



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA DEL PUENTE ÁGUILA NORTE Y USO DE
LAPONITA EN SU RESPUESTA DE SITIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAFAEL MATÍAS CASTRO AGUAYO

PROFESOR GUIA:
FELIPE OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO
CÉSAR PASTÉN PUCHI

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto FONDECYT 11181252 y
FONDEF

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: RAFAEL CASTRO A.
FECHA: 20/05/2020
PROF. GUÍA: SR. FELIPE OCHOA C.

ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA DEL PUENTE ÁGUILA NORTE Y USO DE LAPONITA EN SU RESPUESTA DE SITIO.

Este trabajo presenta un estudio de amenaza sísmica desarrollado para el puente Águila Norte, ubicado en la salida sur de Santiago, junto con la evaluación de un posible mejoramiento de suelo para el mismo sector. La primera parte del trabajo se desarrolló usando las metodologías determinística y probabilística. Se consideró el uso de las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte más actualizadas aplicables para la sismicidad chilena (GMPE), estimando la sollicitación sísmica en roca superficial, y propagando la onda sísmica a la superficie a través de la teoría unidimensional de ondas de corte, considerando un perfil de suelo representativo del sector en estudio, obtenido en trabajos paralelos a través de métodos de ondas superficiales. El cálculo de los espectros se definió considerando el valor medio de las GMPE, así como el valor medio más una desviación estándar. Respecto a la propagación unidimensional de ondas, para evaluar el efecto de sitio, esta se realizó mediante un análisis lineal como y un análisis lineal equivalente, a través del software “Deepsoil”.

Los resultados del estudio determinístico variaron según el tipo de análisis. El análisis que utiliza el valor medio en la construcción del espectro de respuesta entrega resultados consistentes con lo registrado para grandes sísmicos históricos. El análisis que considera el valor medio más una desviación estándar entrega resultados muy conservadores para períodos bajos, con aceleraciones que pueden alcanzar dos veces los valores alcanzados al no considerar la desviación. Con respecto a la propagación unidimensional de la onda, se observa que al implementar un análisis lineal equivalente se obtienen amortiguamientos muy altos, que pueden alcanzar incluso valores de un 16% de tasa de amortiguamiento crítico, lo cual se explica en el hecho que se somete el perfil de suelo a una gran sollicitación sísmica, basada en sismos de diseño, lo que produce grandes deformaciones de corte. Esta observación sugiere que el realizar un análisis lineal, considerando el amortiguamiento constante igual a un 5%, entrega valores ingenierilmente más razonables.

Con respecto al estudio probabilístico, los resultados obtenidos son similares a los casos más conservadores analizados con la metodología determinística, destacando la importancia de la elección del catálogo sísmico en los resultados obtenidos, así como la regionalización determinada.

Finalmente, el estudio de mejoramiento de suelo se realiza mediante el modelo PDMY02, disponible en “OpenSees”, reemplazando los 10 [m] más superficiales de un perfil característico de la región de Paine, por arena limpia de Ottawa. Esta arena se somete a mejoramientos con un 3% de bentonita, y también se mejora con un 1% de laponita. Se observa, en general, que el suelo mejora ante la presencia de estos finos altamente plásticos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi madre por su paciencia, amor, apoyo y almuerzos. A mi padre, por su constancia, esfuerzo y sostén. Sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mi hermana por su compañía y su auto y a mi hermano por su buena salud.

A mi abuela, siempre recordaré tu cariño y tu talento para las masas y los asados. Lamento no haber podido darte esta alegría antes.

A mi sobrina y a la Canela. Ambas con sus ojitos brillosos son una inspiración para el día a día.

A mi Profesor guía, Felipe Ochoa, por su constante apoyo y preocupación durante el desarrollo del trabajo y a mis profesores Francisco Hernández y César Pastén, sin sus observaciones y buena disposición este trabajo no hubiera sido posible.

A Vicente Mercado, infinitas gracias por el apoyo y las rutinas.

A José, Sergio y a todos quienes aportaron algún dato u opinión para llevar a cabo mi tesis.

Finalmente, a mis amigos Daniel, Francisco, Matías Fuentes, Murci y Pablo, por los buenos momentos vividos y en especial a Matías Ávila por la buena disposición, comentarios y apoyo. El tiempo compartido con ustedes fue de vital importancia para mantener la sanidad mental.

Esta tesis fue parcialmente financiada por proyecto FONDECYT 11181252 y el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF), en el marco del proyecto de bases y recomendaciones para complementar el análisis sísmico de puentes viales del Manual de Carreteras.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	ii
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Alcances y Objetivos	2
1.2.1 Objetivos generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Organización de la Memoria.....	2
2 Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Tipos de Sismo.....	4
2.1.1 Tipos de Sismos en Chile	4
2.2 Ecuaciones de predicción de movimiento fuerte	5
2.2.1 Montalva et al. (2017):	6
2.2.2 Idini et al. (2017):	8
2.2.3 Idriss et al. (2014).....	10
2.2.4 Graizer & Kalkan (2016)	11
2.3 Métodos de ajuste espectral (spectral matching)	14
2.4 Comportamiento cíclico de suelos.....	15
2.5 Módulo de corte.....	16
2.5.1 Razón de amortiguamiento.....	17
2.6 Modelos Constitutivos	18
2.7 Herramientas computacionales	18
2.7.1 DEEPSOIL.....	18
2.7.2 OpenSees.....	19
2.8 Modelo PDMY02	19
2.8.1 Modelo constitutivo	19
2.8.2 Superficie de fluencia	20
2.8.3 Respuesta esfuerzo-deformación	22
2.8.4 Regla de flujo.....	23
2.8.5 Detalle de parámetros del modelo PDMY02.....	24
2.9 Efecto de sitio.....	25
2.10 Licuación.....	25
2.11 Materiales granulares.....	26
3 Metodología	28
3.1 Enfoque determinístico para la amenaza sísmica	28

3.2	Enfoque probabilístico para la amenaza sísmica	31
3.3	Procesamiento de registros.....	37
3.4	Mejoramiento de suelo	37
4	Antecedentes de la zona de estudio	38
4.1	Suelo en la zona de estudio	39
4.2	Modelo de velocidades de onda de corte asociadas al sector	40
4.3	Caracterización dinámica del sitio	41
5	Estudio Determinístico	42
5.1	Sismos de diseño	42
5.2	Espectros objetivo	44
5.3	Registros semilla	46
5.4	Ajuste espectral.....	54
5.4.1	Espectros modificados considerando la desviación estándar.....	54
5.4.2	Acelerogramas compatibles considerando la desviación estándar.....	58
5.4.3	Espectros modificados considerando el promedio.....	62
5.4.4	Acelerogramas espectro compatibles considerando promedio.....	66
5.5	Propagación unidimensional de ondas de corte	70
5.6	Resultados propagación análisis lineal	72
5.6.1	Espectros producto del promedio más una desviación estándar.....	72
5.6.2	Acelerogramas considerando desviación estándar	77
5.6.3	Espectros producto del promedio	82
5.6.4	Acelerogramas considerando el promedio.....	86
5.7	Propagación lineal equivalente.....	91
5.7.1	Espectros producto de promedio más desviación estándar.....	91
5.8	Espectro propuesto determinístico	96
6	Estudio Probabilístico	97
6.1	Aceleración máxima	97
6.2	Espectro de amenaza uniforme.....	100
6.3	Ajuste espectral.....	101
6.3.1	Espectros modificados.....	101
6.3.2	Acelerogramas modificados.....	105
6.4	Resultados propagación análisis lineal	109
6.4.1	Espectros de análisis lineal.....	109
6.4.2	Acelerogramas modificados.....	113
6.5	Espectro propuesto probabilístico	117
7	Mejoramiento de suelo.....	118

7.1	Calibración del modelo.....	118
7.2	Resultados Propagación	123
7.2.1	Presión de poros.....	123
7.2.2	Aceleración superficial.....	124
7.2.3	Deformación angular	126
8	Discusión y Recomendaciones.....	127
8.1	Observaciones relativas al riesgo sísmico	127
8.2	Observaciones sobre uso de laponita en la respuesta de sitio.....	130
9	Conclusiones	131
10	Bibliografía.....	133
11	Anexos	137
11.1	Coeficientes utilizados en la GMPE de Montalva et al. (2017).....	137
11.2	Coeficientes utilizados en la GMPE de Idini et al (2017).....	141
11.3	Coeficientes utilizados en la GMPE de Idriss (2014)	144
11.4	Coeficientes utilizados en la GMPE de Graizer & Kalkan (2016).....	146
11.5	Registros espectro compatibles mediante análisis lineal equivalente.....	147
11.6	Espectros considerando valor promedio, análisis LE.....	150
11.7	Registros compatibles considerando valor promedio, análisis LE	153
11.8	Espectros propuestos para análisis lineal equivalente.....	156

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros recomendados para ajuste espectral. Adaptado de Adekristi & Eatherton, 2015.....	15
Tabla 2.2 Resumen propiedades de los materiales a considerar (El Mohtar, 2008; Ochoa, 2015; Mercado et al. 2019).	27
Tabla 4.1 Modelo de velocidades de onda de corte con mejor ajuste (Grand, 2019).....	41
Tabla 5.1 Resumen de registros semillas considerados.	46
Tabla 5.2 Recomendaciones de curvas de degradación a utilizar (Aditya & Anbazhagan, 2015).....	70
Tabla 6.1 Período de retorno y PGA dada probabilidad de excedencia, utilizando diversas combinaciones de GMPE y regionalización.	99
Tabla 7.1 Perfil característico de la zona de estudio	118
Tabla 7.2 Resultados de ajuste de parámetros c_1 y c_3	118
Tabla 11.1 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017).....	137
Tabla 11.2 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación.....	138
Tabla 11.3 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación.....	139
Tabla 11.4 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación.....	140
Tabla 11.5 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Idini et al. (2017), primera regresión	141
Tabla 11.6 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte idini et al. (2017), segunda regresión.....	142
Tabla 11.7 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Idini et al. (2017), coeficientes del suelo y continuación de coeficientes de segunda regresión.....	143
Tabla 11.8 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte Idriss (2014), Para $V_{S30} \geq 450$ [m/s] y $M_w \leq 6.75$	144
Tabla 11.9 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte Idriss (2014), Para $V_{S30} \geq 450$ [m/s] y $M_w \geq 6.7$	145
Tabla 11.10 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte. Graizer & Kalkan (2016).....	146

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema de las diferentes fuentes sísmicas presentes. Fuente: Leyton et al, 2014.	5
Figura 2.2 Curva histerética de ciclo carga y descarga. Modificado de Pastén (2007) .	15
Figura 2.3 Degradación de rigidez a distinta deformación. Modificado de Kramer (1996)	16
Figura 2.4 Razón de amortiguamiento	17
Figura 2.5 Superficies de fluencia cónicas en el plano de los esfuerzos principales y en el plano deviatorico. Modificado de Yang et al. (2003).....	21
Figura 2.6 Relación entre la curva esqueleto y las superficies de fluencia, en el plano de esfuerzos deviatoricos. Modificado de Mercado et al. (2019)	22
Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología para estudio determinístico.....	30
Figura 3.2 Regionalizaciones del territorio chileno consideradas en este estudio. A la derecha, la regionalización propuesta por Susa (2004). Modificado de Núñez et al. (2015). A la izquierda regionalización propuesta por Poulos. Fuente: Poulos et al. (2019).....	32
Figura 3.3 Diagrama de flujo de metodología para estudio probabilístico	36
Figura 4.1 Puente Águila Norte, vista sur poniente. Fuente: Grand (2019).....	38
Figura 4.2 División administrativa de la zona en estudio. Se destaca con una estrella roja la ubicación del puente Águila Norte. Modificado de Contreras (2012).....	39
Figura 4.3 Espesor de sedimentos [m]. Modificado de González et al. 2018. La estrella marca la zona del puente Águila Norte..	40
Figura 5.1 Distancia entre el puente Águila Norte (estrella roja) y el área de ruptura de hipotético sismo de diseño interplaca.....	43
Figura 5.2 Distancia entre puente Águila Norte (estrella roja) y extensión de la falla de San Ramón (línea verde).	43
Figura 5.3 Espectros objetivos para sismo interplaca considerando roca superficial.....	44
Figura 5.4 Espectros objetivos para sismo intraplaca considerando roca superficial	45
Figura 5.5 Espectros objetivos para sismo superficial considerando roca superficial ...	45
Figura 5.6 Registros semillas empleados para sismo de diseño interplaca.....	47
Figura 5.7 Registros semillas empleados para sismo de diseño intraplaca.	48
Figura 5.8 Registros semillas empleados para sismo de diseño superficial.....	49
Figura 5.9 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño interplaca.....	51
Figura 5.10 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño intraplaca.....	52
Figura 5.11 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño superficial.	53
Figura 5.12 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño interplaca, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	55
Figura 5.13 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño intraplaca, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	56
Figura 5.14 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño superficial, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	57
Figura 5.15 Registros espectro compatibles para sismo de diseño interplaca, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	59
Figura 5.16 Registros espectro compatibles para sismo de diseño interplaca, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	60

Figura 5.17 Registros espectro compatibles para sismo de diseño superficial, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	61
Figura 5.18 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño interplaca, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	63
Figura 5.19 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño intraplaca, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	64
Figura 5.20 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño superficial, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	65
Figura 5.21 Registros espectro compatibles para sismo de diseño interplaca, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	67
Figura 5.22 Registros espectro compatibles para sismo de diseño intraplaca, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	68
Figura 5.23 Registros espectro compatibles para sismo de diseño superficial, considerando valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	69
Figura 5.24 Curva de degradación y amortiguamiento para gravas (Rollins et al. 1998)	71
Figura 5.25 Curva de degradación y amortiguamiento para arenas. Valor promedio y límites (Seed & Idriss, 1970).	71
Figura 5.26 Curva de degradación y amortiguamiento para arcillas (Vucetic & Dobry, 1991).	72
Figura 5.27 Espectros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	74
Figura 5.28 Espectros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	75
Figura 5.29 Espectros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	76
Figura 5.30 Amplificación para propagación lineal con amortiguamiento del 5%.	77
Figura 5.31 Registros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	78
Figura 5.32 Registros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	79
Figura 5.33 Registros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo. ..	80
Figura 5.34 Variación de PGA en profundidad para distintos sismos, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	81
Figura 5.35 Variación de la razón de amortiguamiento en profundidad para distintos sismos, mediante un análisis lineal, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	81
Figura 5.36 Espectros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	83
Figura 5.37 Espectros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	84
Figura 5.38 Espectros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo. ...	85
Figura 5.39 Registros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	87

Figura 5.40 Registros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo	88
Figura 5.41 Registros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.....	89
Figura 5.42 Variación de PGA en profundidad para distintos sismos, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo	90
Figura 5.43 Variación de la razón de amortiguamiento en profundidad para distintos sismos, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo	90
Figura 5.44 Espectros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	92
Figura 5.45 Espectros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	93
Figura 5.46 Espectros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	94
Figura 5.47 Variación de la razón de amortiguamiento en profundidad para distintos sismos, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.....	95
Figura 5.48 Espectro propuesto determinístico, mediante un análisis lineal, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo	96
Figura 5.49 Espectro propuesto determinístico, mediante un análisis lineal, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	97
Figura 6.1 Tasa de excedencia anual y períodos de retorno.....	98
Figura 6.2 Probabilidad de excedencia mediante ecuación de predicción de movimiento fuerte de Montalva et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca y Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales.....	98
Figura 6.3 Probabilidad de excedencia mediante ecuación de predicción de movimiento fuerte de Idini et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca y Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales.....	99
Figura 6.4 Espectro de análisis probabilístico (PSHA) empleando la GMPE de Montalva et al (2017) para sismos interplaca e intraplaca y la GMPE de Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales, considerando la regionalización Susa (Susa, 2004).	100
Figura 6.5 Ajuste de espectro probabilísticos mediante semillas interplaca.....	102
Figura 6.6 Ajuste de espectro probabilísticos mediante semillas intraplaca.....	103
Figura 6.7 Ajuste de espectro probabilísticos mediante semillas superficiales.	104
Figura 6.8 Registros espectro compatibles de ajuste probabilísticos con semillas interplaca.....	106
Figura 6.9 Registros espectro compatibles de ajuste probabilísticos con semillas intraplaca.....	107
Figura 6.10 Registros espectro compatibles de ajuste probabilísticos con semillas superficial.	108
Figura 6.11 Espectros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal, con espectro objetivo probabilístico.	110

Figura 6.12 Espectros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal, con espectro objetivo probabilístico.	111
Figura 6.13 Espectros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal, con espectro objetivo probabilístico.	112
Figura 6.14 Registros producto de la propagación lineal con espectro objetivo probabilístico, semillas interplaca.	114
Figura 6.15 Registros producto de la propagación lineal con espectro objetivo probabilístico, semillas intraplaca.	115
Figura 6.16 Registros producto de la propagación lineal con espectro objetivo probabilístico, semillas superficiales.	116
Figura 6.17 Espectro propuesto probabilístico, obtenido mediante un análisis lineal.	117
Figura 7.1 Ajuste modelo PDMY02. Deformación axial.	120
Figura 7.2 Ajuste modelo PDMY02. Desarrollo de presión de poros.	121
Figura 7.3 Ajuste modelo PDMY02. Esfuerzo de corte vs deformación angular.	122
Figura 7.4 Presión de poros a distintas profundidades].	124
Figura 7.5 Aceleración superficial para los distintos perfiles en estudio.	125
Figura 7.6 Esfuerzo de corte vs deformación angular para distintas profundidades. ...	126
Figura 11.1 Registros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	147
Figura 11.2 Registros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	148
Figura 11.3 Registros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal equivalente, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo.	149
Figura 11.4 Espectros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	150
Figura 11.5 Espectros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	151
Figura 11.6 Espectros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	152
Figura 11.7 Registros de propagación para sismos interplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	153
Figura 11.8 8 Registros de propagación para sismos intraplaca, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	154
Figura 11.9 9 Registros de propagación para sismos superficial, mediante un análisis lineal equivalente, considerando el valor promedio en la construcción del espectro objetivo.	155
Figura 11.10 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio más una desviación estándar, mediante un análisis lineal equivalente.	156

Figura 11.11 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio, mediante un análisis lineal equivalente. 157

1 Introducción

1.1 Motivación

Desde el extremo norte del país hasta la península de Taitao, la subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana acumula una gran cantidad de energía, debido a su elevada tasa de convergencia de entre 6 y 7 [cm/año] (Khazaradze & Klotz, 2003).

La liberación de dicha energía ocasiona un número alto de eventos sísmicos, de mediana y gran magnitud, lo que hace de Chile uno de los países más sísmicos del planeta.

Entre el plano de ruptura que da origen a un evento sísmico y la superficie en el terreno, se tiene un medio altamente heterogéneo, ocasionando variaciones en el movimiento sísmico resultante en superficie, dependiendo de: trayectoria de los rayos, tipo de depósito de suelo, presencia de singularidades topográficas, geomorfologías, etc. Este fenómeno es conocido como “Efecto de Sitio” o bien “Amplificación de Suelos” (Pinto, 2016)

Es aceptado que las condiciones geológicas y geotécnicas de cada sitio inciden en las aceleraciones que este presenta en superficie ante un evento sísmico (Seed & Idriss, 1969). Tales efectos han sido también observados en el país, en zonas como la cuenca de Santiago (Pastén et al 2015).

Los puentes son una estructura de gran relevancia para la conectividad del país, por lo que resulta fundamental mantener su operabilidad durante catástrofes naturales. El diseño de puente en Chile se basa en el Manual de Carreteras, específicamente en el volumen 3 de la versión 2018, se encuentran los criterios para la construcción de puentes de luces no mayores a 70 [m] (Ministerio de Obras Públicas, 2018). Estos criterios de diseño tienen como objetivo limitar los daños durante sismos de mediana intensidad, y evitar el colapso en eventos de gran intensidad. Dichos criterios de diseño no contemplan el efecto de sitio.

Durante el sismo del Maule del año 2010, 230 puentes públicos se vieron afectados, de los cuales cinco fueron afectados por licuación y se ubican en la comuna de Paine (González, 2015).

En el contexto anterior, el presente trabajo de título busca realizar un estudio de amenaza sísmica de un puente ubicado en una zona donde se presente el efecto de sitio, como lo es el puente Águila Norte, en la comuna de Paine, en busca de mejorar los criterios de diseño dados por el Manual de Carreteras, considerando el efecto de sitio del sector.

1.2 Alcances y Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Realizar un estudio de amenaza sísmica para el sector del puente Águila Norte.
- Analizar la factibilidad de un posible mejoramiento de suelo para los materiales del depósito del puente Águila Norte.

1.2.2 Objetivos específicos

- Efectuar un estudio determinístico de amenaza sísmica para el sector del puente Águila Norte.
- Efectuar un estudio probabilístico de amenaza sísmica para el sector del puente Águila Norte.
- Proponer un espectro asociado a la respuesta en superficie del suelo para el sector del puente Águila Norte.
- Modelar los parámetros del modelo PDMY02 para arenas limpias de Ottawa.
- Modelar los parámetros del modelo PDMY02 para arenas con un 3% de Bentonita.
- Modelar los parámetros del modelo PDMY02 para arenas con un 1% de Laponita.
- Analizar los efectos de un mejoramiento de suelo para los materiales del depósito del puente Águila Norte.

1.3 Organización de la Memoria

Esta tesis se compone de ocho capítulos adicionales a este y un anexo, los que son brevemente detallados a continuación.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de los conceptos más relevantes para llevar a cabo el presente documento. Inicia con una breve descripción del contexto sísmico chileno, y las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (“GMPE” por sus siglas en inglés), a utilizar. Posteriormente se describen los conceptos de efecto de sitio y ajuste espectral (“spectral matching”), junto con los modelos constitutivos y materiales a implementar en el estudio.

En el capítulo 3 se detalla la metodología a seguir en el presente estudio. Inicia describiendo el tratamiento a realizar con los registros de aceleraciones a utilizar. Luego detalla los pasos para llevar a cabo un estudio de amenaza sísmico determinístico, poniendo énfasis en el efecto del suelo sobre el registro en superficie. Se prosigue de igual manera, pero ahora con un estudio con enfoque probabilístico, para finalizar en una descripción de cómo se analiza el efecto de sitio, luego de un mejoramiento de suelo.

En el capítulo 4 se realiza una breve descripción de la zona del puente Águila Norte, se describen las principales propiedades del suelo, su perfil en profundidad y las características dinámicas del sitio.

En el capítulo 5 se lleva a cabo el estudio de amenaza sísmica bajo un enfoque determinístico. Se inicia definiendo los sismos de diseño, relevantes para la zona de estudio, y se definen las herramientas necesarias para realizar un ajuste espectral, que posteriormente se utilizará como registro “outcrop” para evaluar las aceleraciones en superficie, tanto en un modelo lineal como en un modelo lineal equivalente.

En el capítulo 6 se lleva a cabo el estudio de amenaza sísmica bajo un enfoque probabilístico. Se describe el catálogo y las consideraciones para obtener un espectro de amenaza uniforme para la zona. Este espectro se emplea como un nuevo “objetivo” para la rutina de “spectral matching”, y se prosigue de igual manera que en el capítulo anterior, con el estudio determinístico.

En el capítulo 7 se realiza un análisis de como mejora la respuesta en superficie al realizar un mejoramiento de suelo. Para esto se inicia calibrando los diversos parámetros a utilizar en el modelo PDMY02, con el objetivo de reemplazar los últimos 10 [m] del perfil con los materiales definidos en el capítulo 2.

Finalmente, en el capítulo 8, se presentan las conclusiones obtenidas para cumplir con los objetivos planteados en el capítulo 1.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Tipos de Sismo

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo (Scholz, 2002). Dicha actividad sísmica se debe principalmente a la interacción de tipo subductivo entre las placas de Nazca y Sudamericana, desde el extremo norte del país hasta la península del Taitao, entre los paralelos 18°S y 47°S. En este contacto entre placas, se estima una alta velocidad de convergencia de entre 6 y 7 [cm/año] (Khazaradze & Klotz, 2003).

Por otro lado, en el extremo sur de Chile continental, en la región de magallanes, se tiene un desplazamiento lateral entre la placa sudamericana respecto a la de Scotia, que puede generar sismos por fallas transcurrentes (Centro Sismológico Nacional (CSN), 2016), no relevantes para la zona en estudio.

2.1.1 Tipos de Sismos en Chile

En Chile central, se tiene los siguientes tipos de sismos:

- Sismos Interplaca tipo thrust: Conocidos como terremotos de subducción, se producen en la zona de contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, cuando el esfuerzo compresivo supera el acoplamiento mecánico que trava el movimiento entre estas. Corresponden a sismos compresionales con mecanismo de falla inversa, cuyas profundidades son menores a 60 [km] (Leyton et al 2010). Ejemplos de sismos de este tipo en la zona son: Valdivia 1960 (Mw 9.5), Valparaíso 1985 (Mw 8.0), Maule 2010 (Mw 8.8), Iquique 2014 (Mw 8.2) y el de Coquimbo 2015 (Mw 8.4).
- Sismos Intraplaca de profundidad intermedia: Ocurren al interior de la placa de Nazca, con profundidades de entre 50 [km] a 250 [km]. Se ha observado que el potencial de daño de estos sismos es mayor al daño que podría provocar un sismo interplaca de la misma magnitud (Centro Sismológico Nacional (CSN), 2016). Ejemplo de grandes sismos de este tipo son: Chillan 1939 (Mw 7.8), el de Punitaqui 1997 (Mw 7.1) y el de Tarapacá 2005 (Mw 7.8).
- Sismos Superficiales o Corticales: Ocurren al interior de la placa sudamericana a profundidades someras, en general, menores a 30 [km] (Leyton et al 2010). Debido a la proximidad de la falla de San Ramón con la zona en la cual se encuentra el Puente Águila Norte, se toma en consideración este tipo de sismos. Ejemplo de sismos de este tipo en la zona de estudio son los sismos de Las Melosas de 1958 (Mw 6.9, 6.7 y 6.8) (Sepúlveda et al 2008). Además, se estima que la falla de San Ramón podría ser fuente de eventos de entre Mw 7 y Mw 7.5 (Ammirati et al 2019).
- Sismos Outer-Rise: Ocurren costa afuera de la fosa oceánica, a profundidades inferiores a 30 [km]. Son producto de la deformación y los esfuerzos de flexión de la placa de Nazca y en general no superan la magnitud Mw 7.0. (Centro Sismológico Nacional (CSN), 2016). Un ejemplo de este tipo de sismo se observó en el año 2001, frente a las costas de Valparaíso y de magnitud Mw 6.7. Este tipo de sismo ocurren a distancias mayores a 150 [km] de la costa (Leyton et al 2010), por lo que no son relevantes para la zona de estudio.

La Figura 2.1 presenta la distribución espacial de las diferentes fuentes sísmicas involucradas en la zona de subducción descrita.

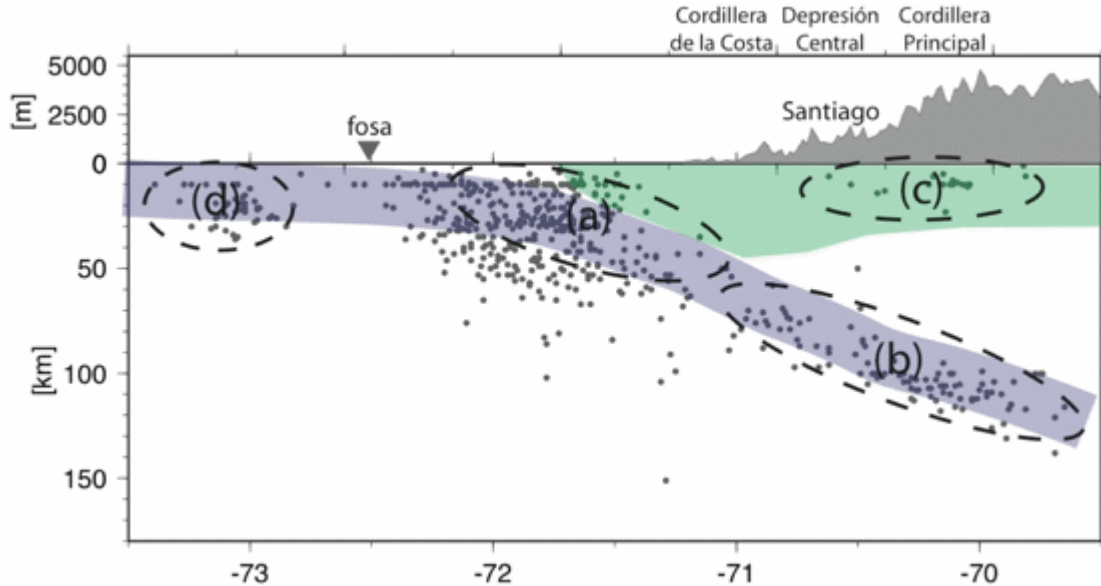


Figura 2.1 Esquema de las diferentes fuentes sísmicas presentes. a) Sismos interplaca. b) Sismos intraplaca de profundidad intermedia. c) Sismos superficiales. d) Sismos "Outer-Rise". Fuente: Leyton et al, 2014.

2.2 Ecuaciones de predicción de movimiento fuerte

Las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte o GMPE según sus siglas en inglés ("Ground Motion Prediction Equation"), son curvas que estiman el espectro de aceleraciones asociado a una tasa de amortiguamiento del 5% en un sector producto de un evento sísmico, dependiendo de: el tipo de sismo, la magnitud, la profundidad, la distancia entre el origen del sismo y la zona en estudio, así como el tipo de suelo.

Las curvas GMPE se han determinado en base a métodos de regresión que se ajustan lo más posible a un conjunto de registros sísmicos medidos asociados a eventos sísmicos con características similares. Es por esto que se han desarrollado una amplia variedad de "GMPE" que son obtenidas y por tanto aplicables a una determinada zona sísmica (ya que depende de la sismicidad local).

Para el desarrollo del presente estudio se emplean las "GMPE" desarrolladas por Montalva et al (2017) e Idini et al (2017) para el caso de sismos interplaca e intraplaca, ya que emplean un catálogo nacional chileno de eventos para determinar los coeficientes relevantes de las ecuaciones. Para sismos superficiales no existen GMPE de estudios nacionales y, por lo tanto, para este tipo de sismos se emplean las "GMPE" desarrolladas por Idriss et al (2014). y Graizer & Kalkan (2016), que emplean un catálogo de registros sísmicos en base a datos de eventos internacionales. Las GMPE utilizadas en este estudio se describen en la siguiente sección.

2.2.1 Montalva et al. (2017):

Para el desarrollo de estas GMPE, Montalva et al. (2017) consideró un catálogo nacional incluyendo 2461 registros de 281 eventos interplaca, y 1313 registros de 192 eventos intraplaca, obtenidos tanto de agencias nacionales (Centro Sismológico Nacional o CSN), como internacionales (“Harvard Centroid Moment Tensor” o CMT”, “National Earthquake Information Center” o NEIC e “International Seismological Centre” o ISC). El evento más antiguo incluido en el set de datos es el de Valparaíso de 1985, e incluye el sismo de Illapel de 2015 (Bastías & Montalva, 2016).

Posteriormente recalculó los coeficientes relacionados a la desviación estándar de la GMPE, considerando un menor número de registros, cuyos parámetros fueron medidos con mayor precisión. En este segundo modelo consideró 411 registros de 151 eventos interplaca y 109 registros de 57 eventos intraplaca, para generar un segundo set de coeficientes asociadas al error (Modelo HQ-High Quality).

Este modelo HQ no es considerado en el desarrollo subsiguiente, ya que cuenta con pocos registros para su calibración.

Según los autores, la ecuación tiene validez para distancias de hasta 300 [km], pero se comporta bien con distancias hasta 1000 [km]. Por otro lado, el parámetro V_{S30} tiene un rango de validez de entre 100 a 1000 [m/s].

La GMPE de Montalva et al (2017) se basan en la forma del modelo propuesto por Abrahamson (Abrahamson et al. 2016), que considera la división del espectro de respuesta en contribuciones. Estas son la contribución de la fuente sísmica (f_{source}), la contribución de del camino entre la fuente sísmica y el sitio (f_{path}), la contribución del evento para diferenciar los sismos interplaca de los intraplaca ($f_{event/depth}$), la contribución local del sitio (f_{site}) y la distinción entre eventos “fore-arc” y “back-arc”.

La ecuación, considerando las correcciones correspondientes (Montalva et al. 2017), tiene la siguiente forma general:

$$\ln(Sa) = \theta_1 + f_{source} + f_{path} + f_{event/depth} + f_{site} + f_{FABA} \quad (2.1)$$

Donde el parámetro f_{source} está dado por:

$$f_{source} = \theta_4 \Delta C_1 + f_{mag}(M_w) \quad (2.2)$$

En esta ecuación, el término f_{Mag} está dado por:

$$f_{mag}(M_w) = \begin{cases} \theta_4 \cdot (M_w - (C_1 + \Delta C_1)), & \text{Para } M_w \leq C_1 + \Delta C_1 \\ \theta_5 \cdot (M_w - (C_1 + \Delta C_1)), & \text{Para } M_w > C_1 + \Delta C_1 \end{cases} \quad (2.3)$$

El parámetro f_{path} está dado por:

$$f_{path} = [\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3 (M_w - 7.2)] \cdot \ln(R + C_4 \cdot \exp \exp(\theta_9 (M_w - 6))) + \theta_6 \cdot R \quad (2.4)$$

Mientras que el parámetro f_{depth} está dado por (aplicable solo a sismos del tipo intraplaca):

$$f_{depth}(Z_h) = [\theta_{10} + \theta_{11} \cdot ((Z_h \cdot 120)) - 60] \cdot F_{event} \quad (2.5)$$

De la misma manera, el parámetro f_{site} está dado por:

$$f_{site}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \begin{cases} \theta_{12} \cdot \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right) - b \cdot \ln(PGA_{1000} + c) \\ + b \cdot \ln\left(PGA_{1000} + c \left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right)^2\right), \text{ Para } V_{S30} < V_{lin} \\ \theta_{12} \cdot \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right) + b \cdot n \cdot \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right), \text{ Para } V_{S30} \geq V_{lin} \end{cases} \quad (2.6)$$

En la ecuación 2.6,

$$V_S^* = \begin{cases} 1000, & \text{Para } V_{S30} > 1000 \left[\frac{m}{s}\right] \\ V_{S30} & \text{Para } V_{S30} \leq 1000 \left[\frac{m}{s}\right] \end{cases} \quad (2.7)$$

Por otra parte, el parámetro f_{FABA} está dado por:

$$f_{FABA}(R) = \begin{cases} [\theta_7 + \theta_8 \cdot \ln\left(\frac{(R_{hypo} \cdot 85)}{40}\right)] \cdot F_{FABA}, & \text{Para } F_{event} = 1 \\ [\theta_{15} + \theta_{16} \cdot \ln\left(\frac{(R_{rup} \cdot 100)}{40}\right)] \cdot F_{FABA}, & \text{Para } F_{event} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Entre las ecuaciones 2.1 y 2.8, los términos corresponden a:

- Sa : PGA o pseudo de aceleraciones [g].
- Mw : Magnitud de momento.
- Z_h : Profundidad hipocentral [km].
- R_{rup} : Distancia más corta al plano de ruptura [km].
- R_{hyp} : Distancia hipocentral [km].
- F_{event} : Variable ficticia, 1 para intraplaca, 0 para interplaca.
- F_{FABA} : Variable ficticia, 1 para tras arco, 0 para antearco.
- V_{S30} : Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], [m/s].
- PGA₁₀₀₀: : Valor promedio de PGA [g], considerando V_{S30}=1000 [m/s].
- V_{lin}, b, n : Coeficientes de la regresión (Tabla 11.4).
- θ_{1... 16} : Coeficientes de la regresión (Tablas de la 11.1 a la 11.4)
- c, C₄, C₁ : Coeficientes de la regresión (Tablas 11.3 y 11.4)

Además, la desviación estándar, θ_t se calcula como

$$\theta_t = \sqrt{\tau^2 + \Phi_{S2S}^2 + \Phi_{SS}^2} \quad (2.9)$$

En donde:

- θ_t : Desviación estándar.
- τ : Terminio residual sitio a sitio (Tabla 11.2).
- Φ_{S2S} : Terminio residual entre sismos (Tabla 11.2).
- Φ_{SS} : Terminio residual de estación (Tabla 11.2).

2.2.2 Idini et al. (2017):

Para su desarrollo, se consideró un catálogo nacional que incluye 369 registros de 65 eventos interplaca y 114 registros de 38 eventos intraplaca. Obtenidos del Centro Sismológico Nacional (CSN) y de la red nacional de acelerómetros del departamento de ingeniería civil (RENADIC). incluye sismos desde el año 1981 hasta el año 2015. Además, a estos registros, se les aplicó un límite de distancia, dependiente de la magnitud, para la seleccionar cuales considerar en la regresión.

Idini et al (2017) hace la diferencia entre sismos interplaca e intraplaca, requiriendo como datos la magnitud de momento, la profundidad y la distancia al plano de ruptura para sismos interplaca de magnitud mayor a Mw 7.7. Por otra parte, considera la distancia hipocentral para sismos intraplaca e interplaca de magnitud menor a Mw 7.7. Además, considera el efecto del sitio mediante dos parámetros: la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros (V_{S30}), y el período fundamental del suelo (T_s).

La ecuación es válida para sismos interplaca con magnitudes inferiores o iguales a Mw 9, con distancias al plano de ruptura de entre 30 [km] a 400 [km]. Mientras que para sismos intraplaca es válida para magnitudes iguales o inferiores a Mw 8, con distancias hipocentrales de entre 60 [km] a 400 [km] y profundidades de hasta 150 [km]. No se recomienda el uso de esta ecuación para V_{S30} inferiores a 400 [km/s].

La ecuación considera tres importantes contribuciones: la de la fuente sísmica, la de la trayectoria entre la fuente y el sitio o de atenuación, y la de efecto del sitio. Lo anterior se plasma a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Log}(Y) = F_f(M_w, H, F_{eve}) + F_D(M_w, R, F_{eve}) + F_S \quad (2.10)$$

Para la contribución de la fuente se tiene que:

$$F_F = c_1 + c_2 M_w + c_8 (H - h_0) F_{eve} + \Delta f_M \quad (2.11)$$

Donde el parámetro Δf_M está dado por:

$$\Delta f_M = \begin{cases} c_9 M_w^2, & \text{Para } F_{eve} = 0 \\ \Delta c_1 + \Delta c_2 M_w, & \text{Para } F_{eve} = 1 \end{cases} \quad (2.12)$$

Por otro lado, para la componente de la atenuación se tiene que:

$$F_D = g \cdot \log_{10}(R + R_0) + c_5 R \quad (2.13)$$

En donde el parámetro R_0 se define como:

$$R_0 = (1 - F_{eve})c_6 \cdot 10^{c_7[M_w - M_r]} \quad (2.14)$$

Mientras que el parámetro g está dado por:

$$g = (c_3 + c_4[M_w - M_r] + \Delta c_3 \cdot F_{eve}) \quad (2.15)$$

Para la contribución de sitio, se tiene la siguiente expresión:

$$F_s(V_{s30}, T^*) = s_T(T) \cdot \log\left(\frac{V_{s30}}{V_{ref}}\right) \quad (2.16)$$

Entre las ecuaciones 2.10 y 2.16, los términos corresponden a:

Y	: PGA o pseudo de aceleraciones [g].
M _w	: Magnitud de momento.
H	: Profundidad hipocentral [km].
R	: Distancia hipocentral para sismos intraplaca y M _w < 7.7. Distancia más corta a la superficie de ruptura para sismos interplaca y M _w > 7.7 [km].
F _{eve}	: Variable ficticia, 1 para intraplaca, 0 para interplaca.
F _f	: Contribución de la fuente sísmica.
F _D	: Efecto del camino entre fuente sísmica y el sitio.
F _s	: Efectos de sitio.
h ₀	: Profundidad de referencia (50 [km]).
Δc ₁ , Δc ₂	: Coeficientes de regresión (Tabla 11.6).
c ₁ , c ₂ , c ₈ , c ₉	: Coeficientes de regresión (Tabla 11.6).
M _r	: Magnitud de referencia (M _w 5).
Δc ₃	: Coeficientes de regresión (Tabla 11.5).
c ₃ , c ₄ , c ₆ , c ₇	: Coeficientes de regresión (Tabla 11.5).
S _T	: Coeficiente dependiente del período (Tabla 11.7).
V _{s30}	: Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m]. [m/s]
V _{ref}	: Velocidad de onda de corte de referencia en roca. El valor con menor error en la regresión, y el utilizado en el presente estudio es de 1530 [m/s].

La desviación estándar está dada por:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_r^2} \quad (2.17)$$

En donde:

- σ_t : Desviación estándar global (Tabla 11.7).
- σ_e : Desviación estándar de primera etapa de regresión (Tabla 11.7).
- σ_r : Desviación estándar de segunda etapa de regresión (Tabla 11.5).

2.2.3 Idriss et al. (2014).

Para su desarrollo se consideró un catálogo global de sismos superficiales, con 7135 registros de 160 eventos con magnitudes de entre Mw 4.5 y Mw 7.9, distancias al plano de ruptura de 0.2 a 175 [km].

El catálogo utilizado es el elaborado por el “Pacific Earthquake Engineering Research Center” (PEER), en el marco de su Proyecto “NGA-WEST2”. Incluye ochenta y tres sismos ocurridos en California, seis en Taiwán, setenta y uno ocurridos en otras partes de Estados Unidos, Canadá, Grecia, Irán, Italia, Japón, México, Nueva Zelanda y Turquía, considerando eventos desde el año 1966 al año 2011 (Idriss, 2013).

Esta metodología diferencia entre cuatro mecanismos de falla, fallas inversas, oblicuas, normales y transcurrentes. Además, considera el efecto del suelo mediante V_{S30} , considerando el mínimo valor de este en 450 [m/s] y un máximo de 1200 [m/s]. Para V_{S30} mayores, se debe considerar este como 1200 [m/s].

Se tiene la siguiente forma general:

$$\begin{aligned} \ln(PSA) = & \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 (8.5 - M)^2 - (\beta_1 + \beta_1 M) \cdot \ln(R_{RUP} + 10) \\ & + \xi \cdot \ln(V_{S30}) + \gamma R_{RUP} + \varphi F \end{aligned} \quad (2.18)$$

En donde:

- PSA : Pseudo espectro de aceleraciones [g].
- M : Magnitud de momento.
- R_{rup} : Distancia más corta al plano de ruptura [km].
- F : Variable ficticia. 0 para fallas normales y transcurrentes, 1 para fallas inversas y oblicuas.
- V_{S30} : Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], [m/s].
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.8 y 11.9).
- β_1, β_2 : Coeficientes de la regresión (Tabla 11.8 y 11.9).
- ξ, γ, φ : Coeficientes de la regresión (Tabla 11.8 y 11.9).

La fórmula anterior entrega un valor promedio de los espectros de respuesta de aceleración para el suelo y para distintos períodos, con una razón de amortiguamiento del 5%.

Por otro lado, se tiene un error estándar (SE) dependiente del período y la magnitud, según la siguiente expresión:

$$SE = 1.18 + 0.035 \cdot \ln(T) - 0.06 \cdot M \quad (2.19)$$

En donde:

SE : Error estándar.

T : Período a evaluar [s].

Para magnitudes inferiores a Mw 5, se debe considerar Mw 5. Para períodos menores a 0.05 [s], se debe considerar este valor en la expresión 2.19. De igual manera se debe considerar como el período máximo 3 [s] y considerar este valor para períodos superiores. Además, el mínimo valor de SE, se asume igual al que esta toma al considerar un Mw 7.5.

2.2.4 Graizer & Kalkan (2016)

Para su desarrollo, se consideró catálogo de sismos superficiales, ocurridos principalmente en USA, Turquía, Taiwán e Italia (cerca del 70% de los datos son de sismos ocurridos en Californian hasta el año 2005). Se emplearon 2583 registros de 47 eventos superficiales, 1450 con mecanismo de falla inversa, 1120 con mecanismo de falla transcurrentes, y 13 de mecanismo de falla normal, todos con profundidades menores que 20 [km].

El catálogo utilizado proviene del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), y contiene sismos desde el año 1966 al año 2015 (Graizer & Kalkan, 2015).

Considera distancias al plano de ruptura que van desde 0.2 a 250 [km] y magnitudes que van desde Mw 5 a Mw 8. Toma en cuenta el efecto del suelo mediante V_{S30} entre 200 y 1300 [m/s]. Además, considera parámetros como B_{depth} , definido como la profundidad en que la roca tiene un V_{S30} igual a 1500 [m/s], y el factor Q_0 , definido como el factor de calidad regional y el factor F , que depende del mecanismo de falla.

El PGA se divide en funciones, estas son, magnitud y mecanismo de falla (G_1), atenuación por distancia (G_2), atenuación anelastica (G_3), efecto de sitio (G_4) y efecto de cuenca (G_5). La forma general de la ecuación se muestra a continuación:

$$\ln(PGA) = \ln(G_1) + \ln(G_2) + \ln(G_3) + \ln(G_4) + \ln(G_5) \quad (2.20)$$

En donde el parámetro G_1 se define como:

$$\ln(G_1) = \ln((c_1 \cdot \arctan(M + c_2) + c_3) \cdot F) \quad (2.21)$$

Por otro lado, el parámetro G_2 se expresa mediante:

$$\ln(G_2) = -0.5 \cdot \ln \left(\left(1 - \frac{R}{R_0}\right)^2 + 4 \cdot (D_0)^2 \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right) \right) \quad (2.22)$$

En donde el parámetro R_0 se define como:

$$R_0 = c_4 \cdot M + c_5 \quad (2.23)$$

Mientras el parámetro D_0 está dado por:

$$D_0 = c_6 \cdot \cos(c_7 \cdot (M + c_8)) + c_9 \quad (2.24)$$

Por otro lado G_3 se expresa mediante:

$$\ln(G_3) = -c_{10} \cdot \left(\frac{R}{Q_0}\right) \quad (2.25)$$

A su vez, G_4 se calcula mediante:

$$\ln(G_4) = b_V \cdot \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_A}\right) \quad (2.27)$$

Mientras que G_5 está dado por:

$$\ln(G_5) = \ln(1 + A_{Bdist} \cdot A_{Bdepth}) \quad (2.28)$$

En la ecuación 2.28:

$$A_{Bdepth} = c_{11} \cdot 1 / \left(\sqrt{\left(1 - \left(\frac{c_{12}}{B_{depth} + 0.1}\right)^2\right)^2 + 4 \cdot c_{13}^2 \cdot \left(\frac{1.5}{B_{depth} + 0.1}\right)^2} \right) \quad (2.29)$$

Finalmente, el parámetro A_{Bdist} se calcula mediante:

$$A_{Bdist} = 1 / \left(\sqrt{\left(1 - \left(\frac{c_{14}}{R + 0.1}\right)^2\right)^2 + 4 \cdot c_{13}^2 \cdot \left(\frac{40}{R + 0.1}\right)^2} \right) \quad (2.30)$$

Entre las ecuaciones 2.18 y 2.30, los términos corresponden a:

- PGA : Aceleración máxima [g].
- M : Magnitud de momento.
- F : Variable ficticia. 1 para fallas transcurrentes y normales, 1.28 para fallas inversas y 1.14 para combinación de falla transcurrentes e inversa.
- $c_{1...3}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- R : Distancia al plano de ruptura [km].
- $c_{4...9}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- V_{S30} : Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], [m/s].

- Q_0 : Factor de calidad regional (Igual a 400 según Ammirati et al. (2019)).
- c_{10}, B_v, V_A : Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- B_{depth} : Profundidad en que se tiene $V_{S30}=1500$ [m/s].
- $c_{11...14}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).

En cuanto al espectro de aceleraciones, este resulta del producto entre el PGA y la forma espectral, con las relaciones que se muestran a continuación.

$$PSA = PGA \cdot Forma \quad (2.31)$$

En donde la forma está dada por:

$$Forma = I \cdot \exp\left(-0.5 \cdot \frac{\ln(T) + \mu}{S}\right)^2 + \left(\left(1 - \left(\frac{T}{T_{sp.0}}\right)^\xi\right)^2 + 4 \cdot D_{sp}^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{sp.0}}\right)^\xi\right)^{-0.5} \quad (2.32)$$

Mientras que el parámetro μ está dado por:

$$\mu = m_1 \cdot R + m_2 \cdot M + m_3 \cdot V_{S30} + m_4 \quad (2.33)$$

Por otro lado, el parámetro I está dado por:

$$I = (a_1 \cdot M + a_2) + \exp(a_3 \cdot R) \quad (2.34)$$

En la ecuación 2.32

$$S = s_1 \cdot R - (s_2 \cdot M + s_3) \quad (2.35)$$

El parámetro $T_{sp.0}$ se calcula mediante:

$$T_{sp.0} = \max\left\{\begin{array}{l} 0.3 \\ |t_1 \cdot R + t_2 \cdot M + t_3 \cdot V_{S30} + t_4| \end{array}\right. \quad (2.36)$$

Finalmente, el parámetro ξ tiene la siguiente expresión:

$$\xi = 1.763 - 0.25 \cdot \arctan(1.4 \cdot B_{depth} - 1) \quad (2.37)$$

Entre las ecuaciones 2.31 y 2.37, los términos corresponden a:

- $m_{1...4}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- $a_{1...3}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- $t_{1...4}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- $s_{1...3}$: Coeficientes de la regresión (Tabla 11.10).
- PSA : Espectro de aceleraciones con 5% de amortiguamiento [g].
- T : Período [s].

D_{SP} : Coeficiente de la regresión (Tabla 11.10).

En cuanto a la desviación estándar, esta sigue la siguiente expresión:

$$\sigma = \max \begin{cases} 0.668 + 0.0047 \cdot \log (T) \\ 0.8 + 0.13 \cdot \log (T) \end{cases} \quad (2.38)$$

En donde:

σ : Desviación estándar.

2.3 Métodos de ajuste espectral (spectral matching)

En busca de generar registros de aceleraciones sintéticos compatibles con un pseudo espectro de aceleraciones de interés, que permita realizar un análisis no lineal en una estructura es que se recurre a técnicas de ajuste espectral o “spectral matching”.

Existen métodos de ajuste espectral que trabajan en el dominio del tiempo y métodos que trabajan en el dominio de la frecuencia. Es aconsejable emplear un método en el dominio del tiempo, debido a que en el dominio de la frecuencia se tiende a alterar el carácter no estacionario y a incrementar la energía del sismo, además de distorsionar la velocidad y el desplazamiento (Adekristi & Eatherton, 2015).

El método empleado para el ajuste espectral en este documento es el propuesto por Adekristi (Adekristi, 2013), que consiste en modificar el acelerograma real de un sismo, en el dominio del tiempo, sumándole pequeñas señales o “wavelets”, de manera de generar un registro cuyo espectro de respuesta sea similar al espectro objetivo seleccionado. El esquema general del método se muestra a continuación:

- Calcular el espectro de respuesta de un sistema elástico de un grado de libertad, producto del registro semilla real, para un amortiguamiento dado. En este caso, se utiliza un amortiguamiento del 5%.
- Comparar el espectro producto del registro real, con un espectro objetivo (en este caso, el espectro calculado mediante las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte). La diferencia entre ambos espectros, para cada periodo, se denomina “misfit”.
- Se calcula una matriz de sensibilidad, cuyos elementos son la variación en la respuesta del sistema, en un período T_i , debido a una “wavelet” de período T_j . Calcular el vector magnitud del conjunto de “wavelets”, de manera que el producto entre la matriz de sensibilidad y el vector magnitud sea igual a la diferencia entre espectros anteriormente calculada.
- Agregar las “wavelets”, al registro original en el dominio del tiempo.
- Iterar hasta que la diferencia entre los espectros esté bajo una tolerancia dada.

Se tienen los siguientes parámetros para límites y ganancias, recomendados por Adekristi (Adekristi, 2013).

Tabla 2.1 Parámetros recomendados para ajuste espectral. Adaptado de Adekristi & Eatherton, 2015.

Parámetro	Variable	Valor Propuesto
Factor de ganancia de la matriz inicial "C"	α_C	$1 \cdot 10^2$
Magnitud de ondicula	ψ_M	$1 \cdot 10^{-7}$ [g]
Factor de reducción para fuera de la diagonal de matriz "C"	$\alpha_{\text{off-C}}$	0.7
Factor de ganancia de vector "b"	g_b	1
Factor de ganancia de matriz "C"	g_c	1
Número máximo de iteraciones en "Loop de Broyden"	M	10
Número máximo de iteraciones en "Loop exterior"	N	6

2.4 Comportamiento cíclico de suelos

Una sollicitación cíclica en una masa de suelo genera una respuesta de características no lineales en un gráfico esfuerzo deformación. La curva típica de un ciclo de carga y descarga se muestra en la Figura 2.2, en donde se observa un "loop" cerrado en el plano esfuerzo deformación, que indica un amortiguamiento histerético.

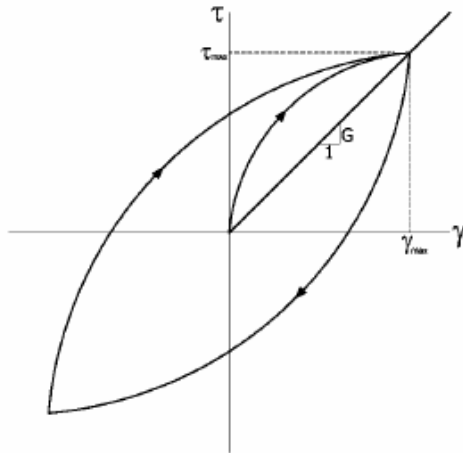


Figura 2.2 Curva histerética de ciclo carga y descarga. Modificado de (Pastén, 2007)

Los parámetros que caracterizan esta curva dependen del nivel de deformación alcanzado, y son el módulo de corte y la razón de amortiguamiento. El módulo de corte "G", corresponde a la rigidez global de cada ciclo, mientras que la razón de amortiguamiento efectiva se relaciona con la razón entre el área encerrada por el ciclo histerético y la energía elástica (ecuación 2.40).

2.5 Módulo de corte

El módulo de corte se define como la razón entre el corte alcanzado en un ciclo de carga, y su respectiva deformación angular. Depende fuertemente del nivel de deformación alcanzado, degradándose a medida que este aumenta. Para valores muy pequeños de deformación angular, del orden de 10^{-6} (Pastén, 2007), el módulo de corte alcanza un valor máximo denominado " G_{max} ".

El módulo de corte máximo se puede evaluar mediante la siguiente expresión:

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2.39)$$

En donde:

- ρ : Densidad del suelo.
- V_s : Velocidad de propagación de onda de corte para pequeñas deformaciones.

La relación esfuerzo deformación suele modelarse mediante una curva esqueleto (Figura 2.3.), que se define como la curva envolvente de varios ciclos de histéresis para distintos niveles de deformación. La pendiente definida por la recta que une el origen con el corte asociado a un nivel de deformación " γ_c ", define el módulo de corte " G_{sec} ". Debido a que el módulo de corte se degrada al aumentar el nivel de deformación, se pueden normalizar los valores de dicho módulo según su valor máximo. Graficando la razón de módulos se obtiene la curva de degradación (Figura 2.3.).

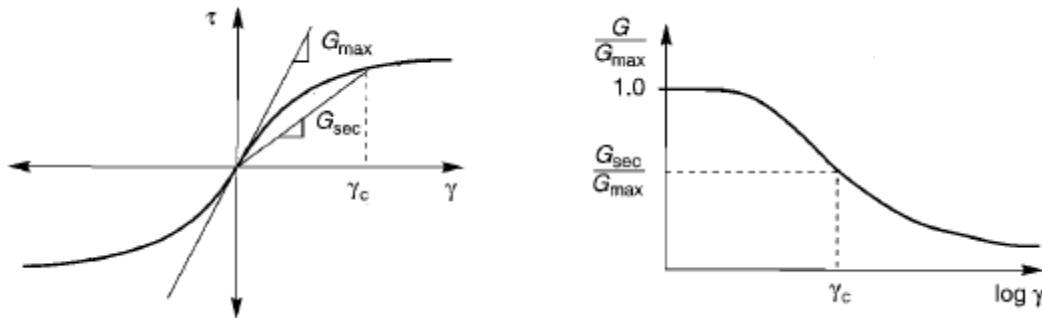


Figura 2.3 Degradación de rigidez a distinta deformación. Modificado de (Kramer, 1996)

Estas curvas de degradación dependen de la plasticidad de los finos presentes (Vucetic & Dobry, 1991), en donde se desplazan hacia la derecha al aumentar la plasticidad. También dependen del confinamiento, especialmente para suelos de baja plasticidad (Iwasaki et al. 1978), desplazándose a la derecha a medida que este aumenta.

2.5.1 Razón de amortiguamiento

La razón de amortiguamiento “ D ” se define como el cociente entre la energía disipada por ciclo, representada como el área encerrada dentro de la curva de histéresis “ ΔW ” y la energía de deformación equivalente “ W ”, representada por el triángulo definido por la deformación máxima (Figura 2.4.).

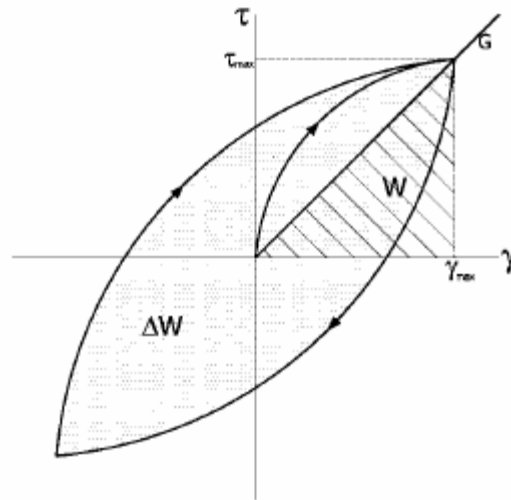


Figura 2.4 Razón de amortiguamiento

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2.40)$$

En donde:

ΔW : Área encerrada en un ciclo de histéresis

W : Área elástica asociada solamente al efecto de carga

La razón de amortiguamiento en suelos no-cohesivos aumenta con el nivel de deformación angular. Teóricamente no existe disipación histerética para bajos niveles de deformación, en que se tiene un comportamiento lineal. Sin embargo, evidencia experimental muestra que siempre existe cierta disipación de energía (Kramer, 1996). Al aumentar las deformaciones, se tiene que el amortiguamiento crece junto con estas.

Se observa que el amortiguamiento de suelos muy plásticos es menor que para suelos no plásticos, dado un mismo nivel de deformación (Vucetic & Dobry, 1991). También se tiene una dependencia con el confinamiento, donde decrece a medida que este aumenta (Kramer, 1996).

2.6 Modelos Constitutivos

En el análisis de la respuesta sísmica del suelo, la característica más relevante a representar es el comportamiento de la relación esfuerzo deformación del material.

Mientras se alcancen bajos niveles de deformación, es decir deformaciones de corte del orden de 10^{-6} , no cambian las propiedades del suelo y tanto el módulo de corte como el amortiguamiento permanecen constantes. Este tipo de comportamiento se puede representar de buena manera con un modelo lineal viscoelástico y analizarse a través de métodos lineales (Ishihara, 1996).

Al aumentar el nivel de deformación, el módulo de corte y el amortiguamiento se determinan mediante funciones que los relacionan con la deformación angular alcanzada. Este tipo de comportamiento puede representarse de buena manera usando un modelo viscoelástico lineal y suelen emplearse métodos lineales equivalentes para su análisis (Ishihara, 1996).

Los métodos lineales equivalentes se basan en repetir paso a paso un análisis lineal, actualizando las propiedades del suelo según el nivel de deformación alcanzado. Este nivel de deformación considerado para actualizar los coeficientes se toma como el 65% de la deformación máxima al nivel donde ocurre la actualización (Hashash et al. 2016).

Un modelo viscoelástico representa de buena manera el comportamiento del suelo para deformaciones del orden de 10^{-3} a 10^{-4} . En este modelo la relación esfuerzo deformación puede asumirse lineal, pero toma en cuenta el amortiguamiento del suelo, ya que se ha observado que siempre existe cierto grado de amortiguamiento, incluso para deformaciones pequeñas (Ishihara, 1996).

Para deformaciones angulares de gran magnitud, del orden de 10^{-2} , las propiedades del suelo comienzan a cambiar no solo con el nivel de deformación, sino que también con la progresión de los ciclos. Este tipo de comportamiento se denomina histerético degradado (Ishihara, 1996), y necesita modelos más sofisticados para su representación.

2.7 Herramientas computacionales

2.7.1 DEEPSOIL

Para implementar un método simplificado de respuesta sísmica, es decir, asumiendo que solo existe una propagación vertical de ondas de corte, se utiliza el software "DEEPSOIL".

"DEEPSOIL" resuelve el problema de propagación vertical de ondas de corte horizontales a través de un medio con estratificación vertical. Este realiza análisis en una dimensión, lineales y no lineales en el dominio del tiempo, o análisis lineales y lineales equivalentes en el dominio de la frecuencia (Hashash et al. 2016). En este estudio se trabaja con la solución de la ecuación de onda en el dominio de las frecuencias.

2.7.2 OpenSees

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es un software libre de elementos finitos. En este software, el usuario define tanto el tipo de datos como las operaciones que pueden ser aplicadas a una estructura de datos.

OpenSees es creado con el fin de simular la respuesta de sistemas estructurales y geotécnicos sujetos a sismos. Está escrito primeramente en C++ y usa varios elementos de las librerías de Fortran y C para la resolución de ecuaciones lineales y rutinas de materiales y elementos. Los modelos son generados a través de líneas de comando en TCL (Tool Command Language). Un modelo completo de OpenSees se compone del modelo (nodos, elementos, cargas y restricciones), el análisis (procedimiento) y los archivos de salida, que almacenan lo que se quiere analizar (Grand, 2019).

2.8 Modelo PDMY02

OpenSees ofrece una cantidad considerable de modelos constitutivos para suelos según propósito de análisis o tipo de suelo. En el presente trabajo se utiliza el modelo denominado “Pressure Depended Multi Yield Material 02” (PDMY02).

Se basa en el modelo de multi-superficies plásticas dependientes de la presión (Yang et al. 2003) y fue creado con la finalidad de reproducir la respuesta de un suelo sensible a la presión bajo cargas dinámicas. Simula la respuesta no lineal considerando una dependencia de las superficies de fluencia respecto a la presión de confinamiento, tomando en cuenta un modelo hiperbólico que tiene implícito un cambio del módulo de rigidez y razón de amortiguamiento con el nivel de deformación de corte,

Este modelo simula la respuesta del suelo bajo condiciones drenadas, en OpenSees la presión de poros se maneja como un grado de libertad adicional y requiere un elemento capaz de manejarla (Grand, 2019), empleado en el presente estudio.

2.8.1 Modelo constitutivo

El modelo emplea la ecuación constitutiva expuesta en la Ecuación 2.41, en donde la notación “:” se refiere a la doble contracción de tensores y las variables en negrita se refieren a tensores.

$$\dot{\sigma} = \mathbf{E} : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p) \quad (2.41)$$

En donde:

$\dot{\sigma}$: Incremento del tensor de esfuerzo efectivo
\mathbf{E}	: Tensor de coeficientes elásticos isotrópico de cuarto orden
$\dot{\epsilon}$: Incremento elástico del tensor deformación
$\dot{\epsilon}^p$: Incremento plástico del tensor deformación

El tensor de coeficientes elásticos isotrópicos se define como se muestra a continuación:

$$E_{ijkl} = \left(B - \frac{2G_{max}}{3} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + G_{max} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2.42)$$

Donde:

- G_{max} : Módulo de corte para pequeñas deformaciones
- B : Módulo de compresibilidad
- δ_{ij} : Delta de Kronecker

Por otro lado, se define el tensor tasa de deformación plástica como se muestra a continuación:

$$\dot{\varepsilon}^p = \langle \dot{\lambda} \rangle \mathbf{P} \quad (2.43)$$

Donde:

- \mathbf{P} : Tensor regla de flujo
- $\dot{\lambda}$: Carga plástica o parámetro de consistencia

La regla de flujo define la dirección, en el espacio de los esfuerzos, de la deformación plástica. En cuanto a la notación " $\langle \rangle$ ", se refiere al paréntesis de MacCauley, definido como:

$$\begin{aligned} \langle \dot{\lambda} \rangle &= \dot{\lambda}, \quad \text{si } \dot{\lambda} \geq 0 \\ \langle \dot{\lambda} \rangle &= 0, \quad \text{en otro caso} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Es conveniente expresar "P" en terminos de sus componentes deviatorica y volumétrica.

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}' + \mathbf{P}'' \boldsymbol{\delta} \quad (2.45)$$

En la ecuación 2.46:

- \mathbf{X}' : Componente deviatorica de un tensor X
- \mathbf{X}'' : Componente volumétrica de un tensor X
- $\boldsymbol{\delta}$: Tensor identidad de segundo orden

Finalmente, el tensor de tasa de esfuerzos efectivos se puede expresar ahora como:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{E} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbf{E} : \mathbf{P} \langle \dot{\lambda} \rangle \quad (2.46)$$

2.8.2 Superficie de fluencia

En el contexto de multi-superficies plásticas, es necesario una colección anidada de superficies de fluencia, de manera que se pueda ajustar de mejor la regla de endurecimiento plástico con los datos experimentales.

La función de fluencia utilizada corresponde a una familia de superficies cónicas definidas en el plano de los esfuerzos principales (Figura 2.5), con vértice común en el origen, dada por la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{3}{2}(s - p\alpha_m):(s - p\alpha_m) - (M_m p)^2 = 0 \quad (2.47)$$

En donde los parámetros s y p se calculan mediante:

$$\begin{aligned} s &= \boldsymbol{\sigma} - p\boldsymbol{\delta} \\ p &= \frac{1}{3}tr(\boldsymbol{\sigma}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

En donde se tiene que:

- s : Tensor de esfuerzo deviatorica
- p : Confinamiento promedio
- α : Tensor que define las coordenadas del centro la superficie de fluencia en el espacio de los esfuerzos deviatoricos.
- M : Parámetro que define el tamaño de la superficie de fluencia

El subíndice “m” se refiere a la superficie número “m”. La superficie más externa es designada como la superficie de falla, con el subíndice “f”, de donde se puede correlacionar un ángulo de fricción interna de falla, según la siguiente expresión:

$$M_f = \frac{6 \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)} \quad (2.49)$$

Donde:

- φ : Ángulo de fricción interna de falla

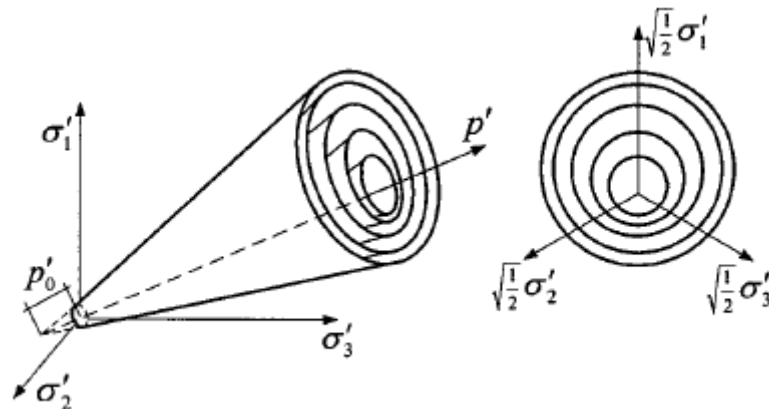


Figura 2.5 Superficies de fluencia cónicas en el plano de los esfuerzos principales y en el plano deviatorico. Modificado de (Yang et al. 2003)

2.8.3 Respuesta esfuerzo-deformación

La respuesta no lineal en la relación esfuerzo-deformación bajo corte, se describe por una curva esqueleto. La versión original del modelo "PDMY02", emplea una función hiperbólica para definir dicha relación. Sin embargo, una hipérbola no captura de buena manera el comportamiento del suelo (Matasovic & Vucetic, 1994; Mercado et al. 2019). Es por lo anterior que se emplea una modificación de la curva esqueleto, la función "MKZ" (Modificada Kondner y Zelasko), propuesta por Matasovic & Vucetic en 1994.

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \beta\left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^s} \quad (2.50)$$

En donde:

- τ : Esfuerzo de corte
- γ : Deformación angular
- γ_{ref} : Deformación angular al esfuerzo de referencia
- $G_{max,r}$: Modulo de corte para pequeñas deformaciones, al confinamiento de referencia p_r
- β, s : Parámetros del modelo

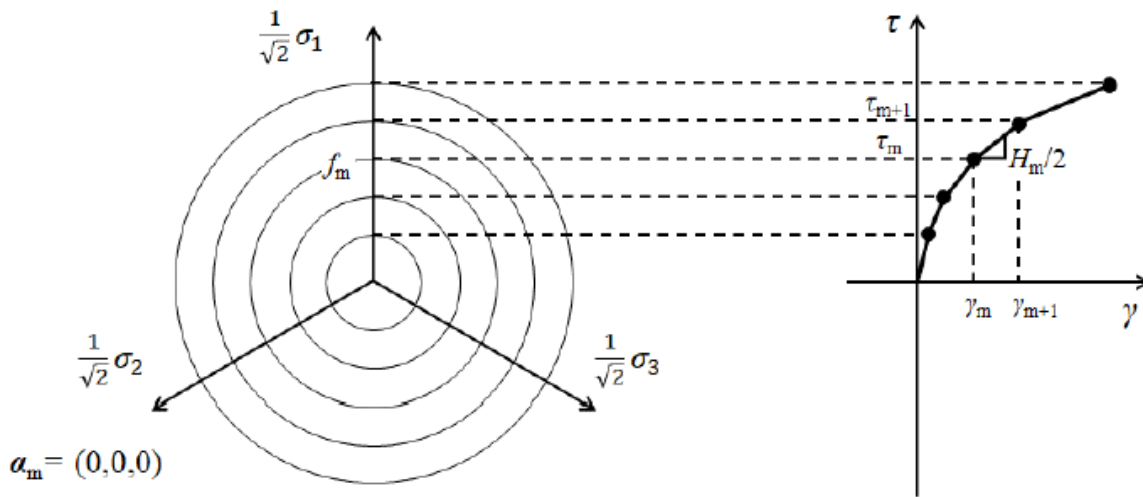


Figura 2.6 Relación entre la curva esqueleto y las superficies de fluencia, en el plano de esfuerzos deviatoricos. Modificado de Mercado et al. 2019

La curva esqueleto del material es incorporada al modelo a través de múltiples aproximaciones lineales usando la colección de superficies de fluencia. Cada superficie " f_m ", es asociada con un módulo de corte " H_m ", y el tamaño de superficie " k_m ". Para un confinamiento dado, se tiene el siguiente módulo de corte:

$$H_m = \frac{2(\tau_{m+1} - \tau_m)}{(\gamma_{m+1} - \gamma_m)} \quad (2.51)$$

Adoptando la regla de flujo y endurecimiento, se tiene el siguiente modulo plástico asociado a f_m :

$$H_m^p = \frac{2G_{max}H_m}{2G_{max} - H_m} \quad (2.52)$$

Se asume que el módulo de corte para pequeñas deformaciones varía con el confinamiento, según se muestra a continuación.

$$G = G_{max} \cdot \left(\frac{p'}{p'_r}\right)^d \quad (2.53)$$

Además, que el módulo de compresibilidad sigue la siguiente relación:

$$B = \frac{2G_{max}(1 + \nu)}{(1 - 2\nu)} \quad (2.54)$$

2.8.4 Regla de flujo

La componente volumétrica del tensor P (P''), indica la dirección de las deformaciones plásticas volumétricas, se define mediante la superficie de transformación de fase (PT). Dicha superficie indica la transición del comportamiento contractivo al dilatante en la respuesta del suelo bajo condiciones de carga monotónicas sin drenaje.

La localización del estado de esfuerzos se infiere en base a la razón entre esfuerzos:

$$\eta = \frac{q}{p} \quad (2.55)$$

Donde:

- q : Esfuerzo de Von Misses
- p : Confinamiento

Definiendo la razón de esfuerzos a lo largo de la superficie de transformación de fase como η_{PT} , se tiene que para $\eta < \eta_{PT}$ (razón de esfuerzos dentro de la superficie de transformación de fase) o para $\eta > \eta_{PT}$ (razón de esfuerzos fuera de la superficie de transformación de fase), con $\dot{\eta} < 0$, el suelo presentará un comportamiento contractivo bajo condiciones no drenadas, mientras que si $\eta > \eta_{PT}$ y $\dot{\eta} > 0$, el suelo presentará una tendencia dilatante.

La razón de esfuerzos asociada a la superficie de transformación de fase puede expresarse como se muestra a continuación:

$$\eta_{PT} = \frac{6 \cdot \sin(\Phi_{PT})}{3 - \sin(\Phi_{PT})} \quad (2.56)$$

Para cargas asociadas a una tendencia contractiva, la regla de flujo se define como se muestra a continuación.

$$P'' = -(1 - \text{sign}(\dot{\eta}) \frac{\eta}{\eta_{PT}})^2 - (c_1 + c_2 \varepsilon_c) \left(\frac{p}{p_{atm}}\right)^{c_3} \quad (2.57)$$

En donde:

- p_{atm} : Presión atmosférica
- c_1, c_2, c_3 : Constantes del material para dar flexibilidad al modelo
- ε_c : Escalar no negativo que representa la acumulación de deformación volumétrica, que aumenta por dilatación y decrece por contracción.

Por otro lado, para cargas asociadas a una tendencia dilatante, la regla de flujo se define como se muestra a continuación.

$$P'' = -(1 - \text{sign}(\dot{\eta}) \frac{\eta}{\eta_{PT}})^2 - (d_1 + \gamma_d^{d_2}) \quad (2.58)$$

En la ecuación 2.63:

- d_1, d_2 : Constantes del material que controlan la tendencia dilatante
- γ_d : Acumulación de deformación de corte octaédrica desde el comienzo de un ciclo en particular

Cuando los estados de esfuerzo se aproximan a la superficie de cambio de fase, desde abajo, una cantidad de deformación de corte se acumula previa a la dilatación, con cambios mínimos en el esfuerzo de corte y “p”. Este efecto se modela mediante $P'' = 0$ durante la fase de fluencia, hasta que el límite definido en el espacio de esfuerzo deviatorica es alcanzado, produciendo posteriormente la dilatación. Este límite aumenta cuando la deformación por corte acumulada durante la fase de dilatación excede al máximo “ γ_d ”, alcanzado en el ciclo anterior.

Este aumento del límite de deformación es proporcional al parámetro de control interno “Liq1”.

2.8.5 Detalle de parámetros del modelo PDMY02

Durante la contracción inicial, la tasa de desarrollo de la presión de poros se ajusta principalmente a través de los parámetros de calibración c_1 y c_3 (ecuación 2.62). c_2 (ecuación 2.62), también afecta el desarrollo de la presión de poros, pero este comienza a actuar luego de que se ha alcanzado la dilatación.

Tal como se ve en la ecuación 2.62, un aumento en el parámetro c_1 , aumenta la tendencia a alcanzar contracciones plásticas para cierto nivel de deformaciones deviatoricas plásticas. Esto bajo condiciones no drenadas, se traduce en un aumento de la presión de poro. Por otro lado, el parámetro c_3 , considera la dependencia de la contracción con el confinamiento, en donde se tiene que un aumento en el valor de este coeficiente provoca un desarrollo de presión de poros más lento.

Por otro lado, el comportamiento del suelo, luego de que este sobrepasa la superficie de transformación de fase se encuentra fuertemente influenciado por c_2 (ecuación 2.61), d_1 ,

d_2 (ecuación 2.62), y $Liq\ 1$. El parámetro c_2 afecta la contracción en base al daño experimentado durante la fase de dilatación. Una fuerte dilatación resulta en una mayor contracción en el ciclo subsiguiente. En cambio, el decrecimiento del parámetro d_1 , reduce la tendencia dilatante, lo que aumenta el esfuerzo acumulado por ciclo. El parámetro d_2 afecta la tendencia dilatante en a la deformación de corte acumulada octaédrica (γ_d), en cada ciclo.

Finalmente, $Liq1$ controla la cantidad de deformación de corte permanente alcanzada durante la fase neutral. Estos cuatro parámetros juntos controlan la acumulación de deformación de corte y el comportamiento de los “peaks” de la fase dilatante.

2.9 Efecto de sitio

Se ha observado que los daños ocasionados por un terremoto presentan gran variabilidad, dependiendo del tipo de suelo y singularidades topográficas (Lermo & Chávez-García, 1993). Por lo general, se observan daños mayores en depósitos de suelos blandos que sobre afloramientos rocosos o gravas.

Uno de los ejemplos más citados en la literatura es el efecto de sitio observado durante el terremoto de Michoacán en 1985 en Ciudad de México. En este evento, en la zona sur oeste de la ciudad, se registraron daños menores. Sin embargo, en la zona nor-este, conformada principalmente por arcillas blandas con velocidades de onda de corte inferiores a 100 [m/s] (Seed, 1987), se produjeron daños catastróficos (Pastén, 2007).

Es importante notar que las condiciones topográficas también influyen en el daño observado. Existen evidencia instrumental que indica que la topografía superficial afecta considerablemente la amplitud y el contenido de frecuencias en superficie (Faccioli, 1991).

2.10 Licuación

El fenómeno de licuación es una importante fuente de daño en estructuras, que sucede con frecuencia luego de una elevada sollicitación cíclica. En Chile se registraron 120 casos de licuación entre La Calera y Valdivia, debido a los efectos del terremoto del Maule del 2010 (Verdugo et al. 2012).

El fenómeno de licuación se define como el paso de un estado sólido a un estado líquido de un depósito de suelo no cohesivo, producto de un aumento de la presión de poros (Youd, 1975). Este fenómeno conlleva grandes deformaciones, incluso bajo pequeñas sollicitaciones. Suele manifestarse en suelos sueltos contractivos y saturados, bajo condiciones no drenadas, que, al ser sometidos a una sollicitación rápida, tienden a densificarse, lo produce en un aumento de las presiones de poro, traduciéndose en la caída de las tensiones efectivas.

Se pueden distinguir dos tipos de licuación, la movilidad cíclica, relacionado con la pérdida de rigidez, y la licuación verdadera (o licuación de flujo), asociada a una pérdida de resistencia (Casagrande, 1975).

La licuación verdadera, se caracteriza por un rápido incremento de la presión de poros, seguida de una pérdida de resistencia hasta un valor residual. La falla producto de este tipo de licuación se caracteriza por presentar altos niveles de deformación. Es el tipo de licuación más dañina.

En cuanto a la movilidad cíclica, se refiere a la pérdida de rigidez, a consecuencia del incremento de presiones de poro, causado por una sollicitación cíclica. Produce deformaciones considerables, pero menores a las causadas por la licuación verdadera. Es el tipo de licuación más común.

2.11 Materiales granulares

Para realizar un posterior análisis de mejoramiento de suelos en un modelo no lineal, es necesario especificar los materiales empleados. A continuación, se tienen algunas características de estos.

Arena de Ottawa: Tiene un color grisáceo, es muy uniforme (C_u de entre 1.5 a 1.9) y limpia, con un porcentaje de finos menor al 1%. Con una gravedad específica de 2.65, y un índice de vacíos que varía entre 0.78 y 0.48 (El Mohtar, 2008).

Las partículas tienen un diámetro de 150 a 850 [μm] ($D_{10}\sim 0.2$ [mm], $D_{30}\sim 0.26$ [mm], $D_{50}\sim 0.33$ [mm], $D_{60}\sim 0.38$ [mm]). Las partículas varían de redondeadas sub-redondeadas, con una esfericidad de entre 0.7 a 0.9 y una redondez de entre 0.5 y 0.7 (Ochoa et al. 2019).

Laponita: La laponita RD, de fórmula $Na_{0.7}^{+0.7}[(Si_8Mg_{5.5}Li_{0.3})O_{20}(OH)_4]^{-0.7}$, más conocida como laponita, es una nanopartícula artificial altamente plástica ($PI > 1000\%$), con forma de disco, de un diámetro de 25 [nm] y un espesor de 1 [nm] (Ochoa et al. 2019).

Tiene una densidad específica de 2.570 [Kg/m^3] y cada disco está formado por tres capas, dos externas de silicato tetraédrico, y una octaédrica central rodeada de magnesio, en parte desplazado por litio (Kroon, 1998), lo que provoca una carga negativa en su superficie.

En comparación con arena limpia, una arena con un 1% de laponita exhibe un módulo de corte un 10-20% mayor (Ochoa et al. 2019), lo que difiere con previa evidencia experimental de que el módulo de corte se reduce en presencia de finos (y al aumentar porcentaje de estos), ya sea con finos plásticos como no plásticos (Iwasaki & Tatsuoka, 1997). Esto se debe a que la laponita provee de un “puente” entre los granos de arena.

Por otro lado, en los espacios vacíos, al hidratarse la laponita, forma un gel, responsable de disminuir su comportamiento no lineal, retrasando la generación de presión de poros (Ochoa et al. 2019).

Bentonita: Es un término utilizado para referirse a una roca de arcilla blanda formada a partir de la meteorización de ceniza volcánica. Contiene principalmente montmorillonita como la esmectita principal. Está compuesta de dos láminas tetraédricas y una octaédrica.

Las partículas de bentonita tienen forma de disco, con diámetros de 0.1 [μm] y una relación de diámetro – espesor de 100. Tienen carga negativa en la superficie de sus caras y carga negativa en los bordes (El Mohtar, 2008).

El pequeño tamaño de las partículas les da a las suspensiones de montmorillonita una alta viscosidad y la presencia de cargas opuestas en la superficie y los bordes de la partícula, permiten la floculación dándole a la suspensión su fuerza (El Mohtar, 2008).

Para los materiales anteriormente expuestos se tienen los siguientes parámetros relevantes:

Tabla 2.2 Resumen propiedades de los materiales a considerar (El Mohtar, 2008; Ochoa, 2015; Mercado et al. 2019).

Material	Dr	G ₀ [MPa]	Φ	Φ _{PT}	Permeabilidad [cm/s]
Laponita (1%)	20	100	35	30	2·10 ⁻⁵
Arena limpia	24	86	35	30	8·10 ⁻³
Bentonita (3%)	35	90	35	30	5·10 ⁻⁶

En donde, en la tabla anterior se considera la arena limpia como arena de Ottawa y los porcentajes de Laponita y Bentonita representan las relaciones en peso entre los nanomateriales y arena de Ottawa.

3 Metodología

En la metodología determinística se escoge en forma arbitraria los posibles sismos de diseño en base a una elección racional como, por ejemplo, el terremoto máximo creíble (definido como el evento de mayor magnitud esperada, dada una fuente sismogénica). En contraste, un estudio probabilístico considera la sismicidad local registrada en la zona en estudio (durante un período definido) lo cual permite establecer las demandas espectrales esperadas según diversos periodos de retorno.

En esta sección se presenta la metodología utilizada para la evaluación de la amenaza sísmica, en el sector de emplazamiento del puente Águila Norte, mediante el enfoque determinístico (Figura 3.1), y el enfoque probabilístico (Figura 3.3).

Posteriormente, una vez definida la amenaza sísmica, se explicita la metodología empleada para el estudio de respuesta de sitio, mediante un modelo constitutivo no lineal, evaluando el efecto de un mejoramiento de suelo en la zona, a través de arena limpia de Ottawa, y los nanomateriales Bentonita y Laponita.

3.1 Enfoque determinístico para la amenaza sísmica

Para llevar a cabo el estudio determinístico, se seleccionan sismos de diseño basados en grandes eventos característicos de la actividad sísmica asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Posteriormente, en base a estos eventos se estima el espectro de aceleraciones objetivo para la ubicación geográfica de referencia mediante ecuaciones de predicción de movimiento fuerte, o GMPE (Ground Motion Prediction Equations) propuestas en la literatura, considerando una condición local de referencia en roca. Debido a que existen diversas GMPE disponibles en la literatura, se ha optado por utilizar un valor promedio de las más adecuadas para la sismicidad nacional, esto es, el promedio entre (Montalva et al. 2017) e (Idini et al. 2017) para terremotos interplaca e intraplaca, mientras que se usa el promedio entre (Idriss, 2014) y (Graizer et al. 2013) para sismos superficiales.

Cabe mencionar que las GMPE se han definido para diversos tipos de suelos (Idini et al. 2017, Montalva et al. 2017), sin embargo, las características del suelo en el lugar de emplazamiento del puente Águila Norte no permiten la aplicación directa de las GMPE debido a que la estratigrafía del lugar no es consecuente con las características consideradas para calibrar las GMPE, en donde se observan múltiples estratos, en su mayoría gravas, hasta una profundidad de 240 [m] (Grand, 2019 y González et al. 2018). Por esta razón es que se emplean las GMPE considerando el suelo de fundación como roca, pensando en generar un registro que sirva como base para una posterior propagación considerando la estratigrafía real de la zona.

Hay que considerar que las GMPE poseen una dispersión significativa, en gran medida debido a la gran cantidad de eventos de pequeña magnitud que presenta Chile. Por esta razón, se ha optado por considerar dos metodologías para construir el espectro objetivo. En el primero, se utiliza el valor medio entregado por las GMPE utilizadas, mientras que el segundo considera los valores medios más una desviación para obtener un espectro de diseño más conservador.

Una vez determinado el espectro de aceleraciones objetivo, se obtiene un registro sintético compatible, mediante técnicas de ajuste espectral (spectral matching, en inglés) (Adekristi, 2013), empleando tres registros semilla consistente para casa sismo de diseño (es decir, registros medido en roca, producto de un evento sísmico de características similares). En caso de no contar con el número suficiente de registros en el catálogo nacional, se recurre a registros de eventos sísmicos en el extranjero, de ambientes sísmicos similares a los chilenos.

Finalmente, para incorporar el efecto de sitio del terreno en superficie, el registro generado en roca se propaga unidimensionalmente mediante el software “DEEPSOIL” (Hashash et al., 2016), considerando la estratigrafía y las características dinámicas del suelo del sector. La propagación se realiza mediante dos análisis. El primero es un análisis lineal considerando un amortiguamiento del 5%, mientras que el segundo es un análisis lineal equivalente, considerando las curvas de degradación asociadas a los tipos de suelo del perfil estratigráfico.

Los resultados obtenidos a través de “Deepsoil”, permiten obtener el espectro de evaluación sísmica y registros sintéticos que definen la demanda sísmica en superficie. La Figura 3.1 presenta el diagrama de flujo del estudio determinístico realizado en este estudio.

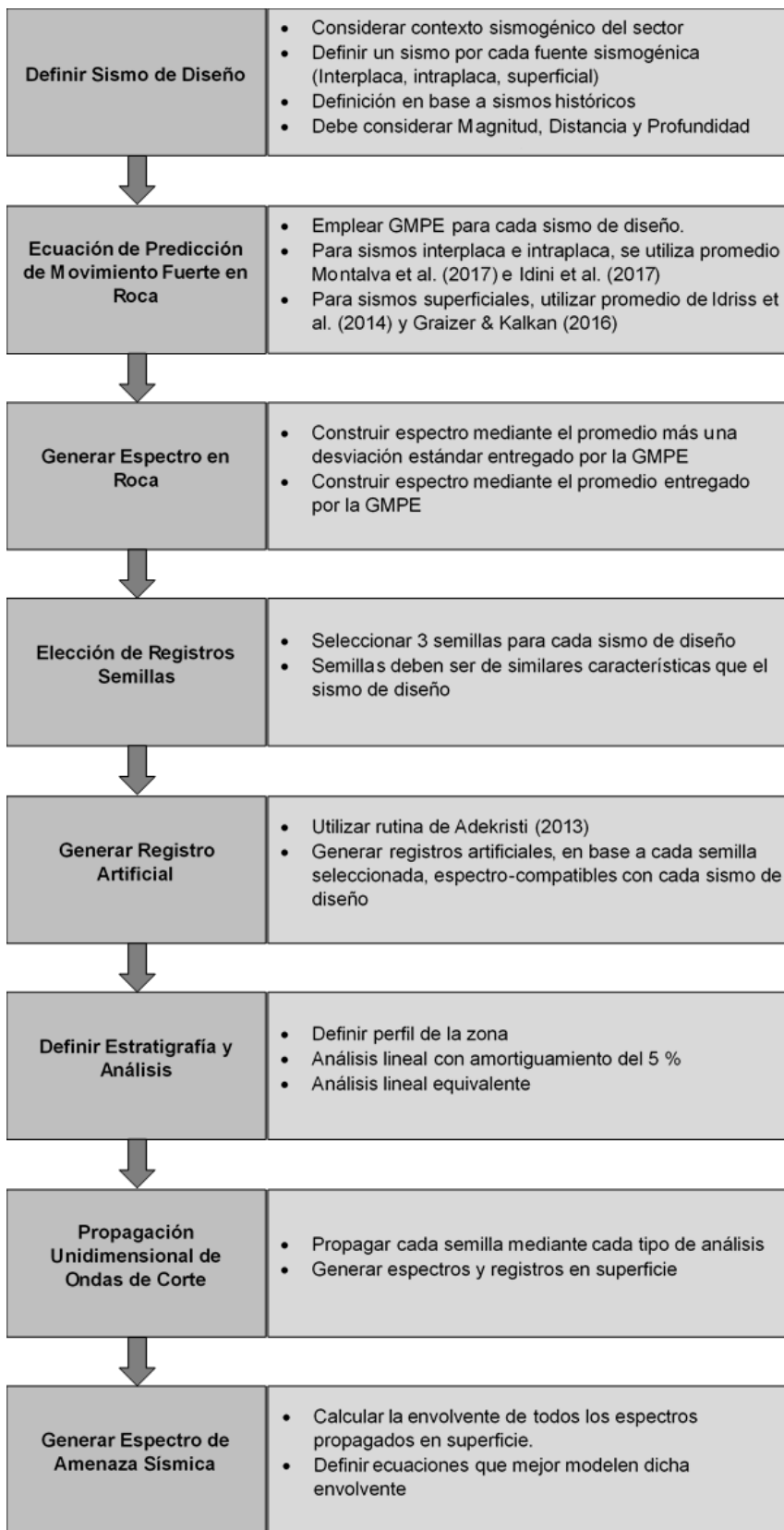


Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología para estudio determinístico

3.2 Enfoque probabilístico para la amenaza sísmica

Un estudio probabilístico de amenaza sísmica se basa en considerar todos los eventos sísmicos dentro de una zona, los cuales están detalladamente descritos en un catálogo sísmico. Este catálogo ayuda a objetivizar la elección de un único sismo de diseño, propio de los métodos determinísticos para desarrollar el cálculo de la probabilidad de excedencia de cierta aceleración para un período dado.

El catálogo sísmico utilizado en este estudio está disponible en la página web del USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), y considera todos los eventos con magnitudes mayores o iguales a M_w 5, ocurridos en los últimos 88 años en Chile. Para homogeneizar las magnitudes reportadas a magnitud de momento, se emplean las relaciones globales entre magnitud de ondas de cuerpo y magnitud de ondas superficiales con la magnitud de momento explicitadas en las ecuaciones 3.1 y 3.2 (Scordilis, 2006). Además, los eventos con profundidades mayores a los 250 [km] no son considerados en el análisis, por tratarse de sismos intraplaca profundos, no tomados en cuenta este estudio.

$$\begin{aligned}M_w &= 0.67 \cdot M_s + 2.07, & 3 \leq M_s \leq 6.1 \\M_w &= 0.99 \cdot M_s + 0.08, & 6.2 \leq M_s \leq 8.2\end{aligned}\tag{3.1}$$

$$M_w = 0.85 \cdot m_b + 1.03 \quad 3.5 \leq m_b \leq 6.2\tag{3.2}$$

En donde:

M_w : Magnitud de momento
 M_s : Magnitud de ondas superficiales
 m_b : Magnitud de ondas de cuerpo

Un aspecto importante que consideran los estudios de riesgo sísmico es la regionalización de la zona, ya que no toda el área de interés presenta las mismas tasas de recurrencia sísmica. Para regionalizar, en este estudio, se considera la propuesta de Susa (2004). Esta se basa en largos de ruptura de sismos históricos para eventos interplaca.

Con la regionalización de Susa (2004), el puente Águila Norte se encuentra en la zona seis que. Con el catálogo considerado, presenta 540 eventos (Figura 3.2).

Adicionalmente se realiza el análisis para la regionalización propuesta por Poulos et al. (2019), que divide el país en zonas de sismicidad interplaca e intraplaca, basado en alterar en la menor medida posible la relación de Gutenberg-Richter calculada en la zona.

Con la regionalización de Poulos et al. (2019), el puente Águila Norte se encuentra entre las zonas dos de sismos interplaca y la zona siete de sismos intraplaca. Con el catálogo considerado, presenta 1165 eventos (Figura 3.2).

Es importante señalar que ninguna de las regionalizaciones consideradas hace una división utilizando las tres fuentes sísmicas planteadas al inicio del documento; en efecto, no hay regionalización que considere sismos superficiales en el país, debido a su baja

ocurrencia. Sin embargo, tal como se verá más adelante en este estudio, la regionalización no afecta en gran medida las aceleraciones máximas estimadas.

En este contexto, el presente estudio de amenaza sísmica se basa en la metodología propuesta por Baker (2008). Esta metodología caracteriza las fuentes, magnitudes, distancias y profundidades de los eventos a considerar.

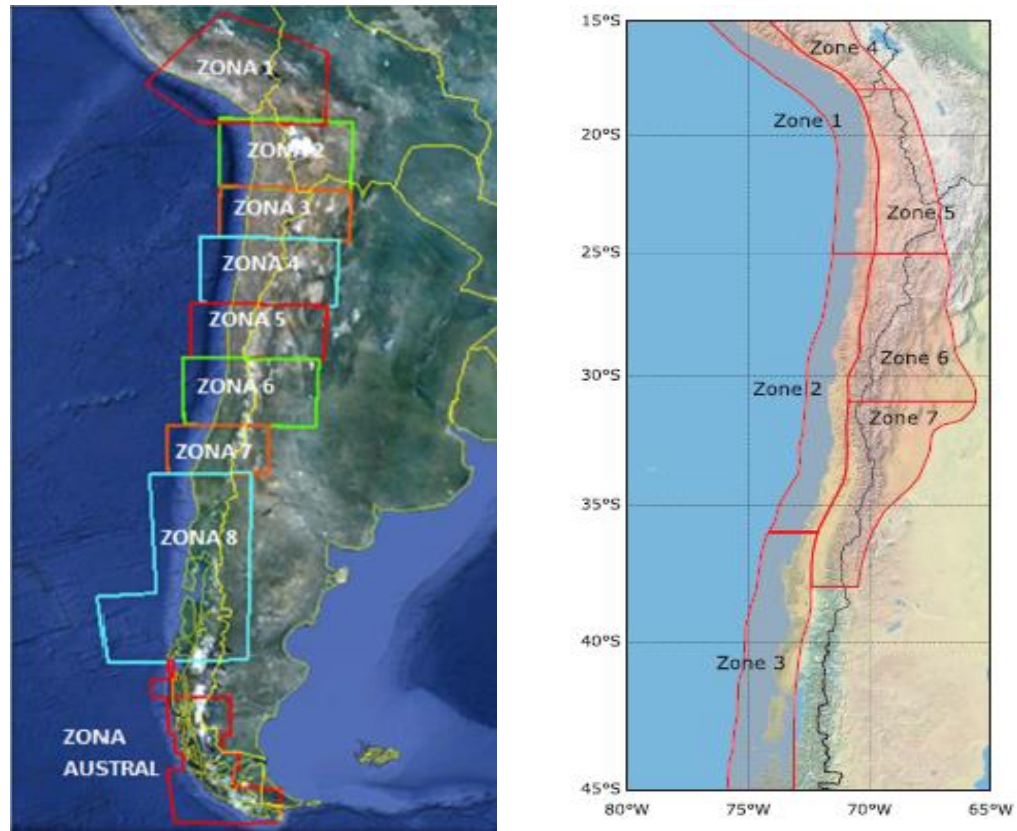


Figura 3.2 Regionalizaciones del territorio chileno consideradas en este estudio. A la derecha, la regionalización propuesta por Susa (2004), modificado de (Núñez et al. 2015). A la izquierda Regionalización propuesta por Poulos, et al. (2019).

Para caracterizar las anteriores variables, se debe calcular la probabilidad de que estas tomen cierto valor en el catálogo empleado, según la siguiente ecuación:

$$P(X_i = x_j) = \frac{\sum(X_i = x_j)}{\sum X_i} \quad (3.3)$$

En donde:

- X_i : Variable considerada
- x_j : Valor tomado por la variable considerada
- $P(X_i = x_j)$: Probabilidad de que la variable de un evento tome el valor de x_j .

$\sum(X_i = x_j)$: Número de eventos con variable de valor igual a x_j .
 $\sum X_i$: Número variables a consideradas

Por otro lado, es necesario conocer la tasa de excedencia de cierta magnitud en la zona, dada por la siguiente expresión:

$$\lambda(M_i > m_{min}) = \frac{\sum(M_i > m_{min})}{V} \quad (3.4)$$

En donde:

$\lambda(M_i > m_{min})$: Tasa de ocurrencia de eventos con magnitud mayor a m_{min} .
 m_{min} : Magnitud mínima considerada (Mw 5).
 $\sum(M_i > m_{min})$: Número de eventos con magnitud mayor a m_{min} .
 V : Ventana de tiempo, en años.

Dado que en el tiempo aumenta el número de sismos registrados por unidad de tiempo, también debido a una mayor instrumentación, es que se considera una ventana de 50 años para calcular la tasa de excedencia de la zona en estudio.

Para obtener la aceleración máxima del suelo, es necesario emplear las GMPE. Para esto se emplea la curva de Montalva (Montalva et al. 2017), para las fuentes sísmicas interplaca e intraplaca, mientras que se emplea la curva de Graizer & Kalkan (Graizer et al. 2013) para la fuente sísmica superficial. En todos los casos se considera que el suelo de fundación es roca, para compatibilizar ambos enfoques en el estudio de amenaza sísmica. Alternativamente sea realiza un análisis complementario empleando la ecuación de predicción de movimiento fuerte de Idini (Idini et al. 2017), para las fuentes sísmicas interplaca e intraplaca.

Asumiendo que la aceleración máxima del suelo presenta una distribución normal en las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte a utilizar, se tiene la siguiente expresión para calcular la probabilidad de excedencia de cierta aceleración espectral, las cual requiere una magnitud, una distancia y una profundidad:

$$P(m_j, r_k, h_s) = 1 - \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right) \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.3:

x : Valor de aceleración máxima a evaluar.
 \bar{x} : Valor medio de PGA o PSA según GMPE.
 σ : Desviación estándar según GMPE.
 $P(m_j, r_k, h_s)$: Probabilidad de excedencia de una aceleración “ x ”, dada una magnitud, una distancia y una profundidad.

Por otro lado, mediante el teorema de probabilidades totales, se combina la información anteriormente expuesta, para calcular la probabilidad de excedencia de cierto valor espectral, dado un único sismo dentro del grupo de control, para cada fuente sísmica (Baker, 2008). Esto se traduce en la ecuación 3.4, presentada a continuación.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} \sum_{s=1}^{n_H} P(m_j, r_k, h_s) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k) P(H_i = h_s) \quad (3.6)$$

En donde:

- n_M : Discretización de magnitudes disponibles en el catálogo
- n_R : Discretización de distancias disponibles en el catálogo
- n_H : Discretización de profundidades disponibles en el catálogo
- $\lambda(IM > x)$: Probabilidad de excedencia una aceleración “x”

Debido al amplio margen de magnitudes, distancias y profundidades disponibles en la información utilizada, se agrupan las variables de los sismos presentes en el catálogo en intervalos definidos según la siguiente discretización:

- Magnitudes Mw 0.1
- Distancias de 10 [km]
- Profundidades 1 [km]

Para el estudio de amenaza sísmica, es necesario definir qué tan frecuentemente ocurren los eventos en el sitio de interés. Para esto, se modifica la ecuación 3.4, multiplicando por la tasa de ocurrencia calculada con la ecuación 3.2, obteniendo la tasa de excedencia de cierta aceleración (Baker, 2008).

$$\lambda^*(IM > x) = \lambda(M_i > m_{min}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} \sum_{s=1}^{n_H} P(m_j, r_k, h_s) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k) P(H_i = h_s) \quad (3.7)$$

Tomando en cuenta que los cálculos anteriores se deben realizar para cada una de las fuentes sísmicas consideradas, finalmente se tiene que:

$$\lambda^*(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{fuentes}} \lambda(M_i > m_{min}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} \sum_{s=1}^{n_H} P(m_j, r_k, h_s) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k) P(H_i = h_s) \quad (3.8)$$

En donde:

$\lambda^*(IM > x)$: Tasa de excedencia de una aceleración “x”.

n_{fuentes} : Número de fuentes a considerar. En este caso tres.

Por otro lado, el periodo de retorno se define como el inverso de la tasa de excedencia, dado por la siguiente expresión:

$$T(IM > x) = \frac{1}{\lambda^*(IM > x)} \quad (3.9)$$

En donde:

$T(IM > x)$: Período de retorno de una aceleración “x”.

Asumiendo una distribución de Poisson para la ocurrencia de eventos, debido a su simplicidad y a que muestra ser consistente con los datos disponibles para la zona en estudio (Poulos et al. 2019), se tiene que la probabilidad de que ocurra al menos un evento para una ventana de tiempo dada se puede inferir a través de la fórmula:

$$P(x) = 1 - e^{-\lambda^*(IM>x)t} \quad (3.10)$$

En donde:

t : Ventana de tiempo a considerar.

$P(x)$: Probabilidad de que ocurra al menos un evento.

Repitiendo el proceso de cálculo de la probabilidad de excedencia de cierta aceleración que se realizó para el PGA, pero para las pseudo aceleraciones de un espectro de respuesta (ecuación 3.3), y considerando este cambio de las ecuaciones 3.4 a la 3.8, es posible construir un espectro de amenaza uniforme, dada cierta probabilidad de excedencia y periodos de tiempo. En el contexto del análisis presentado se tienen los siguientes casos para el desarrollo del análisis:

- Sismo de servicio: Probabilidad de 50% de excedencia en 50 años.
- Sismo de diseño: Probabilidad de 10% de excedencia en 50 años.
- Sismo máximo creíble: Probabilidad de 10% de excedencia en 100 años.

Una vez obtenido el espectro de amenaza uniforme, para el caso del sismo máximo creíble (MCE), se considera este sismo como un nuevo espectro objetivo, y se repite la misma metodología empleada para el estudio determinístico (es decir spectral matching y propagación mediante el software “DEEPSOIL”).

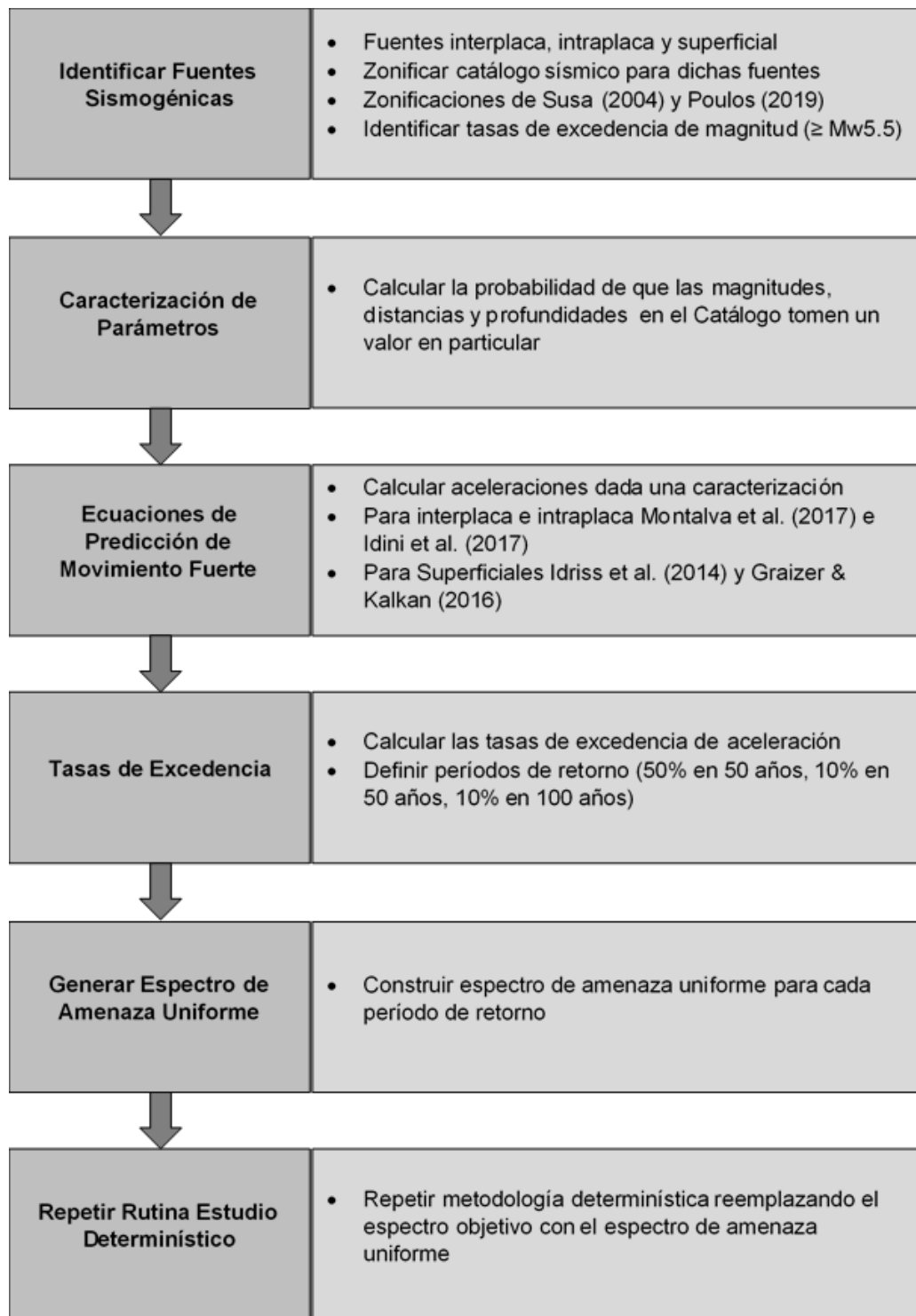


Figura 3.3 Diagrama de flujo de metodología para estudio probabilístico

3.3 Procesamiento de registros

Para filtrar los registros a utilizar en los análisis expuestos, se emplea la corrección de línea base disponible en el software “DEEPSOIL”, versión 6.1 (Hashash et al. 2016). Esta corrección está basada en las recomendaciones incluidas en el programa de procesamiento de señales del servicio geológico de los Estados Unidos (“USGS” por sus siglas en inglés), “BAP” (Basic strong-motion accelerogram processing software). El proceso sigue los siguientes pasos:

1. Truncar, tanto el inicio como el final del registro con el primer y último cruce por cero.
2. Agregar ceros al inicio y al final del registro.
3. Procesar el registro con un filtro bidireccional “Butterworth” de segundo orden recursivo, pasa altos con una frecuencia de corte de 0.1 [Hz], en el dominio del tiempo.
4. Truncar el nuevo registro usando su último cruce por cero.

3.4 Mejoramiento de suelo

En cuanto al estudio del efecto de un posible mejoramiento de suelo, en el contexto de reducir el peligro a licuación, se evalúa la respuesta de tres perfiles característicos de la zona de Paine, reemplazando los primeros 10 [m] del perfil con tres candidatos, arena limpia de Ottawa, y esta misma arena con un 1% de Laponita y 3% de Bentonita.

Para evaluación del mejoramiento de suelo, se emplea el modelo PDMY02, disponible en el software “OpenSees”. El primer paso es calibrar los coeficientes c_1 , c_3 , presentes en la ecuación 2.62, en base a las variables definidas en la Tabla 2.2 y de una serie de ensayos triaxiales cíclicos no drenados efectuados a cada uno de los candidatos para el mejoramiento.

Hay que recalcar que solo es de interés para este estudio el comportamiento previo a la licuación, por lo que los parámetros que actúan luego de que esta ocurra se dejarán fijos, esto es c_2 en la ecuación 2.62, d_1 y d_2 en la ecuación 2.63 y el parámetro interno Liq_1 .

Posteriormente, se realiza una propagación no lineal de un registro sísmico en los perfiles característicos de la zona, considerando el modelo PDMY02, y se evalúa la respuesta en superficie.

4 Antecedentes de la zona de estudio

El puente Águila Norte, mostrado en la Figura 4.1, es un puente recto de 148 [m] de longitud y dividido en 5 tramos iguales de 29.6 [m]. Se ubica en la ruta G-550 uniendo las calles Águila Sur y Hospital, cruzando el río angostura en la provincia del Maipo, en la comuna de Paine. Tiene una ubicación geográfica de referencia de 33.87° S y 70.75°W, remarcada en la Figura 4.2.



Figura 4.1 Puente Águila Norte, vista sur poniente (Grand, 2019).

Según la descripción hecha por Grand (2019), el tablero está compuesto por una losa continua de calzada de 20 [cm] de espesor y 10.7 [m] de ancho, que permite circulación de vehículos en dos vías. Tiene 2 aguas con pendiente del 2%.

El tablero se encuentra sobre 4 vigas de 29.4 [m] de largo y 1.4 [m] de alto, de hormigón postensado, separadas 2.6 [m] de centro a centro. Estas estructuras se encuentran unidas mediante seis barras antisísmicas de 22 [mm] de diámetro en los estribos y 12 barras del mismo diámetro en las cepas.

La infraestructura está compuesta en los apoyos intermedios por tres cepas de hormigón armado de sección circular de 1.2 [m] de diámetro, cuyas alturas varían de 3.3 [m] a 4.9 [m], unidas por una viga de coronamiento de hormigón armado de 150 [cm] de alto y 170 [cm] de ancho. En la parte inferior las cepas son unidas con una viga de encepado cuadrada de 170 [cm] de alto.

Las vigas de coronamiento poseen topes sísmicos laterales de hormigón armado de 30 [cm] de alto y 70 [cm] de ancho. Bajo las vigas de encepado se tienen tres pilotes de hormigón armado de sección circular de 1.2 [m] de diámetro, que llegan hasta los 16.75 [m] de profundidad.

Los estribos retienen material compactado y son de hormigón armado, con un muro frontal de 10.7 [m] de ancho, 4.83 [m] de alto y 30 [cm] de espesor. Se encuentran fundados sobre una losa de fundación de 150 [cm] de espesor, que a su vez se sustenta

sobre una doble fila de pilotes de 1.2 [m] de diámetro. Los estribos tienen dos muros aletas de 310 [cm] de largo y 35 [cm] de espesor.

En particular este puente no presentó daños significativos durante el terremoto del Maule de 2010, sin embargo, en su cercanía se observaron puentes como el puente Chada (Paine), el puente Romero (Paine), puente Pintúe (Pintúe) y el puente Graneros (Graneros) que no tuvieron un comportamiento sísmico adecuado, lo cual se atribuyó a características de amplificación sísmica de suelo en la zona y a deficiencias de diseño sísmicas empleadas anterior al 2010 para puentes en zona sísmica 2 Grand (2019).



Figura 4.2 División administrativa de la zona en estudio. Se destaca con una estrella roja la ubicación del puente Águila Norte. Modificado de Contreras (2012)

4.1 Suelo en la zona de estudio

El sector de Paine-Hospital se compone por abanicos aluviales, zona de descarga del acuífero (A1da). El área de estudio se encuentra sobre una franja de hasta 15 [km] de ancho asociada al acuífero principal. El depósito sedimentario consiste en su mayor parte de gravas con bolones de hasta 30 [cm], en una matriz areno-arcillosa (Grand 2019, Milovich 2000).

El terreno cuenta con pendientes de entre 0.5 y 1.0%, con un desnivel topográfico que varía entre 25 a 100 [m], entre el punto más bajo al más alto, donde el agua se acumula en superficie. Los niveles de la napa se encuentran a profundidades someras, inferiores a 5 [m]. El suelo es principalmente limo-arcillo-arenoso, en donde localmente se diferencian dos horizontes según los contenidos de materia orgánica y limo, mayores en el horizonte superior, con espesores de hasta 4 [m] y con colores de pardo oscuro amarillento a grisáceo (Grand, 2019).

Por otro lado, se otra unidad de interés denominada cauces fluviales y terrazas fluviales subactuales (F2). Correspondiente a los lechos de ríos y esteros de la cuenca (rio Angostura), compuesto por depósitos no consolidados de diversos materiales, desde bolones hasta arenas y limos (Grand, 2019).

4.2 Modelo de velocidades de onda de corte asociadas al sector

Para realizar un análisis de respuesta de sitio, es necesario conocer el espesor y la velocidad de propagación de onda de corte de los estratos. La profundidad hasta la roca basal se estima en 240 [m] lo cual se deduce de estudios gravimétricos realizados en la zona (González et al. 2018), e indicados en la Figura 4.3.

En consecuencia, con los resultados obtenidos en la prospección geofísica reportada por Grand (2019), se define la estratigrafía del lugar de emplazamiento según se indica en la Tabla 4.1, donde se indica, para cada estrato, su densidad y su velocidad de onda de corte. Ambos parámetros aumentan con la profundidad.

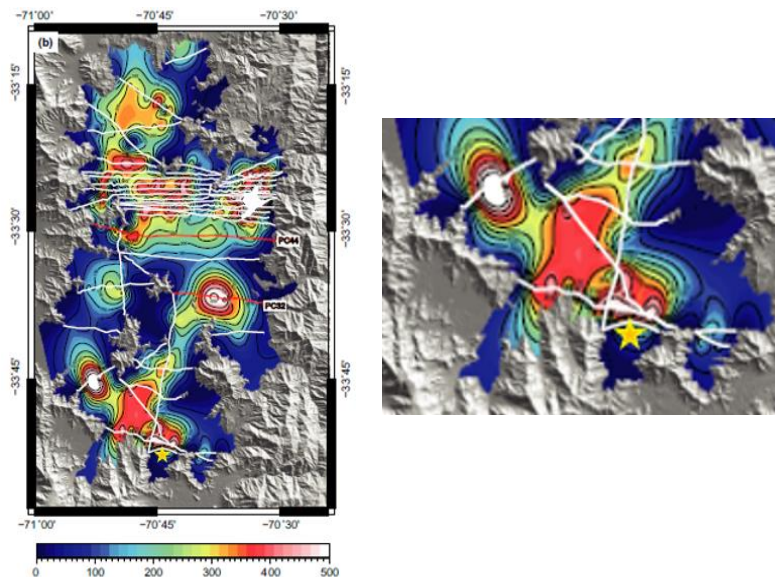


Figura 4.3 Espesor de sedimentos [m]. Modificado de González et al. 2018. La estrella marca la zona del puente Águila Norte. La imagen de la derecha es una ampliación de la zona inferior de la imagen a la izquierda.

Tabla 4.1 Modelo de velocidades de onda de corte con mejor ajuste (Grand, 2019)

Tipo de Suelo	Espesor [m]	γ [kN/m ³]	Vs [m/s]
Arena Suelta	4	19	170
Arena	10	19	240
Grava	41	20	360
Grava	27	20	420
Grava	160	21	560
Roca	-	25	2500

4.3 Caracterización dinámica del sitio

Grand (2019), observó que la frecuencia predominante del sitio de emplazamiento del puente es igual a 0.47 [Hz]. Esta baja frecuencia se justifica principalmente por el gran espesor del depósito de suelos. Por otro lado, se estableció una velocidad de propagación de ondas de corte promedio de los primeros 30 [m] de 274 [m/s].

5 Estudio Determinístico

5.1 Sismos de diseño

En la zona en estudio se pueden presentar sismos interplaca e intraplaca, dado que su ubicación geográfica es al norte de la península de Taitao. Además, podría presentar sismos superficiales debido su cercanía con la falla de San Ramón (Figura 5.2), la cual se ha demostrado que es una falla inversa activa (Pérez et al. 2014). A continuación, se muestran los sismos de diseño considerados, según su fuente.

- Sismo de diseño interplaca: Sismo de diseño interplaca: para este tipo de sismos, se tienen como evento característico el sismo del Maule de 2010. Considerando una magnitud de Mw 8.5 y una superficie de ruptura hipotética, expuesta en la Figura 5.1, con una distancia en planta de 50 [km]. Tomando en cuenta una profundidad de 50 [km] en el borde de la superficie de ruptura, se tiene una distancia a la superficie de ruptura de 70 [km].
- Sismo de diseño intraplaca: para este tipo de sismos, se considera el peor escenario posible en cuanto a magnitud, acorde a las observaciones históricas de terremotos chilenos, Mw 8 (Leyton et al. 2010). Se fija una distancia epicentral de 50 [km] y una profundidad de su hipocentro de 70 [km], acorde a la profundidad de la placa oceánica en el sector.
- Sismo de diseño superficial: para este tipo de sismos se asume un potencial evento Mw 7.5 producto de la falla de San Ramón (Ammirati et al. 2019), Se estima una distancia superficial en base a la proyección de la falla de San Ramón de tienen 19 [km] (Figura 5.2). Suponiendo una profundidad de 10 [km] (Ammirati et al. 2019), resulta en una distancia entre el puente al plano de ruptura de aproximadamente 22 [km].

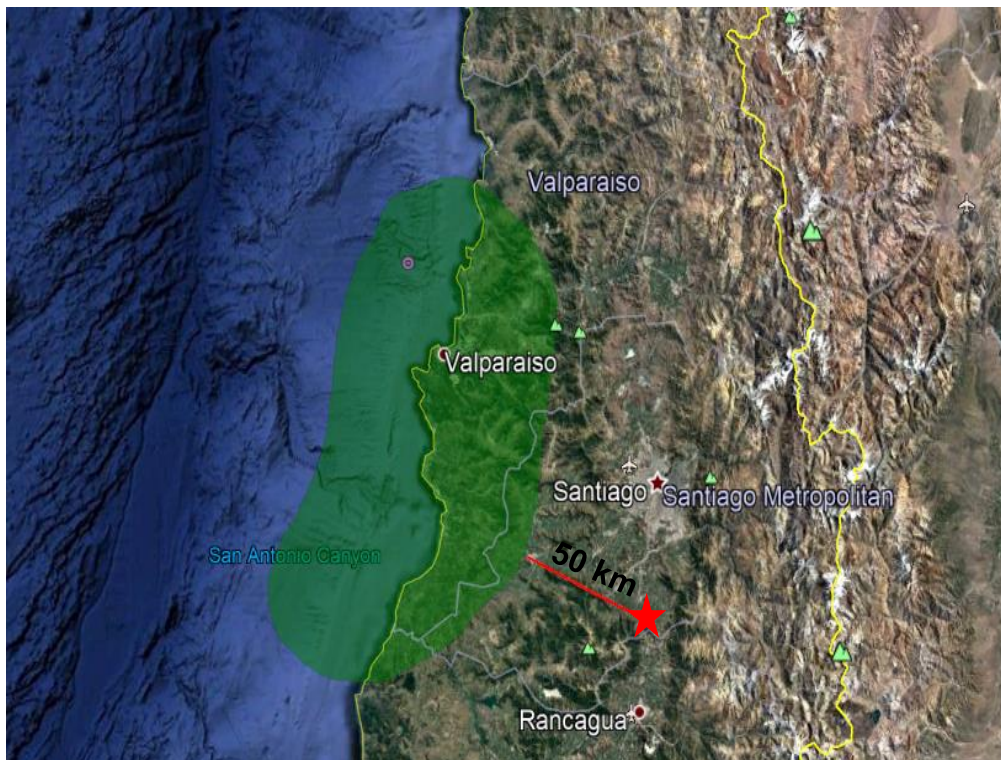


Figura 5.1 Distancia entre el puente Águila Norte (estrella roja) y el área de ruptura de hipotético sismo de diseño interplaca

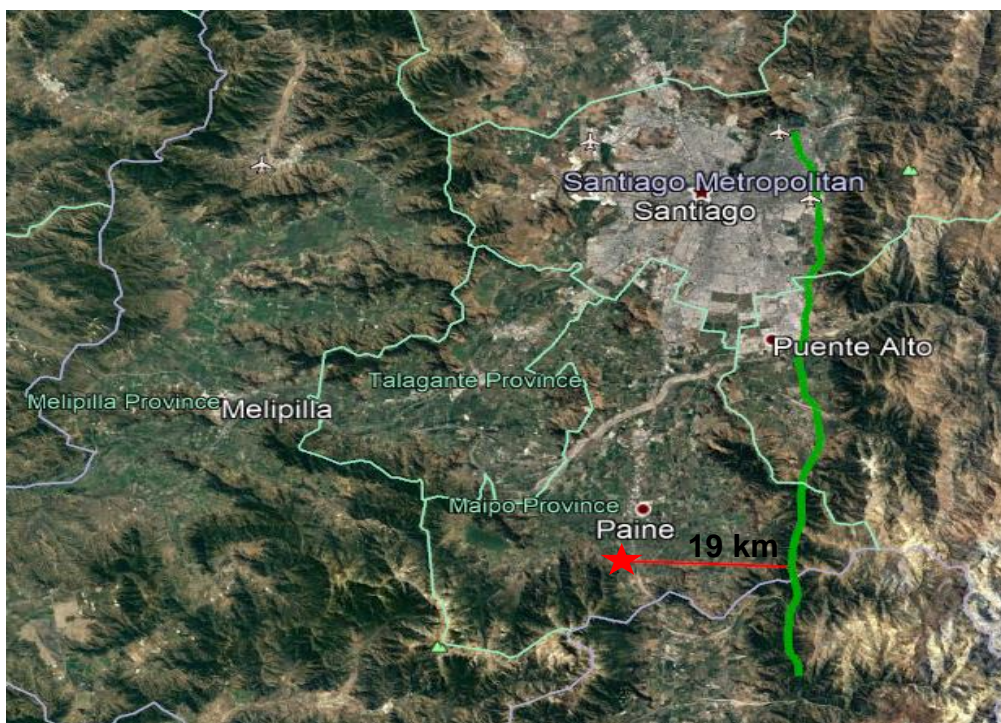


Figura 5.2 Distancia entre puente Águila Norte (estrella roja) y extensión de la falla de San Ramón (línea verde).

5.2 Espectros objetivo

Empleando la GMPE de Montalva et al. (2017) y la de Idini et al. (2017) para los sismos de diseño interplaca e intraplaca presentados en la Sección 5.1, se obtienen los espectros de las Figura 5.3, y 5.4. Para el caso del sismo de diseño superficial, se consideran las GMPE de Idriss (2014) y la de Graizer et al. (2013) para obtener los espectros de la Figura 5.5.

Se observa que, al considerar la desviación estándar en el cálculo del espectro de aceleraciones, los valores que estos alcanzan duplican a los de los espectros construidos en base al valor promedio. Al aumentar el período esta discrepancia disminuye.

Por otro lado, los espectros producto de diferentes GMPE para un mismo sismo de diseño puede variar significativamente (como en el caso del sismo de diseño intraplaca, en la figura 5.4). Por esta razón, se opta por considerar, a lo largo de este estudio, el valor promedio entregado por las distintas GMPE para cada sismo de diseño (línea punteada en las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5)

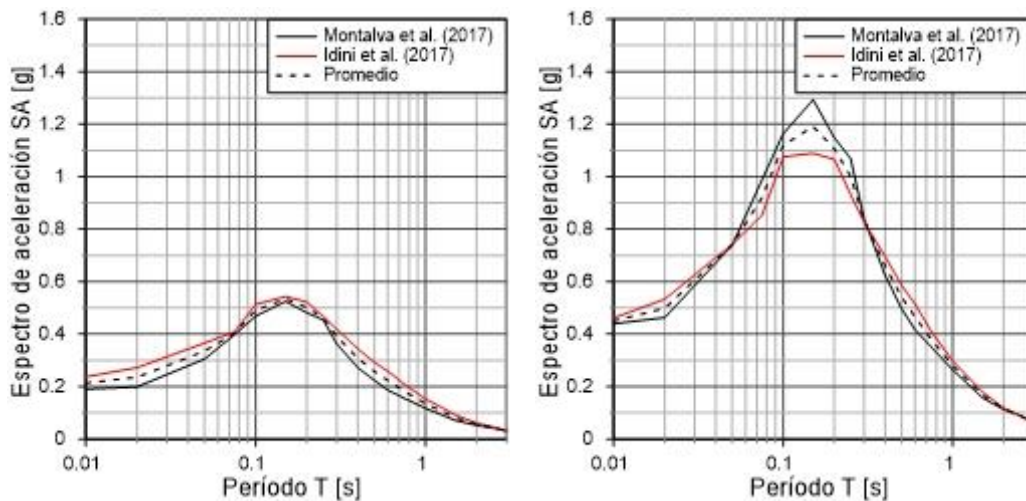


Figura 5.3 Espectros objetivos para sismo interplaca considerando roca superficial. A la izquierda el valor promedio entregado por las GMPE, a la derecha el valor promedio entregado por las GMPE más una desviación estándar.

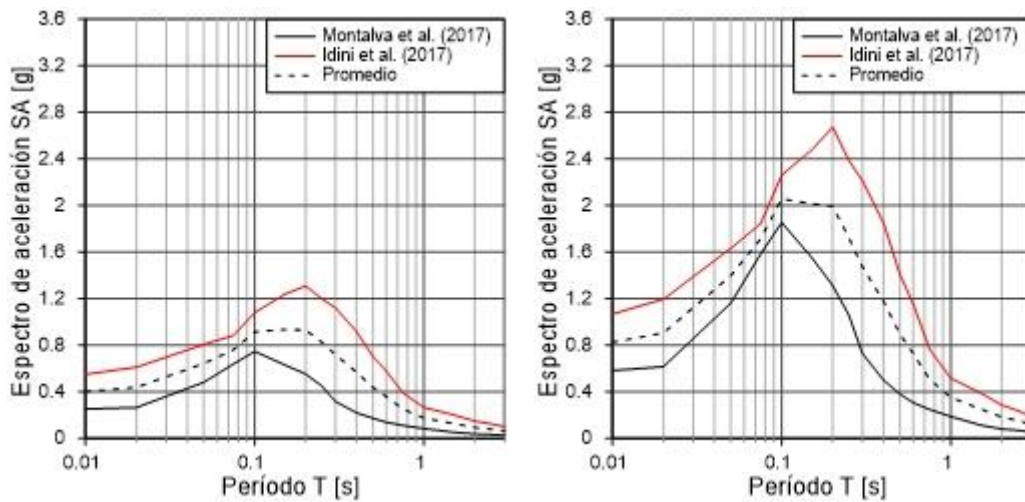


Figura 5.4 Espectros objetivos para sismo intraplaca considerando roca superficial. A la izquierda el valor promedio entregado por las GMPE, a la derecha el valor promedio entregado por las GMPE más una desviación estándar

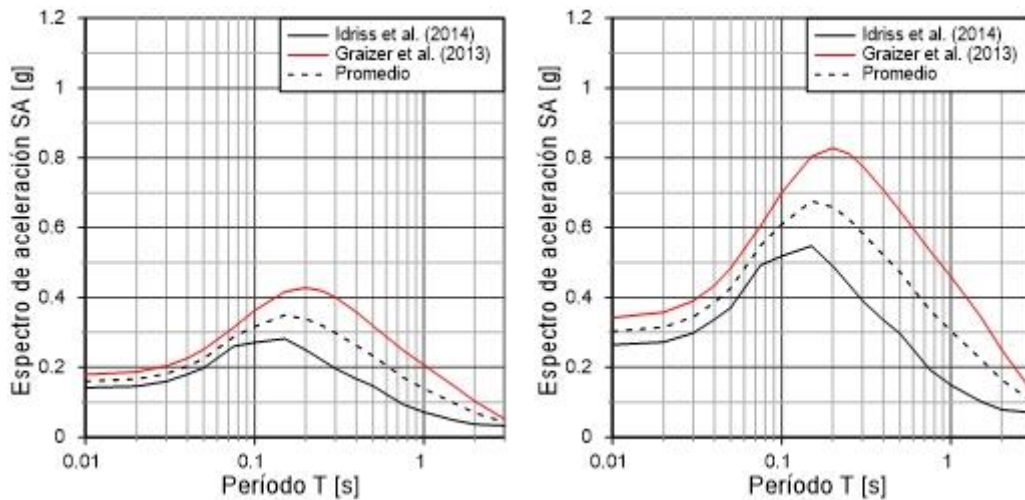


Figura 5.5 Espectros objetivos para sismo superficial considerando roca superficial. A la izquierda el valor promedio entregado por las GMPE, a la derecha el valor promedio entregado por las GMPE más una desviación estándar

En cuanto a los espectros, tanto en el caso que considera la desviación estándar como en el caso en que solo considera el valor promedio, se observa que el espectro del sismo de diseño intraplaca domina claramente para periodos bajos. Para periodos cercanos a 1 [s], los tres espectros de cada sismo de diseño alcanzan valores similares.

5.3 Registros semilla

Para elegir un registro semilla, se considera un tipo de evento y un suelo de fundación (tipo roca), que sean acordes al sismo de diseño para cada caso.

En el caso de sismos interplaca, se emplean registros del terremoto del Maule del 2010 (Mw 8.8), por otro lado, para sismos intraplaca, se considera el sismo de Tarapacá del 2005 (Mw 7.8). Cabe destacar que solamente se tiene una estación en roca con registro para el terremoto de Tarapacá 2005. Por esta razón, se utilizan eventos internacionales, como es el sismo de Puebla 2017 en México (Mw 7.1). Del mismo modo se procede para sismos superficiales, donde debido a la escasez de registros nacionales, se considera el sismo de Chichi 1999 en Taiwán (Mw 7.7).

La Tabla 5.1, resume las principales características de los registros semillas considerados, tres con sus dos componentes horizontales por cada caso, junto al PGA alcanzado por cada uno de ellos.

Tabla 5.1 Resumen de registros semillas considerados.

Evento	Año	Estación	Mw	Distancia [km]	Prof. [km]	V _{S30} [m/s]	PGA [g]
Maule (Chile)	2010	Santa Lucia	8.8	125*	30.1	>1500	N-S: 0.32
							E-O: 0.22
Maule (Chile)	2010	Las Tórtolas	8.8	139*	30.1	>1500	N-S: 0.18
							E-O: 0.17
Maule (Chile)	2010	Melado	8.8	122*	30.1	-	N-S: 0.14
							E-O: 0.14
Tarapacá (Chile)	2005	PIS	7.8	156**	108	>1500	N-S: 0.31
							E-O: 0.44
Puebla (México)	2017	HMTT	7.1	79**	51.2	-	N-S: 0.17
							E-O: 0.15
Puebla (México)	2017	RABO	7.1	62**	51.2	-	N-S: 0.16
							E-O: 0.13
ChiChi (Taiwán)	1999	HWA003	7.7	56*	8.0	1526	N-S: 0.14
							E-O: 0.05
ChiChi (Taiwán)	1999	TAP065	7.7	122*	8.0	1023	N-S: 0.027
							E-O: 0.037
ChiChi (Taiwán)	1999	TAP077	7.7	119*	8.0	1023	N-S: 0.034
							E-O: 0.03

*Distancia al plano de ruptura.

** Distancia hipocentral.

Los registros para el sismo del Maule del 2010 y el sismo de Tarapacá del 2005 se obtuvieron del centro sismológico nacional, CSN (Figura 5.6 y Figura 5.7). Para el caso de los registros para el sismo de Puebla (2017), estos se obtuvieron del sitio web "<https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Consultas/Filtro.aspx>", producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM". (Figura 5.7).

Por otro lado, los registros para el sismo de Chichi (1999), se obtienen del sitio web "<https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/260539/searches/new?fbclid=IwAR3RYRxeHC6TySXIpaVaaAtEjuq15A2zT9YLBtLvGGZIRKjaeL-OOI9zj9s>" (Figura 5.8).

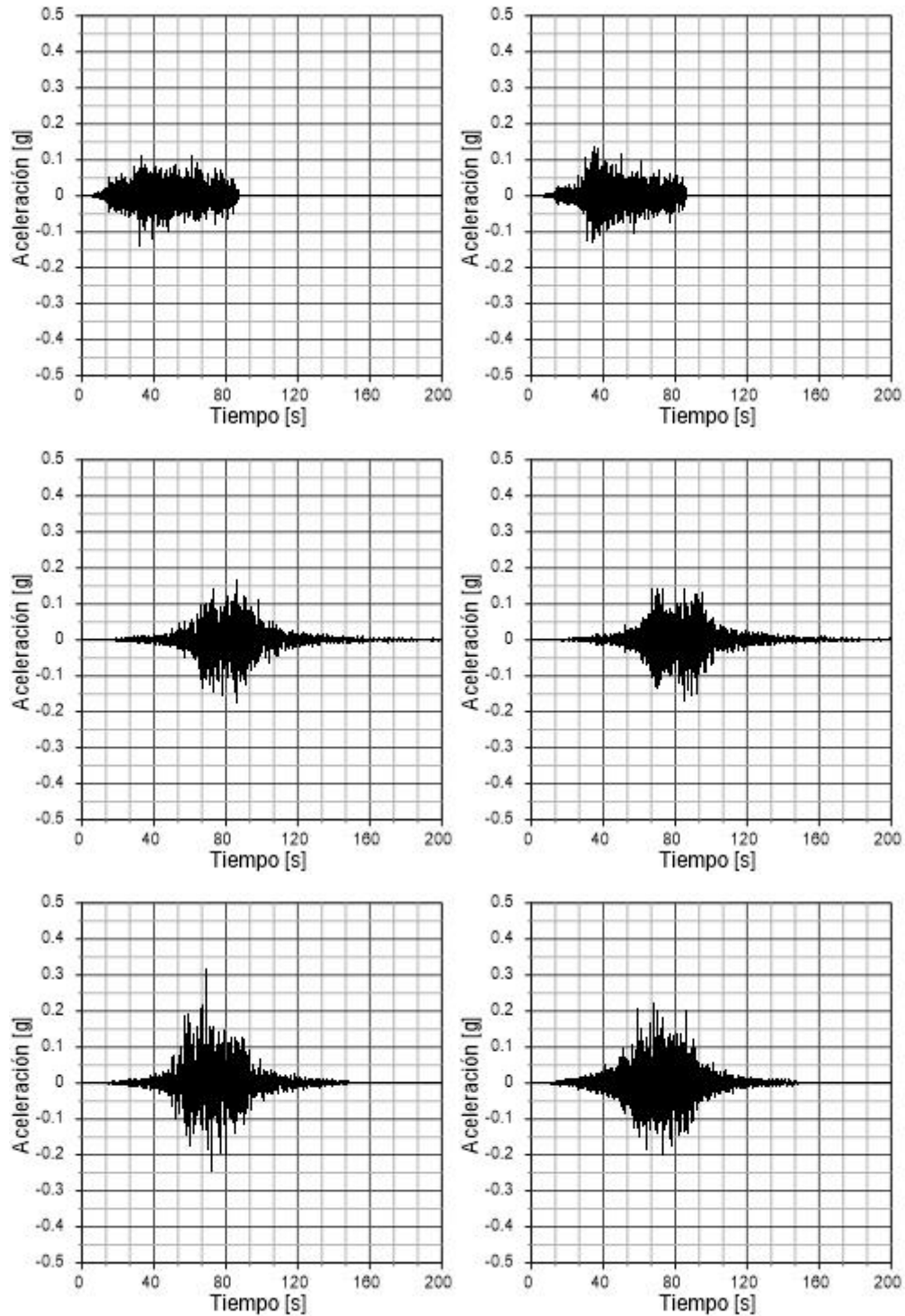


Figura 5.6 Registros semillas empleados para sismo de diseño interplaca. De arriba hacia abajo, estaciones Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

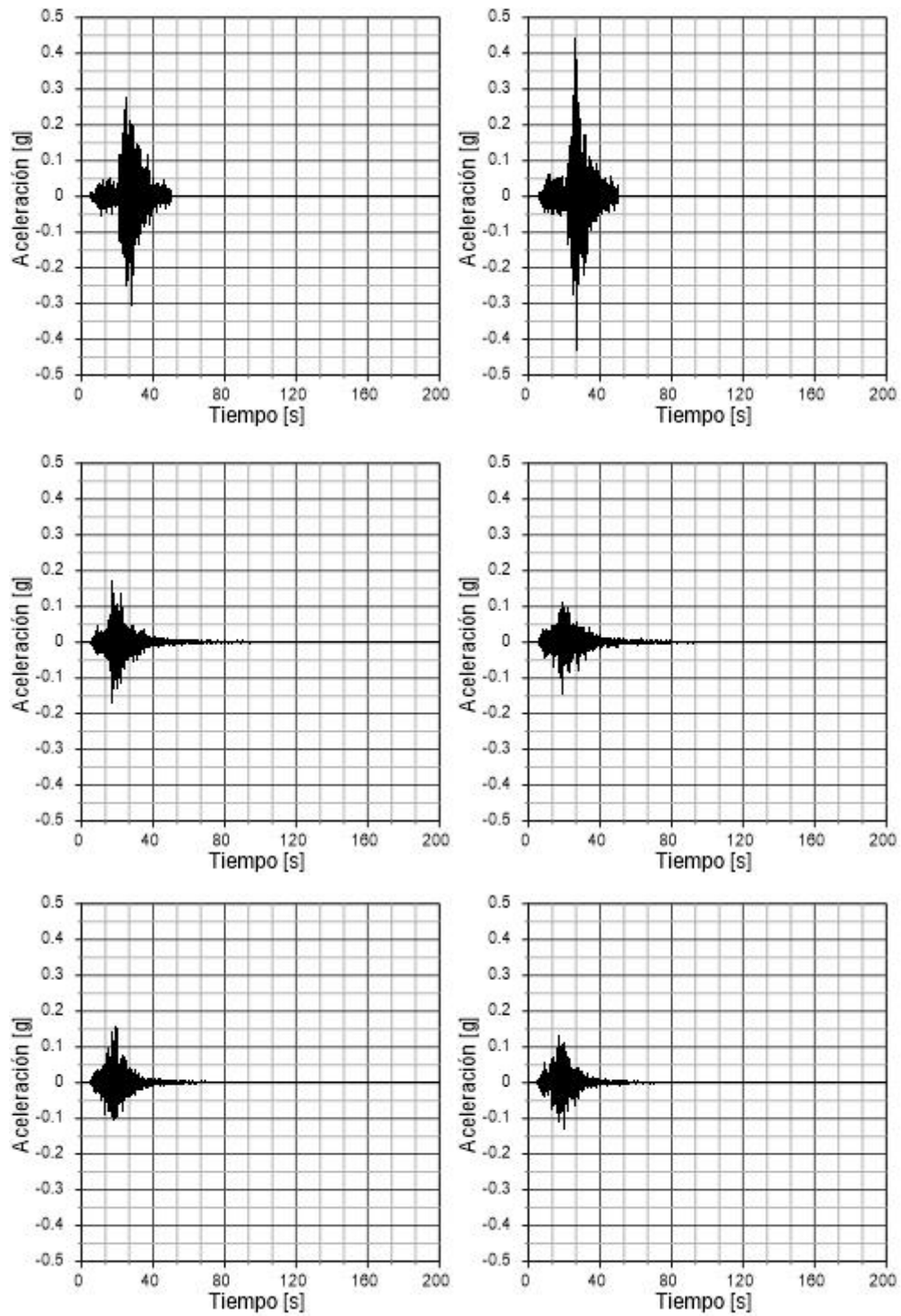


Figura 5.7 Registros semillas empleados para sismo de diseño intraplaca. De arriba hacia abajo, estaciones PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

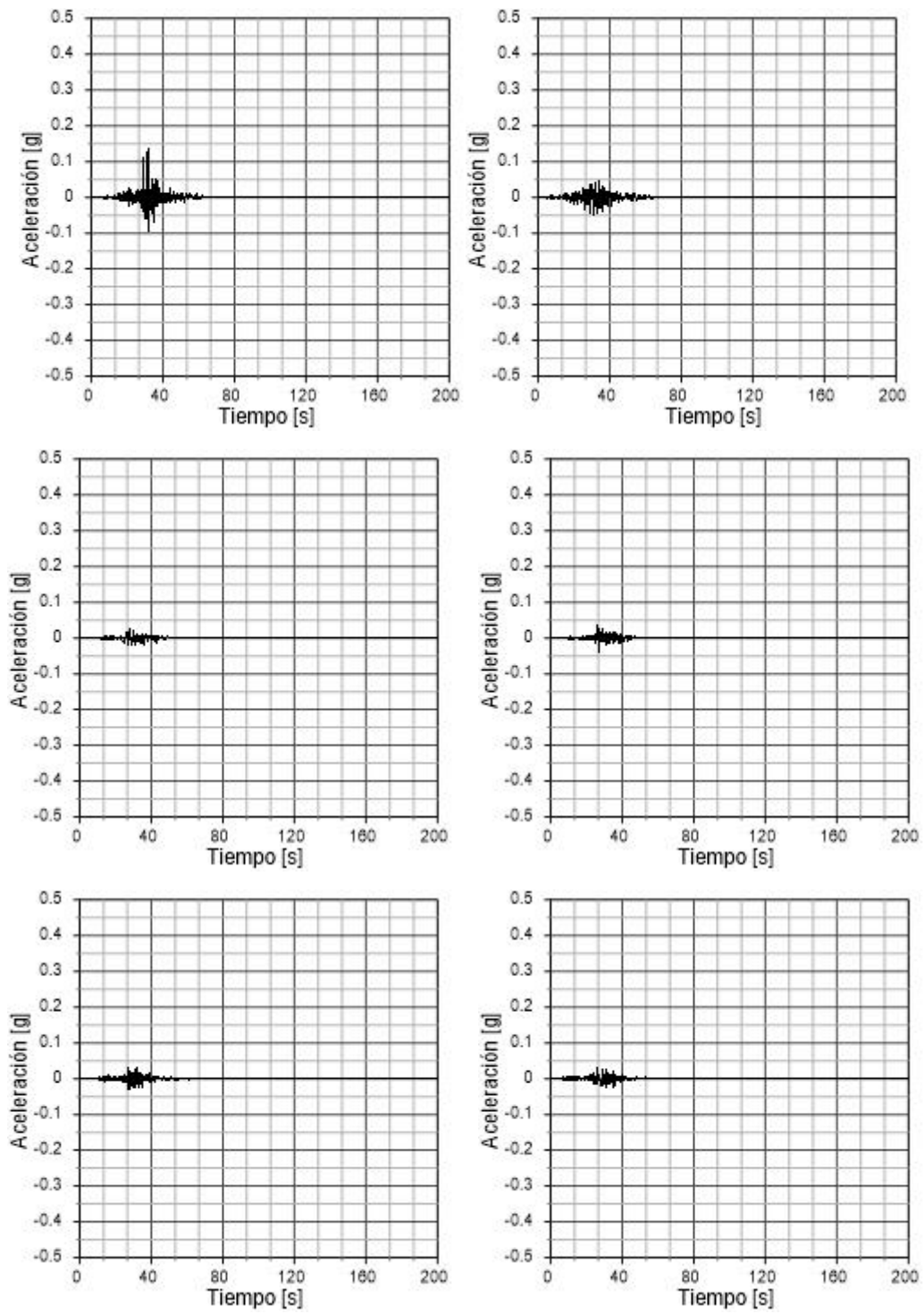


Figura 5.8 Registros semillas empleados para sismo de diseño superficial. De arriba hacia abajo, estaciones HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

De los anteriores registros semillas, se obtienen los siguientes espectros de aceleraciones (Figura 5.9 Figura 5.10 y Figura 5.11).

En general son espectros con valores de aceleración bajas, en comparación con los espectros producto de los sismos de diseño al considerar la desviación estándar en las GMPE. Se asemejan bastante a los espectros promedio de las GMPE (Figura 5.3, 5.4 y 5.5).

Los espectros de los registros semillas se asemejan bastante entre componentes para una misma estación, a excepción de los registros de la estación Pisagua (Figura 5.10) y la estación HWA003 (Figura 5.11).

Cabe destacar que las semillas para el caso de sismo de diseño superficial presentan espectros de aceleraciones bastante bajos, sin embargo, debido a la escasez de registros en roca, se optó por usarlos en el análisis de todos modos.

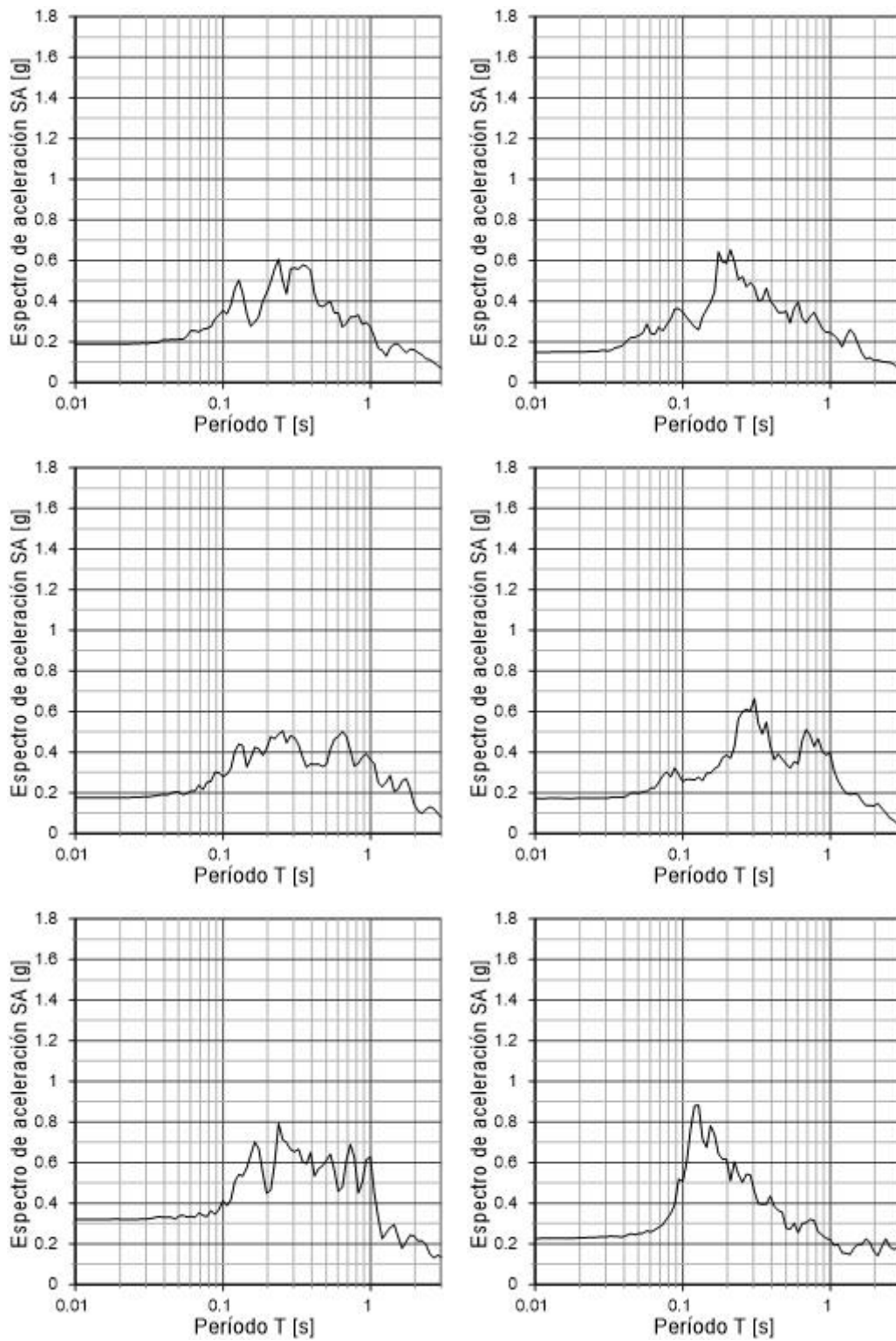


Figura 5.9 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño interplaca. De arriba hacia abajo, estaciones Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

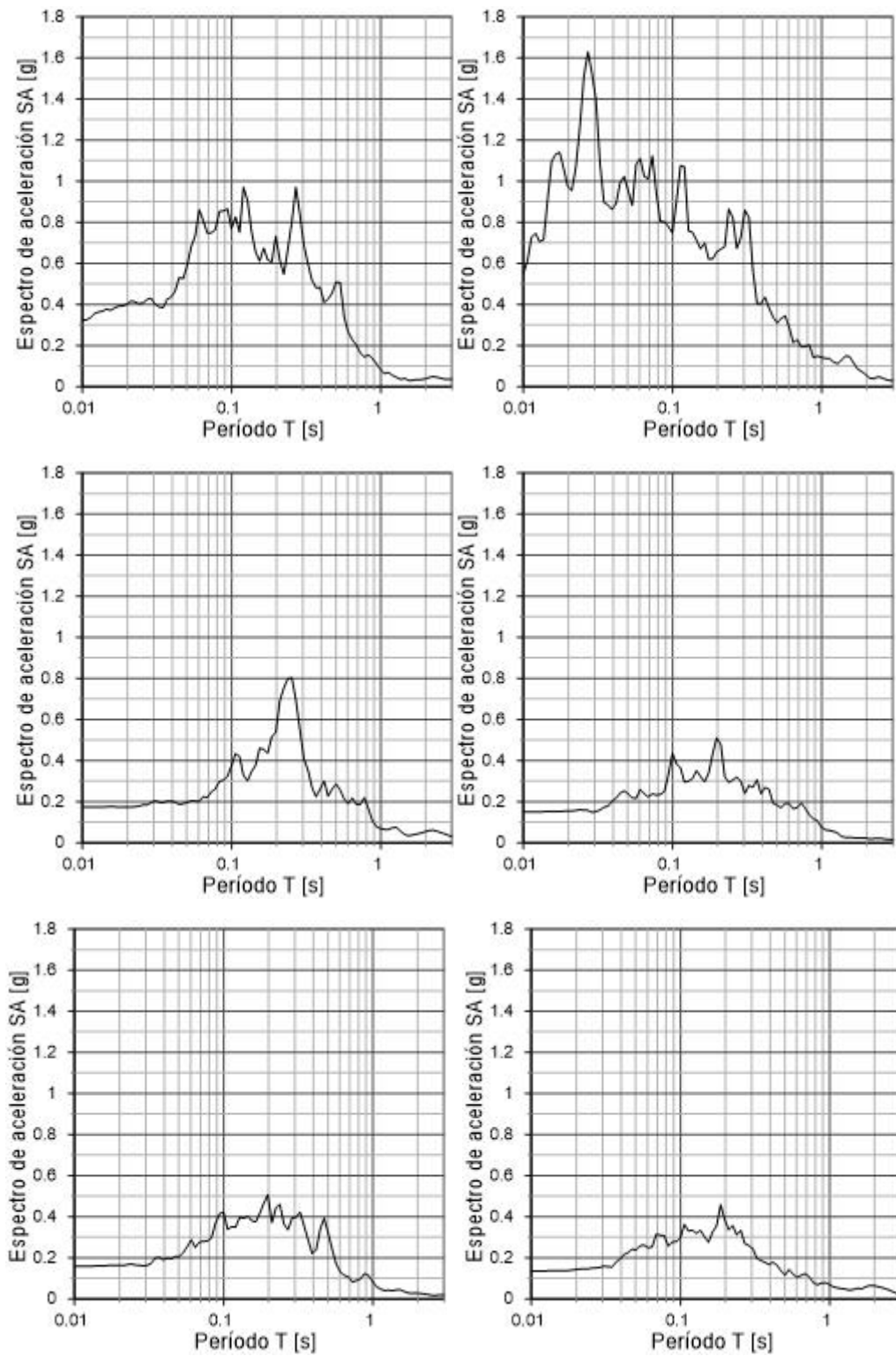


Figura 5.10 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño intraplaca. De arriba hacia abajo, estaciones PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

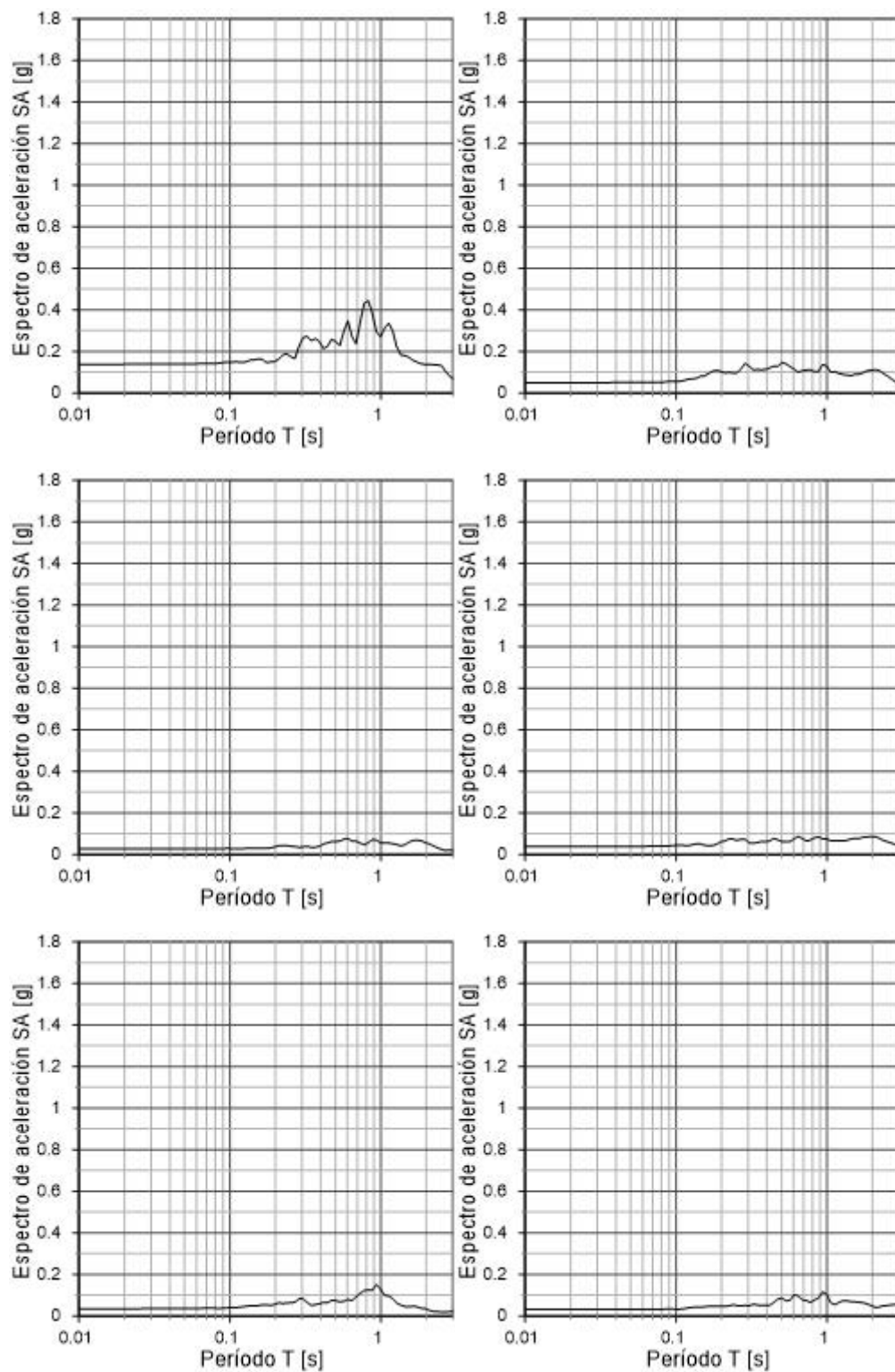


Figura 5.11 Espectros de respuesta para semillas empleadas para sismo de diseño superficial. De arriba hacia abajo, estaciones HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.4 Ajuste espectral

Una vez obtenidos los espectros de respuesta para la roca en superficie con las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (Figuras 5.3, 5.4 y 5.5), estos espectros se emplean como funciones objetivo. Se modifican los registros semilla, de manera que sus espectros de respuesta se asemejen a los espectros objetivos, siguiendo la metodología de “spectral matching” descrita en la Sección 2.3. De esta manera se generan acelerogramas sintéticos espectro-compatibles.

Este proceso se realiza considerando como espectro objetivo, tanto el caso donde se considera la desviación estándar de la GMPE, como para el caso en que solo se toma en cuenta el valor promedio.

5.4.1 Espectros modificados considerando la desviación estándar

Considerando el espectro objetivo como el valor promedio más una desviación estándar del resultado de evaluar las GMPE con los sismos de diseño, se obtienen los espectros compatibles de las Figuras 5.12, para registros interplaca, 5.13 para registros intraplaca y 5.14 para registros superficiales.

Lo primero a destacar es que, en general, los espectros de los registros semilla son notoriamente menores a los espectros objetivos, y los espectros de los registros artificiales resultantes del “spectral matching”, en lo siguiente denominados espectros modificados, para períodos bajos. Esto se debe a dos motivos, el primero es que, debido a la escasez de semillas, se utilizaron registros de estaciones bastante alejadas de las zonas de ruptura de los terremotos que registraron. La segunda razón, es que se está considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo, con lo que se sobrestiman bastante las aceleraciones alcanzadas.

A pesar de lo anterior, para períodos largos, cercanos a 1 [s], la desviación estándar de las GMPE se reduce bastante, con lo que los espectros semillas, los espectros objetivos y los espectros modificados presentan valores similares.

Finalmente, se observa que los espectros modificados son casi idénticos a los espectros objetivos, sobre todo al ir aumentando el período. Para períodos bajos, se observa cierta discrepancia entre el espectro modificado y el objetivo, destacándose en este efecto las estaciones Santa Lucía para sismos interplaca (Figura 5.12), junto a Pisagua y HMTT para sismos intraplaca (5.13), en donde se observa un elevado peak cercano a un período de 0.03[s].

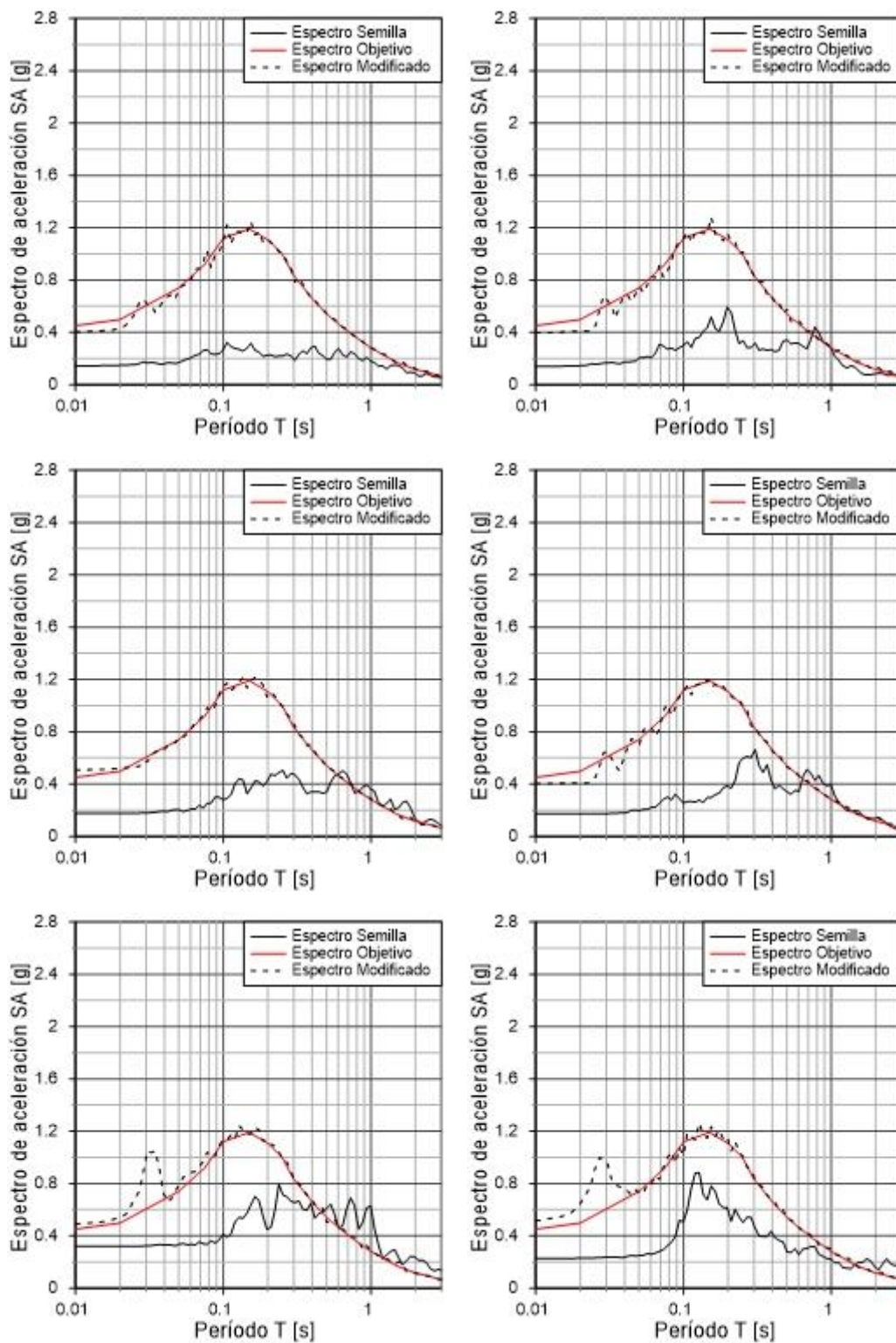


Figura 5.12 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño interplaca. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE considerando una desviación estándar, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

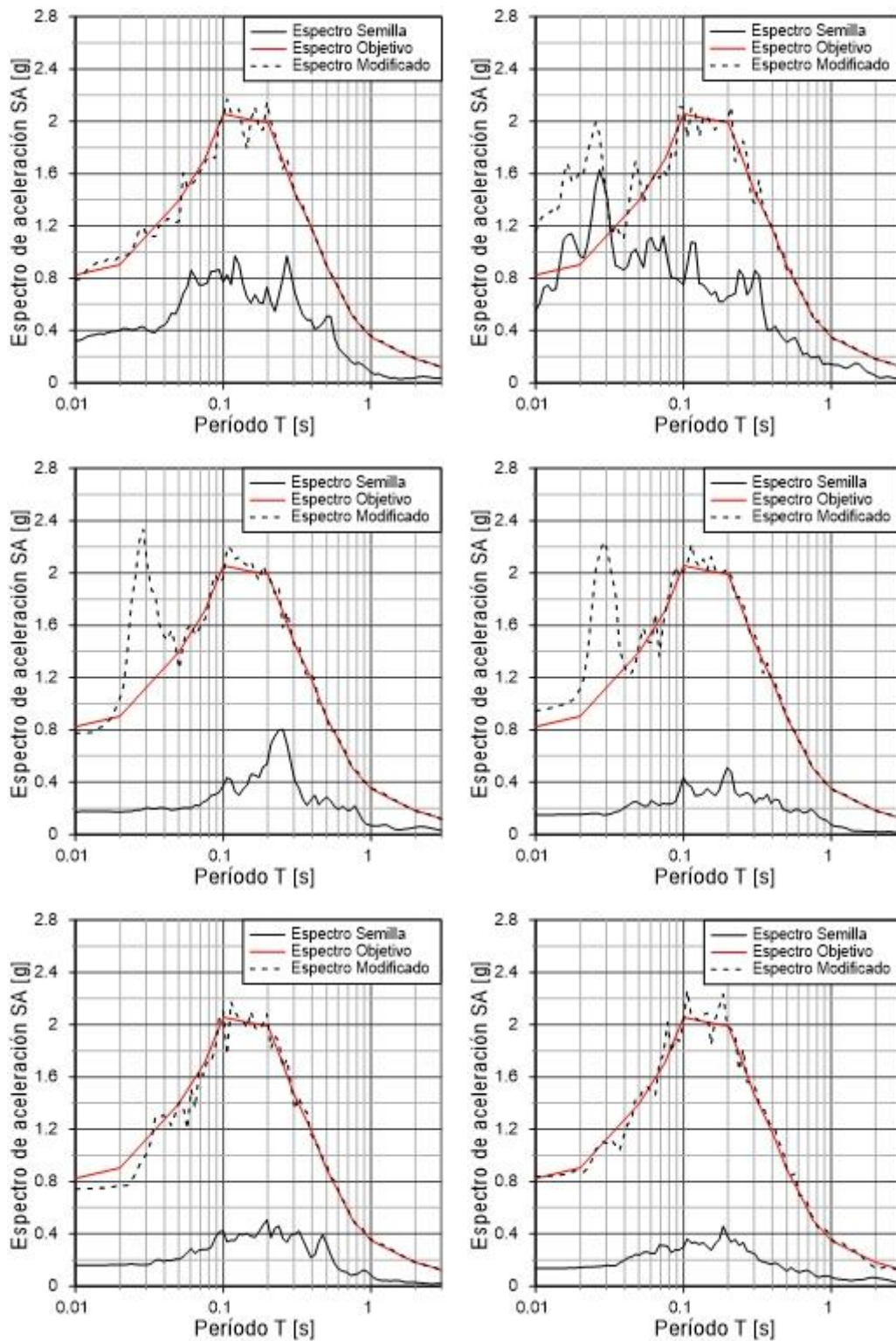


Figura 5.13 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño intraplaca. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE considerando una desviación estándar, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

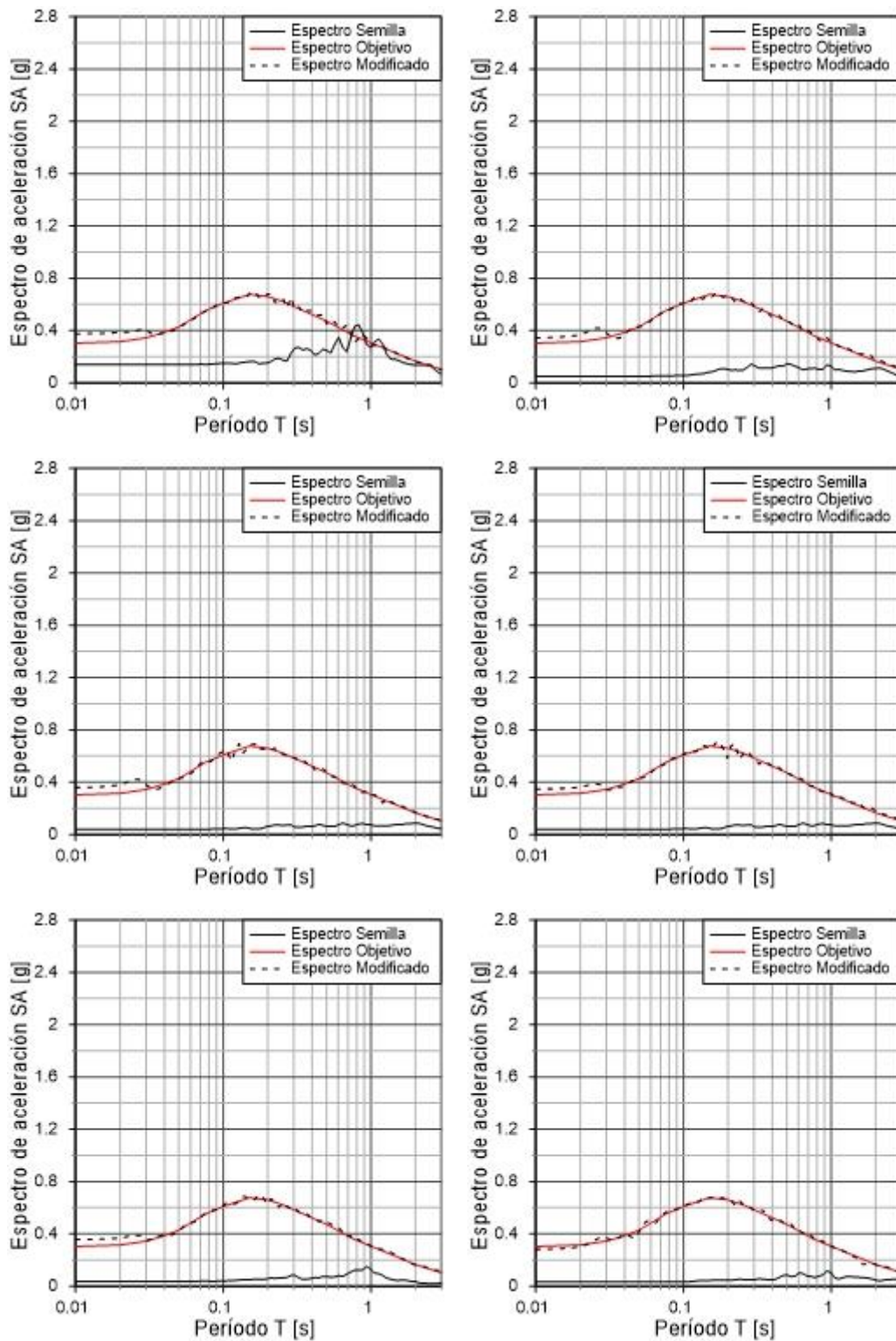


Figura 5.14 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño superficial. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE considerando una desviación estándar, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.4.2 Acelerogramas compatibles considerando la desviación estándar

En esta sección se presentan los acelerogramas espectro compatibles, que producen los espectros de respuestas presentados en la Sección 5.4.1.

Se observa una amplificación considerable de los registros semilla, para llegar a los registros modificados. Este efecto es notoriamente mayor para el caso de sismo de diseño superficial, en donde los registros semilla presentaba aceleraciones considerablemente bajas (Figura 5.17)

Se observa que, en general, los registros modificados, mantienen la forma de su registro semilla origen, y solo se ven afectados por una amplificación, en donde los registros producto de un sismo intraplaca (Figura 5.16) y los registros producto de un sismo superficial (5.17), son de corta duración y con elevados peaks, mientras que los registros de sismos interplaca son de larga duración y de forma más plana (Figura 5.15).

Algunos registros modificados presentan peaks anormalmente altos respecto al resto de aceleraciones registradas en sus respectivos acelerogramas, estos son, los registros Norte-Sur de las estaciones Las Tórtolas y Santa Lucía con semilla interplaca (Figura 5.15), los registros de la estación RABO con semilla intraplaca (Figura 5.16) y los registros de las estaciones TAP065, TAP077 con semilla superficial (Figura 5.17). Esto se debe a la gran discrepancia entre el espectro del registro semilla y el espectro objetivo, en donde se debió amplificar considerablemente las aceleraciones semilla para llegar a generar un espectro similar al objetivo.

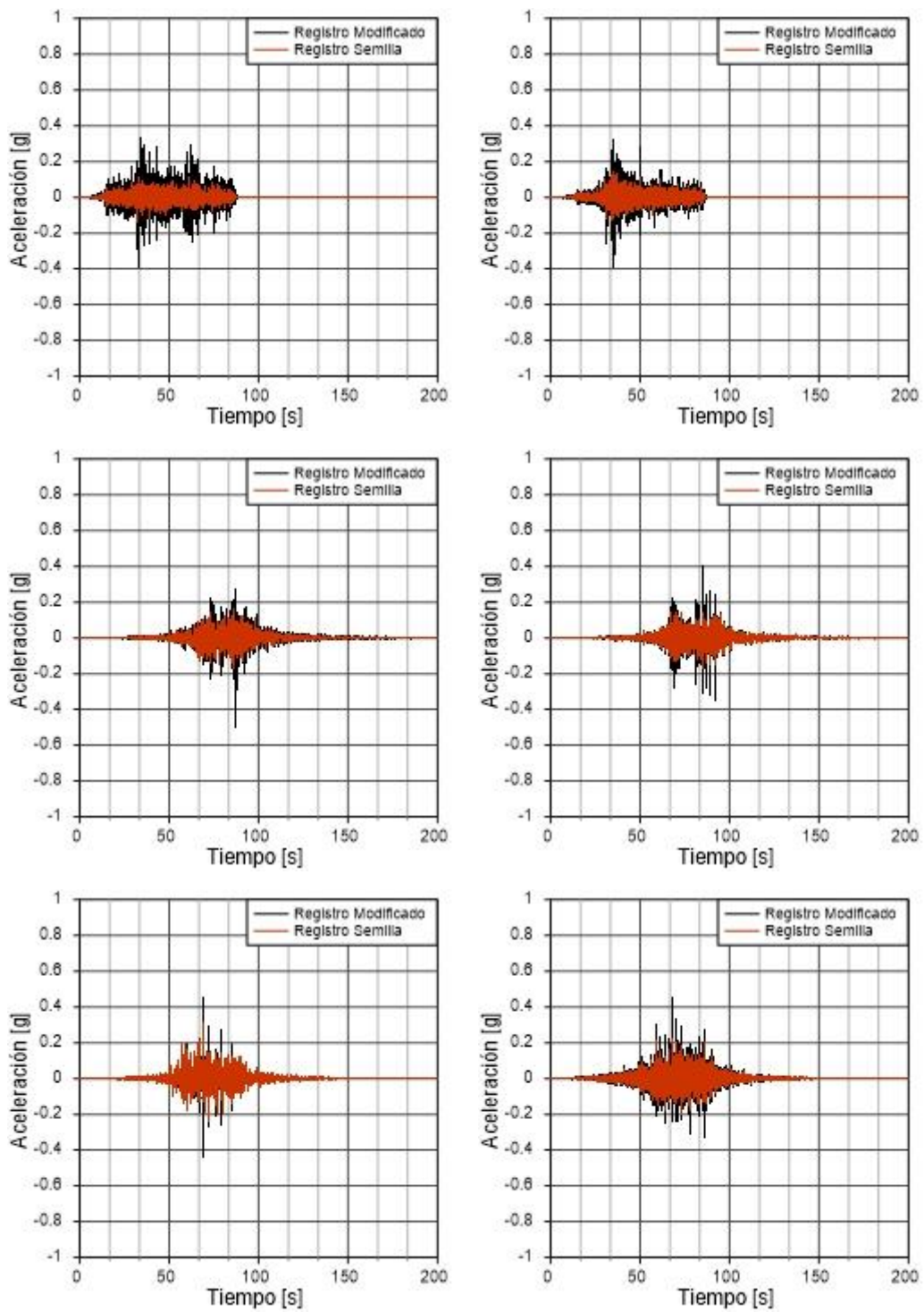


Figura 5.15 Registros para sismo de diseño interplaca. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE, considerando una desviación estándar. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

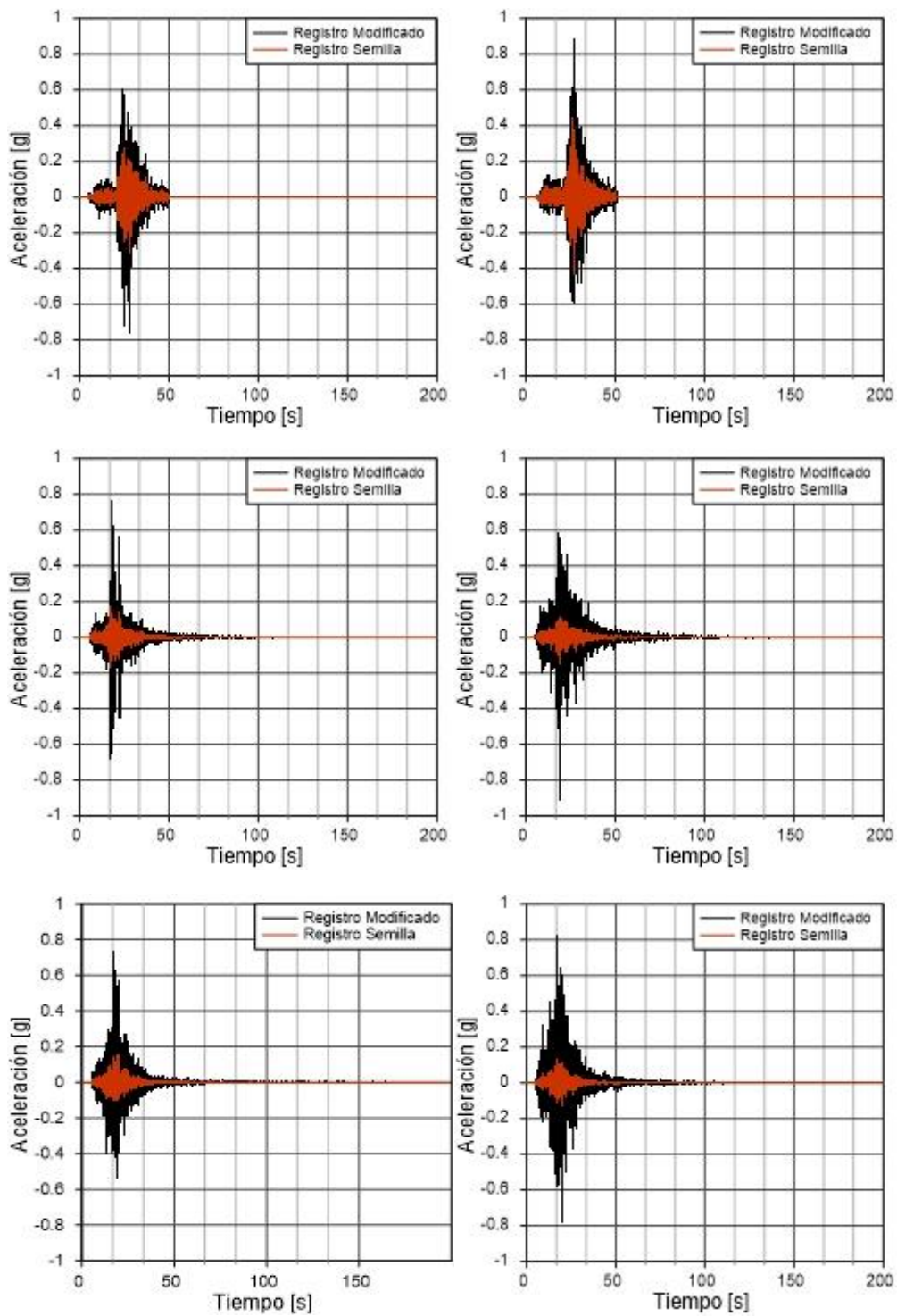


Figura 5.16 Registros para sismo de diseño interplaca. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE, considerando una desviación estándar. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

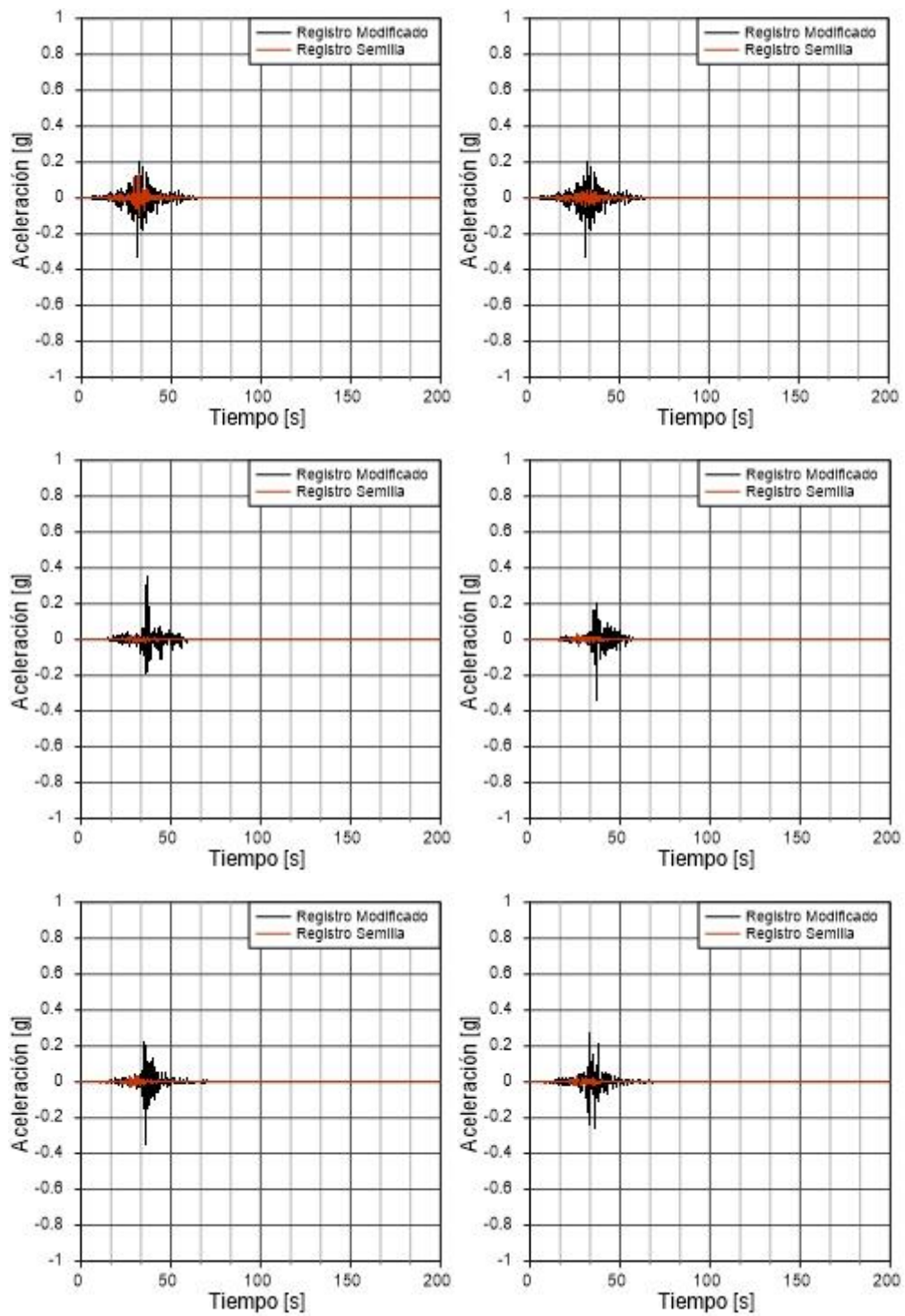


Figura 5.17 Registros para sismo de diseño interplaca. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE, considerando una desviación estándar. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.4.3 Espectros modificados considerando el promedio

Considerando el espectro objetivo como el valor promedio del resultado de evaluar las GMPE con los sismos de diseño, se obtienen los espectros compatibles de las figuras 5.18, para registros interplaca, 5.19 para registros intraplaca y 5.20 para registros superficiales.

Se observa que los espectros modificados con esta metodología se asemejan bastante más a los espectros semilla que los espectros modificados de la sección 5.4.2, presentando aceleraciones menores que los espectros semillas para varios periodos. Esta semejanza no se aprecia para los espectros modificados producto de semillas superficiales, específicamente en las estaciones TAP065, TAP077 (Figura 5.20), ya que estos registros semillas presentan aceleraciones muy bajas.

Para el caso de los espectros modificados producto de sismos de diseño intraplaca, se observa un buen ajuste entre los tres espectros (semilla, objetivo y modificado) (Figura 5.19). En cambio, para los espectros modificados producto de sismos de diseño interplaca (Figura 5.18), se observa que tanto el espectro objetivo como el modificado tienden a reducir las aceleraciones espectrales de los registros medidos para períodos mayores a 0.6 [s]

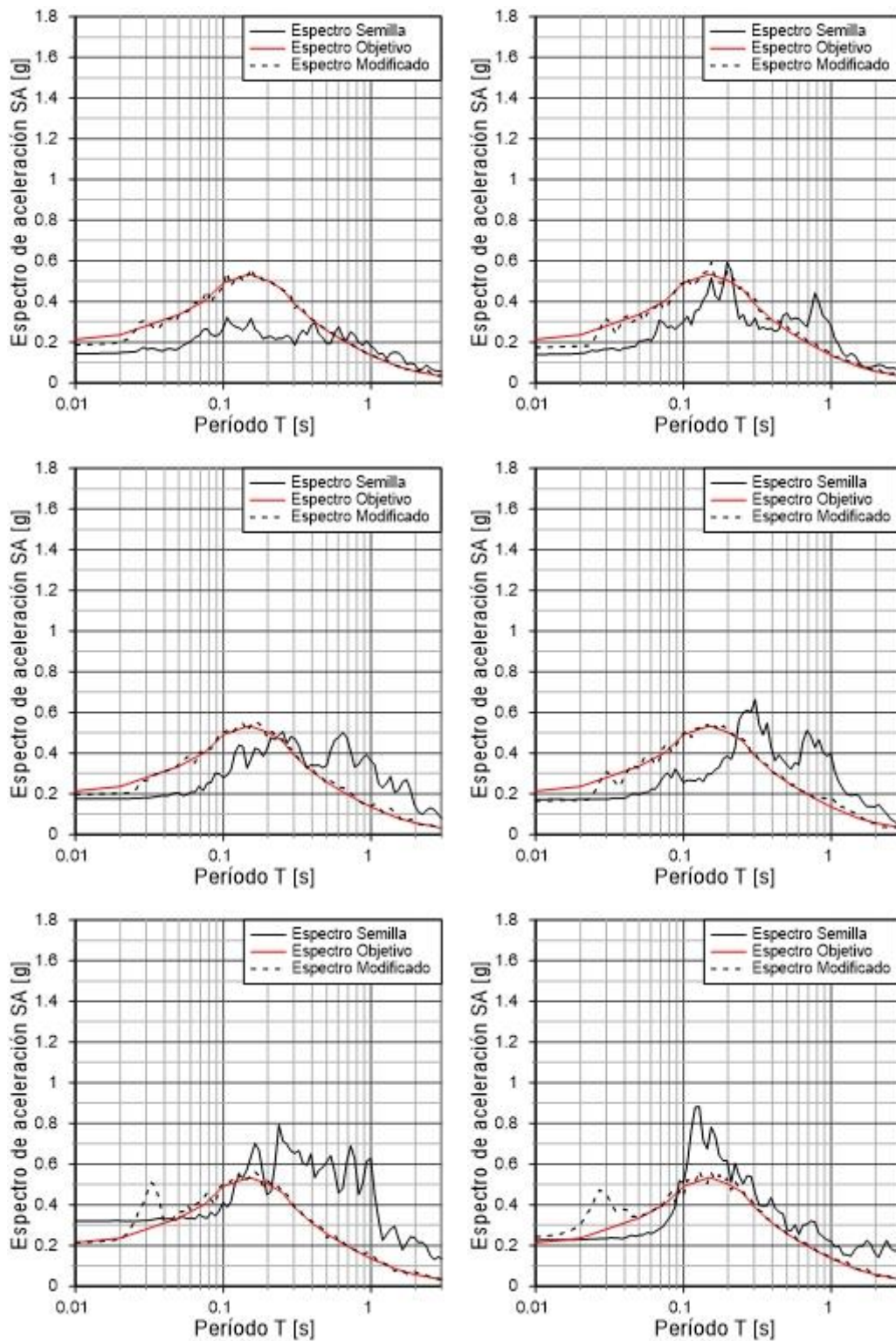


Figura 5.18 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño interplaca. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

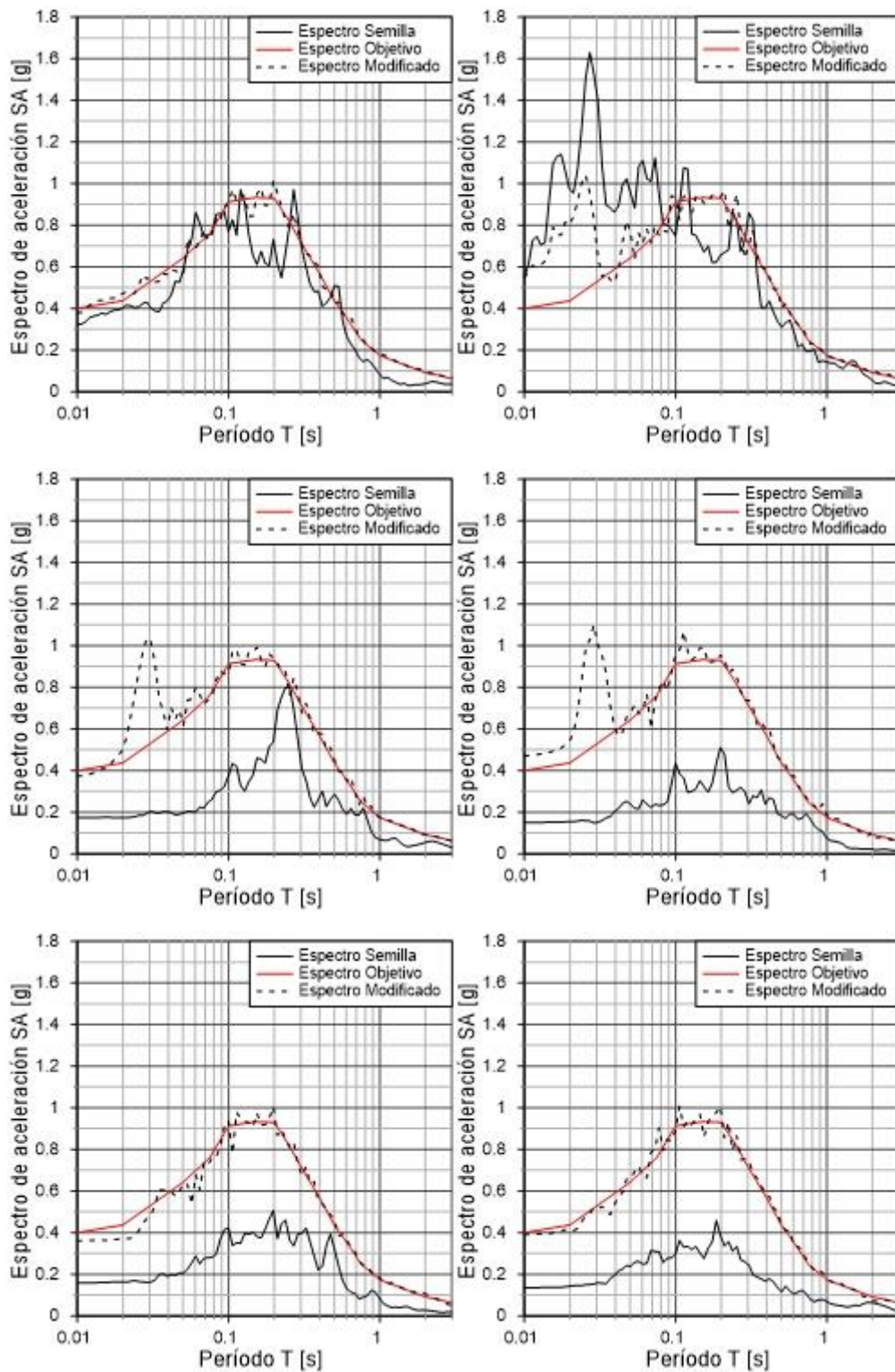


Figura 5.19 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño intraplaca. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

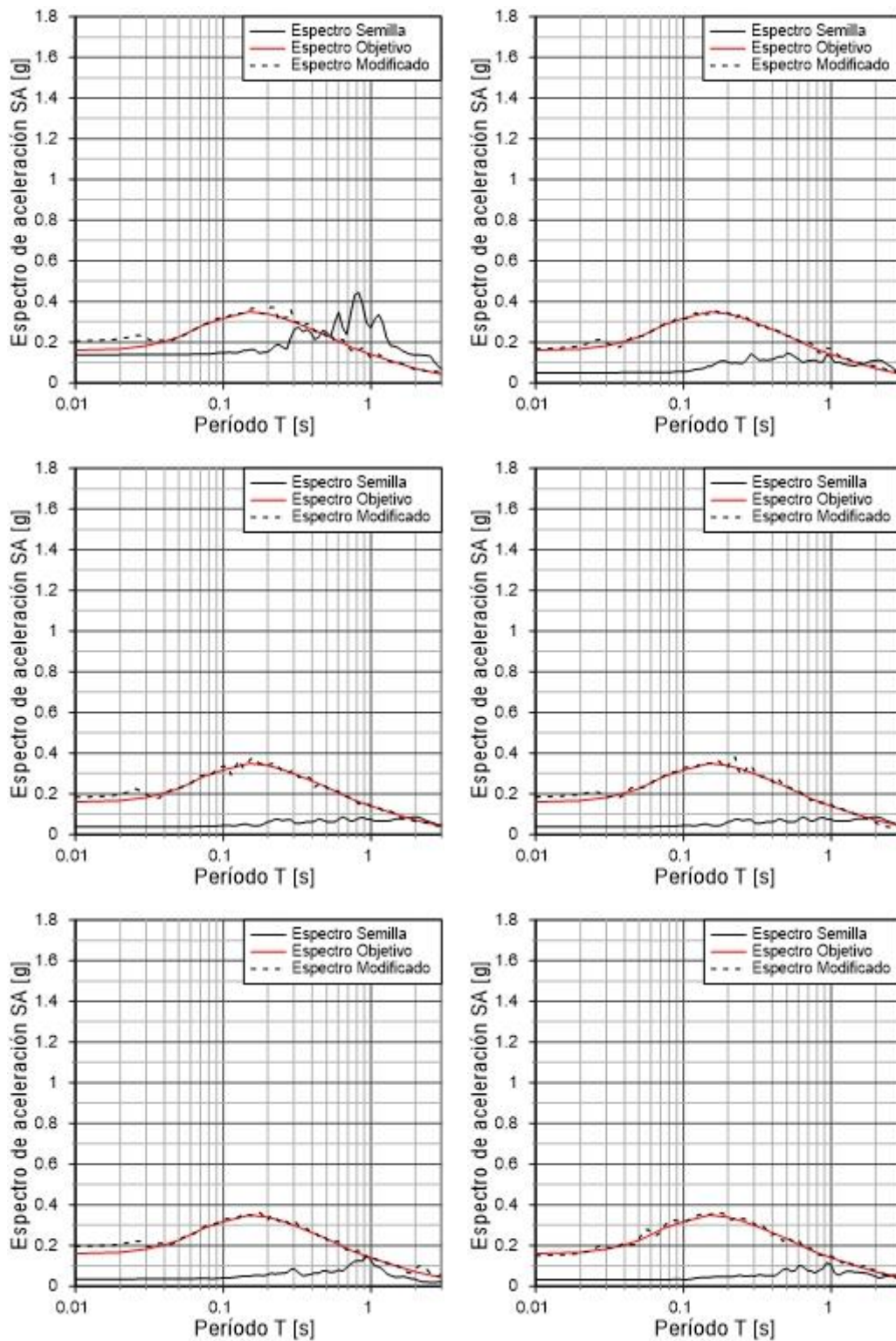


Figura 5.20 Espectros de ajuste espectral para sismo de diseño superficial. Se muestra el espectro semilla, producto del registro semilla sin modificar, el espectro objetivo, producto del valor medio entregado por las GMPE, y el espectro modificado, resultante del “spectral matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.4.4 Acelerogramas espectro compatibles considerando promedio

En esta sección se presentan los acelerogramas espectro compatibles, que producen los espectros de respuestas presentados en la sección 5.4.3.

Al igual que con la metodología anterior, los registros modificados mantienen la forma de sus registros semillas, pero esta vez, se producen reducciones junto con amplificaciones en distintos tiempos.

Para el caso de los registros modificados de sismos interplaca (Figura 5.21) e intraplaca (Figura 5.22), se observa que estos se asemejan bastante a sus registros semillas origen.

Por otro lado, para los registros modificados de sismos superficiales (Figura 5.23), se aprecia una amplificación del registro semilla original, para producir un espectro similar al objetivo.

Al considerar solo el valor promedio de las GMPE en la construcción de los espectros objetivo, se obtienen espectros modificados con valores de aceleraciones menores que considerando el promedio más la desviación estándar en las GMPE. Esto hace que se deba modificar menos los registros semillas, que suelen generar espectros menores, resultando en que no se aprecian las peaks aislados de la metodología anterior.

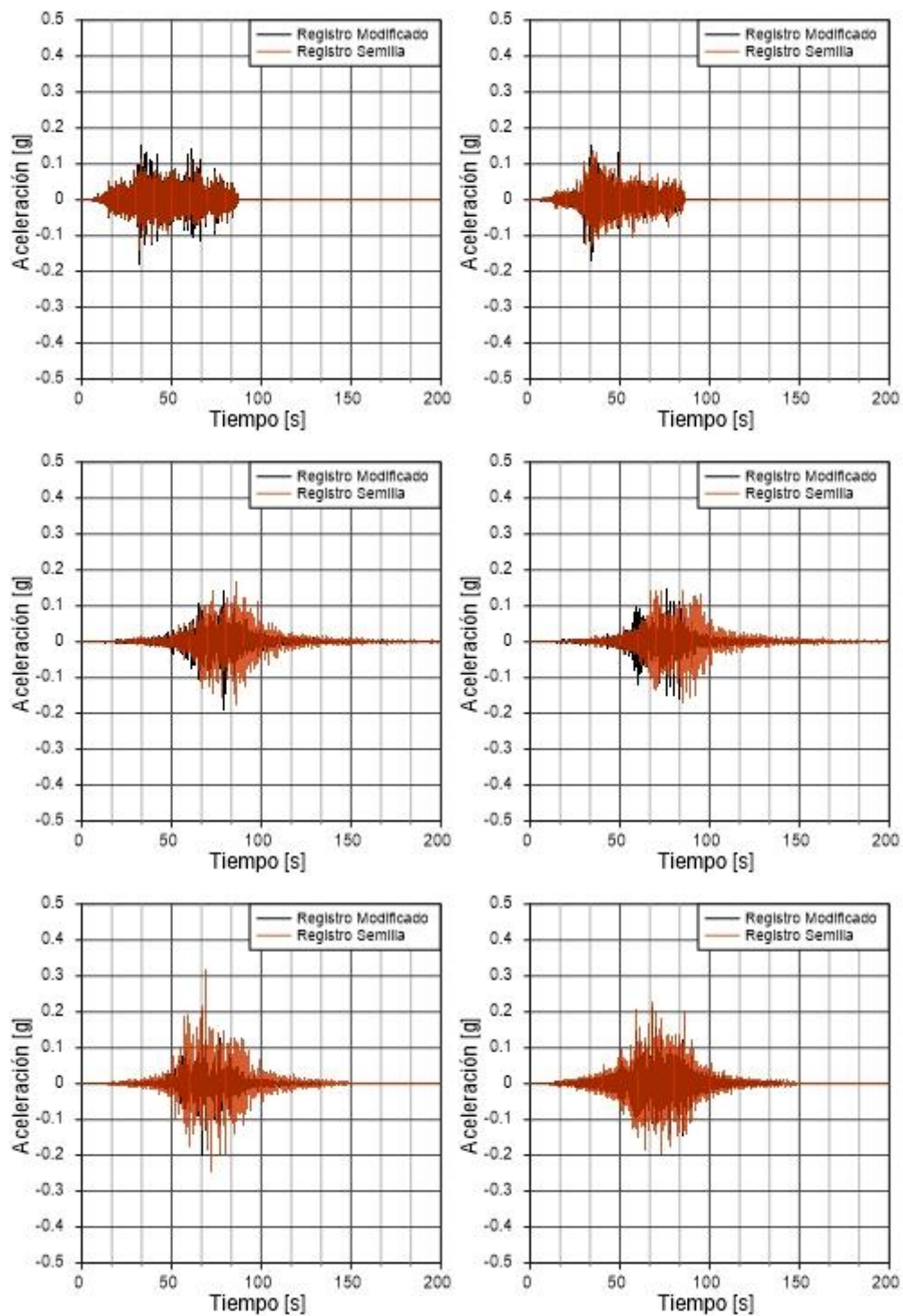


Figura 5.21 Registros para sismo de diseño interplaca. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

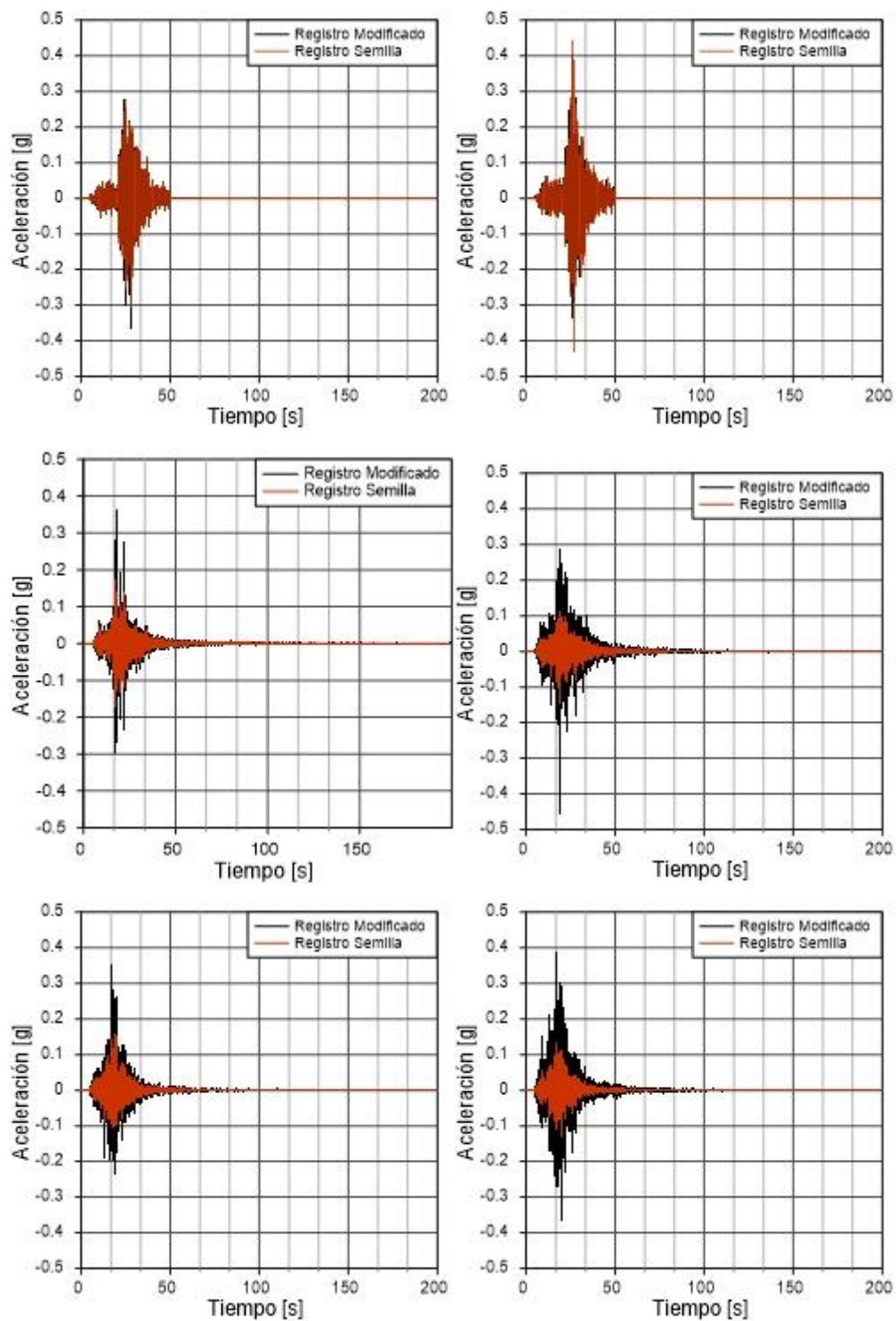


Figura 5.22 Registros para sismo de diseño intraplaca. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

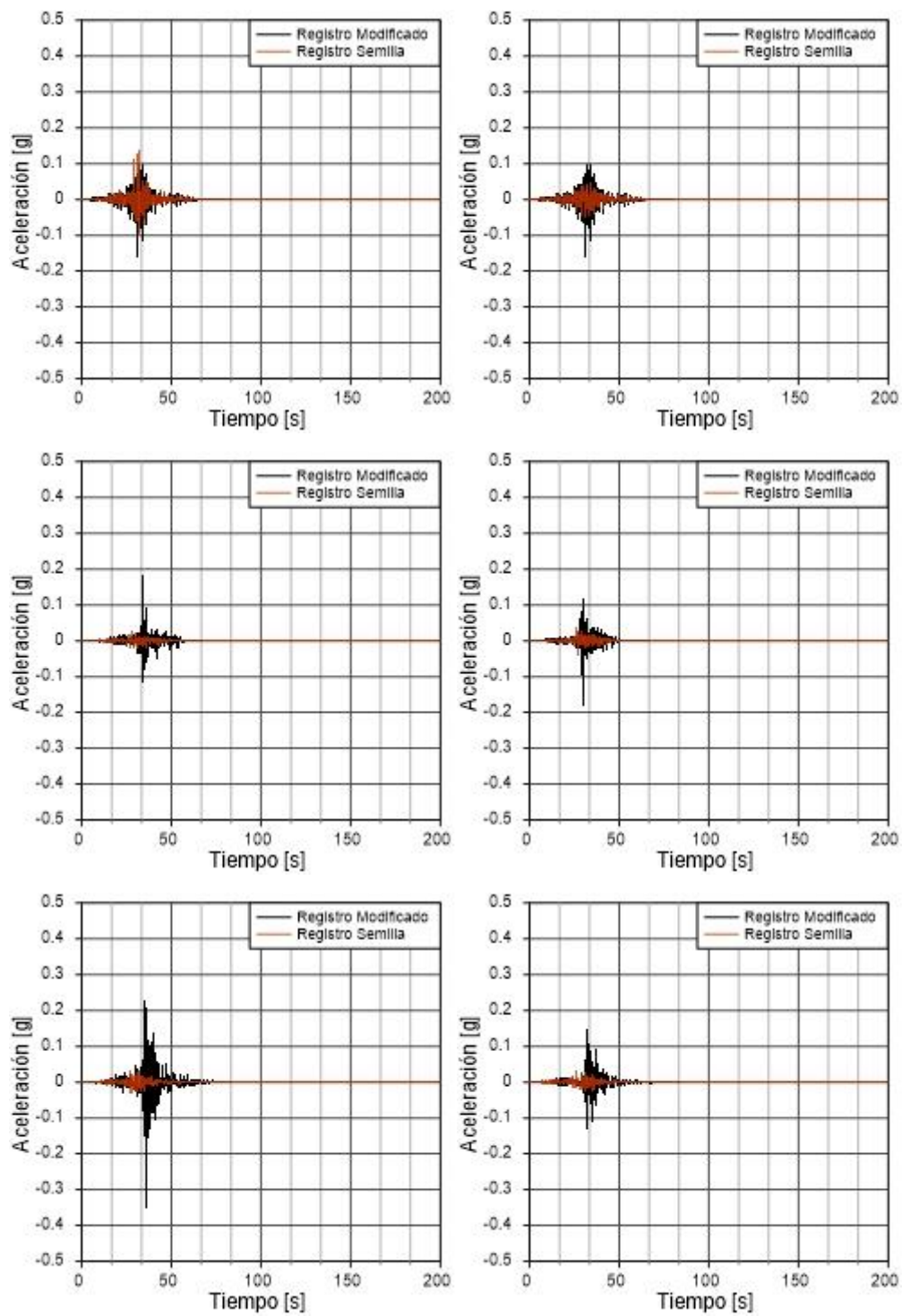


Figura 5.23 Registros para sismo de diseño superficial. Se muestra el registro semilla, y el registro modificado con spectral-matching mediante el espectro objetivo entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.5 Propagación unidimensional de ondas de corte

Una vez obtenidos los registros espectro compatibles (o modificados) de la sección 5.4, se procede con la propagación unidimensional de ondas de corte conforme a la estratigrafía estimada para el puente Águila Norte. Ésta se realiza con el software “Deepsoil” (Hashash et al. 2016), y el perfil expuesto en la Tabla 4.1. El procedimiento considera un análisis lineal con un amortiguamiento constante del 5%, para todos los estratos, a excepción de la roca basal, con un amortiguamiento del 1% (esta tasa de amortiguamiento es levemente significativa para obtener el registro en el basamento rocoso de la deconvolución del registro en roca superficial).

Es importante recordar que, para la construcción de los espectros objetivos, se consideró el suelo de fundación como roca. En esta sección del procedimiento, se ingresan los registros artificiales generados en la superficie de un afloramiento de roca (“outcrop”), considerando la roca elástica.

Adicionalmente, se realiza un análisis lineal equivalente, con las mismas consideraciones anteriores, empleando las curvas de degradación expuestas en la siguiente sección, en función del tipo de estrato.

5.5.1.1 Curvas de degradación del suelo

Dependiendo de cada estrato a modelar, se tienen distintas curvas de degradación a implementar (Aditya & Anbazhagan, 2015). La Tabla 5.2 resume las consideraciones tomadas en la propagación

Tabla 5.2 Recomendaciones de curvas de degradación a utilizar (Aditya & Anbazhagan, 2015)

Tipo de Suelo	Curva de degradación
Grava	(Rollins Kyle M, 1998)
Arena	(Seed & Idriss, 1970)
Arcilla	(Vucetic & Dobry, 1991)

El modelo de Seed & Idriss (1970) consiste en tres curvas, límite superior, valor medio, y límite inferior de la curva de degradación (Figura 5.25). Se recomienda emplear la curva de límite superior para arenas de bajo V_{S30} , el límite inferior para arenas de alto V_{S30} , y el valor medio para el resto de los casos.

La curva de Vucetic & Dobry (1991) (Figura 5.26), considera la plasticidad, ya que es un factor de gran importancia en la curva degradación y amortiguamiento, en donde una alta plasticidad generalmente implica una curva esfuerzo-deformación más lineal (Vucetic & Dobry, 1991). La curva de degradación se desplaza hacia a arriba mientras mayor sea la plasticidad, alejándose del comportamiento de una arena.

Tanto la curva de Seed & Idriss (1970) como la de Vucetic & Dobry (1991) se encuentran disponibles en el software “Deepsoil”. Para el caso de grava, se ingresa manualmente los datos de la curva de Rollins et al. (1998) (Figura 5.24).

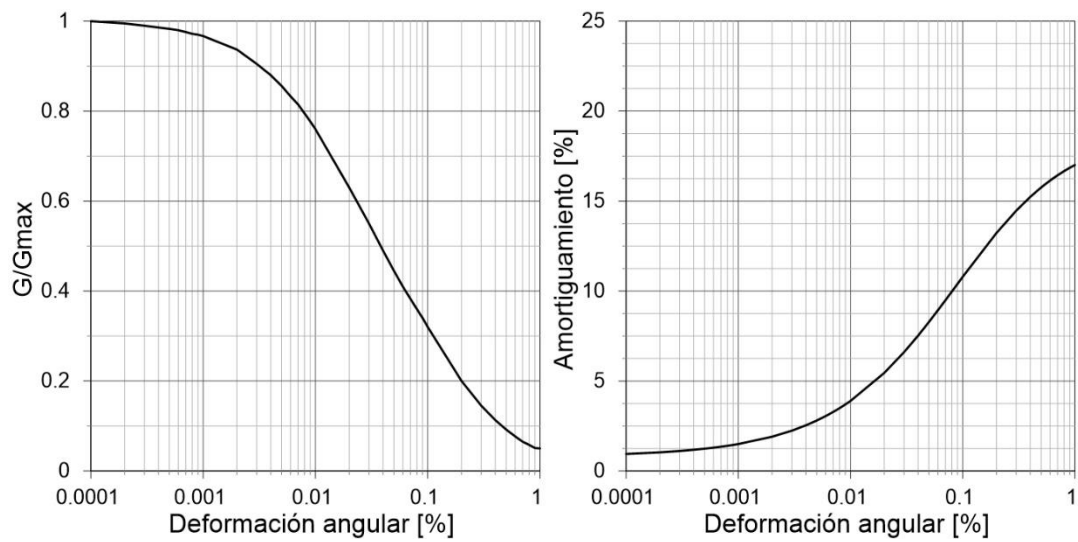


Figura 5.24 Curva de degradación y amortiguamiento para gravas (Rollins et al. 1998)

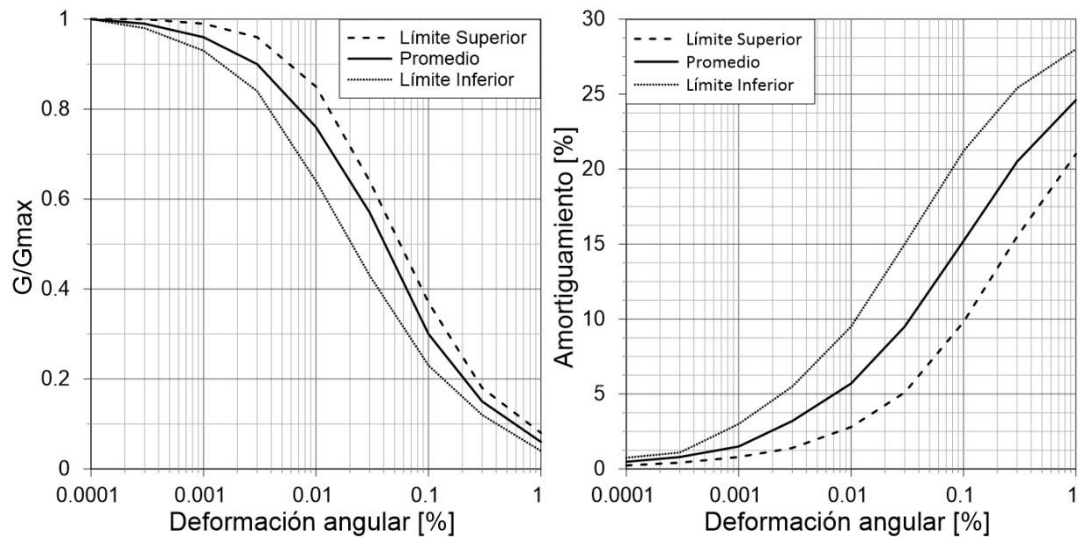


Figura 5.25 Curva de degradación y amortiguamiento para arenas, valor promedio y límites (Seed & Idriss, 1970).

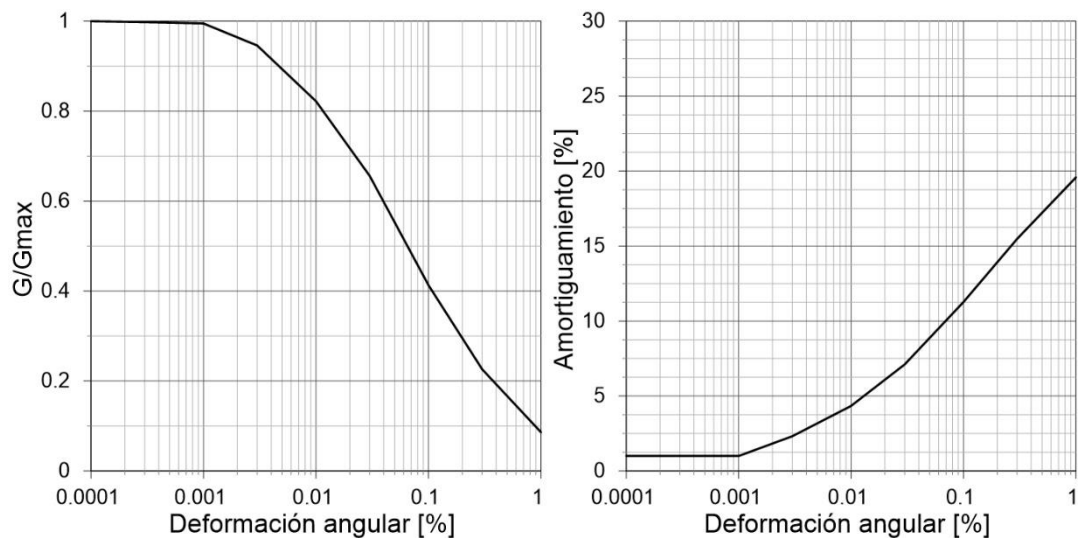


Figura 5.26 Curva de degradación y amortiguamiento para arcillas (Vucetic & Dobry, 1991).

5.6 Resultados propagación análisis lineal

Esta sección muestra los resultados obtenidos mediante un análisis lineal con un amortiguamiento del 5%. Se divide en subcapítulos según se considera el valor promedio más la desviación estándar de las GMPE en la construcción del espectro objetivo, o si solo se considera el valor promedio.

5.6.1 Espectros producto del promedio más una desviación estándar

En esta sección se muestran los espectros resultantes de la propagación lineal con un amortiguamiento del 5% en superficie, productos de un espectro objetivo construido a través del promedio más la desviación estándar del resultado al evaluar las GMPE para los sismos de diseño.

Las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29 muestran el espectro en superficie, el espectro en la superficie de la roca basal “outcrop”, que es el espectro modificado de la sección 5.4 y el espectro dentro de la roca basal “within”.

Se observa una fuerte amplificación para periodos mayores a 0.2 [s], mientras que para periodos inferiores se aprecia una leve desamplificación. El espectro en superficie producto de semillas intraplaca (Figura 5.28) controla claramente la respuesta para periodos bajos, hasta aproximadamente 1 [s]. Para periodos mayores se observa que tanto los espectros producto de semillas interplaca (Figura 5.27), como los espectros producto de semillas superficiales (Figura 5.29) presentan aceleraciones similares a los de las semillas intraplaca.

En el gráfico de amplificación (Figura 5.30) se observan fuertes amplificaciones en los períodos 1.75 [s], 0.69 [s], 0.41 [s] y 0.29 [s] (frecuencias de 0.57 [Hz], 1.45[Hz], 2.45 [Hz] y 3.4 [Hz] respectivamente). Estas amplificaciones se observan en los correspondientes espectros de respuesta en superficie de todas las propagaciones realizadas.

Cabe destacar que en el período con mayor amplificación (1.75 [s]), se muestra con una baja energía en los espectros en superficie. Esto se debe a que los espectros objetivos generados con la rutina de ajuste espectral no tenían mayor energía en dicho período, por lo que no alcanzan una gran amplitud espectral, siendo sobrepasados por períodos de menor amplificación, pero con mayor energía en el registro en la roca basal.

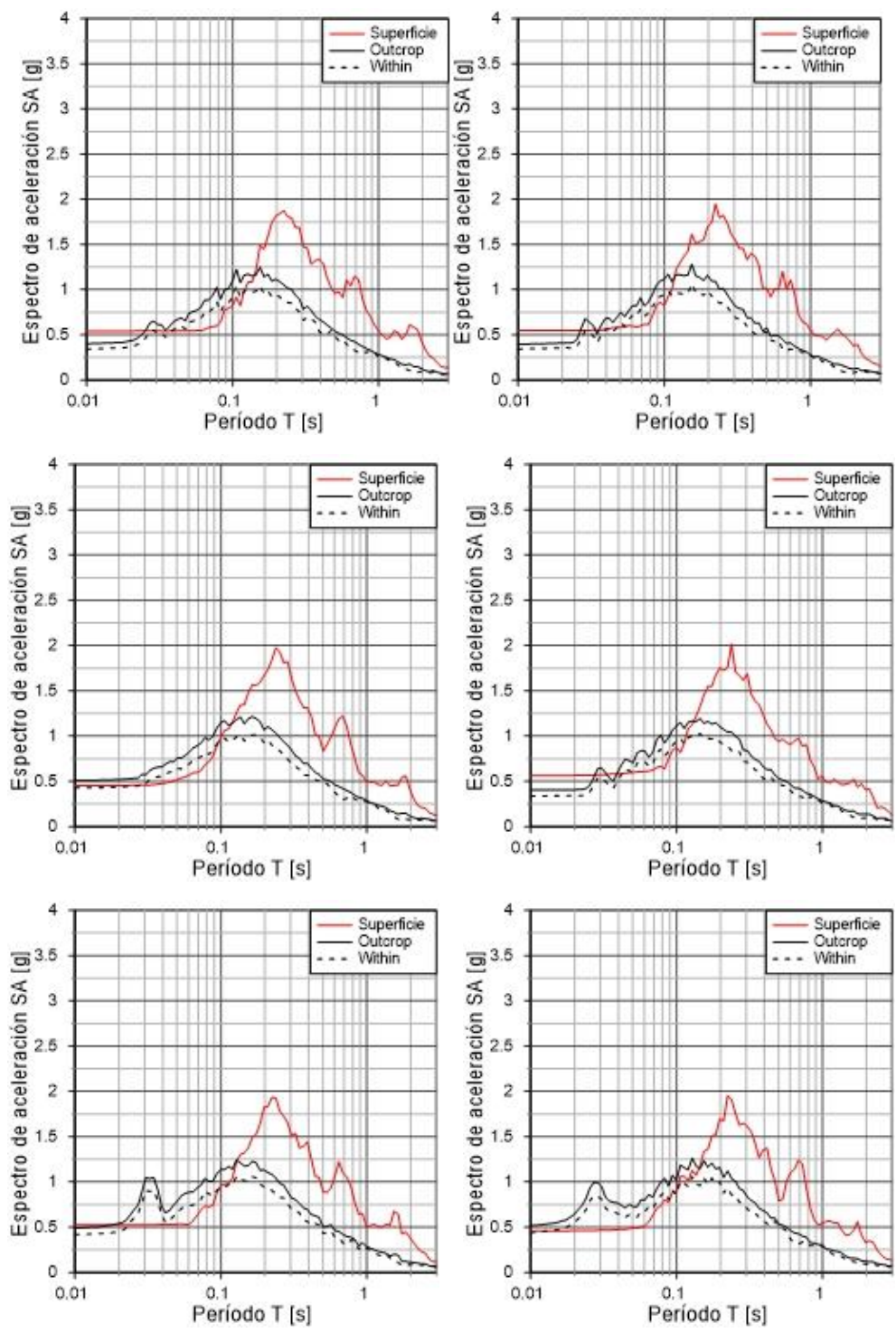


Figura 5.27 Espectros de propagación para sismos interplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

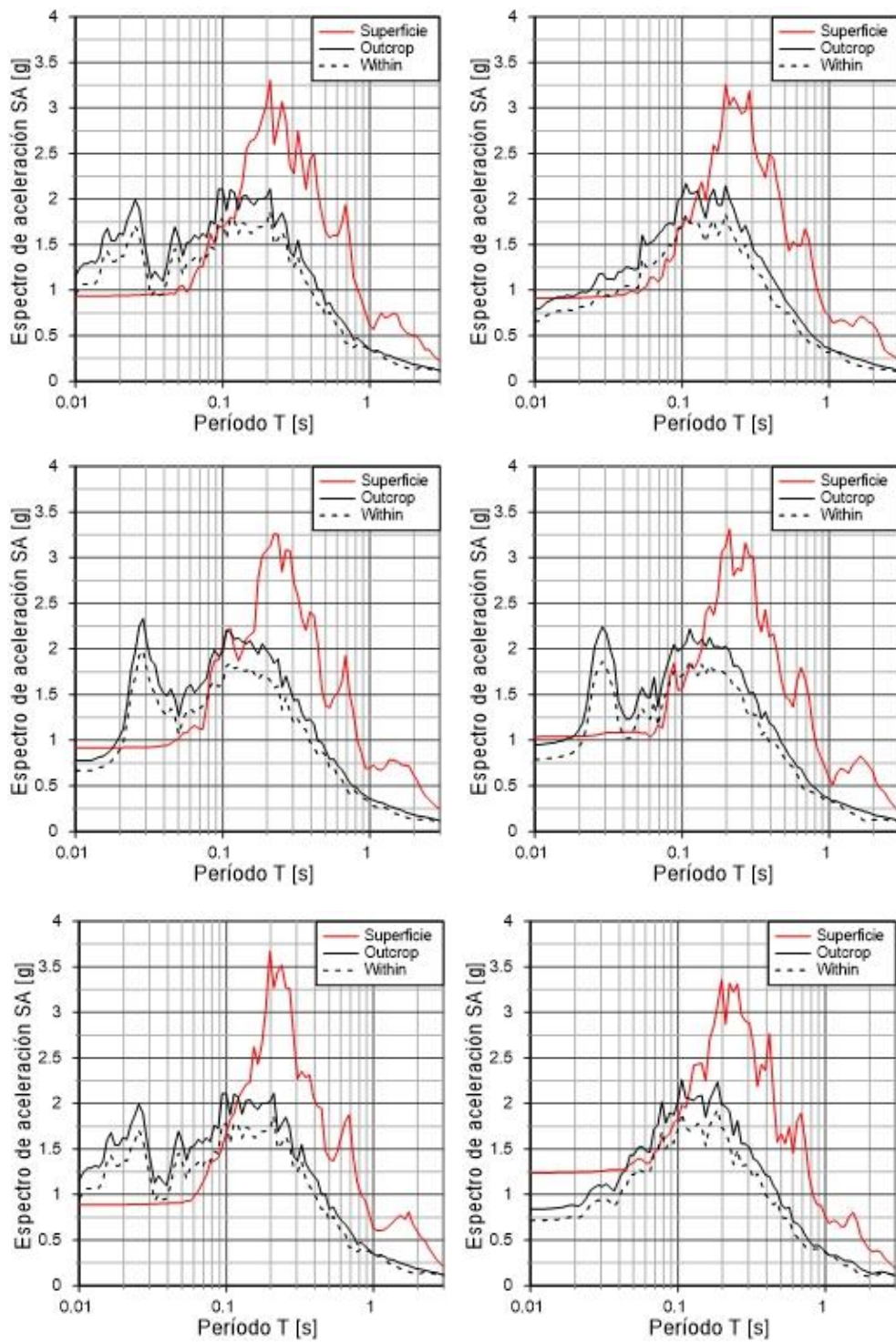


Figura 5.28 Espectros de propagación para sismos intraplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

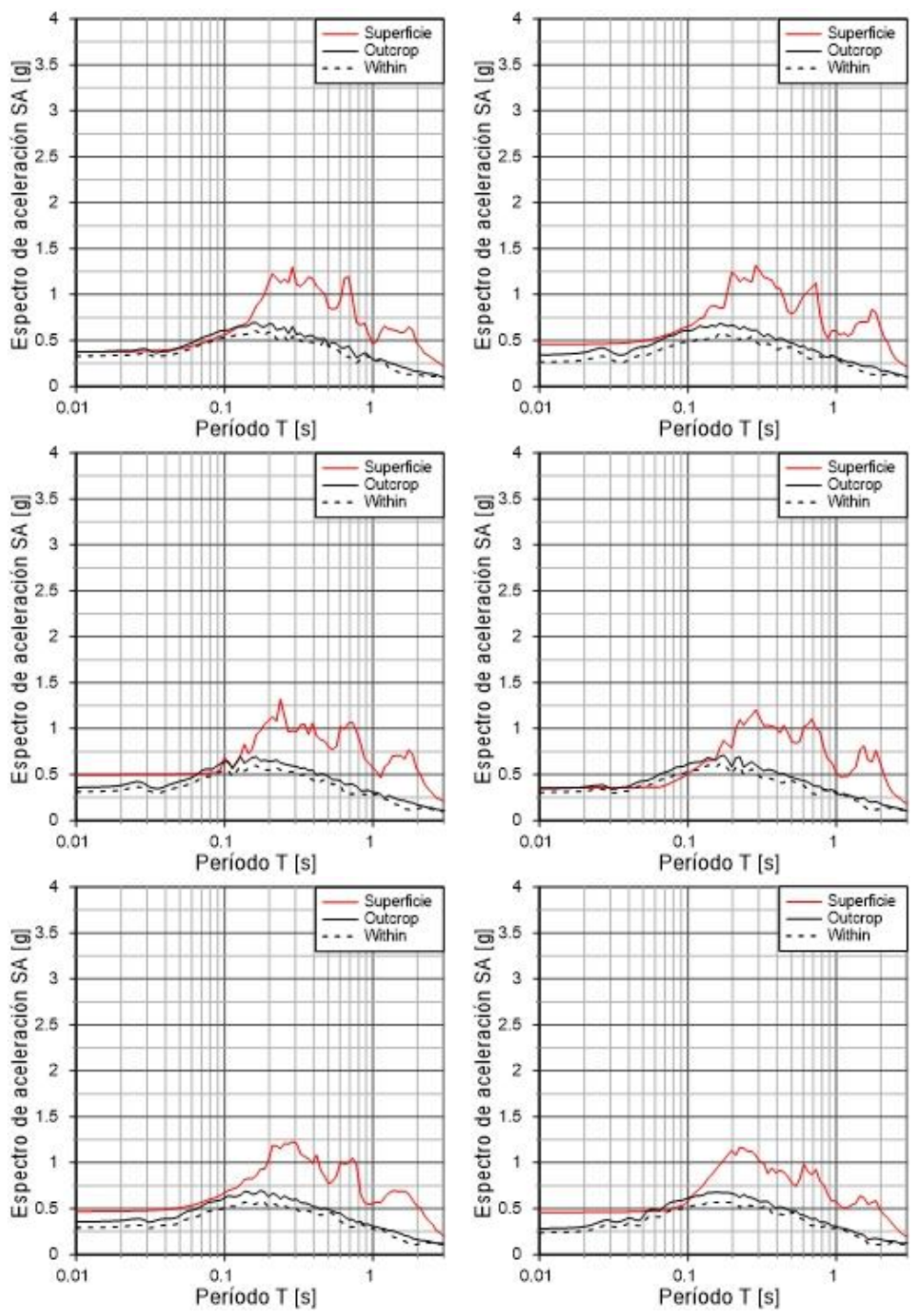


Figura 5.29 Espectros de propagación para sismos superficial. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

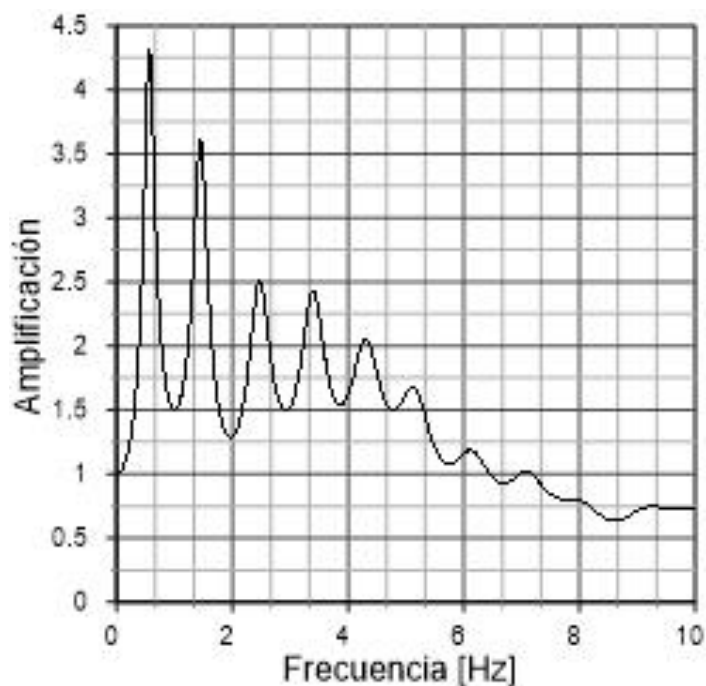


Figura 5.30 Razón de amplificación entre superficie y registro input, para propagación lineal con amortiguamiento del 5%

5.6.2 Acelerogramas considerando desviación estándar

En esta sección se presentan los registros espectro compatibles que generan los espectros en superficie de la sección 5.6.1.

Se observa que estos presentan la forma característica de los registros semillas que los generaron. Planos y de larga duración para el caso interplaca (Figura 5.31), y con grandes peaks y corta duración para sismos intraplaca (Figura 5.32) y superficiales (Figura 5.33).

En general, no se observan peaks aislados, pero los registros en superficie muestran una elevada aceleración, destacándose el caso de los generados por semillas intraplaca, en donde se llegan a un PGA mayor a 0.9 [g]

En la Figura 5.34 se observa la variación del PGA en profundidad, en el perfil característico de la zona, para distintos sismos a propagar. Se puede apreciar en todo un comportamiento similar, donde el PGA aumenta de manera considerable al acercarse a la superficie.

Calculando la deformación efectiva (definido como el 65% de la deformación máxima), y evaluando el amortiguamiento para dichos niveles de deformación para las curvas de degradación empleadas, se obtiene la Figura 5.35. Se aprecian la variación de amortiguamiento en profundidad. Se tiene que esta bordea valores del 8%, alcanzando un máximo del 14%, con lo que emplear un amortiguamiento constante del 5% sería conservador.

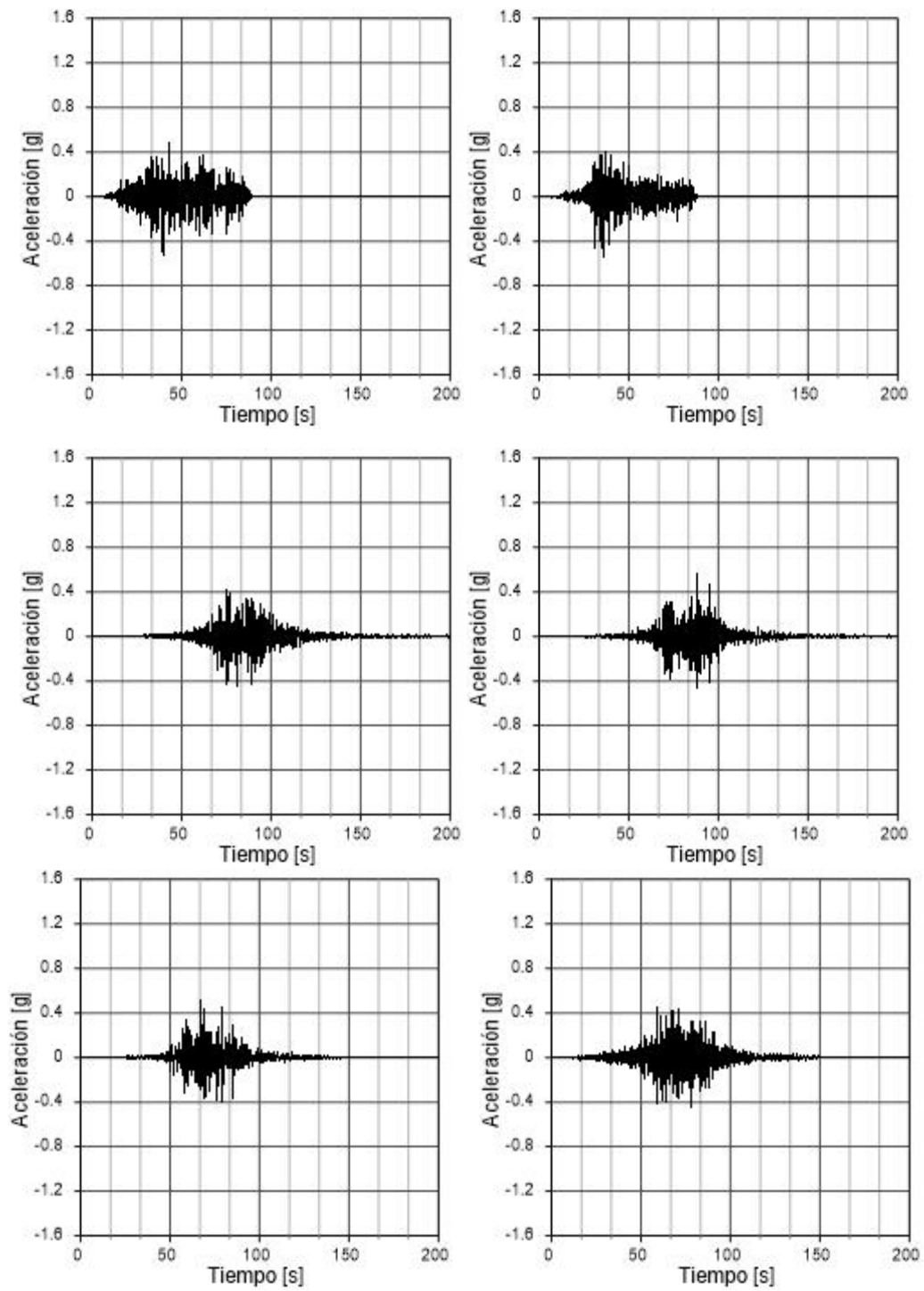


Figura 5.31 Registros de propagación para sismos interplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

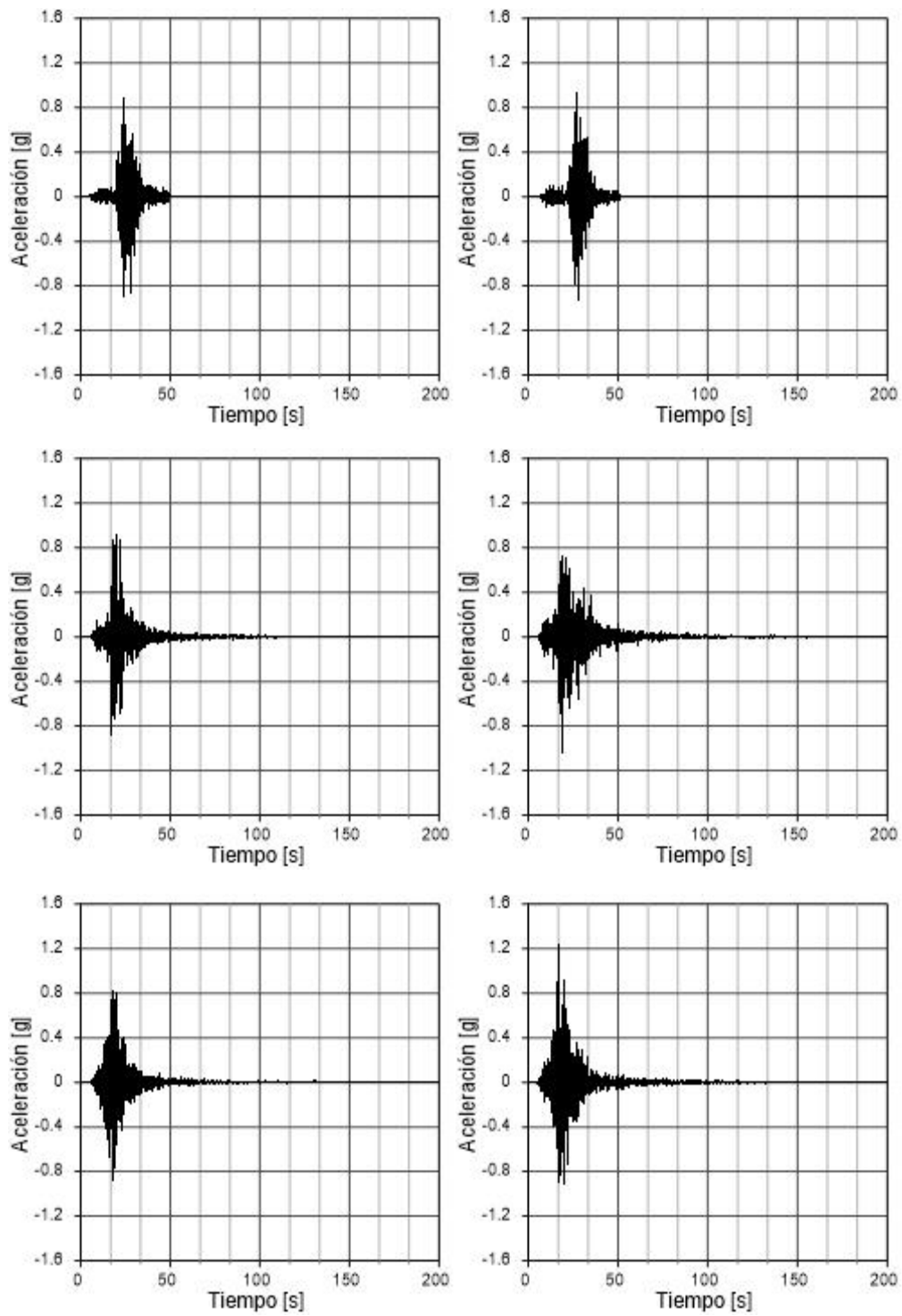


Figura 5.32 Registros de propagación para sismos intraplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

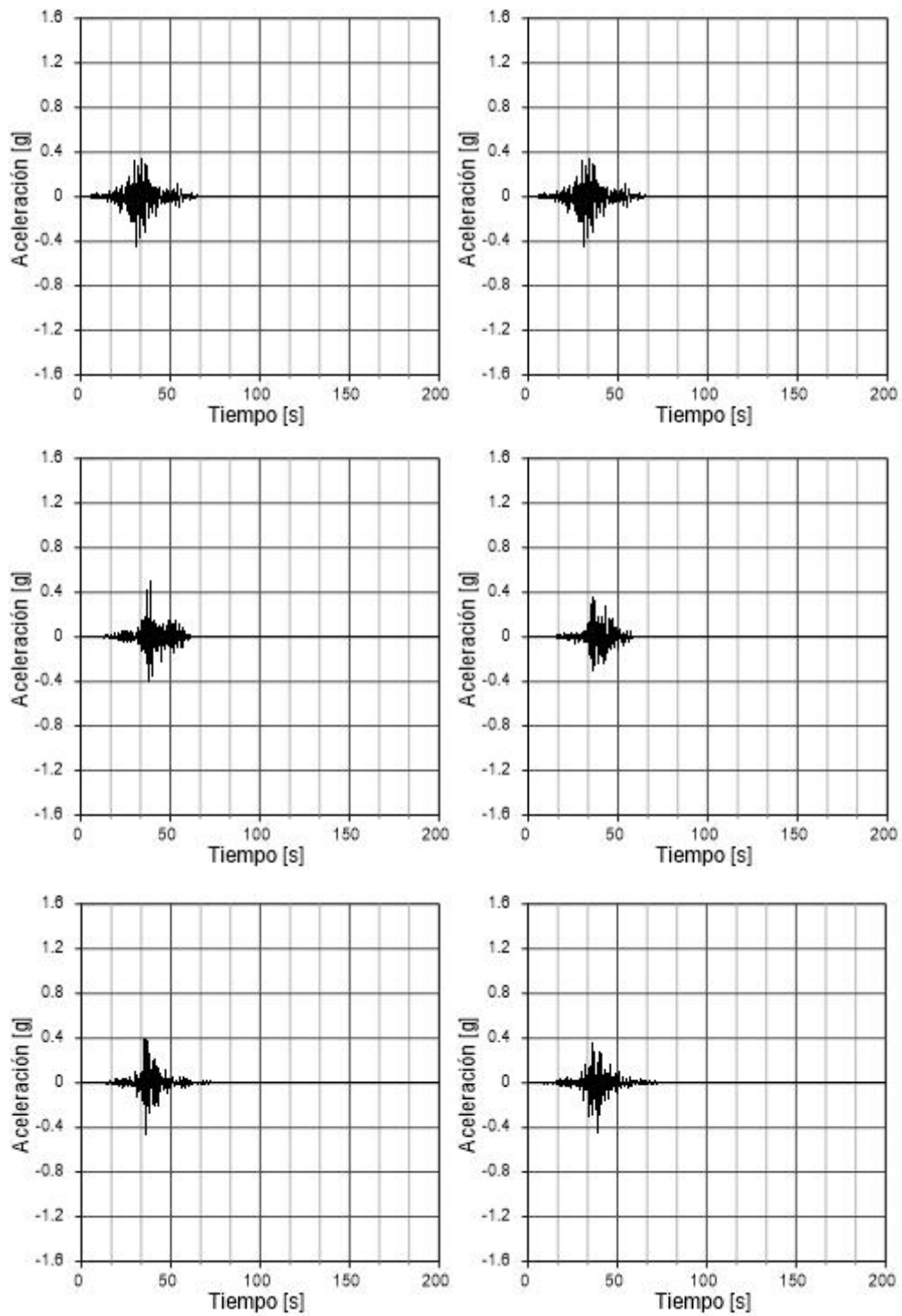


Figura 5.33 Registros de propagación para sismos superficial, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

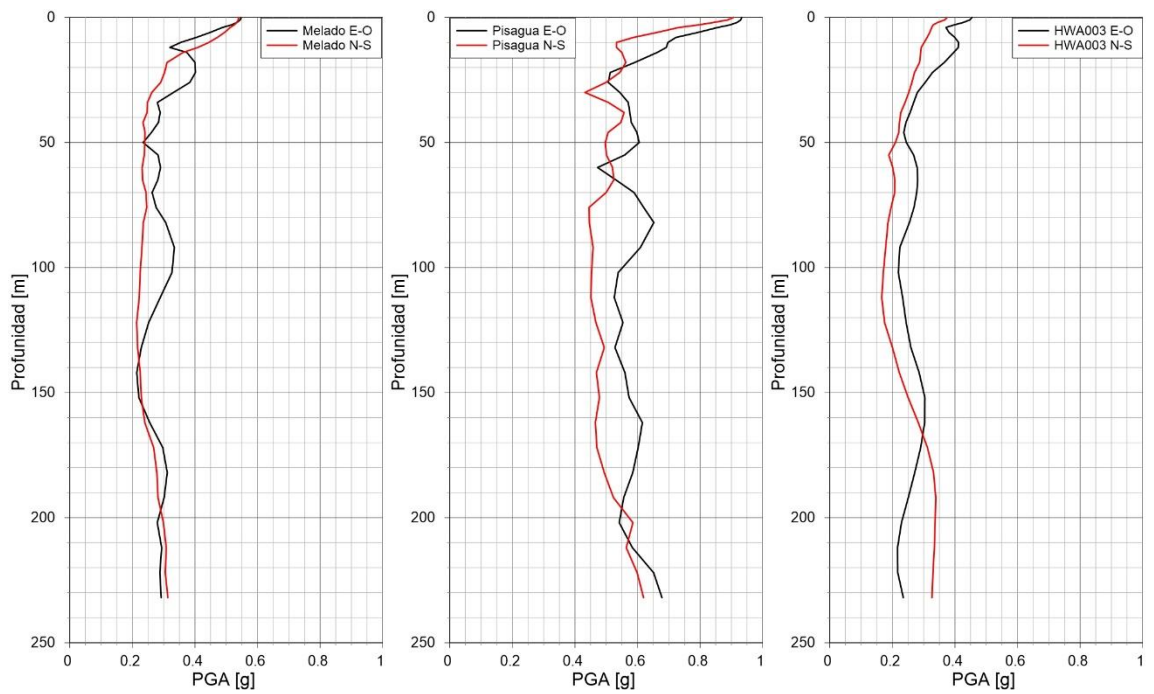


Figura 5.34 Variación de PGA en profundidad para distintos sismos, considerando la desviación estándar.

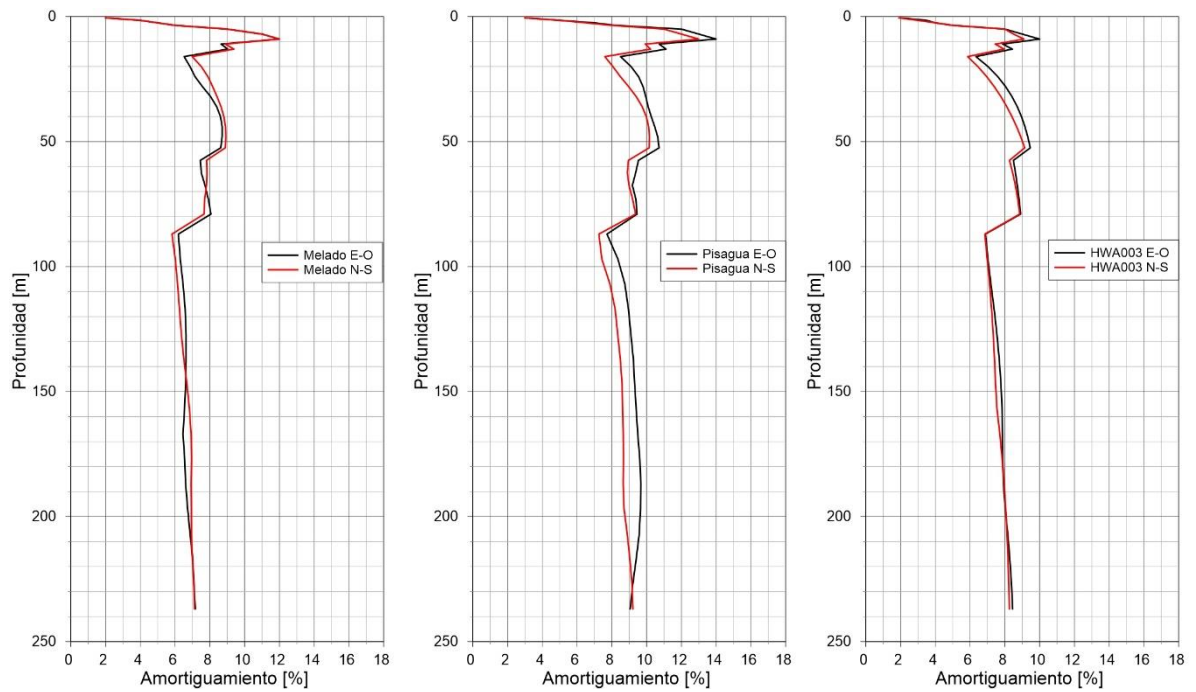


Figura 5.35 Variación de amortiguamiento en profundidad para distintos sismos, considerando la desviación estándar.

5.6.3 Espectros producto del promedio

En esta sección se muestran los espectros resultantes de la propagación lineal con un amortiguamiento del 5% en superficie, productos de un espectro objetivo construido a través del promedio del resultado al evaluar las GMPE para los sismos de diseño.

Los gráficos 5.36, 5.37 y 5.38 muestran el espectro en superficie, el espectro “outcrop”, y el espectro “within”. Se observan aceleraciones mucho menores que con la metodología empleada en la sección 5.6.2, donde nuevamente controla el espectro producto de semillas intraplaca, pero en menor manera, siendo solo hasta 1.5 veces el espectro producto de semillas interplaca. Para períodos mayores a 1 [s], se observa que los espectros producto de los tres sismos de diseño convergen.

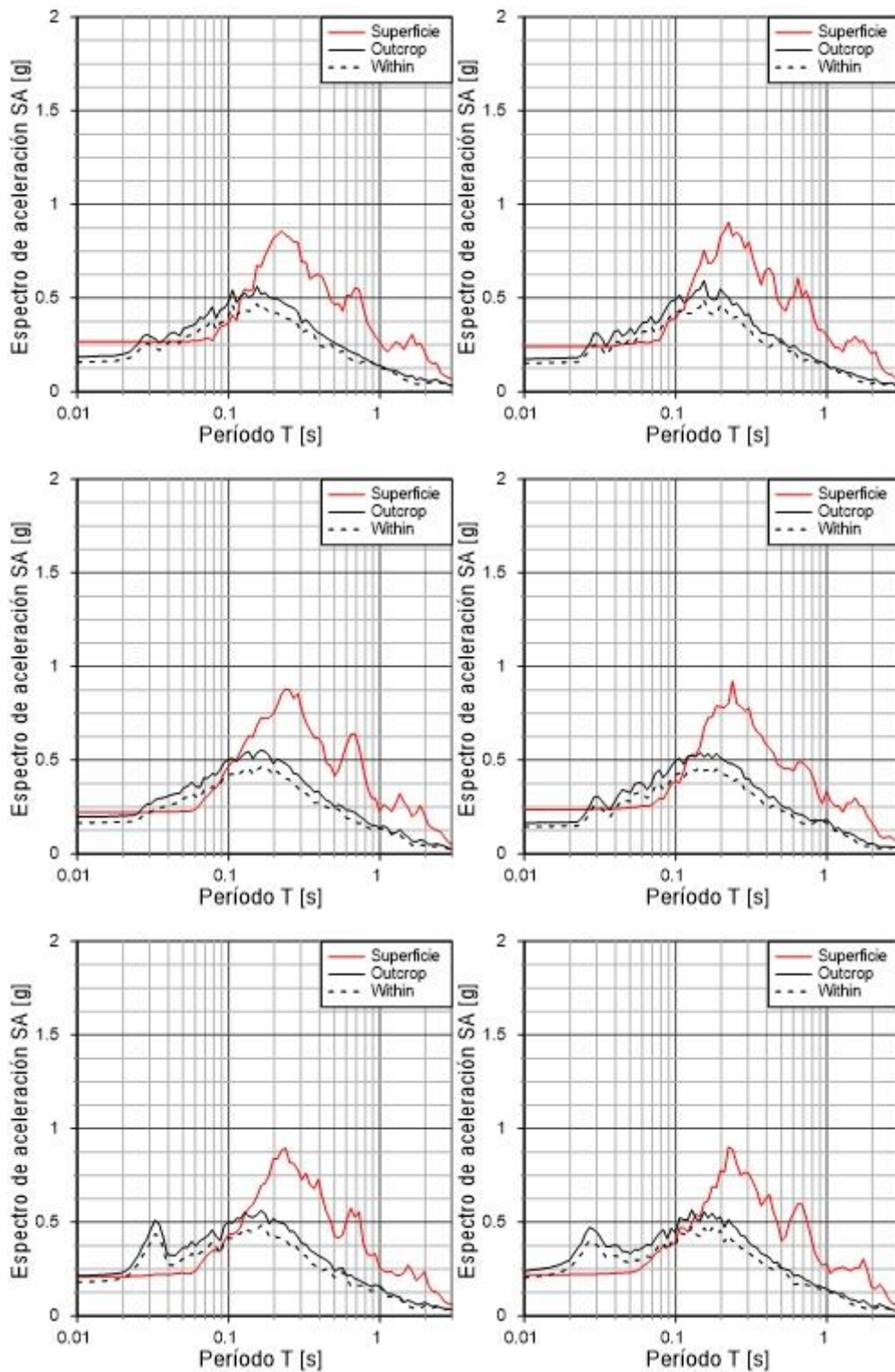


Figura 5.36 Espectros de propagación para sismos interplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

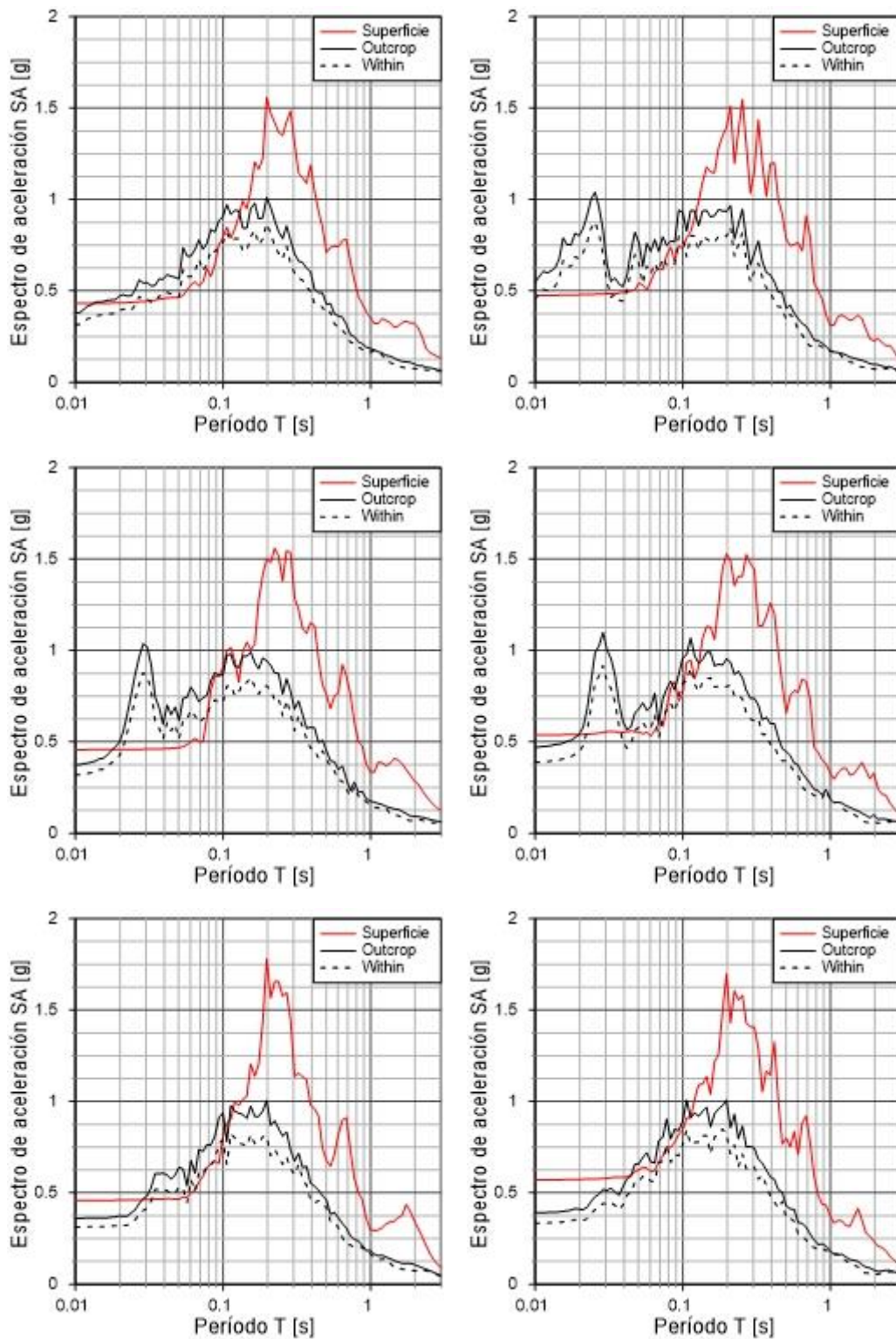


Figura 5.37 Espectros de propagación para sismos intraplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

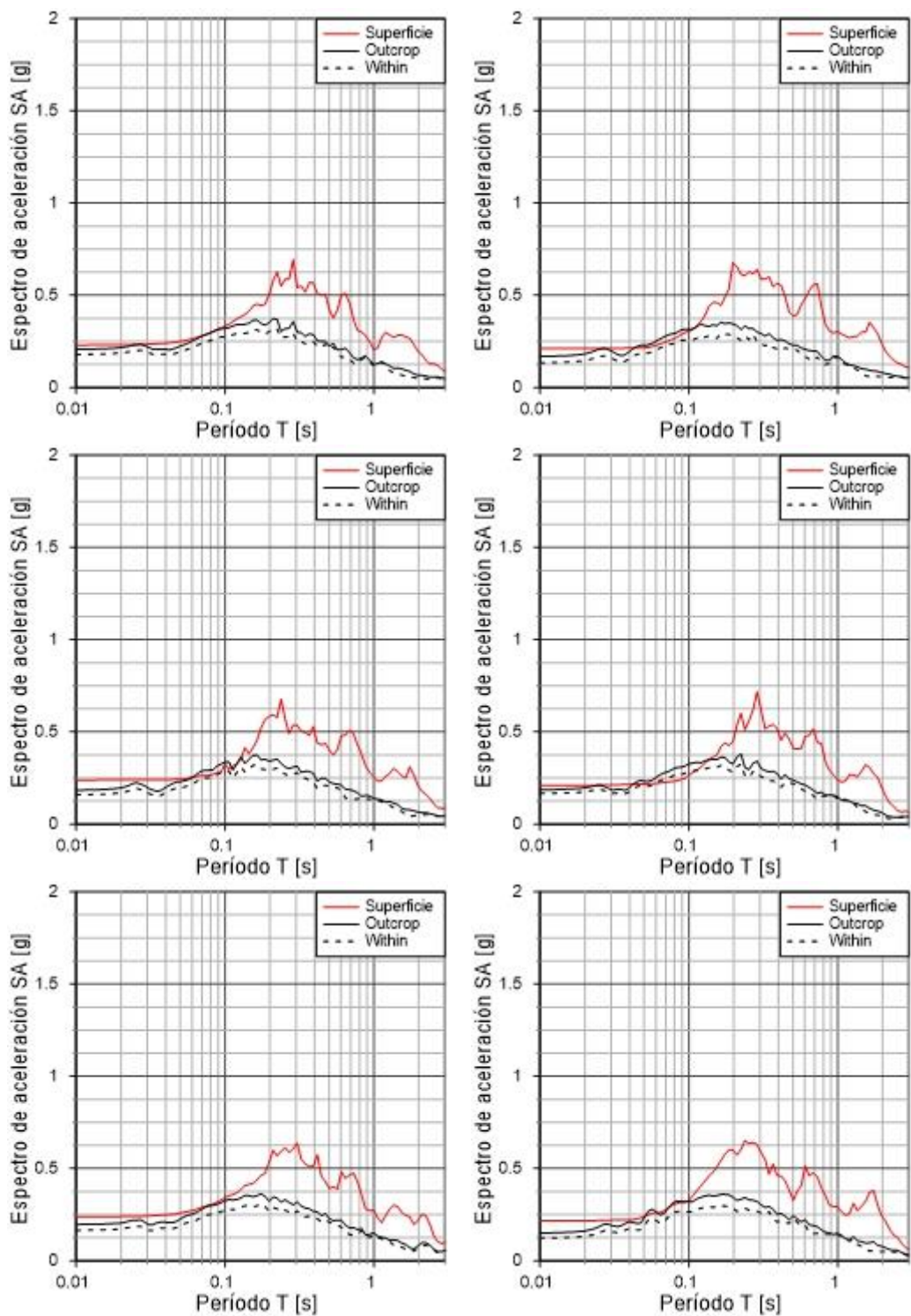


Figura 5.38 Espectros de propagación para sismos superficial. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el promedio entregado por las GMPE, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

5.6.4 Acelerogramas considerando el promedio

En esta sección se presentan los registros espectro compatibles en superficie de la sección 5.6.3 (Figuras de la 5.39 a la 5.41).

Se observa que estos presentan la forma característica de los registros semillas que los generaron, al igual que los registros de la sección 5.6.2. Pero presentando aceleraciones mucho más bajas. El mayor PGA ocurre para registros generados en base a una semilla intraplaca, alcanzando estos valores unos poco más altos que 0.4 [g].

Por otro lado, se aprecia el mismo aumento en el PGA que en la metodología anterior (Figura 5.42), y los valores de amortiguamiento en profundidad rondan el 6%, con lo que emplear un amortiguamiento constante del 5% en el análisis es adecuado.

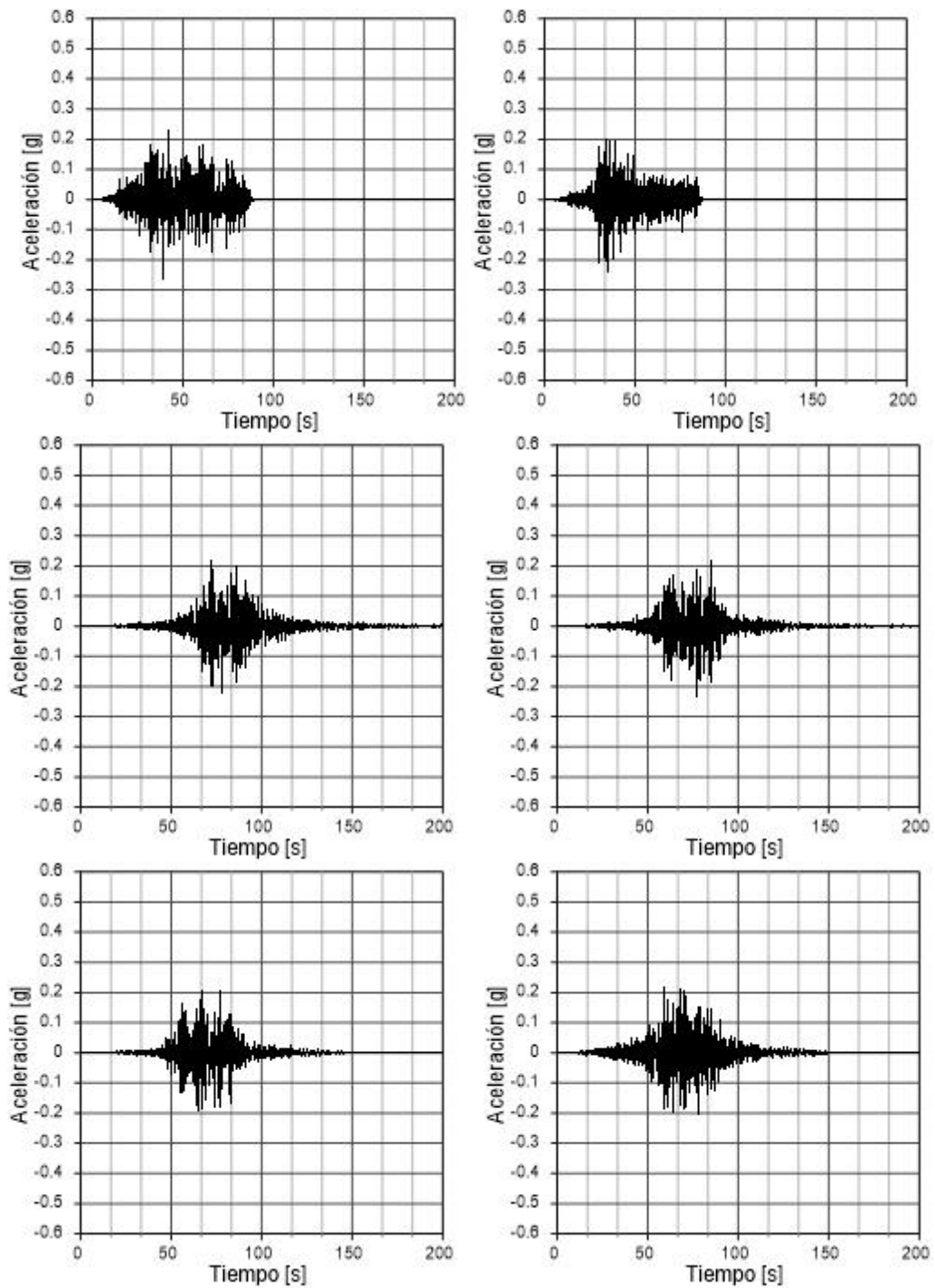


Figura 5.39 Registros de propagación para sismos interplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

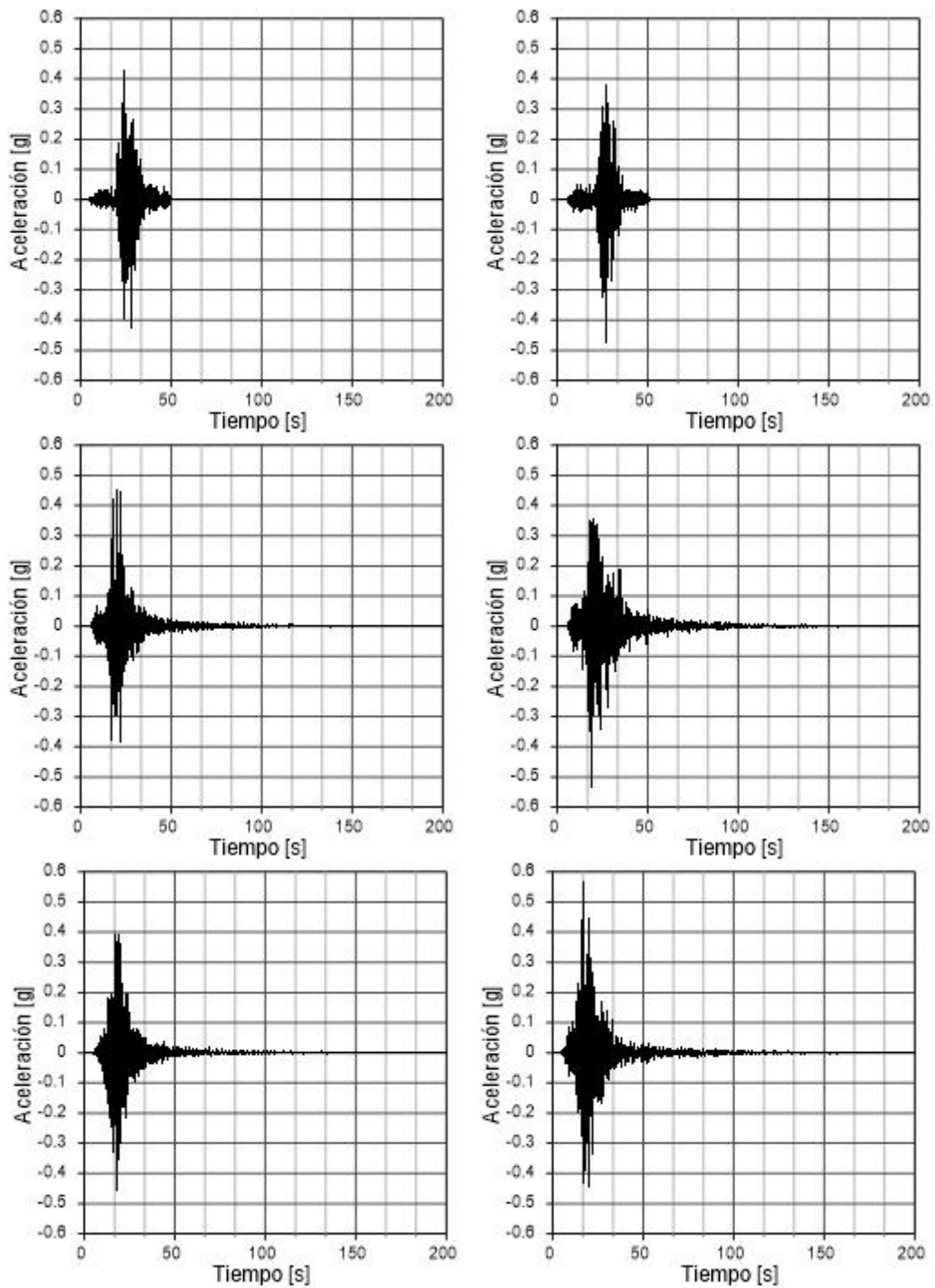


Figura 5.40 Registros de propagación para sismos intraplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

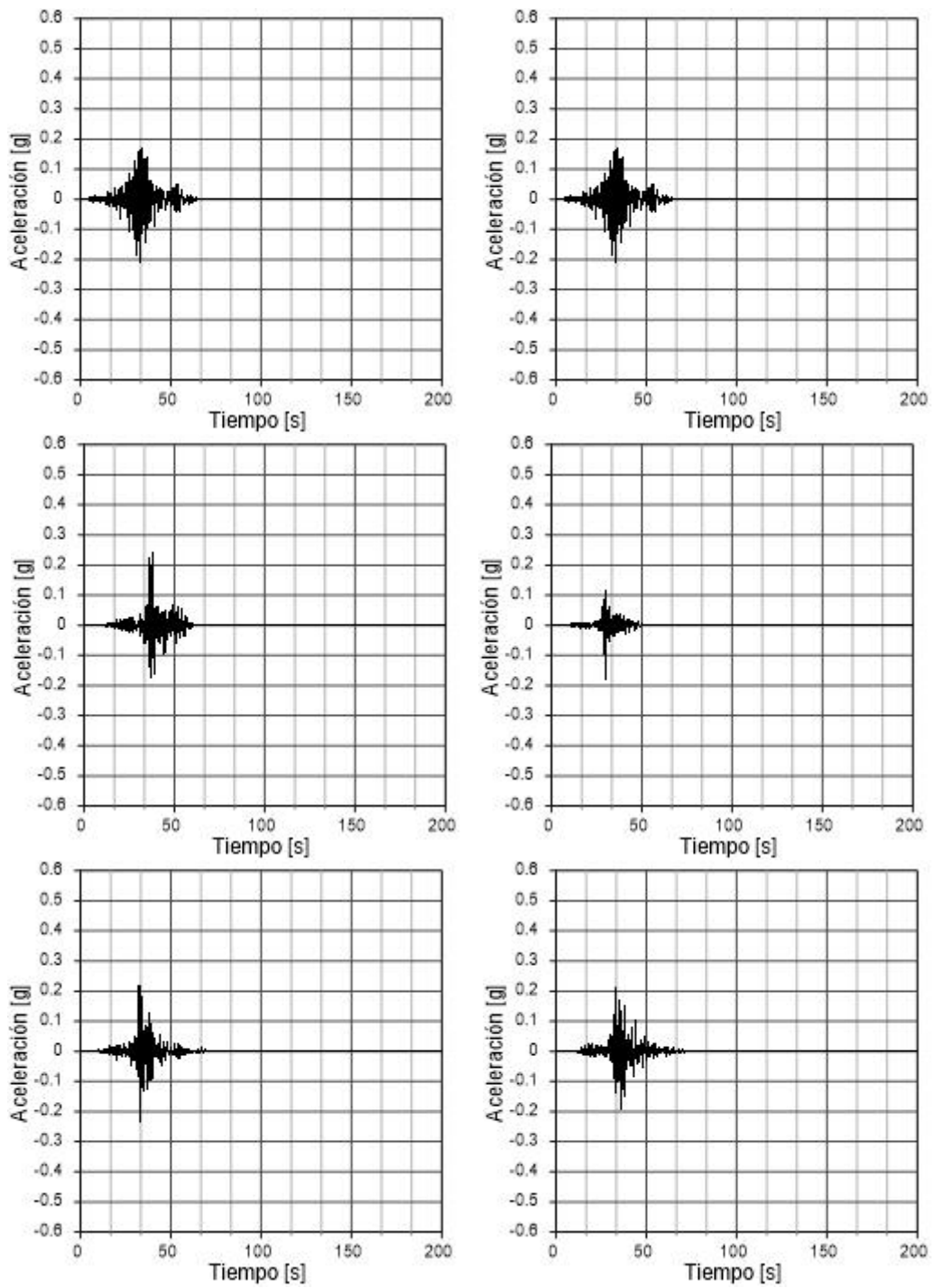


Figura 5.41 Registros de propagación para sismos superficial, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

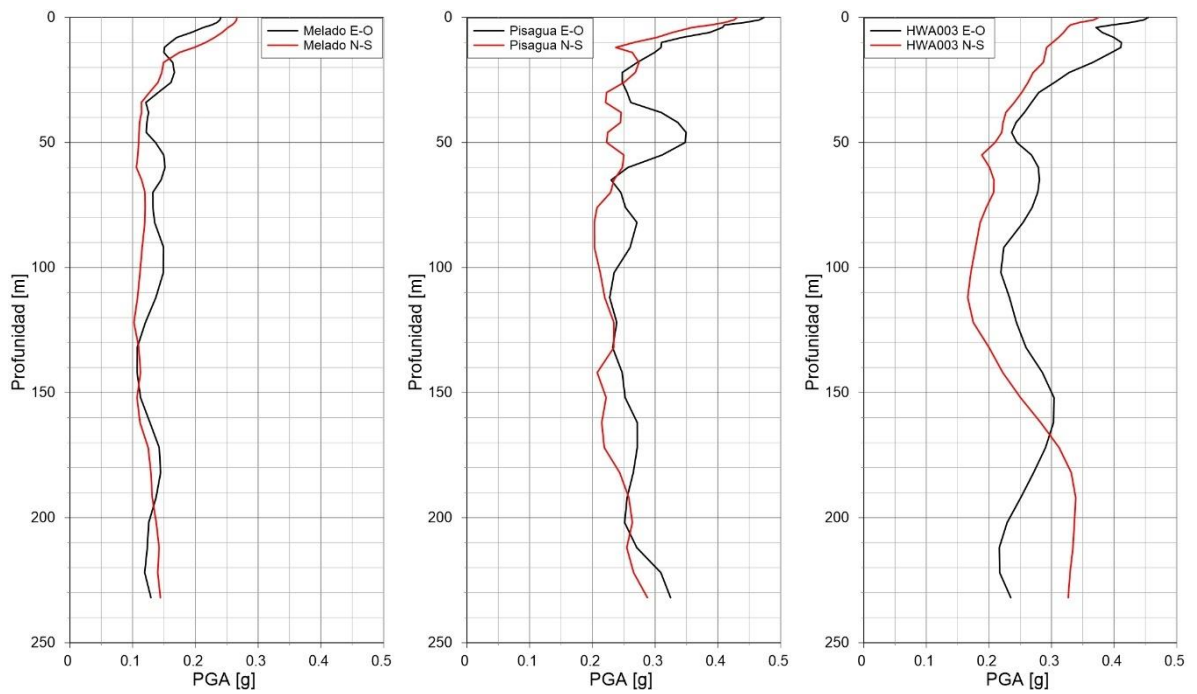


Figura 5.42 Variación de PGA en profundidad para distintos sismos, considerando el valor promedio

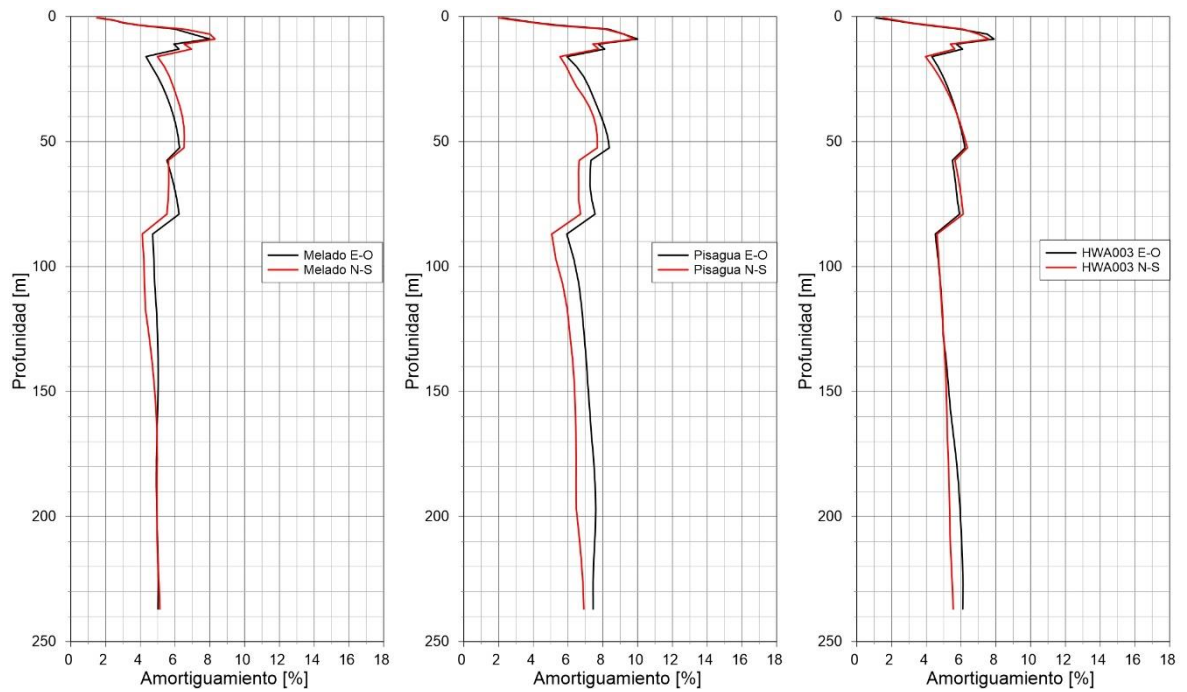


Figura 5.43 Variación de amortiguamiento en profundidad para distintos sismos, considerando el valor promedio

5.7 Propagación lineal equivalente

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante un análisis lineal equivalente. Estos son los espectros de respuesta con una tasa de amortiguamiento de 5%, en superficie, “outcrop” y “within”.

5.7.1 Espectros producto de promedio más desviación estándar

En esta sección se muestran los espectros resultantes de la propagación lineal equivalente, productos de los registros generados por espectros objetivos construidos a través del promedio más la desviación estándar del resultado al evaluar las GMPE para los sismos de diseño.

En los espectros producto de los tres sismos de diseño se observa que una desamplificación hasta períodos más bajos de 0.4 [s]. Para períodos superiores, todos los espectros presentan aceleraciones similares (Figura 5.44, 5.45 y 5.46). Lo que lleva a que mientras más grande sea el sismo ingresado en la superficie de la roca, mayor desamplificación se observa en superficie.

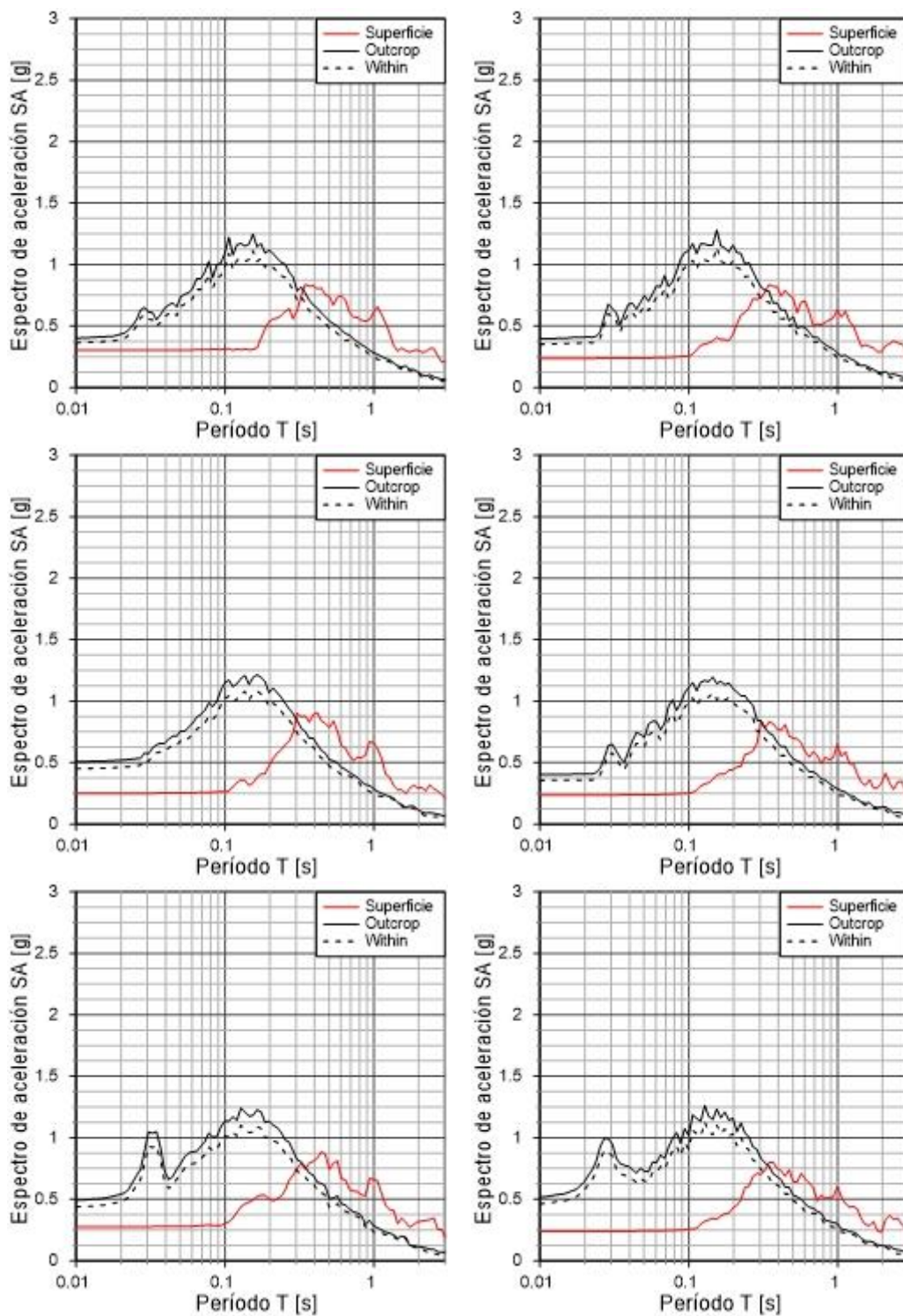


Figura 5.44 Espectros de propagación para sismos interplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

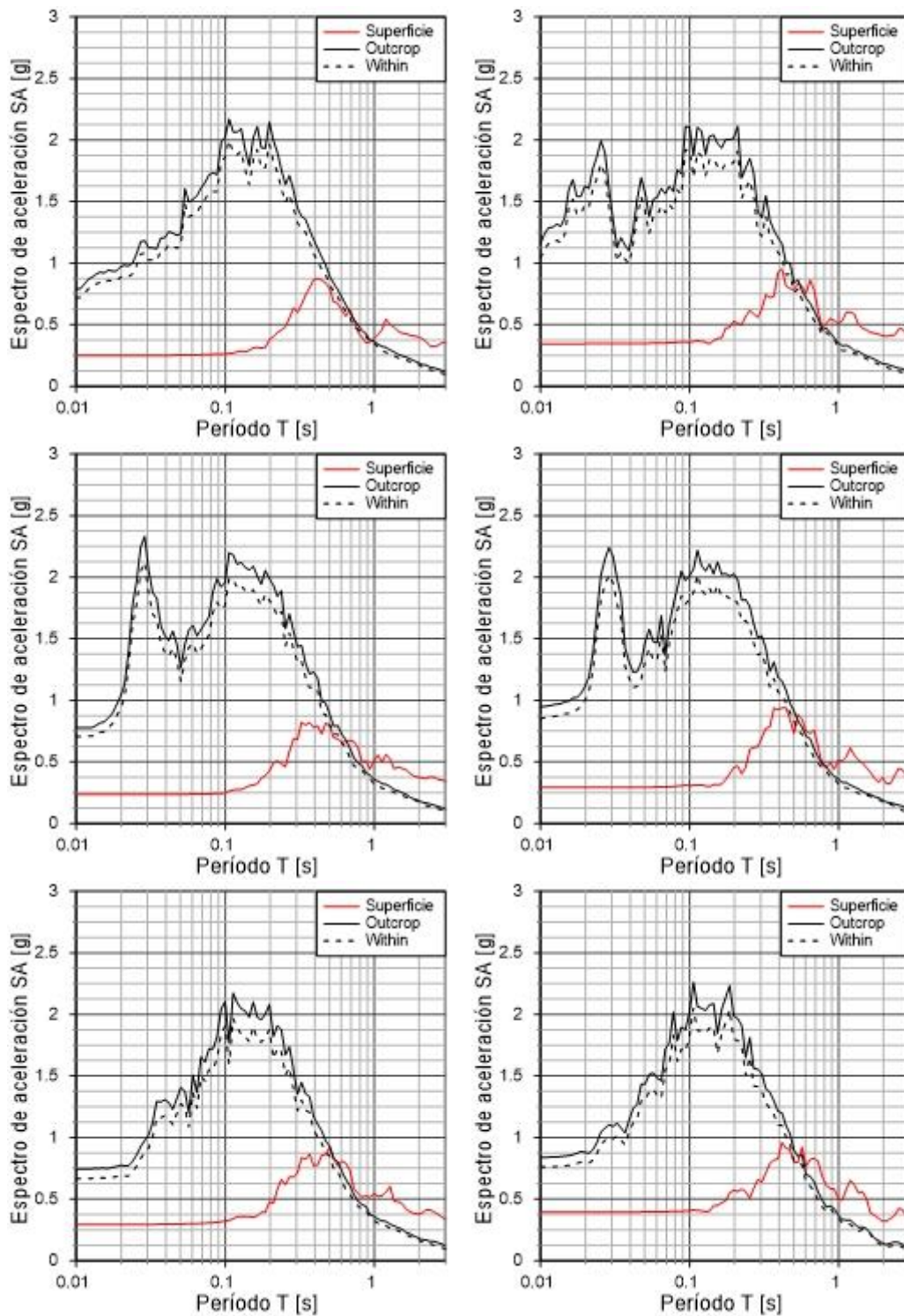


Figura 5.45 Espectros de propagación para sismos intraplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

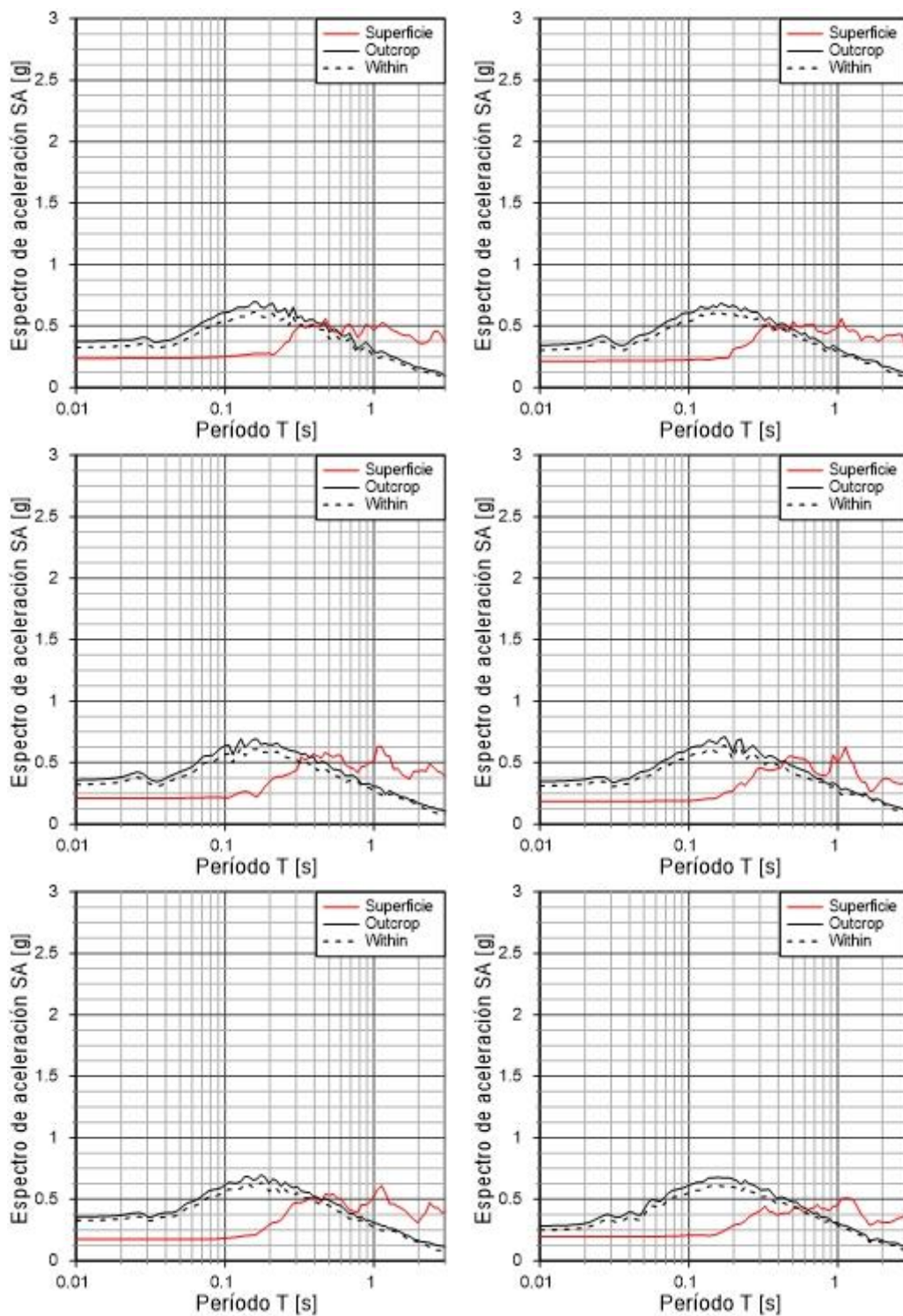


Figura 5.46 Espectros de propagación para sismos superficial. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

Se obtienen elevados amortiguamientos (Figura 5.47), que bordean al 10%, siendo mayores para sismos intraplaca que para interplaca y superficiales, superando un 15% de amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son producto de las elevadas deformaciones, generadas por sismos de diseño de gran magnitud. Estos valores de amortiguamiento no son los observados en la práctica, por lo que, en lo que sigue, se empleará solamente un análisis lineal con un amortiguamiento constante del 5%. Los resultados de un análisis lineal equivalente se pueden observar en los anexos del documento.

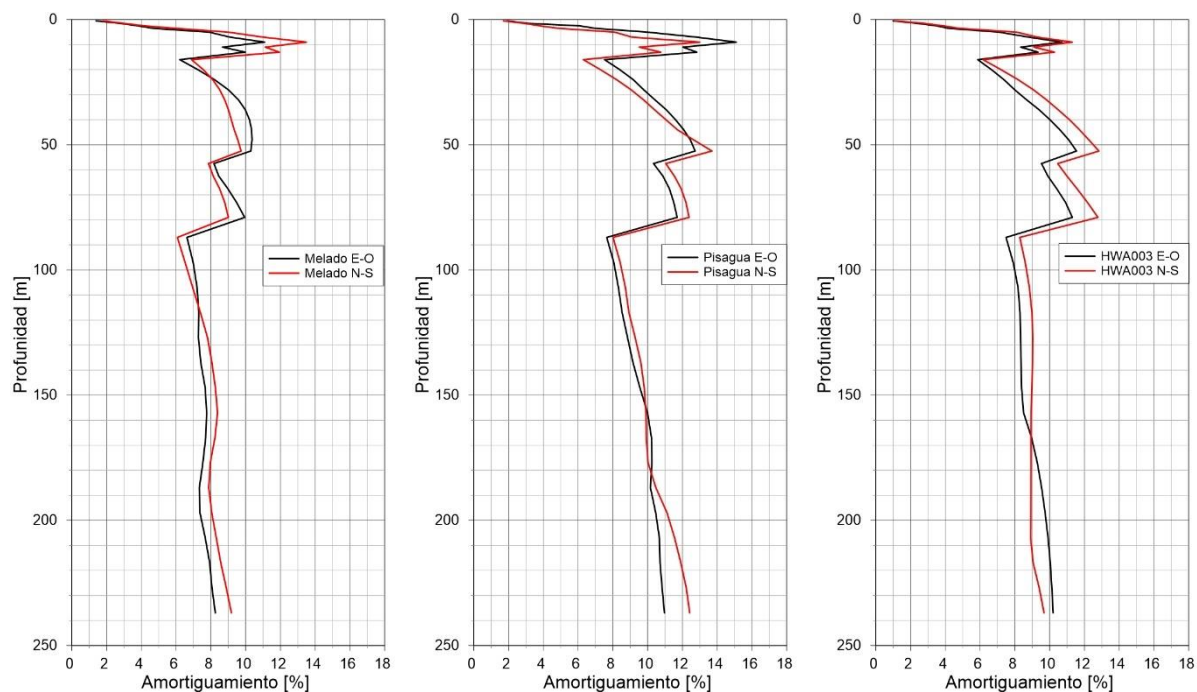


Figura 5.47 Variación de amortiguamiento en profundidad para sismo interplaca, intraplaca y superficial.

5.8 Espectro propuesto determinístico

En el estudio determinístico, mediante un análisis lineal con un amortiguamiento del 5%, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo, se obtienen resultados muy conservadores, con aceleraciones máximas que superan los 3.5 [g], a diferencia del mismo procedimiento, considerando solo el valor promedio de las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte, que entregan valores más usuales, cuyos espectros no superan 1 [g]. En ambos casos controla el sismo de diseño intraplaca. Notoriamente para períodos bajos, pero al ir aumentando el período de análisis los tres sismos de diseño convergen a valores similares.

En cuanto al análisis lineal equivalente, esta entrega espectros con aceleraciones bastante bajas, debido a los altos amortiguamientos que se generan, por lo que no es recomendable emplear este tipo de análisis para sismos que generen una alta deformación angular.

A continuación, se calcula la envolvente de todos los espectros en superficie, para la metodología de análisis lineal con amortiguamiento constante. Posteriormente, se define una curva como espectro propuesto, en base a la envolvente, tal como se muestra a continuación (Figura 5.48 y 5.49). El espectro propuesto construido mediante un análisis lineal equivalente, este se puede observar en los anexos (Figura 11.10 y 11.11).

$$Sa(g) = \begin{cases} 17.37 \cdot T + 1.06 & T \leq 0.15 \\ 3.67 & 0.15 < T \leq 0.4 \\ 1.18 \cdot T^{-1.07} & 0.4 < T \end{cases} \quad (5.1)$$

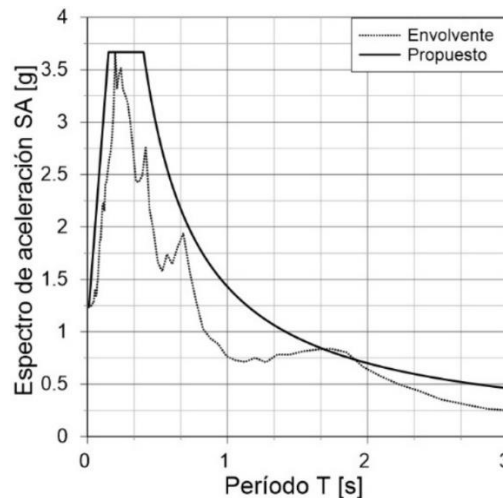


Figura 5.48 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio más una desviación estándar, mediante un análisis lineal con amortiguamiento del 5%

$$Sa(g) = \begin{cases} 8.64 \cdot T + 0.48 & T \leq 0.15 \\ 1.78 & 0.15 < T \leq 0.4 \\ 0.76 \cdot T^{-0.93} & 0.4 < T \end{cases} \quad (5.2)$$

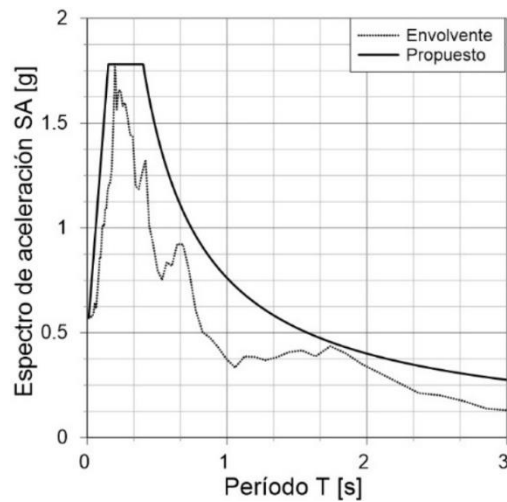


Figura 5.49 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio, mediante un análisis lineal con amortiguamiento del 5%.

6 Estudio Probabilístico

6.1 Aceleración máxima

Empleando la metodología descrita en la sección 3.2, se calculan las tasas de excedencia anuales y probabilidades de excedencia, en función de la regionalización y las GMPE consideradas.

En la Figura 6.1 se observan los resultados empleando la GMPE de Montalva et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca, junto a la GMPE de Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales, considerando la regionalización de Susa (2004) y de Poulos (2019).

En la misma Figura 6.1, se muestran los resultados empleando la GMPE de Idini et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca, junto a la GMPE de Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales, considerando la regionalización de Susa (2004) y de Poulos (2019).

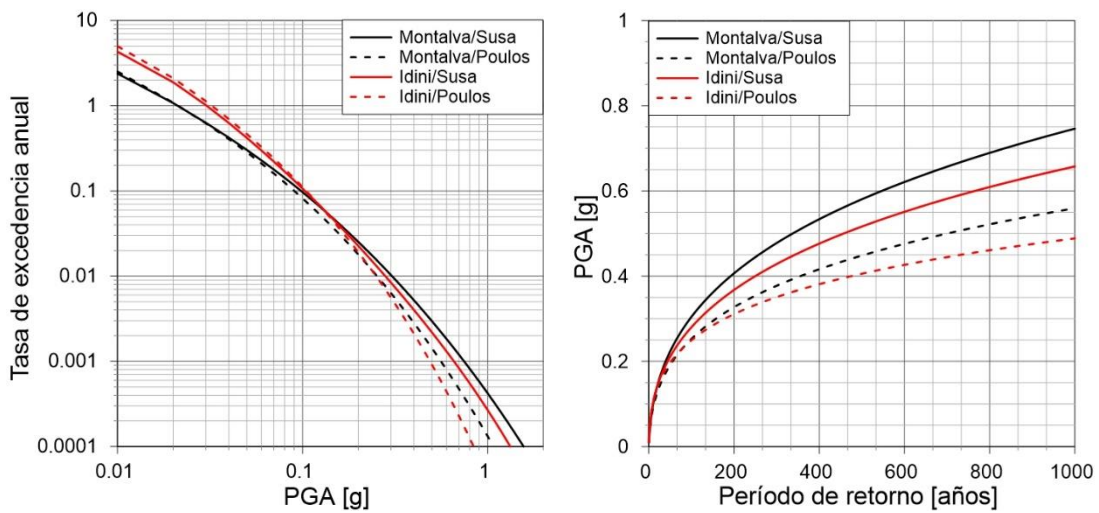


Figura 6.1 Tasa de excedencia anual y período de retorno calculados mediante distintas GMPE y regionalizaciones.

Considerando una distribución de Poisson, se puede calcular la probabilidad de excedencia, dadas las ventanas de tiempo de 50, 100, 200 y 500 años, para las diferentes combinaciones de GMPE y regionalizaciones consideradas. Estos resultados se exponen En las Figuras de la 6.2 y 6.3.

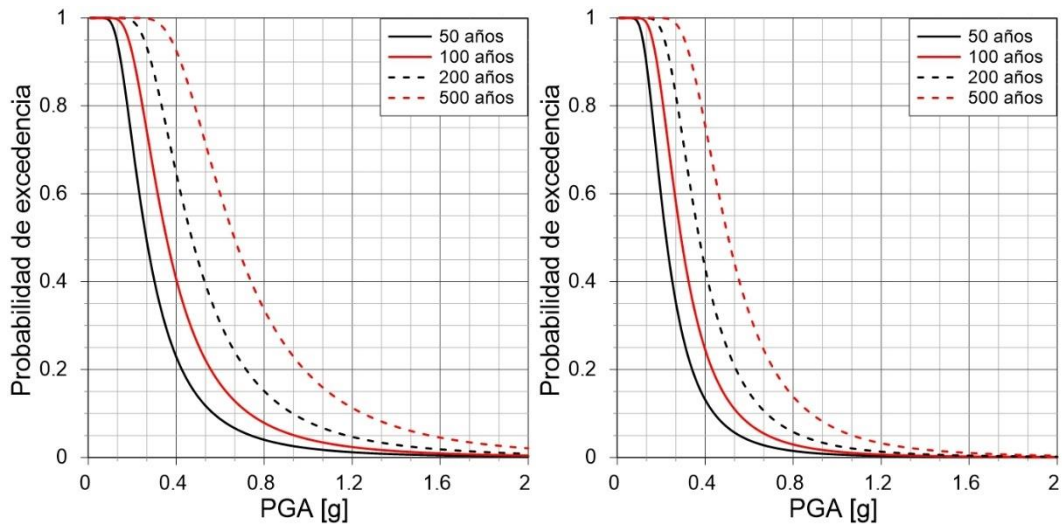


Figura 6.2 Probabilidad de excedencia empleando ecuación de predicción de movimiento fuerte de Montalva et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca y Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales. A la derecha considerando regionalización Susa (2004), a la izquierda considerando regionalización de Poulos (2019)

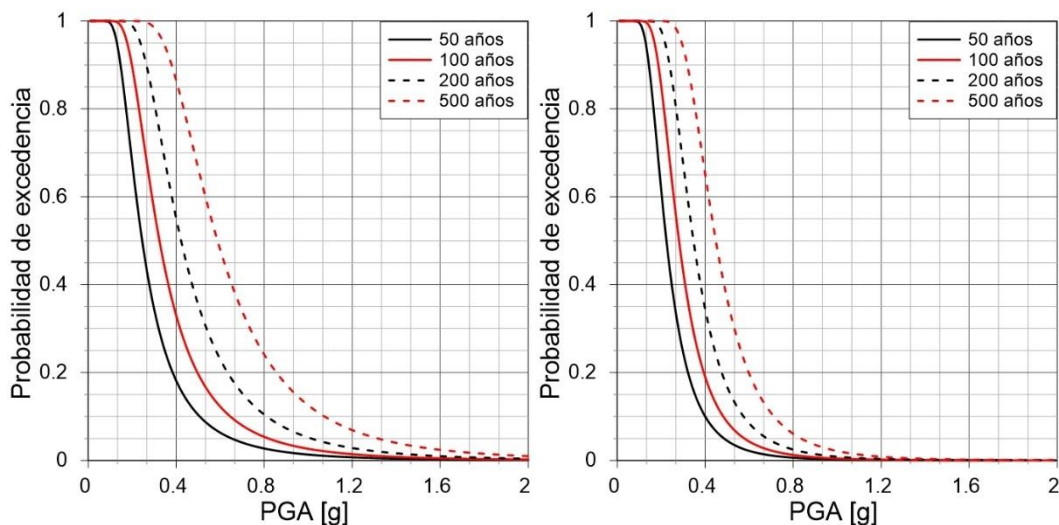


Figura 6.3 Probabilidad de excedencia empleando ecuación de predicción de movimiento fuerte de Idini et al. (2017) para sismos interplaca e intraplaca y Graizer & Kalkan (2016) para sismos superficiales. A la derecha considerando regionalización Susa (2004), a la izquierda considerando regionalización de Poulos (2019)

Considerando una probabilidad de excedencia del 50% en 50 años (período de retorno de 72 años, desde ahora llamado sismo de servicio), 10% en 50 años (período de retorno de 475 años, desde ahora llamado sismo de diseño) y 10% en 100 años (período de retorno de 949 años, desde ahora llamado sismo máximo creíble), se tienen los PGA mostrados en la Tabla 6.1, en función de la GMPE y la regionalización considerada.

Tabla 6.1 Período de retorno y PGA dada probabilidad de excedencia, utilizando diversas combinaciones de GMPE y regionalización.

Probabilidad de excedencia	GMPE Interplaca/Intraplaca	Regionalización	PGA [g]
50% 50 años Servicio	Montalva et al (2017)	Susa (2004)	0.27
	Montalva et al (2017)	Poulos (2019)	0.23
	Idini et al (2017)	Susa (2004)	0.25
	Idini et al (2017)	Poulos (2019)	0.23
10% en 50 años Diseño	Montalva et al (2017)	Susa (2004)	0.57
	Montalva et al (2017)	Poulos (2019)	0.45
	Idini et al (2017)	Susa (2004)	0.51
	Idini et al (2017)	Poulos (2019)	0.40
10% en 100 años Máximo Creíble	Montalva et al (2017)	Susa (2004)	0.74
	Montalva et al (2017)	Poulos (2019)	0.56
	Idini et al (2017)	Susa (2004)	0.65
	Idini et al (2017)	Poulos (2019)	0.49

Se obtienen valores de aceleración máxima consistentes con otros estudios de amenaza sísmica para la zona (Leyton et al. 2010; Núñez et al. 2015). Además, se puede apreciar que el PGA estimado varía escasamente con la regionalización considerada al tomar en

cuenta la probabilidad de excedencia más baja propuesta (Tabla 6.1). Sin embargo, esta variación aumenta al considerar probabilidades de excedencias mayores, en donde los resultados entregados al considerar la regionalización de Susa son mayores que los obtenidos mediante la regionalización de Poulos.

Al emplear la ecuación de predicción de movimiento fuerte de Montalva, se obtienen resultados ligeramente mayores a los obtenidos al utilizar la curva de Idini (Tabla 6.1). Este efecto también se observa en la Figura 6.1, en donde la GMPE de Montalva va por sobre la curva de Idini al aumentar el PGA, y en las Figuras 6.2 y 6.3, en donde las curvas calculadas mediante Idini presentan pendientes más pronunciadas que las calculadas considerando las ecuaciones de Montalva.

6.2 Espectro de amenaza uniforme

Repitiendo el procedimiento anterior, pero ahora considerando cada periodo dado por las curvas de predicción de movimiento fuerte, es posible construir un espectro de amenaza probabilístico, dado cierta probabilidad de excedencia y periodo de tiempo. Siendo consecuente con el análisis expuesto, se tiene el caso del sismo de servicio, el sismo de diseño y el sismo máximo creíble.

Considerando el caso más conservador se la sección anterior, esto es, una regionalización de Susa (Susa, 2004), se obtiene el espectro expuesto en la Figura 6.4.

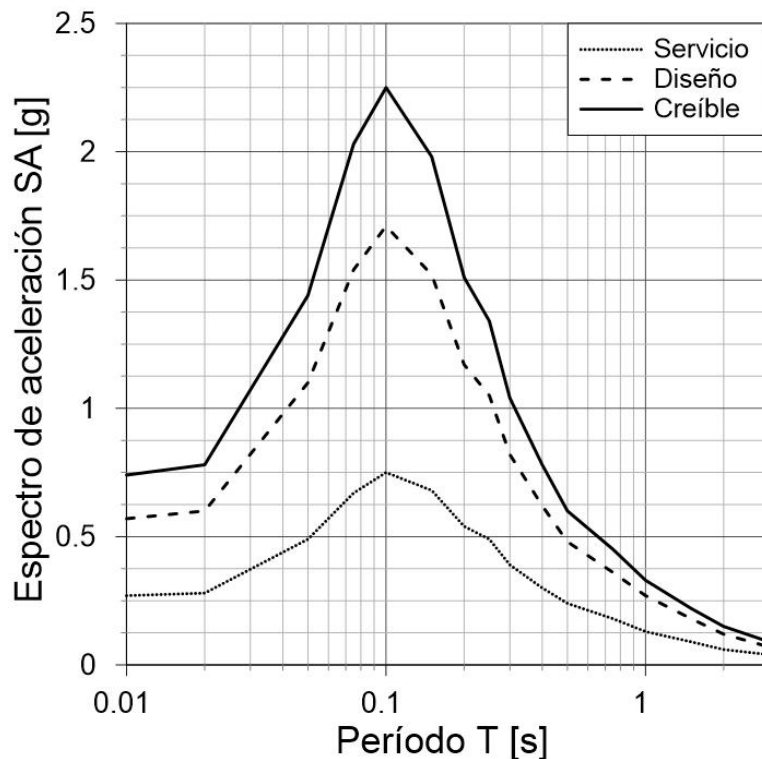


Figura 6.4 Espectro de análisis probabilístico (PSHA) empleando la GMPE de Montalva para sismos interplaca e intraplaca (Montalva et al. 2017), y la GMPE de Graizer & Kalkan para sismos superficiales (Graizer et al. 2013), considerando la regionalización Susa (Susa, 2004).

6.3 Ajuste espectral

Repitiendo la metodología para el estudio determinístico, se emplea el espectro del sismo máximo creíble obtenido como espectro objetivo en la rutina de “spectral matching”. Como el espectro de amenaza uniforme se obtiene de la contribución de todos los sismos disponibles en el catálogo, no se pueden identificar las características correspondientes para seleccionar una semilla adecuada, por lo que, de manera preliminar, se realiza el ajuste espectral con todas las semillas disponibles en este estudio.

6.3.1 Espectros modificados

En general, se obtienen espectros de respuesta acordes con el espectro objetivo utilizado, a excepción de los espectros modificados con semilla interplaca en estación “Santa Lucia” y a los con semilla intraplaca en estación “HMTT”, en donde se genera un gran “peak” artificial, no presente en el espectro semilla ni en el objetivo (Figura 6.5 y 6.6), producto del método de ajuste. Este efecto se aprecia también, aunque en menor medida para el espectro producto de las semillas superficiales “HWA003” y “TAP065” (Figura 6.7).

Este fenómeno, en el presente estudio, no es de gran relevancia, tal como se verá a continuación, ya que estese produce en una zona de alta frecuencia, que escapa a la frecuencia máxima de análisis empleada en el software “Deepsoil”, debido al perfil con el que se trabaja y se detalla en la Tabla 4.1.

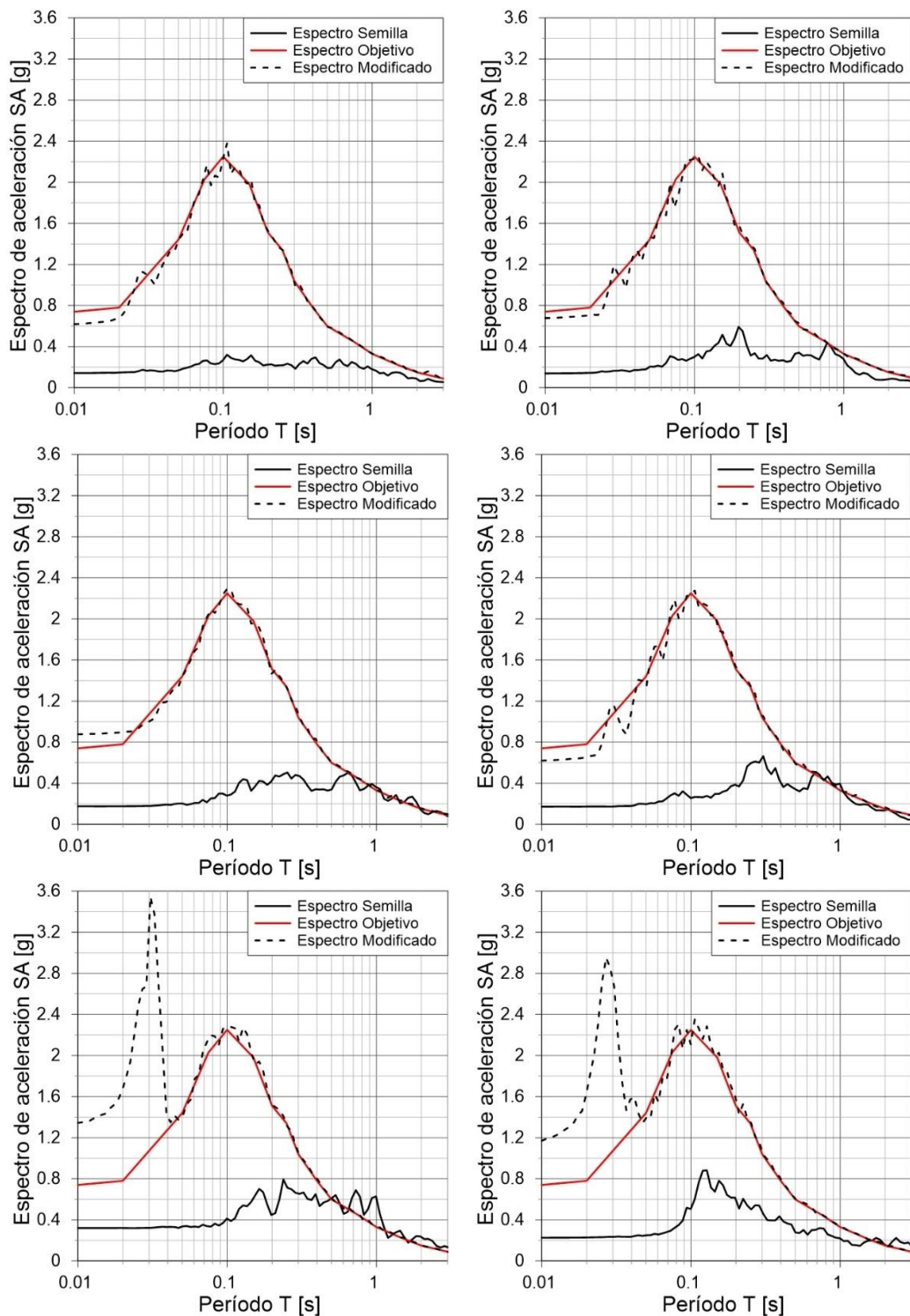


Figura 6.5 Ajuste de espectro probabilísticos con semillas interplaca. Se observa el espectro semilla, producto del registro semilla original, el espectro objetivo, producto del estudio probabilístico para el sismo máximo creíble, y el espectro modificado producto del “spectral-matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

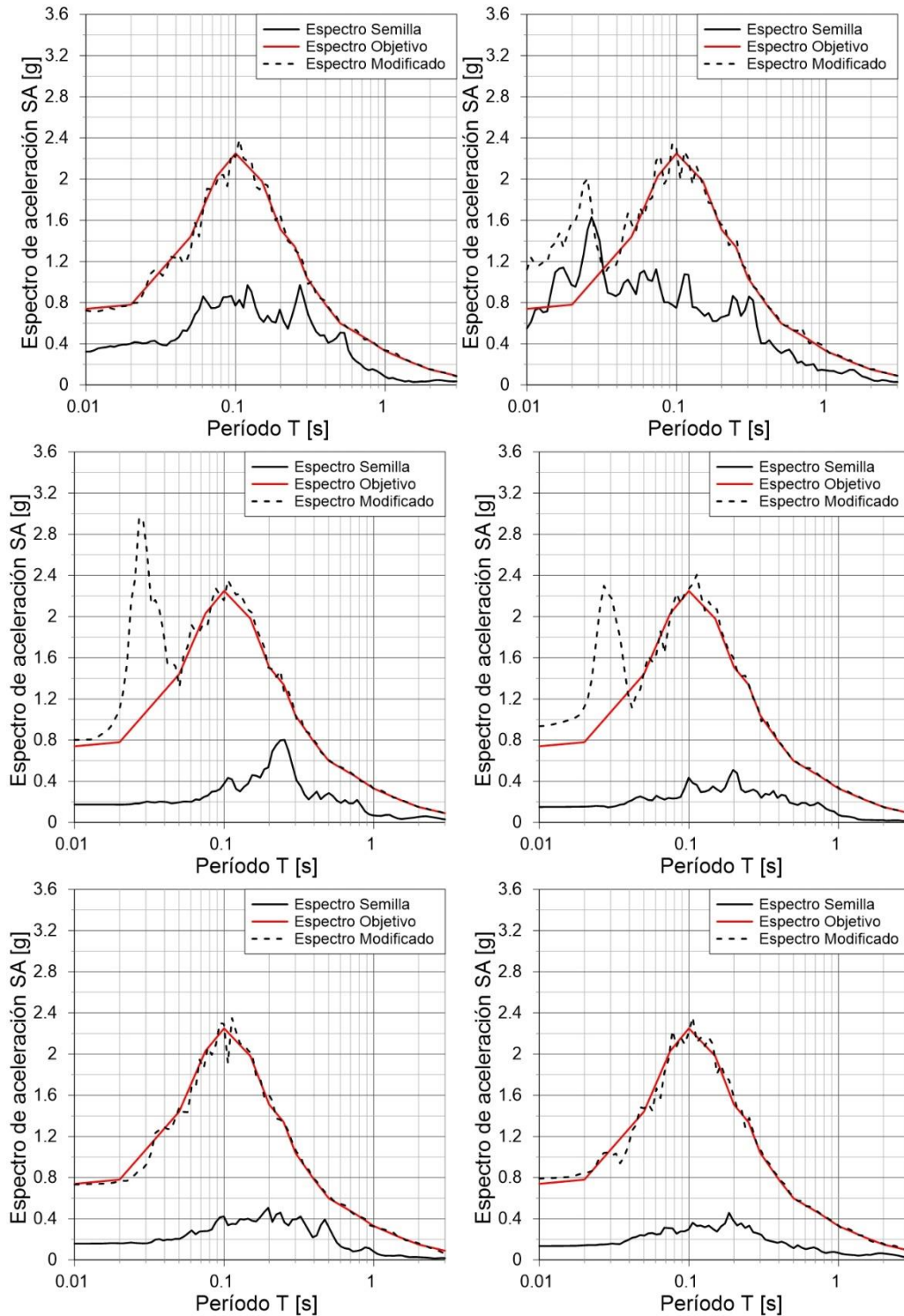


Figura 6.6 Ajuste de espectro probabilísticos con semillas intraplaca. Se observa el espectro semilla, producto del registro semilla original, el espectro objetivo, producto del estudio probabilístico para el sismo máximo creíble, y el espectro modificado producto del “spectral-matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

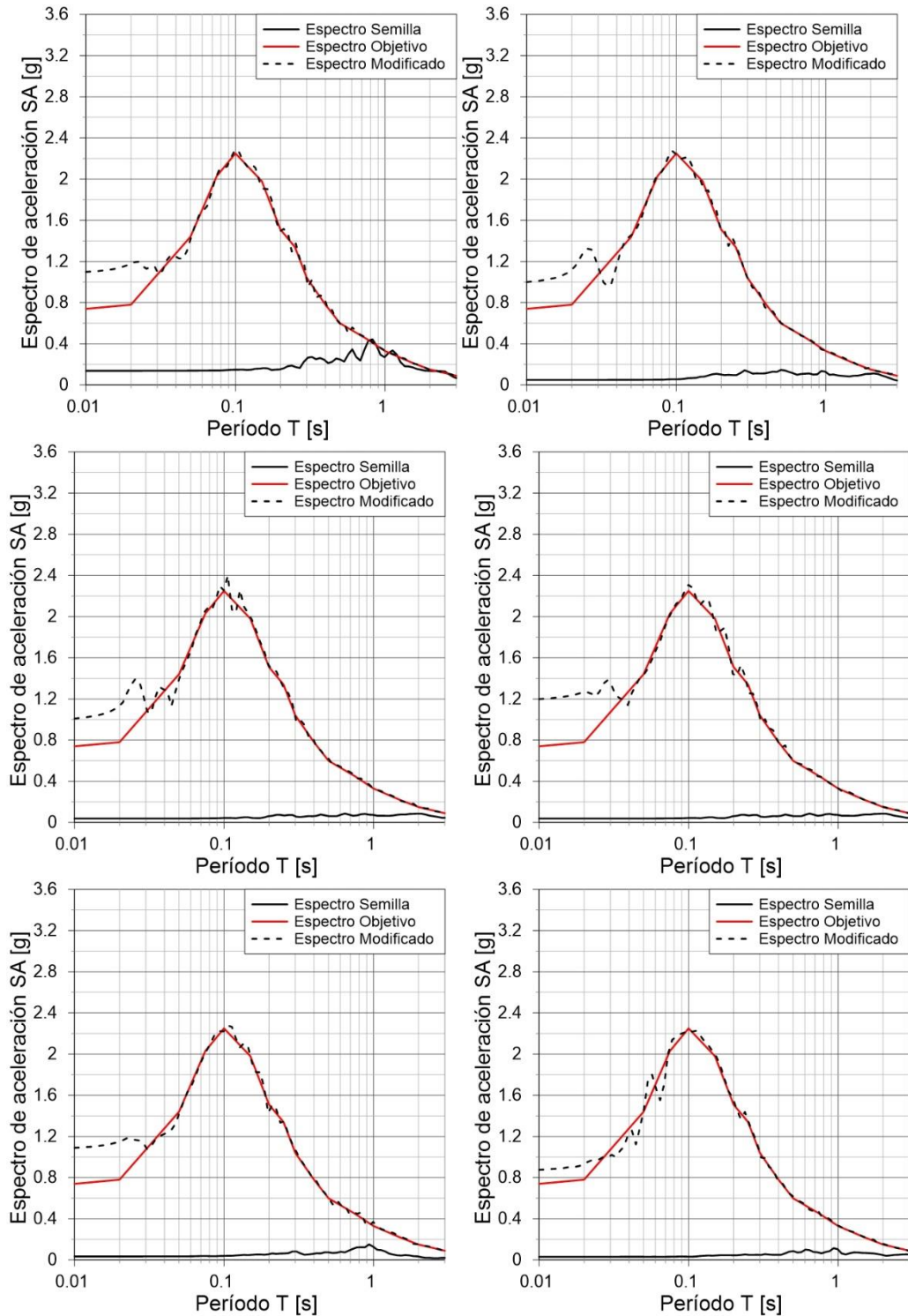


Figura 6.7 Ajuste de espectro probabilísticos con semillas superficiales. Se observa el espectro semilla, producto del registro semilla original, el espectro objetivo, producto del estudio probabilístico para el sismo máximo creíble, y el espectro modificado producto del “spectral-matching”. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

6.3.2 Acelerogramas modificados

Los registros artificiales generados, en el caso de emplear un sismo superficial como semilla (Figura 6.10), y de igual manera para semillas de sismos interplaca como la estación “Santa Lucia” y “Las Tórtolas” (Figura 6.8) y estaciones de sismos intraplaca como “HMTT” (Figura 6.9), se generan “peaks” anormalmente altos para un registro sísmico.

Este se debe a la diferencia significativa entre la forma espectral del espectro semilla y el espectro objetivo, basado en que no se tiene un único sismo característico de diseño como objetivo, por lo que se desconocen las características necesarias para elegir un buen registro semilla. Sin embargo, los registros artificiales basados en la semilla intraplaca “Pisagua” presentan una forma adecuada para el tipo de sismo representado, junto con una buena forma espectral, debido a su contenido de energía en alta frecuencia.

Esto puede ser producto de que el espectro de amenaza uniforme calculado en base al sismo máximo creíble (Figura 6.4) se asemeja en gran medida con el espectro calculado con el promedio de las GMPE, más una desviación estándar, para el caso de un terremoto intraplaca (Figura 5.4).

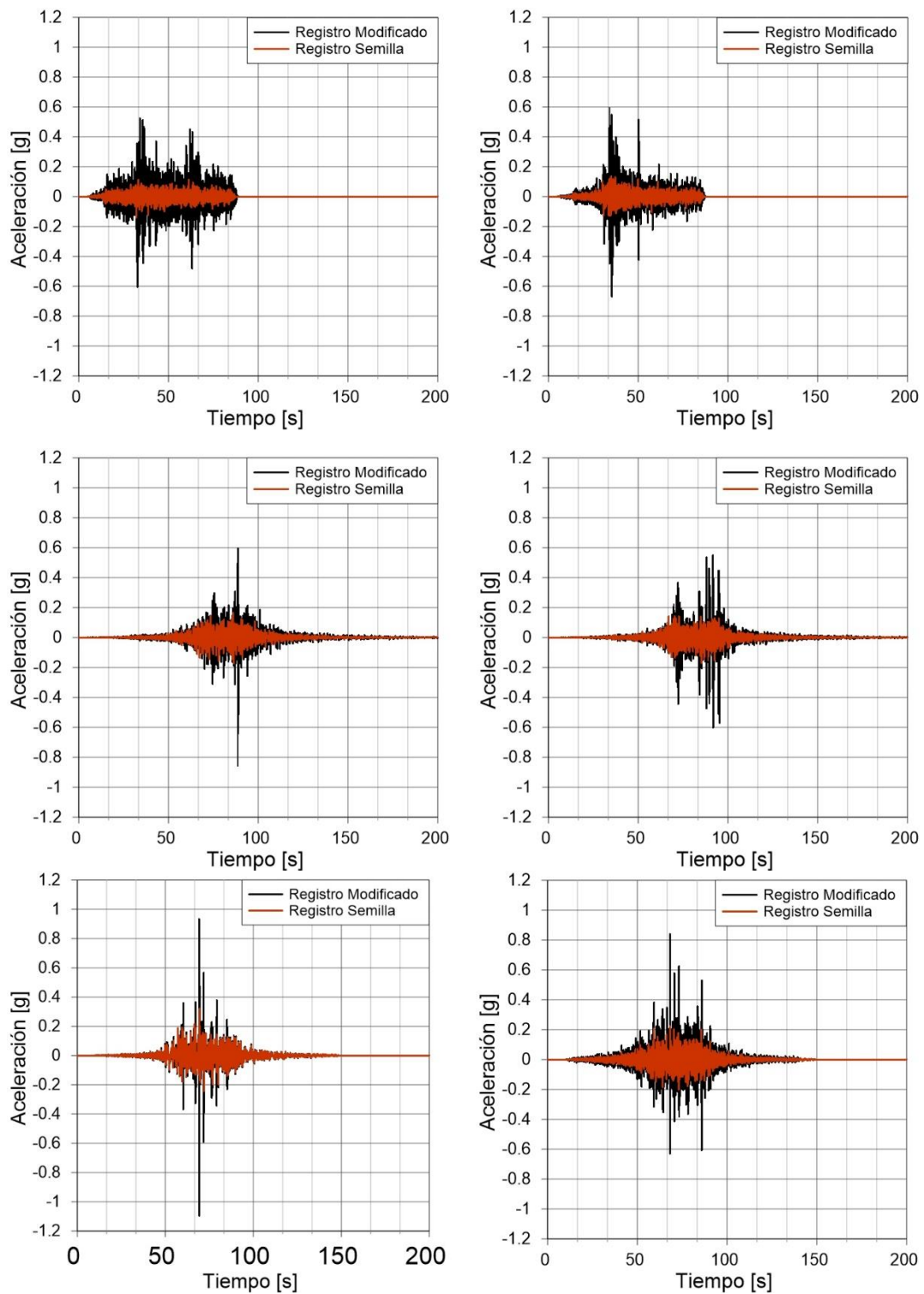


Figura 6.8 Registros de ajuste probabilísticos con semillas interplaca. Se observa el registro semilla sin modificar, junto con el registro producto del “spectral-matching” con el espectro objetivo probabilístico. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

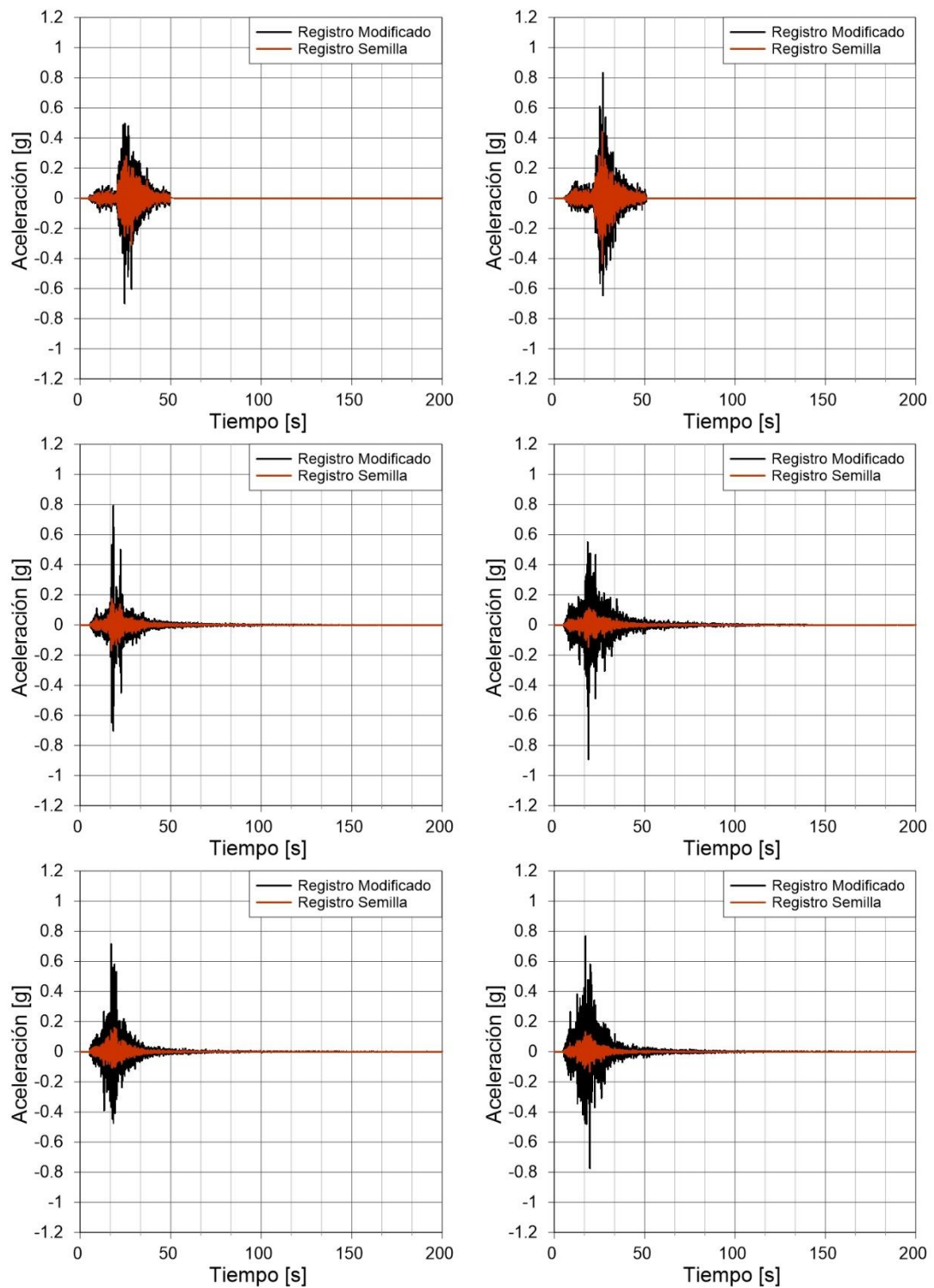


Figura 6.9 Registros de ajuste probabilísticos con semillas intraplaca. Se observa el registro semilla sin modificar, junto con el registro producto del “spectral-matching” con el espectro objetivo probabilístico. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

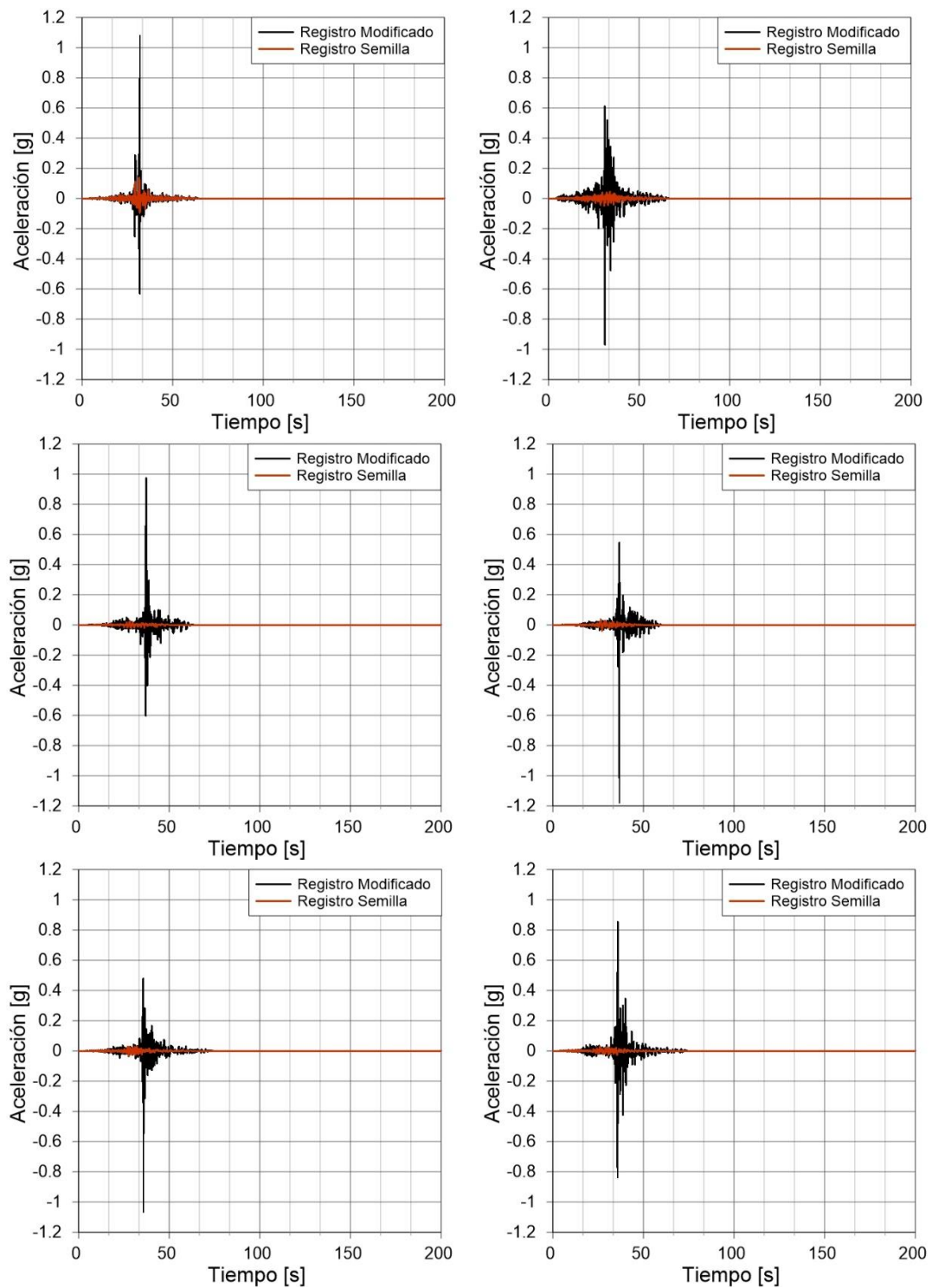


Figura 6.10 Registros de ajuste probabilísticos con semillas superficial. Se observa el registro semilla sin modificar, junto con el registro producto del “spectral-matching” con el espectro objetivo probabilístico. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

6.4 Resultados propagación análisis lineal

Posteriormente a obtener los registros artificiales, se procede a realizar un análisis lineal con un amortiguamiento del 5%, tal como en el caso del estudio determinístico.

6.4.1 Espectros de análisis lineal

A continuación, se muestran los espectros con un amortiguamiento del 5% propagados en superficie (Figuras de la 6.11 a la 6.13). Al igual que para el estudio determinístico, se observa una desamplificación para períodos bajos, aproximadamente inferiores a 0.1 [s], para una posterior amplificación para períodos altos.

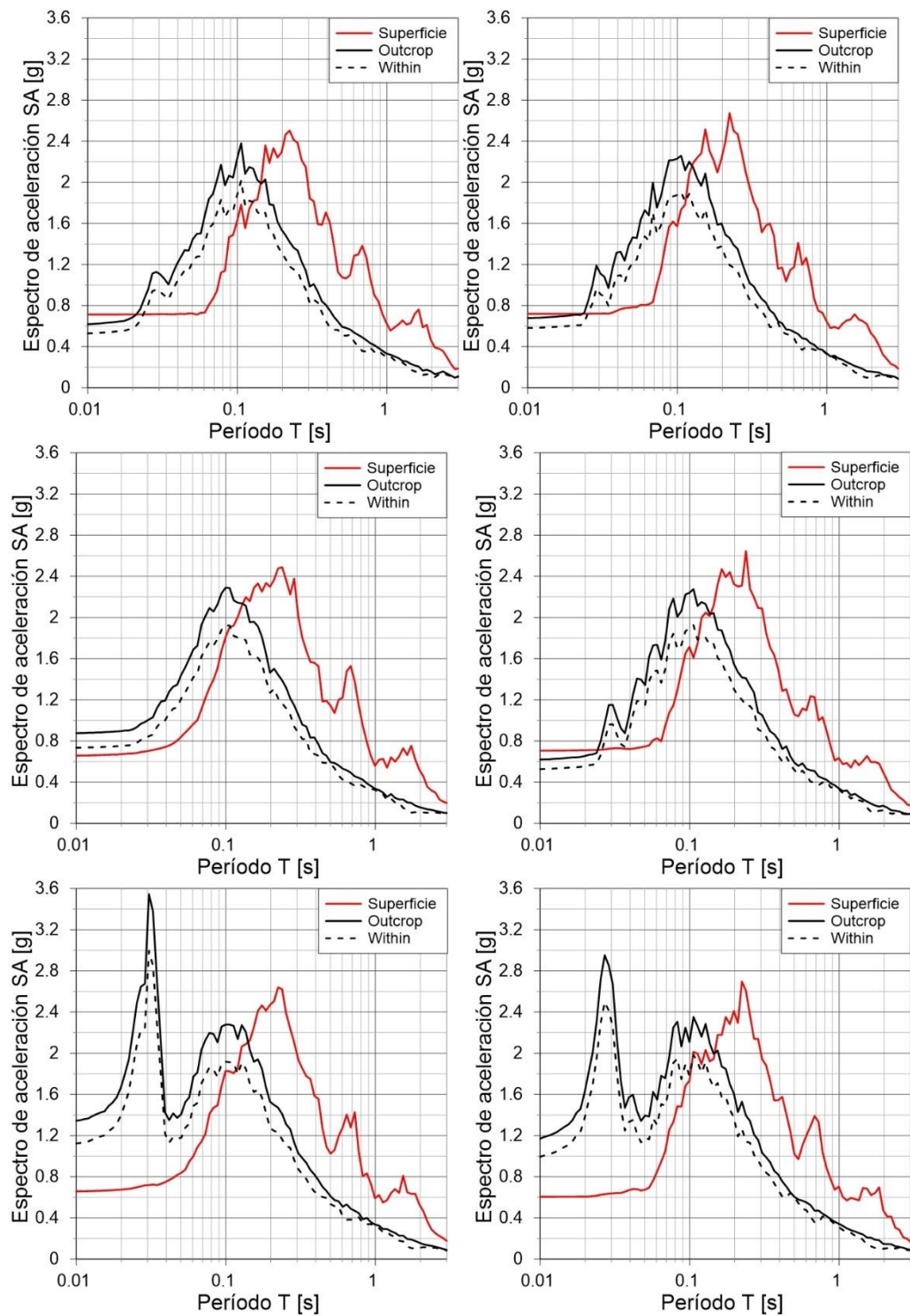


Figura 6.11 Espectros de propagación lineal con amortiguamiento del 5%, para semillas de sismo interplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el espectro probabilístico del sismo máximo creíble, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

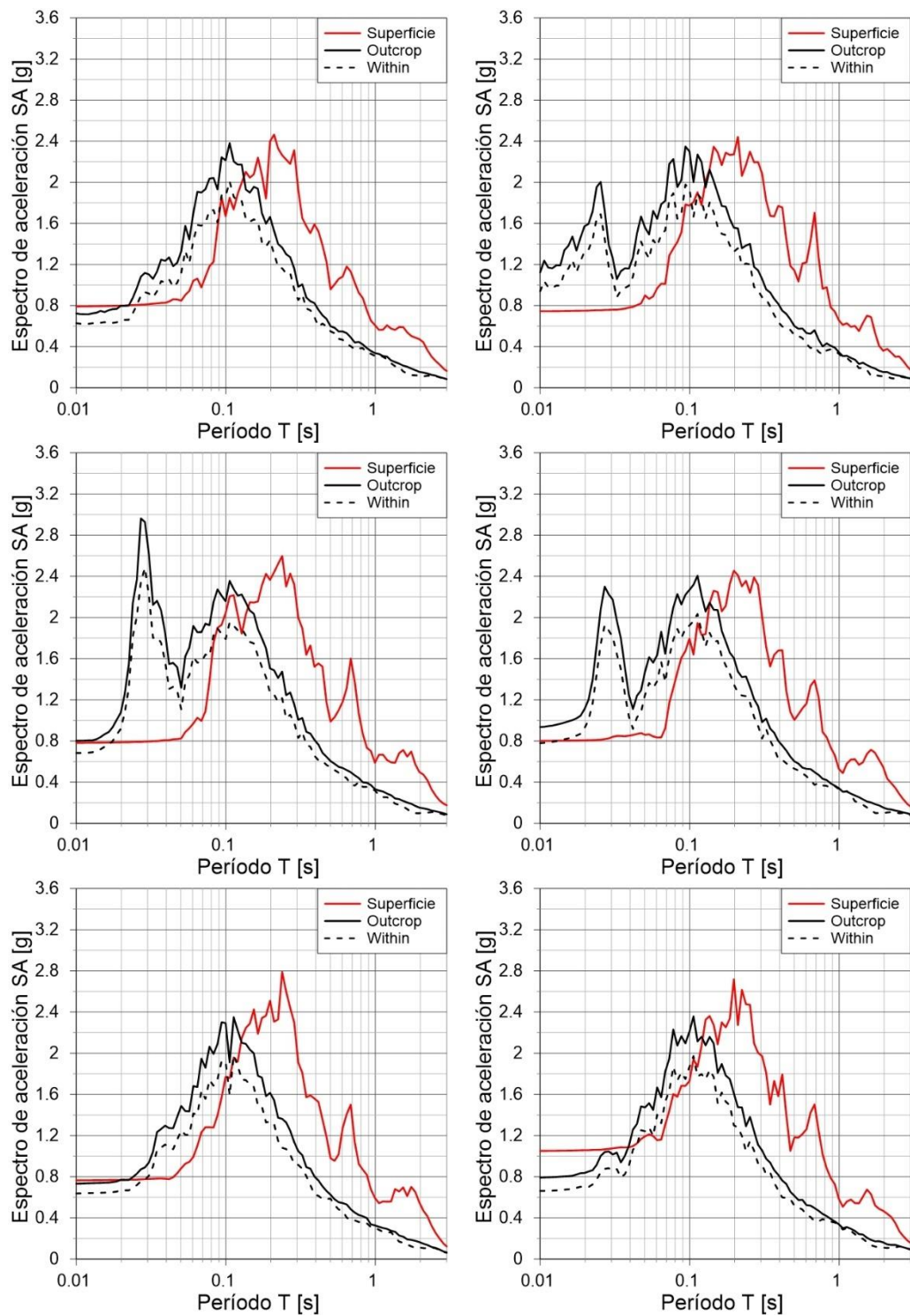


Figura 6.12 Espectros de propagación lineal con amortiguamiento del 5%, para semillas de sismo intraplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el espectro probabilístico del sismo máximo creíble, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

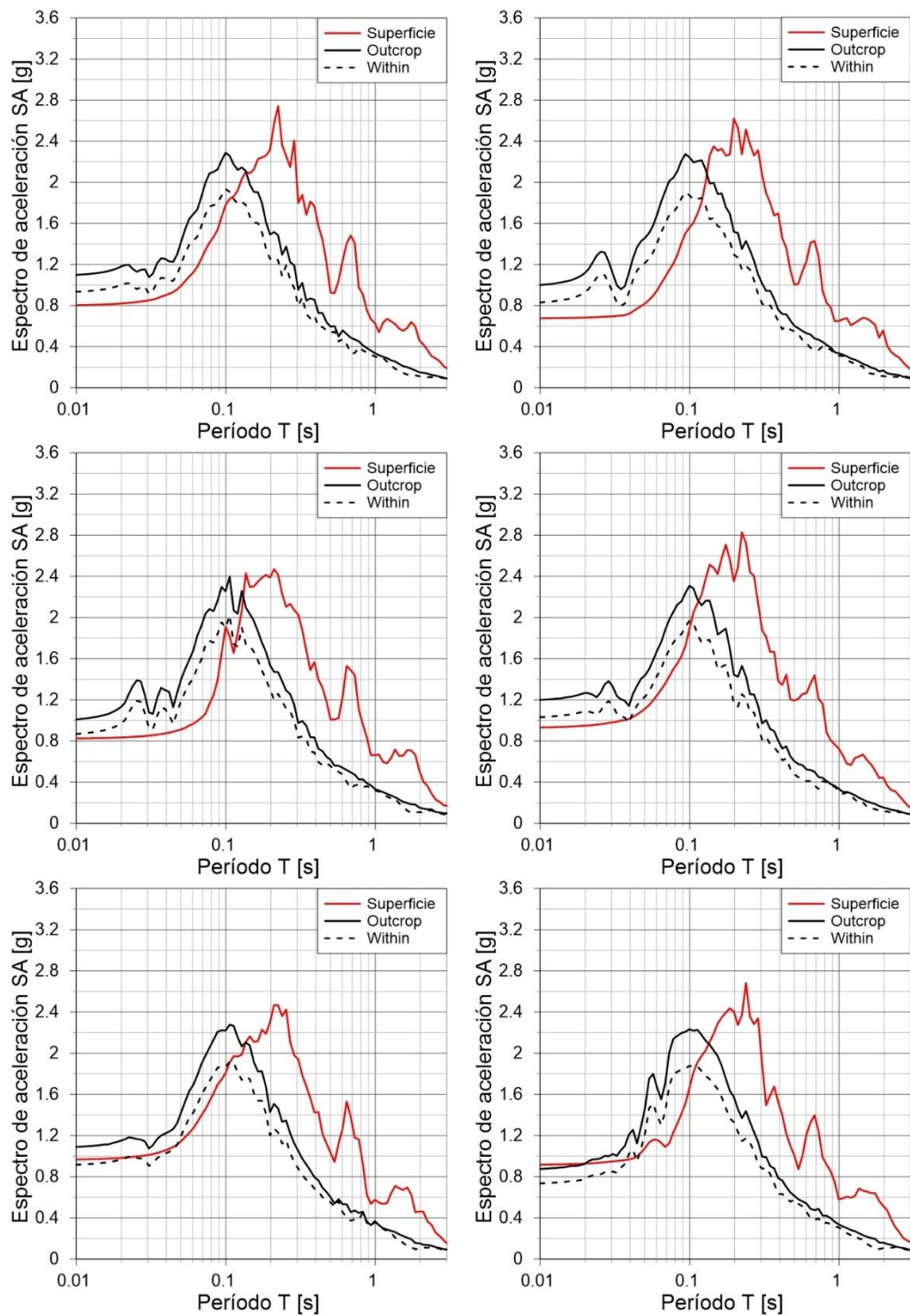


Figura 6.13 Espectros de propagación lineal con amortiguamiento del 5%, para semillas de sismo superficial. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el espectro probabilístico del sismo máximo creíble, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

6.4.2 Acelerogramas modificados

En el caso de los registros, tanto los producto de una semilla interplaca (Figura 6.14) como intraplaca (Figura 6.15) presentan formas acordes al sismo que representan, sin embargo, se observa que para los registros basados en semillas superficiales (Figura 6.16), se tienen “peaks” anormalmente altos, tal como el registro a propagar calculado en la sección 7.3.

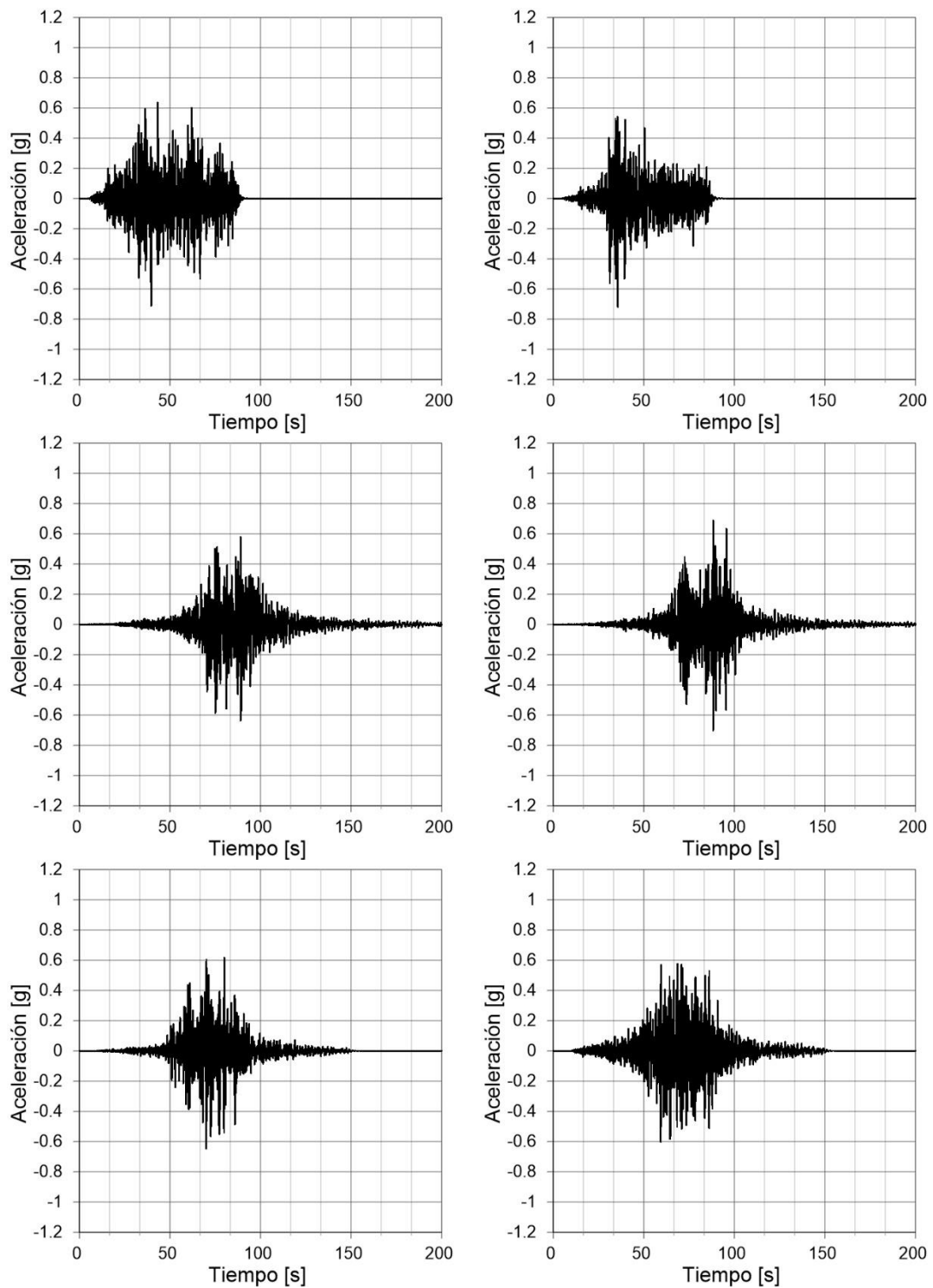


Figura 6.14 Registros producto de la propagación lineal con amortiguamiento del 5%, de los registros ajustados con un espectro objetivo probabilístico con el sismo máximo creíble, con semillas de sismo interplaca. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

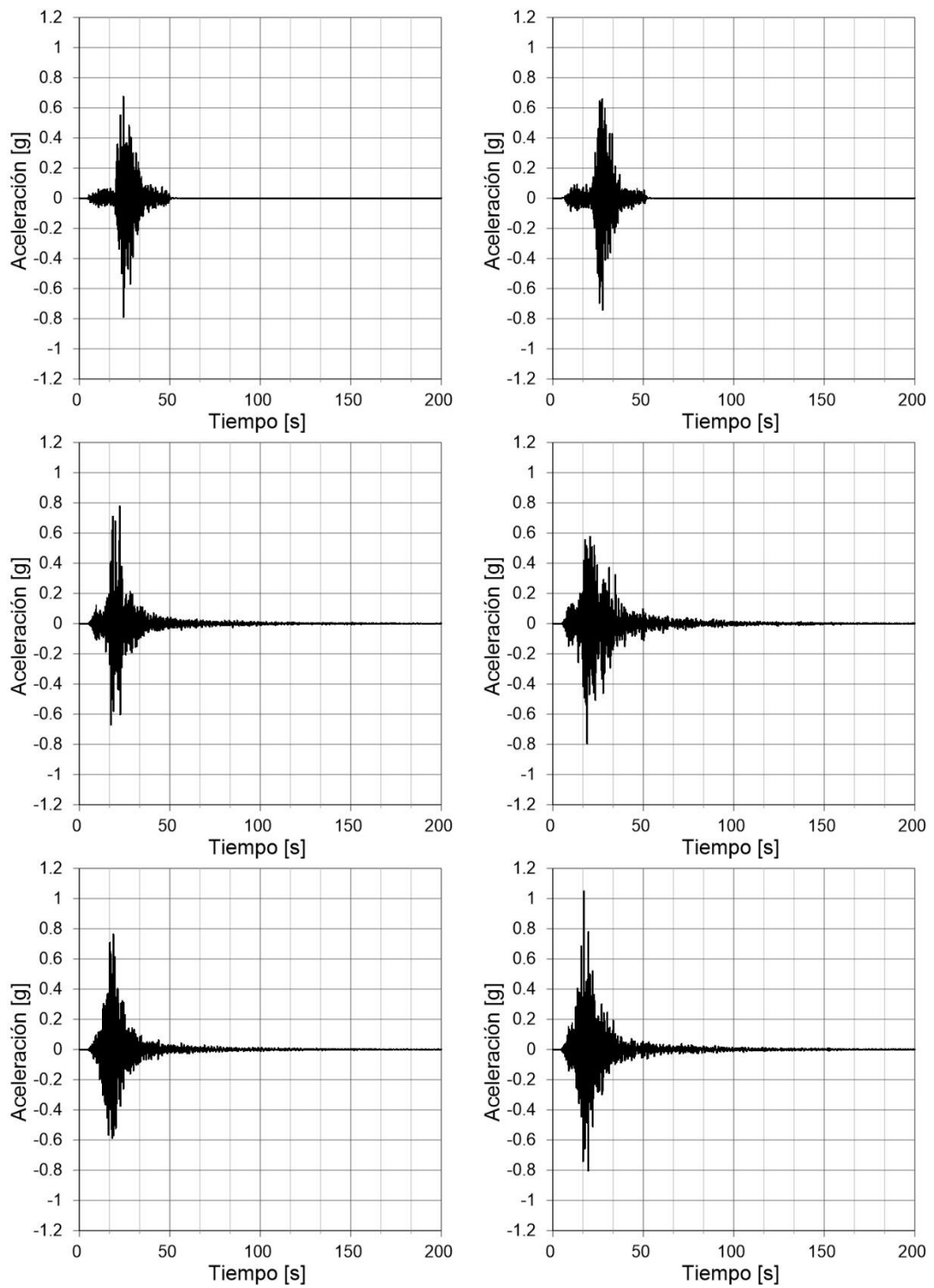


Figura 6.15 Registros producto de la propagación lineal con amortiguamiento del 5%, de los registros ajustados con un espectro objetivo probabilístico con el sismo máximo creíble, con semillas de sismo intraplaca. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

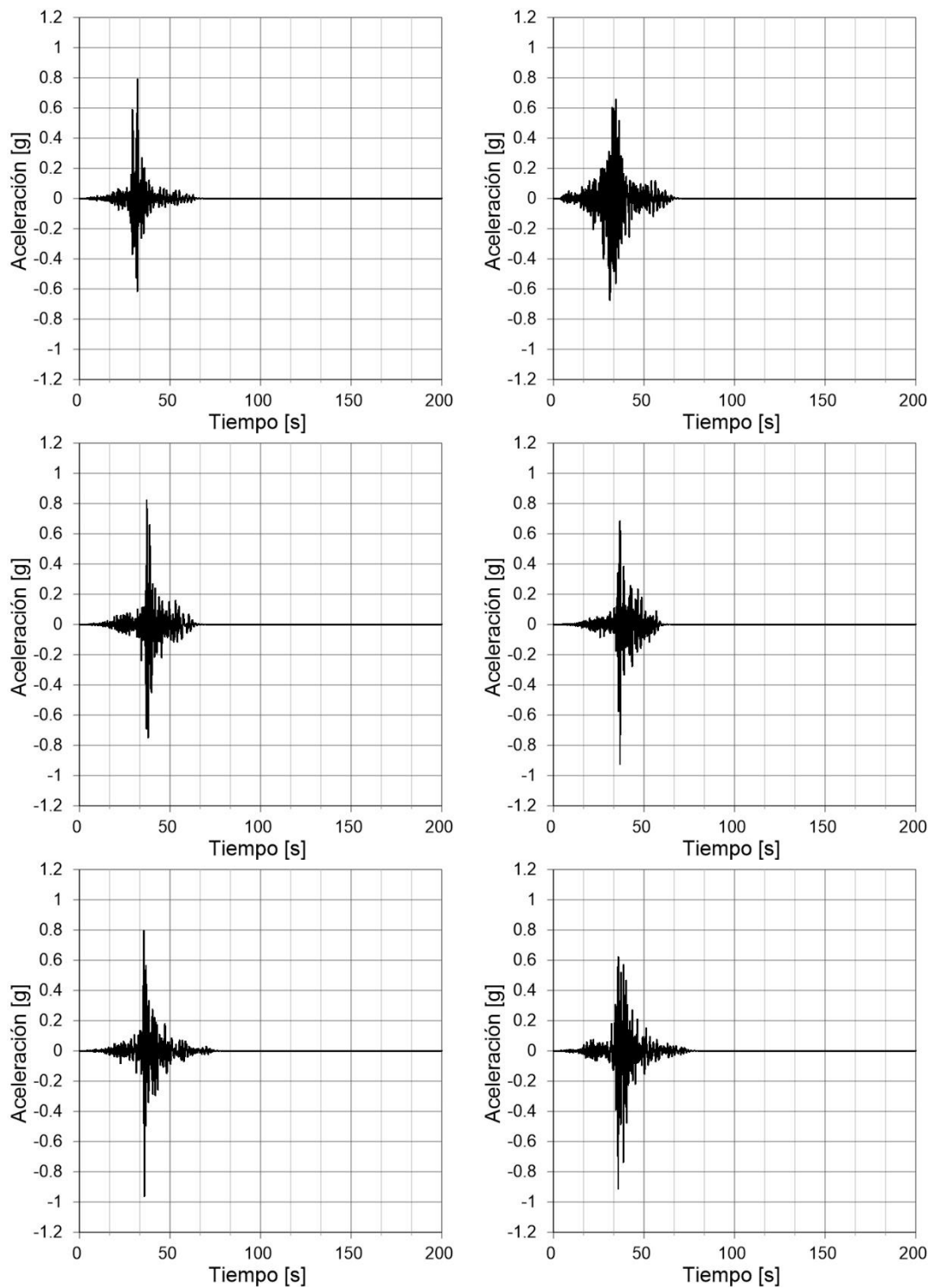


Figura 6.16 Registros producto de la propagación lineal con amortiguamiento del 5%, de los registros ajustados con un espectro objetivo probabilístico con el sismo máximo creíble, con semillas de sismo superficial. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

6.5 Espectro propuesto probabilístico

Los resultados de la metodología probabilística arrojan resultados similares a el caso más conservador del estudio determinístico (sismo de diseño intraplaca, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo).

Nuevamente se calcula la envolvente de todos los espectros propagados, de todos los registros semillas considerados. Posteriormente, se define una curva como espectro propuesto, en base a la envolvente, tal como se muestra a continuación (6.17).

$$S_a(g) = \begin{cases} 2.57 \cdot T + 0.12 & T \leq 0.15 \\ 2.83 & 0.15 < T \leq 0.4 \\ 1.17 \cdot T^{-0.96} & 0.4 < T \end{cases} \quad (6.1)$$

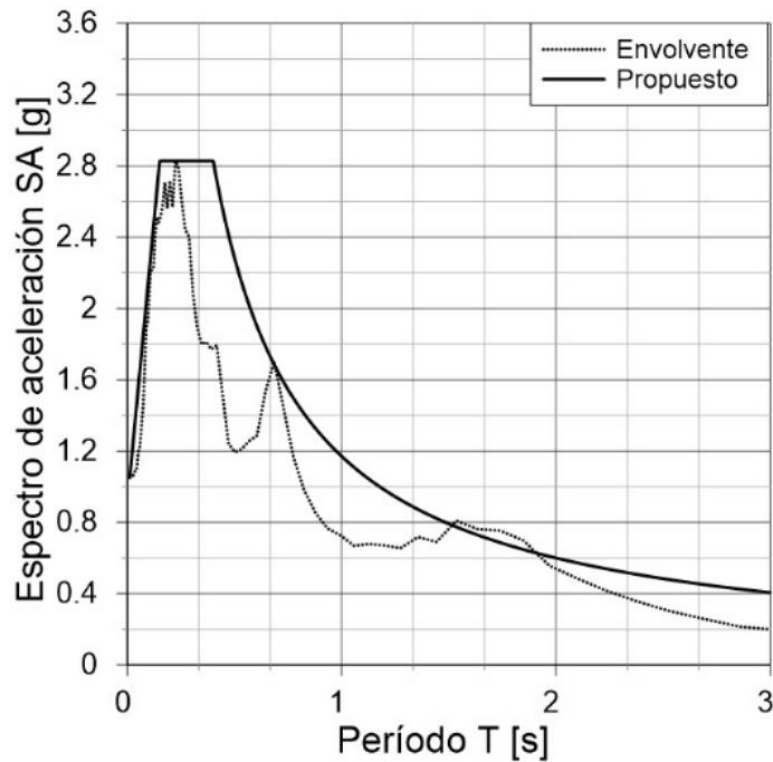


Figura 6.17 Espectro propuesto probabilístico, obtenido mediante un análisis lineal con amortiguamiento del 5%.

7 Mejoramiento de suelo

A continuación, se muestra el proceso y los resultados obtenidos al evaluar un posible mejoramiento de suelo en un perfil característicos de la región de Paine (Tabla 7.1), basado en los estudios de Grand (2019) ,reemplazando sus primeros 10 [m], con arena limpia de Ottawa, arena con un 3% de bentonita y arena con un 1% de laponita.

El capítulo inicia calibrando los parámetros del modelo PDMY02, implementado en “OpenSees”, para modelar de buena manera el desarrollo de presión de poros de los materiales en estudio, además de sus comportamientos esfuerzo-deformación, teniendo en cuenta que el modelo tiene como limitación la correcta modelación de la deformación, una vez alcanzada la licuación (Mercado et al. 2019).

Posteriormente se realiza una propagación no lineal con las consideraciones anteriores, y se analiza como varía la respuesta en superficie ante una sollicitación sísmica en los distintos casos en estudio.

Tabla 7.1 Perfil característico de la zona de estudio

Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1*	10	-
2	4	230
3	50	670

*Capa variable con los materiales a reemplazar

7.1 Calibración del modelo

Para ajustar los coeficientes del modelo PDMY02, se consideraron las características de los materiales expuestas en la Tabla 2.2. Debido a que solo es de interés, en este análisis, evaluar el principio hasta el principio de la licuación, se opta por dejar fijos los parámetros que actúan luego de que esta se produce.

En dicho contexto se considera $c_2 = 5$, $d_1 = 0.004$ y $Liq_1 = 1$, siguiendo las recomendaciones dadas por Yang, para arenas con baja densidad relativa (Yang, et al., 2008), dejando como parámetros a calibrar c_1 y c_3 .

Considerando un ensayo triaxial consolidado no drenado, para cada muestra en el estudio, se obtienen los valores para los parámetros calibrados del modelo que se indican en la Tabla 7.2

Tabla 7.2 Resultados de ajuste de parámetros c_1 y c_3

Tipo	c_1	c_3	Dr [%]
Arena limpia de Ottawa	0.26	25	31
Arena de Ottawa 3% bentonita	0.1	23	30
Arena de Ottawa 1% laponita	0.045	15	25

En la Figura 7.1 se muestra la deformación axial en el tiempo durante el ensayo. Con la calibración realizada, se observa que el modelo, en un inicio, representa de buena manera el comportamiento evidenciado en el laboratorio, hasta llegar al inicio de las grandes deformaciones. Esta es una limitación del modelo, además de que para el posterior análisis solo es de interés el comportamiento previo a la licuación.

Se observa que el modelo subestima las deformaciones medidas en el laboratorio para el caso de la arena limpia de Ottawa y para la arena con un 1% de laponita, mientras que las sobrestima ligeramente para el caso de arena con un 3% de bentonita. En los 3 casos se aprecia que la variación de la deformación axial es menor en el modelo que la medida en el laboratorio.

Para el desarrollo de la presión de poros, se obtuvo una calibración casi idéntica a los datos obtenidos en el laboratorio (Figura 7.2). Se observa que la arena limpia de Ottawa desarrolla presiones de poros considerablemente más rápido que con la presencia de finos. Por otro lado, se observa que la arena con un 1% de laponita desarrolla presiones de poros ligeramente más despacio que la arena con un 3% de bentonita.

Para el caso del esfuerzo de corte versus la deformación angular, el modelo no representa de manera precisa lo observado en el laboratorio al llegar a las grandes deformaciones, sin embargo, se mantiene dentro del mismo rango de magnitud (Figura 7.3).

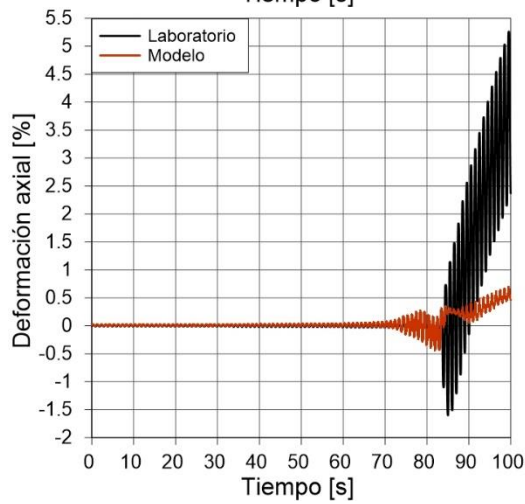
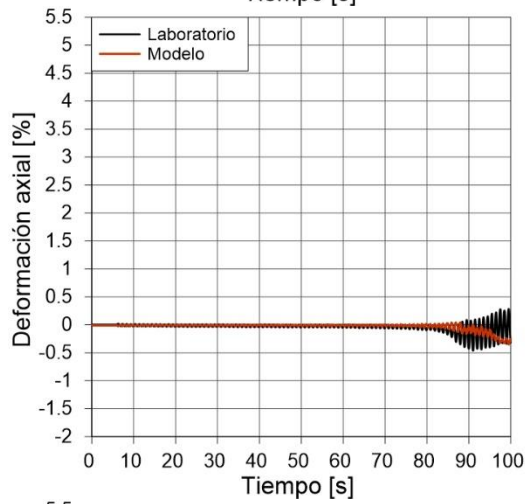
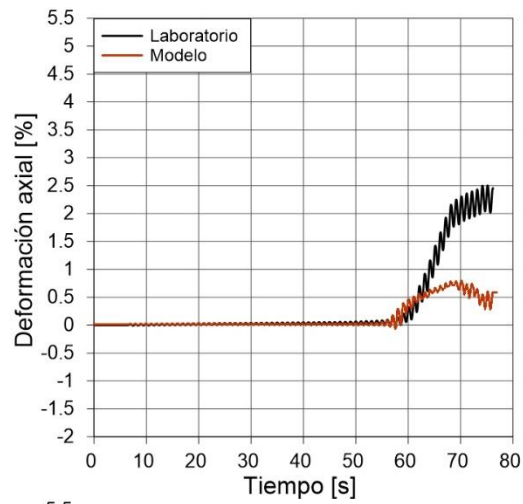


Figura 7.1 Ajuste modelo PDMY02, gráficos deformación axial en el tiempo. En orden descendiente, arena limpia de Ottawa, arena con 3% de bentonita y arena con 1% de laponita.

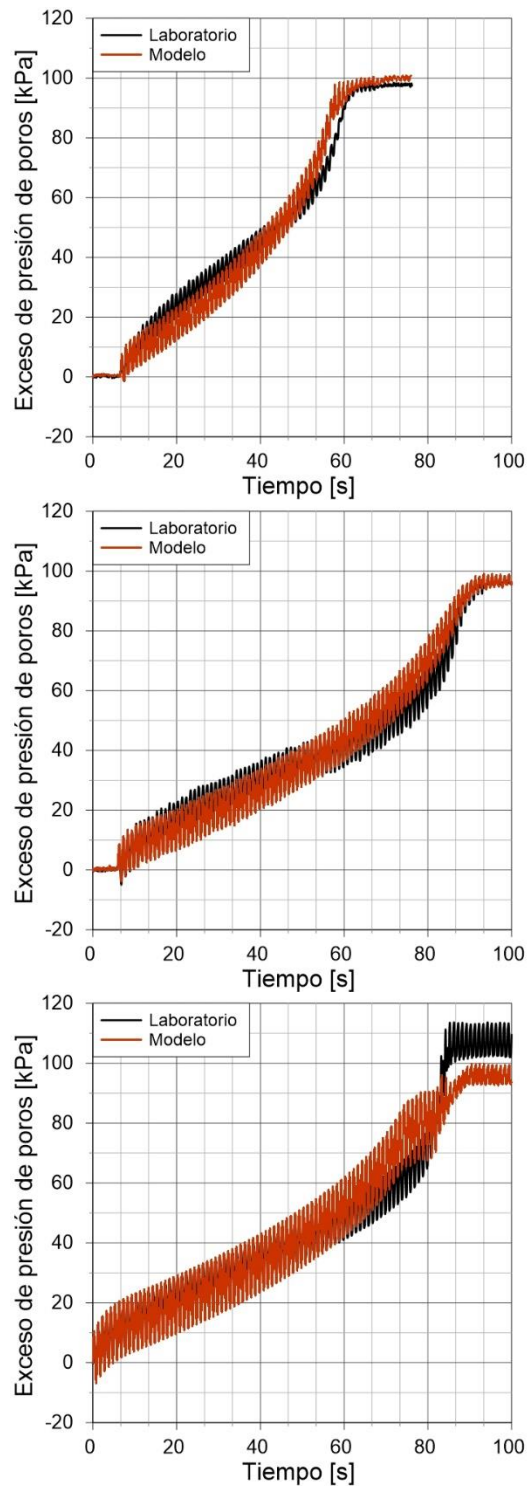


Figura 7.2 Ajuste modelo PDMY02, gráficos desarrollo de presión de poros. En orden descendiente, arena limpia de Ottawa, arena con 3% de bentonita y arena con 1% de laponita.

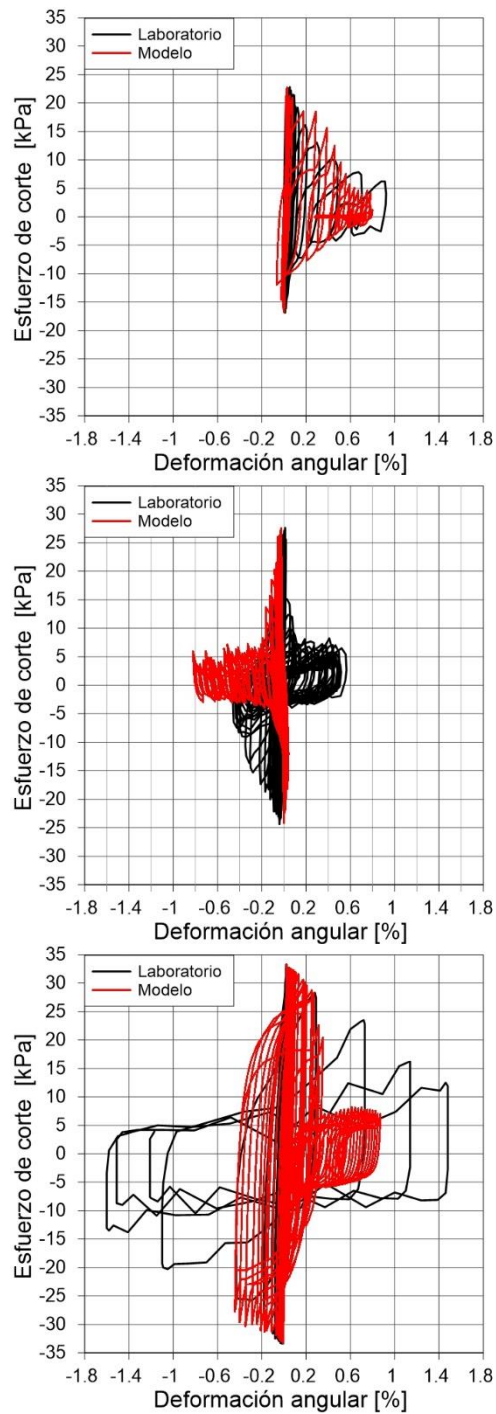


Figura 7.3 Ajuste modelo PDMY02, gráficos esfuerzo de corte vs deformación angular. En orden descendiente, arena limpia de Ottawa, arena con 3% de bentonita y arena con 1% de laponita. A la izquierda se muestran los datos de laboratorio, a la derecha los resultados del modelo.

7.2 Resultados Propagación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar una propagación unidimensional de ondas de corte, mediante un análisis no lineal en condiciones no drenadas, para el perfil expuesto en la Tabla 7.1, reemplazando los 10 [m] más superficiales por los materiales en estudio. El registro sísmico propagado para este estudio es el del Maule 2010, estación las tórtolas, orientación Norte-Sur (Figura 5.6)

7.2.1 Presión de poros

Normalizando la presión de poros por el esfuerzo vertical efectivo, se obtiene el parámetro "ru". Este parámetro toma el valor igual a la unidad cuando ocurre una licuación completa.

En la Figura 7.4 se tienen los resultados del desarrollo de presión de poros a distintas profundidades para los perfiles en estudio. Se observa que la laponita retarda de manera considerable la licuación, en comparación con la bentonita y la arena estudiada. Estos dos últimos materiales se comportan de manera bastante similar, apreciando en la arena una leve mayor rapidez en el desarrollo de presiones de poros.

A una profundidad de 8 [m], se observa que el perfil mejorado con Laponita no alcanza una licuación completa, a diferencia de los demás mejoramientos considerados.

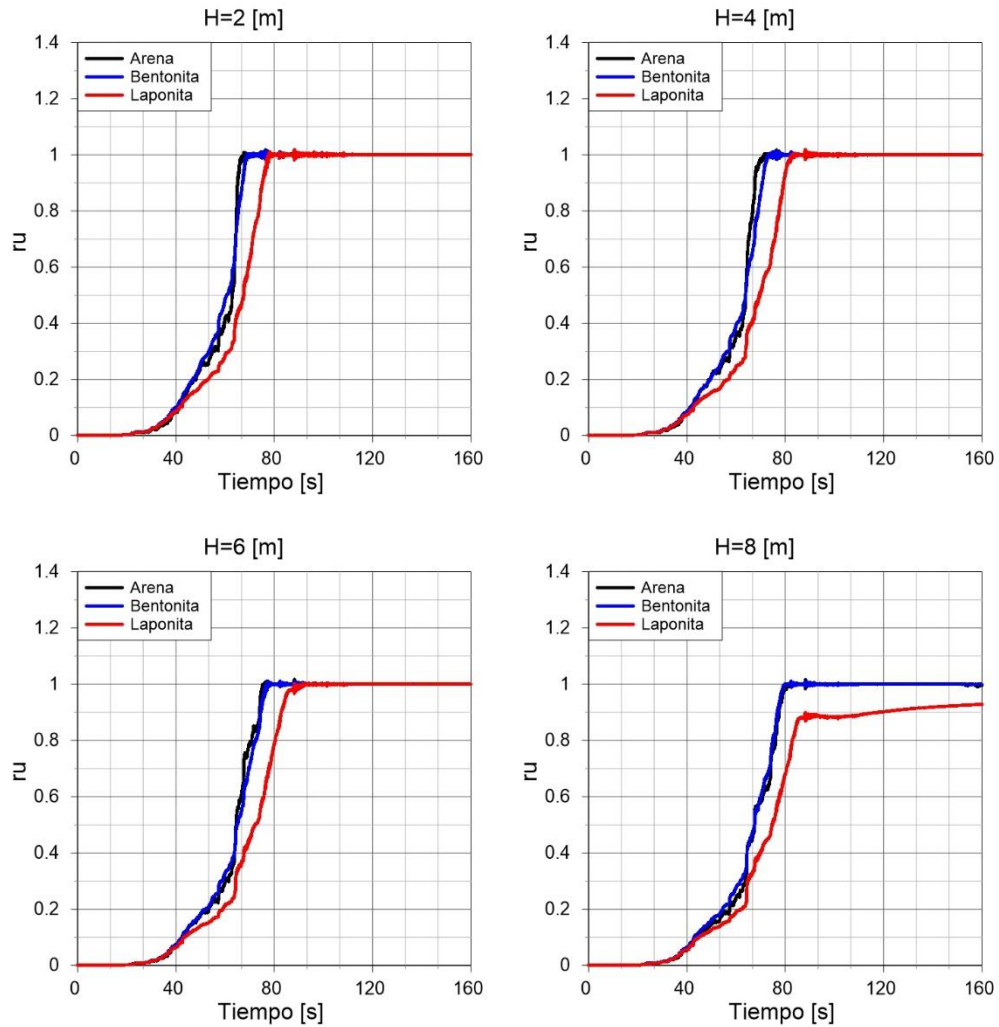


Figura 7.4 Presión de poros a distintas profundidades de izquierda a derecha y en orden descendente, profundidades de 2 [m], 4 [m], 6 [m] y 8 [m].

7.2.2 Aceleración superficial

En la Figura 7.5 se observan las aceleraciones superficiales para los distintos mejoramientos estudiados. En los tres casos en estudio, se observa un comportamiento inicial casi idéntico, luego, cerca de los 64 [s], tanto la arena como la bentonita comienzan a licuar, con lo que dejan de transmitir de buena manera la aceleración. Lo mismo ocurre con la laponita, pero desde los 80 [s].

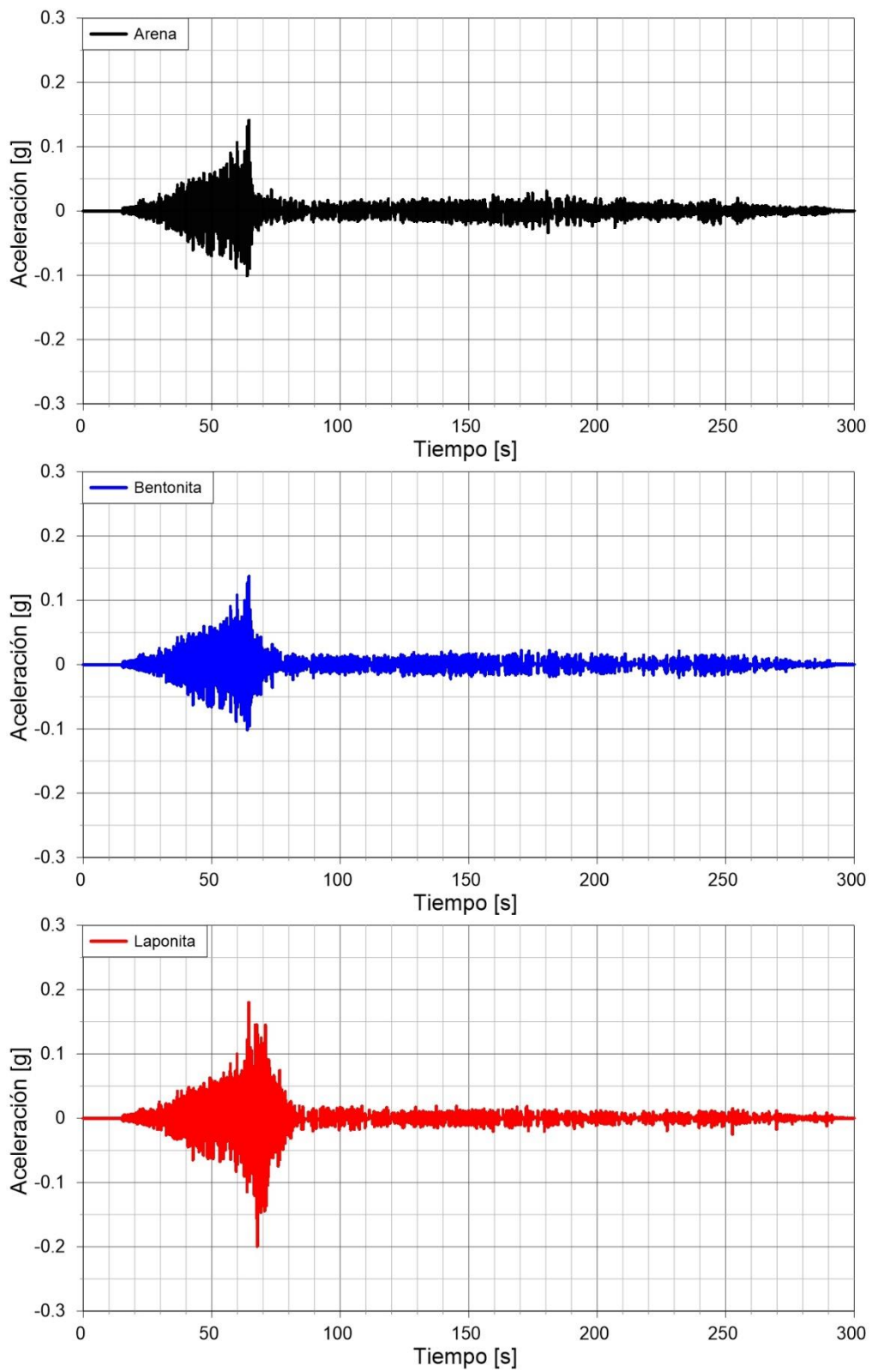


Figura 7.5 Aceleración superficial para los distintos perfiles en estudio.

7.2.3 Deformación angular

En la Figura 7.6 se tiene la deformación angular versus el esfuerzo de corte, en distintas profundidades para los casos en estudio. En general, los tres materiales analizados se comportan de manera similar, alcanzo niveles de deformación similar, en donde la laponita suele alcanzar valores ligeramente más altos que el resto.

Cabe destacar que una de las limitaciones del modelo son los niveles de deformación luego de la licuación, por lo que los siguientes resultados no son confiables al mirar grandes deformaciones.

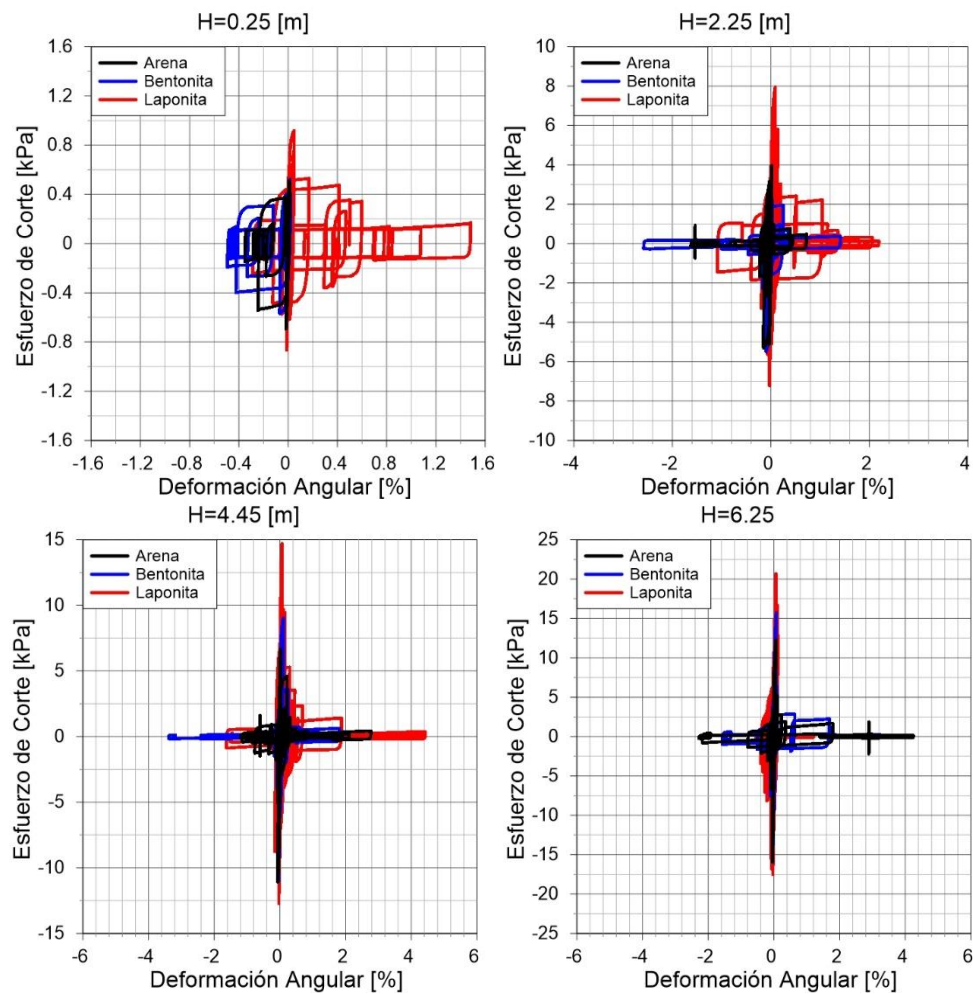


Figura 7.6 Esfuerzo de corte vs deformación angular para distintas profundidades.

8 Discusión y Recomendaciones

8.1 Observaciones relativas al riesgo sísmico

Respecto a las GMPE consideradas, estas presentan discrepancias considerables entre ellas, al evaluar el mismo sismo de diseño. Esta diferencia es aún mayor al considerar el promedio más una desviación estándar en la construcción del espectro de aceleraciones.

Montalva et al. (2017) e Idini et al. (2017), si bien se comportan de manera similar para sismos interplaca, para el caso de sismos intraplaca, se observa que el PGA en roca alcanzado por la curva de Idini et al. (2017) es el doble que el alcanzado por Montalva et al. (2017). También se observa esta discrepancia entre las curvas de Idriss (2014) y la de Graizer & Kalkan (2013), en donde las curvas de Idriss (2014) predice menores aceleraciones en su espectro para todos los períodos evaluados.

Esta discrepancia es el motivo por el que se recomienda desarrollar los espectros de aceleraciones, para cada sismo de diseño, mediante el promedio de las GMPE utilizadas, independiente si se considera la media o la media más una desviación estándar.

Al considerar una desviación estándar en la GMPE para la construcción de un espectro, se obtienen aceleraciones muy elevadas, que superan bastante a los espectros de semillas de características similares, lo que genera espectros de respuesta conservadores, en especial para períodos bajos (inferiores a 1 [s]). De requerir un resultado acorde a lo normalmente observado como respuesta tras un sismo, se recomienda considerar el valor promedio entregado por la GMPE en la construcción del espectro objetivo.

Por otro lado, en cuanto a las semillas, es difícil encontrar registros representativos para sismos intraplaca y sismos superficiales. Si bien, se tienen numerosos acelerogramas para sismos de gran magnitud (similares a los sismos de diseño), rara vez estos son medidos en una estación sobre el suelo de interés en el estudio y a distancias adecuadas. Por esta razón, para este estudio, se emplearon registros semillas no idóneas, que se debieron modificar en gran medida para la construcción del espectro modificado. Mientras mayor sea la modificación al registro semilla, se obtienen registros con mayores peaks aislados, que discrepan del resto de las aceleraciones medidas en el acelerograma. Este efecto se ve claramente para el caso de “spectral matching” entre el espectro de amenaza uniforme y semillas universales, disponible en los anexos. Para futuros estudios de amenaza sísmica que requieran el uso de “spectral matching”, se recomienda evaluar la posibilidad de trabajar con registros semilla sintéticos generados a partir de la modelación de la fuente y su propagación.

La técnica de “spectral matching” empleada en este estudio, entrega espectros modificados muy similares a los espectros objetivo. Si existe una gran discrepancia entre espectros, descuida la forma de los registros espectro-compatibles. Por lo tanto, la metodología de spectral matching que ha sido utilizada se recomienda solo en el caso cuando los registros semillas tienen un espectro semejando al espectro objetivo.

En cuanto a la metodología de análisis lineal, esta entrega grandes aceleraciones en superficie, amplificando en la mayor parte de los períodos en estudio. Para el caso en estudio, controla el sismo de diseño intraplaca para la mayoría de los periodos. Al

incrementarse el periodo de análisis, a cerca de 1 [s], los espectros producto de los tres sismos de diseño presentan valores de aceleraciones similares.

Por otro lado, al considerar un análisis lineal equivalente en la propagación unidimensional de ondas de corte, se observan espectros bajos, en contraste con los resultantes de un análisis lineal. Esto se debe a que, al considerar sismos de diseño de gran envergadura para el espectro objetivo obtenido del valor medio de la GMPE más una desviación estándar, se obtienen registros espectro compatibles con grandes aceleraciones, lo que genera deformaciones angulares de corte altas (mayores al 0.1 %, llegando incluso al 1% en sus máximos).

Estas elevadas deformaciones angulares generan amortiguamientos de hasta un 16% (Figura 5.47), lo que genera altas desamplificaciones para periodos bajos observadas en los espectros generados por el análisis lineal equivalente. La razón de amortiguamiento es, en promedio, mayor mientras mayor sea la sollicitación, como se observa en la Figura 5.47, en donde la curva de amortiguamiento en función de la profundidad para el caso intraplaca alcanza valores superiores que el resto de los casos, debido a que el espectro semilla es mayor. Este efecto provoca que los espectros propagados en superficie, para todos los sismos de diseño, presenten valores de aceleraciones similares (Figura 5.37 a 5.39).

Por lo anteriormente expuesto se recomienda emplear un análisis lineal considerando un amortiguamiento representativo con lo observado en la realidad (alrededor del 5%), por sobre un análisis lineal equivalente al trabajar con grandes sollicitaciones. Sin embargo, si se trabajan con sollicitaciones más bajas, que generen deformaciones angulares que se encuentren en rangos más pequeños, se podría utilizar de buena manera un análisis lineal equivalente.

En cuanto al estudio de amenaza sísmica con enfoque probabilístico, para la construcción del espectro de amenaza uniforme, se tiene una dependencia entre la regionalización empleada, la GMPE y el catálogo sísmico. El catálogo sísmico empleado en la zona se encuentra incompleto para sismos de grandes magnitudes, siendo el más alto el terremoto de Algarrobo de 1985 (Mw 8.0). Esto produce que el espectro de amenaza uniforme presente aceleraciones más bajas que el mismo estudio realizado en una zona similar con el catálogo sísmico completo.

Por otro lado, se observa que los resultados obtenidos considerando la regionalización de Susa (2004), son mayores a los obtenidos mediante la regionalización de Poulos (2019), para la zona en estudio. Esta discrepancia aumenta junto con el periodo de retorno, yendo desde un 18% para un período de retorno de 72 años a un 33% para un período de retorno de 949 años. Lo anterior puede explicarse con el hecho de que, al aumentar la zona del catálogo, se tiene un menor peso de los eventos cercanos en la metodología probabilística, lo que reduciría los espectros.

En cuanto a la GMPE considerada, se observa que los resultados obtenidos mediante Montalva et al. (2017) son ligeramente mayores a los obtenidos por Idini et al. (2017). Al igual que en el caso anterior, la discrepancia aumenta junto con el periodo de retorno, pero en menor medida, va desde un 8% para un período de retorno de 72 años a un 14% para un período de retorno de 949 años.

El espectro de amenaza uniforme resultante para el sismo máximo creíble en el caso más conservador, esto es regionalización de Poulos (2019) y GMPE de Montalva et al. (2017), resulta similar a los obtenidos mediante el caso más conservador del enfoque determinístico, esto es sismo de diseño intraplaca, espectro objetivo considerando el promedio más la desviación estándar de las GMPE. Este resultado concuerda con el hecho que en el estudio determinístico se impone un sismo máximo creíble basado en eventos históricos.

La metodología expuesta en el presente documento requiere un registro semilla de características similares al sismo de diseño que genera un espectro objetivo. En el caso del estudio de amenaza sísmica con enfoque probabilístico, al construir el espectro de amenaza uniforme, este se basa en toda la información disponible en un catálogo, y no en un sismo en particular, por esta razón, tiene la limitación de no poder elegir de forma adecuada un registro semilla. Para abordar el problema anterior, se optó por utilizar todos los registros semillas disponibles en el estudio de amenaza sísmica con enfoque determinístico.

Como resultado de lo anterior, se obtuvieron registro espectro compatibles, para el caso de sismo de diseño interplaca (Figura 6.11) y sismo de diseño superficial (Figura 6.13), con peaks aislados altos respecto al resto del registro y con formas no representativas de sus semillas base. Este efecto no se aprecia para el caso de sismo de diseño intraplaca (Figura 6.12), debido a que el espectro de amenaza uniforme se asemeja al espectro objetivo, resultante de considerar la desviación estándar, para el sismo de diseño intraplaca. Por lo que se requirió una menor modificación del registro semilla para llegar al registro modificado.

Otra limitante del método es que las regionalizaciones consideradas no toman en cuenta la fuente sísmica superficial, ya que dividen el país en base a sismos interplaca e intraplaca, por lo tanto, no se estaría siendo riguroso con en este aspecto.

Comparando los resultados de la propagación de ambos enfoques de análisis, se obtiene que el enfoque determinístico, considerando la desviación estándar en la construcción del espectro objetivo, controla por sobre el probabilístico, hasta un período cercano a 0.3 [s]. Para períodos mayores las aceleraciones obtenidas, mediante ambos enfoques, son similares.

Esto concuerda con el hecho de que el estudio de amenaza sísmica bajo un enfoque probabilístico, se define un período de retorno para un sismo máximo creíble. Este sismo no se encuentre en el catálogo, ya que este está incompleto para la zona, generando espectros de aceleraciones menores a lo esperado. En cambio, el estudio de amenaza sísmica con enfoque determinístico define un sismo máximo creíble en base a hechos históricos. Por lo tanto, que controle el estudio determinístico sobre el probabilístico depende fuertemente del catálogo sísmico disponible.

Como sugerencias a futuros trabajos relacionados, se recomienda evaluar hasta qué punto es recomendable emplear un análisis lineal equivalente, de manera que no genere altas desamplificaciones. Por otro lado, para el caso de espectros semillas se recomienda evaluar el uso de semillas sintéticas. Finalmente, para el estudio probabilístico, sería de interés realizar el análisis dividiendo las fuentes sísmicas, creando un espectro de amenaza uniforme para cada tipo de sismo que afecte la zona en estudio.

8.2 Observaciones sobre uso de laponita en la respuesta de sitio

Por otro lado, en cuanto a la calibración de los parámetros del modelo PDMY02, se obtuvieron resultados casi idénticos a los ensayos de laboratorio para el caso de desarrollo de presión de poros, en donde la arena de Ottawa las desarrolla más rápido, y la laponita (1%) las desarrolla más lento.

En cuanto a las deformaciones, el modelo simula de buena manera los datos del laboratorio hasta el inicio de la licuación, en el momento que los excesos de presiones de poros se desarrollan al 100%, desde donde subestima las grandes deformaciones desarrolladas para todos los materiales en estudio.

Como recomendación a futuros trabajos, sería interesante considerar un mayor número de ensayos por material, a densidades relativas similares, de manera de calibrar los parámetros del modelo de forma más confiable, considerando variaciones.

Al propagar en el perfil característico de la zona, los tres materiales presentan un registro de aceleración superficial casi idéntico previo a la licuación. Luego de que esta se produce, sucede un “corte” en el registro, por lo que la laponita, al licuar más tarde, presenta un “peak” mayor.

En cuanto a las deformaciones, los materiales presentan niveles similares de deformación, teniendo en cuenta que el modelo es confiable, en cuanto a estas, solamente hasta el inicio de la licuación, no modela de buena manera el comportamiento a niveles altos de deformación.

Finalmente se observa un retardo en el desarrollo de presión de poros por parte de la laponita, tardándose un 16% más en alcanzar una licuación completa en comparación con la arena de Ottawa o la bentonita. Estos dos últimos materiales se comportan de manera muy similar, en donde la bentonita presenta una menor tasa de desarrollo de presión de poros.

9 Conclusiones

Se realizó un estudio de amenaza sísmica considerando ambas metodologías (determinística y probabilística) para el puente Águila Norte. Para su desarrollo fue necesario la aplicación de diversas curvas de atenuación de movimiento fuerte, estudios para determinar la estratigrafía de la zona, registros semillas en los que basar el análisis, además de un catálogo sísmico para el caso de la metodología probabilística.

En cuanto al estudio determinístico, al considerar la desviación estándar en la construcción de espectros objetivo, se obtienen resultados mucho más conservadores, pero elevados respecto a los registros medidos durante sismos históricos. Este efecto es mayor al evaluar bajos períodos, menores a 1 [s]. Al considerar el valor promedio entregado por las curvas de predicción de movimiento fuerte para la construcción del espectro objetivo, se obtienen resultados similares a los medidos en la realidad.

Respecto a la técnica de “spectral matching” empleada, esta entrega espectros modificados muy similares a los espectros objetivo. Se debe elegir una correcta semilla para obtener registros con buena forma, sin elevados peaks aislados. Una correcta semilla respeta el tipo, distancia y magnitud del sismo, además de otros parámetros como similitud de su forma espectral con el objetivo.

Al considerar un análisis lineal equivalente, se observan fuertes desamplificaciones, en contraste con los resultantes de un análisis lineal. Esto se debe a las grandes deformaciones (llegando incluso al 1%) que producen los sismos de diseño, que a su vez conllevan a grandes razones de amortiguamiento, superando el 10%, y en el caso de estudio llegando a un máximo del 16%.

Finalmente, respecto al estudio determinístico, se concluye que la metodología de análisis que mejor se adapta a la realidad de entre las propuestas es un análisis lineal con una razón de amortiguamiento constante del 5%, en vez de los grandes amortiguamientos presentados por el análisis lineal equivalente, que generan grandes desamplificaciones en su espectro respuesta.

Para el caso de estudio, en la metodología determinística controla el sismo de diseño intraplaca, debido a que las curvas de predicción de movimiento fuerte predicen un mayor espectro de aceleraciones para este tipo de sismos, sobre las demás fuentes sísmicas analizadas. Este efecto se aprecia con claridad para bajos períodos. Al aumentar el período de análisis (mayores a 1 [s]), los tres sismos de diseño convergen a resultados similares.

En cuanto al estudio probabilístico, se observa una fuerte dependencia respecto al catálogo sísmico, la ecuación de predicción de movimiento fuerte y la zonificación a considerada. Respecto al catálogo usado en este estudio, este se encuentra incompleto, por lo que los espectros resultantes son menores a los esperados.

Los resultados obtenidos considerando la regionalización de Susa (2004), son mayores a los obtenidos mediante la regionalización de Poulos (2019), para la zona en estudio, esta discrepancia aumenta con el periodo analizado, yendo desde un 18% a un 33% para los periodos de retorno analizados. En cuanto a la GMPE considerada, se observa que los resultados obtenidos mediante Montalva et al. (2017) son mayores a los obtenidos

por Idini et al. (2017). Al igual que en el caso anterior, la discrepancia aumenta junto con el periodo de retorno.

Comparando los resultados obtenidos de la metodología determinística y probabilística, se obtiene que el enfoque determinístico, considerando una desviación estándar en la construcción del espectro objetivo, controla por sobre el probabilístico, para bajos períodos (hasta aproximadamente 0.3 [s]). Para períodos mayores las aceleraciones obtenidas, mediante ambos enfoques, son convergen a resultados similares.

Por otro lado, en cuanto a la calibración de los parámetros del modelo PDMY02, se obtuvieron resultados similares a los ensayos de laboratorio, con la limitante de la deformación, que, una vez alcanzada la licuación, el modelo subestima a los resultados medidos en el laboratorio. Respecto a la presión de poros, se observa que la arena de Ottawa las desarrolla más rápido, y la laponita (1%) las desarrolla más lento.

Finalmente, respecto a la propagación unidimensional de ondas de corte, se observa un retardo en el desarrollo de presión de poros por parte de la laponita, presentando un tiempo un 16% mayor en alcanzar una licuación completa en comparación con la arena de Ottawa o la bentonita.

10 Bibliografía

Abrahamson, N., Gregor, N. & Addo, K., 2016. BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthq. Spectra*, 32(1), p. 23–44.

Adekristi, A., 2013. Algorithm for spectral matching of earthquake ground motions using wavelets and Broyden updating.

Adekristi, A. & Eatherton, M. R., 2015. Time-domain spectral matching of earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, Volumen 20:5, pp. 679-698.

Aditya, P. & Anbazhagan, P., 2015. Selection of modulus and damping curves for site response study. Chennai, India.

Ammirati, J., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahaml, R., Bertrand, P., Leyton, F., Ruiz, S., 2019. The crustal seismicity of the western Andean thrust (central Chile, 33-34°S).

Baker, J. W., 2008. *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*.

Bastías, N. & Montalva, G., 2016. Chile Strong Ground Motion Flatfile. *Earthq. Spectra*, 32(4), p. 2549–2566.

Casagrande, A., 1975. Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands: A Critical Review. 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina.

Centro Sismológico Nacional (CSN), 2016. Tipos de Sismos en Chile. [En línea]. Disponible en <https://www.csn.uchile.cl/tipos-de-sismos-chile/>.

Contreras Oyarzún, J. M., 2012. Estudio de los efectos del terremoto del 27 de febrero de 2010 en la zona de las comunas de Buin y Paine de la región Metropolitana, Universidad de Chile: Tesis para optar al título de ingeniero civil.

El Mohtar, C., 2008. Pore Fluid Engineering: An Autoadaptive Design for Liquefaction Mitigation, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.: PhD dissertation, School of Civil Engineering.

Faccioli, E., 1991. Seismic amplification in the presence of geological and topographical irregularities. In *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (1991: March 11-15; St. Louis, Missouri)*. Missouri S&T (formerly the University of Missouri--Rolla).

González, F., Maksymowicz, A., Díaz, D., Villegas, L., Leiva, M., Blanco, B., Vera, E., Contreras, S., Cabrera, D., Bonvalot, S., 2018. Characterization of the depocenters and the basement structure, below the central Chile Andean Forearc: A 3D geophysical modelling in Santiago Basin area.

González, V., 2015. Puentes afectados por licuefacción del terreno de fundación debido al terremoto 27f. Memoria para optar al título de ingeniera civil.

Graizer, V. & Kalkan, E., 2015. Earthquakes, Update of the Graizer-Kalkan Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal Continental. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey ed. Open-File Report 2015–1009.

- Graizer, V., Kalkan, E. & Lin, K.-W., 2013. Global Ground Motion Prediction Equation for Shallow Crustal Regions. *Sage Journals*, 29 (3), pp. 777-791.
- Grand, J., 2019. Estudio de la interacción suelo-estructura de un puente carretero de Chile central, considerando los efectos de sitio. Memoria para optar al título de ingeniero civil.
- Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Groholski, D., Phillips, C., Park, D., 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual.
- Idini, B., 2016. Curvas de atenuación para terremotos intraplaca e interplaca en la zona de subducción chilena. Tesis para optar al grado de magíster en ingeniería, mención ingeniería sísmica. Memoria para optar al título de ingeniero civil.
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. et al. Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bull Earthquake Eng* 15, 1853–1880 (2017).
- Idriss, M., 2014. An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra* 30(3):1155-1177
- Ishihara, K., 1996. Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford, Clarendon Press.
- Iwasaki, T. & Tatsuoka, F., 1997. Effects of grain size and grading. *Soils Found*, 17(3), p. 19–35.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. & Takagi, Y., 1978. Shear modulus of sands under torsional shear loading. *Soils and Foundations*, 18(1), pp. 39-56.
- Khazaradze, G. & Klotz, J., 2003. Short and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the South-Central Andes. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, Volumen 108
- Kramer, S. L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, N.J. ed. Prentice Hall.
- Kroon, M. a. V. W. L. a. W. G. H., 1998. Structure and formation of a gel of colloidal disks. *Phys. Rev. E*, 57(2), pp. 1962--1970.
- Lermo, J. & Chávez-García, F., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5), pp. 1574-1594.
- Leyton, F., Ruiz, S. & Sepúlveda, S. A., 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), pp. 455-472.
- Matasovic, N. & Vucetic, M., 1994. Cyclic characterization of liquefiable sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(11), pp. 1805-1822.
- Mercado, V., El-Sekelly, W., Sepúlveda, A., 2019. LEAP 2020 Simulation Exercise – Phase I: Model Calibration, Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.
- Mercado, V., Ochoa F., Astroza, R., Waleed E., Tarek, A., Pastén, C. Hernández, F., 2019. Uncertainty quantification and propagation in the modeling of liquefiable. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volumen 123, pp. 217-229.
- Milovich, J., 2000. Estudio geológico ambiental para el ordenamiento territorial de la mitad sur de la cuenca de Santiago, Universidad de Concepción.

Ministerio de Obras Públicas. Manual De Carreteras volumen no3., (2018).

Montalva, G. A., Bastías, N. & Rodriguez-Marek, A., 2017. Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. Bulletin of the Seismological Society of America, Volumen 107(2), pp. 901-911.

Montalva, G., Bastías, N. & Rodriguez-Marek, A., 2017. Erratum to Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. Bulletin of the Seismological Society of America, Volumen 107(5), pp. 2541.

Núñez, I., Boroschek, R., Comte, D., Contreras, V., 2015. Nuevo peligro sísmico para Chile.

Ochoa, F., 2015. Cyclic behavior of sands with superplastic fines, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.: PhD dissertation, School of Civil Engineering.

Ochoa, F., Bobet, A., Johnston, C., Santagata, M., V.Sinfield, J..2019. Dynamic properties of a sand–nanoclay composite. Géotechnique., pp. 70. 1-54.

Pastén, C., 2007. Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería geotécnica. memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile.

Pastén, C., Lezana, F., Leyton, F. & Ruiz, S., 2015. Razones espectrales H/V de una red temporal de estaciones sismológicas en la cuenca de Santiago. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica.

Pérez, A., Ruiz, J., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., Campos, J., 2014. Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. Natural Hazards, 71(1), pp. 243-274.

Pinto, L., 2016. Determinación de efectos de sitio en las estaciones sismológicas de la región de Tarapacá. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137966>

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N. & de la Llera, J. C., 2019. An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. Bulletin of the Seismological Society of America, 109(1), p. 66–74.

Prevost, J. H., 1985. A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 4(1), pp. 9-17.

Rollins K., Evans M., Diehl N., Daily W., 1998. Shear modulus and damping relationships for gravels. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 396-405.

Scholz, G., 2002. The Mechanics of Earthquake and Faulting. Cambridge: Cambridge University Press: 300-329.

Scordilis, E., 2006. Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. Journal of Seismology, Volumen 10, p. 225–236.

Seed, H., Romo, M., Sun, A., Lysmer, J., Lysmer, Jaime., & 1987. Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of Sept. 19, 1985. Engineering Research Center, College of Engineering, University of California; Springfield.

Seed, H. & Idriss, I., 1969. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1969, Vol. 95, Issue 1, Pg. 99-137

Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, p. 40.

Sepúlveda, S. A. y otros, 2008. New findings on the 1958 Las Melosas earthquake sequence New findings on the 1958 Las Melosas earthquake sequence, central Chile: implications for seismic hazard related to shallow crustal earthquakes in subduction zones. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(3), pp. 432-455.

Susa, D., 2004. Evaluación del peligro sísmico asociado a sismos de tipo interplaca en Chile y sur del Perú utilizando una distribución bi-paramétrica de Weibull. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Vargas, G. & Rebolledo, S., 2015. La Falla San Ramón y el peligro sísmico de Santiago: Nuevos antecedentes morfoestratigráficos e implicancias normativas. Congreso Geológico Chileno.

Verdugo, R., González, J., V., G. & Torres, A., 2012. Características y efectos del fenómeno de licuefacción. Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile 27 de febrero 2010. capítulo 3, 63-105.

Vucetic, M. & Dobry, R., 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volumen 117 (1), p. 89 –107.

Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational Model for Cyclic Mobility and Associated Shear Deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119–1127.

Yang, Z., Lu, J., Elgamal & Ahmed, 2008. OpenSees Soil Models and Solid-Fluid Fully Coupled Elements User's Manual. Ver 1.0 ed. University of California, San Diego Department of Structural Engineering.

Youd, T., 1975. Discussion of "Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan" by E. Kuribayashi and Tatsuoka. *Soils and Foundations* 15 and *Soils and Foundations*, Volumen 17, pp. 81–92, 82–85.

11 Anexos

11.1 Coeficientes utilizados en la GMPE de Montalva et al. (2017)

A continuación, se muestran los coeficientes resultantes de la regresión de la GMPE de Montalva et al. (2017).

Tabla 11.1 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017)

Período [s]	θ_1	θ_4	θ_5	θ_2	θ_3	θ_6	θ_{14}
0	5.875	0.803	-0.335	-1.754	0.131	0.000	-0.731
0.02	5.976	0.841	-0.281	-1.770	0.122	0.000	-0.739
0.05	7.453	1.031	-0.040	-2.033	0.083	0.000	-0.698
0.075	8.048	1.034	-0.013	-2.106	0.080	0.000	-0.653
0.1	7.761	1.076	0.008	-1.994	0.073	-0.001	-0.551
0.15	6.172	1.171	0.105	-1.587	0.055	-0.003	-0.430
0.2	4.834	1.205	0.180	-1.297	0.053	-0.003	-0.531
0.25	4.427	1.376	0.229	-1.188	0.030	-0.004	-0.581
0.3	4.570	1.350	0.156	-1.249	0.039	-0.002	-0.663
0.4	3.983	1.380	0.117	-1.134	0.047	-0.002	-0.722
0.5	4.860	1.520	0.183	-1.380	0.038	0.000	-0.796
0.6	4.675	1.667	0.220	-1.354	0.025	0.000	-0.901
0.75	4.309	1.856	0.298	-1.308	0.010	0.000	-0.898
1	3.573	1.812	0.244	-1.231	0.036	0.000	-0.873
1.5	2.922	2.035	0.225	-1.188	0.028	0.000	-0.947
2	2.398	2.043	0.274	-1.163	0.040	0.000	-0.908
2.5	1.641	1.890	0.187	-1.065	0.083	-0.001	-0.805
3	1.665	1.905	0.133	-1.127	0.094	-0.001	-0.817
4	0.906	1.712	0.014	-1.076	0.138	-0.001	-0.873
5	0.612	1.594	0.065	-1.131	0.153	0.000	-0.878
6	0.327	1.692	0.324	-1.157	0.124	0.000	-0.884
7.5	-0.241	1.711	0.603	-1.141	0.110	0.000	-0.988
10	-0.963	1.672	0.776	-1.093	0.113	0.000	-1.050

Tabla 11.2 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación

Período [s]	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}	τ	φ_{s2s}	φ_{ss}	σ
0	4.531	0.006	1.015	0.475	0.564	0.399	0.838
0.02	4.574	0.006	1.037	0.476	0.572	0.403	0.846
0.05	4.561	0.008	1.310	0.538	0.579	0.397	0.884
0.075	4.366	0.009	1.482	0.562	0.599	0.388	0.909
0.1	3.909	0.006	1.656	0.527	0.634	0.384	0.909
0.15	3.062	0.006	1.939	0.506	0.630	0.399	0.902
0.2	3.501	0.003	2.089	0.446	0.617	0.418	0.869
0.25	3.628	0.002	2.250	0.450	0.586	0.433	0.857
0.3	3.876	0.002	2.283	0.425	0.570	0.441	0.837
0.4	4.034	0.001	2.314	0.429	0.548	0.452	0.830
0.5	4.314	0.001	2.333	0.433	0.491	0.455	0.797
0.6	4.752	0.001	2.234	0.446	0.491	0.452	0.803
0.75	4.705	0.000	2.052	0.467	0.482	0.456	0.811
1	4.560	-0.001	1.635	0.501	0.460	0.438	0.809
1.5	4.833	0.000	0.693	0.516	0.426	0.423	0.792
2	4.590	0.001	-0.098	0.507	0.402	0.404	0.762
2.5	4.134	0.000	-0.349	0.515	0.398	0.385	0.756
3	4.190	0.001	-0.333	0.504	0.385	0.374	0.736
4	4.509	0.001	-0.413	0.453	0.356	0.370	0.685
5	4.564	0.001	-0.424	0.439	0.350	0.377	0.676
6	4.558	0.001	-0.388	0.421	0.320	0.372	0.647
7.5	5.083	0.002	-0.326	0.417	0.299	0.363	0.629
10	5.497	-0.001	-0.258	0.389	0.285	0.362	0.602

Tabla 11.3 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación

Período [s]	σ_7	σ_8	σ_{15}	σ_{16}	σ_9	$\Delta C_{1,}$ interface	$\Delta C_{1,}$ in-slab
0	1.099	-1.42	0.9969	-1	0.4	0.2	-0.3
0.02	1.099	-1.42	0.9969	-1	0.4	0.2	-0.3
0.05	1.254	-1.65	1.103	-1.18	0.4	0.2	-0.3
0.075	1.418	-1.8	1.2732	-1.36	0.4	0.2	-0.3
0.1	1.400	-1.8	1.3042	-1.36	0.4	0.2	-0.3
0.15	1.358	-1.69	1.26	-1.3	0.4	0.2	-0.3
0.2	1.165	-1.49	1.223	-1.25	0.4	0.2	-0.3
0.25	0.994	-1.3	1.16	-1.17	0.4	0.2	-0.3
0.3	0.882	-1.18	1.05	-1.06	0.4	0.2	-0.3
0.4	0.705	-0.98	0.8	-0.78	0.4	0.144	-0.3
0.5	0.580	-0.82	0.662	-0.62	0.4	0.1	-0.3
0.6	0.502	-0.7	0.58	-0.5	0.4	0.074	-0.3
0.75	0.369	-0.54	0.48	-0.34	0.4	0.042	-0.3
1	0.175	-0.34	0.33	-0.14	0.4	0	-0.3
1.5	-0.082	-0.05	0.31	0	0.4	-0.058	-0.3
2	-0.282	0.12	0.3	0	0.4	-0.1	-0.3
2.5	-0.411	0.25	0.3	0	0.4	-0.155	-0.3
3	-0.447	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3
4	-0.434	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3
5	-0.437	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3
6	-0.459	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3
7.5	-0.443	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3
10	-0.483	0.3	0.3	0	0.4	-0.2	-0.3

Tabla 11.4 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Montalva et al. (2017), continuación

Período [s]	V_{lin}	b	n	c	C_4	C_1
0	865.1	-1.186	1.18	1.88	10	7.2
0.02	865.1	-1.186	1.18	1.88	10	7.2
0.05	1053.5	-1.346	1.18	1.88	10	7.2
0.075	1085.7	-1.471	1.18	1.88	10	7.2
0.1	1032.5	-1.624	1.18	1.88	10	7.2
0.15	877.6	-1.931	1.18	1.88	10	7.2
0.2	748.2	-2.188	1.18	1.88	10	7.2
0.25	654.3	-2.381	1.18	1.88	10	7.2
0.3	587.1	-2.518	1.18	1.88	10	7.2
0.4	503	-2.657	1.18	1.88	10	7.2
0.5	456.6	-2.669	1.18	1.88	10	7.2
0.6	430.3	-2.599	1.18	1.88	10	7.2
0.75	410.5	-2.401	1.18	1.88	10	7.2
1	400	-1.955	1.18	1.88	10	7.2
1.5	400	-1.025	1.18	1.88	10	7.2
2	400	-0.299	1.18	1.88	10	7.2
2.5	400	0	1.18	1.88	10	7.2
3	400	0	1.18	1.88	10	7.2
4	400	0	1.18	1.88	10	7.2
5	400	0	1.18	1.88	10	7.2
6	400	0	1.18	1.88	10	7.2
7.5	400	0	1.18	1.88	10	7.2
10	400	0	1.18	1.88	10	7.2

11.2 Coeficientes utilizados en la GMPE de Idini et al (2017)

A continuación, se muestran los coeficientes resultantes de la regresión de la GMPE de Idini et al. (2017).

Tabla 11.5 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Idini et al. (2017), primera regresión

Período (s)	C3	C5	$\Delta C3$	σ
PGA	-0.97558	-0.00174	-0.52745	0.232
0.01	-1.02993	-0.00175	-0.50466	0.231
0.02	-1.08567	-0.00176	-0.48043	0.233
0.03	-1.15951	-0.00176	-0.4249	0.235
0.05	-1.2864	-0.00178	-0.31239	0.241
0.07	-1.34644	-0.00181	-0.17995	0.251
0.1	-1.32353	-0.00182	-0.13208	0.255
0.15	-1.17687	-0.00183	-0.26451	0.255
0.2	-1.04508	-0.00182	-0.39105	0.268
0.25	-0.94363	-0.00178	-0.34348	0.264
0.3	-0.84814	-0.00173	-0.36695	0.26
0.4	-0.69278	-0.00166	-0.46301	0.263
0.5	-0.57899	-0.00161	-0.54098	0.261
0.75	-0.56887	-0.00158	-0.46266	0.252
1	-0.53282	-0.00154	-0.42314	0.247
1.5	-0.46263	-0.00145	-0.58519	0.246
2	-0.40594	-0.00139	-0.65999	0.245
3	-0.33957	-0.00137	-0.79004	0.231
4	-0.26479	-0.00137	-0.86545	0.228
5	-0.22333	-0.00137	-0.88735	0.232
7.5	-0.30346	-0.00131	-0.91259	0.231
10	-0.33771	-0.00117	-0.96363	0.204

Tabla 11.6 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte idini et al. (2017), segunda regresión

Período [s]	C1	C2	C9	C8	$\Delta C1$	$\Delta C2$
PGA	-2.8548	0.7741	-0.03958	0.00586	2.5699	-0.4761
0.01	-2.8424	0.8052	-0.04135	0.00584	2.737	-0.5191
0.02	-2.8337	0.8383	-0.04325	0.00583	2.9087	-0.564
0.03	-2.8235	0.8838	-0.04595	0.00586	3.0735	-0.6227
0.05	-2.7358	0.9539	-0.05033	0.00621	3.2147	-0.7079
0.07	-2.6004	0.9808	-0.05225	0.00603	3.0851	-0.7425
0.1	-2.4891	0.9544	-0.0506	0.00571	2.8091	-0.7055
0.15	-2.6505	0.9232	-0.04879	0.0056	2.626	-0.627
0.2	-3.0096	0.9426	-0.05034	0.00573	2.6063	-0.5976
0.25	-3.3321	0.9578	-0.05143	0.00507	2.3654	-0.582
0.3	-3.5422	0.9441	-0.05052	0.00428	2.2017	-0.5412
0.4	-3.3985	0.7773	-0.03885	0.00308	1.6367	-0.3448
0.5	-2.8041	0.5069	-0.01973	0.00257	0.7621	-0.0617
0.75	-4.4588	0.8691	-0.04179	0.00135	2.1003	-0.4349
1	-5.3391	1.0167	-0.04999	0.00045	2.561	-0.5678
1.5	-6.1204	1.1005	-0.05426	0.00068	2.8923	-0.5898
2	-7.0334	1.2501	-0.06356	0.00051	3.3941	-0.7009
3	-8.2507	1.4652	-0.07797	0.00066	4.0033	-0.8465
4	-8.7433	1.4827	-0.07863	0.00063	3.9337	-0.8134
5	-8.9927	1.463	-0.07638	0.00067	3.7576	-0.7642
7.5	-9.8245	1.6383	-0.0862	0.00108	4.3948	-0.9313
10	-9.8671	1.5877	-0.08168	0.00014	4.3875	-0.8892

Tabla 11.7 Coeficientes de ecuación de predicción de movimiento fuerte Idini et al. (2017), coeficientes del suelo y continuación de coeficientes de segunda regresión

Período [s]	σ_e	σ_t	S _{II}	S _{III}	S _{IV}	S _V	S _{VI}
PGA	0.172	0.289	-0.584	-0.322	-0.109	-0.095	-0.212
0.01	0.173	0.288	-0.523	-0.262	-0.1	-0.092	-0.193
0.02	0.176	0.292	-0.459	-0.208	-0.092	-0.089	-0.177
0.03	0.178	0.295	-0.39	-0.16	-0.085	-0.088	-0.164
0.05	0.19	0.307	-0.306	-0.088	-0.075	-0.09	-0.146
0.07	0.213	0.329	-0.351	-0.056	-0.069	-0.096	-0.141
0.1	0.195	0.321	-0.524	-0.087	-0.07	-0.113	-0.156
0.15	0.16	0.302	-0.691	-0.336	-0.095	-0.166	-0.245
0.2	0.157	0.31	-0.671	-0.547	-0.127	-0.209	-0.359
0.25	0.142	0.299	-0.584	-0.674	-0.178	-0.235	-0.444
0.3	0.141	0.296	-0.506	-0.73	-0.258	-0.234	-0.491
0.4	0.157	0.306	-0.386	-0.718	-0.423	-0.164	-0.535
0.5	0.152	0.302	-0.3	-0.635	-0.537	-0.11	-0.557
0.75	0.146	0.291	-0.276	-0.395	-0.575	-0.358	-0.599
1	0.153	0.29	-0.275	-0.254	-0.462	-0.67	-0.584
1.5	0.152	0.289	-0.249	-0.238	-0.3	-0.801	-0.522
2	0.157	0.291	-0.218	-0.231	-0.22	-0.746	-0.479
3	0.155	0.279	-0.18	-0.219	-0.21	-0.628	-0.461
4	0.16	0.279	-0.171	-0.218	-0.212	-0.531	-0.448
5	0.167	0.286	-0.168	-0.218	-0.203	-0.438	-0.439
7.5	0.164	0.283	-0.168	-0.218	-0.153	-0.256	-0.435
10	0.176	0.27	-0.168	-0.218	-0.125	-0.231	-0.435

11.3 Coeficientes utilizados en la GMPE de Idriss (2014)

A continuación, se muestran los coeficientes resultantes de la regresión de la GMPE de Idriss (2014).

Tabla 11.8 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte Idriss (2014)
Para $V_{S30} \geq 450$ [m/s] y $M_w \leq 6.75$

Período [s]	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	ξ	γ	φ
0.01	7.0887	0.2058	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.02	7.1157	0.2058	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.03	7.2087	0.2058	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.04	7.3287	0.2058	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.05	6.2638	0.0625	0.0417	2.8664	-0.2418	-0.631	-0.0061	0.08
0.075	5.9051	0.1128	0.0527	2.9406	-0.2513	-0.591	-0.0056	0.08
0.1	7.5791	0.0848	0.0442	3.019	-0.2516	-0.757	-0.0042	0.08
0.15	8.019	0.1713	0.0329	2.7871	-0.2236	-0.911	-0.0046	0.08
0.2	9.2812	0.1041	0.0188	2.8611	-0.2229	-0.998	-0.003	0.08
0.25	9.5804	0.0875	0.0095	2.8289	-0.22	-1.042	-0.0028	0.08
0.3	9.8912	0.0003	-0.0039	2.8423	-0.2284	-1.03	-0.0029	0.08
0.4	9.5342	0.0027	-0.0133	2.83	-0.2318	-1.019	-0.0028	0.08
0.5	9.2142	0.0399	-0.0224	2.856	-0.2337	-1.023	-0.0021	0.08
0.75	8.3517	0.0689	-0.0267	2.7544	-0.2392	-1.056	-0.0029	0.08
1	7.0453	0.16	-0.0198	2.7339	-0.2398	-1.009	-0.0032	0.06
1.5	5.1307	0.2429	-0.0367	2.68	-0.2417	-0.898	-0.0033	0.04
2	3.361	0.3966	-0.0291	2.6837	-0.245	-0.851	-0.0032	0.02
3	0.1784	0.756	-0.0214	2.6907	-0.2389	-0.761	-0.0031	0.02
4	-2.4301	0.9283	-0.024	2.5782	-0.2514	-0.675	-0.0051	0
5	-4.357	1.1209	-0.0202	2.5468	-0.2541	-0.629	-0.0059	0
7.5	-7.8275	1.4016	-0.0219	2.4478	-0.2593	-0.531	-0.0057	0
10	-9.2857	1.5574	-0.0035	2.3922	-0.2586	-0.586	-0.0061	0

Tabla 11.9 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte Idriss (2014).
Para $V_{S30} \geq 450$ [m/s] y $M_w \geq 6.7$

Período [s]	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	ξ	γ	φ
0.01	9.0138	-0.0794	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.02	9.0408	-0.0794	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.03	9.1338	-0.0794	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.04	9.2538	-0.0794	0.0589	2.9935	-0.2287	-0.854	-0.0027	0.08
0.05	7.9837	-0.1923	0.0417	2.7995	-0.2319	-0.631	-0.0061	0.08
0.075	7.756	-0.1614	0.0527	2.8143	-0.2326	-0.591	-0.0056	0.08
0.1	9.4252	-0.1887	0.0442	2.8131	-0.2211	-0.757	-0.0042	0.08
0.15	9.6242	-0.0665	0.0329	2.4091	-0.1676	-0.911	-0.0046	0.08
0.2	11.13	-0.1698	0.0188	2.4938	-0.1685	-0.998	-0.003	0.08
0.25	11.3629	-0.1766	0.0095	2.3773	-0.1531	-1.042	-0.0028	0.08
0.3	11.7818	-0.2798	-0.0039	2.3772	-0.1595	-1.03	-0.0029	0.08
0.4	11.6097	-0.3048	-0.0133	2.3413	-0.1594	-1.019	-0.0028	0.08
0.5	11.4484	-0.2911	-0.0224	2.3477	-0.1584	-1.023	-0.0021	0.08
0.75	10.9065	-0.3097	-0.0267	2.2042	-0.1577	-1.056	-0.0029	0.08
1	9.8565	-0.2565	-0.0198	2.1493	-0.1532	-1.009	-0.0032	0.06
1.5	8.3363	-0.232	-0.0367	2.0408	-0.147	-0.898	-0.0033	0.04
2	6.8656	-0.1226	-0.0291	2.0013	-0.1439	-0.851	-0.0032	0.02
3	4.1178	0.1724	-0.0214	1.9408	-0.1278	-0.761	-0.0031	0.02
4	1.8102	0.3001	-0.024	1.7763	-0.1326	-0.675	-0.0051	0
5	0.0977	0.4609	-0.0202	1.703	-0.1291	-0.629	-0.0059	0
7.5	-3.0563	0.6948	-0.0219	1.5212	-0.122	-0.531	-0.0057	0
10	-4.4387	0.8393	-0.0035	1.4195	-0.1145	-0.586	-0.0061	0

11.4 Coeficientes utilizados en la GMPE de Graizer & Kalkan (2016).

A continuación, se muestran los coeficientes resultantes de la regresión de la GMPE de Graizer & Kalkan (2016).

Tabla 11.10 Coeficientes para ecuación de predicción de movimiento fuerte. Graizer & Kalkan (2016).

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
C ₁	0.14	m ₁	-0.0012
C ₂	-6.25	m ₂	-0.38
C ₃	0.37	m ₃	0.0006
C ₄	2.237	m ₄	3.9
C ₅	-7.542	a ₁	0.01686
C ₆	-0.125	a ₂	1.2695
C ₇	1.19	a ₃	0.0001
C ₈	-6.15	D _{sp}	0.75
C ₉	0.6	t ₁	0.001
C ₁₀	0.345	t ₂	0.59
C ₁₁	1.077	t ₃	-0.0005
C ₁₂	1.5	t ₄	-2.3
C ₁₃	0.7	s ₁	0.001
C ₁₄	40	s ₂	0.077
b _v	-0.24	s ₃	0.3251
V _a	484.5		

11.5 Registros espectro compatibles mediante análisis lineal equivalente

A continuación, se muestran los registros compatibles mediante un espectro objetivo considerando la desviación estándar y una propagación lineal equivalente.

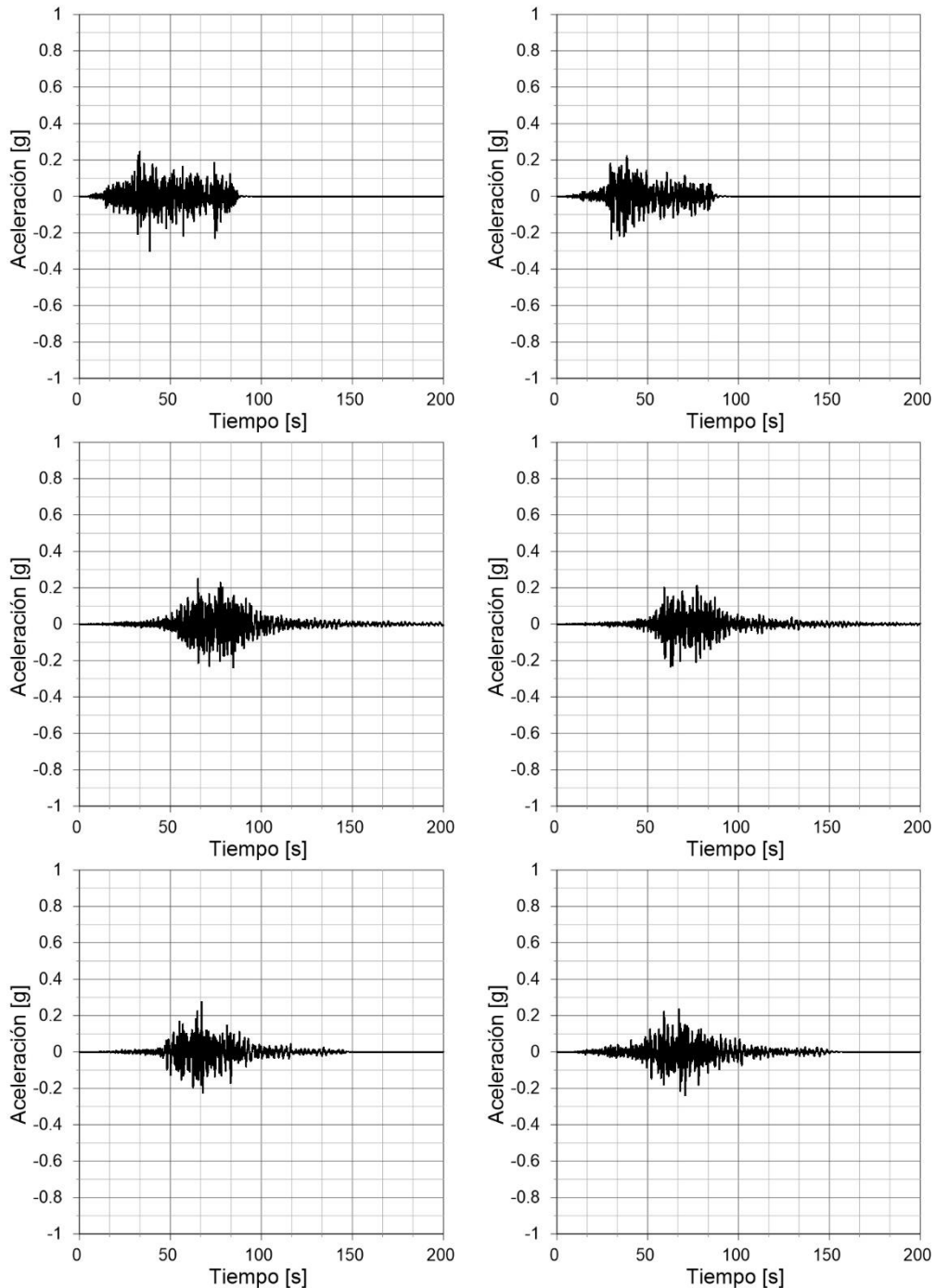


Figura 11.1 Registros de propagación para sismos interplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucía, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

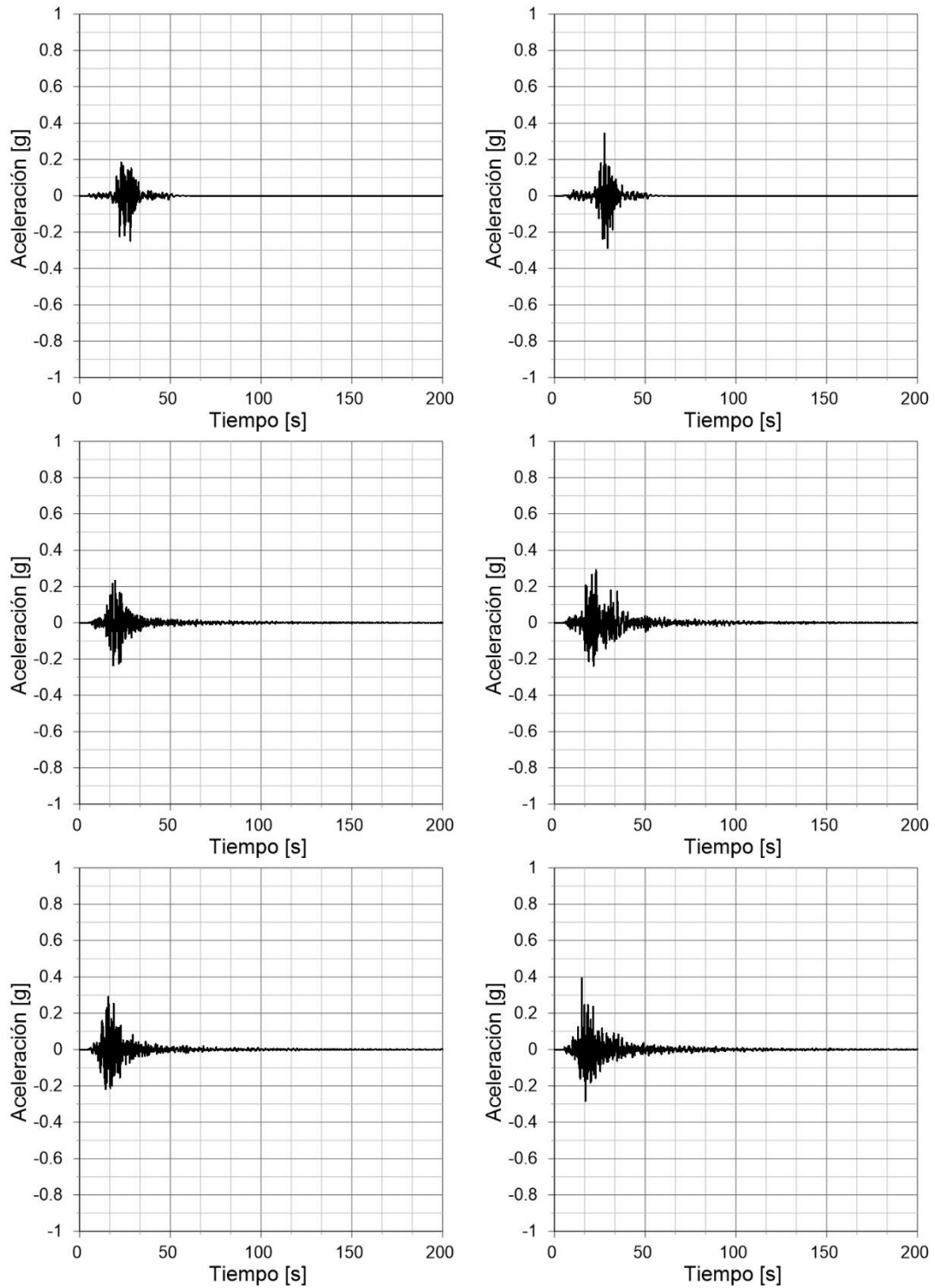


Figura 11.2 Registros de propagación para sismos intraplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

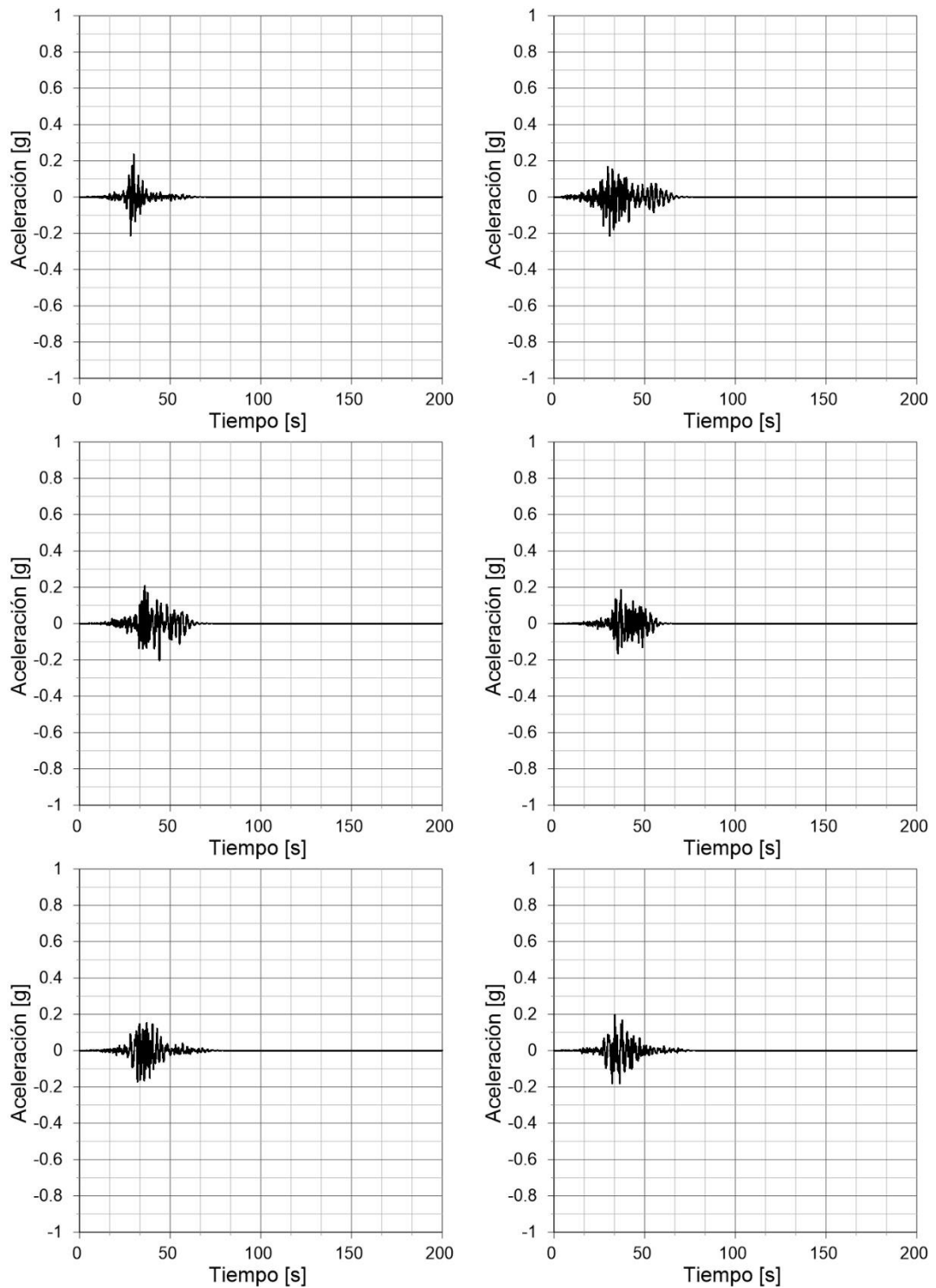


Figura 11.3 Registros de propagación para sismos superficial, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio más una desviación estándar entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

11.6 Espectros considerando valor promedio, análisis LE

A continuación, se muestran los espectros mediante un espectro objetivo considerando el valor medio y una propagación lineal equivalente.

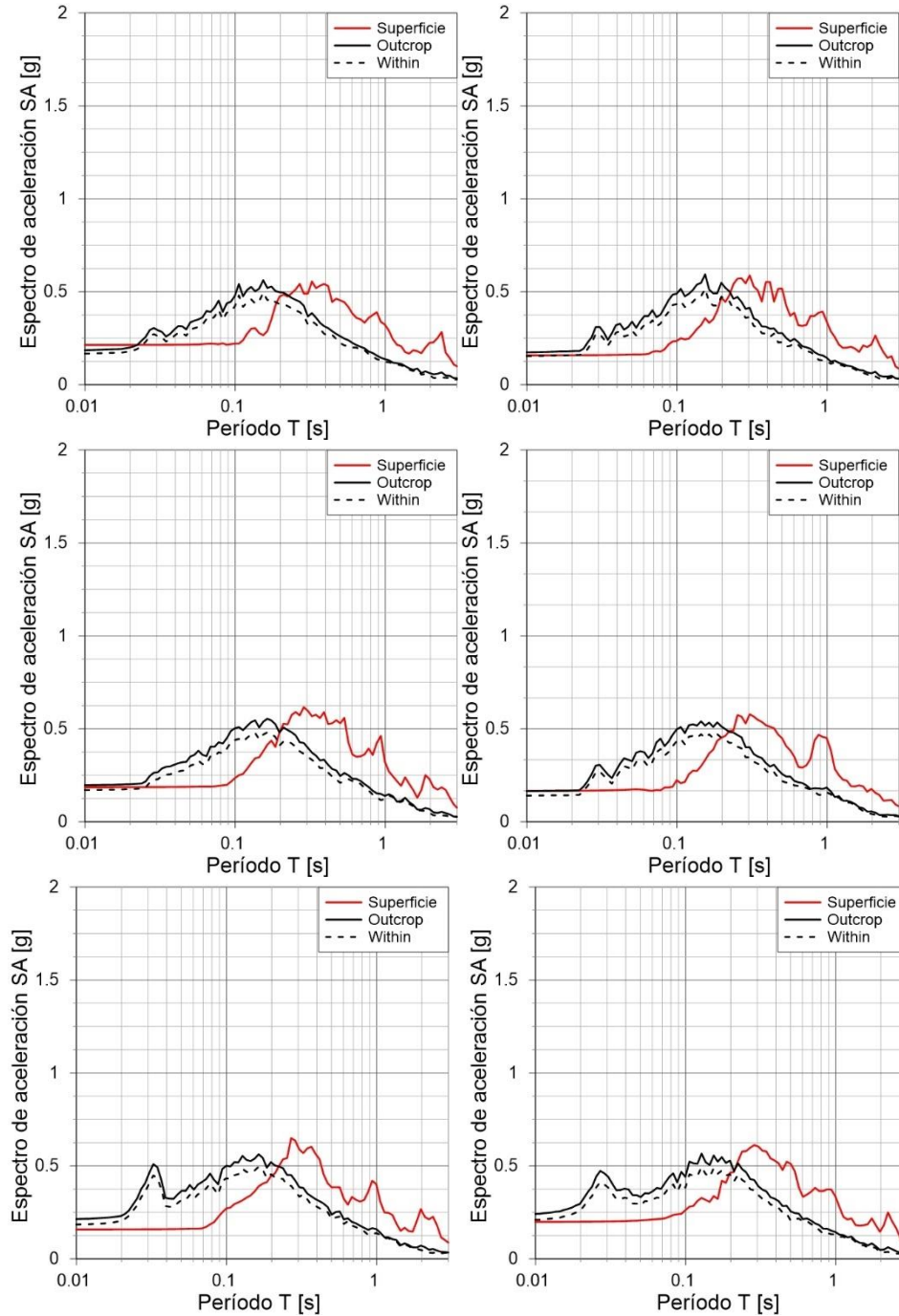


Figura 11.4 Espectros de propagación para sismos interplaca. Producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio de las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

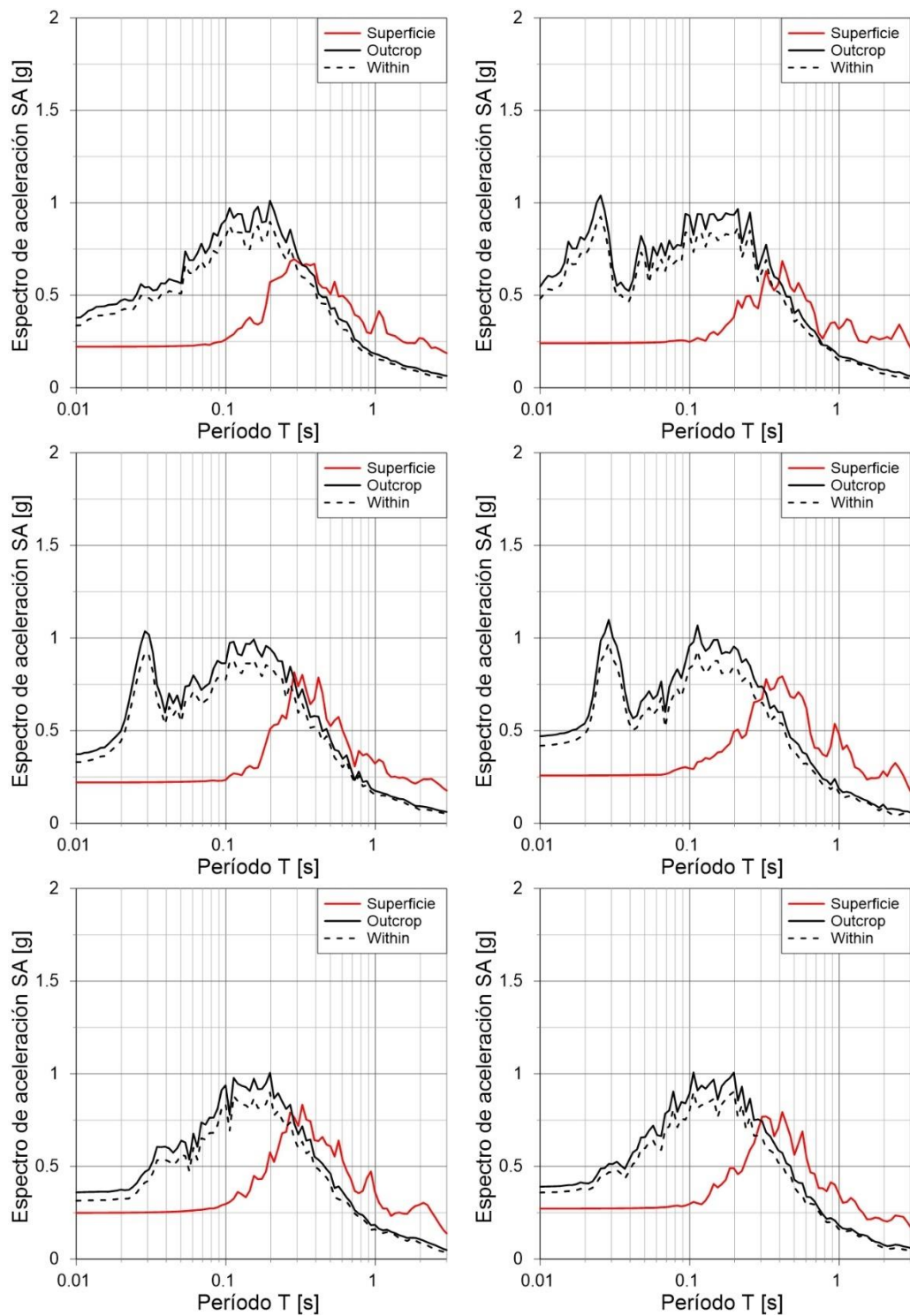


Figura 11.5 Espectros de propagación para sismos intraplaca. Se observa el espectro producto del registro modificado, considerando como objetivo el promedio entregado por las GMPE, “Outcrop”, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

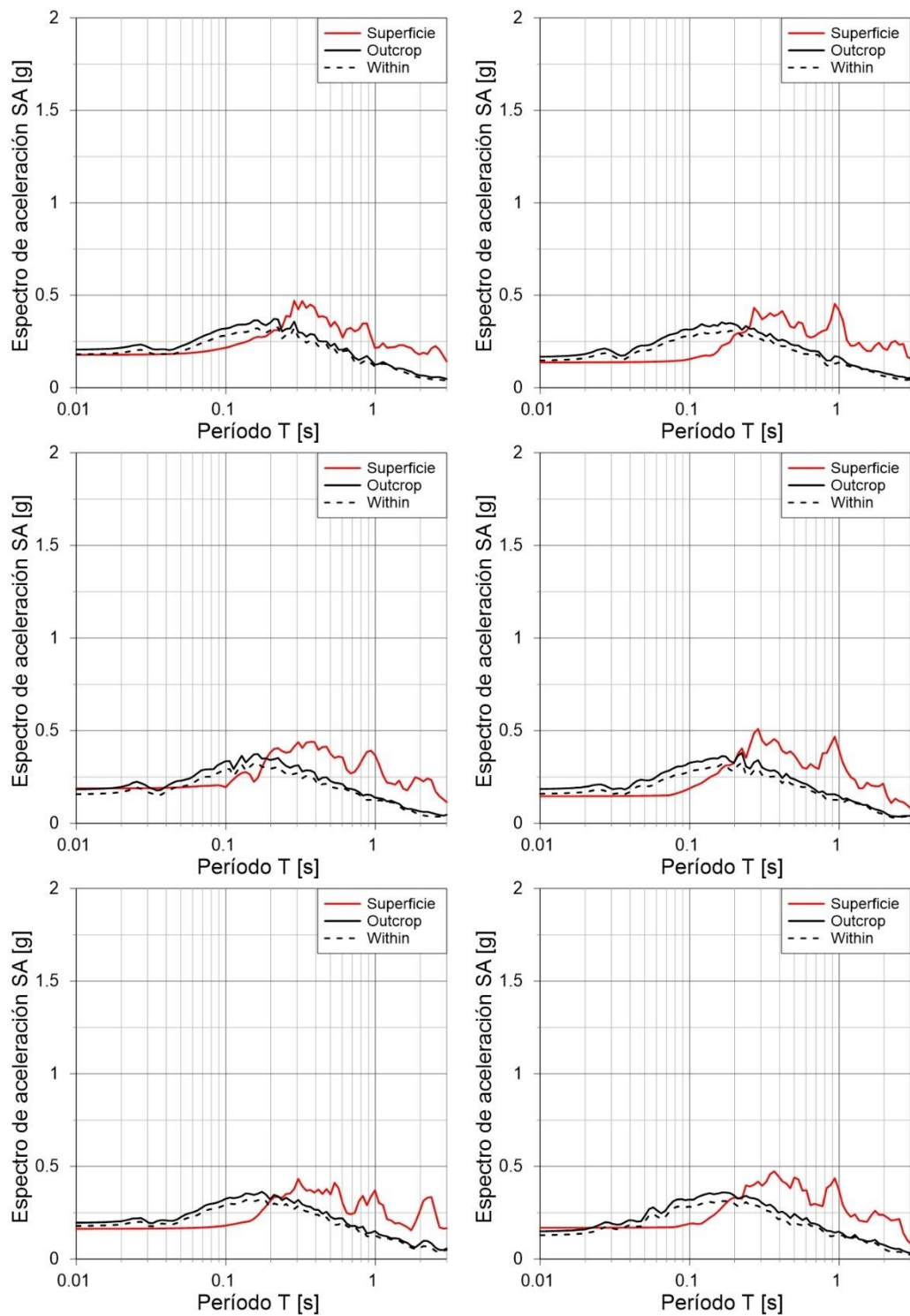


Figura 11.6 Espectros de propagación para sismos superficial. Se observa el espectro producto del registro modificado “Outcrop”, considerando como objetivo el promedio entregado por las GMPE, el registro en la interfaz de la roca con el suelo “Within”, y el registro en superficie. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

11.7 Registros compatibles considerando valor promedio, análisis LE

A continuación, se muestran los registros espectro compatibles obtenidos mediante un espectro objetivo considerando el valor medio y una propagación lineal equivalente.

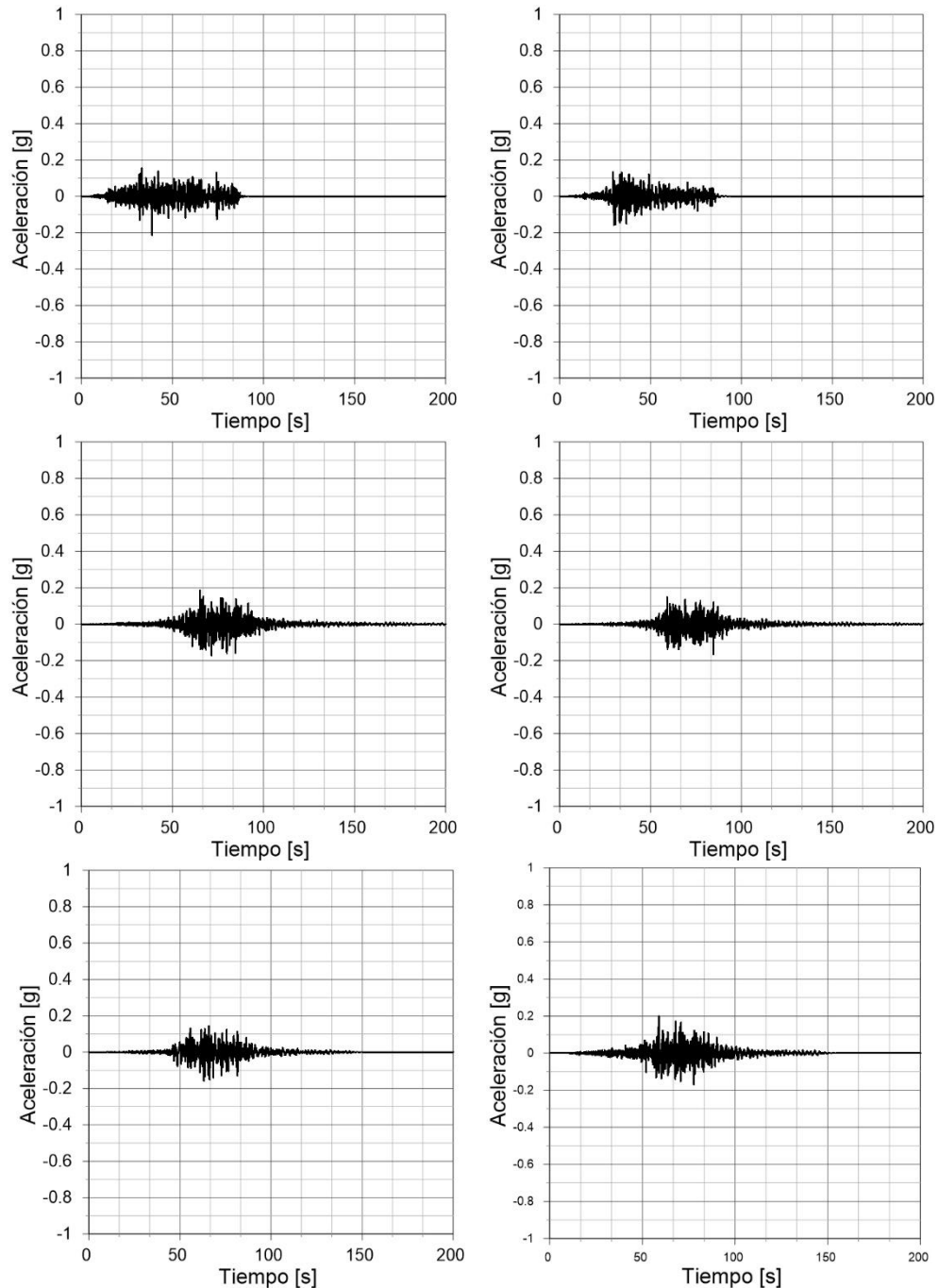


Figura 11.7 Registros de propagación para sismos interplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas Melado, Las Tórtolas, Santa Lucia, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

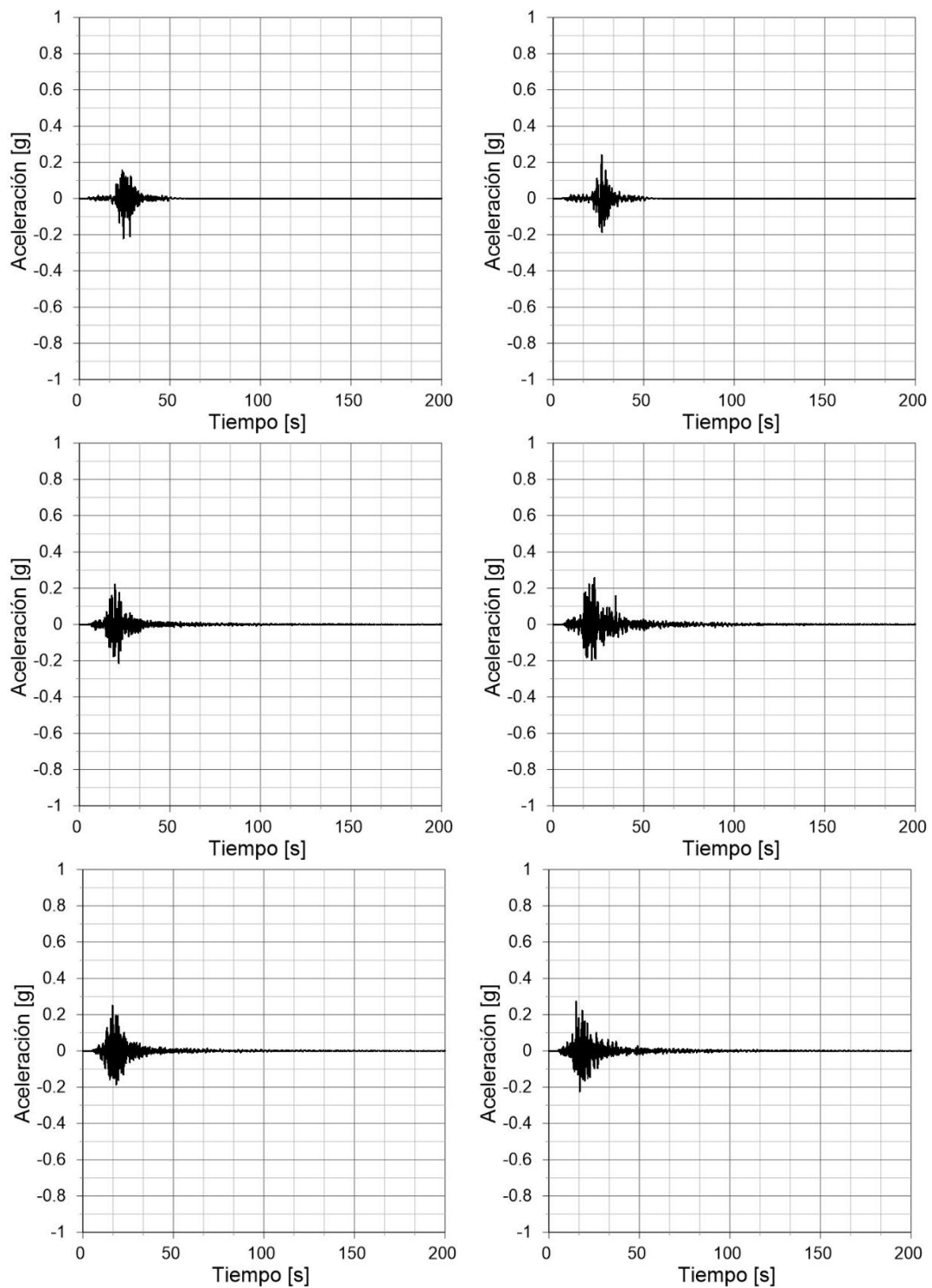


Figura 11.8 Registros de propagación para sismos intraplaca, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas PIS, HMTT, RABO, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

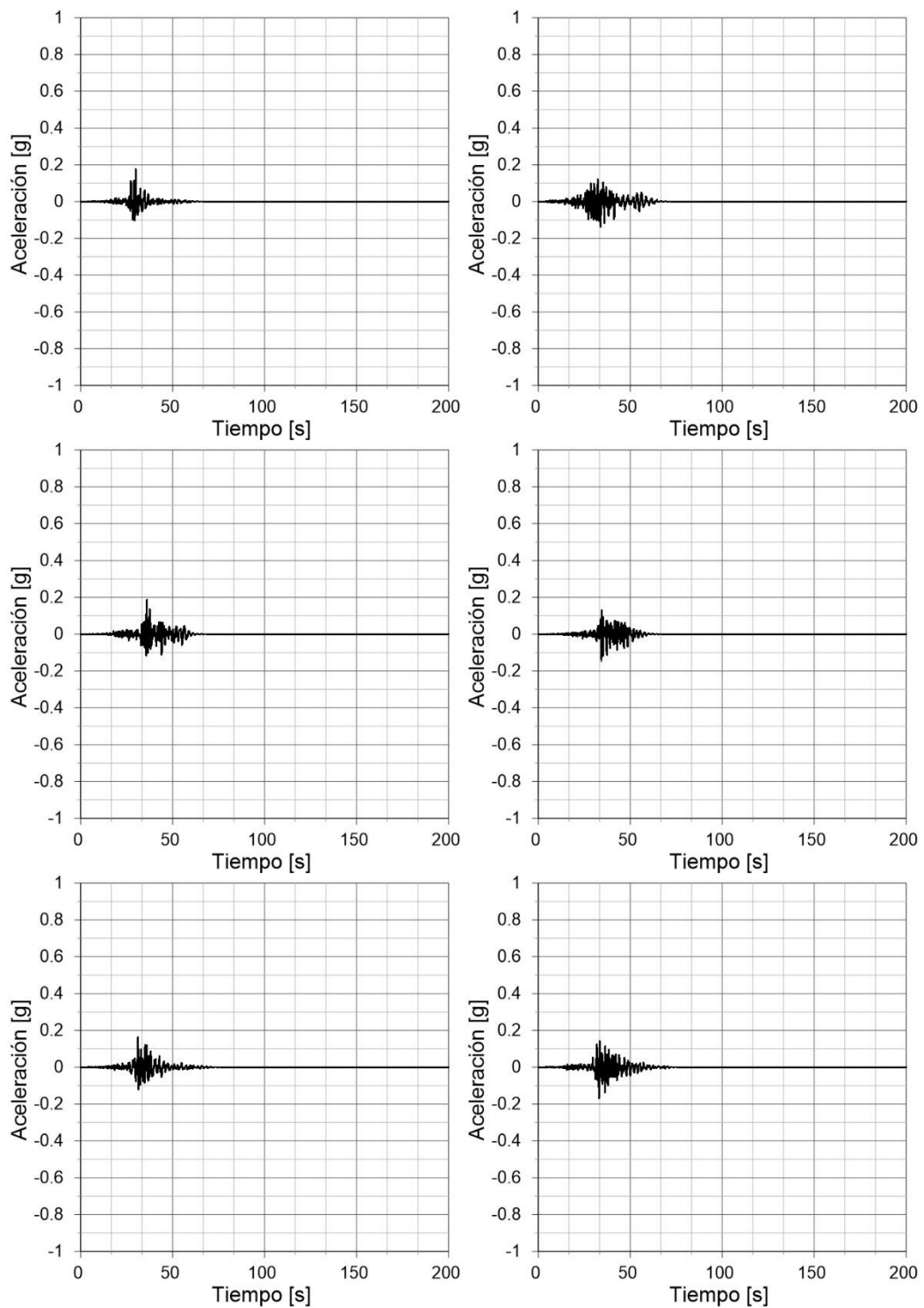


Figura 11.9 Registros de propagación para sismos superficial, considerando como espectro objetivo en la etapa de “spectral matching” el promedio entregado por las GMPE. De arriba hacia abajo, estaciones semillas HWA003, TAP065, TAP077, a la izquierda registro Norte-Sur, a la derecha registro Este-Oeste.

11.8 Espectros propuestos para análisis lineal equivalente

A continuación, se muestran los espectros propuesto para diseño, en el caso de un estudio de amenaza sísmica con enfoque determinístico, propagados mediante un análisis lineal equivalente.

$$Sa(g) = \begin{cases} 1.96 \cdot T + 0.37 & T \leq 0.3 \\ 0.96 & 0.3 < T \leq 0.7 \\ 0.77 \cdot T^{-0.62} & 0.7 < T \end{cases} \quad (10.1)$$

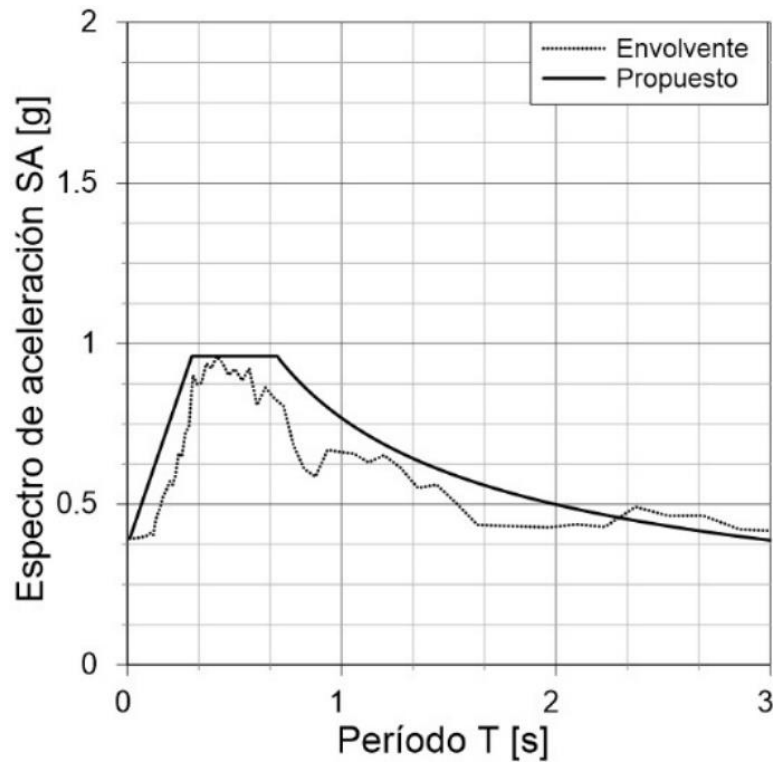


Figura 11.10 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio más una desviación estándar, mediante un análisis lineal equivalente.

$$Sa(g) = \begin{cases} 2.03 \cdot T + 0.28 & T \leq 0.3 \\ 0.83 & 0.3 < T \leq 0.6 \\ 0.55 \cdot T^{-0.8} & 0.6 < T \end{cases} \quad (10.2)$$

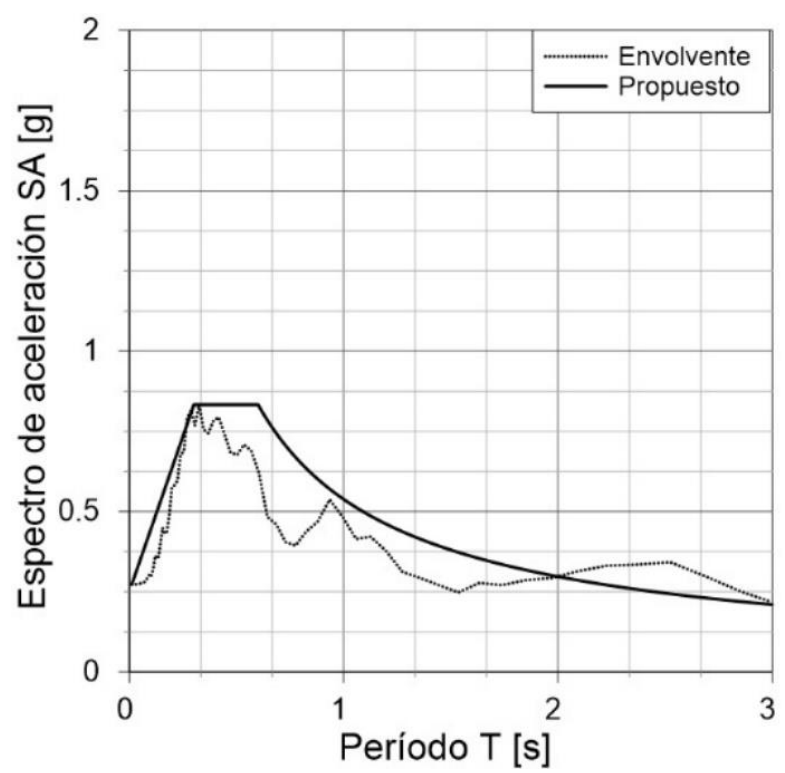


Figura 11.11 Espectro propuesto determinístico, para espectros objetivos considerando el promedio, mediante un análisis lineal equivalente.