14	1.14	1.14	1.13	1.12	1.11	1.11	1.10	1.09	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.03	1.01
C	1.17	1.23	1.25	1.26	1.26	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
CD	1.29	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
D	1.40	1.38	1.36	1.36	1.35	1.35	1.35	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.32	1.32

4.5.3. Factores de amplificación para SA [0.2 seg]

	Aceleración espectral de terreno [SA(0.2 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.05	1.14	1.17	1.18	1.19	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
C	1.17	1.18	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
CD	1.30	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
D	1.43	1.71	1.68	1.63	1.57	1.52	1.47	1.43	1.39	1.35	1.32	1.29	1.26	1.23	1.21	1.16	1.12	1.08	0.94	0.84

4.5.4. Factores de amplificación para SA [0.3 seg]

	Aceleración espectral de terreno [SA(0.3 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.24	1.36	1.39	1.41	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.43	1.43
C	1.25	1.37	1.40	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.42	1.42	1.42	1.42	1.41	1.39
CD	1.42	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51	1.50	1.50	1.50	1.49	1.49	1.48	1.48	1.48	1.47	1.47	1.46	1.45	1.43	1.41
D	1.89	1.80	1.76	1.74	1.72	1.71	1.70	1.69	1.68	1.67	1.67	1.66	1.65	1.65	1.64	1.64	1.63	1.62	1.60	1.58

4.5.5. Factores de amplificación para SA [0.5 seg]

	Aceleración espectral de terreno [SA(0.5 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.01	1.21	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.18	1.17	1.16	1.14	1.13	1.12	1.11	1.10	1.08	1.06	1.04	0.98	0.92
C	1.34	1.35	1.30	1.26	1.23	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.11	1.10	1.08	1.07	1.06	1.04	1.02	1.00	0.93	0.88
CD	1.57	1.56	1.56	1.56	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
D	2.24	2.13	2.03	1.96	1.90	1.85	1.81	1.78	1.75	1.72	1.70	1.67	1.65	1.63	1.61	1.58	1.55	1.53	1.42	1.35

4.5.6. Factores de amplificación para SA [0.6 seg]

	Aceleración espectral de terreno [SA(0.6 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																			
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.10	1.12	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	0.97	0.95
C	1.36	1.38	1.38	1.37	1.37	1.37	1.37	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35	1.35	1.35	1.35	1.34	1.33	1.33
CD	1.56	1.54	1.54	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.51	1.51
D	2.12	2.18	2.19	2.20	2.20	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21

4.5.7. Factores de amplificación para SA [0.8 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(0.8 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.10	1.10	1.05	1.00	0.96	0.93	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
C	1.26	1.25	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.21	1.21	1.21	1.21
CD	1.60	1.58	1.58	1.57	1.57	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.54	1.54
D	2.53	2.48	2.36	2.26	2.17	2.10	2.04	1.98	1.93	1.88	1.84	1.80	1.76	1.72	1.69	1.63	1.57	1.52	1.30	1.13

4.5.8. Factores de amplificación para SA [1.0 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(1.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.19	1.22	1.23	1.24	1.24	1.24	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
C	1.31	1.23	1.19	1.16	1.14	1.12	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.96	0.94
CD	1.67	1.66	1.65	1.65	1.65	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
D	2.45	2.47	2.40	2.34	2.29	2.25	2.21	2.18	2.14	2.11	2.09	2.06	2.03	2.01	1.99	1.95	1.91	1.88	1.73	1.63

4.5.9. Factores de amplificación para SA [1.5 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(1.5 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
C	1.26	1.19	1.16	1.14	1.12	1.11	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.04	1.03	1.01	0.99
CD	1.47	1.32	1.26	1.23	1.21	1.19	1.18	1.16	1.15	1.15	1.14	1.13	1.12	1.12	1.11	1.10	1.10	1.09	1.06	1.04
D	2.49	2.24	2.04	1.91	1.81	1.73	1.67	1.61	1.57	1.52	1.48	1.45	1.42	1.39	1.36	1.32	1.28	1.24	1.10	1.01

4.5.10. Factores de amplificación para SA [2.0 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(2.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.22	1.16	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	0.97	0.96
CD	1.48	1.37	1.33	1.30	1.28	1.27	1.26	1.25	1.24	1.24	1.23	1.22	1.22	1.21	1.21	1.20	1.20	1.19	1.17	1.15
D	2.16	1.86	1.75	1.68	1.64	1.61	1.58	1.56	1.54	1.52	1.51	1.50	1.49	1.47	1.46	1.45	1.43	1.42	1.37	1.33

4.5.11. Factores de amplificación para SA [2.5 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(2.5 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.11	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
CD	1.27	1.25	1.25	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22
D	1.16	1.10	1.08	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.98

4.5.12. Factores de amplificación para SA [3.0 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(3.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 períodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.04	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
CD	1.26	1.20	1.16	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.00	0.97	0.94
D	1.11	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.15

5. Conclusiones, recomendaciones y comentarios finales

- En las tres técnicas empleadas para estimar empíricamente el efecto de sitio (utilizando registros acelerográficos) se considera únicamente los movimientos horizontales, asumiendo que con estas componentes se generaría la mayor contribución en la amplificación del terreno; alineándose con la hipótesis que la dirección de la propagación de las ondas sísmicas a lo largo del subsuelo es cuasi-vertical y va a atravesando las diferentes capas de configuración horizontal.
- Un total de doce medidas de intensidad y periodos estructurales asociados han sido evaluados en este trabajo; a los cuales se les ha determinado sus correspondientes factores de amplificación. Estos son los siguientes: PGA, SA(0.1s), SA(0.2 s), SA(0.3 s), SA(0.5 s), SA(0.6 s), SA(0.8 s), SA(1.0 s), SA(1.5 s), SA(2.0 s), SA(2.5 s) y SA(3.0 s).
- El territorio nacional ha sido dividido en cinco tipos de suelo de acuerdo a la clasificación propuesta por NEHRP en el año 2020, cuyas divisiones se encuentran en función de la variación de la velocidad de ondas de corte de los primeros 30 superiores; y a las cuales se les ha integrado las diferentes unidades geológicas encontradas en los pozos perforados, desde un punto de vista de edades geológicas, orígenes eruptivos, descripciones físicas y geomecánicas. Los cinco tipos de suelo son: BC (Vs30: 640-910 m/s), C (Vs30: 440-640 m/s), CD (Vs30: 300-440 m/s), D (Vs30: 210-300 m/s) y DE (Vs30: 150-210 m/s).
- El tipo de suelo DE no se pudo caracterizar, debido a que no se encontraron estaciones acelerográficas emplazadas en ese tipo de suelo (de acuerdo al mapa de Vs30). Por lo que, únicamente se pudieron generar funciones de amplificación para los cuatro tipos de suelo restantes.
- El mapa de Vs30 fue elaborado a través de la búsqueda y recopilación de información relacionada principalmente en valores de velocidad de corte medidos directamente en pozos de perforación (realizadas por MARN, MOP, OPAMSS, CEL y empresas privadas), acompañada de información geológica en profundidad, estudios de microtrepidación, información litológica en superficie (afloramientos) en algunos sectores a nivel nacional suministrada por geólogos que han trabajado para la caracterización vulcanológica del país, y otros estudios de investigación afines a este mismo tema. Dentro de la información recopilada, fue evidente la calidad de la misma, la cual se tomó en consideración al momento de ser utilizada
- La delimitación de las zonas del mapa de Vs30 fueron construidas mediante la generación de modelos estadísticos espaciales que fueron configurados a través de la utilización de herramientas de aprendizaje supervisado (machine learning) manejando como variable objetivo el valor numérico de Vs30 (problema de

regresión), o bien considerando variables categóricas como las clases de tipo de suelo, según la NEHRP 2020 (problema de clasificación). Se aplicaron las técnicas de los algoritmos de Random Forest con Predicción espacial (Rfsp) y la Técnica de redes de neuronas artificiales

- En la determinación de factores para generar las funciones de ampliación (Fa vs SA_roca) para cada tipo de suelo, no se tomaron en cuenta las amplificaciones relativas obtenidas de la técnica de Nakamura (Horizontal to Vertical Spectral Ratio: HVSR), debido a que no se tiene control sobre una posible variación acentuada en el contraste de velocidades (impedancia) de las onda de cuerpo (S) entre los diferentes estratos someros dentro de una columna de suelo; especialmente en la estratigrafía heterogénea y compleja que existe en ciertos sectores del país.
- De igual manera, esta variación en el contraste de impedancias puede repercutir en los factores determinados por la técnica de Borcherdt (Standard Spectral Ratio: SSR). Sin embargo, se optó por registrar estos factores dados la concepción teórica de la misma, ya que se evalúa exactamente su definición: la amplificación del movimiento sísmico observada en un sitio sobre sedimentos con respecto al movimiento registrado para el mismo sismo sobre roca dura; donde en esta ocasión, se utilizará una variante de dicha técnica, basada en la utilización de cocientes espectrales de aceleración y no de espectros de Fourier.
- Al existir variaciones marcadas en el contraste de impedancia entre capas de una columna de suelo (especialmente capas someras), se podría tener un escenario donde se coexista con el atrapamiento de ondas superficiales (principalmente ondas Rayleigh) en dichas capas, las cuales influirían notablemente en la amplificación; obligando a que la componente vertical del registro acelerográfico también presente cierto grado de amplificación; quebrantando así las condiciones que plantean las técnicas SSR y HVSR.
- Para enmendar una de las limitaciones de la técnica SSR respecto a la seguridad en la eliminación de la influencia del trayecto (cumpliendo que la distancia entre los sitios de análisis con el de referencia sea despreciable en relación a la distancia hipocentral), y que no se repercuta en el cálculo de los factores de amplificación, se utiliza una variación donde el denominador del cociente (atribuido a la aceleración espectral de la estación de referencia situada en suelo rocoso) fuera multiplicado por otro cociente que involucraría la relación entre las distancias hipocentrales (al evento sísmico en cuestión) entre la estación de análisis (situada en suelo) y la de referencia (situada en roca).
- La estación de referencia para la técnica SSR se ubica en la ciudad de Panchimalco en San Salvador, donde sus rocas volcánicas observadas en sus afloramientos datan

de la era geológica del Terciario. Una medición de microtemores proporcionó un período predominante bajo (0.08 seg) característico de suelos muy competentes. Asimismo, se determinó su valor de Vs30, el cual resultó mayor a los 500 m/s.

- Para la caracterización de los resultados de las técnicas de SSR y HVSR se han utilizado ventanas frecuenciales, con el objetivo de poder discriminar aquellas frecuencias donde se observe que la componente vertical se amplifica considerablemente en relación a la horizontal. Las ventanas de frecuencias son las siguientes: a) Alta frecuencia (10 – 25 Hertz) – Período Corto (0.04 – 0.10 segundos), b) Moderada frecuencia (1 – 10 Hertz) – Período Moderado (0.1 – 1.0 segundos), c) Baja frecuencia (0.5 – 1 Hertz) – Período Alto (1.0 – 2.0 segundos) y d) Muy Baja frecuencia (0.1 – 0.5 Hertz) – Período Muy Alto (2.0 – 10 segundos).
- La técnica de la razón espectral H/V (HVSR) solo se utilizará únicamente para determinar frecuencias predominantes en los registros acelerográficos de estaciones particulares; con el objetivo de ir caracterizando los sitios; y observar cuales son los períodos que pudiesen verse activados al registrarse un evento sísmico.
- Para extraer las frecuencias predominantes utilizando la técnica de HVSR se utilizarán ventanas que abarquen secciones propias de la forma de onda del registro acelerográfico, que ayudarán a que las suposiciones de la técnica de Nakamura se sigan cumpliendo. Estas secciones serán específicamente de la parte intensa de las ondas S directa y la fase CODA.
- Al utilizar la ventana de la parte intensa, se garantiza que en su mayoría las ondas S, estarán contenidas en los componentes horizontales, ofreciendo una mejor estimación en las amplificaciones locales.
- Respecto a la utilización de la ventana de la CODA, se busca representar un escenario de medición de ruido ambiental o microtemores; donde exista un análisis explícito en la remoción del efecto de las ondas Rayleigh.
- Determinar una serie de rangos de períodos predominantes que podría experimentar el suelo a lo largo de su historia frente a sismos (considerando la no-linealidad del mismo), es sumamente importante, principalmente al momento de determinar espectros de diseño sísmico por zonas y el cálculo de los respectivos factores de amplificación para períodos estructurales de interés ingenieril.
- La técnica de ajuste óptimo de modelos de atenuación (GMPEs), es considerada como una alternativa práctica en virtud de poder utilizar análisis estadísticos y probabilísticos que permitan la búsqueda en la reducción de los residuales que existen entre una observación real de movimiento fuerte con la de una predicción

en determinado lugar, así como la reducción de las incertezas aleatorias inherentes a los modelos de atenuación, a partir de un modelo empírico de atenuación (GMPEs); para cada uno de los períodos estructurales de interés.

- Los GMPE rara vez están limitados por datos de un sitio específico, a una falla o incluso a una región, porque generalmente se construyen sobre la base de más conjuntos globales de datos de regiones de características sismotectónicas similares (o no tan similares). Por lo anterior, en esta técnica de selección óptima de GMPEs se realiza teniendo el cuidado de seleccionar los ambientes tectónicos correspondientes a la naturaleza del registro acelerográfico.
- Para mantener una congruencia con la selección de los GMPEs, se llevó a cabo un proceso de exclusión de modelos, cuya concepción presenta propiedades desfavorables que se alejen de la realidad tectónica de nuestro país.
- Dentro del desarrollo de esta técnica de ajuste óptimo de GMPEs, se busca determinar el ajuste para cada medida de intensidad (MeIn) de cada registro acelerográfico; debido a que no siempre un modelo que se ajuste a la medida PGA se ajustará para una aceleración espectral (SA), esto ayuda con la idea de ir minimizando los residuales y las respectivas incertezas de los modelos.
- El primer grupo definido para la técnica del ajuste óptimo de GMPEs, consiste en determinar que modelos se ajustan mejor a un compilado de registros (provenientes de una serie de eventos) de la misma fuente sísmica. Obteniéndose valores de incertezas aleatorias (inter e intra-evento), no minimizadas completamente.
- El segundo grupo definido para la técnica del ajuste óptimo de GMPEs, se basa en analizar un solo evento sísmico y encontrar que modelos se ajustan mejor a los registros del mismo; logrando eliminar la incerteza inter-evento, y únicamente considerar la variabilidad entre los sitios donde se ubican las estaciones.
- El tercer grupo definido para la técnica del ajuste óptimo de GMPEs, es el que se utilizará para determinar los factores de amplificación empíricos. Con este grupo se busca establecer con mayor detalle los modelos que se ajustan para cada registro de una estación en particular, aún sean parte del mismo evento sísmico; logrando así minimizar completamente las incertezas inter e intra-evento. Por ello, este procedimiento requiere un mayor tiempo de procesamiento.
- Del análisis de las funciones de transferencia obtenidas de la técnica de ajuste óptimos de GMPEs, se pudo evidenciar que para la estación de Panchimalco (tomada como referencia para la técnica de cocientes espectrales, SSR), la mayoría de factores de amplificación se encontraban por debajo de la unidad, mostrando evidencias de

deamplificaciones y/o a veces amplificaciones muy pequeñas; lo cual es congruente con el marco geológico existente en dicha estación.

- Dentro del desarrollo de la técnica de ajuste óptimo de GMPEs se analizó la sensibilidad en la utilización de modelos que únicamente soportan distancias particulares, como lo son la de ruptura (Rrup), Hipocentral (Rhypo) y Epicentral (Repi). No obstante, los factores empíricos de amplificación que son utilizados para que se concatenen con los que se han obtenido por métodos analíticos, son aquellos derivados del Grupo No.3, es decir, utilizando el método de Verosimilitud logarítmica y aquellos que utilizan la distancia hipocentral en sus parámetros sísmicos.
- En el desarrollo de estas funciones se realiza un análisis estadístico de los datos, con el fin de eliminar valores atípicos de factores (conocidos como Outliers) que podrían afectar el valor promedio de la función. El artificio utilizado fue considerar un intervalo de confianza del 95%, se colocaron cuantiles de 0.025 y 0.975; de modo que al menos el 95% de la probabilidad de los factores de amplificación se encuentren dentro del área central de una distribución normal de datos.
- En los análisis de las funciones de amplificación, se considera tanto toda la data y utilizando la data que se mantienen al remover los "Outliers"; expresando el ajuste de resultados, tanto con un modelo cuadrático exponencial y uno No exponencial; con el objetivo de tener diversos valores de amplificación y al final seleccionar el factor más conservador.

6. Referencias bibliográficas

- Borchedt, D. [1970] Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 60, No.1
- Borchardt, R.D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake Spectra 10(4), 617-653
- Chávez-García, Francisco J, & Montalva, Gonzalo A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. Obras y proyectos, (16), 6-30. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>
- Dobry, Ricardo & Borchardt, Roger & Crouse, C. & Idriss, I. & Joyner, W. & Martin, Geoffrey & Power, M. & Rinne, E. & Seed, R.. (2000). New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions. Earthquake Spectra. 16. 41-67. 10.1193/1.1586082.
- DTO-VS30: Documento generado en el MARN en el año 2020, llamado: "Generación de mapa de velocidades promedio a 30 metros de profundidad (Vs30) de El Salvador", desarrollado por Luis Mixco.
- DTO-AMENAZA2019: Documento generado en el MARN en el año 2019, llamado: "Reevaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador", desarrollado por Luis Mixco.
- DTO-ANALITICOS2020: Documento generado en el MARN en el año 2019, llamado: "Modelos analíticos para análisis de respuesta de sitio a nivel nacional y 16 sitios específicos.
- Halldorsson, Benedikt & Olivera, C.I. & Rahpeyma, Sahar & Olafsson, Simon & Green, Russell & Snæbjörnsson, Jónas. (2016). On the HVSR estimation at Icelandic strong-motion stations.
- Ktenidou, Olga-Joan & Roumelioti, Zafeiria & Cotton, Fabrice & Pitilakis, Kyriazis & Hollender, Fabrice. (2018). Understanding single-station ground motion variability and uncertainty (sigma): lessons learnt from EUROSEISTEST. Bulletin of Earthquake Engineering. Accepted. 10.1007/s10518-017-0098-6.
- Lermo, Javier & Chávez-García, Francisco J.: Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bulletin of the Seismological Society of America 1993;; 83 (5): 1574–1594

- Margheriti, Lucia & Boatwright, John & Wennerberg, Leif. (1994). A comparison of coda and S-wave spectral ratios as estimates of site response in the Southern San Francisco Bay Area. Bulletin of the Seismological Society of America. 84.
- MARN-BID- Canizales, R. Sistematización de métodos empíricos para la determinación de amplificaciones por efectos de sitio, Abril 2019
- Panzera, Francesco & Lombardo, Giuseppe & D'Amico, Sebastiano & Galea, Pauline. (2013). Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities. 10.5772/55439.
- Power, M. & Borchardt, Roger & Stewart, J.. (2004). Site amplification factors from empirical studies, Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California. Univ. Calif., Berkeley, NGA project report, Working Group #5, 32 pp.
- Ritta et al. Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral horizontal/vertical, 2012.



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

www.marn.gob.sv | medioambiente@marn.gob.sv

