



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

**ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA CUENCA DEL VALLE
CENTRAL DE COCHABAMBA, BOLIVIA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

JASMANNY MEJIA HEREDIA

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
PABLO BURGOS VARGAS

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA
POR: JASMANNY MEJIA HEREDIA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: CÉSAR PASTÉN PUCHI

ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA CUENCA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA, BOLIVIA

Altas intensidades sísmicas han sido evidenciadas durante terremotos en diferentes zonas de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, Bolivia. Sin embargo, no existen estudios publicados que confirmen o descarten que estas intensidades son producto de las propiedades de los suelos, la profundidad al basamento rocoso y la geología local. En esta Cuenca, las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe son consideradas como las principales fuentes de amenaza sísmica por su cercanía a los centros poblados.

En este sentido, esta tesis representa el primer estudio realizado que evalúa esta temática y tiene como objetivo estimar la respuesta sísmica de esta Cuenca, considerando escenarios determinísticos de activación sísmica de estas fallas, mediante la implementación de modelos de movimiento fuerte (GMMs) y la propagación unidimensional de ondas de corte. Para cumplir con ese objetivo, se recopiló información de estudios geotécnicos en superficie y estudios geológicos realizados en la Cuenca a partir de los cuales se estimaron modelos de velocidades de ondas de corte representativos de las diferentes unidades geológicas. En la propagación unidimensional de ondas de corte se consideraron diferentes tipos de análisis y una metodología simplificada que permite incorporar incertidumbre epistémica y variabilidad aleatoria en los perfiles de velocidad de ondas de corte analizados y la profundidad al basamento rocoso. Los acelerogramas utilizados en la propagación unidimensional corresponden a terremotos corticales y fueron ajustados espectralmente a espectros en roca generados a partir de GMMs, para siete puntos de control seleccionados en los principales centros urbanos de la Cuenca.

Los resultados de los análisis evidencian que el alto espesor de los sedimentos en zonas de la Cuenca puede reducir considerablemente la amplificación sísmica en superficie en función del amortiguamiento alcanzado por los materiales y su V_{s30} . Además, los valores de PGA obtenidos en la Cuenca difieren considerablemente al obtenido en el análisis probabilístico de amenaza sísmica desarrollado para Bolivia (PSHBO,2019), lo cual indica que un solo valor de PGA podría no ser representativo de toda la Cuenca.

Además, los resultados entregados por las GMMs y la propagación unidimensional, evidencian que las mayores pseudo-aceleraciones se concentran entre los periodos naturales correspondientes a 0.1 y 0.8 segundos. Esto sugiere que, dado un evento generado por estas fallas, estructuras de 1 a 8 pisos, aproximadamente, podrían experimentar las mayores solicitaciones sísmicas en la Cuenca.

*A mi querido amigo Raúl Jiménez Rueda (†)
por sus sabios consejos, enseñanzas e
incondicional apoyo brindado a lo largo de estos años*

Agradecimientos

A Dios, por guiar mi camino y permitirme cumplir este sueño.

A Karen Noelia Quemaya Aguilar, por su infinito amor, paciencia y especialmente por ser mi fuente de alegrías en este viaje y estadía en Chile.

A mis padres Freddy y Beatriz, por su apoyo, confianza, brindarme valores y ejemplo de superación. A mi hermana Veronica, por su cariño y cuidar de mis padres durante la pandemia.

Al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Mayor de San Simón y su personal, por ser la escuela donde me formé, guiarme hacia el camino de la investigación y facilitarme los estudios geotécnicos utilizados en esta tesis.

A Gosler Tarifa, Juan Carlos Tarifa y Julio Torres, por su apoyo, consejos y ayudarme con las cartas de recomendación que me permitieron cumplir con este objetivo.

A mi profesor guía, César Pastén, por las recomendaciones, constante apoyo y siempre buena disposición. Muchas gracias por todo César, especialmente por enseñarme que la calidad de un buen profesional, va de la mano de la calidad como persona y ser humano.

A los profesores miembros de mi comisión, Fabián Rojas y Pablo Burgos, por su colaboración, buena disposición y comentarios que aportaron a mi trabajo.

A la Universidad de Chile y los profesores, por compartirme su conocimiento, brindarme herramientas y una formación académica de calidad. A mis compañeros del magíster, por motivarme a entregar lo mejor de mi.

Finalmente, a la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) por el apoyo y el financiamiento para mis estudios y estadía en Chile.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivo Específicos	3
1.4. Estructura de la tesis	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Marco Sismológico	4
2.2. Marco Geológico y Geomorfológico	7
2.2.1. Geomorfología de la Cuenca	7
2.2.2. Geología de la Cuenca	8
2.2.3. Sedimentos Superficiales de la Cuenca	9
3. Modelos de velocidad de ondas de corte y su aplicación en la estimación de periodos fundamentales en la Cuenca de Cochabamba	11
3.1. Estimación de velocidades de ondas de corte en superficie a partir de información geotécnica disponible	11
3.2. Definición de modelos de velocidad de ondas de corte	15
3.3. Incorporación de variabilidad en los modelos de velocidad de ondas de corte	18
3.4. Estimación de periodos fundamentales en la Cuenca de Cochabamba	19
4. Estimación de la respuesta en superficie mediante modelos de movimiento fuerte (GMMs)	22
4.1. GMMs utilizadas y parámetros de entrada	22
4.2. Definición de escenarios de activación sísmica	23
4.3. Resultados obtenidos en la aplicación de GMMs en la Cuenca de Cochabamba	24
5. Propagación unidimensional de registros sísmicos en puntos de control	29
5.1. Metodología	29
5.2. Puntos de control	30
5.3. Generación de espectros objetivo	31
5.4. Selección de registros semilla	32
5.5. Ajuste espectral	33
5.6. Propagación unidimensional de ondas de corte	34
5.6.1. Selección de perfiles de velocidad de ondas de corte	35

5.6.1.1.	Perfil de suelo con variabilidad en la velocidad de ondas de corte	35
5.6.1.2.	Perfil de Vs con variabilidad en la profundidad al basamento rocoso	36
5.6.2.	Curvas de degradación de rigidez del suelo	38
5.7.	Resultados obtenidos de la propagación unidimensional	39
5.7.1.	Espectros de pseudo-aceleraciones considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte	39
5.7.2.	Espectros de pseudo-aceleraciones considerando variabilidad en la profundidad al basamento rocoso	41
5.7.3.	Resumen de resultados en la evaluación del PGA en los puntos de control	43
5.7.4.	Amplificación relativa	46
5.8.	Incorporación del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo en mapas de PGA	50
6.	Discusión	53
6.1.	Sobre los modelos de velocidad	53
6.2.	Sobre la aplicación de modelos de movimiento fuerte (GMMs)	53
6.2.1.	Combinación de modelos de movimiento fuerte (GMMs)	53
6.2.2.	Mapas de aceleraciones máximas del terreno (PGA)	54
6.2.3.	Mapas de pseudo-aceleraciones (PSa)	54
6.3.	Sobre la propagación unidimensional de ondas de corte	55
6.3.1.	Ajuste espectral	55
6.3.2.	Funciones de transferencia	55
6.3.3.	Aceleraciones máximas del terreno (PGA)	55
6.3.4.	Espectros de pseudo-aceleraciones	56
6.3.5.	Correlación de resultados y aplicación en la estimación de mapas de PGA	57
7.	Conclusiones y recomendaciones	61
7.1.	Conclusiones	61
7.2.	Recomendaciones	62
	Bibliografía	64
	Anexos	68
	Anexo A. Ecuaciones para estimar Vs a partir de sondeos SPT y CPT	69
A.1.	Correlaciones Vs-SPT	69
A.2.	Correlaciones Vs-CPT	71
	Anexo B. Modelo de Toro (1995)	72
	Anexo C. Propagación unidimensional de ondas de corte en un medio multicapas	74
C.1.	Función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y el basamento rocoso	75

C.2. Función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso	76
Anexo D. Mapas de PGA y pseudo-aceleraciones asociados a la falla de Sipe Sipe	77
Anexo E. Perfiles de Vs seleccionados para los puntos de control	81
E.1. Perfil de suelo con variabilidad en Vs	81
E.2. Perfil de Vs con variabilidad en la profundidad al basamento rocoso	83
Anexo F. Espectros objetivo en roca	85
F.1. Falla Cochabamba (M_w 7)	85
F.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)	87
Anexo G. Ajuste espectral (Spectral Matching)	90
G.1. Falla Cochabamba (M_w 7)	90
G.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)	96
Anexo H. Espectros de pseudo-aceleraciones en puntos de control	103
H.1. Falla Cochabamba (M_w 7)	103
H.1.1. Variabilidad en la velocidad de ondas de corte	103
H.1.2. Variabilidad en la profundidad al basamento rocoso	109
H.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)	115
H.2.1. Variabilidad en la velocidad de ondas de corte	115
H.2.2. Variabilidad en la profundidad al basamento rocoso	121
Anexo I. Resumen de valores de PGA en puntos de control)	127
I.1. Falla Cochabamba (M_w 7)	127
I.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)	130
Anexo J. Amplificación relativa)	134
J.1. Falla Cochabamba (M_w 7)	134
J.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)	136

Índice de Tablas

3.1.	Modelos de V_s y V_{s30} propuestos para las diferentes unidades geológicas de la Cuenca de Cochabamba.	15
3.2.	Parámetros de suelo y roca empleados en los análisis de propagación unidimensional de ondas de corte	19
4.1.	Rangos de aplicabilidad de las GMMs seleccionadas	23
4.2.	Parámetros de entrada de cada GMM	23
4.3.	Magnitudes estimadas para la falla Cochabamba y Sipe Sipe, a partir de su longitud de ruptura y ecuaciones empíricas desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994).	24
4.4.	Criterio para la definición de B_1 y $B_{1.5}$ en función de la unidad geológica . . .	24
5.1.	Características de los puntos de control seleccionados	30
5.2.	Resumen de las características de los registros semillas seleccionados.	32
5.3.	Periodos fundamentales seleccionados para cada punto de control (PC)	36
5.4.	Profundidades identificadas para cada punto de control, según su periodo fundamental	37
5.5.	Correlaciones ajustadas para la estimación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental del suelo para diferentes valores de V_{s30} y amortiguamientos del suelo, los cuales se asocian a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7)	47
5.6.	Correlaciones ajustadas para la estimación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental del suelo para diferentes valores de V_{s30} y amortiguamientos del suelo, los cuales se asocian a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2).	48
6.1.	Resumen de valores de PGA obtenidos en los puntos de control a partir de la evaluación de las Ecuaciones 5.1 a 5.6, las cuales incorporan el efecto del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo (resultados asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba).	59
6.2.	Resumen de valores de PGA obtenidos en los puntos de control a partir de la evaluación de las Ecuaciones 5.7 a 5.12, las cuales incorporan el efecto del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo (resultados asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe).	60
A.1.	Correlaciones Vs-SPT para todo tipo de suelos.	69
A.2.	Correlaciones Vs-SPT para arenas.	70
A.3.	Correlaciones Vs-SPT para arcillas.	70
A.4.	Correlaciones Vs-CPT para todo tipo de suelos.	71
A.5.	Correlaciones Vs-CPT para arenas.	71
A.6.	Correlaciones Vs-CPT para arcillas.	71

B.1. Parámetros del modelo de Toro (1995) para la aleatorización de la velocidad de ondas de corte (V_s)	73
--	----

Índice de Ilustraciones

2.1.	Terremotos ocurridos en Bolivia desde 1970 hasta la actualidad, clasificados en función de su profundidad focal. a) Epicentros de los terremotos. b) Distribución de los terremotos en profundidad, proyectados a lo largo de la latitud.	4
2.2.	Zonificación sísmica de Bolivia (GBDS, 2020). a) Zonas asociadas a deformación cortical (F1 a F8). b) Zonas asociadas al proceso de subducción (F9 a F13).	5
2.3.	Ubicación aproximada y buzamiento promedio de la falla Cochabamba, medido en la proximidad al Valle de Sacaba (Modificado de Lavenu, 1988).	6
2.4.	Profundidad al basamento rocoso en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba (Modificado de SEURECA- BRGM-SOGREAH-CGL, 1994).	7
2.5.	Esquema geológico de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba (Modificado de GEOBOL-UN, 1978).	8
2.6.	Mapa geológico de los sedimentos cuaternarios de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba (Modificado de Renner & Velasco, 2000 y SERGEOMIN, 1994).	9
3.1.	Estimación de Vs en profundidad a partir de información recopilada de un sondeo SPT localizado en la unidad geológica I y empleando los tres grupos de ecuaciones empíricas para sondeos SPT. a) Todo tipo de suelos. b) Arenas. c) Arcillas.	12
3.2.	Estimación de Vs en profundidad a partir de información recopilada de un sondeo CPT localizado en la unidad geológica I y empleando los tres grupos de ecuaciones empíricas para sondeos CPT. a) Todo tipo de suelos. b) Arenas. c) Arcillas.	13
3.3.	Perfiles de Vs promedio según el tipo de suelo, correspondientes a sondeos ubicados en la unidad geológica I. La línea azul gruesa representa el modelo de Vs ajustado para la unidad geológica I. a) Todos los suelos. b) Arenas. c) Arcillas.	14
3.4.	Perfiles de Vs promedio según el tipo de suelo, correspondientes a sondeos ubicados en la unidad geológica II. La línea azul gruesa representa el modelo de Vs ajustado para la unidad geológica II. a) Todos los suelos. b) Arenas. c) Arcillas.	14
3.5.	Comparación de modelos de Vs propuestos para las diferentes unidades geológicas de la Cuenca de Cochabamba.	15
3.6.	Mapa de Vs ₃₀ estimado para la Cuenca de Cochabamba y ubicación de puntos de control seleccionados.	17

3.7.	Comparación de los modelos de Vs propuestos con perfiles y modelos de Vs reportados en la literatura para depósitos de sedimentos profundos como la Cuenca de Grenoble en Francia (Chaljub et al., 2010; Guéguen et al., 2007), el Valle de Rhône en Suiza (Roten et al., 2006), la Bahía de Rhine en Alemania (Seht & Wohlenberg, 1999), el Valle de Tamar en Australia (Claprood et al., 2012), la Llanura de Emilia Romagna en Italia (Martelli, 2021; Martelli & Romani, 2012; Minarelli et al., 2016), la Cuenca de Osaka en Japón (Uebayashi et al., 2012) y la Cuenca de Santiago en Chile (Acevedo, 2021).	17
3.8.	Perfiles de Vs aleatorios generados según el modelo propuesto por Toro (1995), para la unidad geológica I.	18
3.9.	Aplicación de la teoría de propagación 1D de ondas de corte para la identificación de periodos fundamentales de vibración del suelo. a) Periodos fundamentales identificados para cada uno de los perfiles de Vs presentados en la Figura 3.8. b) Funciones de amplificación superficie-basamento rocoso.	20
3.10.	Mapa de periodos fundamentales promedio de la Cuenca de Cochabamba.	21
4.1.	Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio obtenidos por cada GMM, para un evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba.	25
4.2.	Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio más la desviación estándar de cada GMM, para un evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba.	26
4.3.	Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos a partir de valores promedio obtenidos del modelo propuesto por Lanzano et al. (2019), para un evento originado por la falla Cochabamba (M_w 7).	27
4.4.	Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos en base a los valores promedio más la desviación estándar del modelo propuesto por Lanzano et al. (2019), para un evento originado por la falla Cochabamba (M_w 7).	28
5.1.	Diagrama de flujo de la metodología para la propagación unidimensional de registros sísmicos en los puntos de control seleccionados.	29
5.2.	Mapa de uso de suelos de la Cuenca de Cochabamba con la ubicación de los puntos de control seleccionados.	30
5.3.	Espectros objetivo para el punto de control 1, considerando un evento M_w 7 originado por la falla Cochabamba (falla normal). a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	31
5.4.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4477, 4480, 4481, 4482 y 4483) para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles obtenidos en sus dos componentes horizontales.	34
5.5.	Perfiles de Vs seleccionados para el punto de control 1, a partir de sus periodos fundamentales. a) Perfiles de Vs aleatorios seleccionados. b) Periodos fundamentales correspondientes a los perfiles de Vs.	35
5.6.	Perfiles de Vs correspondientes a cada profundidad identificada para el punto de control 1.	37
5.7.	Clasificación de muestras de arcillas características de la Cuenca de Cochabamba, a partir de la carta de plasticidad del suelo (Mejia et al., 2022).	38

5.8.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura 5.5a. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	40
5.9.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	41
5.10.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura 5.6. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	42
5.11.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	43
5.12.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA del suelo para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Variación del PGA en función del periodo fundamental del suelo. b) Variación del PGA en función de la profundidad al basamento. c) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental. d) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función de la profundidad al basamento rocoso.	45
5.13.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	45

5.14.	Correlaciones entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo para los diferentes puntos de control analizados y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. Las correlaciones que describen a estas funciones son las presentadas en la Tabla 5.5 y fueron generadas para: a) Amortiguamiento constante del suelo igual a 3%. b) Amortiguamiento constante del suelo igual a 5%. c) Amortiguamiento constante del suelo igual a 7%. d) Amortiguamientos calculados con el método lineal equivalente.	47
5.15.	Correlaciones entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo para los diferentes puntos de control analizados y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla Sipe Sipe. Las correlaciones que describen a estas funciones son las presentadas en la Tabla 5.6 y fueron generadas para: a) Amortiguamiento constante del suelo igual a 3%. b) Amortiguamiento constante del suelo igual a 5%. c) Amortiguamiento constante del suelo igual a 7%. d) Amortiguamientos calculados con el método lineal equivalente.	48
5.16.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 3% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) $T=0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	49
5.17.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 3% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) $T=0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	50
5.18.	Mapas de PGA considerando afloramiento rocoso ($V_{s30}=1530$ m/s) obtenidos de la combinación de GMMs ($\mu + \sigma_{GMM}$). a) Mapa de PGA en roca asociado a la activación de la falla Cochabamba (M_w 7). b) Mapa de PGA en roca asociado a la activación de la falla Sipe Sipe (M_w 6.2).	51
5.19.	Mapas de PGA obtenidos a partir de la incorporación del periodo fundamental y diferentes niveles de amortiguamientos del suelo, asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) Mapa de PGA obtenido del promedio de los resultados obtenidos por las GMMs presentadas en la Figura 4.2 (basado en los valores promedio más la desviación estándar de cada modelo). b) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 3%. c) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante 5%. d) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 7%.	51
5.20.	Mapas de PGA obtenidos a partir de la incorporación del periodo fundamental y diferentes niveles de amortiguamientos del suelo, asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) Mapa de PGA obtenido del promedio de los resultados obtenidos por las GMMs presentadas en la Figura D.2 (Anexo D), basado en los valores promedio más la desviación estándar de cada modelo. b) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 3%. c) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante 5%. d) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 7%.	52
C.1.	Perfil de suelo unidimensional conformado por capas horizontales.	74
C.2.	Modelo constitutivo visco-elástico tipo Kelvin-Voigt (Semblat & Pecker, 2009).	74
D.1.	Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio obtenidos por cada GMM, para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.	77

D.2.	Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio más la desviación estándar de cada GMM, para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.	78
D.3.	Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos a partir de valores promedio obtenidos del modelo propuesto por Cauzzi et al. (2015), para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.	79
D.4.	Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos en base a los valores promedio más la desviación estándar del modelo propuesto por Cauzzi et al. (2015), para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.	80
E.1.	Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental. a) Punto de control 1. b) Punto de control 2. c) Punto de control 3. d) Punto de control 4.	81
E.2.	Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental (continuación). e) Punto de control 5. f) Punto de control 6. g) Punto de control 7.	82
E.3.	Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental. a) Punto de control 1. b) Punto de control 2. c) Punto de control 3. d) Punto de control 4.	83
E.4.	Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental (continuación). e) Punto de control 5. f) Punto de control 6. g) Punto de control 7.	84
F.1.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 2. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	85
F.2.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 3. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	85
F.3.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 4. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	86
F.4.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 5. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	86
F.5.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 6. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	86
F.6.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 7. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	87

F.7.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 1. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	87
F.8.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 2. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	88
F.9.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 3. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	88
F.10.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 4. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	88
F.11.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 5. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	89
F.12.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 6. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	89
F.13.	Determinación del espectro objetivo para el punto de control 7. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.	89
G.1.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4472, 4477, 4481 y 4483) para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	90
G.2.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	91
G.3.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	92

G.4.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4472, 4477, 4481 y 4483) para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	93
G.5.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	94
G.6.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	95
G.7.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 2385, 2389, 1011, 2635 y 3471) para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	96
G.8.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	97
G.9.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	98
G.10.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	99
G.11.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	100
G.12.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	101

G.13.	Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.	102
H.1.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	103
H.2.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	104
H.3.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	105
H.4.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	106

H.5.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	107
H.6.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	108
H.7.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	109
H.8.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	110
H.9.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	111

H.10.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	112
H.11.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	113
H.12.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	114
H.13.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura 5.5a. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	115
H.14.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	116

H.15.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	117
H.16.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.1d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	118
H.17.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	119
H.18.	Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.2g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	120

H.19.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura 5.6. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	121
H.20.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	122
H.21.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	123
H.22.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	124
H.23.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	125

H.24.	Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.	126
I.1.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Variación del PGA en función del periodo fundamental del suelo. b) Variación del PGA en función de la profundidad al basamento. c) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental. d) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función de la profundidad al basamento rocoso.	127
I.2.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.	128
I.3.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.	128
I.4.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.	129
I.5.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.	129
I.6.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.	130
I.7.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	130
I.8.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	131
I.9.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	131
I.10.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	132
I.11.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.	132

I.12.	Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla de Sipe Sipe.	133
J.1.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 5% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) T= 0.3 s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	134
J.2.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 7% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) T= 0.3 s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	135
J.3.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 5% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) T= 0.3 s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	136
J.4.	Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 7% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) T= 0.3 s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.	137

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Las propiedades de los materiales que conforman un perfil de suelo, su secuencia estratigráfica, la profundidad al basamento rocoso y la topografía del sitio pueden influenciar y modificar considerablemente las características del movimiento en superficie. Este proceso de modificaciones que sufre una determinada onda sísmica en términos de amplitud, contenido de frecuencias y duración, se denomina respuesta sísmica local (Panzer et al., 2013).

La influencia de las condiciones de sitio en el daño a estructuras ha sido evidenciada al comparar registros de los movimientos en superficie, medidos en diferentes sitios (Caracas 1967, México 1985, San Francisco 1989, Northridge 1994, Kobe 1995). Dos enfoques son principalmente utilizados para la estimación de los efectos de sitio. Un enfoque basado en la observación y/o mediciones directas in-situ, y mediante modelos numéricos basados en la información geotécnica disponible (Bard, 1994). Además, debido a que muchas grandes ciudades están ubicadas en valles aluviales o cerca de ellos, los efectos de la topografía superficial y geometría de la cuenca son de gran importancia y son considerados en la estimación de los efectos de sitio (Kramer, 1996).

La ciudad de Cochabamba se encuentra ubicada en la parte central de Bolivia. Esta se encuentra conformada por diferentes municipios, los cuales albergan a 2 millones de habitantes aproximadamente. Esta ciudad registra el mayor número de sismos corticales anualmente en Bolivia (OSC, 2020). Un ejemplo de este tipo de terremotos, es el terremoto de Aiquile de 1998 (M_l 6.6), el cual es catalogado como el más destructivo en los últimos 50 años en Bolivia (Orozco & Alcalá, 2000). Este evento se originó por la falla Aiquile y produjo una intensidad de Mercalli Modificada de VIII. Además de la destrucción que ocasionó este terremoto en los municipios de Aiquile, Mizque y Totora, fue sentido con gran intensidad en la región metropolitana de Cochabamba, que se encuentra ubicada a 145 km al noroeste de la falla.

La Cuenca del Valle Central de Cochabamba aloja a seis de siete municipios que conforman la región metropolitana de la ciudad de Cochabamba en Bolivia. Es una fosa tectónica que por largos periodos de tiempo ha estado ocupado por un lago. El relleno cuaternario que conforma la Cuenca es complejo y está constituido por depósitos heterogéneos de una gran variedad litológica (Renner & Velasco, 2000). La profundidad del basamento rocoso es variable y se extiende más allá de los 200 m.

En la Cuenca del Valle Central de Cochabamba se distinguen dos sistemas de fallas consideradas como las más importantes y que todavía se encuentran activas (Renner & Velasco, 2000). Una falla inversa de carácter regional con dirección noroeste-sureste, denominada falla de Sipe Sipe, la cual originó un terremoto ($M_l = 5.8$) el 23 de julio de 1909 que ocasionó destrucción, muertos y heridos (GBDS, 2018). La otra es la falla del Tunari o falla Cochabamba, una falla normal que se desarrolla en dirección este-oeste, la cual originó el terremoto del 25 de diciembre de 1942 ($M_l = 5.8$) que generó daño y destrucción en estructuras de la época (GBDS, 2018).

La presencia de las fallas activas en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba representa una potencial amenaza sísmica, especialmente considerando los eventos ya descritos y dada la cercanía a las principales estructuras existentes en la Cuenca. La presencia de estas fallas fue considerada en el análisis probabilístico de amenaza sísmica desarrollado para Bolivia (PSHBO, 2019), el cual fue presentado el año 2019. Los mapas de aceleraciones máximas del terreno (PGA) generados por este estudio están incluidos en la Guía Boliviana de Diseño Sísmico (GBDS, 2020) y son utilizados para la construcción de espectros de diseño.

Para el análisis probabilístico de amenaza sísmica de Bolivia (PSHBO, 2019), se consideró una única magnitud de velocidad de ondas de corte de los 30 metros superiores del terreno (V_{s30}), igual a 760 m/s (GBDS, 2020). Este valor que clasifica al tipo de suelo como roca según la GBDS (2020), no considera el efecto del suelo y no refleja la rigidez real de los estratos superficiales de la Cuenca, donde se evidencia velocidades de onda de corte en superficie del orden de 190 m/s, que resultan en $V_{s30} \approx 275$ m/s (GTUMSS, 2021). La diferencia entre las velocidades ya descritas, supone un comportamiento diferente en superficie y probablemente una mayor demanda a la estimada haciendo uso de la Guía Boliviana de Diseño Sísmico (2020). Por otra parte, considerando las altas profundidades al basamento rocoso y la baja rigidez de los estratos superficiales, se espera altos periodos fundamentales, lo que supone un riesgo para estructuras altas. Por lo anteriormente descrito y considerando la alta tasa de crecimiento inmobiliario en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, se considera relevante estimar su respuesta sísmica.

1.2. Hipótesis

La baja rigidez de los estratos superficiales de suelo y la profundidad del basamento rocoso favorecen la amplificación sísmica producida por fallas corticales superficiales en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la respuesta sísmica de perfiles de suelo representativos de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, considerando escenarios determinísticos de activación de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe.

1.3.2. Objetivo Específicos

1. Recopilar información sobre la geología, topografía y geotecnia de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba.
2. Estudiar las características de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe para establecer escenarios determinísticos de activación sísmica.
3. Conformar perfiles de suelo unidimensionales representativos de los suelos de la Cuenca, cuyos parámetros en profundidad son estimados a partir de información geológica y geotécnica, considerando además las incertidumbres referentes a la velocidad de ondas de corte y la profundidad al basamento rocoso.
4. Estimar la respuesta sísmica en superficie de cada perfil de suelo por medio de un análisis de propagación unidimensional de ondas de corte, considerando un comportamiento lineal y lineal equivalente del suelo.
5. Implementar modelos de movimiento fuerte para sismos corticales superficiales en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, que consideren parámetros como el V_{s30} , profundidad al basamento rocoso y el potencial sismogénico de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe.
6. Incorporar el efecto del periodo fundamental del suelo y el V_{s30} en la estimación de los parámetros de movimiento del suelo en superficie para la Cuenca del Valle Central de Cochabamba.

1.4. Estructura de la tesis

Esta tesis está conformada por siete capítulos, incluyendo la introducción. El Capítulo 2 corresponde al marco teórico de la investigación donde se describe la sismología, geomorfología y geología de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba. El Capítulo 3 presenta la definición de los modelos de velocidad de ondas de corte representativos de los suelos de la Cuenca y su aplicación en la determinación de los periodos fundamentales. En el Capítulo 4 se define los escenarios sísmicos asociados a las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe y se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos de movimiento fuerte. El Capítulo 5 presenta la metodología y los resultados obtenidos de la propagación unidimensional de registros de aceleración ajustados espectralmente, en puntos de control seleccionados en la Cuenca. En el Capítulo 6 se analizan y discuten los resultados de esta investigación. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones en respuesta a los objetivos planteados.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Marco Sismológico

En la Figura 2.1 se presenta los epicentros de los terremotos ocurridos en Bolivia desde 1970 hasta la actualidad, los cuales fueron recopilados del navegador de terremotos de IRIS (IEB, 2022). Los terremotos en esta figura son clasificados en función de su profundidad focal.

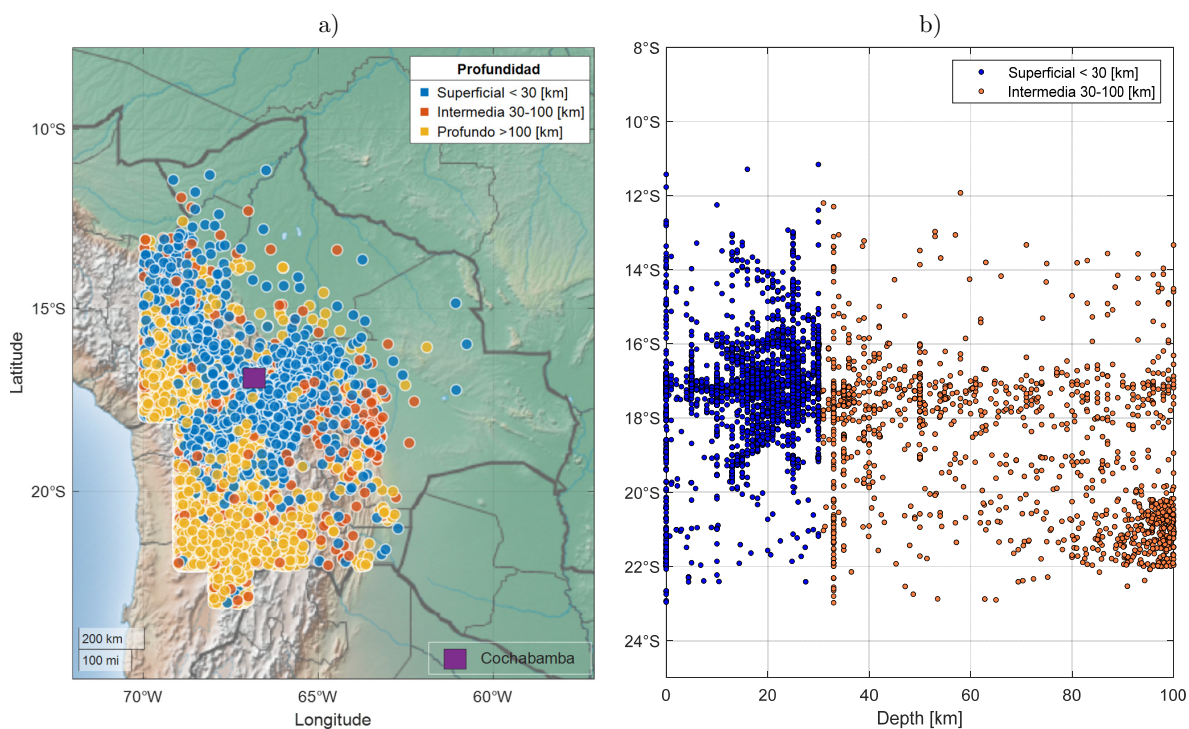


Figura 2.1: Terremotos ocurridos en Bolivia desde 1970 hasta la actualidad, clasificados en función de su profundidad focal. a) Epicentros de los terremotos. b) Distribución de los terremotos en profundidad, proyectados a lo largo de la latitud.

La sismicidad en Bolivia está controlada por dos tipos de fuentes sismogénicas. La fuente sismogénica asociada al proceso de subducción entre las Placas de Nazca y Sudamericana y la asociada a la deformación cortical (Minaya et al., 2012).

Una característica de los terremotos originados por estas fuentes sismogénicas es su profundidad focal. La fuente asociada al proceso de subducción origina terremotos con profundidades intermedias (30-100 km) y profundas (>100 km). Los terremotos de profundidad superficial (<30 km) son los asociados a la deformación cortical.

El observatorio de San Calixto, entidad encargada del monitoreo de la actividad sísmica en Bolivia, zonificó el territorio boliviano en 13 zonas sísmicas (GBDS, 2020), como se puede observar en la Figura 2.2. Nueve zonas (F1 a F8) son asociadas a deformación cortical (zona occidental, altiplánica, oriental, boomerang, cratónica, cordillera argentina, occidental peruana y altiplano peruano) y cinco zonas (F9 a F13) asociadas al proceso de subducción (zona de interplaca, intraplaca intermedia e intraplaca profunda).

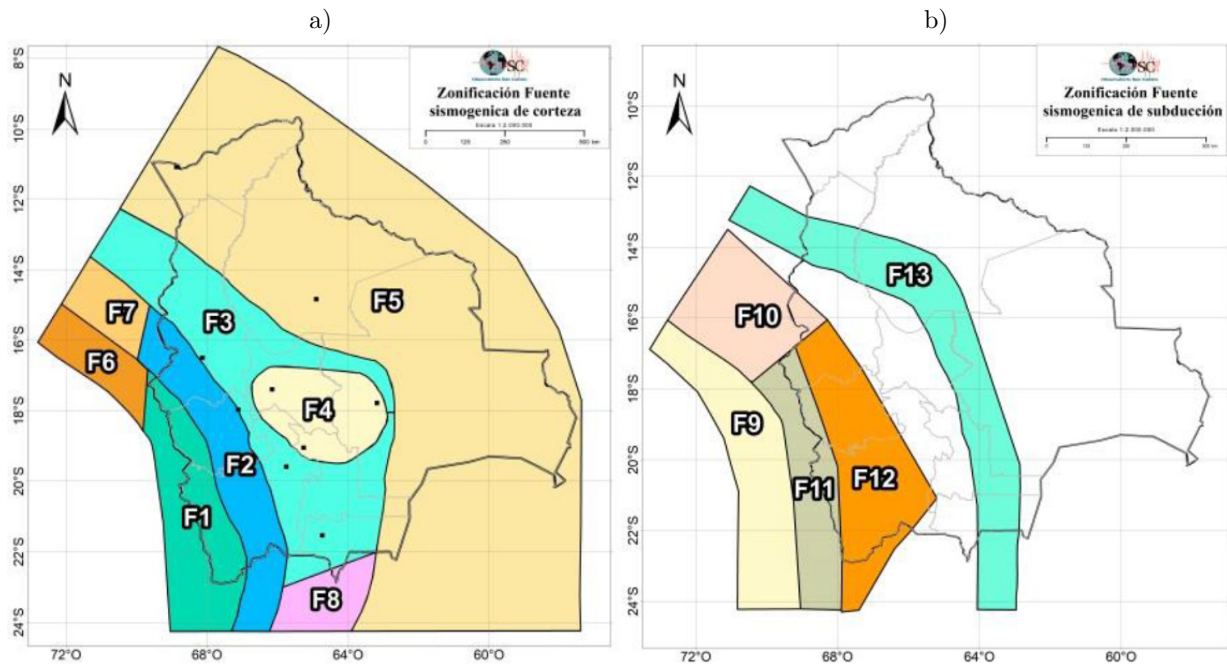


Figura 2.2: Zonificación sísmica de Bolivia (GBDS, 2020). a) Zonas asociadas a deformación cortical (F1 a F8). b) Zonas asociadas al proceso de subducción (F9 a F13).

La ciudad de Cochabamba se encuentra ubicada en la Zona Boomerang (F4), caracterizada por la ocurrencia de sismos superficiales de magnitudes moderadas a altas, relacionados a la curvatura de la Cordillera de los Andes. En esta zona se acumulan esfuerzos debido al sobrecabalgamiento del Escudo brasilero y la Cordillera Oriental Neógena (Baby et al., 1992; GBDS, 2020).

Diferentes eventos sísmicos han sido registrados en la ciudad de Cochabamba y sus alrededores, siendo los eventos superficiales los más destructivos (Sipe Sipe 1909, Cochabamba 1942 y Aiquile 1998).

En la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, la amenaza sísmica se encuentra controlada por las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe. La ubicación de estas fallas es presentada en el mapa geológico de la Figura 2.6.

Según el trabajo de campo y análisis microestructural realizado por Lavenu (1988), la falla Cochabamba es caracterizada como una falla normal con componente transcurrente dextral de 45 km de longitud aproximadamente (Costa et al., 2009; Lavenu & Mercier, 1991; Lavenu et al., 2000; Zavala, 2013). El rumbo de la falla es de $-72.0^\circ \pm 10^\circ$ (N 72.0° O $\pm 10^\circ$) y el buzamiento promedio igual a 60° S. Las estrías de falla indican una dirección de extensión NE-SO con σ_3 orientado N 41° E (Lavenu et al., 2000). La tasa de movimiento al igual que el ancho de ruptura no han sido cuantificados.

En la Figura 2.3 se presenta un esquema desarrollado por Lavenu (1988), con la ubicación aproximada y buzamiento promedio de la falla Cochabamba. El sitio de medición es el 8B y se encuentra localizado en la proximidad al Valle de Sacaba, al este de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba.

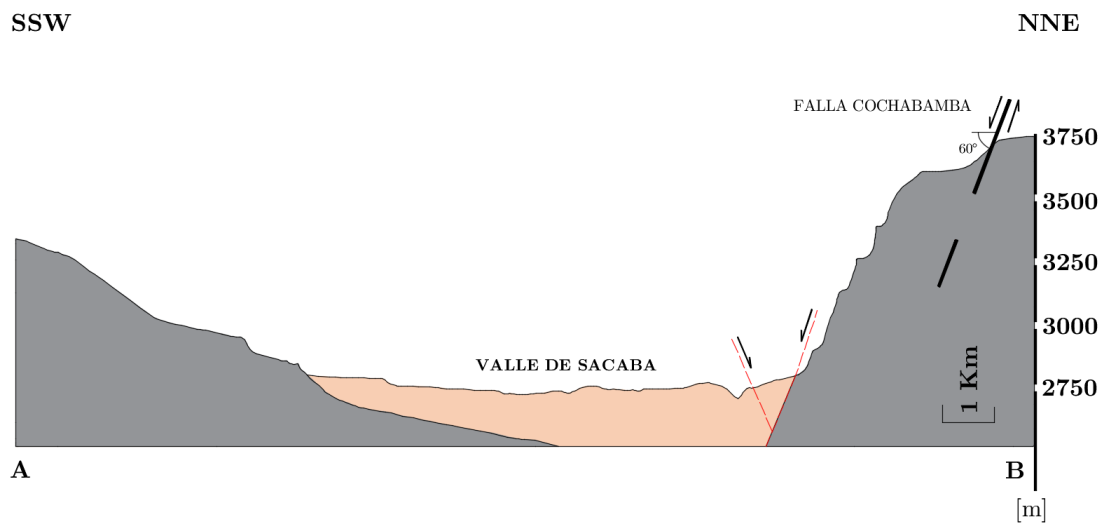


Figura 2.3: Ubicación aproximada y buzamiento promedio de la falla Cochabamba, medido en la proximidad al Valle de Sacaba (Modificado de Lavenu, 1988).

La falla de Sipe Sipe es clasificada como una falla activa del tipo inversa y de carácter regional (Renner & Velasco, 2000). Mas allá de la ubicación y extensión en planta (10 km de longitud aproximada) presentada en diferentes mapas y cartas geológicas publicadas (SERGEOMIN, 1994; Renner & Velasco, 2000), no existe mayor información sobre trabajos y mediciones en campo que describan características relacionadas a la geometría y tasa de movimiento de esta falla.

2.2. Marco Geológico y Geomorfológico

2.2.1. Geomorfología de la Cuenca

La Cuenca del Valle Central de Cochabamba se encuentra limitada por la cordillera del Tunari en la parte norte y la cordillera Maso Cruz hacia el oeste. Estas cordilleras son una prolongación de la Cordillera Oriental de los Andes Centrales. En la Figura 2.6 se puede observar la geomorfología que circunda a la Cuenca.

La Cuenca posee una longitud aproximada de 20 km en dirección norte-sur, 31 km en dirección este-oeste y una superficie aproximada de 1150 km².

La topografía varía desde los 2470 m.s.n.m. en la parte más baja de la Cuenca hasta los 5030 m.s.n.m. en la cordillera del Tunari. Hacia el oeste de la Cuenca se tienen serranías que alcanzan una altura máxima de 4000 m.s.n.m. (Renner & Velasco, 2000). La llanura o planicie de la parte central de la Cuenca (sobre la que se asienta el área urbana de la ciudad de Cochabamba) tiene una elevación promedio de 2600 m.s.n.m.

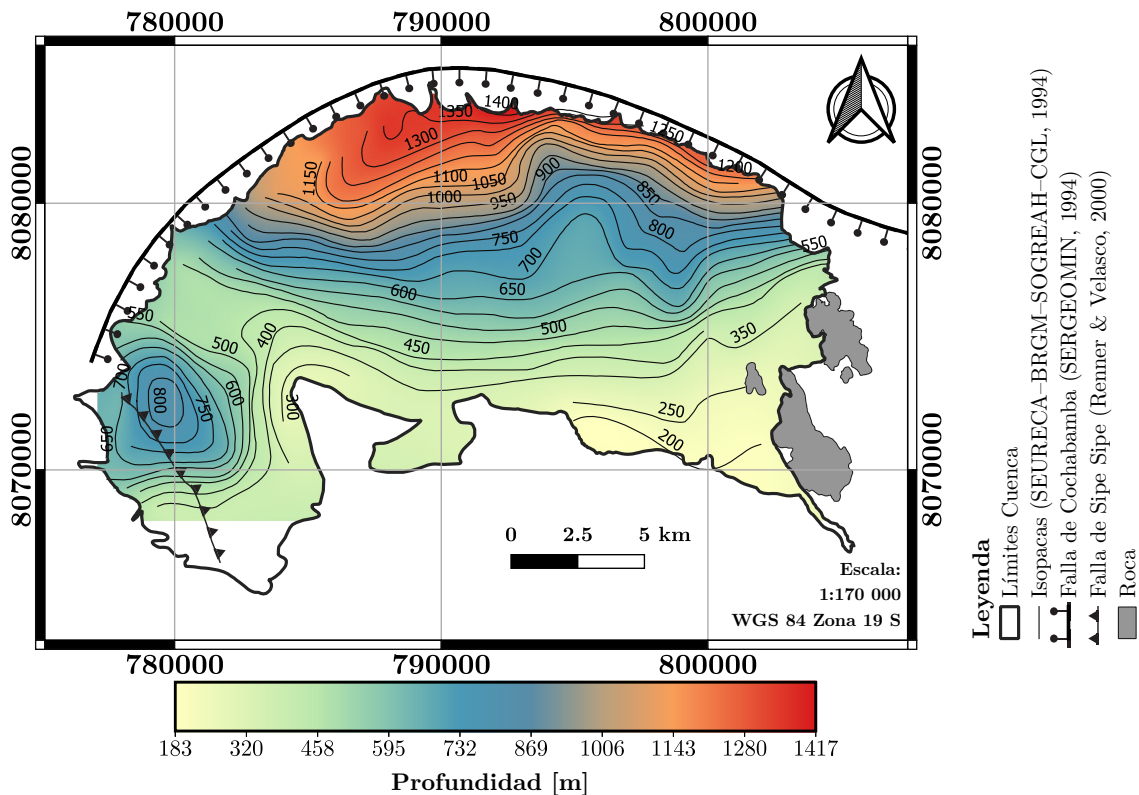


Figura 2.4: Profundidad al basamento rocoso en la Cuenca del Valle Central de Cochabamba (Modificado de SEURECA- BRGM-SOGREAH-CGL, 1994).

En la Cuenca diferentes estudios geofísicos fueron realizados con el objetivo de investigar las aguas subterráneas, determinar los tipos de sedimentos y clasificarlos según sus características y su distribución (PIRHC, 1974; CABAS, 1992). Complementando a estos, a través de un proyecto de cooperación boliviano-francesa se realizó un estudio geofísico mediante sondeos

audiomagnetotelúricos (AMT) (SEURECA- BRGM-SOGREAH-CGL, 1994). Se realizaron 183 sondeos AMT registrados sobre 180 estaciones. Este estudio permitió estimar la profundidad al basamento rocoso, la cual se presenta en la Figura 2.4 y zonificar la Cuenca en base al espesor de los depósitos cuaternarios. En la Figura 2.4 se puede distinguir claramente que, desde la parte central de la Cuenca hacia la zona sur, la profundidad al basamento disminuye hasta alcanzar una profundidad aproximada de 200 m. Por otra parte, hacia la zona norte, la profundidad al basamento incrementa hasta valores superiores a los 1000 m en pie de monte.

2.2.2. Geología de la Cuenca

La Cuenca del Valle Central de Cochabamba es una depresión tectónica que por largos períodos de tiempo ha estado ocupada por un lago. De esta forma, el relleno sedimentario más profundo del valle está compuesto por depósitos lacustres, como se evidencia en la Figura 2.5.

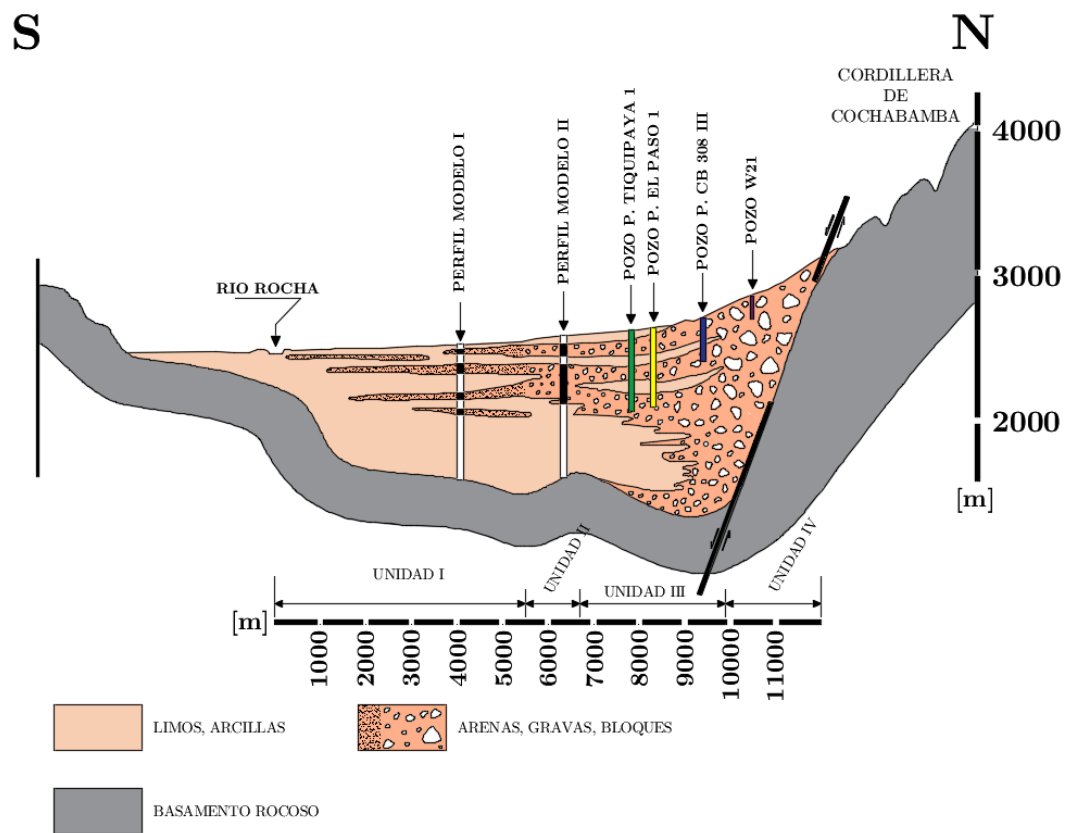


Figura 2.5: Esquema geológico de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba (Modificado de GEOBOL-UN, 1978).

El relleno cuaternario de la Cuenca es complejo y está constituido por depósitos de una gran variedad litológica, como se observa en la Figura 2.5. Esta figura resalta la alta heterogeneidad existente en la distribución de los materiales, tanto en sentido vertical como lateral. Esta heterogeneidad es atribuida a la sedimentación tumultuosa y caótica originada en las variaciones de nivel lagunar y la deposición de los materiales transportados tanto por los glaciales como por los ríos que descienden desde las partes altas de la cordillera (Renner & Velasco, 2000). En esta figura se distingue además, la reducción progresiva del tamaño de

- **Unidad IV.** Abanicos aluviales conformados por gravas y arenas. Estos abanicos en forma de conos han sido transportados y depositados por los ríos Chilahui, Huayculi, Tacata, Pairumani y Llave. Estos sedimentos corresponden a la época del Holoceno superior.
- **Unidad V.** Abanicos aluviales conformados por grandes bloques (cantos rodados y bolones) con diámetros que alcanzan los 7 m, como los que se observan en el abanico del Río Llave. Estos bloques redondeados y pulidos, se encuentran en una matriz de grava, arena y limo. Estos abanicos son de tipo aluvioglacial y corresponden a la época del Holoceno superior.
- **Unidad VI.** Abanicos aluviales conformados por bloques de gran diámetro (cantos rodados y bolones), presentes en matriz de grava arena y limo. Se ubican al borde de la cordillera y son de tipo aluvioglacial. Estos abanicos corresponden a la época del Pleistoceno y son los de mayor edad dentro de la Cuenca.
- **Unidad VII.** Sedimentos del Río Rocha constituidos por limos, arenas y gravas. La granulometría de esta unidad varía en función al origen del aporte de sus afluentes. Los materiales más gruesos se encuentran presentes en la desembocadura del Río Viloma. Estos sedimentos corresponden a la época del Holoceno.
- **Rocas.** Rocas que circundan a la Cuenca de Cochabamba. Las rocas de edad ordovícica se encuentran ampliamente desarrolladas en la parte septentrional del Valle Central (Cordillera del Tunari), así como al sur (norte de Santivañez y sudeste de la Laguna Alalay). Las rocas de este sistema se componen de lutitas, limolitas y areniscas cuarcíticas, correspondientes a las formaciones Capinota, Anzaldo y San Benito, respectivamente. Por otra parte, las rocas del sistema silúrico se encuentran aflorando en el sector sudeste de la Cuenca, nor-central y se extiende al oeste de la Laguna Alalay. Las rocas de este sistema se componen de sedimentos glaciales marinos (intercalaciones de areniscas cuarcíticas) y areniscas correspondientes a las formaciones Cancañiri y Uncia, respectivamente.

Capítulo 3

Modelos de velocidad de ondas de corte y su aplicación en la estimación de periodos fundamentales en la Cuenca de Cochabamba

3.1. Estimación de velocidades de ondas de corte en superficie a partir de información geotécnica disponible

La velocidad de onda de corte (V_s) medida en la superficie de la corteza geológica tiene muchos usos dentro la ingeniería sísmica. Estos usos se extienden desde la clasificación sísmica de sitios, el uso de modelos de movimiento fuerte y la evaluación de la respuesta de sitio.

La Guía Boliviana de Diseño Sísmico presentada el año 2020 introduce por primera vez el termino de V_{s30} para la clasificación sísmica de los suelos en Bolivia. A consecuencia, no se cuenta con información basada en sondeos in-situ sobre la variación de las velocidades de ondas de corte en profundidad, en los suelos de la Cuenca de Cochabamba. En este sentido, solo fue posible estimar modelos de velocidad de ondas de corte que representen a las diferentes unidades geológicas que conforman la Cuenca.

En la Figura 2.6 se presenta la ubicación de los sondeos geotécnicos recopilados, desarrollados por el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Mayor de San Simón en la Cuenca de Cochabamba. Estos consisten en 17 sondeos SPT y 14 sondeos CPT, desarrollados en las unidades geológicas I y II. La profundidad máxima alcanzada por estos sondeos es de 25 m.

Existen tres grupos de ecuaciones empíricas disponibles en la literatura para estimar la velocidad de ondas de corte (V_s) a partir de resultados obtenidos de los sondeos SPT y CPT (Ameratunga et al., 2016; Wair et al., 2012). Para el sondeo CPT, el primer grupo de ecuaciones es aplicable a todo tipo de suelos (Hegazy & Mayne, 1995; Piratheepan, 2002; Mayne, 2006; Andrus et al., 2007; Robertson, 2009), el segundo aplicable a arenas (Sykora & Stokoe, 1983; Baldi et al., 1989; Hegazy & Mayne, 1995; Piratheepan, 2002) y el tercer aplicable a arcillas (Hegazy & Mayne, 1995; Mayne & Rix, 1995; Piratheepan, 2002). Para el sondeo

SPT de igual manera, el primer grupo de ecuaciones es aplicable a todo tipo de suelos (Ohba & Toriuma, 1970; Ohsaki & Iwasaki, 1973; Ohta & Goto, 1978; Imai & Tonouchi, 1982; Lin et al., 1984; Sisman, 1995; Iyisan, 1996; Jafari et al., 1997; Kiku et al., 2001; Hasncebi & Ulusay, 2007), el segundo aplicable a arenas (Kanai, 1966; Shibata, 1970; Ohta & Goto, 1978; Imai & Tonouchi, 1982; Sikora & Stokoe, 1983; Seed et al., 1983; Seed et al., 1986; Lee, 1992; Dickenson, 1994; Pitilakis et al., 1999; Hasncebi & Ulusay, 2007) y el tercer aplicable a arcillas (Ohta & Goto, 1978; Imai & Tonouchi, 1982; Jinan, 1987; Lee, 1992; Pitilakis et al., 1999; Hasncebi & Ulusay, 2007).

En el Anexo A se presentan las ecuaciones empíricas mencionadas. Estas fueron empleadas para estimar la velocidad de onda de corte a partir de los sondeos geotécnicos recopilados. En las Figuras 3.1 y 3.2 se presenta la estimación de V_s en profundidad para uno de los sondeos SPT y CPT recopilados y localizados en la unidad geológica I.

Como se observa en la Figura 3.1, existen diferentes ecuaciones empíricas propuestas por los mismos autores. Esto se debe a que algunas de estas ecuaciones incorporan algún parámetro adicional o estas son aplicables a una edad geológica específica (observar Anexo A).

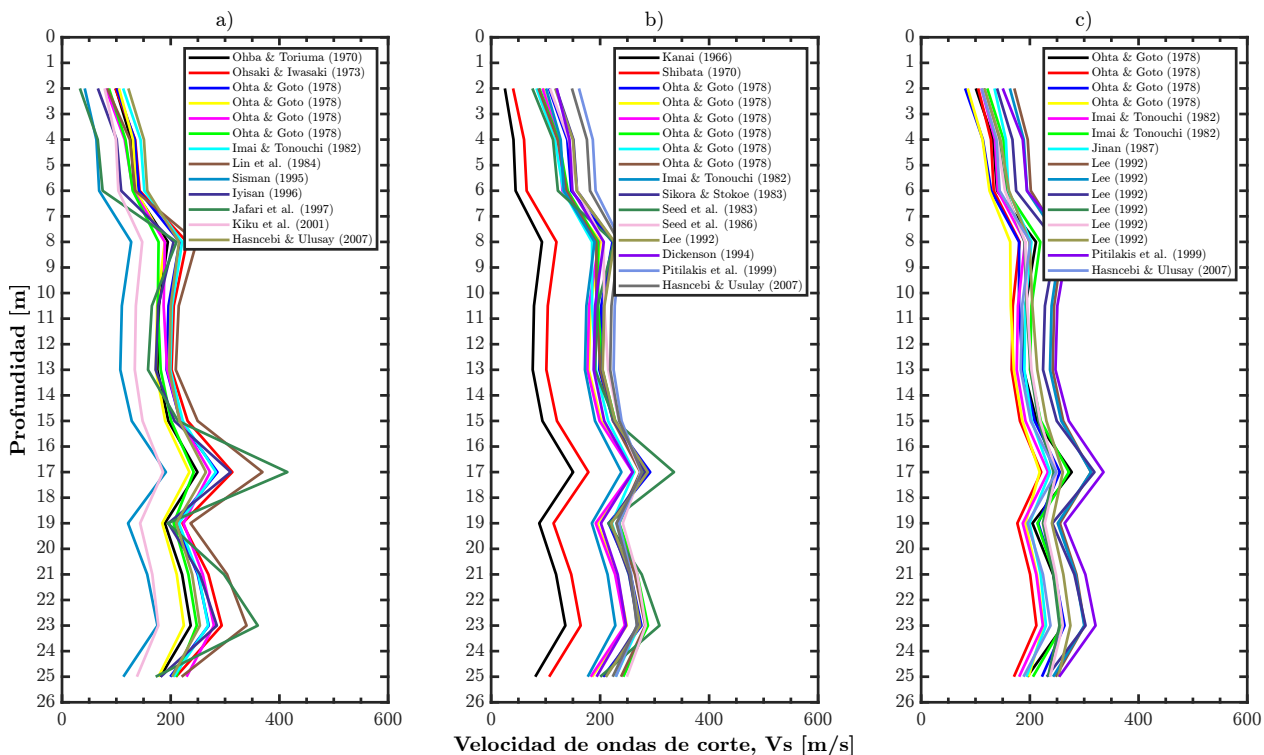


Figura 3.1: Estimación de V_s en profundidad a partir de información recopilada de un sondeo SPT localizado en la unidad geológica I y empleando los tres grupos de ecuaciones empíricas para sondeos SPT. a) Todo tipo de suelos. b) Arenas. c) Arcillas.

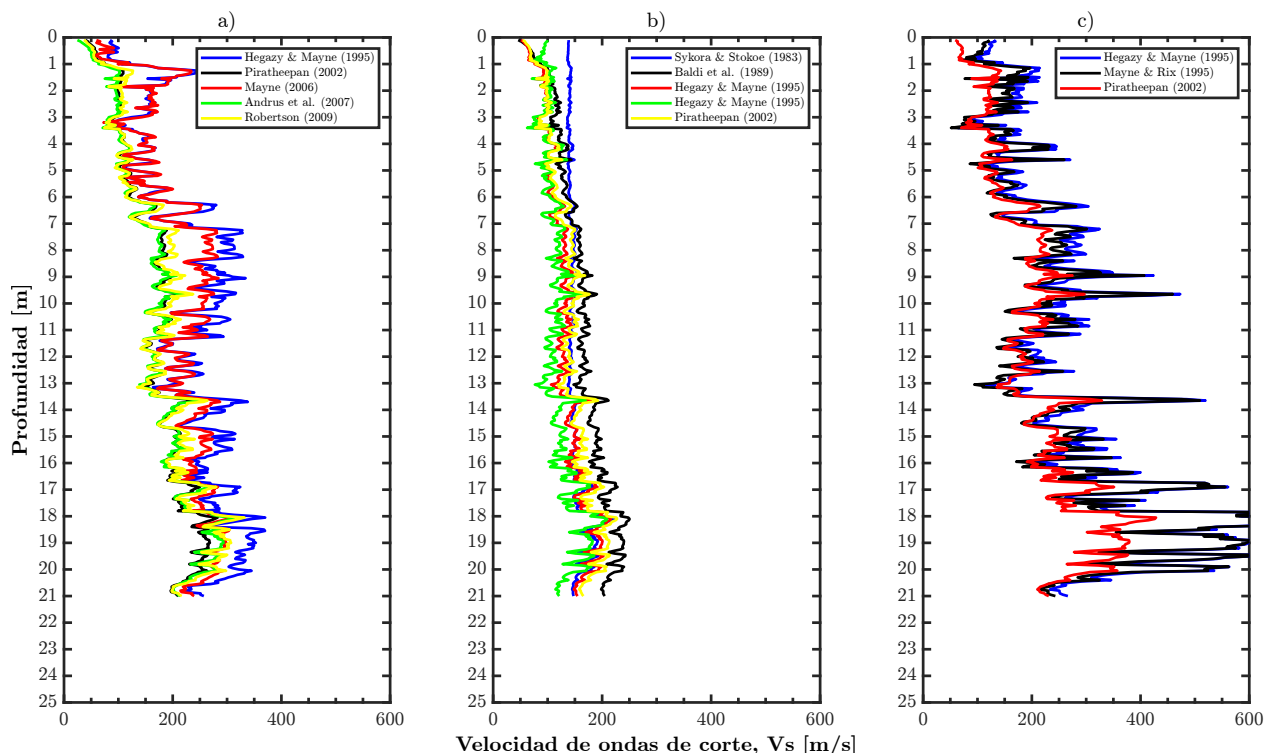


Figura 3.2: Estimación de V_s en profundidad a partir de información recopilada de un sondeo CPT localizado en la unidad geológica I y empleando los tres grupos de ecuaciones empíricas para sondeos CPT. a) Todo tipo de suelos. b) Arenas. c) Arcillas.

Debido a la variabilidad en los resultados de cada una de las ecuaciones evaluadas para cada grupo o tipo de suelo, estas fueron promediadas. En la Figura 3.3 se presenta perfiles de velocidad de ondas de corte promedio, correspondientes a los 24 sondeos ubicados en la unidad geológica I. En la Figura 3.4 se presentan los perfiles de V_s promedio, correspondientes a los 7 sondeos ubicados en la unidad geológica II.

Como se observa en las Figuras 3.3 y 3.4, se ajustaron modelos de velocidad de ondas de corte para estas unidades geológicas, en función de la profundidad $V_s(z)$. Estos modelos representativos se ajustaron mediante una función potencial, la cual tiene la física correspondiente de como varía la velocidad de onda de corte en profundidad (Chaljub et al., 2010; Seht & Wohlenberg, 1999). Además, sigue la tendencia obtenida en la evaluación de V_s en cada grupo de suelos.

Modelos conservadores de V_s son ajustados debido a que los sondeos SPT y CPT al ser del tipo destructivos, llevan al suelo a la rotura (Kottke & Rathje, 2009; Lunne et al., 1997). No obstante, las velocidades de ondas de corte se miden considerando pequeñas deformaciones. Se suma a esto, la dispersión de resultados obtenidos al hacer uso de ecuaciones desarrolladas para arcillas, basados en los sondeos CPT.

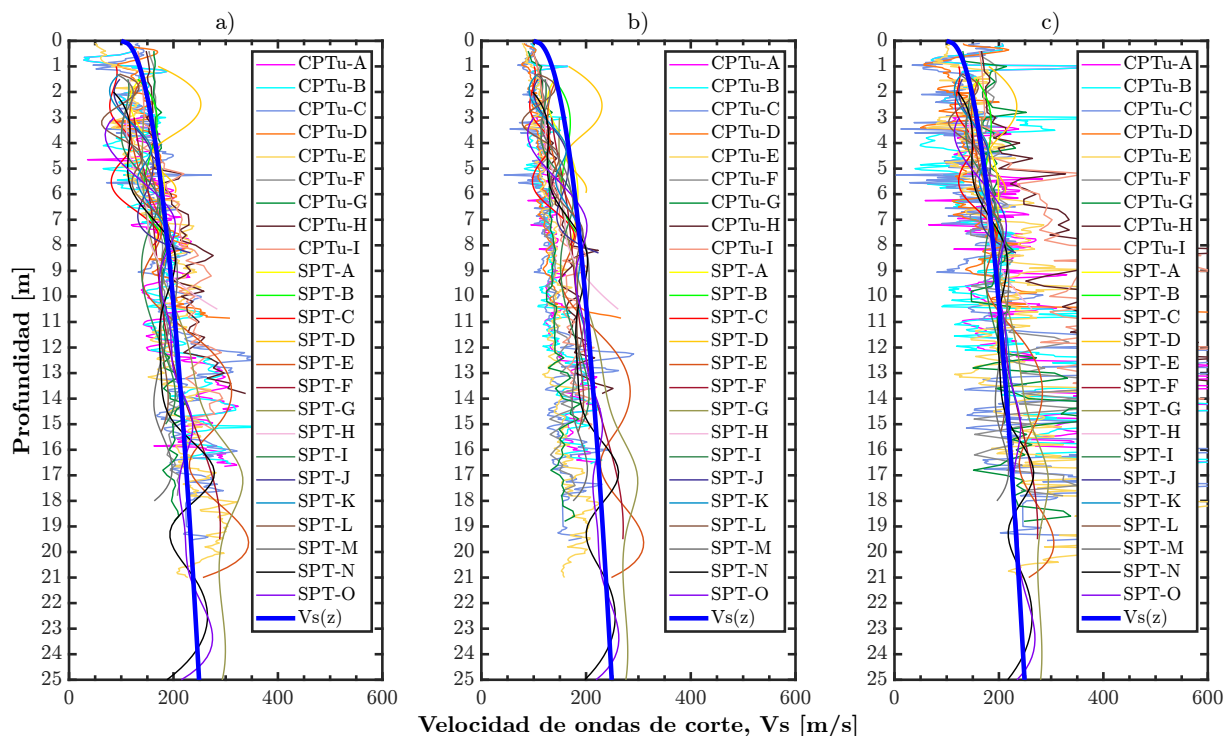


Figura 3.3: Perfiles de V_s promedio según el tipo de suelo, correspondientes a sondeos ubicados en la unidad geológica I. La línea azul gruesa representa el modelo de V_s ajustado para la unidad geológica I. a) Todos los suelos. b) Arenas. c) Arcillas.

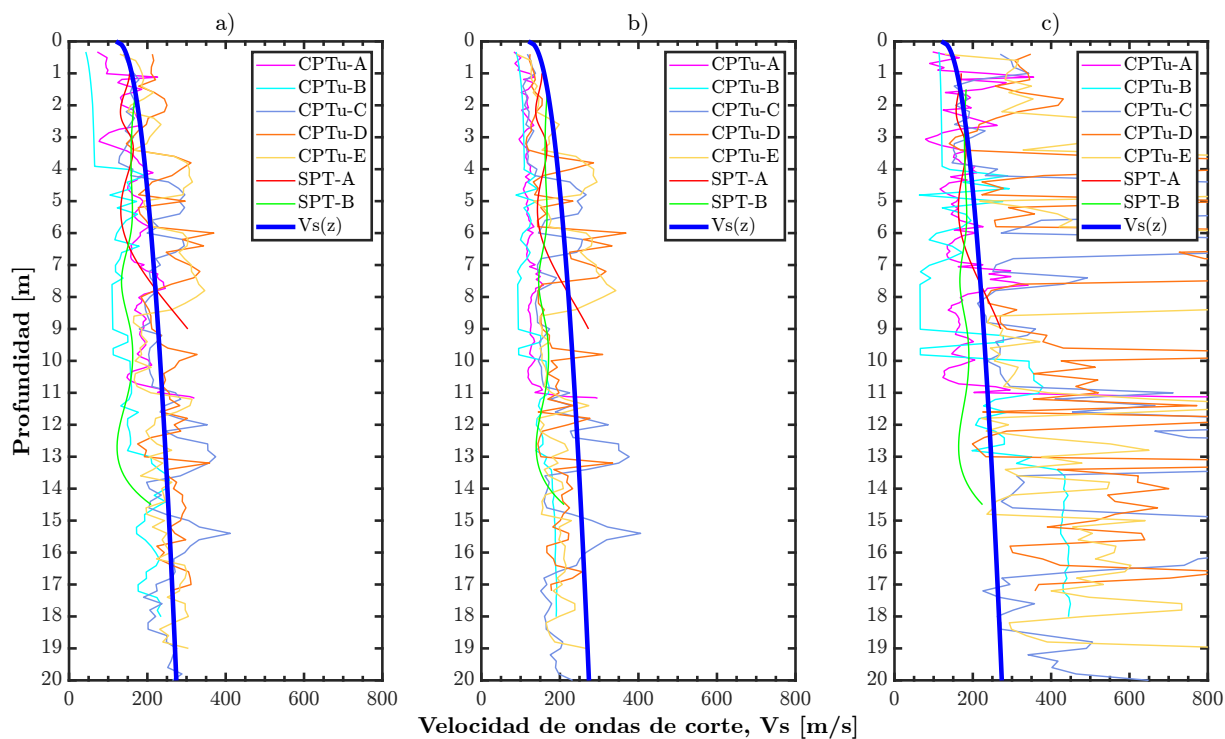


Figura 3.4: Perfiles de V_s promedio según el tipo de suelo, correspondientes a sondeos ubicados en la unidad geológica II. La línea azul gruesa representa el modelo de V_s ajustado para la unidad geológica II. a) Todos los suelos. b) Arenas. c) Arcillas.

3.2. Definición de modelos de velocidad de ondas de corte

En la Tabla 3.1 se presenta las ecuaciones que definen los modelos de velocidad de ondas de corte para las unidades geológicas I y II. Estas ecuaciones extrapolan las tendencias que se ajustan a las correlaciones aplicadas en superficie. Los mismos funcionales fueron utilizados para proponer modelos de Vs para las demás unidades geológicas de la Cuenca. En la Tabla 3.1, H representa el rango de profundidades al basamento representativo de cada unidad geológica. El valor de V_{s30} representativo de cada unidad fue estimado mediante estos modelos de velocidad y considerando estratos de 1 metro de espesor. En la Figura 3.5 se presenta una comparación de estos modelos de velocidad en profundidad.

Tabla 3.1: Modelos de Vs y V_{s30} propuestos para las diferentes unidades geológicas de la Cuenca de Cochabamba..

Unidad Geológica	Modelo Vs ^a [m/s]	V_{s30} [m/s]	$V_{s(z=1000m)}$ [m/s]	H [m]
I	$100 + 35z^{0.45}$	208	884	200-800
II	$120 + 40z^{0.45}$	243	1016	300-930
III-IV	$235 + 35z^{0.48}$	354	1199	300-1300
V-VI	$600 + 35z^{0.50}$	728	1707	400-1400

^a z es la profundidad en metros

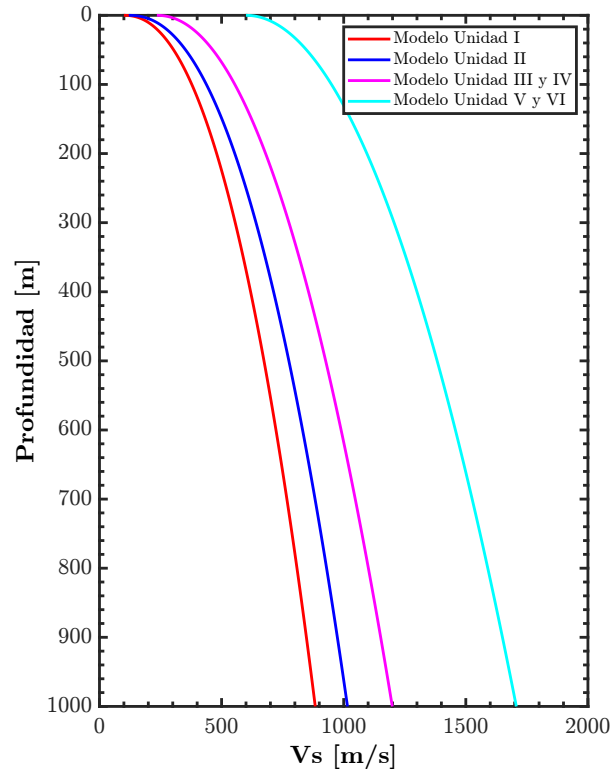


Figura 3.5: Comparación de modelos de Vs propuestos para las diferentes unidades geológicas de la Cuenca de Cochabamba.

Se consideraron iguales modelos de V_s para las unidades geológicas III-IV y V-VI debido a la similitud en la descripción geológica de los suelos que conforman estas unidades.

Los depósitos de suelo correspondientes a las unidades geológicas I, II, III y IV son clasificados como suelos tipo S3 (V_{s30} entre 180 a 370 m/s) según la GBDS (2020). Los suelos ubicados en la unidad V y VI son clasificados como suelo tipo S2 (V_{s30} entre 370 a 760 m/s).

Para comparar los modelos de velocidad propuestos con información existente en la literatura, se recopiló información relacionada a la medición de V_{s30} en sitios con características geológicas similares a la Cuenca de Cochabamba. Los valores de V_{s30} de las unidades geológicas I y II se encuentran muy próximos al promedio medido en materiales aluviales finos ($V_{s30}= 236$ m/s) en el trabajo realizado por Wills & Clahan (2006), en suelos de California. Para las unidades III y IV, el valor de V_{s30} es igual al promedio de los valores medidos en materiales aluviales cuaternarios gruesos ($V_{s30}= 354$ m/s) del mismo estudio.

Para las unidades V y VI, se ajustó un modelo de velocidades de tal manera que su V_{s30} permita clasificarlo según la GBDS (2020) como suelo muy rígido (ligeramente menor al límite que clasifica al material como roca), esto principalmente debido a la presencia de material aluvial de gran diámetro en estas unidades geológicas.

Los modelos de velocidad propuestos representan a depósitos de suelo de diferente rigidez, como puede evidenciarse en la Figura 3.5. Esta diferencia puede también evidenciarse al comparar las magnitudes de V_{s30} correspondientes a cada unidad geológica en el mapa presentado en la Figura 3.6. En esta figura, se evidencia el incremento de la rigidez del suelo hacia la parte norte de la Cuenca, lo cual es consistente con la descripción geológica de los materiales.

En la Figura 3.6 se presenta además, los siete puntos de control seleccionados en la Cuenca para la propagación unidimensional de ondas de corte presentada en el Capítulo 5.

Como se observa en la Figura 2.5, los sedimentos en la Cuenca de Cochabamba se extienden hasta profundidades que superan los 500 m. En este sentido, se recopiló información de registros y modelos de V_s correspondientes a depósitos de sedimentos profundos en varias cuencas sedimentarias del mundo. Esta información permitió verificar que la extrapolación en profundidad de los modelos de V_s propuestos para suelos de la Cuenca, se encuentra dentro de rangos reportados en la literatura. En la Figura 3.7 se presenta la variación y comparación en profundidad de los perfiles de V_s recopilados y los modelos de V_s propuestos.

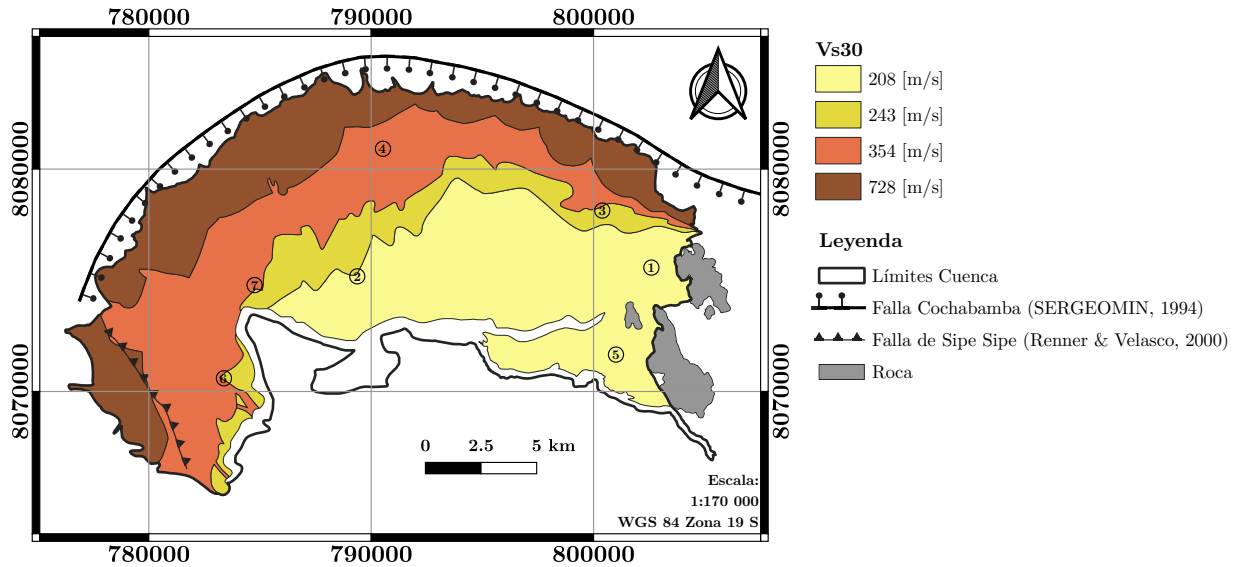


Figura 3.6: Mapa de V_{s30} estimado para la Cuenca de Cochabamba y ubicación de puntos de control seleccionados.

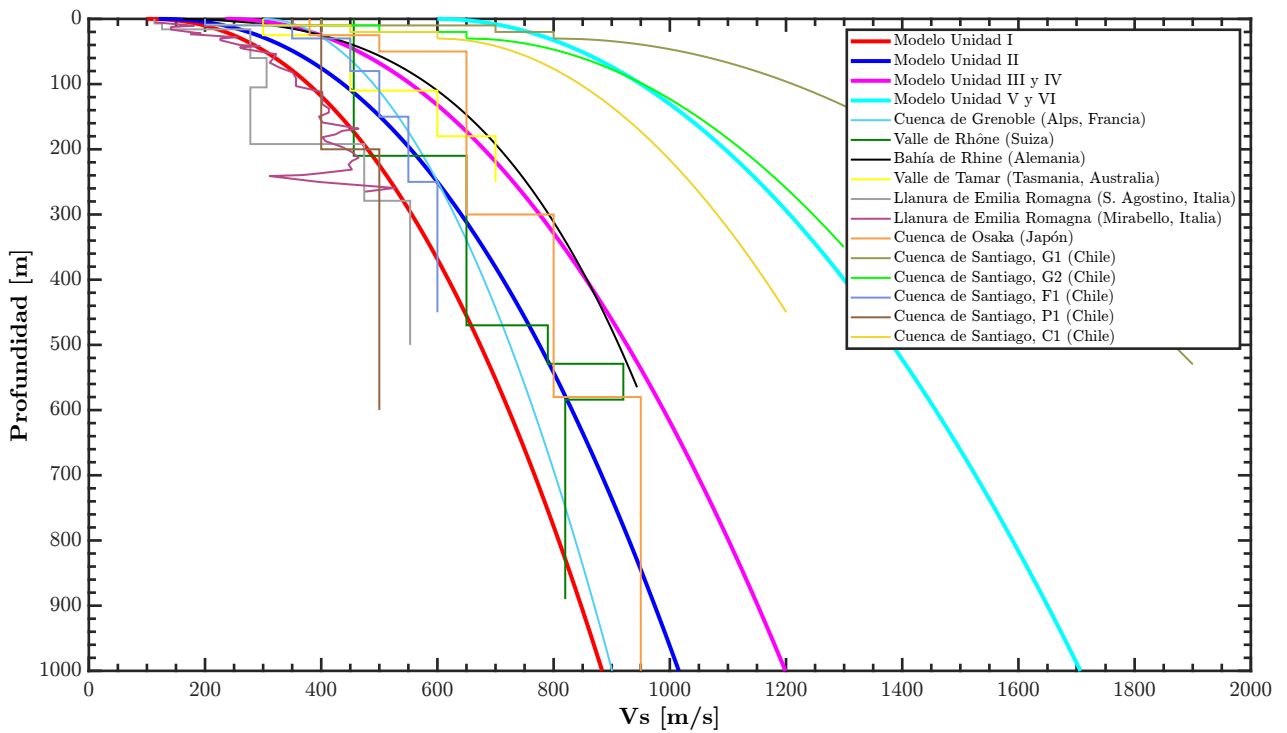


Figura 3.7: Comparación de los modelos de V_s propuestos con perfiles y modelos de V_s reportados en la literatura para depósitos de sedimentos profundos como la Cuenca de Grenoble en Francia (Chaljub et al., 2010; Guéguen et al., 2007), el Valle de Rhône en Suiza (Roten et al., 2006), la Bahía de Rhine en Alemania (Seht & Wohlenberg, 1999), el Valle de Tamar en Australia (Claprod et al., 2012), la Llanura de Emilia Romagna en Italia (Martelli, 2021; Martelli & Romani, 2012; Minarelli et al., 2016), la Cuenca de Osaka en Japón (Uebayashi et al., 2012) y la Cuenca de Santiago en Chile (Acevedo, 2021).

3.3. Incorporación de variabilidad en los modelos de velocidad de ondas de corte

La incertidumbre se asocia a dos principales contribuyentes: incertidumbre epistémica y variabilidad aleatoria (Griffiths et al., 2016; Passeri et al., 2020; Rathje et al., 2020). En la presente tesis, la incertidumbre epistémica se relaciona a la falta de conocimiento e información en la obtención de las velocidades de ondas de corte en profundidad. Por otra parte, la variabilidad aleatoria está relacionada a la alta variabilidad espacial en la distribución de los sedimentos y sus propiedades en la Cuenca de Cochabamba, como puede observarse en el corte transversal presentado en la Figura 2.5.

Para incorporar la incertidumbre en los análisis de amenaza sísmica es necesario considerar variabilidad aleatoria en los parámetros del suelo (Griffiths et al., 2016; Passeri et al., 2020; Tran et al., 2018). Diferentes metodologías e investigaciones reportadas en la literatura se basan en el modelo propuesto por Toro (1995) para incorporar variabilidad aleatoria en las mediciones de V_s .

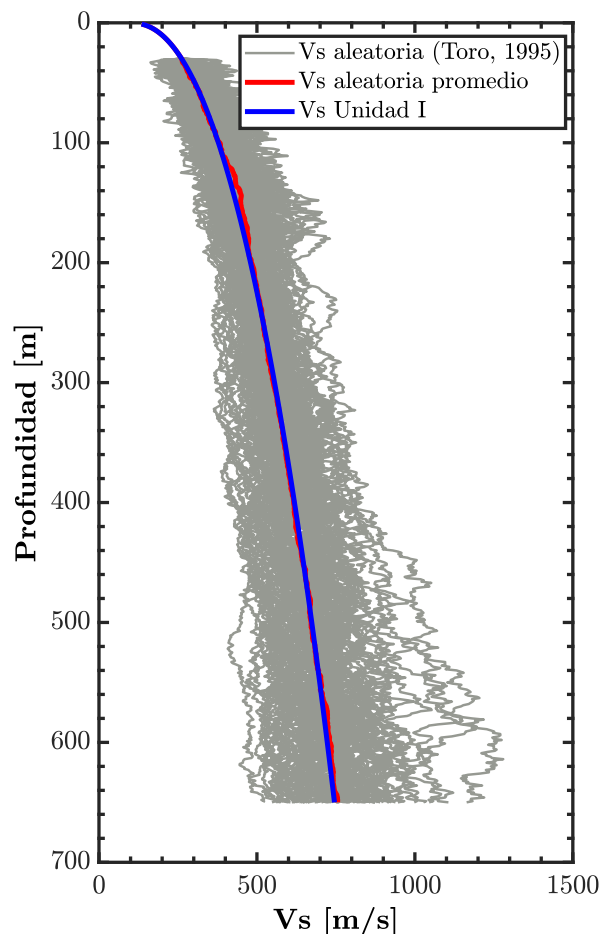


Figura 3.8: Perfiles de V_s aleatorios generados según el modelo propuesto por Toro (1995), para la unidad geológica I.

En resumen, el modelo propuesto por Toro (1995) considera una distribución log-normal y una desviación estándar en la generación de perfiles de V_s aleatorios. Las velocidades para

cada estrato dependen de un perfil de Vs base y son conectados mediante parámetros calculados en función de la profundidad y el espesor de cada estrato. En el Anexo B se presentan las ecuaciones necesarias para su aplicación.

El modelo propuesto por Toro (1995) se implementó en una rutina en Matlab, la cual genera mediante simulaciones de Monte Carlo perfiles aleatorios de velocidad de ondas de corte, a partir de los 30 m de profundidad y considerando estratos de 1 m de espesor. En la Figura 3.8 se presenta la aplicación de este modelo en la generación de 100 perfiles de Vs aleatorios para un depósito de suelos cuya profundidad al basamento es de 650 m y se encuentra ubicado en la unidad geológica I. En esta se presenta además (en trazo de color rojo), el promedio de las velocidades de ondas de corte aleatorias.

3.4. Estimación de periodos fundamentales en la Cuenca de Cochabamba

Los periodos fundamentales de vibración de la Cuenca de Cochabamba se estimaron a partir de la teoría unidimensional de ondas de corte evaluada en los perfiles de Vs definidos para las distintas unidades geológicas.

Para la propagación de ondas de corte 1D se generó una rutina en Matlab, la cual estima el periodo fundamental del suelo para cada punto a partir de su función de transferencia, la cual es calculada a partir de los parámetros definidos para el suelo y la roca presentados en la Tabla 3.2 y los modelos de velocidad presentados en la Tabla 3.1. Se considera que la densidad y el amortiguamiento del suelo permanecen constantes en profundidad. En el Anexo C se presentan las ecuaciones necesarias para el análisis de propagación unidimensional de ondas de corte en un medio multicapas.

Tabla 3.2: Parámetros de suelo y roca empleados en los análisis de propagación unidimensional de ondas de corte

Parámetro	Suelo	Roca
Velocidad de onda de corte Vs [m/s]	Tabla 3.1	2000
Densidad [kN/m ³]	18	27
Amortiguamiento [%]	3	2

Para evaluar el efecto de la variabilidad de las ondas de corte en el periodo fundamental del suelo, se consideró la aplicación del modelo propuesto por Toro (1995). En la Figura 3.9a se presenta los periodos fundamentales calculados para los perfiles de Vs presentados en la Figura 3.8 y haciendo uso de los parámetros de la Tabla 3.2. En la Figura 3.9b se presenta las funciones de amplificación generadas, a partir de las cuales se identificaron los periodos fundamentales para cada perfil de Vs.

Como se observa en la Figura 3.9a, el promedio de todos los periodos fundamentales (T= 4.30 s, línea segmentada de color roja) es ligeramente superior al obtenido a partir del perfil de Vs que no incluye variabilidad en la Figura 3.8 (T= 4.17 s, línea segmentada de color azul).

Las líneas de color magenta representan el rango del promedio de los periodos fundamentales +/- una desviación estándar.

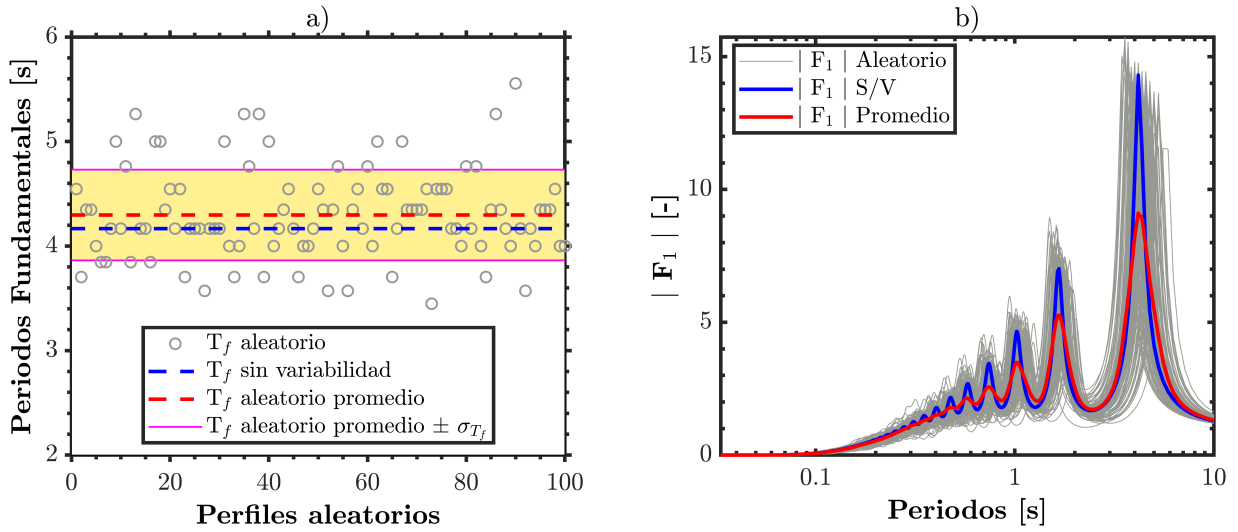


Figura 3.9: Aplicación de la teoría de propagación 1D de ondas de corte para la identificación de periodos fundamentales de vibración del suelo. a) Periodos fundamentales identificados para cada uno de los perfiles de Vs presentados en la Figura 3.8. b) Funciones de amplificación superficie-basamento rocoso.

El ejercicio presentado en la Figura 3.9 se replicó en varios puntos de la Cuenca, los cuales conforman una grilla equidistante de 500 m. En cada punto se generaron 100 perfiles de Vs aleatorios con una profundidad al basamento fija dada por los valores extraídos de la Figura 2.4. Posteriormente, utilizando los parámetros presentados en la Tabla 3.2 y los perfiles de Vs generados, se identificaron y promediaron los 100 periodos fundamentales obtenidos en cada punto. Finalmente, la interpolación de estos periodos fundamentales promedio, permitió construir el mapa presentado en la Figura 3.10.

Como se puede observar en la Figura 3.10, los periodos fundamentales promedio del suelo estimados para la Cuenca, varían desde los 1.10 a 5.00 segundos, aproximadamente. Los menores valores son identificados en la parte sur de la Cuenca donde se tiene espesores de sedimento menores a 400 metros (observar Figura 2.4). Los mayores valores son identificados en la parte central y oeste de la Cuenca (próximo al escarpe de la falla de Sipe Sipe) donde se tiene profundidades al basamento superiores a 500 metros (observar Figura 2.4) y se asientan sobre las unidades geológicas de baja rigidez (observar Figura 3.6). En la parte norte donde se tiene las mayores profundidades al basamento de la Cuenca, se observa una reducción de los periodos fundamentales en comparación a lo observado en la parte central de la Cuenca, esto debido a la alta rigidez de los materiales que conforman estas unidades geológicas (observar Figura 3.6).

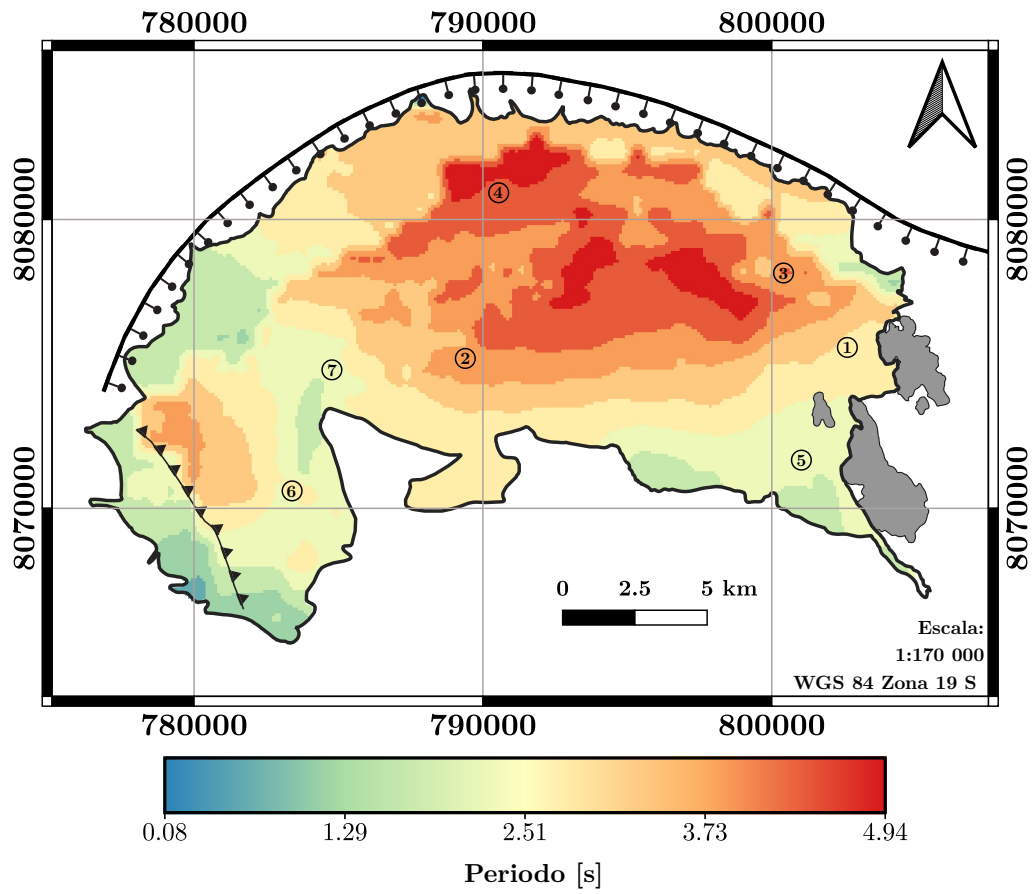


Figura 3.10: Mapa de periodos fundamentales promedio de la Cuenca de Cochabamba.

Capítulo 4

Estimación de la respuesta en superficie mediante modelos de movimiento fuerte (GMMs)

Los modelos de movimiento fuerte (GMMs) son utilizados en estimaciones de amenaza sísmica (determinística y probabilística) para evaluar los niveles promedios esperados del movimiento del terreno y su incertidumbre asociada, en cualquier sitio y para un escenario sísmico determinado (Boore et al., 2014; Lanzano et al., 2019). Las GMMs son calibradas mediante regresiones entre las amplitudes del movimiento del terreno (empíricas o simuladas) y un set de variables predictoras como la magnitud del terremoto, la distancia fuente-sitio y las condiciones locales del suelo (Graizer & Kalkan, 2016).

La dispersión de las GMMs resulta de la aleatoriedad en la mecánica de ruptura, la variabilidad y heterogeneidad de la fuente, la ruta de viaje y las condiciones del sitio. La dispersión en los datos es cuantificada mediante límites de confianza (Campbell, 1985) o mediante la desviación estándar del parámetro predicho. Según Kramer (1996), la incertidumbre debe tenerse en cuenta en los análisis de amenaza sísmica.

4.1. GMMs utilizadas y parámetros de entrada

La limitación principal en la aplicación de las GMMs desarrolladas para terremotos superficiales, es que estas no consideran eventos superficiales ocurridos en Bolivia. Para abordar esta limitante y evitar sesgos asociados al uso de un solo modelo, se han considerado seis GMMs en este estudio. Los modelos de movimiento fuerte seleccionados junto con sus rangos de aplicabilidad son presentados en la Tabla 4.1. En la Tabla 4.2 se resume los parámetros de entrada requeridos por cada GMM.

En la Tabla 4.2, B_1 es la profundidad donde se alcanza $V_s=1$ km/s en el sitio en km, $B_{1.5}$ es la profundidad donde se alcanza $V_s=1.5$ km/s en km, R_{rup} es la distancia al plano de ruptura en km, R_{jb} es la distancia Joyner-Boore en km, R_x es la distancia horizontal en km desde el borde superior de ruptura (solo usado para sitios en el lado del hanging wall), R_{y0} es la distancia horizontal en km desde el final de la ruptura medida paralela al rumbo, FT es el tipo de falla (normal, inversa y transcurrente), FDA es el ángulo de buzamiento de la falla en grados, FHW es el parámetro que permite incluir efectos de hanging wall en fallas de tipo

inversa, W es el ancho de ruptura de la falla en km, y Z_{tor} es la profundidad hasta la parte superior de la ruptura en km.

Tabla 4.1: Rangos de aplicabilidad de las GMMs seleccionadas

N°	GMM	M_w	V_{s30} [m/s]	R_{rup} [km]
1	Li et al. (2020)	≥ 6	160-1500	≤ 200
2	Lanzano et al. (2019)	3.5-8	≤ 1500	≤ 200
3	Graizer & Kalkan (2016)	5.0-8.0	200-1300	≤ 250
4	Cauzzi et al. (2015)	4.5-7.9	Eurocode 8 site classes	≤ 150
5	Boore et al. (2014)	3.0-8.5	150-1500	≤ 400
6	Abrahamson et al. (2014)	3.0-8.5	180-1500	≤ 300

Tabla 4.2: Parámetros de entrada de cada GMM

GMM	M_w	V_{s30}	B_1	$B_{1.5}$	R_{rup}	R_{jb}	R_x	R_{y0}	FT	FDA	FHW	Z_{tor}	W
Li et al. (2020)	x	x			x				x		x		
Lanzano et al. (2019)	x	x			x				x				
Graizer & Kalkan (2016)	x	x		x	x				x				
Cauzzi et al. (2015)	x	x			x				x				
Boore et al. (2014)	x	x	x			x			x				
Abrahamson et al. (2014)	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x

4.2. Definición de escenarios de activación sísmica

Para la presente tesis, se utilizaron las correlaciones empíricas desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994) para estimar la magnitud de los terremotos generados por las fallas Cochabamba y Sipe Sipe, a partir de su longitud de ruptura. Estas ecuaciones son presentadas a continuación:

$$\text{Falla normal: } M_w = 4.86 + 1.32 \log(L_{rup}) \quad (4.1)$$

$$\text{Falla inversa: } M_w = 5.00 + 1.22 \log(L_{rup}) \quad (4.2)$$

En la Tabla 4.3 se presentan las magnitudes estimadas para cada una de las fallas, haciendo uso de las Ecuaciones 4.1 y 4.2.

En la tabla también se presenta el ancho de ruptura estimado para cada falla (W), haciendo uso de ecuaciones empíricas desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994), basadas en la magnitud de momento y el tipo de falla. Además, se presenta el buzamiento correspondiente a cada falla que en el caso de la falla de Sipe Sipe, fue asumido de acuerdo a las recomenda-

ciones realizadas por Kaklamanos et al. (2011).

Tabla 4.3: Magnitudes estimadas para la falla Cochabamba y Sipe Sipe, a partir de su longitud de ruptura y ecuaciones empíricas desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994).

Falla	Largo de ruptura, L_{rup} [km]	Tipo	Buzamiento [°]	Ancho de ruptura, W [km]	Magnitud momento, M_w
Sipe Sipe	10 ± 5	Inversa	40^a	9	6.2
Cochabamba	45 ± 10	Normal	60	21	7

^a Parámetro asumido

4.3. Resultados obtenidos en la aplicación de GMMs en la Cuenca de Cochabamba

Los parámetros de entrada presentados en la Tabla 4.2 fueron incorporados a la grilla de puntos utilizada para construir el mapa de periodos fundamentales (Figura 3.10). Esta grilla, al igual que el vector de puntos utilizado para representar a las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, posee coordenadas en las tres direcciones (E, N, Z), lo que permitió estimar los parámetros de entrada referentes a distancias entre las fallas y los puntos evaluados (R_{rup} , R_{jb} , R_x y R_{y0}).

Para la correcta estimación de las distancias (R_x y R_{y0}) utilizadas por el modelo propuesto por Abrahamson et al. (2014), se utilizó el trabajo desarrollado por Kaklamanos et al. (2011), que define claramente estos y otros parámetros de entrada de esta GMM.

En la Tabla 4.4 se presenta el criterio para la definición de los parámetros B_1 y $B_{1.5}$. B_1 es seleccionado como el menor valor entre los dos contenidos en el vector ($[c, H]$). En este vector, c es la profundidad en km identificada para cada unidad geológica donde se alcanza $V_s=1$ km/s y H es la profundidad al basamento en km en el punto evaluado. El mismo criterio es aplicado en la definición de $B_{1.5}$ para la unidad geológica V . Para las demás unidades, $B_{1.5}$ es igual a la profundidad al basamento en el punto evaluado (H).

Tabla 4.4: Criterio para la definición de B_1 y $B_{1.5}$ en función de la unidad geológica

Unidad Geológica	B_1 [km]	$B_{1.5}$ [km]
I	[1.35, H]	H
II	[1.00, H]	H
III	[0.62, H]	H
V	[0.13, H]	[0.66, H]

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las GMMs de la Tabla 4.1, en la estimación del PGA y las pseudo-aceleraciones (con un amortiguamiento de

5%) en la Cuenca de Cochabamba. El evento analizado corresponde al originado por la falla Cochabamba (M_w 7). Los resultados asociados al evento generado por la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2), son presentados en el Anexo D.

En la Figura 4.1 se presenta los mapas de PGA construidos a partir de valores promedio de las GMMs presentadas en la Tabla 4.1, para un evento generado por la Falla Cochabamba (M_w 7). En la Figura 4.2 se presenta los mapas de PGA calculados a partir de valores promedio más la desviación estándar de cada GMM.

Los mapas de pseudo-aceleraciones (PSa) generados para diferentes periodos y obtenidos mediante la aplicación de la GMM propuesta por Lanzano et al. (2019), son presentados en las Figuras 4.3 y 4.4. Los mapas de PSa de la Figura 4.3 fueron construidos en base a los valores promedio de esta GMM, mientras que los de la Figura 4.4 en base a los valores promedio más la desviación estándar. Se seleccionó esta GMM para la construcción de estos mapas debido a que es la que genera las mayores solicitaciones sísmicas en superficie para una falla normal como es la falla Cochabamba.

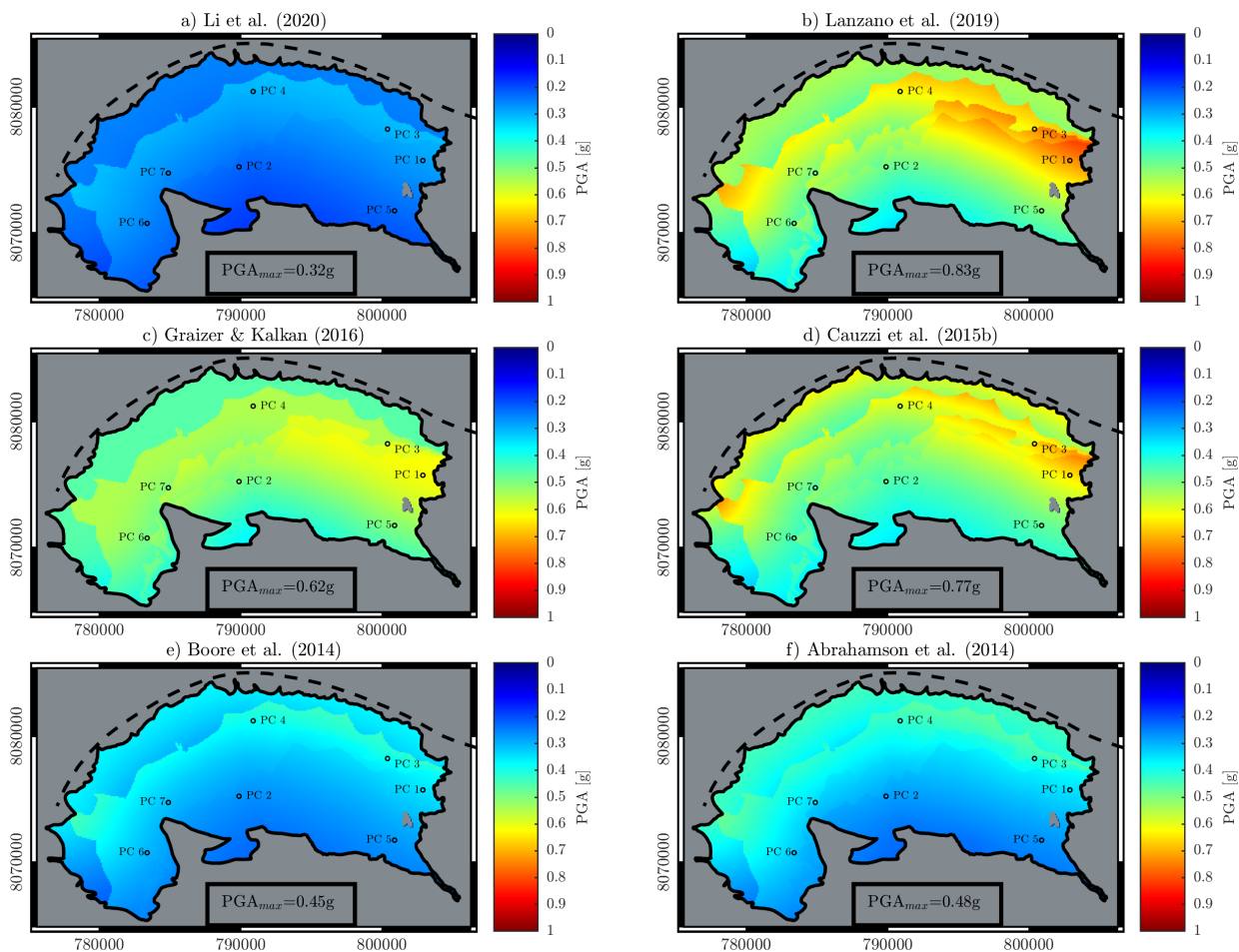


Figura 4.1: Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio obtenidos por cada GMM, para un evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba.

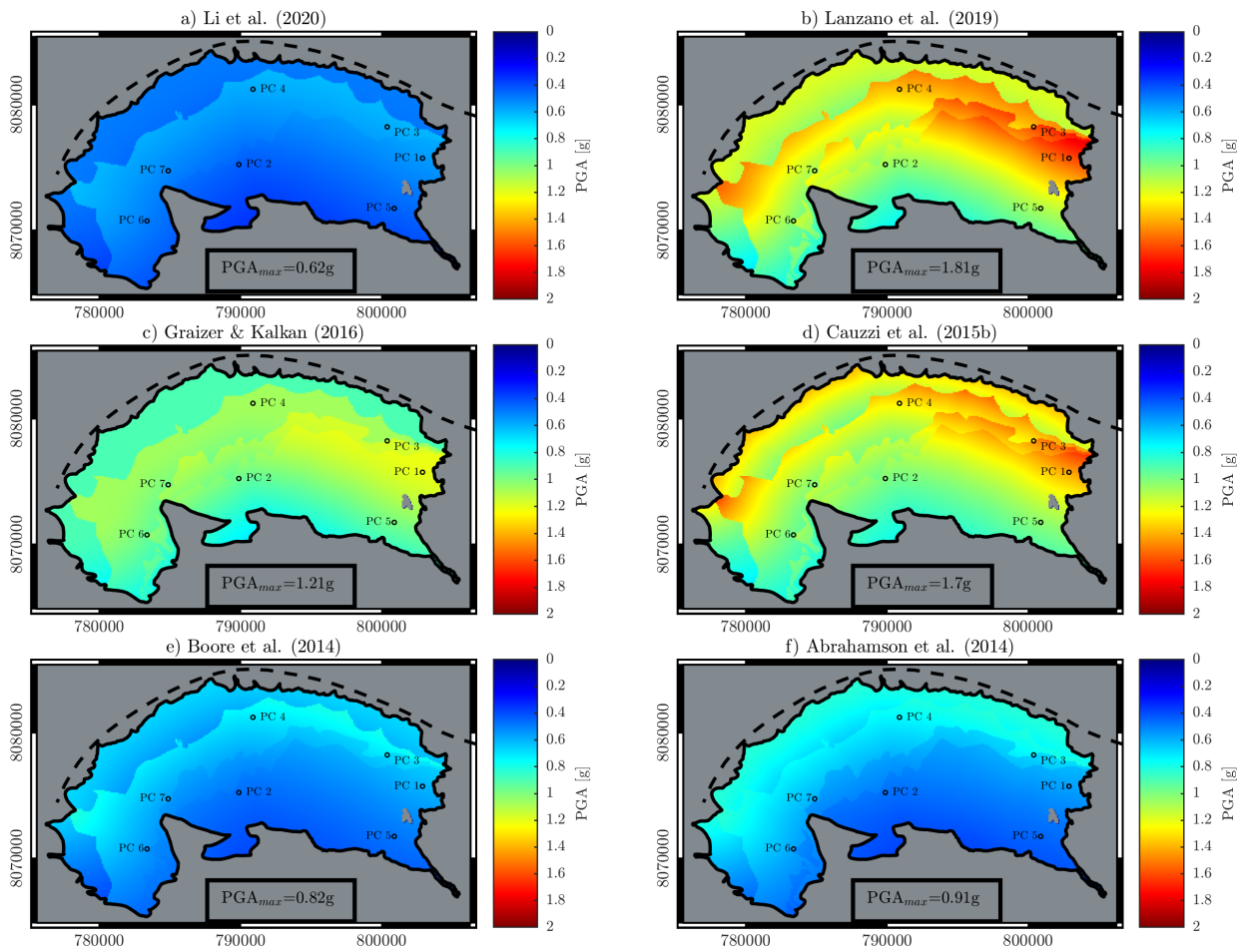


Figura 4.2: Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio más la desviación estándar de cada GMM, para un evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba.

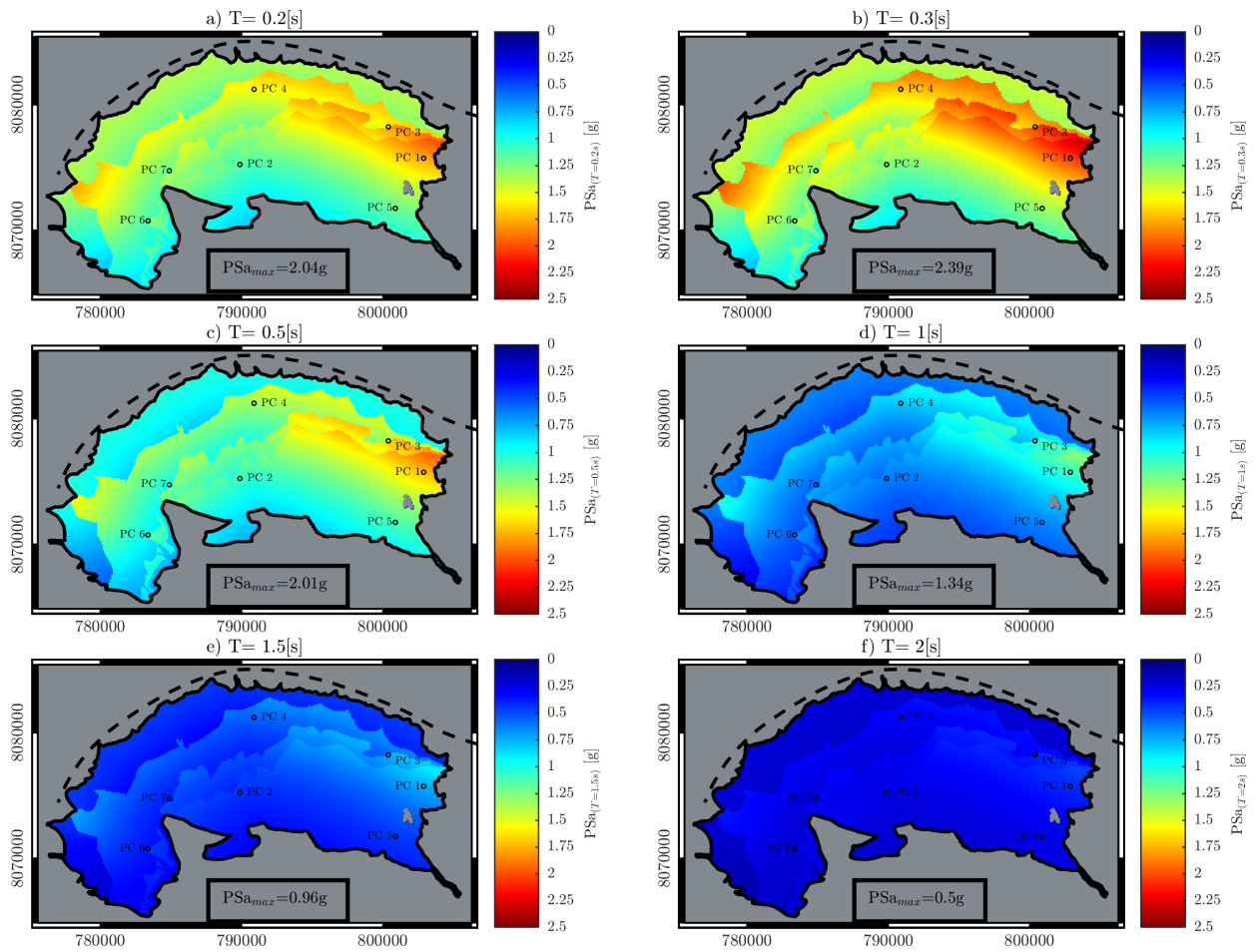


Figura 4.3: Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos a partir de valores promedio obtenidos del modelo propuesto por Lanzano et al. (2019), para un evento originado por la falla Cochabamba (M_w 7).

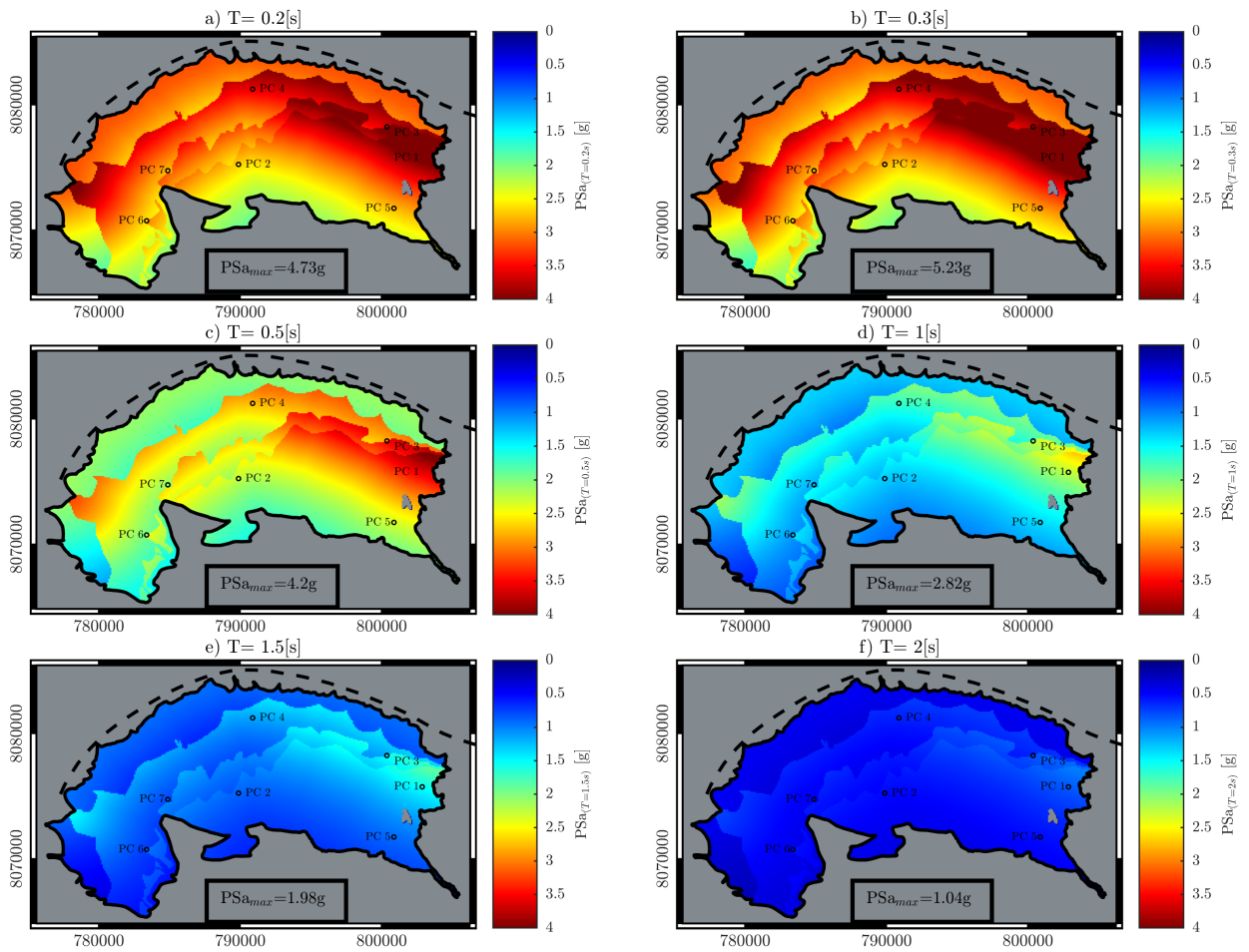


Figura 4.4: Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos en base a los valores promedio más la desviación estándar del modelo propuesto por Lanzano et al. (2019), para un evento originado por la falla Cochabamba (M_w 7).

Capítulo 5

Propagación unidimensional de registros sísmicos en puntos de control

5.1. Metodología

En este capítulo se realizó para cada punto de control seleccionado (presentados en la Figura 3.6), la propagación unidimensional de registros sísmicos espectro-compatibles a través de perfiles de suelo con variabilidad de la velocidad de ondas de corte y la profundidad al basamento rocoso. La metodología aplicada es resumida en el diagrama de flujo presentado en la Figura 5.1.

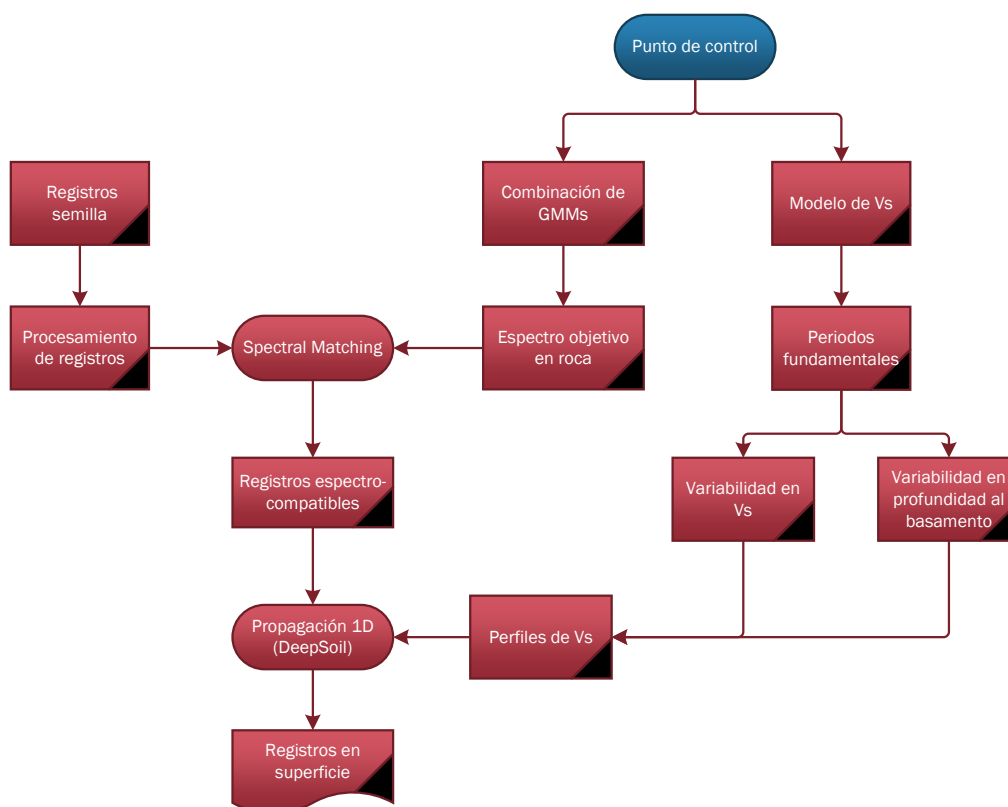


Figura 5.1: Diagrama de flujo de la metodología para la propagación unidimensional de registros sísmicos en los puntos de control seleccionados.

5.2. Puntos de control

Los puntos de control en la Cuenca se presentan sobre el mapa de uso de suelos generado en la Figura 5.2. Como se puede observar, los puntos de control coinciden con las principales áreas urbanas de la Cuenca. En la Tabla 5.1 se presentan las características de los puntos de control seleccionados.

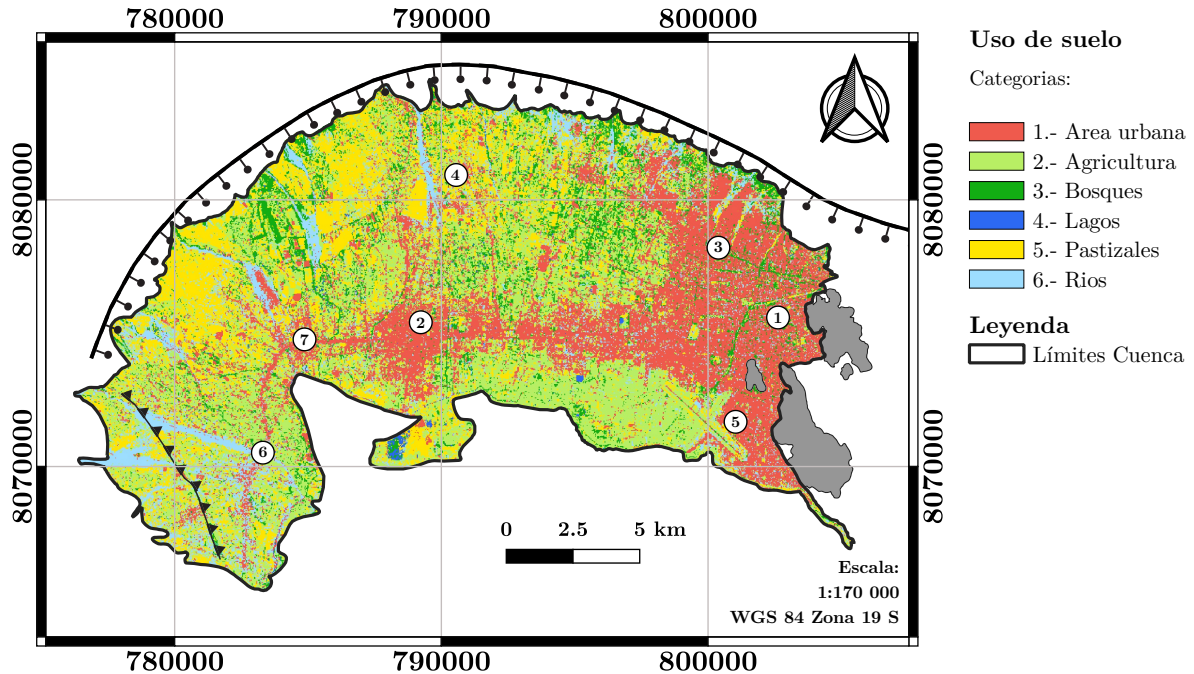


Figura 5.2: Mapa de uso de suelos de la Cuenca de Cochabamba con la ubicación de los puntos de control seleccionados.

Tabla 5.1: Características de los puntos de control seleccionados

PC	V_{s30} [m/s]	H [m]	T_f [s]	R_{jb} falla de Cochabamba [km]	R_{jb} falla de Sipe Sipe [km]	Ubicación
1	208	351	2.86	4.48	23.02	E. Los Tiempos
2	208	532	3.70	9.42	10.93	Quillacollo
3	243	713	3.85	3.60	21.60	C. Norte
4	354	1150	4.35	3.82	15.24	El Paso
5	208	217	2.08	8.95	19.86	Aeropuerto
6	243	418	2.78	7.37	3.04	P. Viloma
7	354	358	2.00	6.80	6.59	Vinto

5.3. Generación de espectros objetivo

El espectro objetivo permite incorporar el efecto de la fuente sísmica y la atenuación del movimiento generado por la distancia a la fuente. El espectro objetivo se obtiene al evaluar cada GMM de la Tabla 4.1 con los parámetros de entrada correspondientes a cada modelo, definidos en la Tabla 4.2. Dado que no se consideran los efectos de amplificación del suelo, las GMM se avalúan en roca, por lo que considera un $V_{s30}=1530$ m/s.

En la Figura 5.3a se presentan los espectros de pseudo-aceleraciones en roca para el punto de control 1, generados mediante las GMMs presentadas en el Capítulo 4 y considerando los valores promedio de cada modelo (μ). En la Figura 5.3b se presentan los espectros de pseudo-aceleraciones en roca, considerando el promedio más una desviación estándar de cada modelo ($\mu + \sigma_{GMM}$).

Los espectros objetivos presentados en la Figura 5.3c son el promedio aritmético de los espectros de pseudo-aceleraciones construidos a partir de los valores promedio de las GMMs (espectro objetivo de color negro) y el promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones generados en base a los valores promedio más la desviación estándar de las GMMs (espectro objetivo de color rojo).

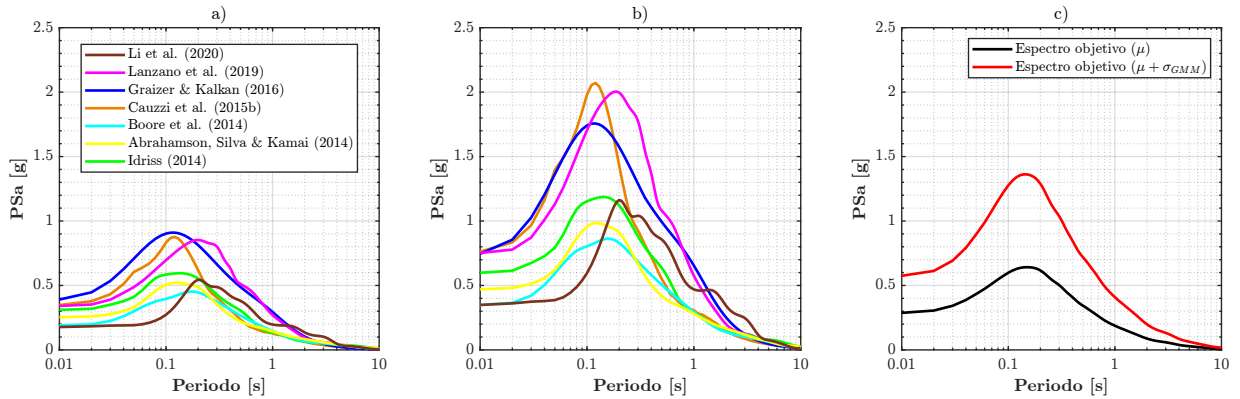


Figura 5.3: Espectros objetivo para el punto de control 1, considerando un evento M_w 7 originado por la falla Cochabamba (falla normal). a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

Como se puede observar al comparar las Figuras 5.3a y 5.3b, los valores que alcanzan los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos al considerar la desviación estándar, duplican a los espectros construidos en base al valor promedio, lo que evidencia la alta dispersión y variabilidad de la data utilizada en la calibración de estos modelos. Por lo anteriormente mencionado, se empleó el espectro objetivo que incluye la desviación estándar en su cálculo para el ajuste espectral de los registros semilla.

Los espectros objetivo correspondientes a los demás puntos de control y los asociados a la falla de Sipe Sipe, son presentados en el Anexo F.

5.4. Selección de registros semilla

Para la selección de los registros semilla representativos de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, se consideró el tipo de falla, la distancia al plano de ruptura, la magnitud del evento y el V_{s30} correspondiente a la estación. La Tabla 5.2 resume las principales características de los registros semilla seleccionados.

Tabla 5.2: Resumen de las características de los registros semillas seleccionados.

RSN	Terremoto	Falla	Distancia [km]	Vs30 [m/s]	PGA [g]	P.C.
4462	L'Aquila (2009), Mw 6.3	Normal	26.86	200	E-O: 0.06	2-7
N-S: 0.07						
4472			21.40	613	E-O: 0.08	2, 5
N-S: 0.09						
4477			6.40	488	E-O: 0.15	1-7
N-S: 0.15						
4480			6.27	475	E-O: 0.67	1, 3, 4, 6, 7
N-S: 0.56						
4481			6.81	685	E-O: 0.49	1-7
N-S: 0.52						
4482	6.55	552	E-O: 0.41	1, 3, 4, 6, 7		
N-S: 0.44						
4483	5.38	717	E-O: 0.34	1-7		
N-S: 0.36						
4489	15.77	421	E-O: 0.04	2, 5		
N-S: 0.06						
2385	Chi-Chi (1999), Mw 7.7	Inversa	21.11	625	E-O: 0.06	1-7
N-S: 0.10						
2389			29.18	615	E-O: 0.06	1-7
N-S: 0.07						
2635			9.81	672	E-O: 0.09	1-7
N-S: 0.09						
3471			26.31	573	E-O: 0.06	1-7
N-S: 0.11						
3472			25.85	615	E-O: 0.11	1-7
N-S: 0.12						
1011	Northridge (1994), Mw 6.7		20.29	1223	E-O: 0.11	1-7
					N-S: 0.16	

Se recurrió a la base de datos mundial del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER, NGA-West2) debido a la falta de acelerogramas de terremotos corticales de altas intensidades, registrados en la Cuenca de Cochabamba.

Para el evento asociado a la falla Cochabamba de M_w 7 (falla normal), se seleccionó registros sísmicos del terremoto de L' Aquila de 2009 (M_w 6.3), originado por una falla normal. Para la falla de Sipe Sipe de M_w 6.2 (falla inversa), se seleccionó registros del terremoto de Chi-Chi de 1999 (M_w 7.7) y del terremoto de Northridge de 1994 (M_w 6.7), ambas originadas por fallas del tipo inversa.

La primera columna en la Tabla 5.2 corresponde a la denominación realizada por el PEER a cada registro de aceleración (RSN), para una determinada estación. Para el ajuste espectral y propagación unidimensional, las componentes horizontales de estos registros semilla fueron utilizados. Los registros semilla utilizados por cada punto de control se indican en la última columna de esta tabla.

5.5. Ajuste espectral

Para el ajuste espectral se utilizó la metodología propuesta por Adekristi (2013), la cual trabaja en el dominio del tiempo y modifica el registro semilla mediante la adición de ondículas (wavelets) que permiten su escalamiento. Los parámetros empleados en el ajuste espectral son los recomendados por Adekristi & Eatherton (2016).

Los periodos de ajuste inicial y final para todos los registros semilla son 0.05 y 6 segundos, respectivamente. Para evitar problemas de divergencia se dividió el conjunto de periodos de ajuste en tres rangos. El primero, de 0.05 a 1 s, el segundo, de 0.05 a 3 s y el tercero, de 0.05 a 6 s.

Un número de 6 registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales fueron ajustados espectralmente por cada punto de control (12 registros de aceleración en total). Los resultados obtenidos para el punto de control 1 y evento generado por la falla Cochabamba, son presentados en la Figura 5.4. El ajuste espectral para los puntos de control restantes y los asociados a la falla de Sipe Sipe, son presentados en el Anexo G.

En la Figura 5.4a se presenta para cada registro, el espectro objetivo (color negro), los espectros semilla en sus dos componentes horizontales (color azul para la E-O y celeste para la N-S) y los espectros modificados (color rojo para la E-O y anaranjado para la N-S). En las Figuras 5.4b y 5.4c se presenta los registros de aceleración semilla y espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales, respectivamente (asociados a los colores ya descritos, correspondientes a sus espectros en la Figura 5.4a).

Como se evidencia en la Figura 5.4, las componentes horizontales de los registros semilla RSN: 4477 y 4483 son los que sufren un mayor escalamiento y ajuste en comparación a los otros registros.

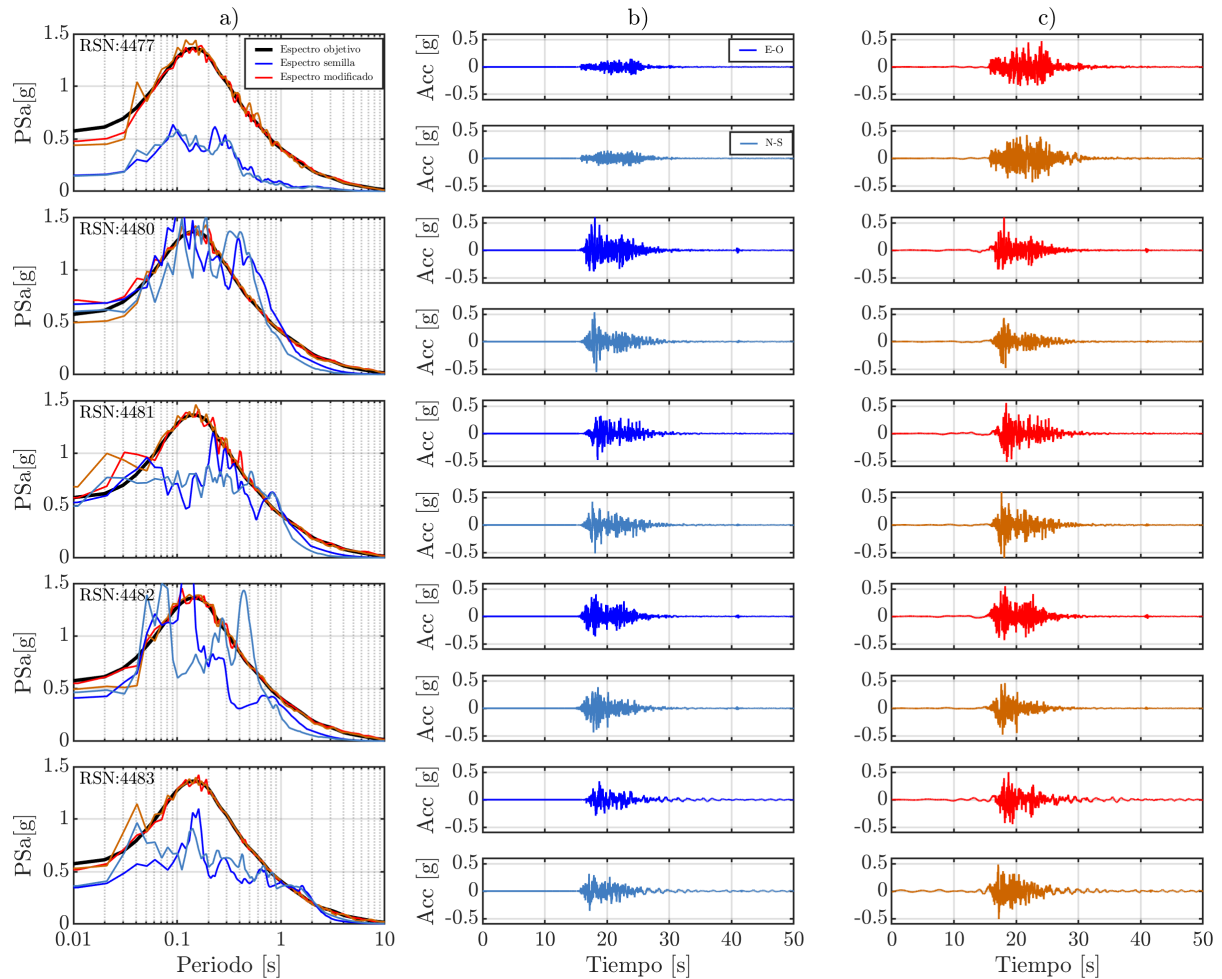


Figura 5.4: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4477, 4480, 4481, 4482 y 4483) para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles obtenidos en sus dos componentes horizontales.

5.6. Propagación unidimensional de ondas de corte

Finalizado el ajuste espectral, los registros de aceleración espectro-compatibles fueron utilizados para la propagación unidimensional de ondas de corte en los puntos de control. Este proceso fue realizado con el software DeepSoil (Hashash et al., 2016) y se efectuaron dos tipos de análisis. En el primer tipo de análisis, se consideró un comportamiento lineal del suelo (en el dominio de la frecuencia), cuyos parámetros empleados para los geomateriales son los presentados en la Tabla 3.2. Además de considerar simulaciones con un amortiguamiento constante del suelo de 3%, se simularon amortiguamientos del 5 y 7%. En el segundo tipo de análisis, se consideró el método lineal equivalente del suelo, empleando las curvas de degradación de rigidez expuestas en la subsiguiente sección, definidas en función del tipo de suelo. En todos los casos, se consideró que el registro de aceleraciones se impone en un afloramiento rocoso (outcrop).

5.6.1. Selección de perfiles de velocidad de ondas de corte

Los perfiles de V_s seleccionados para realizar la propagación de ondas en cada punto de control incorporan variabilidad en la velocidad de ondas de corte y la profundidad al basamento rocoso. Por tanto, los perfiles de V_s seleccionados son diferenciados y presentados según el tipo de variabilidad que estos consideran.

5.6.1.1. Perfil de suelo con variabilidad en la velocidad de ondas de corte

Para evaluar el efecto de la variabilidad de V_s en la respuesta en superficie, se recopilaron los perfiles de V_s generados aleatoriamente y sus correspondientes periodos, los cuales fueron utilizados para la conformación del mapa de periodos fundamentales promedio, presentado en la Figura 3.10. Los cinco perfiles de V_s seleccionados para este análisis en el punto de control 1 son presentados en la Figura 5.5a.

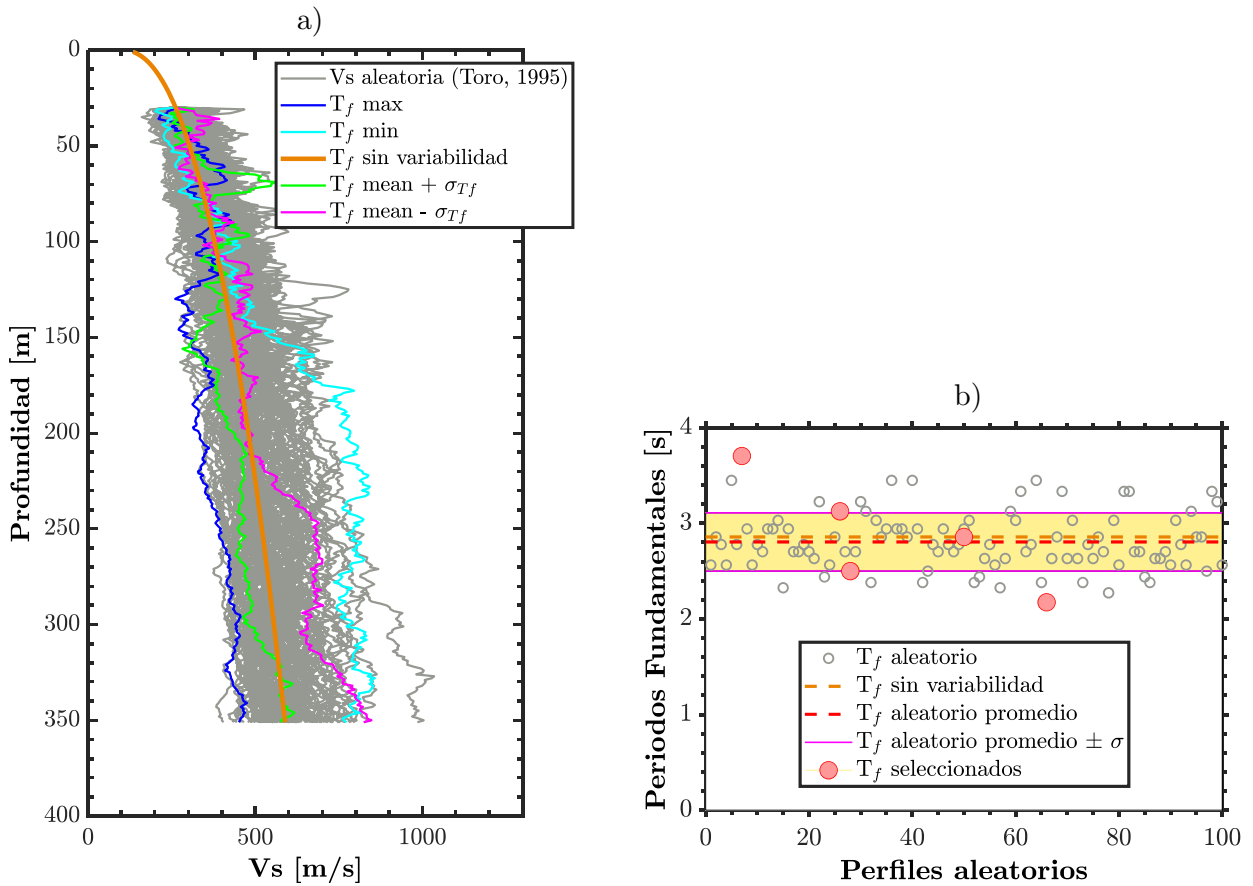


Figura 5.5: Perfiles de V_s seleccionados para el punto de control 1, a partir de sus periodos fundamentales. a) Perfiles de V_s aleatorios seleccionados. b) Periodos fundamentales correspondientes a los perfiles de V_s .

Los perfiles de V_s fueron identificados a partir de sus periodos fundamentales (presentados en la Figura 5.5b), los cuales corresponden: al periodo fundamental máximo (perfil T_f max en Figura 5.5a), el periodo fundamental mínimo (perfil T_f min en Figura 5.5a), el periodo fundamental que no incluye variabilidad en V_s (perfil T_f sin variabilidad en Figura 5.5a,

obtenido directamente con el modelo propuesto para la unidad geológica de la Tabla 3.1), el periodo fundamental promedio más una desviación estándar (perfil T_f mean + σ_{T_f} en Figura 5.5a) y el periodo fundamental promedio menos una desviación estándar (perfil T_f mean - σ_{T_f} en Figura 5.5a).

Replicando la metodología ya expuesta, se seleccionaron los periodos fundamentales para los puntos de control restantes, a partir de los cuales se identificaron sus perfiles de Vs correspondientes. Estos perfiles de Vs son presentados en el Anexo E. En la Tabla 5.3 se presenta los periodos fundamentales seleccionados para cada punto de control.

Tabla 5.3: Periodos fundamentales seleccionados para cada punto de control (PC)

Criterio de selección	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7
	Profundidades [m]						
T_f máx	3.70	5.00	5.00	5.26	2.63	3.57	2.78
T_f mín	2.20	2.86	3.03	3.13	1.82	2.04	1.61
T_f sin variabilidad	2.86	3.70	3.85	4.35	2.08	2.78	2.00
T_f mean + σ_{T_f}	3.13	4.17	4.35	4.76	2.27	3.13	2.33
T_f mean - σ_{T_f}	2.50	3.33	3.57	4.00	1.96	2.44	1.82

5.6.1.2. Perfil de Vs con variabilidad en la profundidad al basamento rocoso

Se consideró la variabilidad en la profundidad al basamento debido a la incertidumbre asociada a la información existente y para evaluar su efecto en la respuesta sísmica en superficie. Para esto, se hizo uso los modelos de Vs propuestos para cada unidad geológica (sin variabilidad, Tabla 3.1) y se identificaron las profundidades que debería tener cada perfil para alcanzar los periodos fundamentales seleccionados y presentados en la Tabla 5.3, para cada punto de control. Por ejemplo, en el punto de control 1, la profundidad estimada al basamento rocoso es 351 m, pero se considera de 525 m para alcanzar un periodo T_f max = 3.7 s (Tabla 5.3).

Las profundidades identificadas para cada punto de control de interés son presentadas en la Tabla 5.4. En la Figura 5.6 se presenta los perfiles de Vs correspondientes a cada profundidad identificada para el punto de control 1. Los perfiles de Vs correspondientes a los demás puntos de control son presentados en el Anexo E.

Tabla 5.4: Profundidades identificadas para cada punto de control, según su periodo fundamental

Criterio de selección	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7
	Profundidades [m]						
T_f máx	525	840	1095	1525	320	620	565
T_f mín	238	355	500	675	180	260	255
T_f sin variabilidad	351	532	713	1150	217	418	358
T_f mean + σ_{T_f}	413	655	845	1305	250	505	435
T_f mean - σ_{T_f}	290	455	650	1010	200	350	305

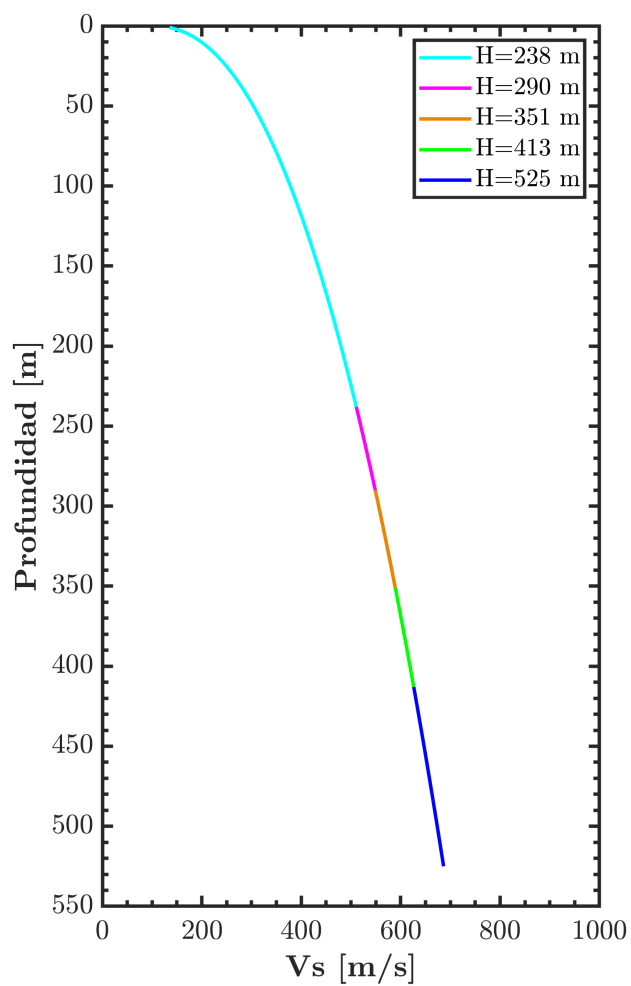


Figura 5.6: Perfiles de V_s correspondientes a cada profundidad identificada para el punto de control 1.

5.6.2. Curvas de degradación de rigidez del suelo

La selección de las curvas de degradación de rigidez del suelo depende del tipo de material que conforma cada estrato de suelo. En este estudio, se diferenciaron los perfiles de suelo que conforman cada punto de control en dos tipos de materiales: arcillas y arenas. Para esta tarea, se utilizó el esquema geológico presentado en la Figura 2.5, la cual es la única información disponible que muestra la variación de los materiales en profundidad a lo largo de la Cuenca de Cochabamba.

Para los puntos de control emplazados en la unidad geológica I (PC 1, 2 y 5), se definió que la totalidad del perfil de suelo se encuentra conformada por arcillas. Para los puntos de control emplazados en la unidad II (PC 3 y 6), se definió que el perfil de suelo está conformado por 60 m de arcilla, 400 m de arena y arcillas que se extienden hasta el basamento. Para los emplazados en la unidad III (PC 4 y 7), se definió que la totalidad del perfil de suelo se encuentra conformado por arenas.

Para estudiar las características de arcillas de la Cuenca de Cochabamba, se recopilaron los estudios realizados por Mejia et al. (2022); Rojas (2015), los cuales concluyen que el suelo característico de esta Cuenca es clasificado como arcilla magra (CL) de baja a media plasticidad ($IP < 20\%$) y consistencia variable entre media a rígida. En la Figura 5.7 se presenta la carta de plasticidad del suelo con la clasificación de 56 muestras de arcillas extraídas en la Cuenca de Cochabamba (Mejia et al., 2022).

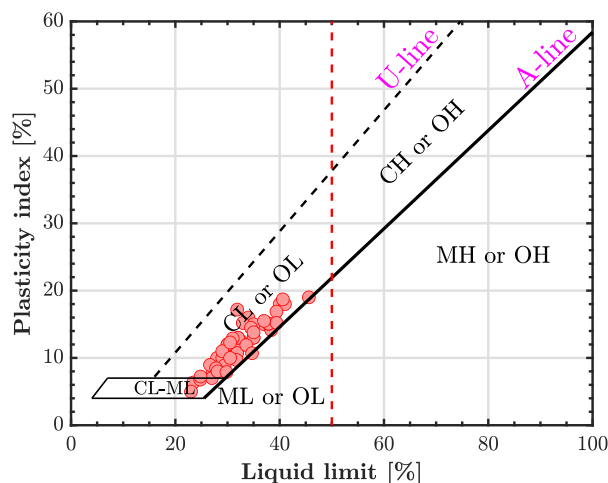


Figura 5.7: Clasificación de muestras de arcillas características de la Cuenca de Cochabamba, a partir de la carta de plasticidad del suelo (Mejia et al., 2022).

Según diferentes autores, la degradación del módulo de rigidez del suelo con la deformación al corte se encuentra altamente influenciada por el grado de plasticidad de las arcillas (Vucetic & Dobry, 1991; Yoshida, 2015) y por el esfuerzo de confinamiento en suelos granulares (Seed & Idriss, 1970; Ishibashi & Zhang, 1993).

Considerando las recomendaciones realizadas por Aditya & Anbazhagan (2015) y Castro (2020), se seleccionó la curva de degradación y amortiguamiento propuesta por Seed & Idriss

(1970) para arenas y Vucetic & Dobry (1991) para arcillas. Estas curvas seleccionadas se encuentran incorporadas en el software DeepSoil.

Las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento propuestas por Vucetic & Dobry (1991) son dependientes del índice de plasticidad del suelo. Suelos de alta plasticidad implican un comportamiento esfuerzo-deformación altamente lineal (Vucetic & Dobry, 1991). Para el análisis, se seleccionó la curva asociada a un índice de plasticidad igual a $IP=20\%$, el cual es el mayor índice de plasticidad identificado en la Figura 5.7 y representa la condición más conservadora de análisis.

Las curvas de degradación y amortiguamiento propuestas por Seed & Idriss (1970) para arenas contemplan tres curvas, un límite superior recomendado para arenas con alto nivel de confinamiento, un límite inferior para arenas con bajo confinamiento y una curva media para casos intermedios (Pastén et al., 2021). Para el análisis, se seleccionó la curva correspondiente al límite superior debido al alto espesor de sedimentos y esfuerzos de confinamiento efectivo correspondientes a los puntos de control ($H > 200$ m).

5.7. Resultados obtenidos de la propagación unidimensional

5.7.1. Espectros de pseudo-aceleraciones considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte

La Figura 5.8 presenta los espectros de pseudo-aceleraciones construidos a partir de los registros de aceleraciones obtenidos en superficie, asociados al evento generado por la falla Cochabamba (M_w 7) y a los perfiles con variabilidad en V_s correspondientes al punto de control 1, presentados en la Figura 5.5a. Las filas de esta figura corresponden a los resultados obtenidos considerando amortiguamientos constantes del suelo iguales a 3, 5 y 7%, y el obtenido del método lineal equivalente, respectivamente.

Las funciones de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso, son presentadas en la primera columna de la Figura 5.8. Estas corresponden a cada uno de los 5 perfiles de suelo evaluados (representados por su periodo fundamental) y son obtenidos para cada tipo de análisis realizado.

Los espectros de pseudo-aceleraciones presentados en la segunda columna de la Figura 5.8 fueron construidos para un amortiguamiento del 5%, en todos los casos. Estos exhiben diferentes valores de pseudo-aceleraciones producto del contenido de frecuencias de los 12 registros de aceleraciones espectro-compatibles propagados por cada perfil de V_s , el nivel de amortiguamiento definido para el suelo y el perfil de V_s analizado (representado por su periodo fundamental). En estos gráficos se muestra el espectro objetivo que se utiliza como input sísmico en la simulación sísmica (espectro de color negro).

Los 12 espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos por cada perfil de V_s fueron promediados y son presentados en la tercera columna de la Figura 5.8. Estos 5 espectros promedio son

comparados a los 2 espectros promedio construidos en base a la evaluación de cada GMM en suelo (procedimiento idéntico al utilizado para la determinación del espectro objetivo, pero en suelo), los cuales consideran tanto los valores promedio (μ) como los valores promedio más la desviación estándar propia de cada modelo ($\mu + \sigma_{GMM}$). Además, estos espectros son comparados con el espectro elástico de pseudo-aceleraciones construido según la Guía Boliviana de Diseño Sísmico (GBDS, 2020), para suelo tipo S3 (V_{s30} entre 180 a 370 m/s).

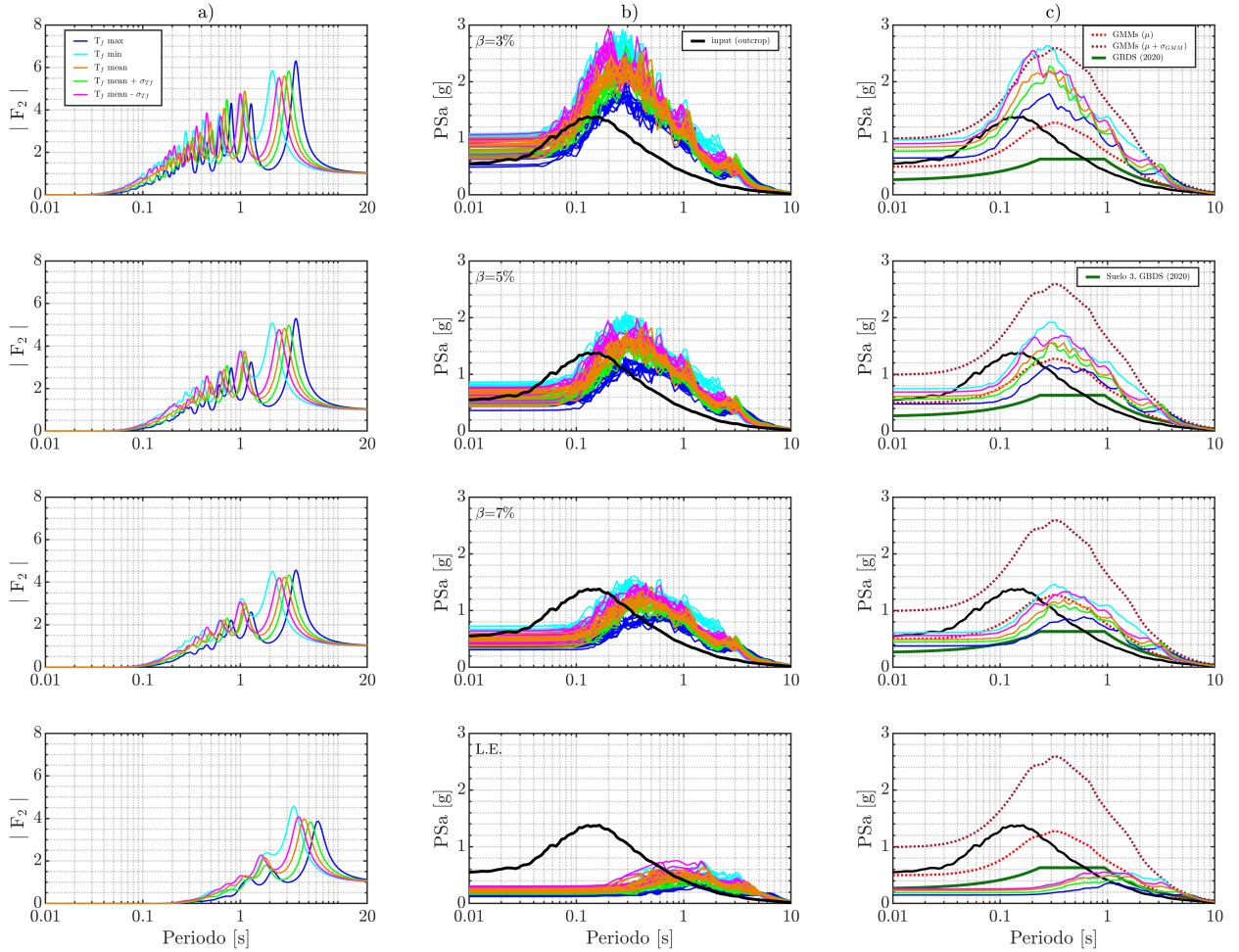


Figura 5.8: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura 5.5a. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

La Figura 5.9 presenta los espectros de pseudo-aceleraciones asociados al evento generado por la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2) y a los perfiles con variabilidad en V_s correspondientes al punto de control 6. El orden en la presentación de resultados es igual a la definida para la Figura 5.8. Los espectros correspondientes a los puntos de control restantes, asociadas a ambas fallas, son presentados en el Anexo H.

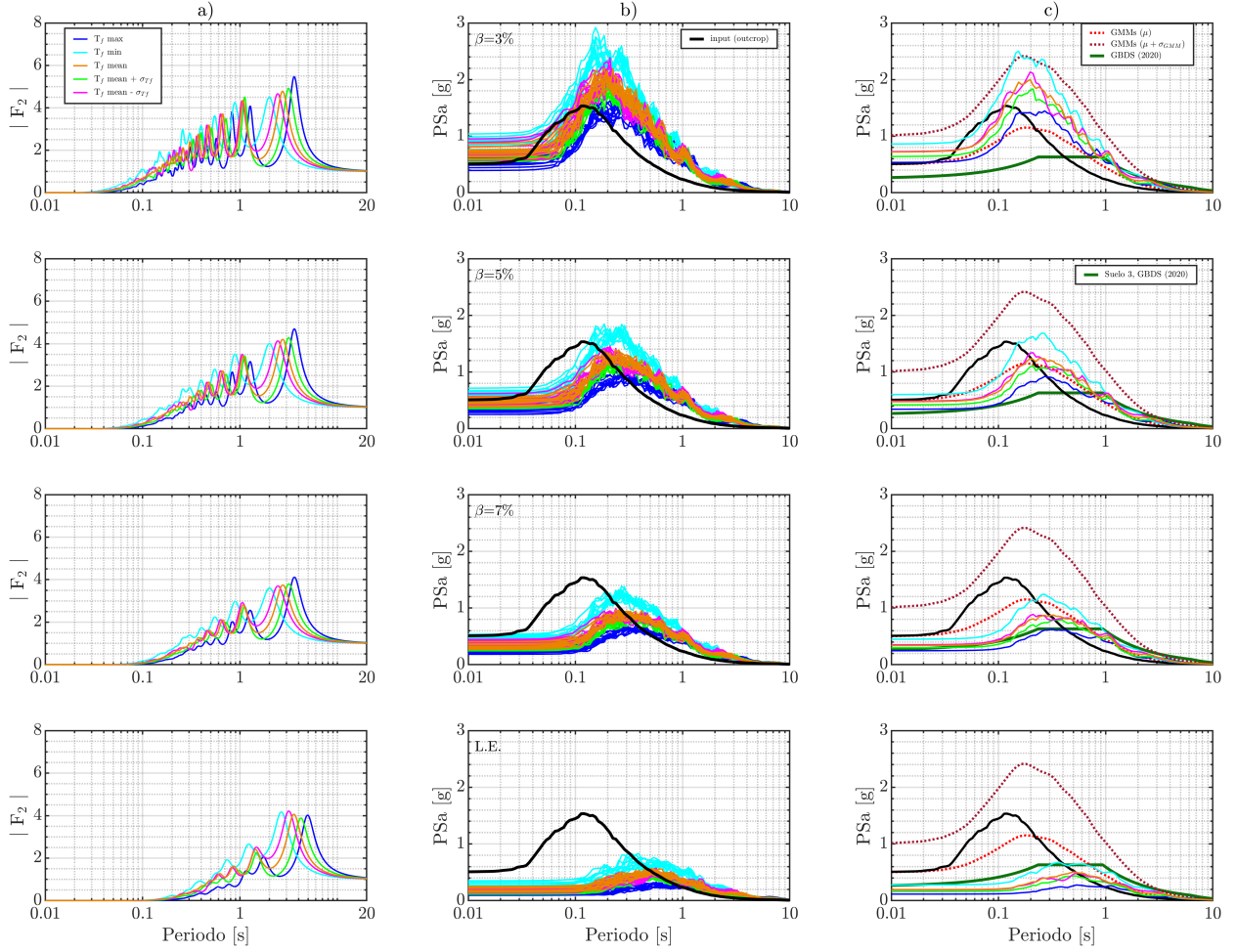


Figura 5.9: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

5.7.2. Espectros de pseudo-aceleraciones considerando variabilidad en la profundidad al basamento rocoso

Los resultados presentados en la Figuras 5.10 son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7) y a los perfiles de V_s correspondientes al punto de control 1 (presentados en la Figura 5.6), los cuales incorporan variabilidad en la profundidad al basamento rocoso.

La Figura 5.11 presenta los espectros de pseudo-aceleraciones asociados al evento generado por la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2) y a los perfiles con variabilidad en la profundidad al basamento rocoso correspondientes al punto de control 6.

Los resultados presentados en estas figuras fueron obtenidos considerando amortiguamientos constantes del suelo, iguales a 3, 5 y 7%. El orden en la presentación de resultados definido en la subsección anterior es también empleado en la presente.

Los espectros correspondientes a los puntos de control restantes, asociadas a ambas fallas, son presentados en el Anexo H.

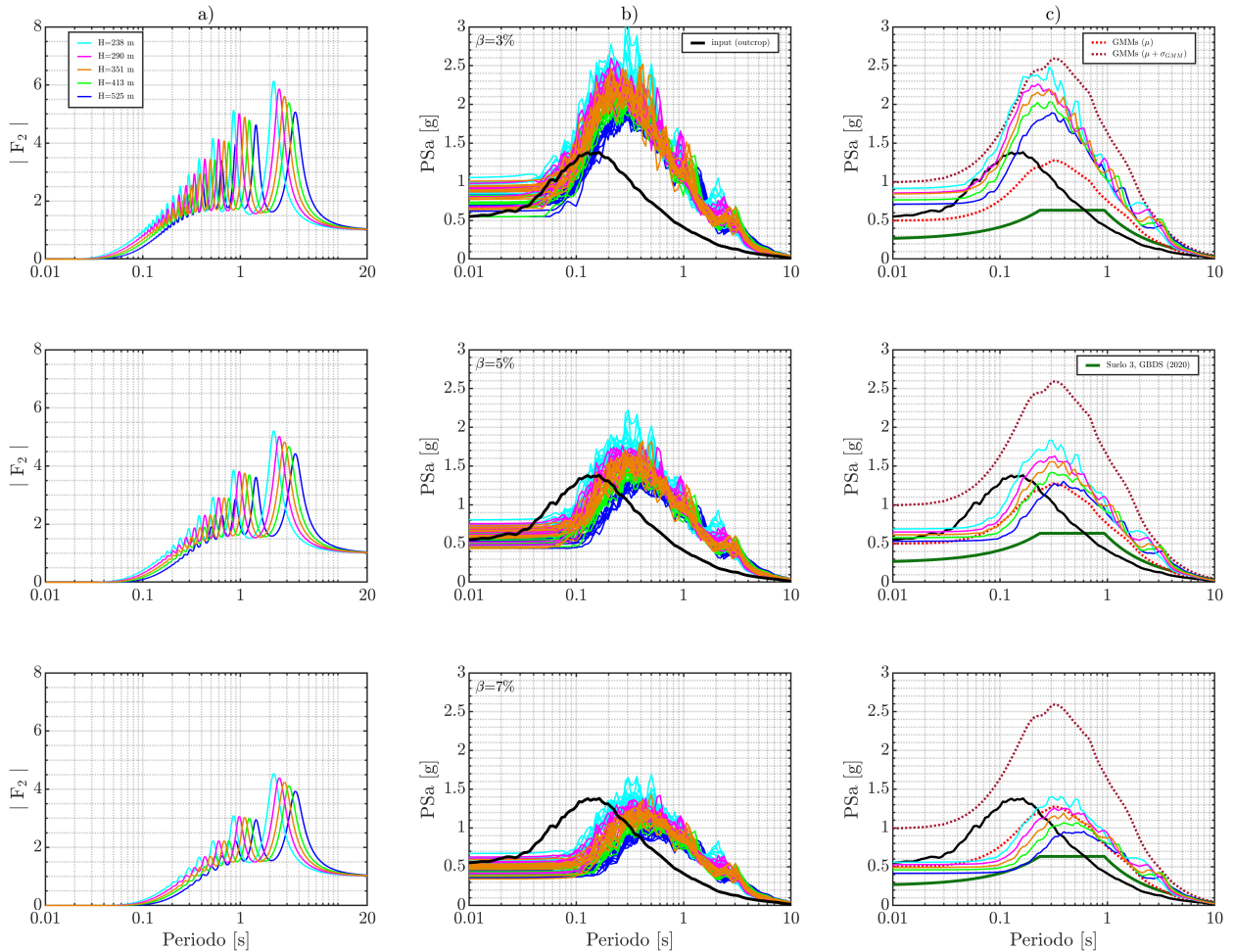


Figura 5.10: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura 5.6. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

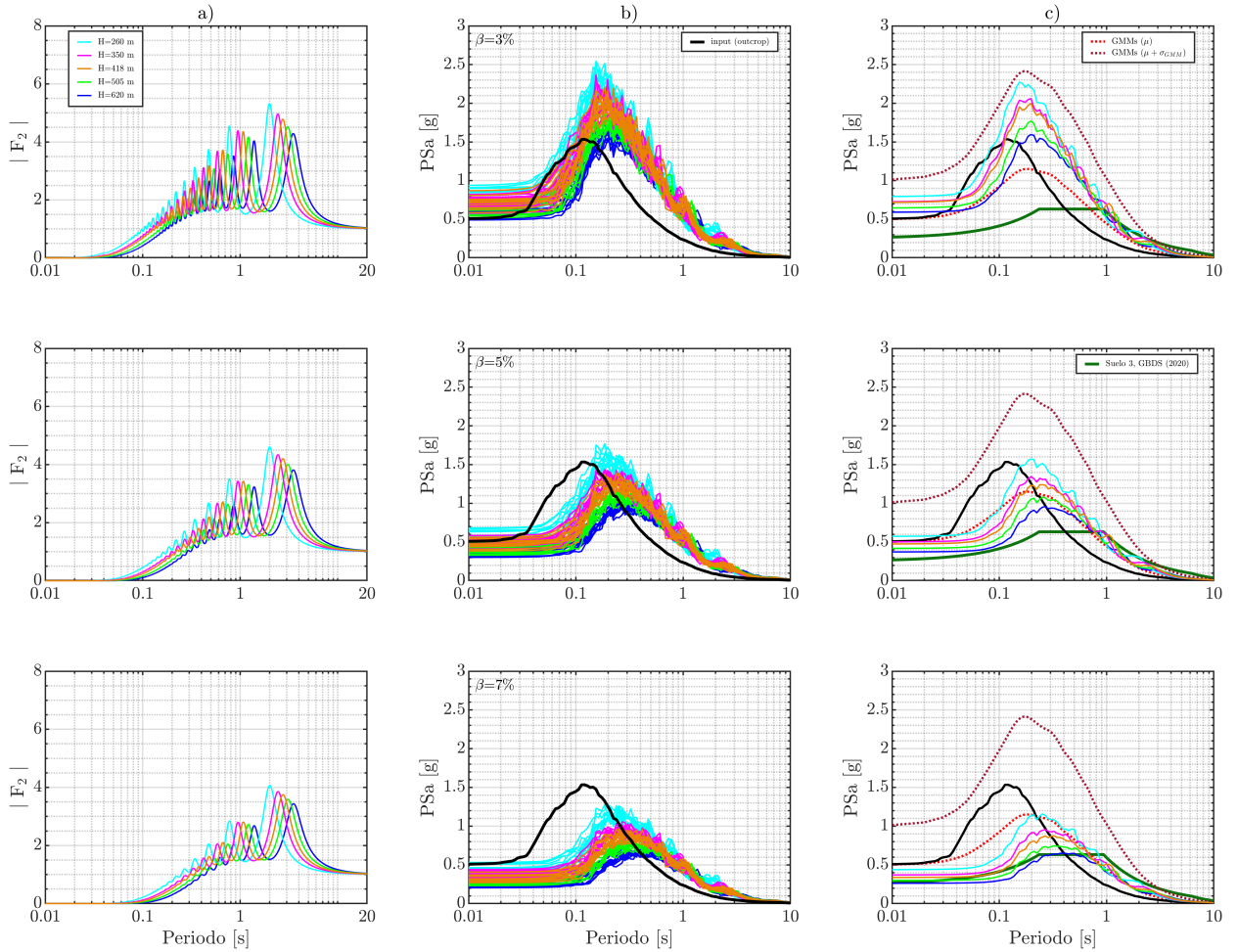


Figura 5.11: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.4f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por las GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

5.7.3. Resumen de resultados en la evaluación del PGA en los puntos de control

En las Figuras 5.12 y 5.13, la variación de los resultados promedios obtenidos del PGA en suelo y el PGA normalizado entre el obtenido en afloramiento rocoso (PGA_{suelo}/PGA_{roca}) para diferentes amortiguamientos del suelo y el método lineal equivalente, son graficados en función del periodo fundamental del suelo y la profundidad al basamento rocoso, para los puntos de control 1 y 6, respectivamente.

La Figura 5.12 es asociada a la activación de la falla Cochabamba, mientras que la Figura 5.13 a la falla de Sipe Sipe.

Los resultados correspondientes a los puntos de control restantes, asociadas a ambas fallas, son presentados en el Anexo I.

La primera columna de las Figuras 5.12 y 5.13 muestra los resultados asociados a la variabilidad de V_s , mientras la segunda columna la variabilidad en la profundidad al basamento. En estas figuras, los periodos fundamentales degradados son utilizados para representar a los resultados obtenidos mediante el método lineal equivalente.

Los marcadores utilizados para representar los valores de PGA promedios, también presentan la desviación estándar (barras) que evidencia la variación de los resultados para cada uno de los registros semilla utilizados como registros de entrada.

En estas figuras se presentan además los valores promedio de PGA obtenidos de simulaciones donde se emplearon amortiguamientos del suelo mayores al 7% ($\beta = 13, 15, 17$ y 19%), los cuales permiten evidenciar la gran no linealidad alcanzada por los materiales mediante el método lineal equivalente. Por ejemplo, en la Figura 5.12a se observa que los valores promedio de PGA obtenidos mediante el método lineal equivalente son proporcionales a los obtenidos considerando un amortiguamiento constante del suelo igual a 19%.

Los dos valores promedio de PGA obtenidos mediante las GMM en suelo también son presentados en estas figuras, al igual que el PGA promedio en afloramiento rocoso (obtenido del promedio de los registros de aceleración espectro-compatibles). Estos valores de PGA son presentados para compararlos con los obtenidos de la propagación 1D. Los periodos fundamentales y profundidades al basamento en los cuales se grafican estos valores en estas figuras, son referenciales. Por ejemplo, los valores de PGA antes mencionados se encuentran ubicados en 2 s y 200 m, como se puede observar en las Figura 5.12a y 5.12b, respectivamente.

La razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} se presenta en estas figuras para contrastar la respuesta sísmica obtenida por un perfil de suelo con variabilidad en V_s (representada por el periodo fundamental del suelo) y profundidad al basamento rocoso. Una razón de PGA_{suelo}/PGA_{roca} mayor a 1 indica efectos de amplificación sísmica en superficie, mientras que una razón menor a 1 indica deamplificación sísmica.

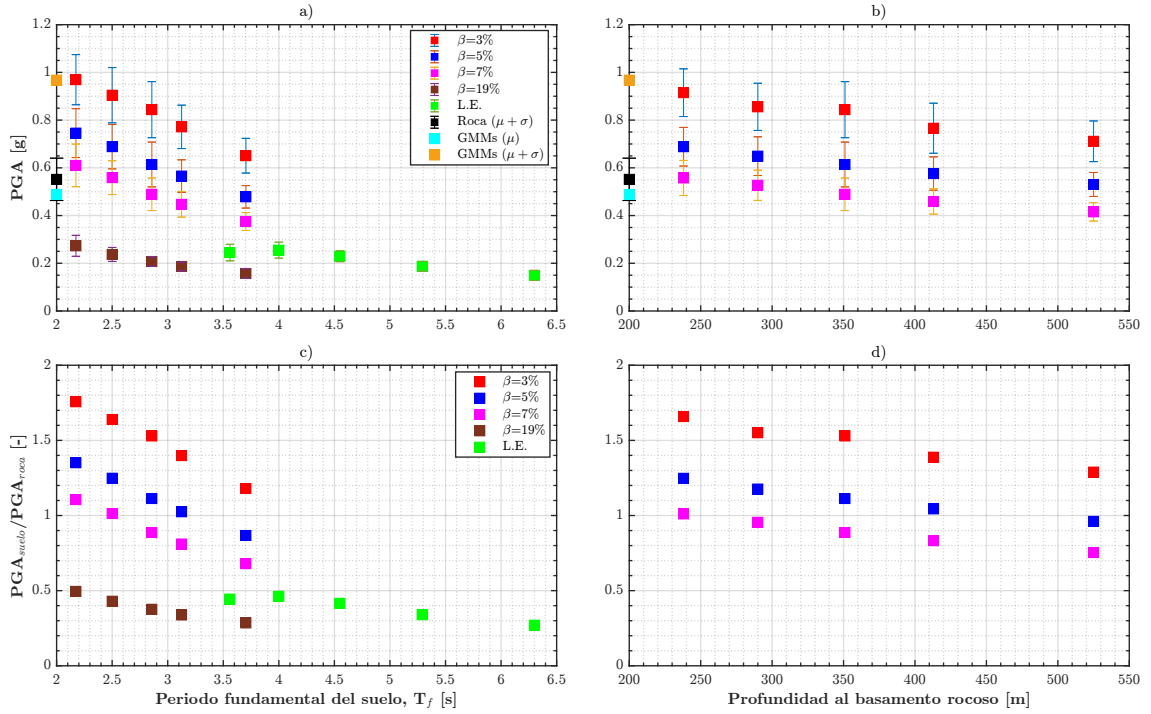


Figura 5.12: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA del suelo para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Variación del PGA en función del periodo fundamental del suelo. b) Variación del PGA en función de la profundidad al basamento. c) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental. d) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función de la profundidad al basamento rocoso.

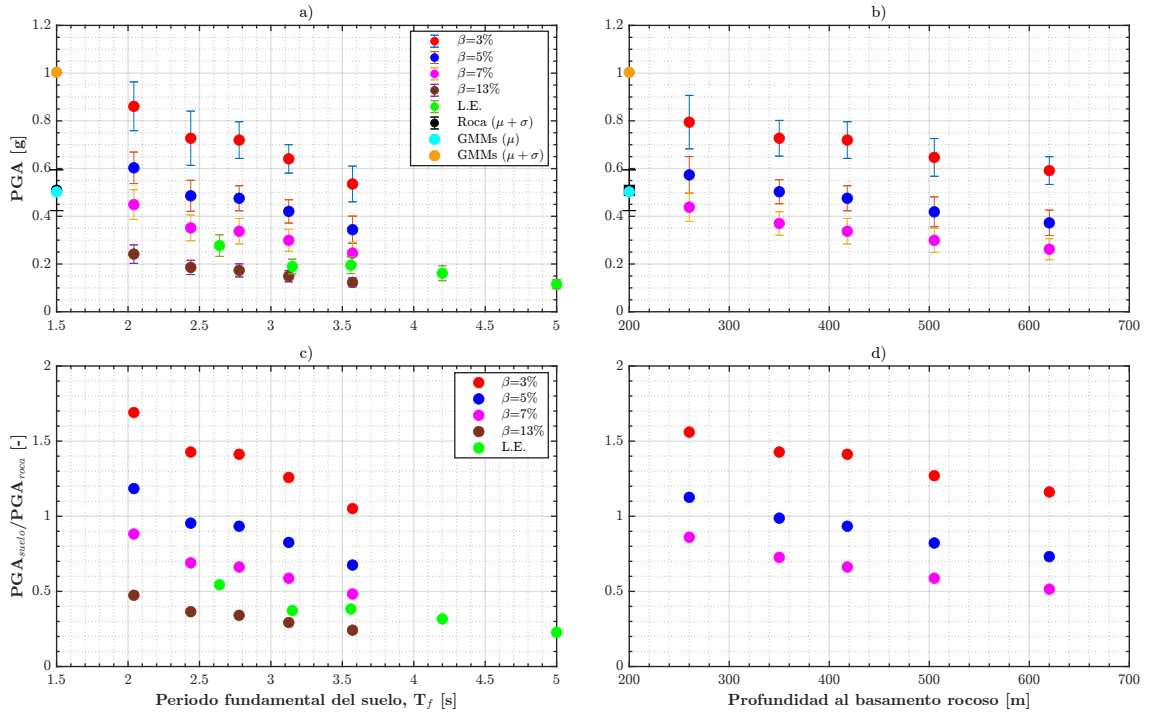


Figura 5.13: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

5.7.4. Amplificación relativa

La razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} se puede graficar como función del periodo considerando todos los casos analizados en todos los sitios o puntos de control. Las Figuras 5.14 y 5.15 muestran esta relación para cada nivel de amortiguamiento del suelo analizado y como función del V_{s30} de cada sitio, las cuales se asocian a la activación sísmica de la falla Cochabamba y Sipe Sipe, respectivamente. Estas figuras muestran además, las funciones o correlaciones ajustadas entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo. Las correlaciones ajustadas son presentadas en las Tablas 5.5 y 5.6.

Se generaron dos tipos de correlaciones por cada tipo de comportamiento de suelo analizado, los cuales son diferenciados según su V_{s30} . Una función es ajustada para la data cuyo V_{s30} es igual a 208 y 243 m/s (unidades geológicas I y II), mientras la otra para un V_{s30} igual a 354 m/s (unidad geológica III). No se desarrolló una correlación adicional que diferencie a las unidades geológicas I y II debido a que no existe una tendencia o patrón claro que permita separar la data, como si lo evidencia la unidad geológica III.

De igual manera, se evaluó la variación de la razón entre las pseudo-aceleraciones del suelo y roca (PSa_{suelo}/PSa_{roca}) para diferentes periodos ($T= 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ y 3.0 s) y amortiguamientos constantes del suelo de 3, 5 y 7%. En las Figuras 5.16 y 5.17 se presentan los resultados obtenidos para un amortiguamiento constante del suelo de 3%, los cuales se asocian a la activación sísmica de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, respectivamente. En el Anexo J se presentan los resultados obtenidos para amortiguamientos del suelo de 5 y 7%.

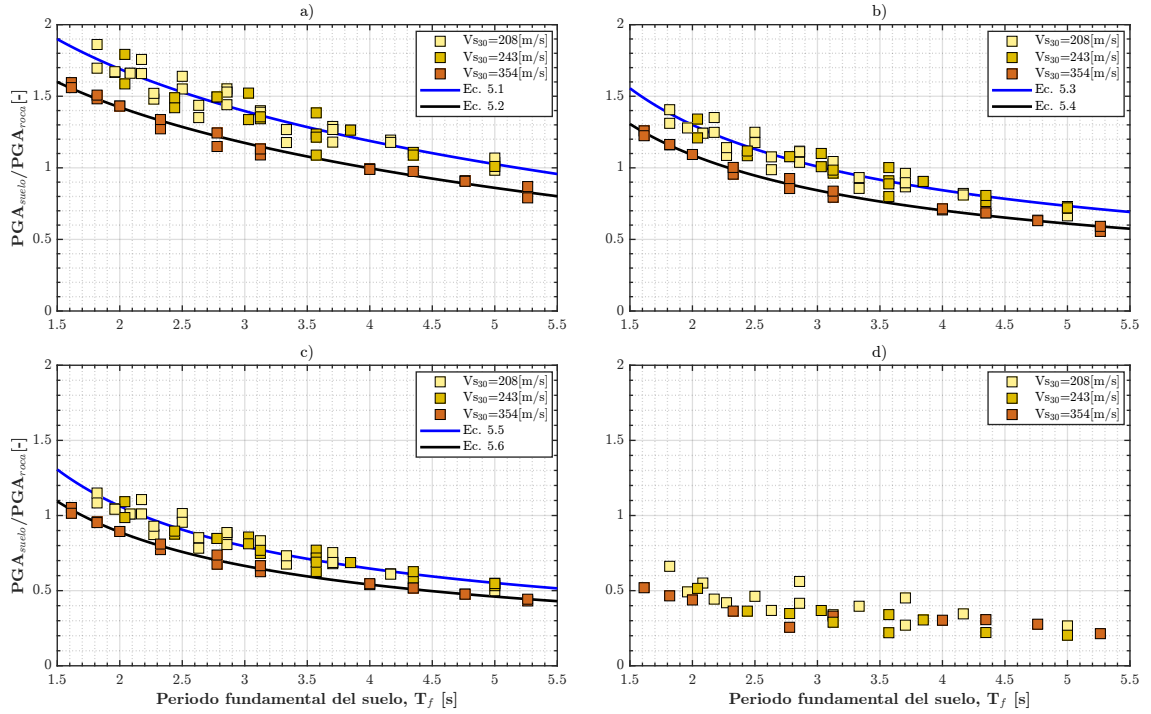


Figura 5.14: Correlaciones entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo para los diferentes puntos de control analizados y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. Las correlaciones que describen a estas funciones son las presentadas en la Tabla 5.5 y fueron generadas para: a) Amortiguamiento constante del suelo igual a 3%. b) Amortiguamiento constante del suelo igual a 5%. c) Amortiguamiento constante del suelo igual a 7%. d) Amortiguamientos calculados con el método lineal equivalente.

Tabla 5.5: Correlaciones ajustadas para la estimación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental del suelo para diferentes valores de V_{s30} y amortiguamientos del suelo, los cuales se asocian a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7)

V_{s30} [m/s]	β [%]	r^2	PGA_{suelo}/PGA_{roca} [-]	Ec.
208 y 243	3	0.88	$-0.72 \ln(T_f) + 2.19$	5.1
354	3	0.98	$-0.61 \ln(T_f) + 1.85$	5.2
208 y 243	5	0.91	$2.00T_f^{-0.624}$	5.3
354	5	0.99	$1.69T_f^{-0.632}$	5.4
208 y 243	7	0.92	$1.75T_f^{-0.716}$	5.5
354	7	0.99	$1.46T_f^{-0.719}$	5.6

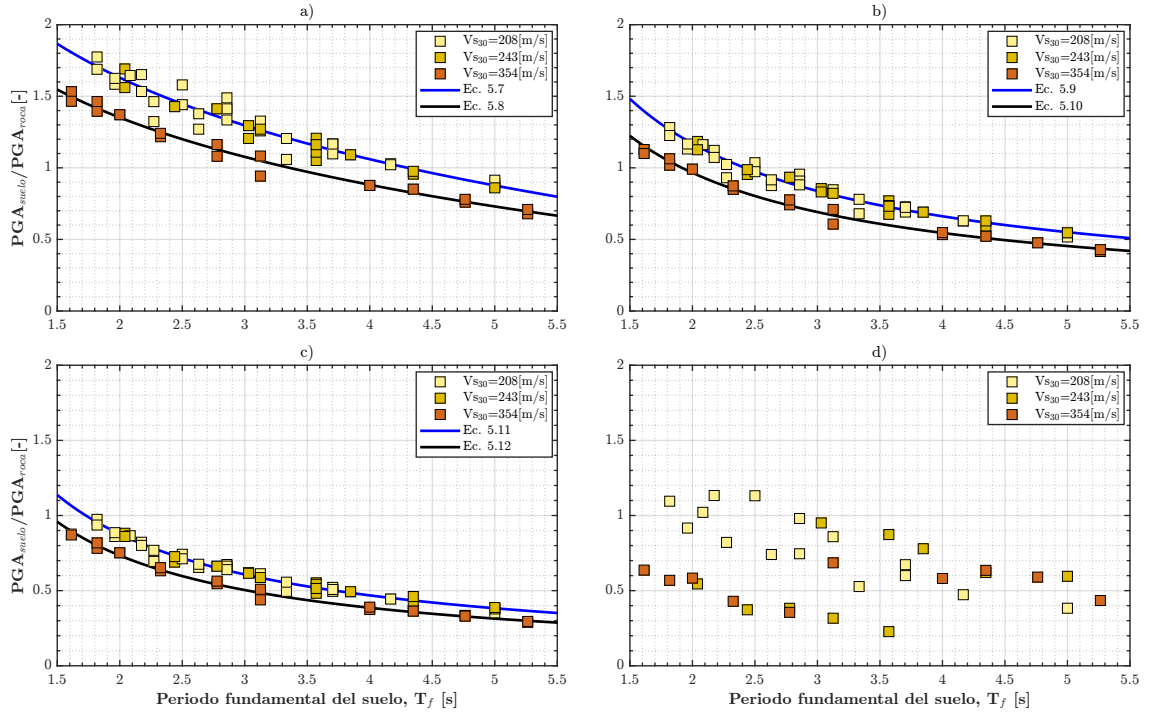


Figura 5.15: Correlaciones entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo para los diferentes puntos de control analizados y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla Sipe Sipe. Las correlaciones que describen a estas funciones son las presentadas en la Tabla 5.6 y fueron generadas para: a) Amortiguamiento constante del suelo igual a 3%. b) Amortiguamiento constante del suelo igual a 5%. c) Amortiguamiento constante del suelo igual a 7%. d) Amortiguamientos calculados con el método lineal equivalente.

Tabla 5.6: Correlaciones ajustadas para la estimación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental del suelo para diferentes valores de V_{s30} y amortiguamientos del suelo, los cuales se asocian a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2).

V_{s30} [m/s]	β [%]	r^2	PGA_{suelo}/PGA_{roca} [-]	Ec.
208 y 243	3	0.93	$-0.82 \ln(T_f) + 2.20$	5.7
354	3	0.98	$-0.68 \ln(T_f) + 1.82$	5.8
208 y 243	5	0.97	$2.07T_f^{-0.822}$	5.9
354	5	0.99	$1.71T_f^{-0.824}$	5.1
208 y 243	7	0.98	$1.64T_f^{-0.904}$	5.11
354	7	0.99	$1.40T_f^{-0.927}$	5.12

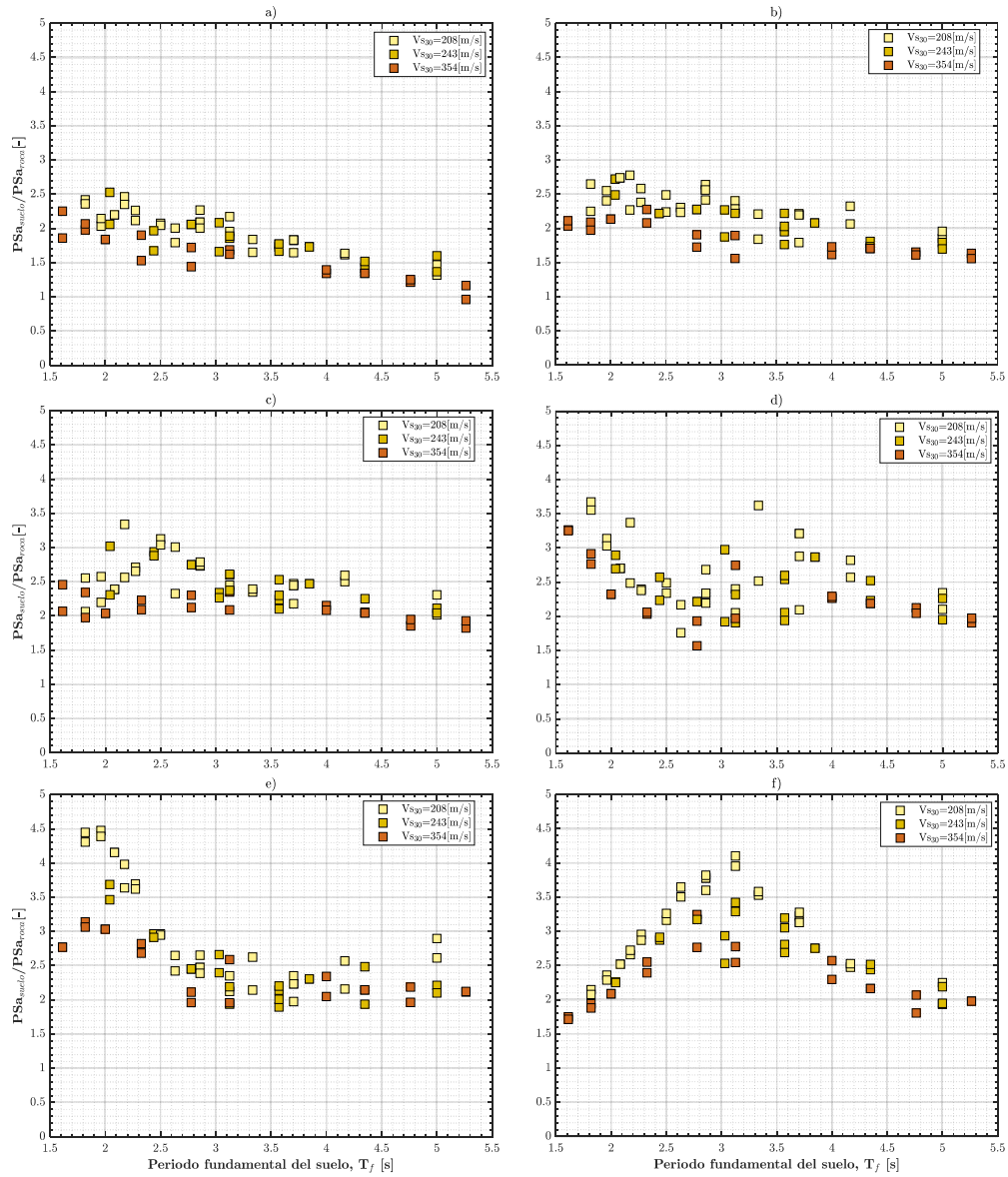


Figura 5.16: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 3% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) $T= 0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.

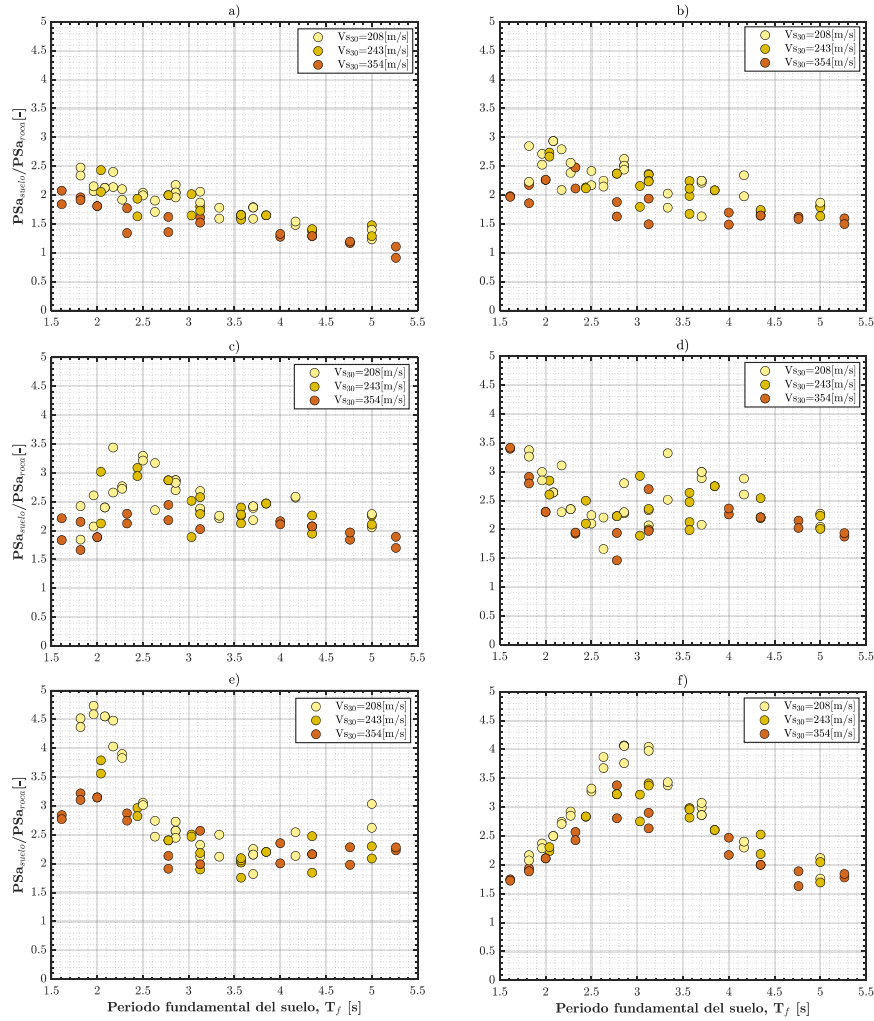


Figura 5.17: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 3% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) $T=0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.

5.8. Incorporación del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo en mapas de PGA

Las ecuaciones presentadas en la sección anterior permitieron incorporar el efecto del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo en la estimación del PGA en la Cuenca de Cochabamba.

Se utilizó el mapa de periodos fundamentales promedio presentado en la Figura 3.10 y las ecuaciones de las Tablas 5.5 y 5.6 para estimar la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} . El producto de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el PGA en roca (presentado en la Figura 5.18), permitió estimar el PGA en suelo para los diferentes niveles de amortiguamientos evaluados y eventos sísmicos asociados a ambas fallas. Los resultados obtenidos son presentados en las Figuras 5.19 y 5.20, para las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, respectivamente. Además, estos resultados se comparan con el mapa de PGA obtenido a partir de la combinación de GMMs ($\mu +$

σ_{GMM}), que consideran el V_{s30} como único parámetro que caracteriza al suelo.

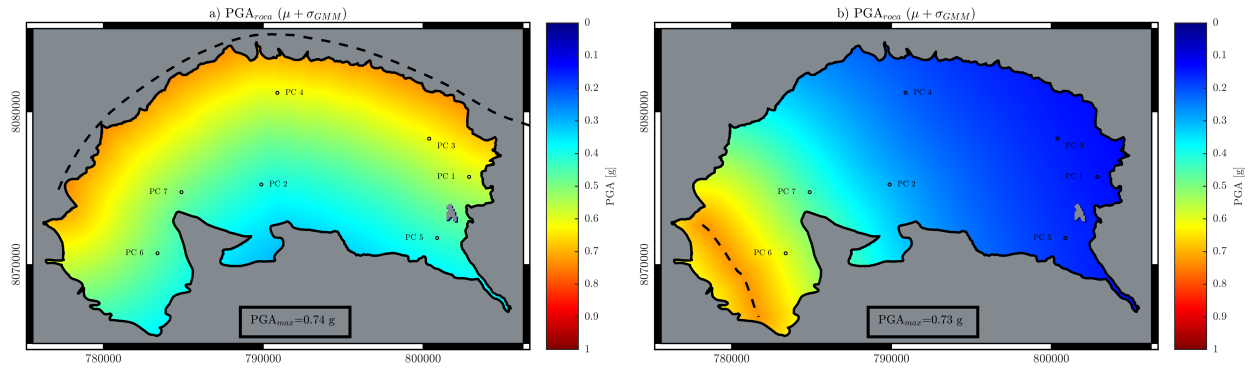


Figura 5.18: Mapas de PGA considerando afloramiento rocoso ($V_{s30}=1530$ m/s) obtenidos de la combinación de GMMs ($\mu + \sigma_{GMM}$). a) Mapa de PGA en roca asociado a la activación de la falla Cochabamba (M_w 7). b) Mapa de PGA en roca asociado a la activación de la falla Sipe Sipe (M_w 6.2).

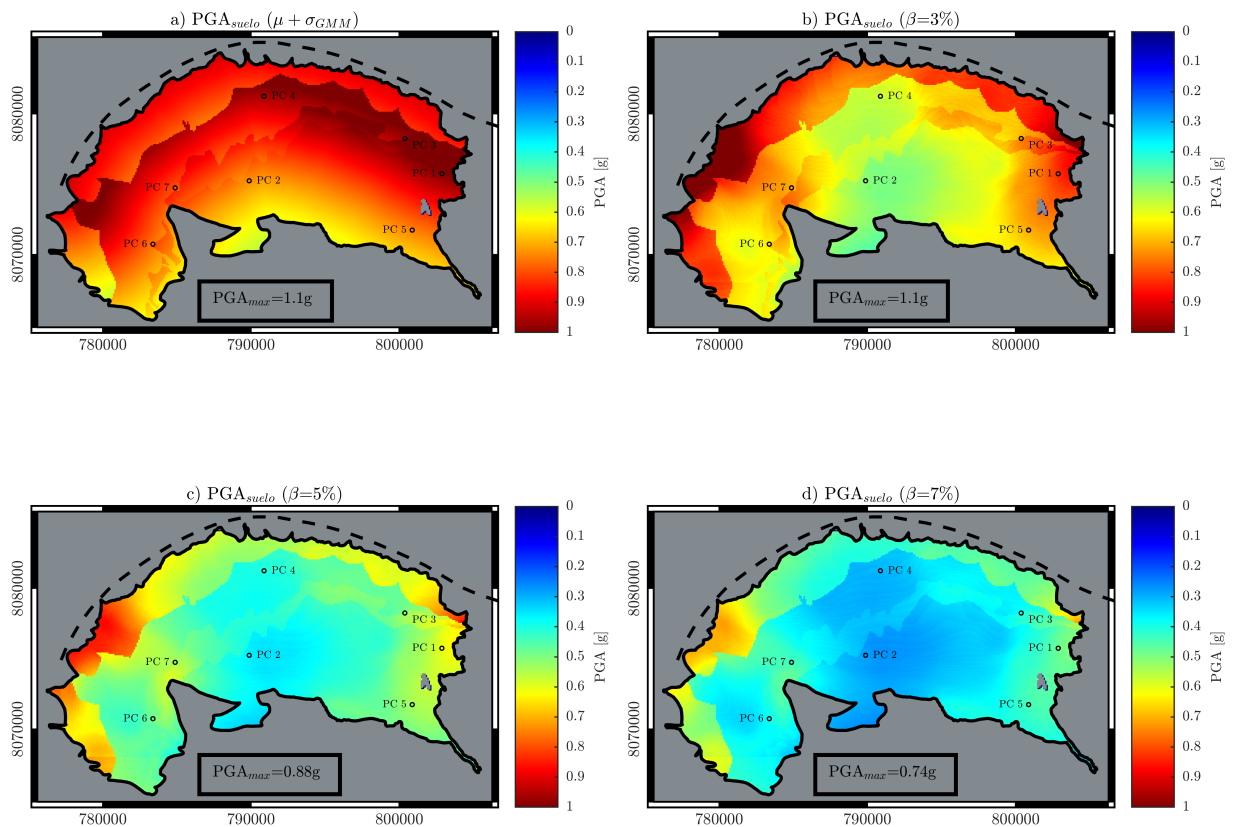


Figura 5.19: Mapas de PGA obtenidos a partir de la incorporación del periodo fundamental y diferentes niveles de amortiguamientos del suelo, asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) Mapa de PGA obtenido del promedio de los resultados obtenidos por las GMMs presentadas en la Figura 4.2 (basado en los valores promedio más la desviación estándar de cada modelo). b) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 3%. c) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante 5%. d) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 7%.

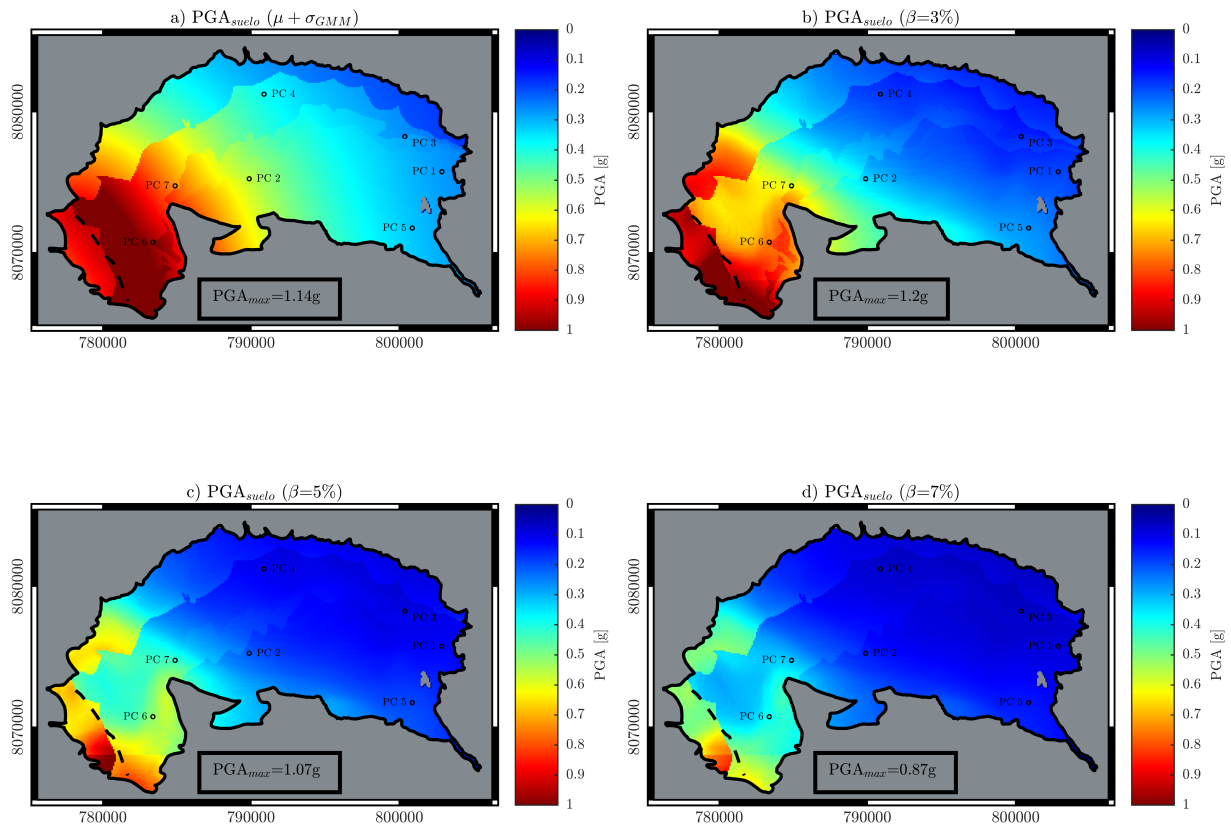


Figura 5.20: Mapas de PGA obtenidos a partir de la incorporación del periodo fundamental y diferentes niveles de amortiguamientos del suelo, asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) Mapa de PGA obtenido del promedio de los resultados obtenidos por las GMMs presentadas en la Figura D.2 (Anexo D), basado en los valores promedio más la desviación estándar de cada modelo. b) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 3%. c) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante 5%. d) Mapa de PGA para un amortiguamiento constante del 7%.

Capítulo 6

Discusión

6.1. Sobre los modelos de velocidad

Los modelos de V_s extrapolados y presentados en la Tabla 3.1 consideran que la rigidez del material incrementa de forma potencial en profundidad, lo cual concuerda con modelos de V_s propuestos por Chaljub et al. (2010); Seht & Wohlenberg (1999) y con la recopilación de modelos de V_s presentados en la Figura 3.7. Sin embargo, la intercalación de materiales finos y gruesos en la Cuenca, evidenciada por la Figura 2.5, supone una variación de V_s en profundidad, que podría no ser captado por estos modelos simplificados y aproximados según la geología. Esto resalta la importancia de contar con información basada en mediciones in-situ para reducir la incertidumbre epistémica asociada a este parámetro.

6.2. Sobre la aplicación de modelos de movimiento fuerte (GMMs)

6.2.1. Combinación de modelos de movimiento fuerte (GMMs)

En la evaluación de amenaza sísmica probabilística y determinística, arboles lógicos son ampliamente utilizados como una herramienta para capturar la incertidumbre epistémica asociada con las fuentes sismogénicas y los modelos de movimiento fuerte (Bommer et al., 2005). En este sentido, la combinación de dos o más modelos de movimiento fuerte es realizada mediante arboles lógicos y la asignación de pesos a cada rama que compone el árbol.

Según Bommer et al. (2005), la importancia de los pesos disminuye a medida que aumenta el número de ramas para los diferentes modelos de movimiento fuerte, y si solo se incluyen dos o tres GMMs en el árbol lógico, los pesos pueden ejercer una fuerte influencia en los resultados.

En la presente tesis se evalúan seis GMMs y debido a que no existe evidencia local que afirme que un modelo tiene un mayor ajuste en comparación al otro, se considera como medio de combinación de estos, el promedio de los modelos de movimiento fuerte o lo que es igual, la asignación de iguales pesos para cada GMM o rama del árbol lógico.

6.2.2. Mapas de aceleraciones máximas del terreno (PGA)

Los resultados de PGA obtenidos con la aplicación de GMMs presentan diferencias considerables. Esta diferencia se atribuye a que las GMMs fueron calibradas para otras zonas del mundo y algunas de ellas (Abrahamson et al., 2014; Boore et al., 2014; Graizer & Kalkan, 2016) utilizan un mayor número de parámetros de entrada (observar Tabla 4.2). Esto resalta la importancia del uso de diferentes modelos de atenuación cuando no se cuenta con uno propio para la región, como es el caso de Bolivia.

Respecto a los mapas de PGA presentados en las Figuras 4.1 y 4.2, obtenidos al evaluar la activación de la falla Cochabamba (M_w 7) con el modelo desarrollado por Lanzano et al. (2019), se observa que los valores máximos de PGA en la Cuenca son 0.83 y 1.81 g, respectivamente. Estos valores son asociados al valor promedio y promedio mas una desviación estándar, respectivamente, entregados por este modelo de movimiento fuerte.

A pesar de las diferencias obtenidas por estos modelos, se observa de manera general que las zonas donde se esperan mayores aceleraciones del terreno corresponden a la zona norte (representado por el punto de control 4) y noreste de la Cuenca (representado por los puntos de control 1 y 3), las cuales se asientan sobre las unidades geológicas I y III. Estas zonas son más evidentes en el modelo de Lanzano et al. (2019). A pesar de que la unidad geológica V ($V_{s30}= 708$ m/s) es la más próxima al escarpe de la falla, se evidencia menores aceleraciones en comparación a las zonas ya descritas, lo cual hace notar la influencia del V_{s30} en el PGA esperado. Por otra parte, dado que la falla Cochabamba se extiende en toda la longitud norte de la Cuenca, se observa un efecto de atenuación hacia la zona sur, donde se evidencia los menores valores de PGA.

En relación a los mapas de PGA presentados en las Figura D.1 y D.2 (Anexo D), obtenidos al evaluar la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2), se observa que los máximos valores de PGA en la Cuenca son entregados por el modelo desarrollado por Cauzzi et al. (2015) y son iguales a 0.86 y 1.88 g (asociado al valor promedio y promedio mas una desviación estándar, respectivamente, entregados por este modelo). En todos los mapas de esa figura se observa que las mayores aceleraciones se concentran en el escarpe de la falla y superficies próximas a esta (puntos de control 6 y 7), asentadas en las unidades geológicas III y II. Por otra parte, dado que la falla de Sipe Sipe se ubica al extremo oeste de la Cuenca, se evidencia altos efectos de atenuación hacia la zona este de la Cuenca (puntos de control 1, 3, 4 y 5). Una mayor atenuación y a partir de una menor distancia respecto a la falla es evidenciada en los modelos desarrollados por Abrahamson et al. (2014); Boore et al. (2014); Li et al. (2020).

6.2.3. Mapas de pseudo-aceleraciones (PSa)

Los mapas de pseudo-aceleraciones presentados en las Figura 4.4 (asociados a la falla Cochabamba, M_w 7), evidencian que, las mayores pseudo-aceleraciones se concentran entre los periodos correspondientes a 0.1 y 0.8 segundos. Esto sugiere que, dado un evento generado por esta falla, estructuras de 2 a 8 pisos, aproximadamente, podrían experimentar las mayores sollicitaciones sísmicas. Sin embargo, al igual que lo observado en los mapas de PGA, los valores de PSa varían dependiendo a su ubicación en la Cuenca. Por otra parte, estructuras con periodos naturales de vibración mayores a 2 s podrían experimentar sollicitaciones sísmicas menores a 1.04 g, según la GMM propuesta por Lanzano et al. (2019).

Resultados similares son obtenidos al evaluar la activación de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2), los cuales son presentados en la Figura D.4 (Anexo D). En esta se evidencia que las mayores pseudo-aceleraciones se concentran entre los periodos correspondientes a 0.1 y 0.6 s (estructuras de 2 a 6 pisos, aproximadamente). Estructuras con periodos naturales de vibración mayores a 2 s podrían experimentar solicitaciones sísmicas menores a 0.43 g, según la GMM propuesta por Cauzzi et al. (2015).

6.3. Sobre la propagación unidimensional de ondas de corte

6.3.1. Ajuste espectral

La metodología seleccionada y utilizada para el ajuste espectral (Adekristi, 2013) trabaja en el dominio del tiempo con el propósito de mantener las propiedades no estacionarias del registro original y evitar el incremento de la energía capturada del evento sísmico. Sin embargo, dado el alto nivel de escalamiento de algunos acelerogramas utilizados en los diferentes puntos de control, los contenidos de frecuencias de estos registros muy probablemente sufrieron modificaciones que alteraron y modificaron sus características originales.

Una metodología más apropiada para la selección de registros sísmicos y su escalamiento es la denominada espectro de media condicionada (CMS), propuesta por Baker (2011).

6.3.2. Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia presentadas junto con los espectros en las Figuras 5.8 y 5.9, evidencian diferentes niveles de amplificación, según el periodo analizado y los amortiguamientos correspondientes. Según lo esperado, se observa una reducción en la amplificación en superficie con el incremento del amortiguamiento del suelo, lo cual también es evidenciado en los espectros de pseudo-aceleraciones. Sin embargo, no se evidencia un efecto del amortiguamiento en los periodos fundamentales del suelo cuando se considera un comportamiento lineal del material y amortiguamientos constantes del suelo (Dobry et al., 2000).

Las funciones de transferencia obtenidos a partir del método lineal equivalente acentúan el efecto de la degradación de la rigidez del suelo. Esta degradación puede ser evidenciada en el incremento de los periodos fundamentales del suelo y la reducción en la amplificación en superficie (observar Figuras 5.8a y 5.9a).

6.3.3. Aceleraciones máximas del terreno (PGA)

Las Figuras 5.12, 5.13 y las presentadas en el Anexo I ponen en evidencia el efecto directo del periodo fundamental del suelo en el PGA. A partir de estos resultados, se observa que mientras menor es el periodo fundamental, mayor es el factor de amplificación o razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} , independientemente del amortiguamiento considerado. Por otra parte, para un depósito de sedimentos profundos con un alto periodo fundamental, co-

mo es el caso del punto de control 4 (observar Figura I.3), se evidencia deamplificaciones ($PGA_{suelo}/PGA_{roca} < 1$) en el PGA, incluso para amortiguamientos constantes del suelo del 3 %. Estas observaciones concuerdan con lo observado por Idini (2016); Tiznado (2020), a partir de la recopilación de información proveniente de estaciones sísmicas en Chile.

Otro efecto que es evidenciado al analizar estas figuras es que los resultados obtenidos al incorporar variabilidad en V_s y profundidad al basamento muestran resultados muy próximos en magnitud y que siguen la tendencia expuesta en el párrafo anterior. Por lo que se puede afirmar que, el periodo fundamental representa un parámetro completo que condensa en un solo valor, la profundidad al basamento y el perfil de velocidades de ondas de corte hasta el basamento de un depósito de suelos, para los casos analizados.

Los valores de PGA obtenidos mediante el método lineal equivalente (analizados únicamente en los casos donde se considera variabilidad en V_s) evidencian la gran no linealidad de los materiales cuando se genera un evento asociado a la falla Cochabamba (M_w 7). Un ejemplo de esto es observado en los puntos de control 1, 3, 6 y 7 (Figuras 5.12, I.2, I.5 y I.6 donde los valores de PGA obtenidos mediante el método lineal equivalente son proporcionales a considerar un amortiguamiento constante del suelo del 19 %. Estos resultados pueden también ser producto de las altas demandas sísmicas generadas por esta falla, las cuales degradan rápidamente los materiales, traduciéndose en una sobreestimación de los amortiguamientos del suelo, como lo resalta Stewart et al. (2014).

Los valores de PGA asociados a la falla de Sipe Sipe, confirman lo expuesto en el párrafo anterior. En los puntos de control 6 y 7, los valores de PGA obtenidos mediante el método lineal equivalente son proporcionales a considerar amortiguamientos constantes del suelo del 13 y 10 %, respectivamente (observar Figuras 5.13 e I.12). En los puntos de control restantes, al estar ubicados a una distancia mayor respecto a la falla de Sipe Sipe y consecuentemente al estar sujeto a menores sollicitaciones sísmicas, los amortiguamientos alcanzados por los materiales según el método lineal equivalente, no superan el 7 %.

6.3.4. Espectros de pseudo-aceleraciones

En las Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y los presentados en el Anexo H, se evidencia la variación en los valores de pseudo-aceleraciones en función al periodo fundamental del suelo y el rango de periodos naturales analizados. Por una parte, para periodos naturales menores a los periodos fundamentales del suelo, las pseudo-aceleraciones disminuyen al aumentar el periodo fundamental del suelo. Por el contrario, para periodos naturales mayores a los periodos fundamentales del suelo, se observan incrementos en las aceleraciones espectrales con el incremento del periodo fundamental del suelo. Este comportamiento es consecuente con las funciones de transferencia obtenidas y trabajos reportados en la literatura (Cadet et al., 2012; Gobbi et al., 2019; Luzi et al., 2011). Sin embargo, este comportamiento dependerá en gran medida del contenido de frecuencias propio del evento sísmico, captado por los registros sísmicos utilizados en la propagación.

Los espectros de pseudo-aceleraciones generados por el promedio de GMMs (basados en los valores medios) para los puntos de control 1, 5, 6 y 7, cuyos periodos fundamentales promedio son menores a 3 segundos (profundidades al basamento menores a 500 m), son equivalentes a los obtenidos mediante propagación 1D, considerando un amortiguamiento constante del

suelo igual a 7 % (observar Figuras 5.8, H.4, H.5 y H.6). Por otra parte, los obtenidos para los puntos de control 2, 3 y 4, cuyos periodos fundamentales son mayores a 3 s (profundidades al basamento mayores a 500 m), son equivalentes a los obtenidos mediante propagación 1D, considerando un amortiguamiento constante del suelo igual a 5 % (observar Figuras H.1, H.2 y H.3).

Los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos mediante propagación 1D, considerando un amortiguamiento constante del suelo igual a 3 %, se acomodan en una banda ubicada entre los espectros generados por la combinación de GMMs (valores medios y medios más una desviación), como se puede observar en las Figuras 5.8 y las presentadas en el Anexo H. No obstante, en función del periodo fundamental del suelo del punto de control analizado, la banda se desplaza hacia el espectro que considera la desviación estándar (puntos de control 1, 5, 6, 7) o se desplaza hacia el espectro que considera valores promedios (puntos de control 2, 3 y 4).

Al comparar los espectros obtenidos mediante propagación 1D y el espectro según la GBDS (2020), se observa diferencias considerables en función al evento generado por ambas fallas.

Para el evento generado por la falla Cochabamba, el espectro según la GBDS (2020) es proporcional al obtenido mediante el método lineal equivalente en la propagación 1D, para todos los puntos de control (observar Figuras 5.8 y H.1 a H.6). Sin embargo, para periodos naturales mayores o iguales al periodo fundamental del suelo (degradado), las pseudo-aceleraciones obtenidas mediante el método lineal equivalente son mayores al normativo. Por otra parte, los espectros obtenidos mediante propagación 1D y considerando amortiguamientos constantes (3, 5 y 7 %), son mayores al espectro normativo en la mayor parte del rango de periodos naturales evaluados.

Para el evento generado por la falla de Sipe Sipe, el espectro según la GBDS (2020) cubre a los obtenidos mediante propagación 1D en los puntos de control 1, 3 y 4, para todos los tipos de análisis realizados (lineales y lineales equivalentes) y en todo el rango de periodos naturales (observar Figuras H.13, H.15 y H.16). En los puntos de control 6 y 7, dada la cercanía de estos puntos a la falla de Sipe Sipe, los espectros obtenidos de la propagación 1D superan al espectro normativo cuando se consideran amortiguamientos constantes del suelo, en un rango de periodos naturales definidos (observar Figuras 5.9 y H.18). Los obtenidos mediante el método lineal equivalente son inferiores al espectro normativo. En los puntos de control 2 y 5, el espectro normativo es superado únicamente cuando un amortiguamiento del 3 % es considerado en la propagación 1D (observar Figuras H.14 y H.17).

6.3.5. Correlación de resultados y aplicación en la estimación de mapas de PGA

Los resultados obtenidos de la amplificación relativa PGA_{suelo}/PGA_{roca} resaltan lo evidenciado en párrafos anteriores. Además, resaltan la importancia del uso conjunto del periodo fundamental del suelo y el V_{s30} como indicadores de la amplificación dinámica de un depósito de suelos.

De manera teórica, lo que se esperaría de las Ecuaciones 5.1 a 5.12 es que conforme el depósito de suelo tiende a ser más rígido (menor periodo fundamental), el factor de amplificación PGA_{suelo}/PGA_{roca} reduzca y decaiga hasta un valor igual a 1 (sin amplificación), como es observado en las figuras 5.16f y 5.17f. Este efecto no es capturado por las correlaciones propuestas, por tanto, el uso de estas se limita al rango de periodos fundamentales evaluados y definido entre 1.5 a 5.5 s, en los cuales estas ecuaciones alcanzan altos grados de correlación, como se puede observar en los coeficientes de correlación presentados en las Tablas 5.5 y 5.6.

No se desarrollaron correlaciones entre la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} y el periodo fundamental del suelo para los resultados obtenidos del método lineal equivalente, como se observa en las Figuras 5.14 y 5.15. En estas figuras no se observa patrones claros de amplificación o deamplificación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} con el periodo fundamental del suelo debido a que los valores de PGA obtenidos en los puntos de control son alcanzados bajo diferentes niveles de amortiguamiento del suelo.

En las Figuras 5.16 y 5.17, se observa el efecto del periodo fundamental en el factor de amplificación de pseudo-aceleraciones (PSa_{suelo}/PSa_{roca}), para un periodo natural y amortiguamiento del suelo definido. Lo que se observa en estas figuras es una tendencia de reducción de este factor, conforme el incremento de los periodos fundamentales cuando el periodo natural no coincide con los periodos fundamentales del suelo. Cuando el periodo natural coincide con el periodo fundamental (resonancia), se observa la mayor amplificación dentro el rango de periodos naturales evaluados, como es el caso de las figuras 5.16d, 5.16e y 5.16f. En estas figuras se observa además el efecto del V_{S30} , el cual indica que a mayor V_{S30} , menor amplificación sísmica.

El incorporar las Ecuaciones 5.1 a 5.12 en la estimación del PGA en la Cuenca (observar Figuras 5.19 y 5.20), permite evidenciar el efecto completo del depósito de suelos (profundidad al basamento y velocidad de ondas de corte en profundidad) en la respuesta sísmica. Al comparar estas figuras (5.19b, 5.19c y 5.19d) con lo obtenido mediante el promedio de GMMs (Figura 5.19a), se evidencia claramente una diferencia en los valores de PGA alcanzados y principalmente la ubicación de zonas donde se evidencia menores efectos de amplificación, los cuales no son capturados por las GMMs que utilizan al V_{S30} como el único indicador de la amplificación sísmica de un depósito de suelos. En las Tablas 6.1 y 6.2 se comparan los resultados obtenidos de la aplicación de estas ecuaciones en la estimación del PGA en los puntos de control para los escenarios de activación sísmica asociados a las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, respectivamente.

A diferencia de lo evidenciado en el mapa presentado en la Figura 5.19a (obtenido del promedio de valores medios más una desviación estándar de las GMMs, para el evento asociado a la falla Cochabamba), se observa que la parte norte (representado por el punto de control 4) y central de la cuenca (representado por el punto de control 2), donde se tienen los mayores periodos fundamentales (observar Figura 3.10), evidencian una reducción considerable del PGA en los mapas presentados en las Figuras 5.19b, 5.19c y 5.19, los cuales incorporan el periodo fundamental y amortiguamiento del suelo. La reducción del PGA en estas zonas se hace más evidente con el incremento del nivel del amortiguamiento del suelo como se evidencia al observar la Figura 5.19d. Sin embargo, en las zonas de la Cuenca donde los periodos fundamentales del suelo son menores a 3 s, como los presentados por los puntos de control 1, 5, 6 y 7, se

observa que los valores de PGA son ligeramente menores a los presentados en la Figura 5.19a.

Al comparar el mapa presentado en la Figura 5.20a (obtenido del promedio de valores medios más una desviación estándar de las GMMs, para el evento asociado a la falla Sipe Sipe) con los presentados las Figuras 5.20b, 5.20c y 5.20d, se observa que la parte norte (representado por el punto de control 4) y central de la cuenca (representado por el punto de control 2), donde se tienen los mayores periodos fundamentales (observar Figura 3.10), evidencian una reducción considerable del PGA. Además, el efecto conjunto de la atenuación (generada por la distancia a la falla), el amortiguamiento y los altos periodos fundamental, genera una reducción en los valores de PGA en la parte este de la Cuenca (representado por los puntos de control 1 y 3). En los puntos de control 5, 6 y 7, cuyos periodos fundamentales son menor a 3 s, no se evidencia una diferencia marcada en los valores de PGA en relación a los presentados en la Figura 5.20a. Finalmente, en la zona ubicada al norte del punto de control 6, donde se tienen altos espesores de sedimentos o periodos fundamentales (observar Figura 3.10), se tiene una reducción considerable del valor de PGA, a pesar de la cercanía al escarpe de la falla de Sipe Sipe.

Tabla 6.1: Resumen de valores de PGA obtenidos en los puntos de control a partir de la evaluación de las Ecuaciones 5.1 a 5.6, las cuales incorporan el efecto del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo (resultados asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba).

PC	T_f [s]	PGA [g]				
		$\beta=3\%$	$\beta=5\%$	$\beta=7\%$	Promedio GMMs (μ)	Promedio GMMs ($\mu + \sigma_{GMM}$)
1	2.86	0.83	0.60	0.48	0.50	0.99
2	3.70	0.51	0.36	0.28	0.37	0.74
3	3.85	0.75	0.53	0.41	0.52	1.03
4	4.35	0.58	0.40	0.31	0.48	0.96
5	2.08	0.70	0.53	0.44	0.38	0.75
6	2.78	0.68	0.50	0.39	0.41	0.81
7	2.00	0.70	0.54	0.44	0.40	0.79

Tabla 6.2: Resumen de valores de PGA obtenidos en los puntos de control a partir de la evaluación de las Ecuaciones 5.7 a 5.12, las cuales incorporan el efecto del periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo (resultados asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe).

PC	T_f [s]	PGA [g]				
		$\beta=3\%$	$\beta=5\%$	$\beta=7\%$	Promedio GMMs (μ)	Promedio GMMs ($\mu + \sigma_{GMM}$)
1	2.86	0.19	0.12	0.09	0.14	0.27
2	3.70	0.34	0.21	0.15	0.28	0.55
3	3.85	0.17	0.10	0.07	0.15	0.29
4	4.35	0.18	0.11	0.08	0.19	0.42
5	2.08	0.27	0.19	0.14	0.16	0.31
6	2.78	0.81	0.53	0.38	0.50	1.01
7	2.00	0.59	0.42	0.32	0.36	0.78

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

La evaluación de la respuesta sísmica de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba es muy compleja debido a sus características geológicas, la falta de conocimiento de los parámetros geotécnicos de los materiales en profundidad, el espesor real del sedimento, la escasa información existente sobre las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe y la falta de registros sísmicos asociados a eventos corticales registrados en la Cuenca.

Para afrontar este problema, se conformaron perfiles de suelos según la geología de la Cuenca, se generaron modelos de velocidades de ondas de corte a partir de información geotécnica en superficie y la descripción geológica de los materiales, se identificaron las profundidades al basamento rocoso a partir de estudios previos realizados, se establecieron eventos sísmicos según la longitud de las fallas y correlaciones empíricas, se ajustaron registros sísmicos espectro compatibles, se implementaron modelos de movimiento fuerte para terremotos corticales y se realizaron análisis de propagación unidimensional de ondas de corte considerando diferentes tipos de análisis que incorporan variabilidad en la velocidad de ondas de corte y la profundidad del basamento rocoso.

La ubicación de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe, el espesor variable del sedimento y las bajas velocidades de ondas de corte en zonas de la Cuenca indican que las aceleraciones máximas del terreno asociadas a estas fallas varían considerablemente y pueden ser mayores al obtenido en el análisis probabilístico de amenaza sísmica desarrollado para Bolivia (PSH-BO, 2019), el cual define un valor de $PGA = 0.22$ g para la Cuenca de Cochabamba. Por lo que un único valor de PGA podría no ser representativo de toda la Cuenca.

Los altos espesores de sedimentos y los amortiguamientos alcanzados en el suelo asociados a los niveles de sollicitación sísmica y la no linealidad de las arcillas de la Cuenca de Cochabamba, pueden reducir considerablemente las sollicitaciones sísmicas en superficie. El efecto conjunto de estos parámetros en la amplificación dinámica de los depósitos de suelo en la Cuenca es reproducido por las correlaciones desarrolladas para estimar el PGA. No obstante, esta evidencia resalta aún más la necesidad de contar con información sobre los parámetros del suelo en profundidad.

El uso individual del V_{S30} como un único indicador de la amplificación sísmica de los suelos de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba, no es suficiente dado el gran espesor de los sedimentos en zonas de la Cuenca. El incorporar el efecto del periodo fundamental del suelo junto al V_{S30} permite una mejor estimación del PGA e identificar el rango de periodos naturales donde se espera las mayores aceleraciones espectrales.

Los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos mediante el promedio de GMMs, calculadas considerando sus valores promedio más la desviación estándar, se encuentran del lado seguro y cubren a los espectros obtenidos de la propagación 1D y los construidos según la GBDS (2020).

Los espectros de pseudo-aceleraciones basados únicamente en los valores promedios obtenidos de las GMMs, son equivalentes a los obtenidos mediante propagación unidimensional para un nivel de amortiguamiento y periodo fundamental del suelo definidos. Por tanto, dado que las GMMs no consideran el periodo fundamental y el amortiguamiento del suelo como parámetros de entrada, se debe tener un especial cuidado en su aplicación debido a que se puede subestimar el valor de los parámetros de movimiento del suelo en superficie.

Los resultados obtenidos de la propagación unidimensional evidencian que, el espectro construido según la GBDS (2020) es proporcional al espectro obtenido mediante un análisis lineal equivalente para periodos naturales menores al periodo fundamental del suelo. Para periodos naturales mayores o iguales al periodo fundamental del suelo (degradado), las pseudo-aceleraciones obtenidas mediante el método lineal equivalente son mayores al normativo. En esta línea, se debe considerar el incluir un parámetro que incorpore el efecto del periodo fundamental del suelo en la construcción del espectro de diseño.

Los resultados obtenidos a partir de las diferentes GMMs evaluadas y los análisis de propagación unidimensional de ondas de corte evidencian que las mayores pseudo-aceleraciones en la Cuenca se concentran entre los periodos naturales comprendidos entre 0.1 a 0.8 segundos. Esto indica que, dado un evento generado por estas fallas, estructuras de 1 a 8 pisos, aproximadamente, podrían experimentar las mayores solicitaciones sísmicas en la Cuenca.

La metodología utilizada en esta tesis es simplificada debido a que la propagación unidimensional considera que la onda de corte es la única que genera daño en estructuras emplazadas en superficie. Sin embargo, esta metodología al no incorporar el efecto de la forma y topografía de la Cuenca, no permite la generación y evaluar el efecto de las ondas superficiales generadas, las cuales son incorporadas en análisis bidimensionales o tridimensionales. Se suma a esto, la simplificación que se realiza al considerar estratos dispuestos completamente de forma horizontal, los cuales difieren de las condiciones existentes en la Cuenca y muy probablemente modificarían la respuesta en superficie.

7.2. Recomendaciones

Más allá de los resultados obtenidos en la evaluación de la amenaza sísmica determinística realizado en la presente tesis, lo que se pretende es resaltar la importancia en la investigación y reducir las grandes brechas existentes en la información disponible al día de hoy, las cuales limitaron en parte el desarrollo de esta tesis. Se recomienda que los trabajos a desarrollar en

una primera etapa, consistan en mediciones en campo que se enfoquen en determinar modelos de velocidad de ondas de corte en profundidad, medir los periodos de vibración del suelo, definir la profundidad al basamento rocoso y un estudio exhaustivo sobre las características geológicas, estructurales y dinámicas de las fallas de Cochabamba y Sipe Sipe.

El periodo fundamental del suelo representa un parámetro completo que engloba en un solo valor, la profundidad al basamento y el perfil de velocidades de ondas de corte hasta el basamento de un depósito de suelos. Por lo que se resalta la importancia del uso conjunto del periodo fundamental del suelo y el V_{s30} como indicadores de la amplificación dinámica de los depósitos de suelos de la Cuenca del Valle Central de Cochabamba. Sin embargo, dado el gran espesor de los sedimentos existentes en la Cuenca, plantea un desafío tanto en su medición, interpretación y la incorporación de estos en la definición de un criterio propio de clasificación sísmica de suelos.

Los modelos de velocidad de ondas de corte propuestos en esta tesis no reemplazan a ningún sondeo geotécnico realizado en la Cuenca de Cochabamba. Por tanto, se recomienda que estos modelos de velocidad sean utilizados únicamente con fines académicos.

Se recomienda enfáticamente no hacer uso de los espectros obtenidos en la presente tesis para diseño debido a que se requiere una validación de los parámetros geotécnicos y la profundidad al basamento, considerados en los análisis de propagación unidimensional realizados.

Bibliografía

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3):1025–1055.
- Acevedo, M. (2021). *Modelo de velocidades de la Cuenca de Santiago y estimación de su respuesta sísmica*. Msc thesis, Universidad de Chile.
- Adekristi, A. & Eatherton, M. R. (2016). Time-Domain Spectral Matching of Earthquake Ground Motions using Broyden Updating. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(5):679–698.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer edition.
- Baker, J. W. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3):322–331.
- Bard, P.-Y. (1994). Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. In *Proceedings of the 10th European conference on earthquake engineering*, pages 305–323, Rotterdam.
- Bommer, J. J., Scherbaum, F., Bungum, H., Cotton, F., Sabetta, F., & Abrahamson, N. A. (2005). On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2):377–389.
- Boore, D. M. (2004). Estimating $V_s(30)$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(2):591–597.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3):1057–1085.
- Cadet, H., Pierre Yves, B., Anne Marie, D., & Etienne, B. (2012). Site effect assessment using KiK-net data: Part 2-site amplification prediction equation based on f_0 and V_{sz} . *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2):451–489.
- Campbell, N., Fenton, C., & Tallett-Williams, S. (2016). An investigation into the effects of material properties on shear wave velocity in rocks/soils. *Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016*, 2:849–853.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., & Bianchini, A. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(6):1587–1612.
- Chaljub, E., Moczo, P., Tsuno, S., Bard, P. Y., Kristek, J., Käser, M., Stupazzini, M., &

- Kristekova, M. (2010). Quantitative comparison of four numerical predictions of 3D ground motion in the Grenoble Valley, France. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4):1427–1455.
- Claprood, M., Asten, M. W., & Kristek, J. (2012). Combining HVSR microtremor observations with the SPAC method for site resonance study of the Tamar Valley in Launceston (Tasmania, Australia). *Geophysical Journal International*, 191(2):765–780.
- Costa, C. H., Pedersen, O., Casa, A., Cisneros, H., Coppolecchia, M., Yamin, M., Valencia, J., Pérez, I., Tello, G., Ramírez, V., Terán, N., Lopez, S., Minaya, E., Ruiz, M., Chirinos, C., & Hermanns, R. (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias de Los Andes. Proyecto Multinacional Andino “Geociencia para las Comunidades Andinas”*.
- Dobry, R., Borcherdt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E., & Seed, R. B. (2000). New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1):41–67.
- Gobbi, S., Lenti, L., Santisi D’avila, M. P., & Semblat, J.-F. (2019). Influence of the variability of the geotechnical properties of soils on computed response spectra for 1D stratigraphies. In *Proceedings of the XVII ECSMGE*, number September, pages 1–8.
- Godoy, C., González, L., & Sáez, E. (2015). Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago. *Obras y proyectos*, (17):61–67.
- Graizer, V. & Kalkan, E. (2016). Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5 *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(2):687–707.
- Griffiths, S. C., Cox, B. R., Rathje, E. M., & Teague, D. P. (2016). Surface-Wave Dispersion Approach for Evaluating Statistical Models That Account for Shear-Wave Velocity Uncertainty. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11):04016061.
- Guéguen, P., Cornou, C., Garambois, S., & Banton, J. (2007). On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: Application to the Grenoble valley (France), a small apex ratio basin. *Pure and Applied Geophysics*, 164(1):115–134.
- Idini, B. R. (2016). *Curvas de atenuación para terremotos intra- placa e interplaca en la zona de subducción chilena*. Msc thesis, Universidad de Chile.
- Kaklamanos, J., Baise, L. G., & Boore, D. M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4):1219–1235.
- Kottke, A. & Rathje, E. (2009). Technical Manual for Strata. Technical Report January 2015, University of Texas, Austin.
- Kramer, L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, volume I. Prentice-Hall, New Jersey.
- Lanzano, G., Luzi, L., Pacor, F., Felicetta, C., Puglia, R., Sgobba, S., & D’Amico, M. (2019). A revised ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2):525–540.
- Lavenu, A. & Mercier, J.-L. (1991). Évolution du régime tectonique de l’Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes de Bolivie du Miocène supérieur à l’Actuel Un effet des forces de gravité et des forces aux limites. *Géodynamique*, 6(January):21–55.

- Lavenu, A., Thiele, R., Machette, M. N., Dart, R. L., Bradley, L.-A., & Haller, K. M. (2000). Maps and database of Quaternary faults in Bolivia and Chile. Technical report, The United States Geological Survey, Denver.
- Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. In *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, pages 1–8, Cancún.
- Li, X., Zhai, C., Wen, W., & Xie, L. (2020). Ground Motion Prediction Model for Horizontal PGA, 5Response Spectrum in Sichuan-Yunnan Region of China. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(11):1829–1866.
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*.
- Luzi, L., Puglia, R., Pacor, F., Gallipoli, M. R., Bindi, D., & Mucciarelli, M. (2011). Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to Vs,30. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6):1877–1898.
- Martelli, L. (2021). Assessment of Seismic Bedrock in Deep Alluvial Plains. Case Studies from the Emilia-Romagna Plain. *Geosciences*, 11(7):319.
- Martelli, L. & Romani, M. (2012). Relazione Illustrativa. Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012. ., 2012.
- Mejia, J. (2016). *Caracterización de suelos estratificados mediante el ensayo de penetración de piezocono CPTu*. Bachelor degree thesis, Universidad Mayor de San Simón.
- Mejia, J., Cruz, A., & Fernandez, H. W. (2022). Estimation of undrained shear strength of clays from the Cochabamba-Bolivia basin using CPTu and SPT tests.
- Minarelli, L., Amoroso, S., Tarabusi, G., Stefani, M., & Pulelli, G. (2016). Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy. *Annals of Geophysics*, 59(5).
- Moffat, R. & Pastén, C. (2014). Caracterización Sísmica de un Depósito de Suelos Lacustre con Métodos Invasivos y No Invasivos. In *VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, number 1, pages 1–12.
- Orozco, J. G. & Alcalá, P. A. (2000). Terremoto de Aiquile – Cochabamba Bolivia 1998. Technical report, Organización Panamericana de la Salud, Quito.
- Panzer, F., Lombardo, G., D'Amico, S., & Gale, P. (2013). Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities. In *Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering*, chapter 5, pages 101–145. InTech.
- Passeri, F., Foti, S., & Rodriguez-Marek, A. (2020). A new geostatistical model for shear wave velocity profiles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136(June).
- Pastén, C., Astroza, R., Bazález, R., Contreras, N., Grand, J., Hernández, F., & Ochoa, F. (2021). Guía para el análisis sísmico no lineal de puentes chilenos. Technical report, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, Santiago.
- Rathje, E., Kottke, A., & Trent, W. L. (2020). Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Responde Analysis. Technical Report April.

- Renner, S. & Velasco, C. (2000). Geología e Hidrogeología del Valle Central De Cochabamba. Technical report, Servicio Nacional de Geología y Minería, Cochabamba.
- Rojas, N. (2015). *Aplicación de sistemas de información geográfica en geotecnia: Recopilación, análisis y predicción de parámetros geotécnicos del suelo en la ciudad de Cochabamba*. Bachelor degree thesis, Universidad Mayor de San Simón.
- Roten, D., Fäh, D., Cornou, C., & Giardini, D. (2006). Two-dimensional resonances in Alpine valleys identified from ambient vibration wavefields. *Geophysical Journal International*, 165(3):889–905.
- Seht, M. I.-v. & Wohlenberg, J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1):250–259.
- Semblat, J.-F. & Pecker, A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*, volume I. IUSS Press, Pavía.
- Souriau, A., Roullé, A., & Ponsolles, C. (2007). Site Effects in the City of Lourdes, France, from H/V Measurements: Implications for Seismic-Risk Evaluation Site Effects in the City of Lourdes, France, from H/V Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(6):2118–2136.
- Stewart, J. P., Afshari, K., & Hashash, Y. M. A. (2014). Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-Dimensional Ground Response Analysis for Ground Motion Prediction. Technical Report October 2014.
- Tiznado, C. A. (2020). *Propuesta de espectros de respuesta para suelos en Chile*. Msc thesis, Universidad de Chile.
- Toro, G. R. (1995). Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground motion amplification studies. Technical report, Brookhaven National Laboratory, New York.
- Tran, T. T., Han, S. R., & Kim, D. (2018). Effect of probabilistic variation in soil properties and profile of site response. *Soils and Foundations*, 58(6):1339–1349.
- Uebayashi, H., Kawabe, H., & Kamae, K. (2012). Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin. *Geophysical Journal International*, 189(2):1060–1074.
- Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(5):89–107.
- Wair, B. R., Dejong, J. T., & Shantz, T. (2012). Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. Technical Report December.
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(4):974–1002.
- Yoshida, N. (2015). *Seismic ground response analysis*, volume 36. Springer, Miyagi.
- Zavala, J. F. (2013). *Actividad Sísmica en la ciudad de Cochabamba relacionada a la falla de Cochabamba*. Bachelor degree thesis, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Anexos

Anexo A

Ecuaciones para estimar V_s a partir de sondeos SPT y CPT

A.1. Correlaciones V_s -SPT

Tabla A.1: Correlaciones V_s -SPT para todo tipo de suelos.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Ohba & Toriuma (1970)	-	-	-	$82.5N_{60}^{0.31}$
Ohsaki & Iwasaki (1973)	-	220	-	$78.0N_{60}^{0.39}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.52	$82.1N_{60}^{0.35}$
Ohta & Goto (1978)	Holoceno	-	0.61	$89.5N_{60}^{0.27}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.67	$59.9N_{60}^{0.25}Z^{0.22}$
Ohta & Goto (1978)	Holoceno	-	0.72	$66.9N_{60}^{0.21}Z^{0.19}$
Imai & Tonouchi (1982)	Holoceno	1654	0.75	$93.7N_{60}^{0.31}$
Lin et al. (1984)	-	31	-	$62.0N_{60}^{0.50}$
Sisman (1995)	-	-	-	$31.0N_{60}^{0.51}$
Iyisan (1996)	-	-	-	$48.6N_{60}^{0.52}$
Jafari et al. (1997)	-	-	-	$20.0N_{60}^{0.85}$
Kiku et al. (2001)	-	-	-	$66.1N_{60}^{0.29}$
Hasncebi & Ulusay (2007)	Cuaternario	-	0.53	$104.8N_{60}^{0.26}$

Tabla A.2: Correlaciones Vs-SPT para arenas.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Kanai (1966)	-	70	-	$17.7N_{60}^{0.60}$
Shibata (1970)	-	-	-	$30.0N_{60}^{0.50}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.53	$86.8N_{60}^{0.34}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.53	$78.3N_{60}^{0.34}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.53	$77.2N_{60}^{0.34}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.69	$66.2N_{60}^{0.22}Z^{0.23}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.69	$62.4N_{60}^{0.22}Z^{0.23}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.69	$65.1N_{60}^{0.22}Z^{0.23}$
Imai & Tonouchi (1982)	Holoceno	294	0.48	$85.0N_{60}^{0.29}$
Sikora & Stokoe (1983)	-	97	0.71	$100.6N_{60}^{0.29}$
Seed et al. (1983)	Cuaternario	-	-	$56.4N_{60}^{0.50}$
Seed et al. (1986)	Cuaternario	-	-	$85.0N_{60}^{0.17}Z^{0.20}$
Lee (1992)	Holoceno	126	0.45	$98.6N_{60}^{0.30}$
Dickenson (1994)	-	-	-	$88.4(N_{60} + 1)^{0.30}$
Pitilakis et al. (1999)	-	145	0.49	$145.0N_{60}^{0.18}$
Hasncebi & Ulusay (2007)	Cuaternario	-	0.42	$131.0N_{60}^{0.21}$

Tabla A.3: Correlaciones Vs-SPT para arcillas.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.53	$82.4N_{60}^{0.34}$
Ohta & Goto (1978)	Holoceno	-	0.62	$90.6N_{60}^{0.25}$
Ohta & Goto (1978)	Cuaternario	-	0.69	$60.7N_{60}^{0.22}$
Ohta & Goto (1978)	Holoceno	-	0.73	$67.5N_{60}^{0.17}$
Imai & Tonouchi (1982)	Holoceno	63	0.33	$95.7N_{60}^{0.25}$
Imai & Tonouchi (1982)	Holoceno	325	0.52	$103.8N_{60}^{0.27}$
Jinan (1987)	Holoceno	59	0.49	$116.1(N_{60} + 0.32)^{0.20}$
Lee (1992)	Holoceno	265	0.48	$131.7(N_{60} + 1.2)^{0.24}$
Lee (1992)	Holoceno	365	0.51	$122.7(N_{60} + 1.2)^{0.26}$
Lee (1992)	Holoceno	100	0.64	$97.2(N_{60} + 1.2)^{0.33}$
Lee (1992)	Holoceno	265	0.79	$84.1N_{60}^{0.12}(Z + 1)^{0.22}$
Lee (1992)	Holoceno	100	0.83	$80.6N_{60}^{0.13}(Z + 1)^{0.23}$
Lee (1992)	Holoceno	365	0.80	$82.5N_{60}^{0.12}(Z + 1)^{0.25}$
Pitilakis et al. (1999)	Cuaternario	176	0.56	$128.1N_{60}^{0.27}$
Hasncebi & Ulusay (2007)	Cuaternario	-	0.56	$95.0N_{60}^{0.27}$

A.2. Correlaciones Vs-CPT

Tabla A.4: Correlaciones Vs-CPT para todo tipo de suelos.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Hegazy & Mayne (1995)	Cuaternario	323	0.70	$(10.1 \log(q_c) - 11.4)^{1.67} [100(\frac{f_s}{q_c})]^{0.3}$
Piratheepan (2002)	Cuaternario	161	0.82	$32.3q_c^{0.089} f_s^{0.121} Z^{0.215}$
Mayne (2006)	Holoceno	60	0.73	$118.8 \log(f_s) + 18.5$
Andrus et al. (2007)	Holoceno	185	0.71	$2.62q_t^{0.395} I_c^{0.912} Z^{0.124} SF^a$
Robertson (2009)	Cuaternario	1035	-	$\left[\frac{(10^{0.55I_c + 1.68})(q_t - \sigma_v)}{P_a^b} \right]^{0.5}$

^a SF= 0.92 para Holoceno

^b $P_a = 100$ kPa

Tabla A.5: Correlaciones Vs-CPT para arenas.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Sykora & Stokoe (1983)	-	256	0.61	$134.1 + 0.0052q_c$
Baldi et al. (1989)	Holoceno	-	-	$17.48q_c^{0.13} \sigma'_v{}^{0.27}$
Hegazy & Mayne (1995)	Cuaternario	133	0.68	$13.18q_c^{0.192} \sigma'_v{}^{0.179}$
Hegazy & Mayne (1995)	Cuaternario	92	0.57	$12.02q_c^{0.319} f_s^{-0.0466}$
Piratheepan (2002)	Holoceno	25	0.74	$25.3q_c^{0.163} f_s^{0.029} Z^{0.155}$

Tabla A.6: Correlaciones Vs-CPT para arcillas.

Estudio	Edad geológica	# Datos	r^2	Ecuación [m/s]
Hegazy & Mayne (1995)	Cuaternario	229	0.78	$3.18q_c^{0.549} f_s^{0.025}$
Mayne & Rix (1995)	Cuaternario	481	0.74	$1.75q_c^{0.627}$
Piratheepan (2002)	Holoceno	20	0.91	$11.9q_c^{0.269} f_s^{0.108} Z^{0.127}$

Anexo B

Modelo de Toro (1995)

Según el modelo propuesto por Toro (1995), la velocidad aleatoria de onda de corte en cualquier intervalo de profundidad es determinado por medio de las siguientes ecuaciones:

$$V_{S_i} = e^{\sigma_{\ln V_s} Z_i + \ln(V_{S_{base}(d_i)})} \quad (\text{B.1})$$

$$Z_1 = \varepsilon_i \quad (\text{B.2})$$

$$Z_i = \rho_{IL} Z_{i-1} + \varepsilon_i \sqrt{1 - \rho_{IL}^2} \quad (\text{B.3})$$

Donde $\sigma_{\ln V_s}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de la velocidad de onda de corte, el cual puede ser variable en profundidad o asumido como constante de la Tabla B.1. Z_i es una variable normal estándar que permite correlacionar los estratos. $V_{S_{base}(d_i)}$ es la velocidad de onda de corte de referencia evaluada a una determinada profundidad en m/s. ε_i es una variable aleatoria normal con promedio cero y desviación estándar igual a 1 (desviación estándar asumida = 0.5). ρ_{IL} es un coeficiente de correlación entre estratos, calculado por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{IL}(d, t) = [1 - \rho_d(d)] \rho_t(t) + \rho_d(d) \quad (\text{B.4})$$

$$\rho_t(t) = \rho_o e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (\text{B.5})$$

$$\rho_d(d) = \begin{cases} \rho_{200} \left[\frac{d+d_0}{200+d_0} \right]^b, & d \leq 200 \text{ m} \\ \rho_{200}, & d > 200 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

Donde $\rho_d(d)$ es el coeficiente de correlación dependiente de la profundidad. $\rho_t(t)$ es el coeficiente de correlación dependiente del espesor del estrato. ρ_o , δ , ρ_{200} , d_0 y b son parámetros del modelo (Tabla B.1). d es la profundidad en m y t es el espesor del estrato en m.

Tabla B.1: Parámetros del modelo de Toro (1995) para la aleatorización de la velocidad de ondas de corte (V_s).

Parámetro	V_{s30} [m/s]			
	> 750	360 - 750	180 - 360	< 180
$\sigma_{\log V_s}$	0.36	0.27	0.31	0.37
ρ_0	0.95	0.97	0.99	0.00
ρ_{200}	0.42	1.00	0.98	0.50
δ	3.40	3.80	3.90	5.00
d_o	0	0	0	0
b	0.063	0.293	0.344	0.744
Perfiles evaluados	35	169	226	27

Anexo C

Propagación unidimensional de ondas de corte en un medio multicapas

Para el análisis de propagación de ondas de corte, se considera un perfil de suelo conformado por capas perfectamente horizontales. Este perfil es idealizado y presentado en la Figura C.1.

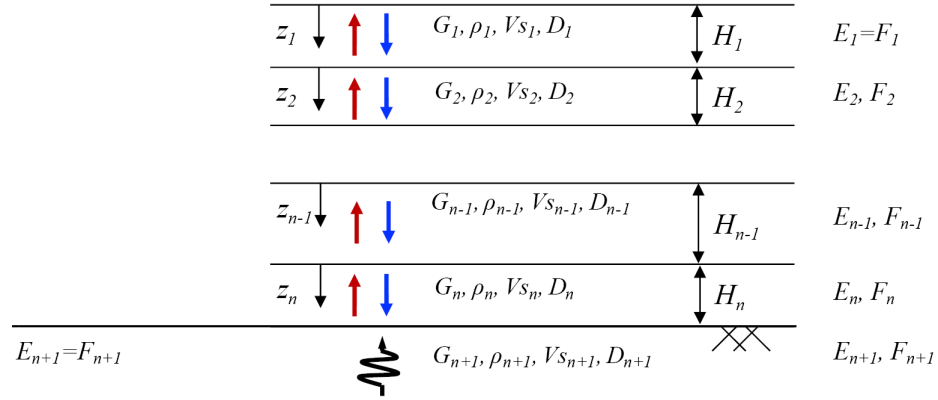


Figura C.1: Perfil de suelo unidimensional conformado por capas horizontales.

El modelo constitutivo visco-elástico que permite relacionar las tensiones con las deformaciones de corte en el suelo, es de tipo Kelvin-Voigt. Este modelo es esquematizado en la Figura C.2 y está compuesto por un resorte y un amortiguador conectados en paralelo. Para este modelo, la ecuación constitutiva es la siguiente:

$$\tau = G\gamma + c\dot{\gamma} \quad (C.1)$$

Donde G y γ son el módulo de corte y la deformación por corte, respectivamente.

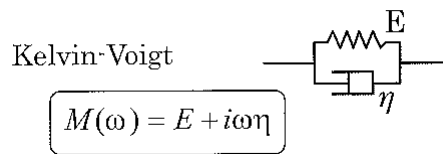


Figura C.2: Modelo constitutivo visco-elástico tipo Kelvin-Voigt (Semblat & Pecker, 2009).

La solución de la ecuación de movimiento que considera el modelo viscoelástico en cada capa, es presentada a continuación:

$$u_j(z_j, t) = E_j e^{i(\omega t + k_j^* z_j)} + F_j e^{i(\omega t - k_j^* z_j)} \quad (\text{C.2})$$

Aplicando compatibilidad de desplazamientos y esfuerzos, los desplazamientos entre estratos son relacionados a partir de los siguientes coeficientes:

$$E_{j+1} = \frac{1}{2} [E_j (1 + \Delta_j) e^{i k_j^* H_j} + F_j (1 - \Delta_j) e^{-i k_j^* H_j}] \quad (\text{C.3})$$

$$F_{j+1} = \frac{1}{2} [E_j (1 - \Delta_j) e^{i k_j^* H_j} + F_j (1 + \Delta_j) e^{-i k_j^* H_j}] \quad (\text{C.4})$$

Donde Δ_j , k_j^* y H_j corresponden a la impedancia entre estratos, el número de onda compleja y el espesor del estrato, respectivamente. La impedancia entre estratos y el número de onda complejo pueden ser calculados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta_j = \frac{\rho_j V s_j}{\rho_{j+1} V s_{j+1}} \sqrt{\frac{1 + 2i\beta_j}{1 + 2i\beta_{j+1}}} \quad (\text{C.5})$$

$$k_j^* = \frac{\omega}{V s_j \sqrt{1 + 2i\beta_j}} \quad (\text{C.6})$$

Donde ρ , V_s y β corresponden a la densidad, velocidad de onda de corte y amortiguamiento de cada estrato, respectivamente.

C.1. Función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y el basamento rocoso

En superficie, la tensión y deformación por corte son nulos ($\tau_{(z_j=0)} = \gamma_{(z_j=0)} = 0$). A consecuencia, los coeficientes E_1 y F_1 son iguales a 1. Por tanto, la función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y el basamento rocoso queda definida por la siguiente expresión:

$$A_1 = \frac{2E_1}{E_{n+1} + F_{n+1}} \quad (\text{C.7})$$

Reemplazando los coeficientes E_{n+1} y F_{n+1} , la función de transferencia entre la superficie del depósito de suelo y el basamento rocoso, es simplificada a la siguiente expresión:

$$A_1 = \frac{2E_1}{E_n e^{i k_n^* H_n} + F_n e^{-i k_n^* H_n}} \quad (\text{C.8})$$

Como se puede evidenciar en la Ecuación C.8, la función de transferencia para este caso depende únicamente de las propiedades del suelo, sin importar las propiedades de la roca.

C.2. Función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso

La función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso (outcrop) queda definida como:

$$A_2 = \frac{E_1}{E_{n+1}} \quad (\text{C.9})$$

Reemplazando el coeficiente E_{n+1} , la función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso, es simplificada a la siguiente expresión:

$$A_2 = \frac{2E_1}{E_n(1 + \Delta_n)e^{ik_n*H_n} + F_n(1 - \Delta_n)e^{-ik_n*H_n}} \quad (\text{C.10})$$

Como se puede evidenciar en la Ecuación C.10, la función de transferencia entre la superficie del depósito de suelos y la superficie de un afloramiento rocoso depende de las propiedades del suelo y la roca.

Anexo D

Mapas de PGA y pseudo-aceleraciones asociados a la falla de Sipe Sipe

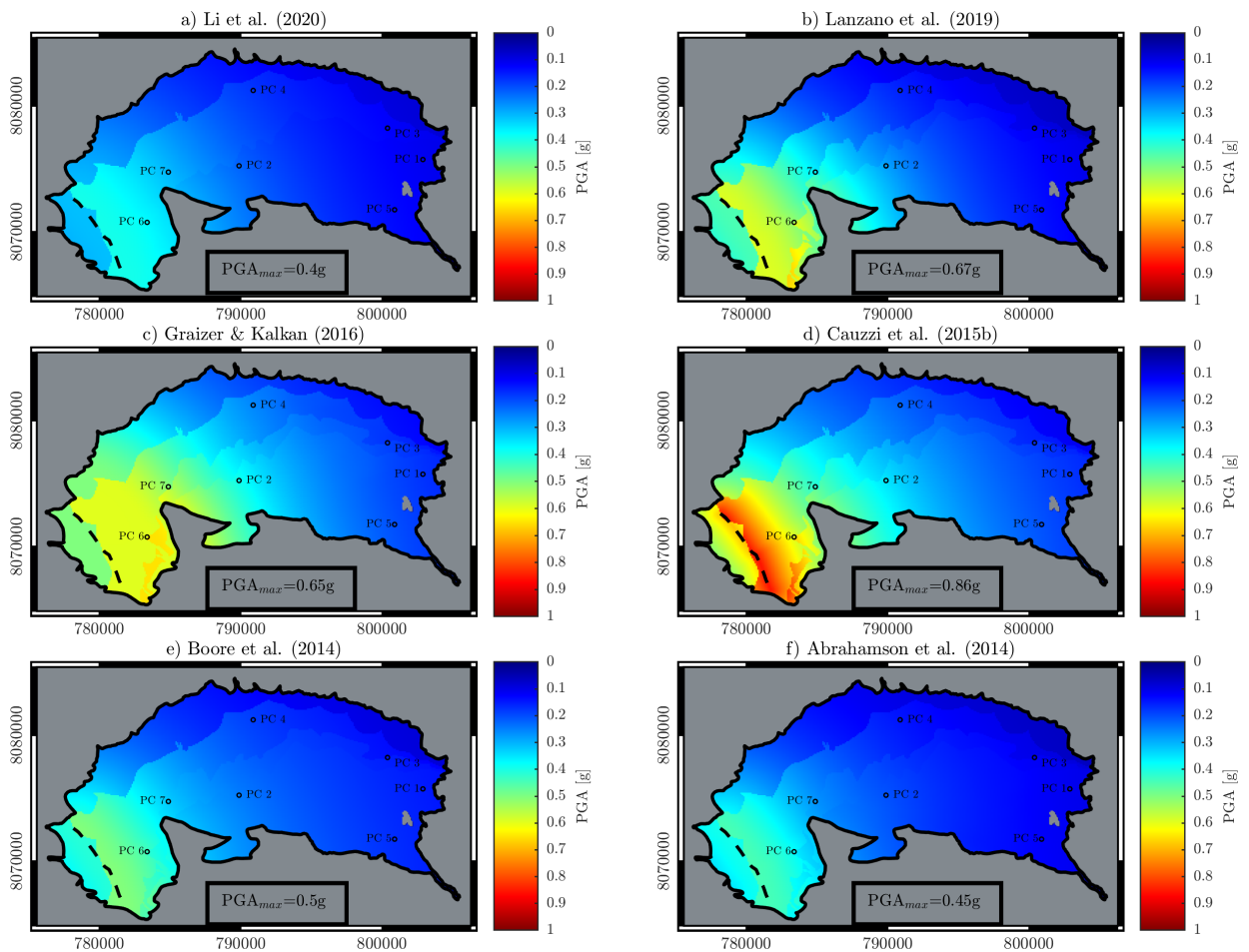


Figura D.1: Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio obtenidos por cada GMM, para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.

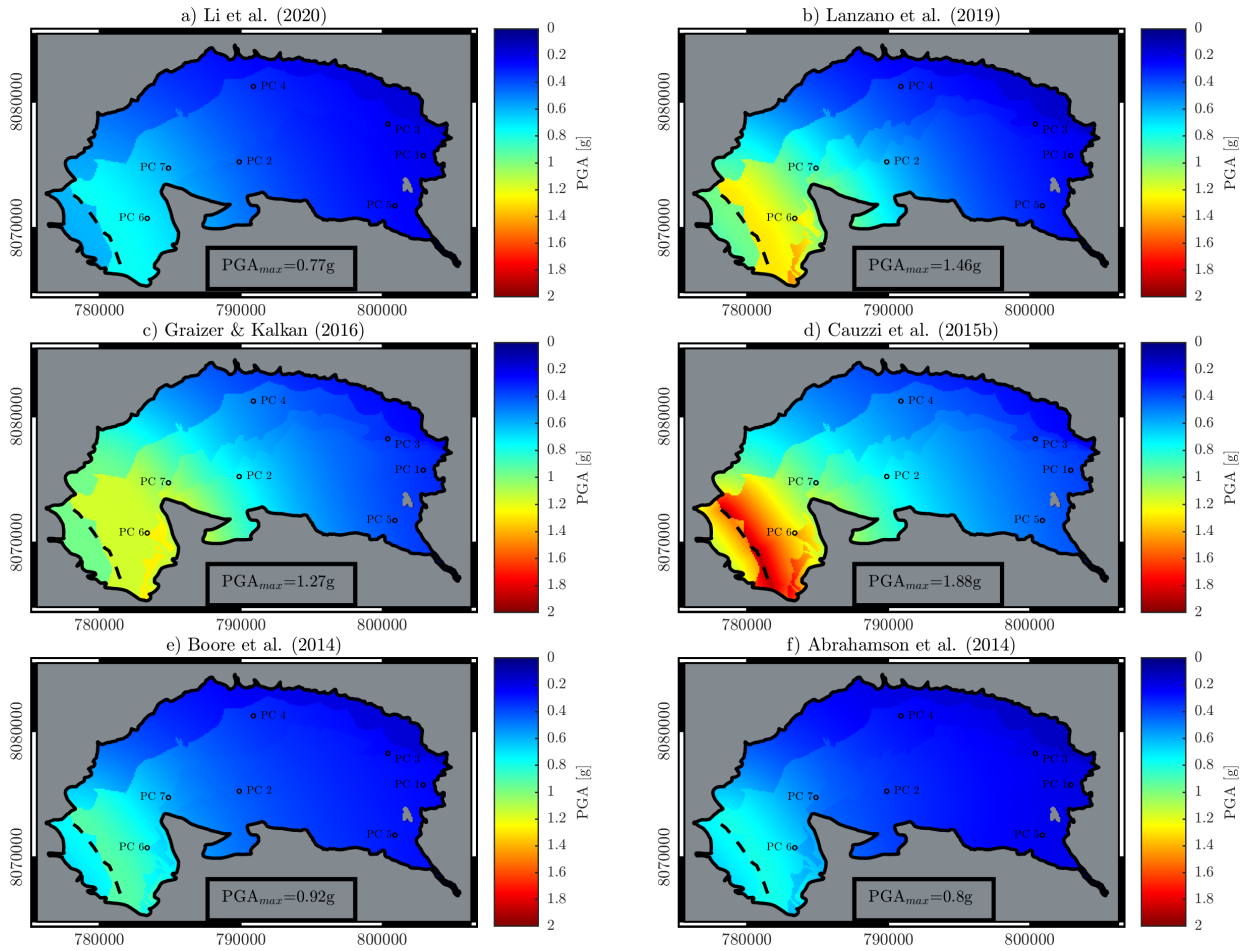


Figura D.2: Mapas de PGA estimados a partir de valores promedio más la desviación estándar de cada GMM, para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.

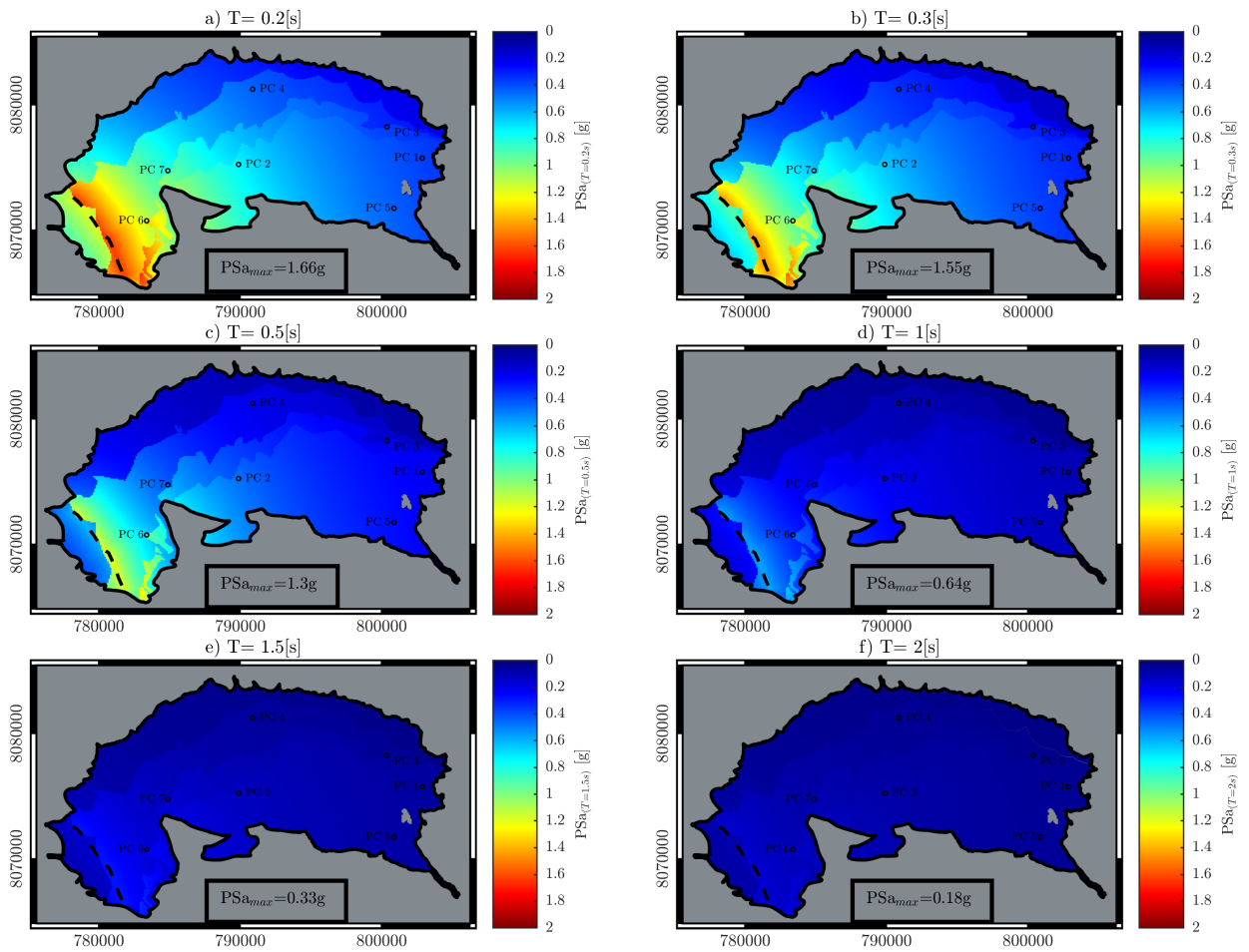


Figura D.3: Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos a partir de valores promedio obtenidos del modelo propuesto por Cauzzi et al. (2015), para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.

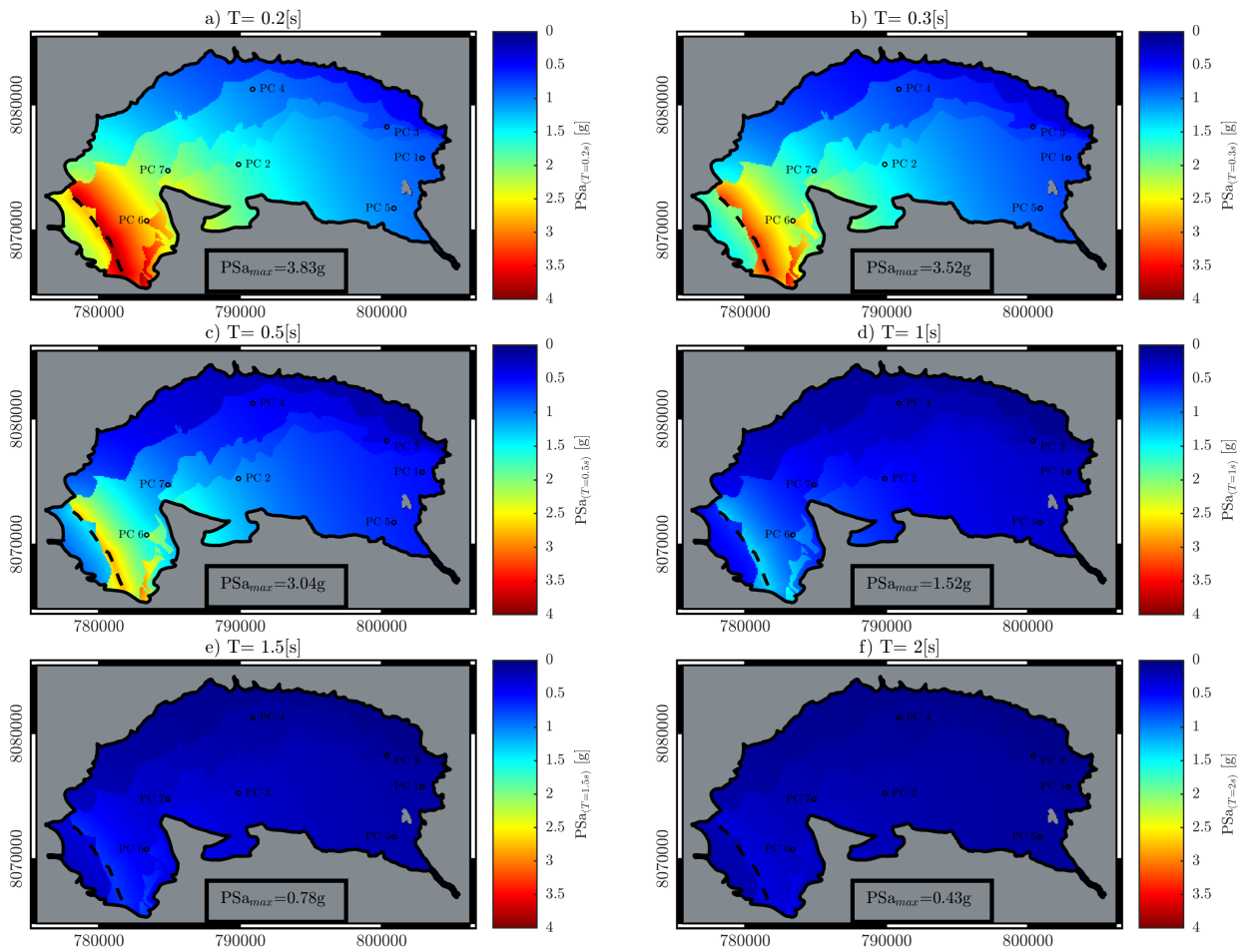


Figura D.4: Mapas de pseudo-aceleraciones para diferentes periodos, construidos en base a los valores promedio más la desviación estándar del modelo propuesto por Cauzzi et al. (2015), para un evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe.

Anexo E

Perfiles de Vs seleccionados para los puntos de control

E.1. Perfil de suelo con variabilidad en Vs

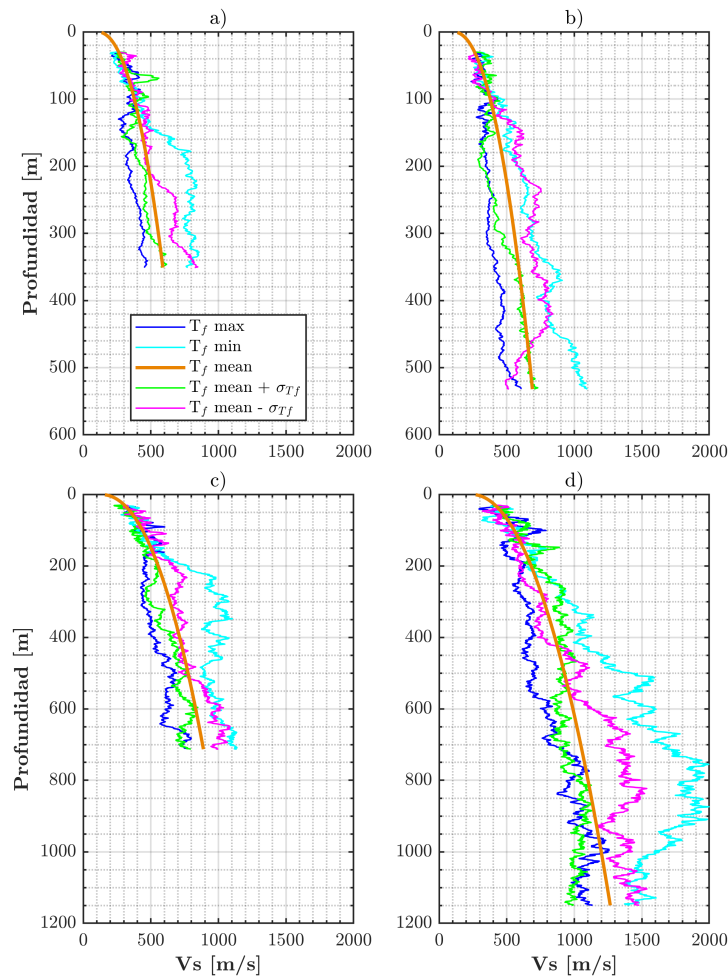


Figura E.1: Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental.
a) Punto de control 1. b) Punto de control 2. c) Punto de control 3. d) Punto de control 4.

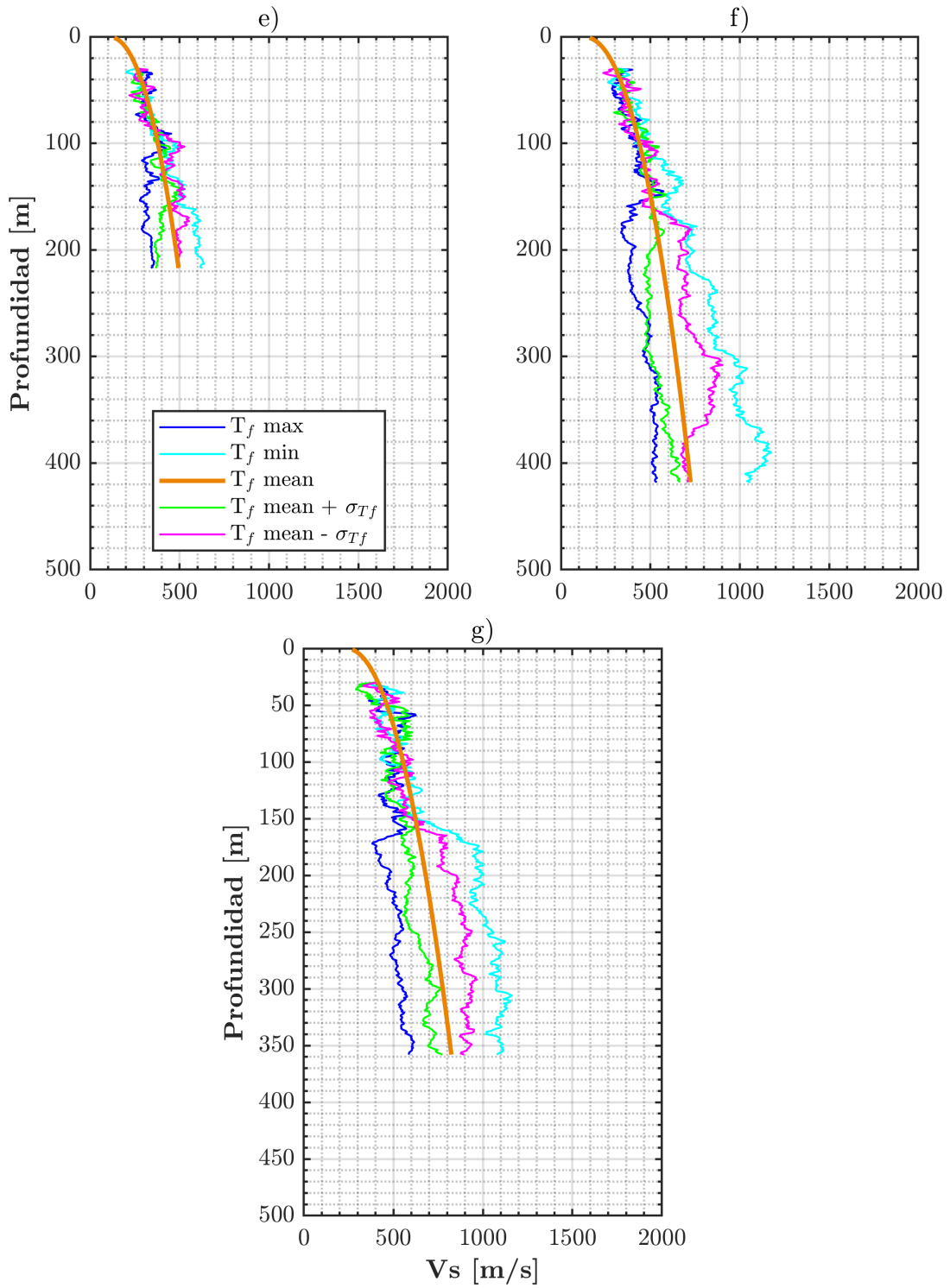


Figura E.2: Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental (continuación). e) Punto de control 5. f) Punto de control 6. g) Punto de control 7.

E.2. Perfil de Vs con variabilidad en la profundidad al basamento rocoso

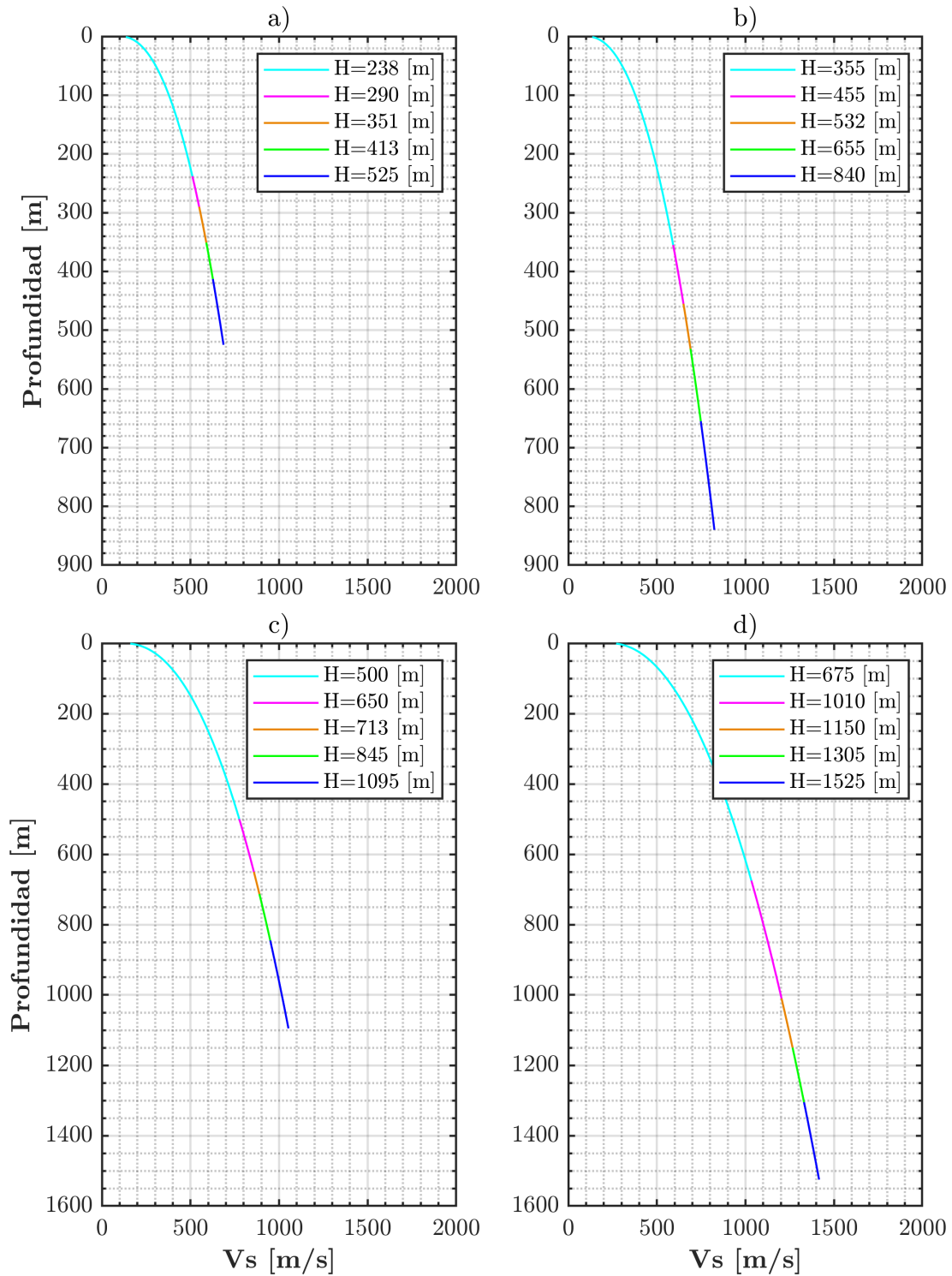


Figura E.3: Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental.
a) Punto de control 1. b) Punto de control 2. c) Punto de control 3. d) Punto de control 4.

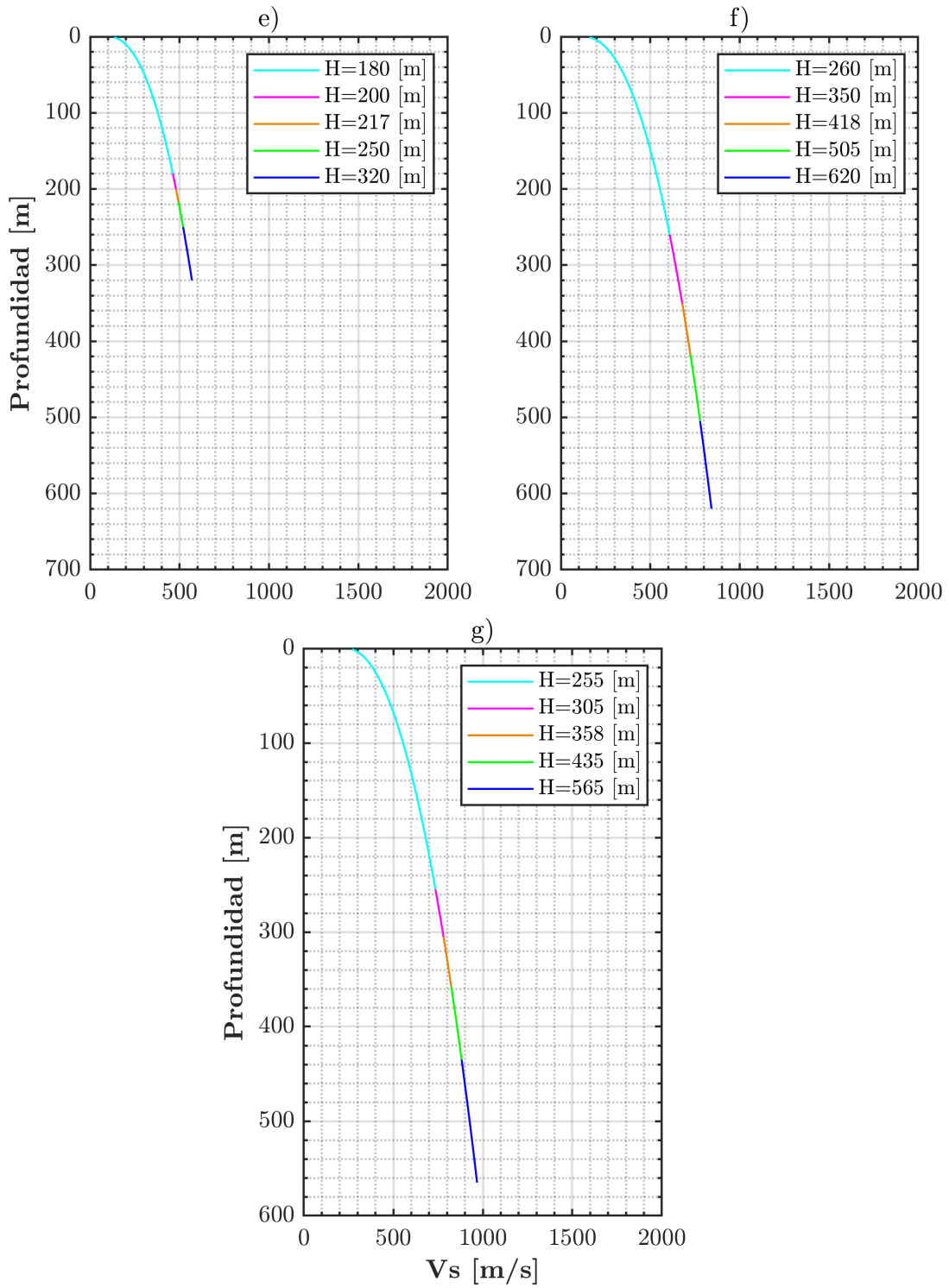


Figura E.4: Perfiles de velocidad de ondas de corte seleccionados a partir su periodo fundamental (continuación). e) Punto de control 5. f) Punto de control 6. g) Punto de control 7.

Anexo F

Espectros objetivo en roca

F.1. Falla Cochabamba (M_w 7)

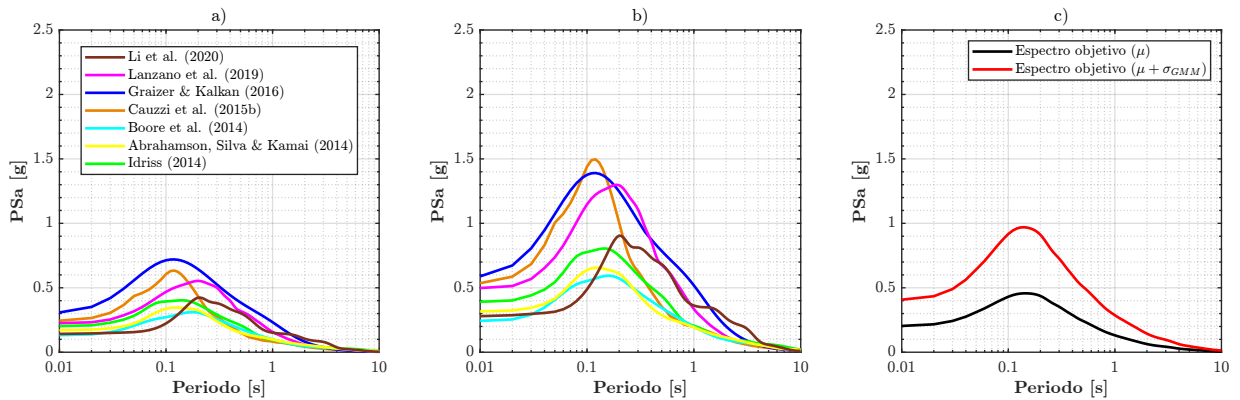


Figura F.1: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 2. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

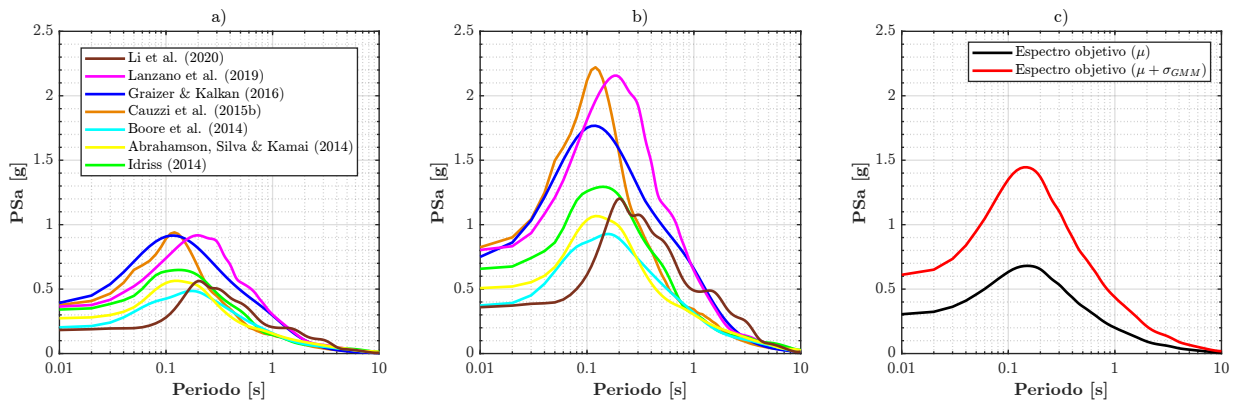


Figura F.2: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 3. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

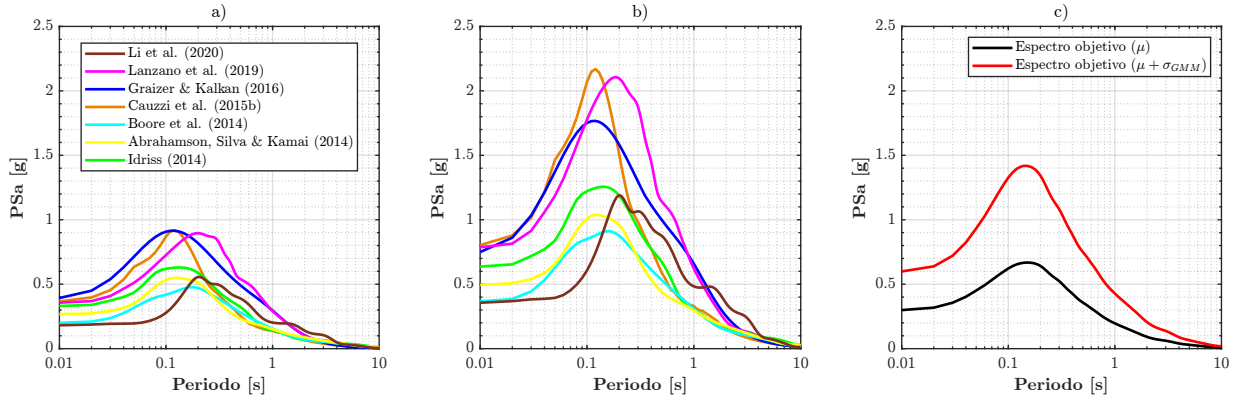


Figura F.3: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 4. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

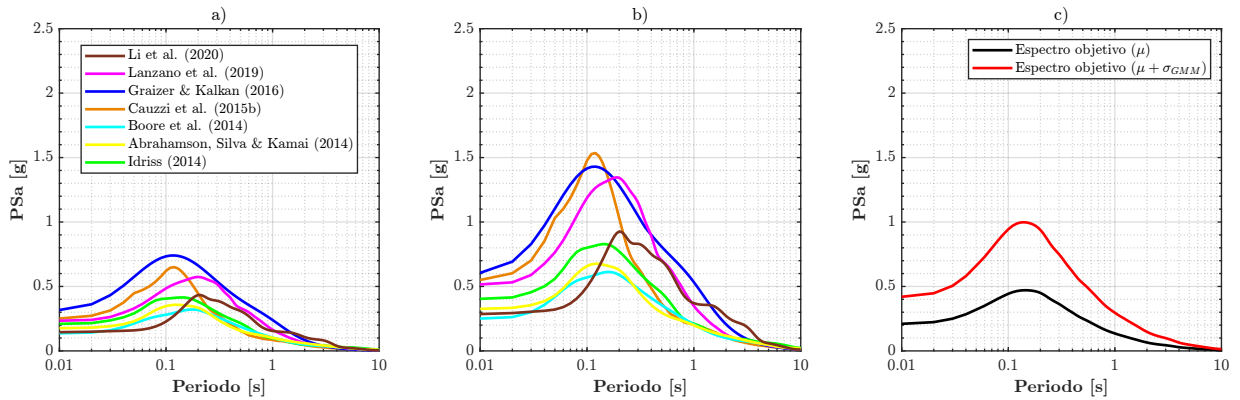


Figura F.4: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 5. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

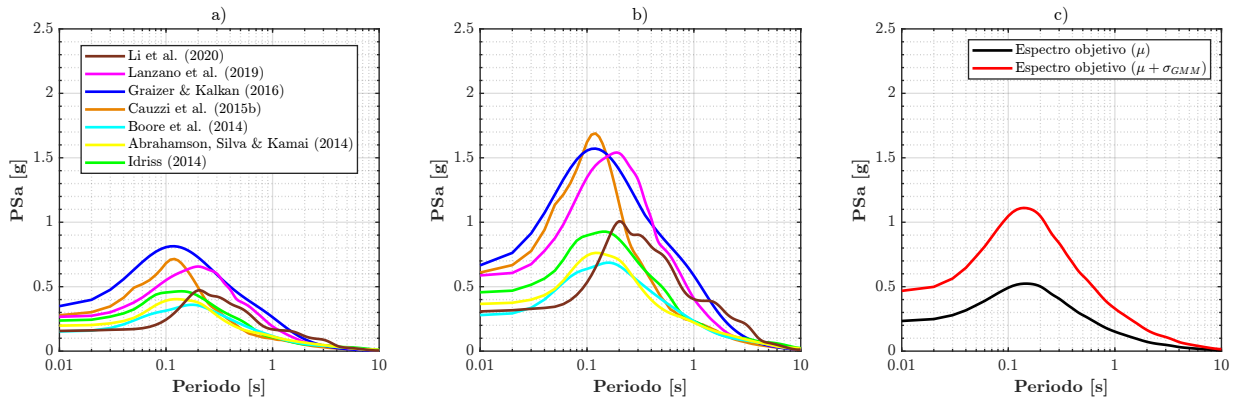


Figura F.5: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 6. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

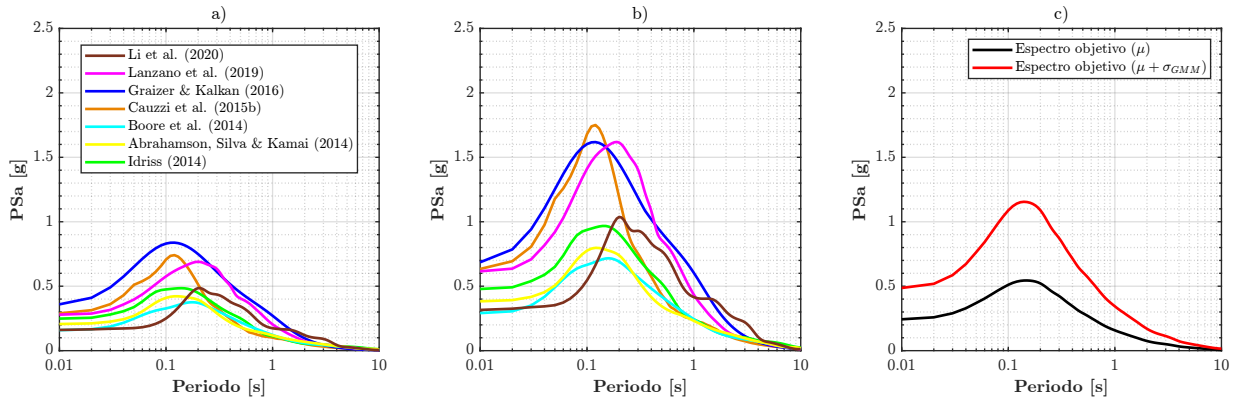


Figura F.6: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 7. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

F.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)

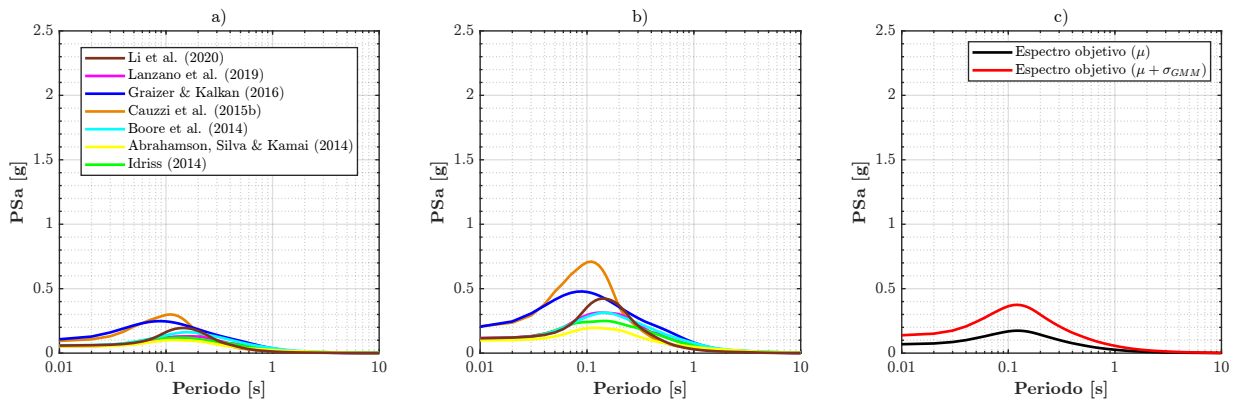


Figura F.7: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 1. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

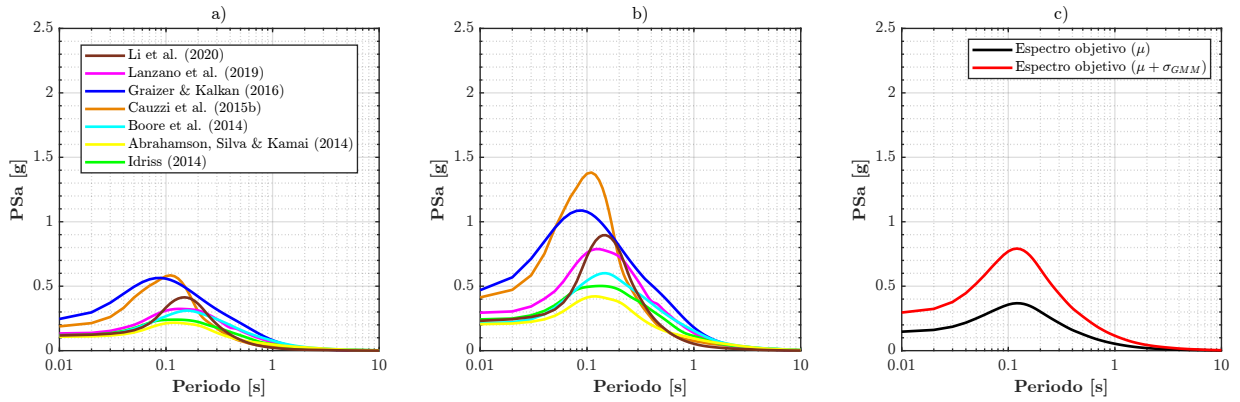


Figura F.8: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 2. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

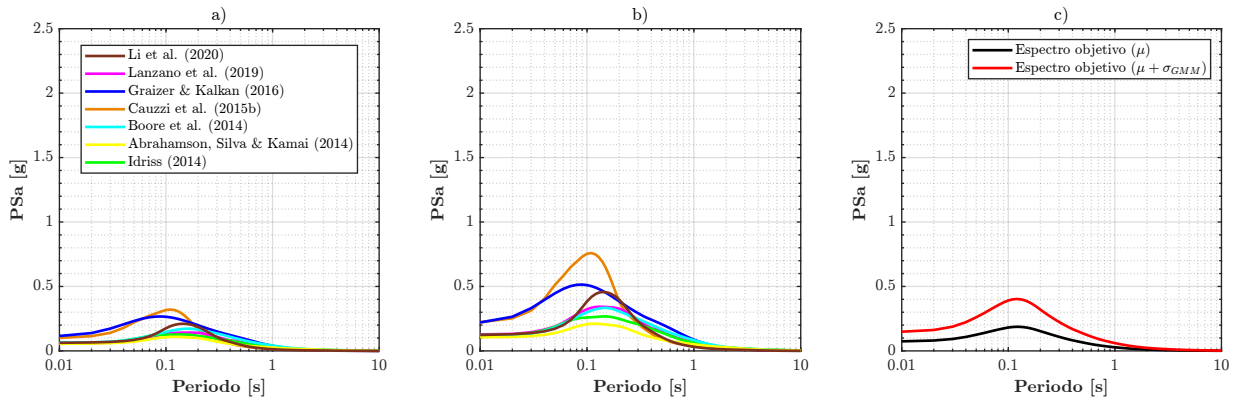


Figura F.9: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 3. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

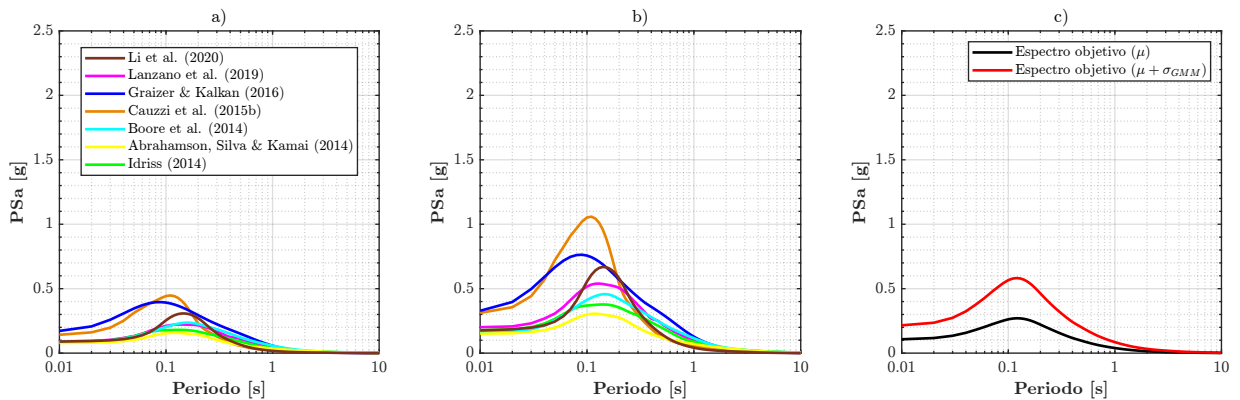


Figura F.10: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 4. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

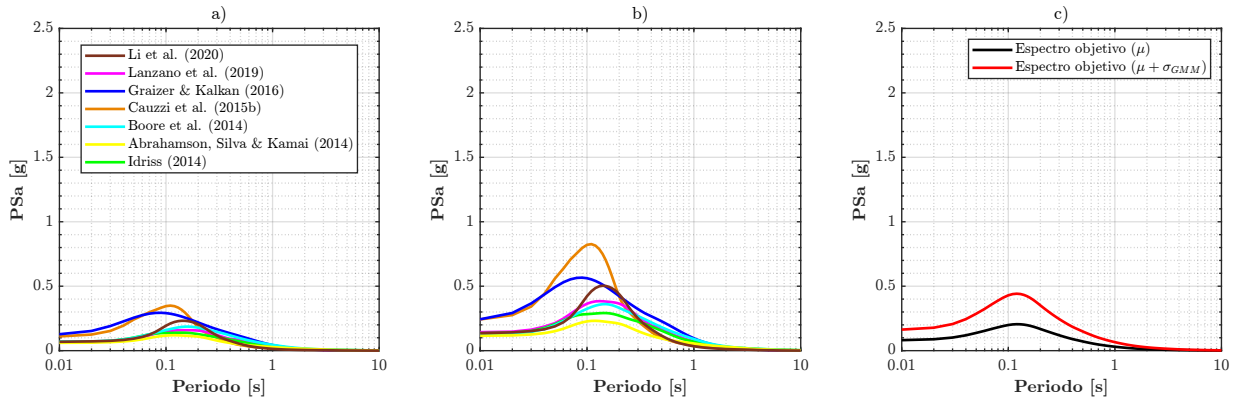


Figura F.11: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 5. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

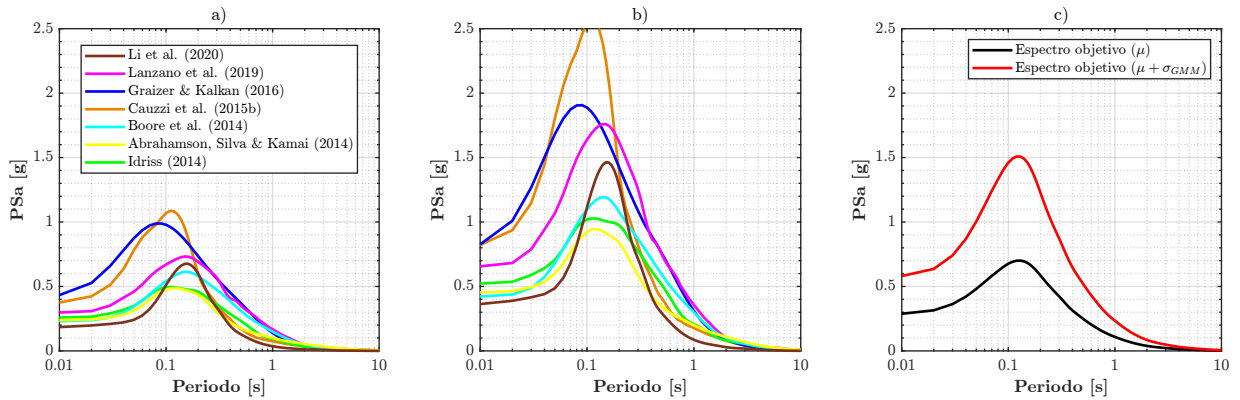


Figura F.12: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 6. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

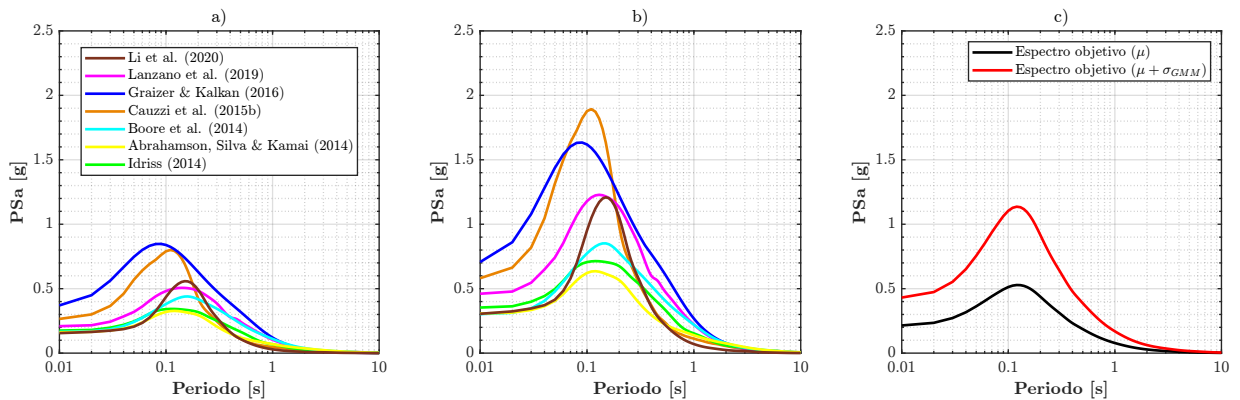


Figura F.13: Determinación del espectro objetivo para el punto de control 7. a) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio de las GMMs. b) Espectros de pseudo-aceleraciones en roca con valores promedio más una desviación estándar de las GMMs. c) Espectros objetivo.

Anexo G

Ajuste espectral (Spectral Matching)

G.1. Falla Cochabamba (M_w 7)

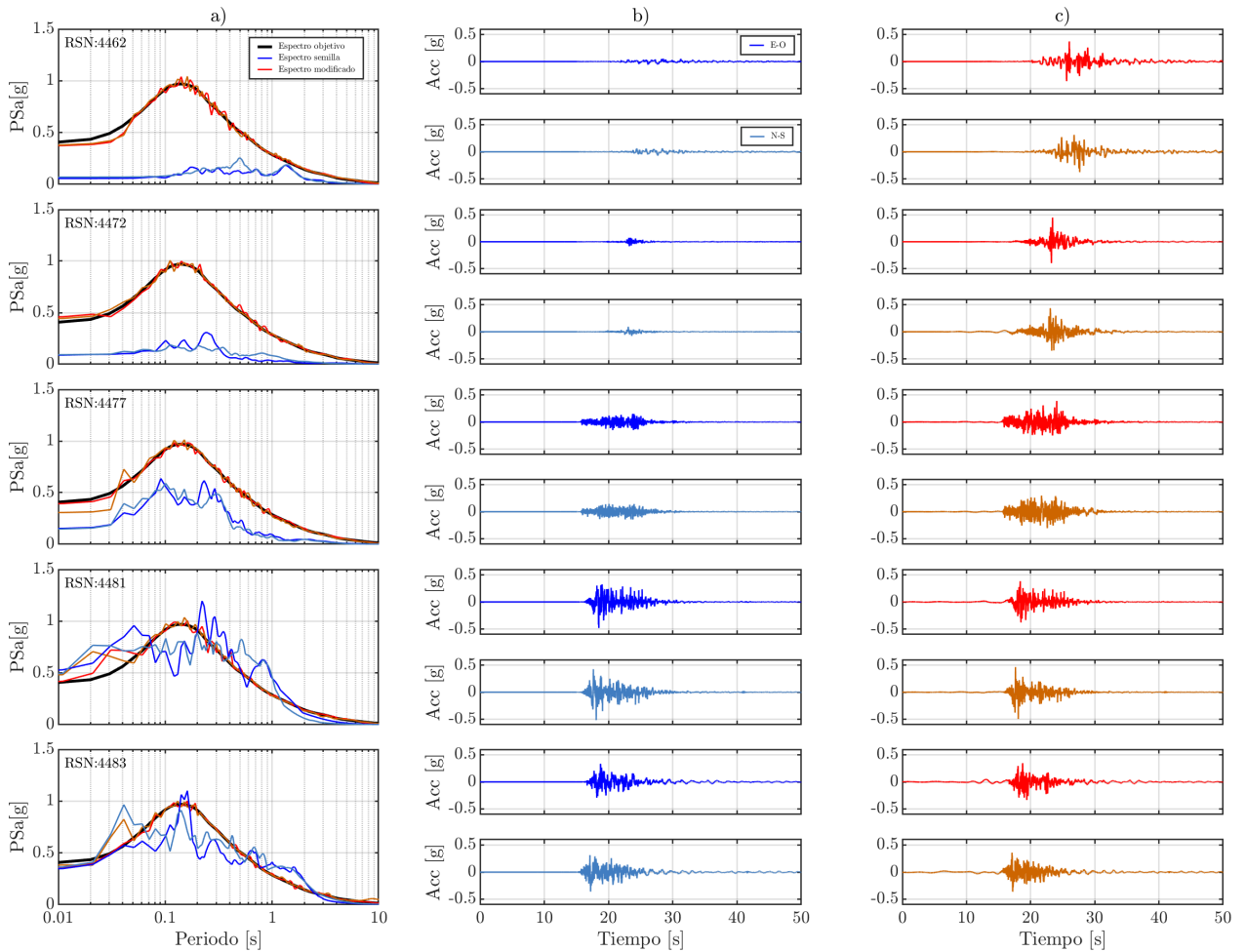


Figura G.1: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4472, 4477, 4481 y 4483) para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

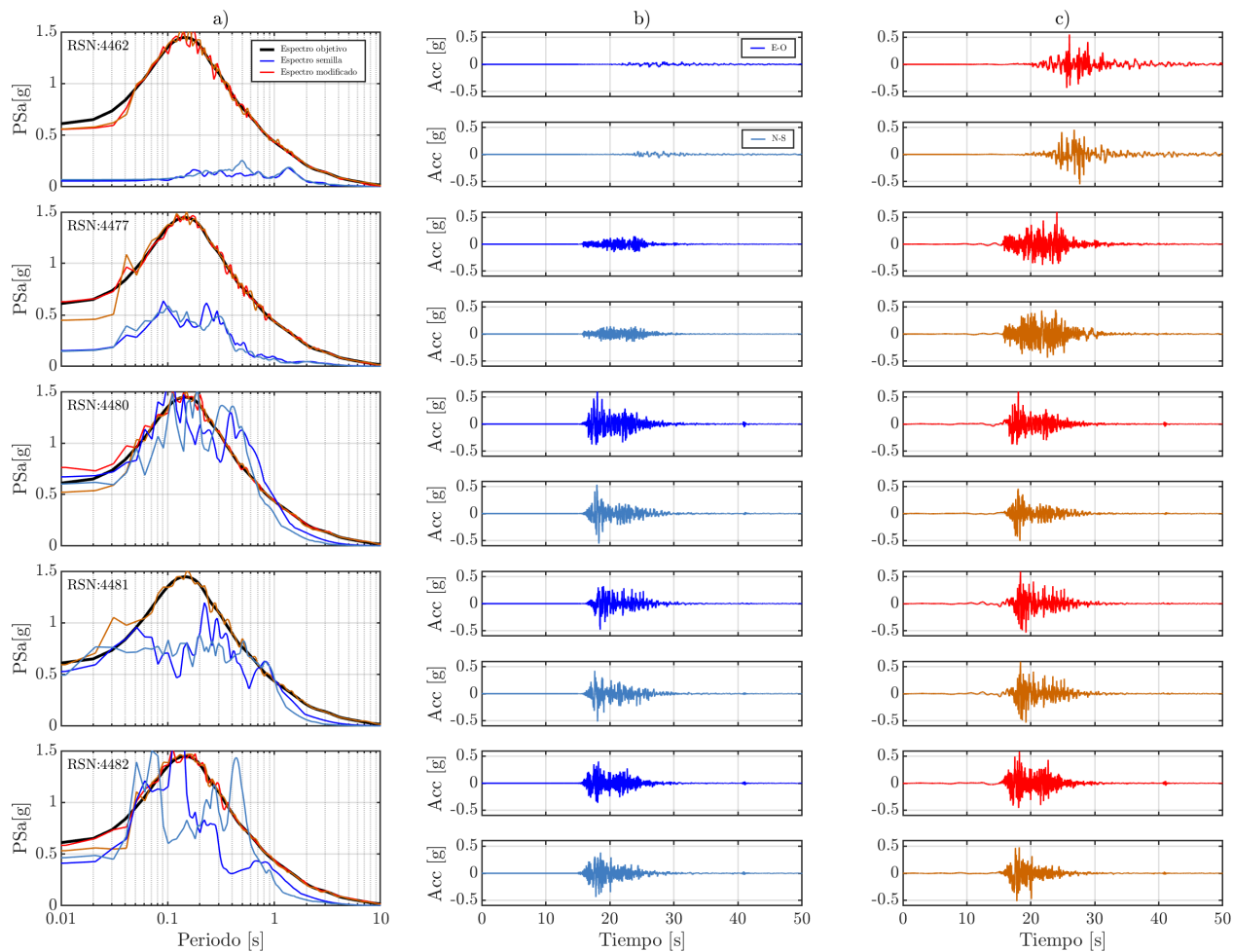


Figura G.2: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

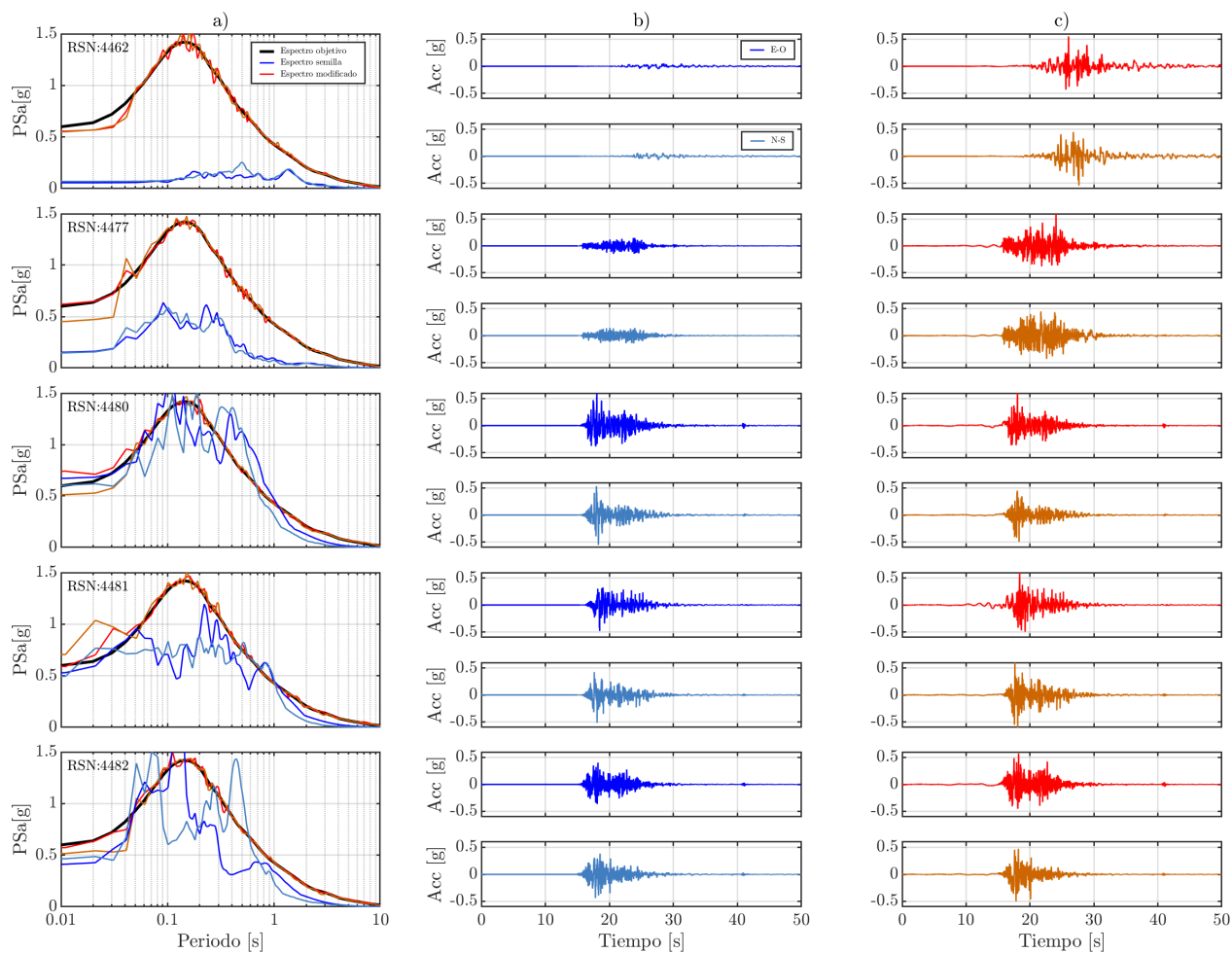


Figura G.3: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

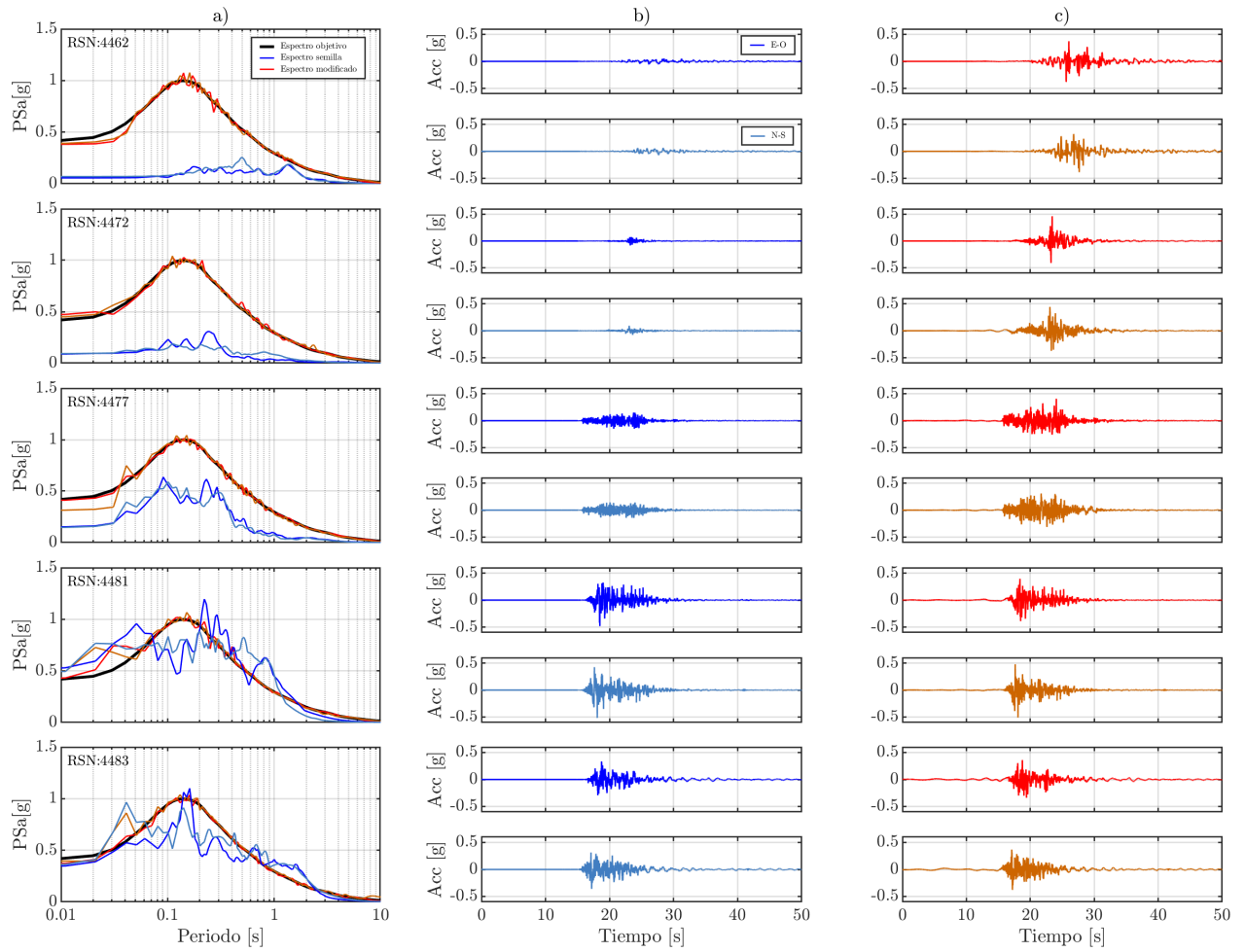


Figura G.4: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4472, 4477, 4481 y 4483) para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

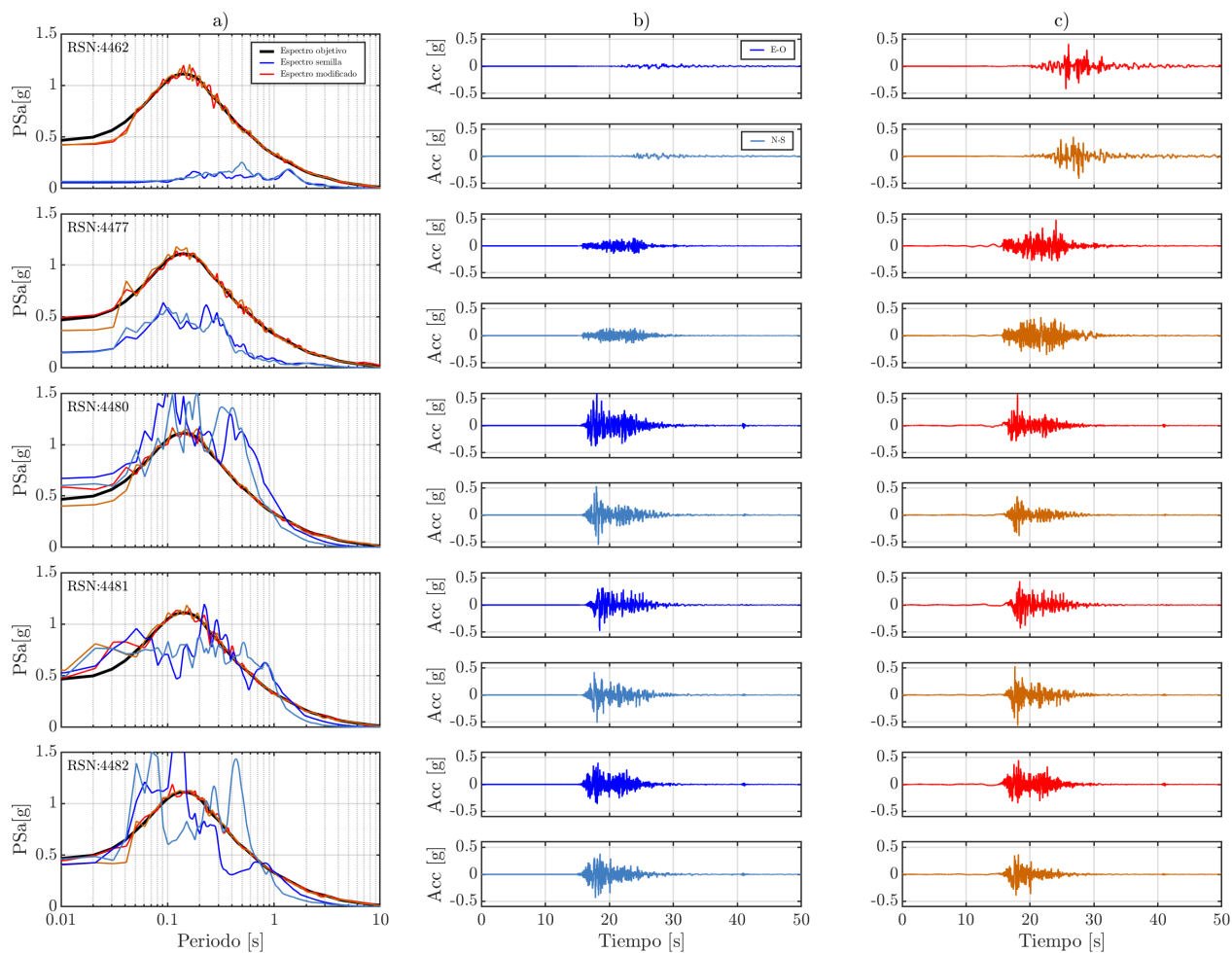


Figura G.5: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

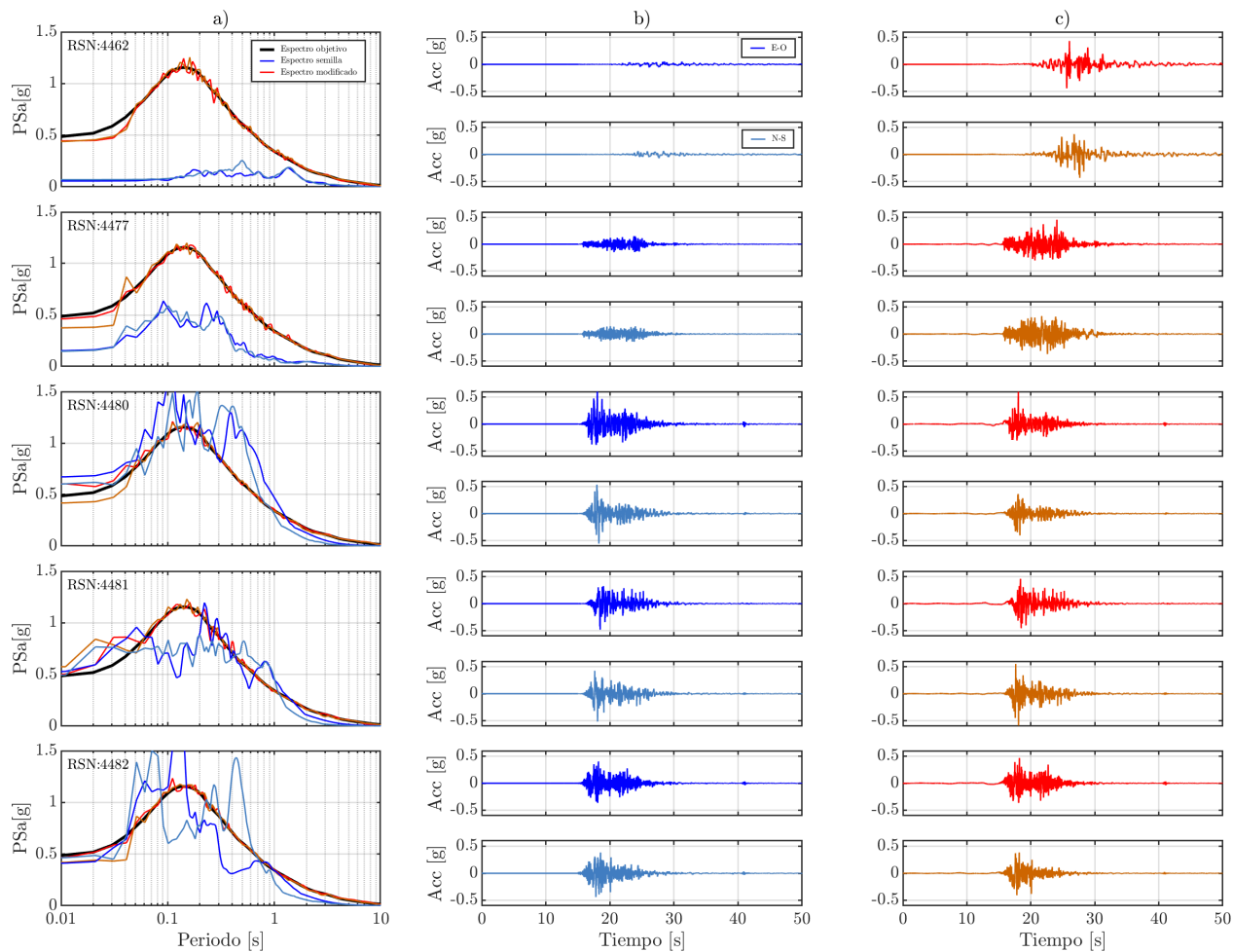


Figura G.6: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 4462, 4477, 4480, 4481 y 4482) para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7 generado por la falla Cochabamba. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

G.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)

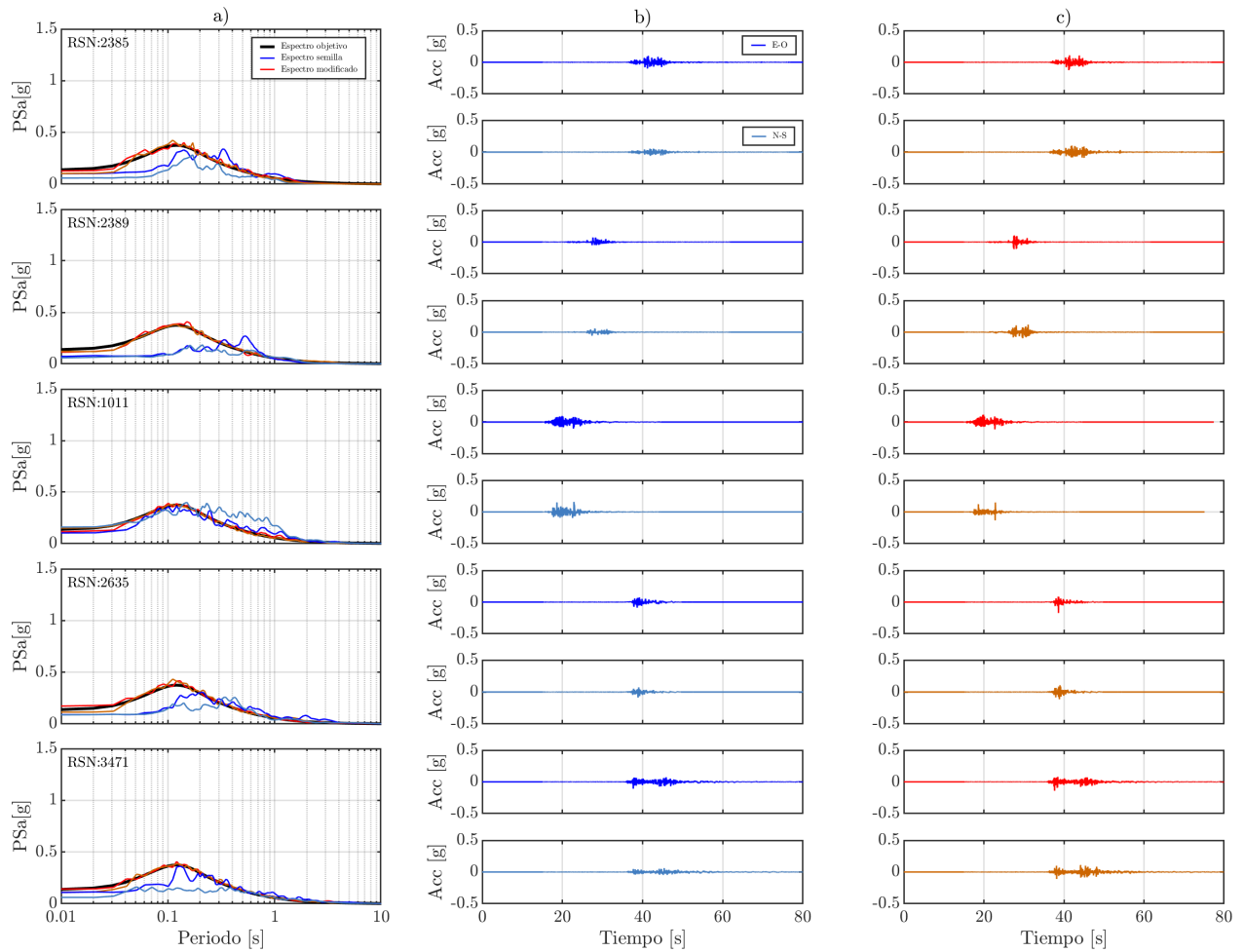


Figura G.7: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 2385, 2389, 1011, 2635 y 3471) para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

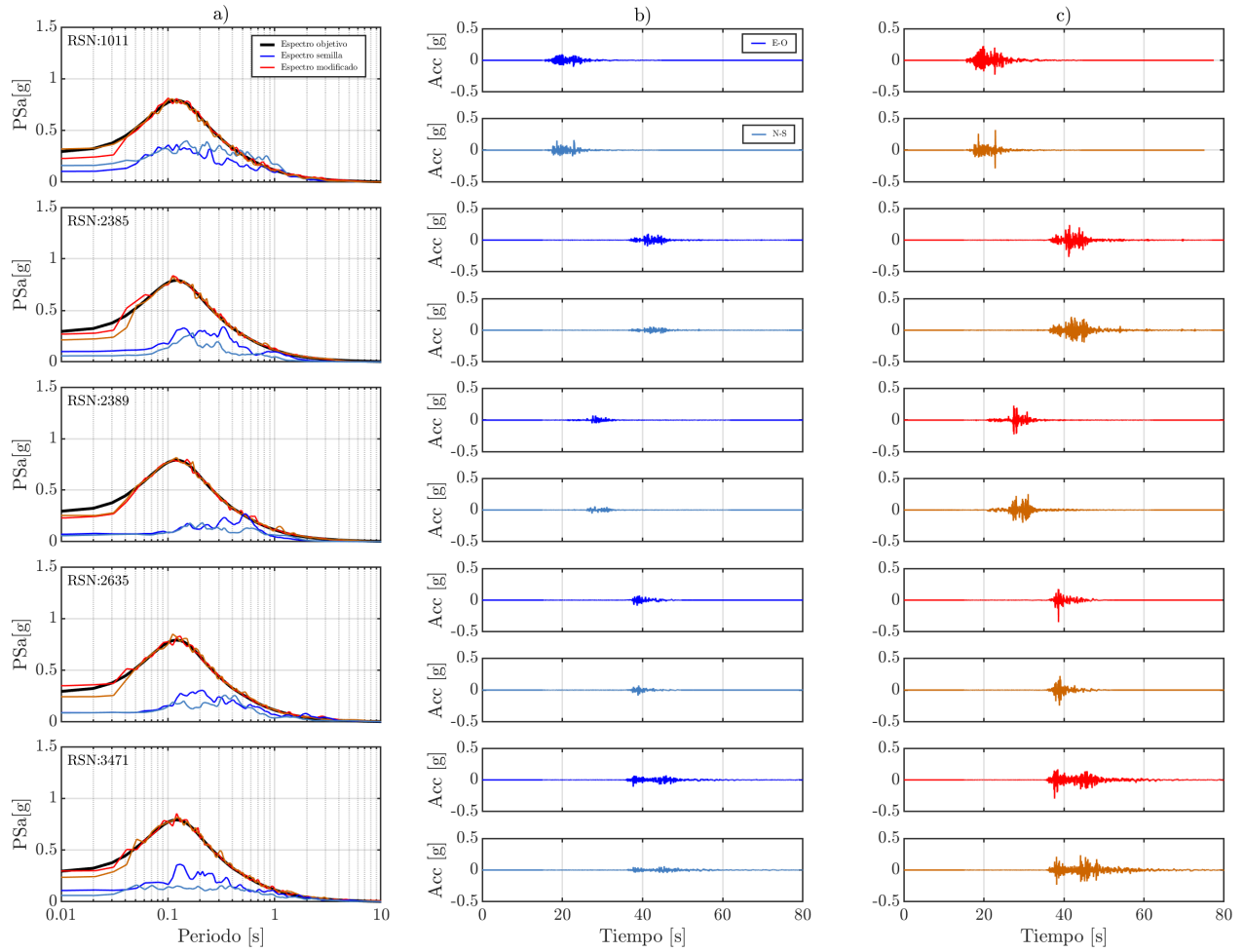


Figura G.8: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

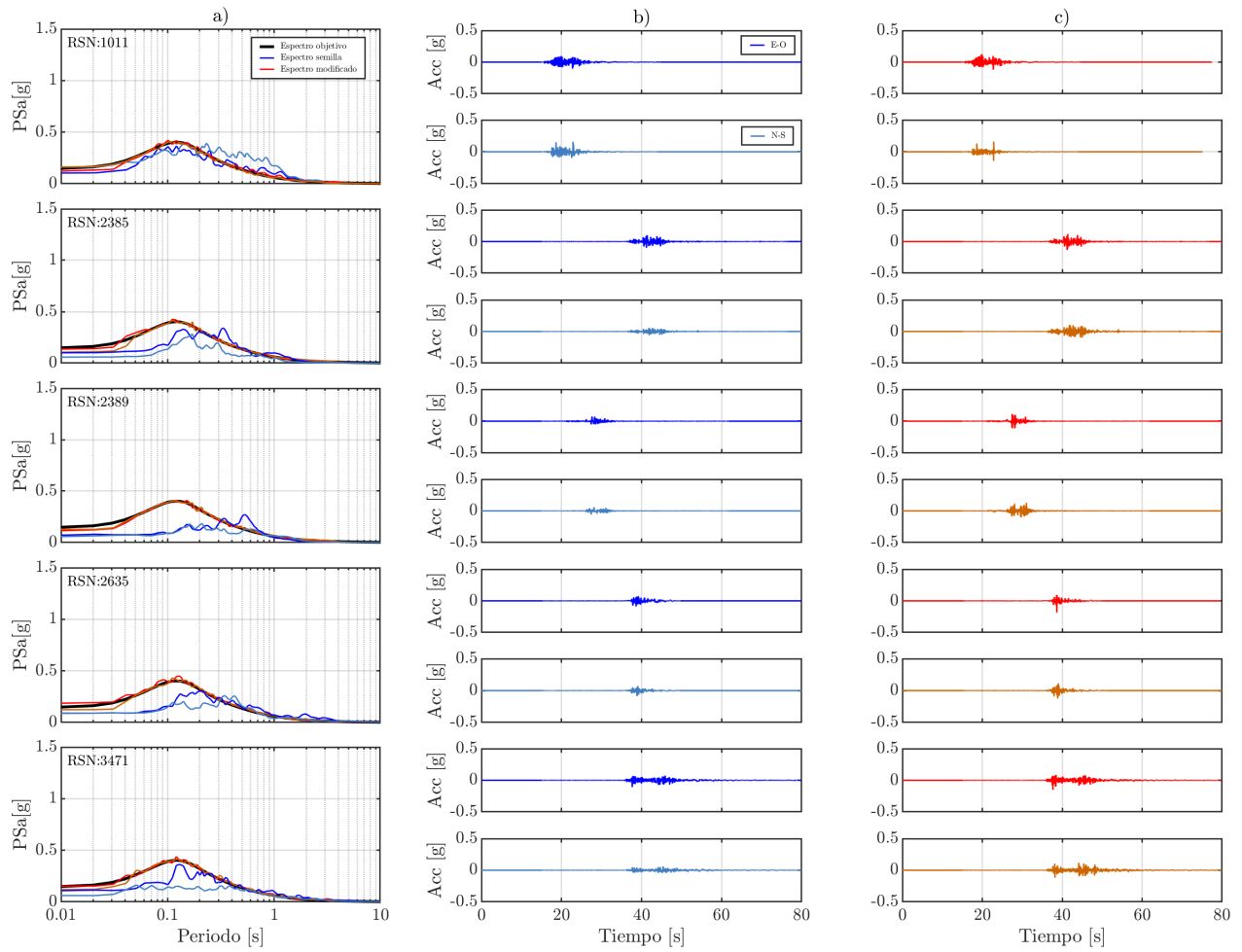


Figura G.9: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

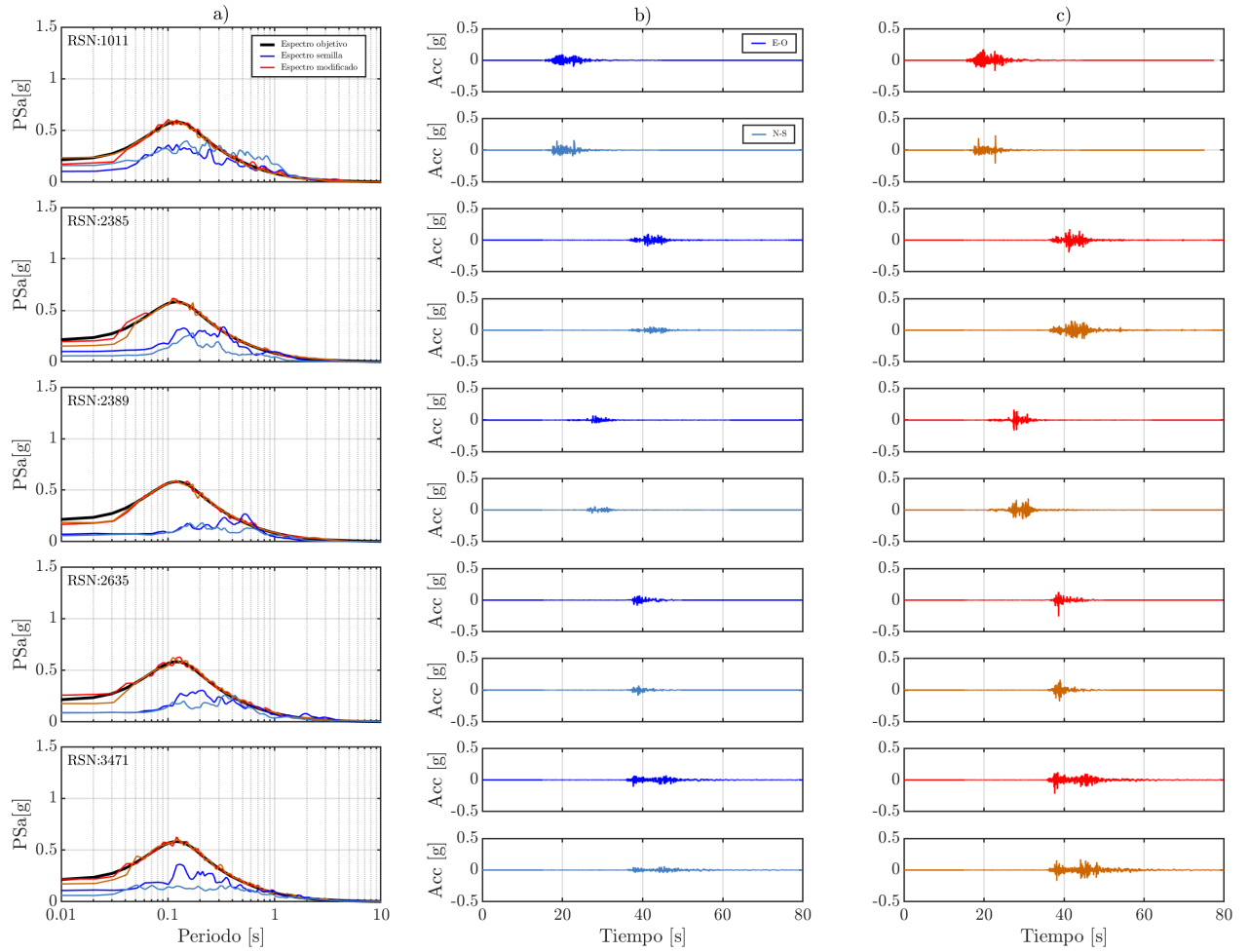


Figura G.10: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

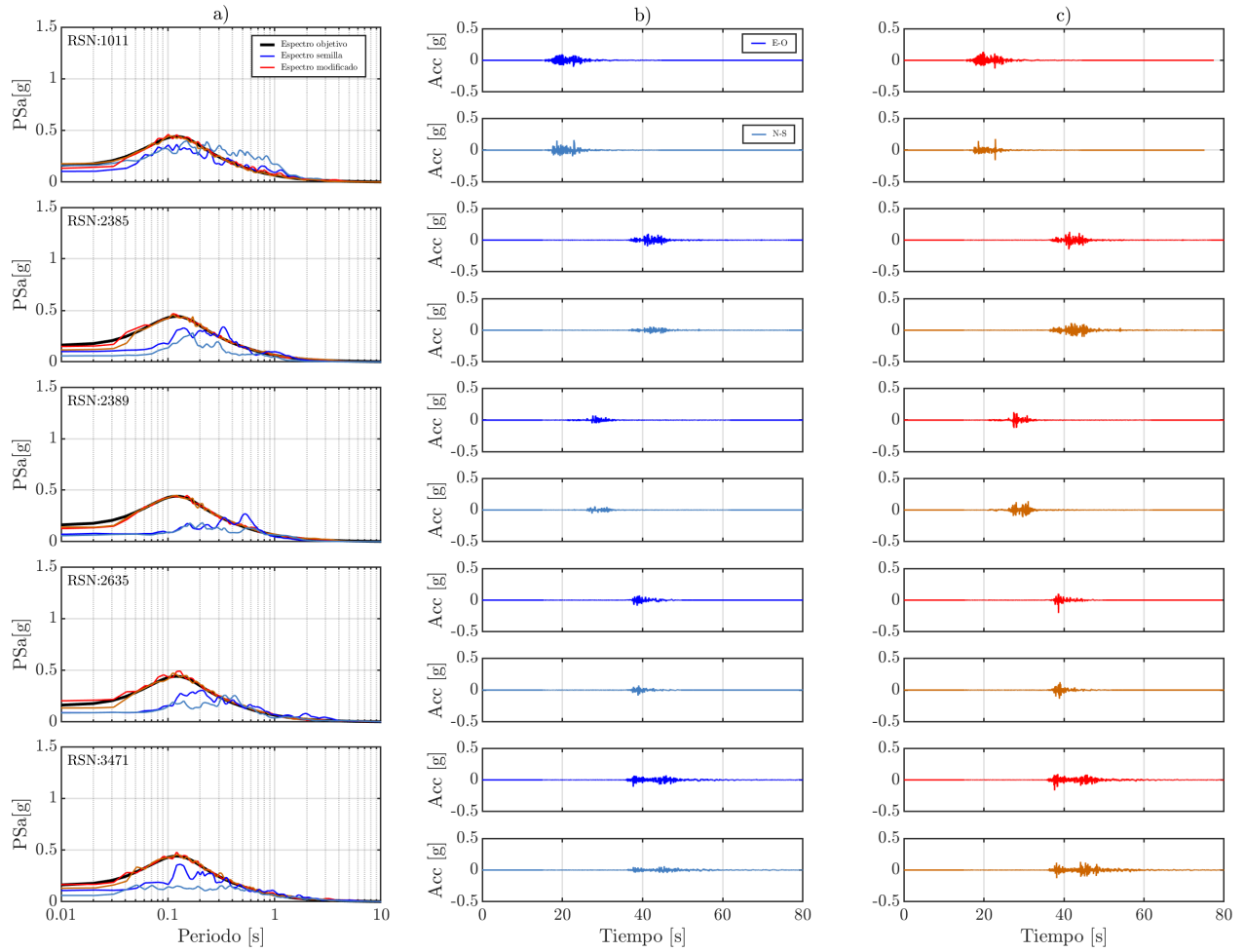


Figura G.11: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

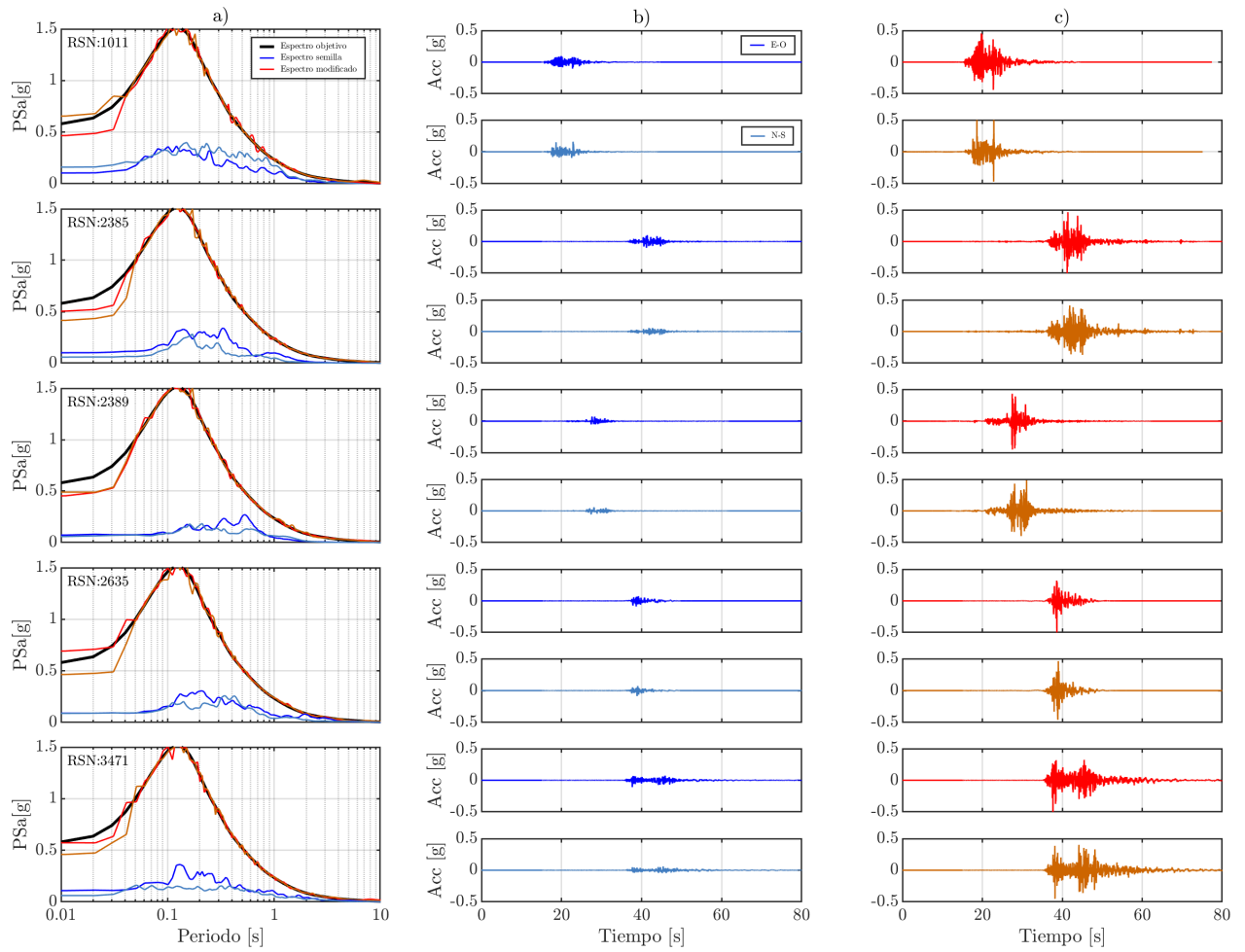


Figura G.12: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatible en sus dos componentes horizontales.

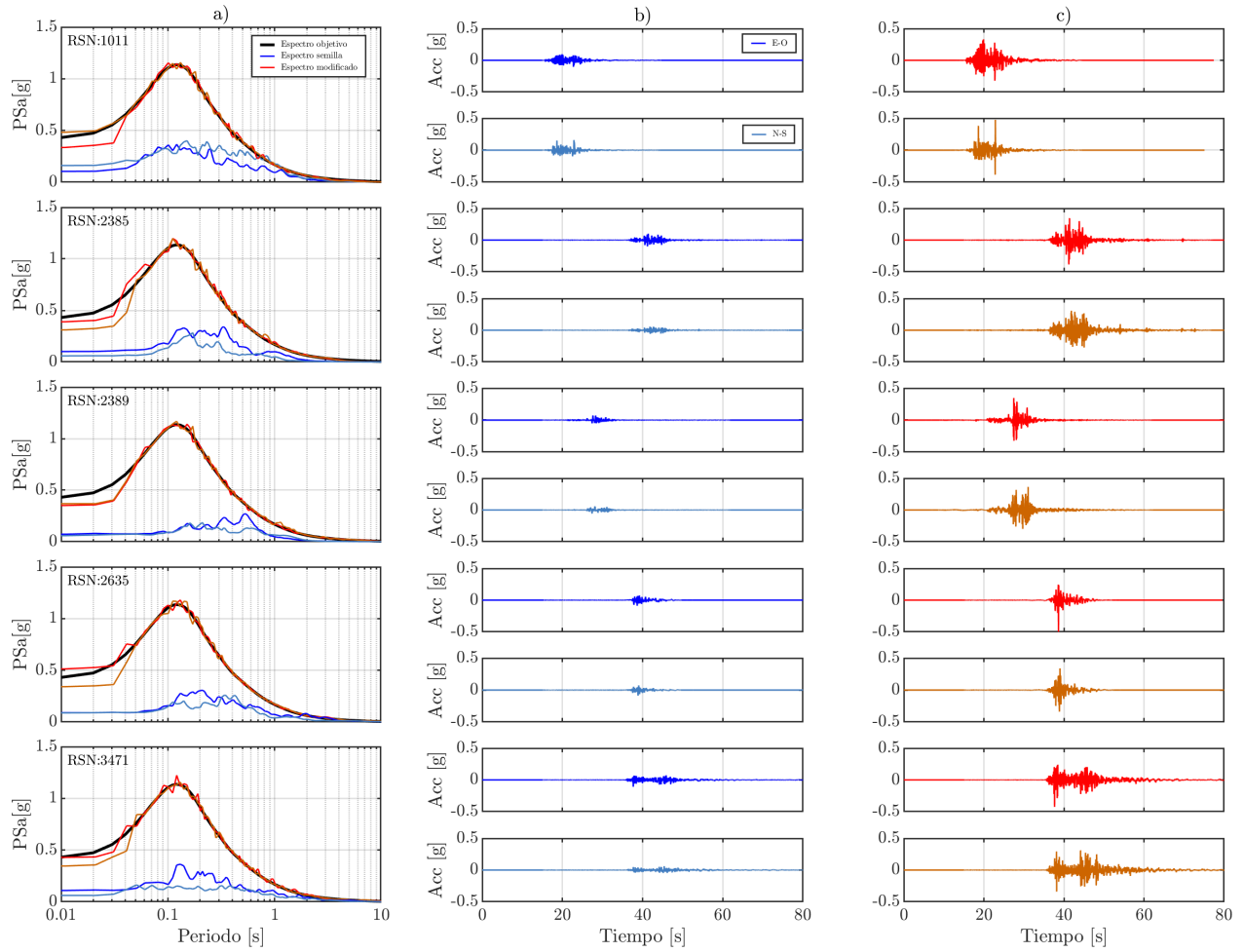


Figura G.13: Ajuste espectral de registros semilla (RSN: 1011, 2385, 2389, 2635 y 3471) para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2 generado por la falla de Sipe Sipe. a) Espectros ajustados según espectro objetivo. b) Registros de aceleración semilla en sus dos componentes horizontales. c) Registros de aceleración espectro-compatibles en sus dos componentes horizontales.

Anexo H

Espectros de pseudo-aceleraciones en puntos de control

H.1. Falla Cochabamba (M_w 7)

H.1.1. Variabilidad en la velocidad de ondas de corte

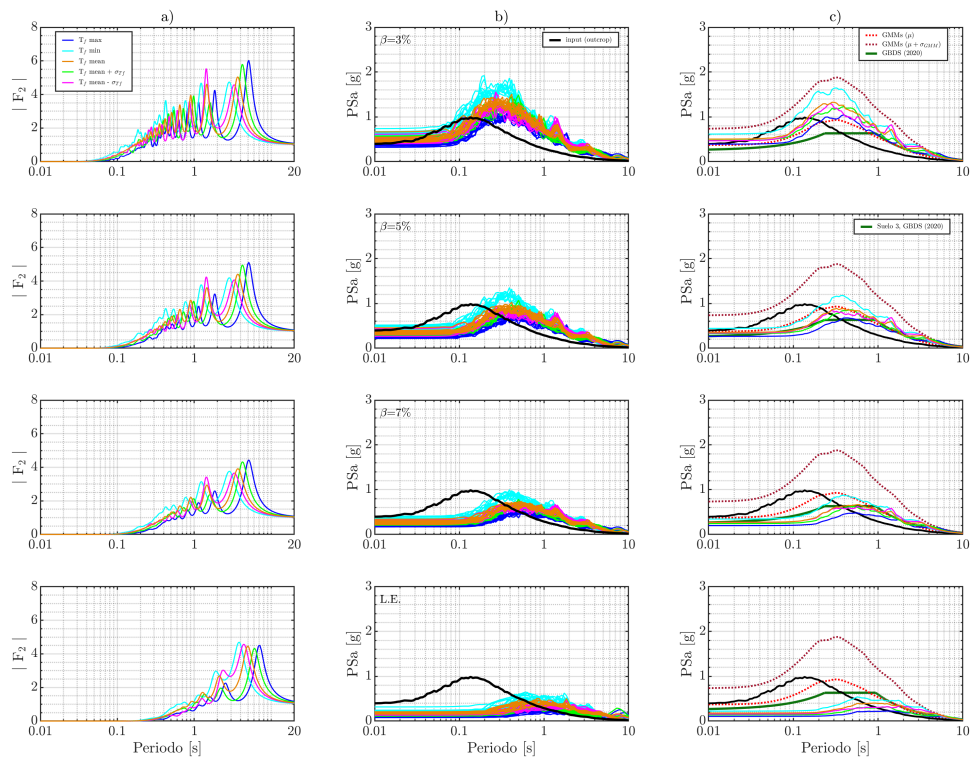


Figura H.1: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

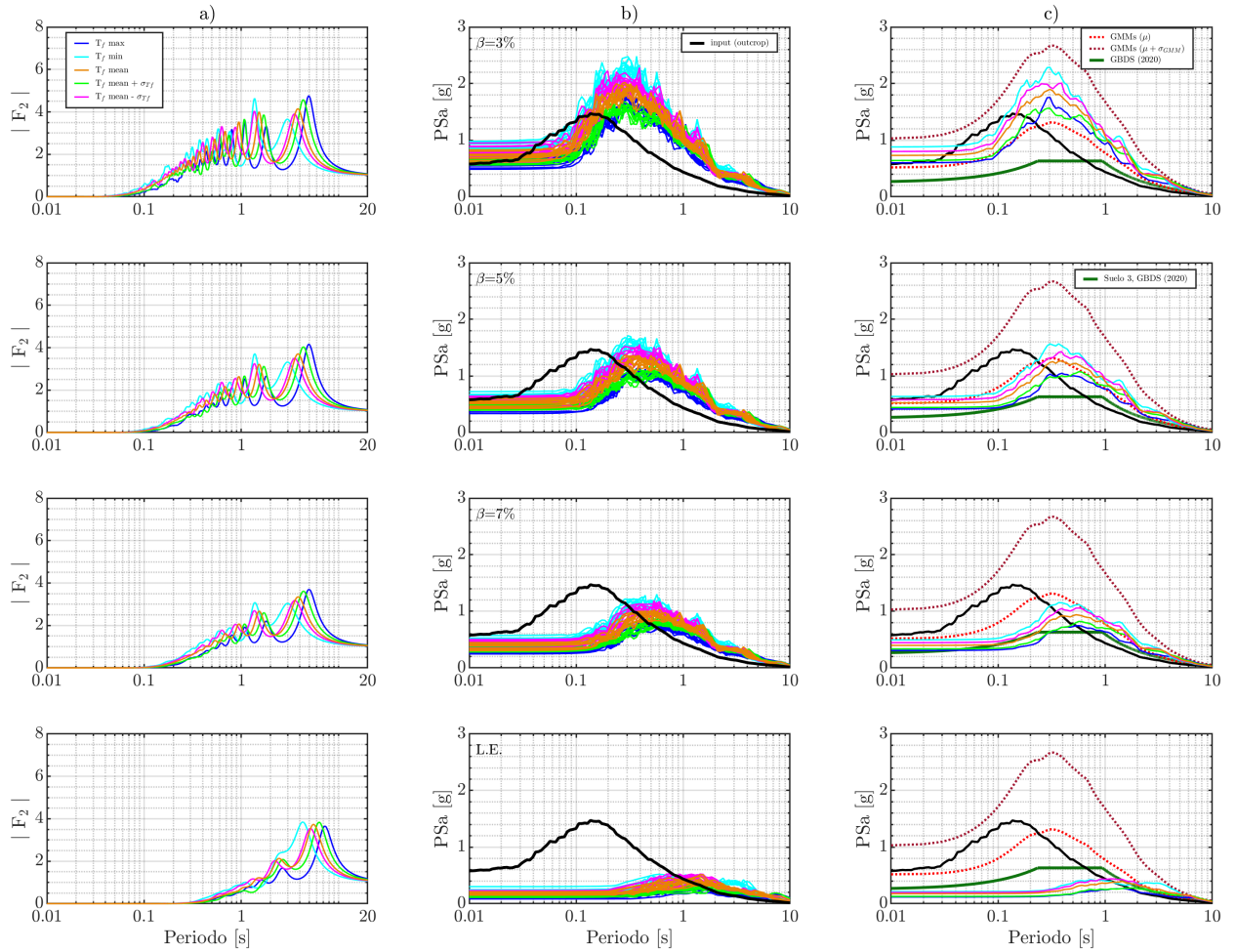


Figura H.2: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1.c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

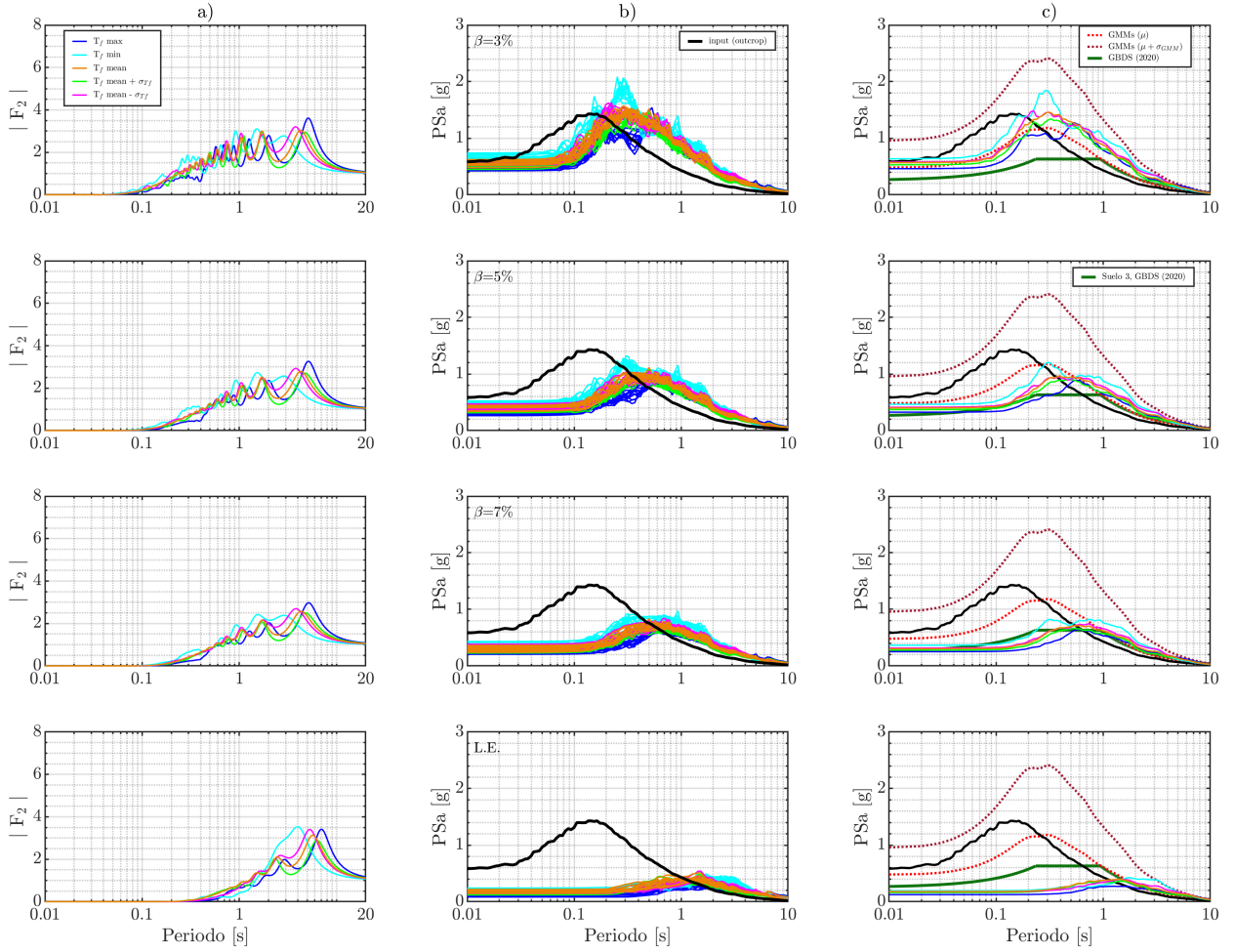


Figura H.3: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1.d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

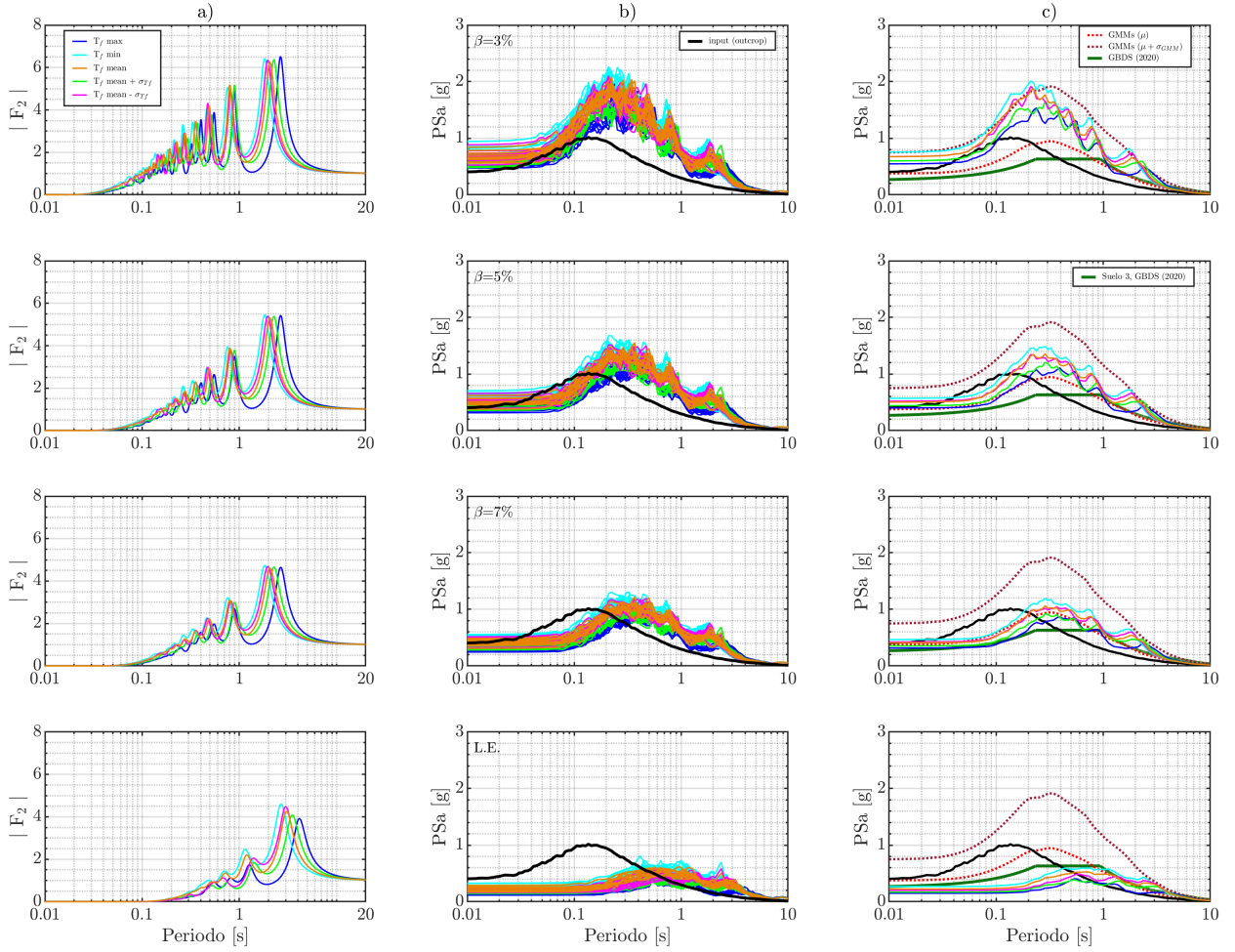


Figura H.4: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

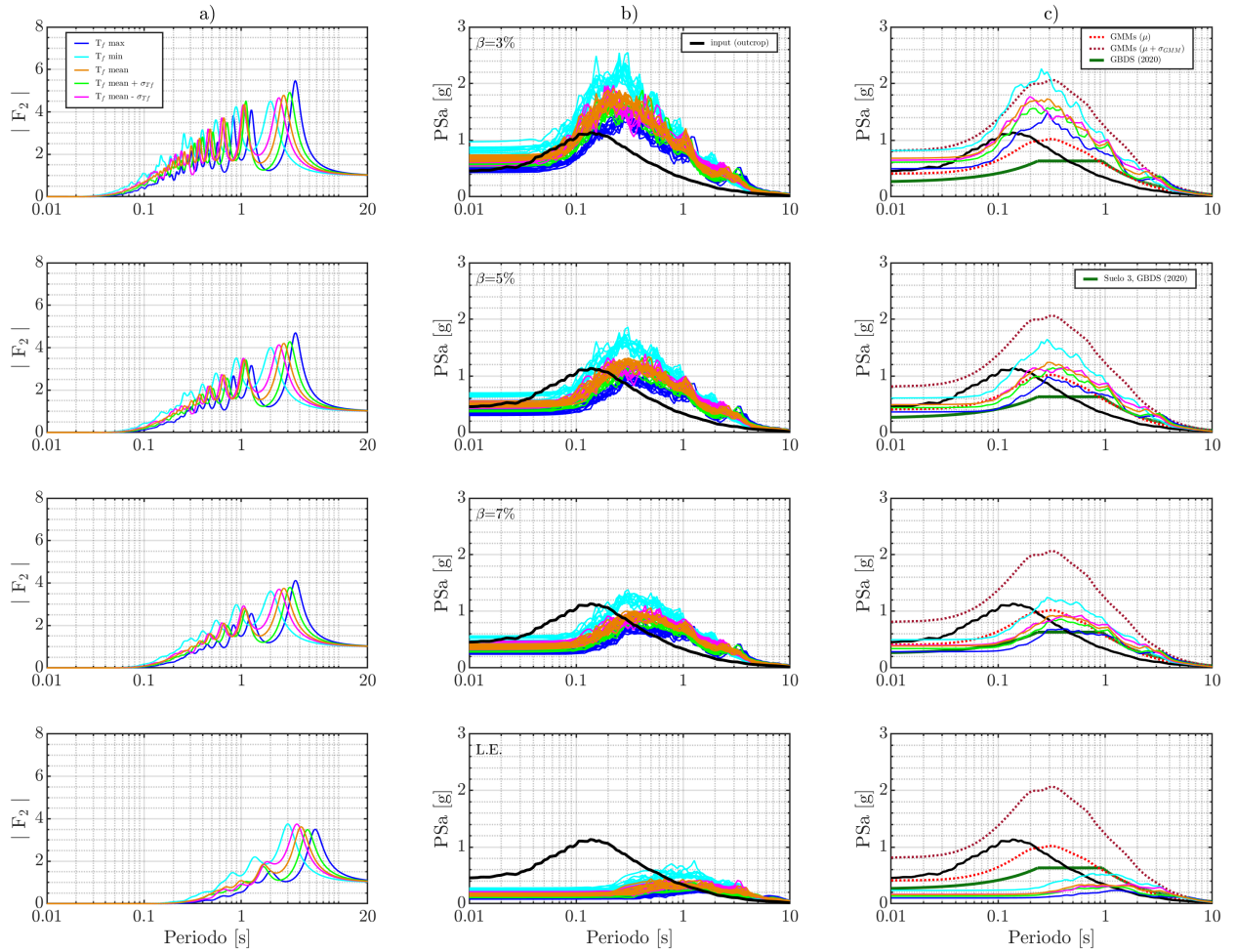


Figura H.5: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

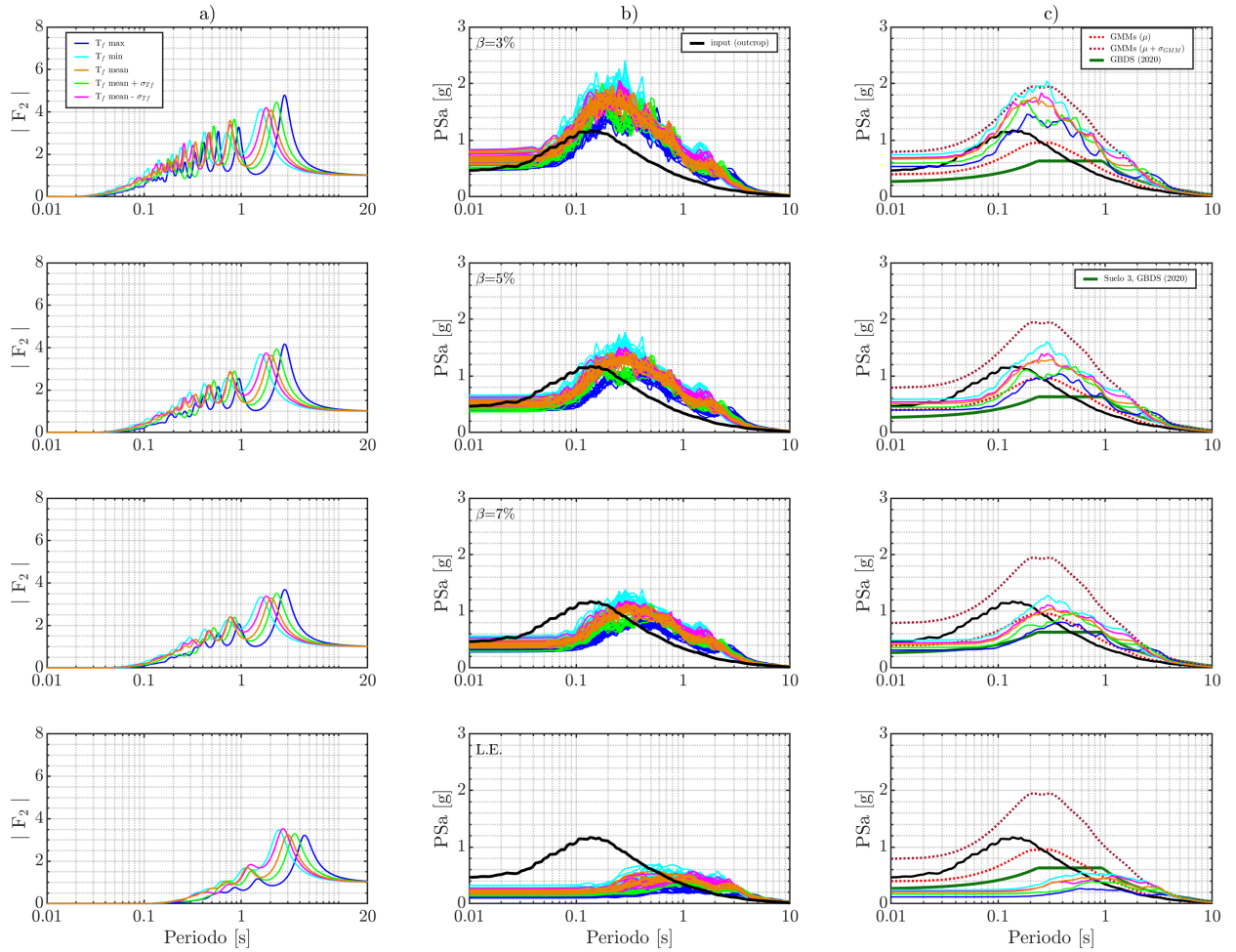


Figura H.6: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

H.1.2. Variabilidad en la profundidad al basamento rocoso

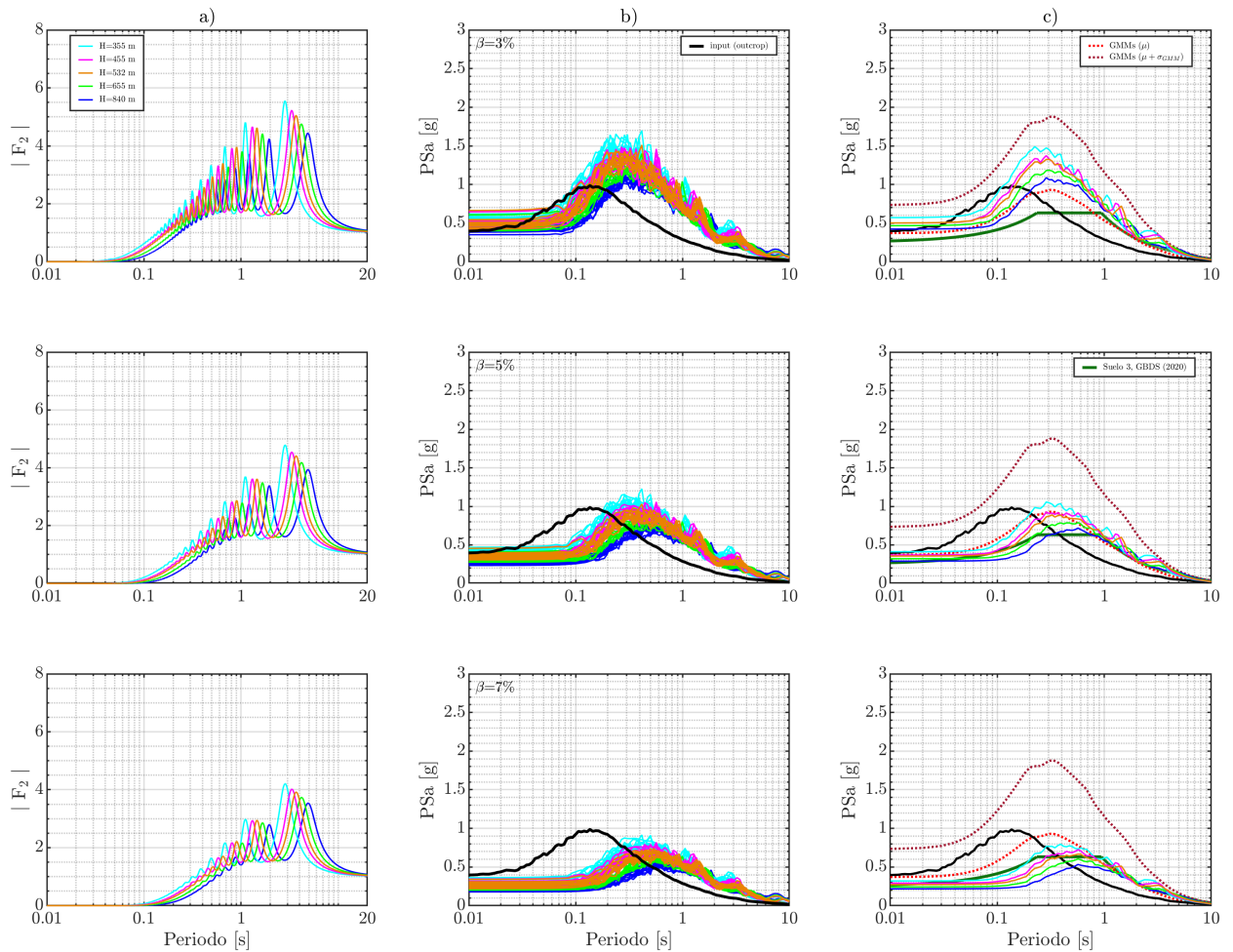


Figura H.7: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.3b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

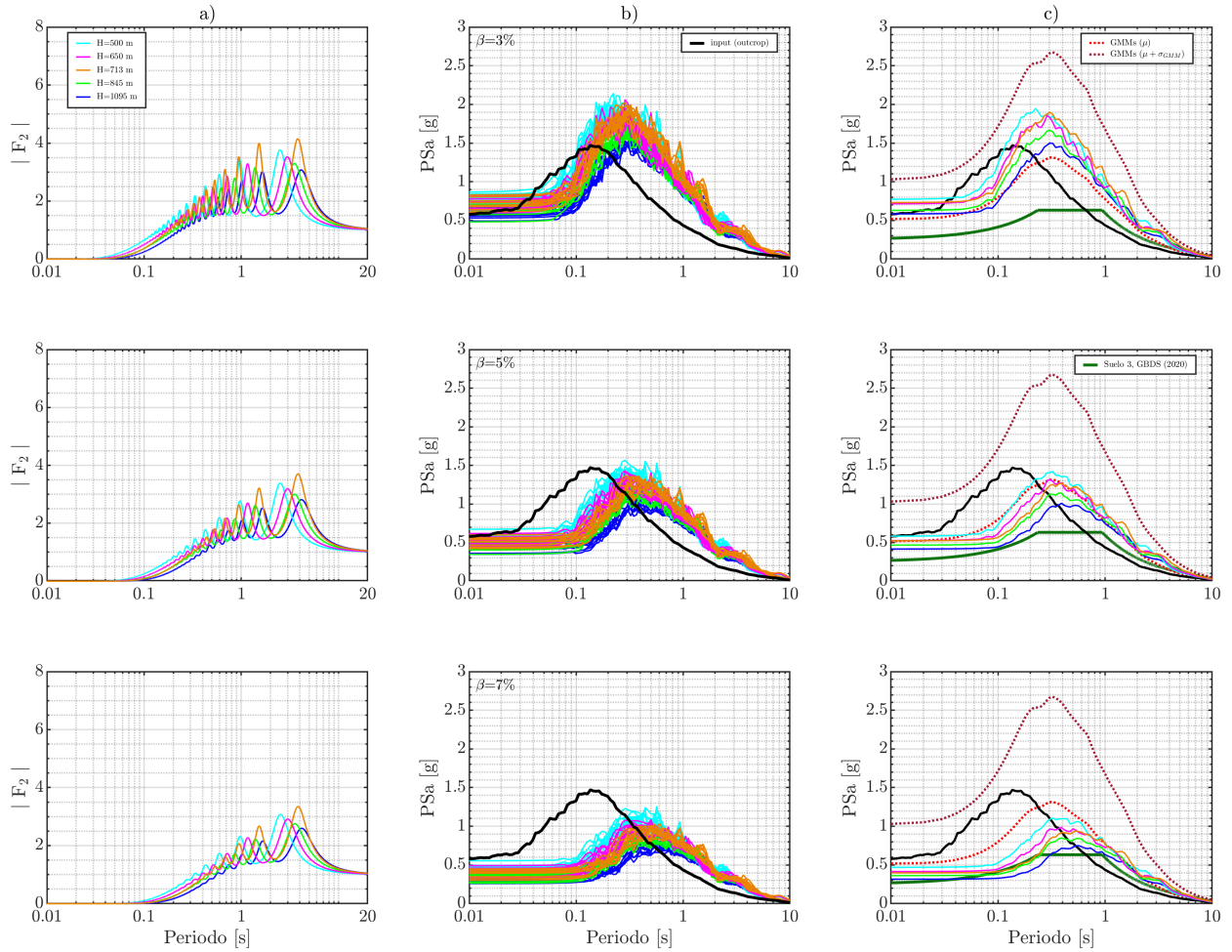


Figura H.8: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

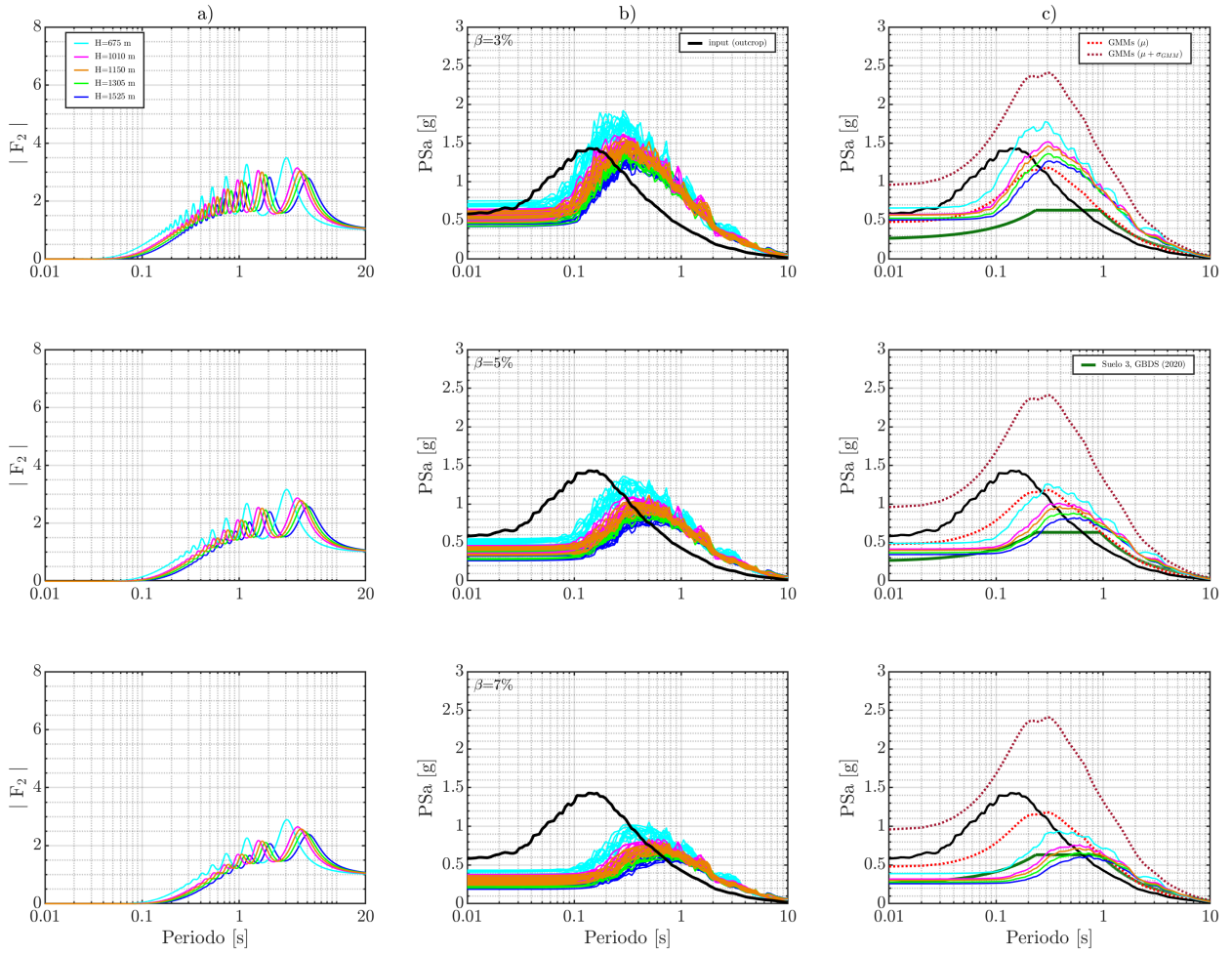


Figura H.9: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

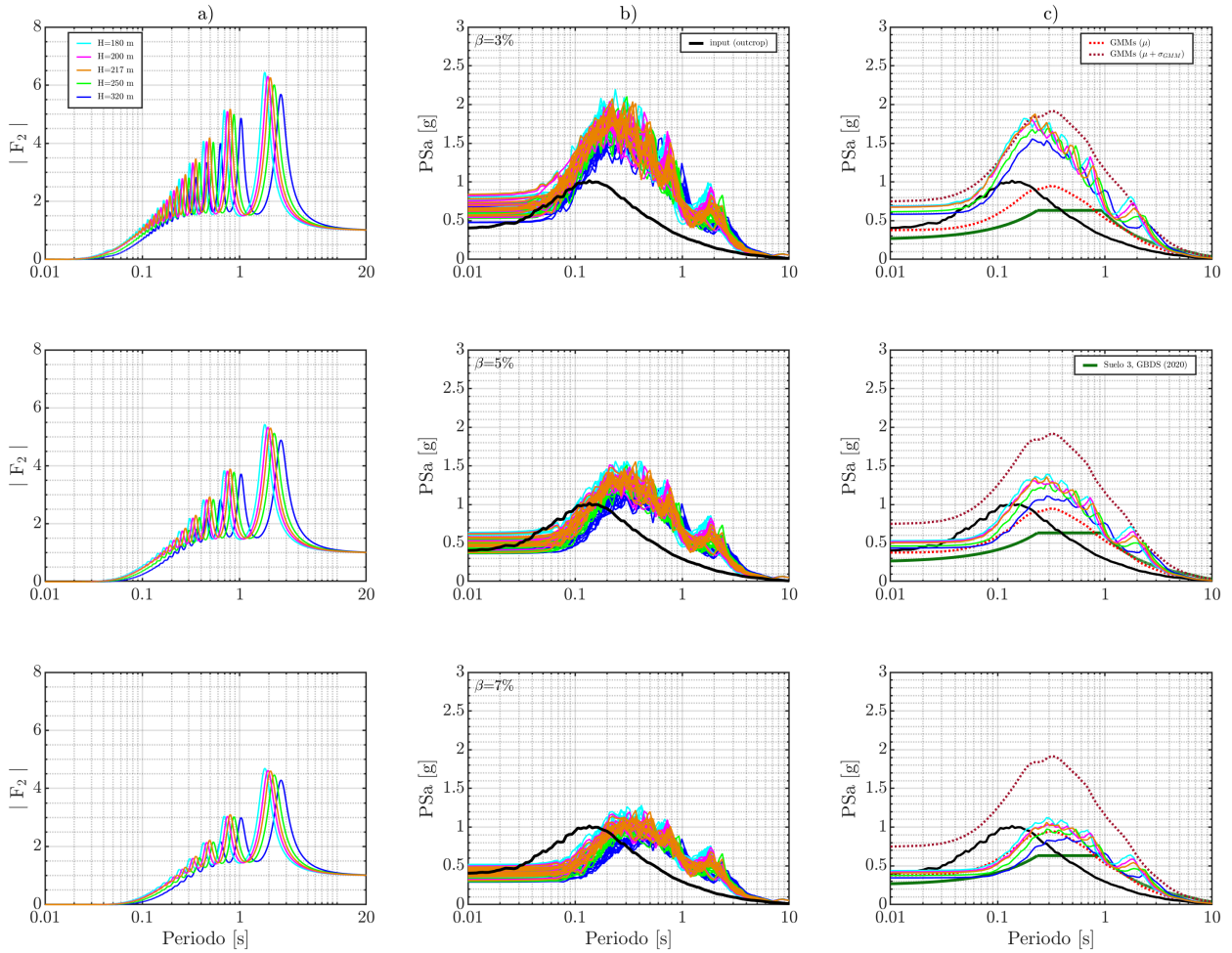


Figura H.10: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.4e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

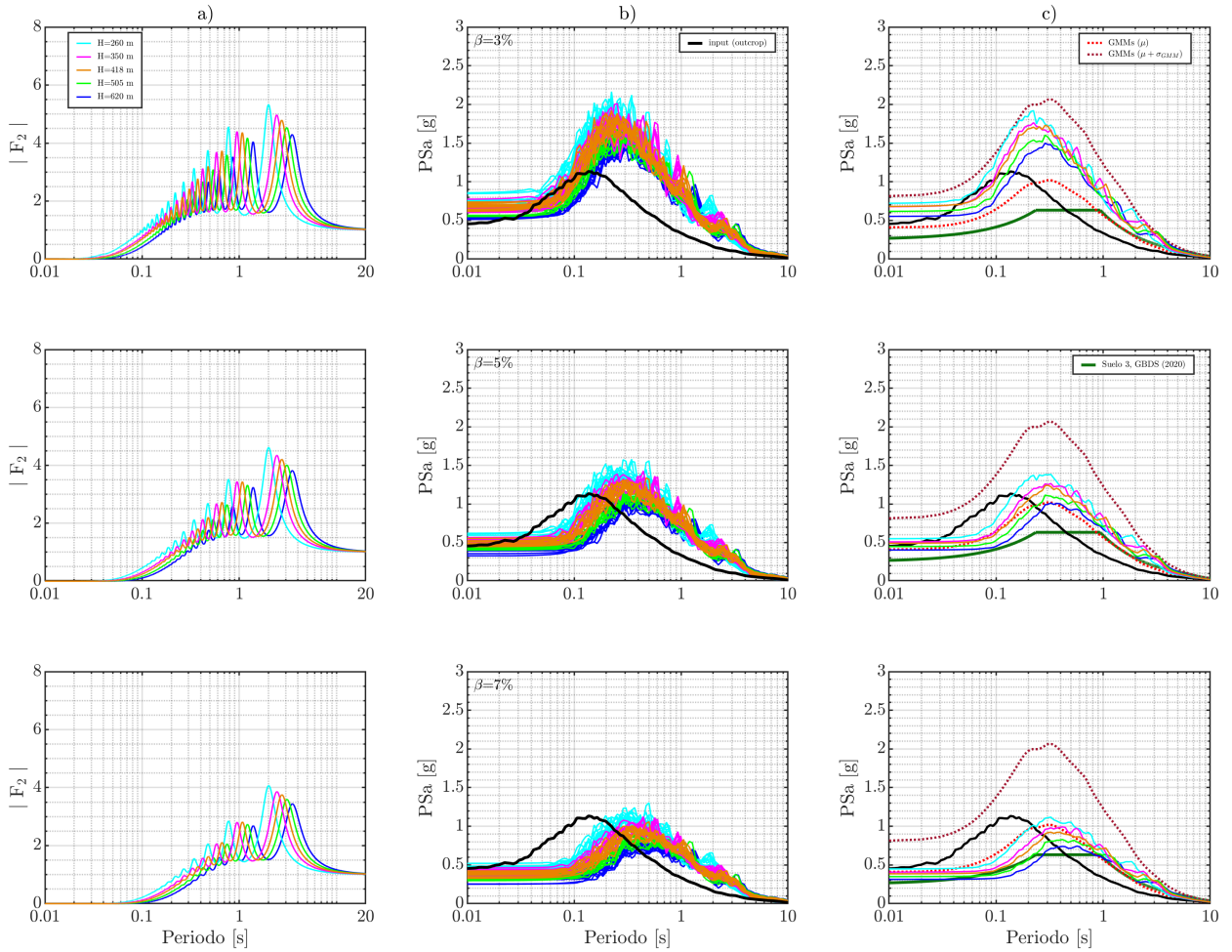


Figura H.11: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 6 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.4f. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

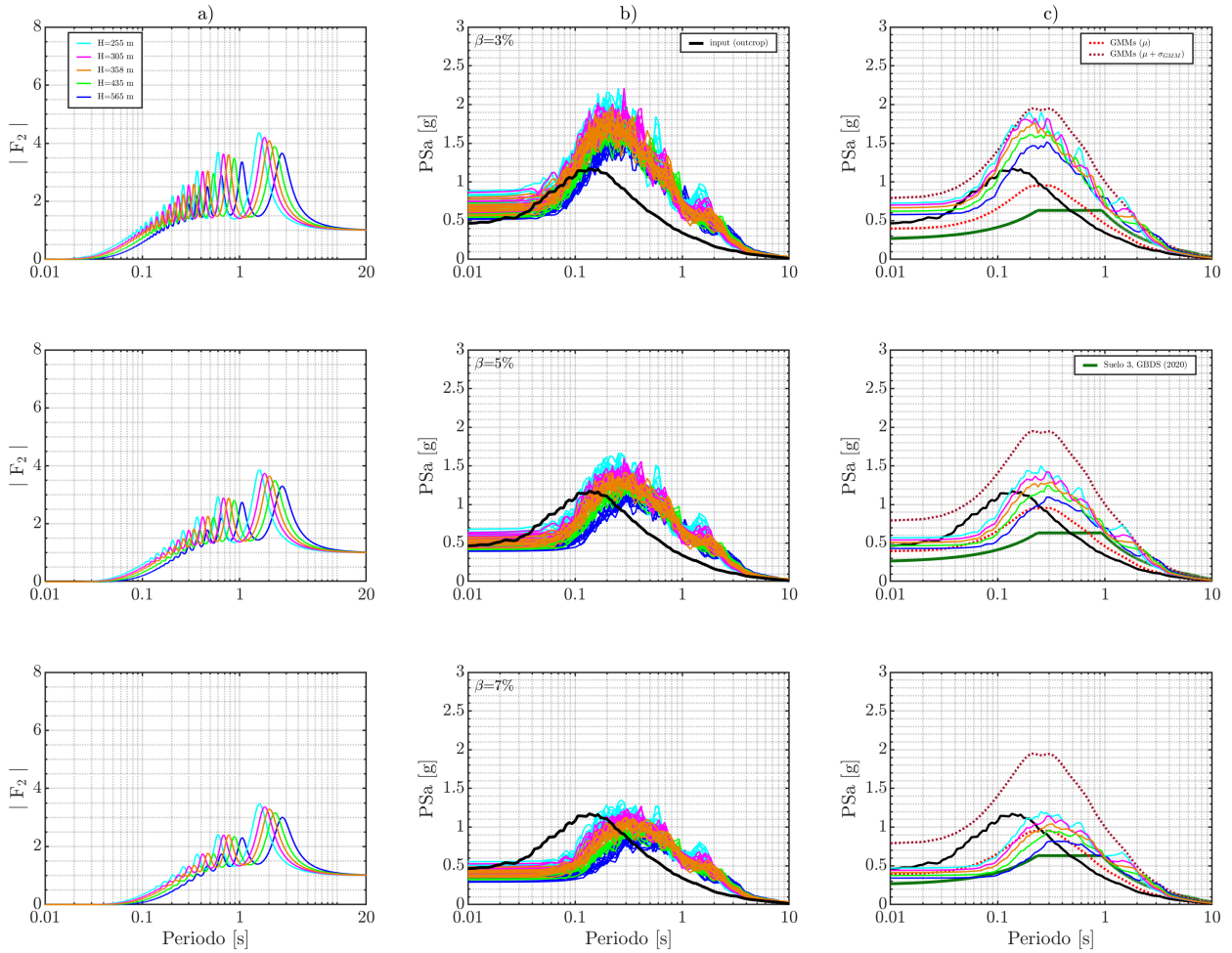


Figura H.12: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

H.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)

H.2.1. Variabilidad en la velocidad de ondas de corte

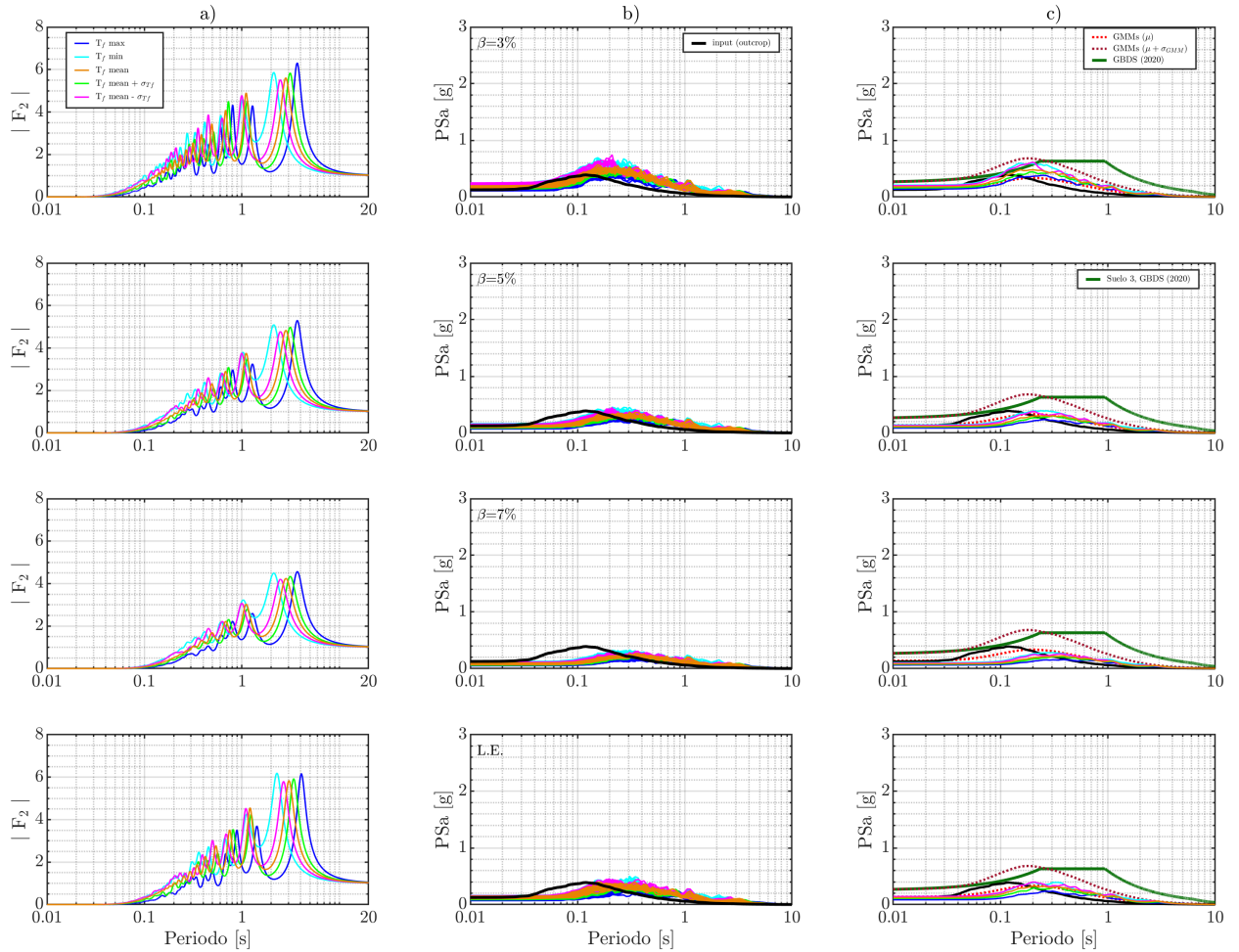


Figura H.13: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura 5.5a. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

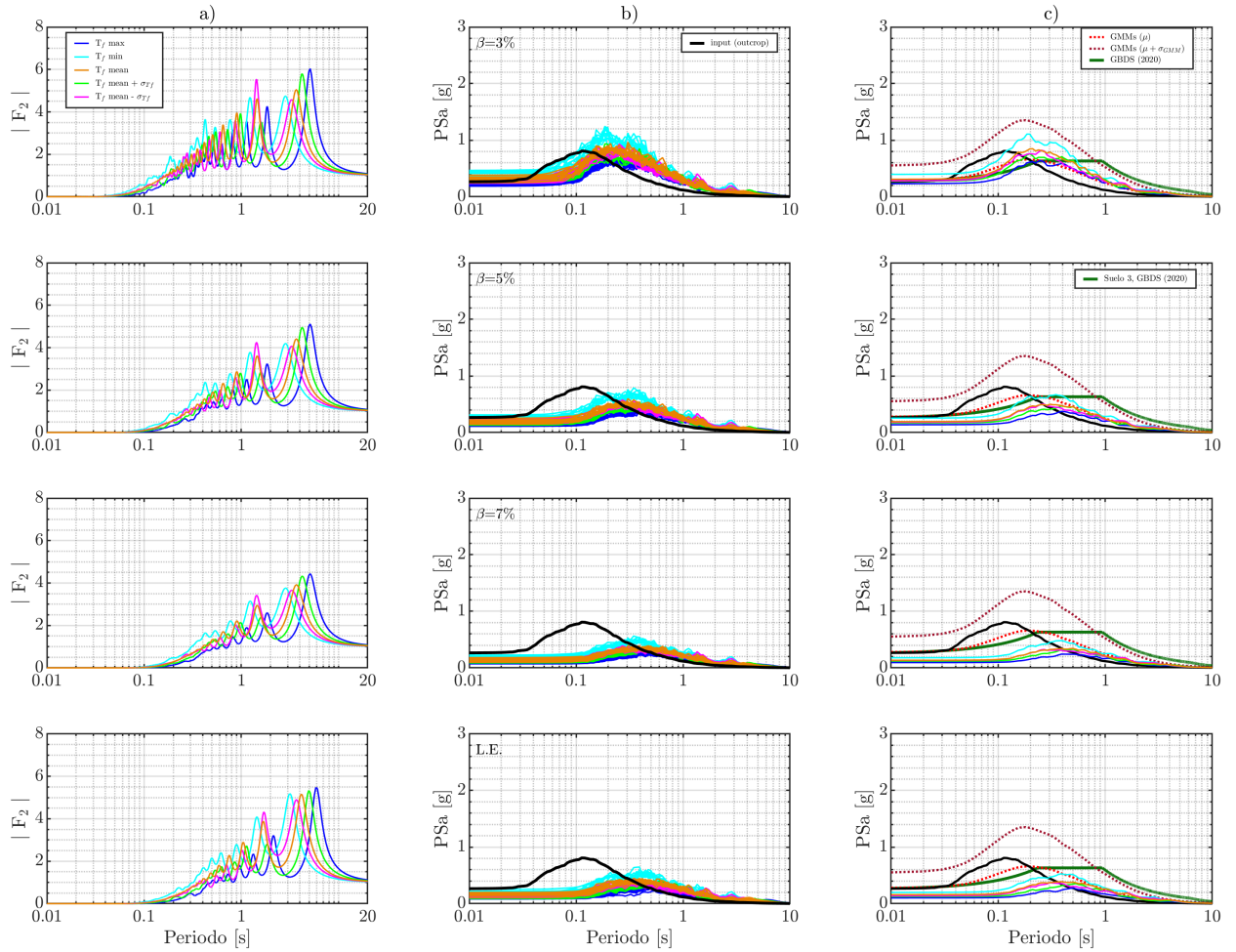


Figura H.14: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

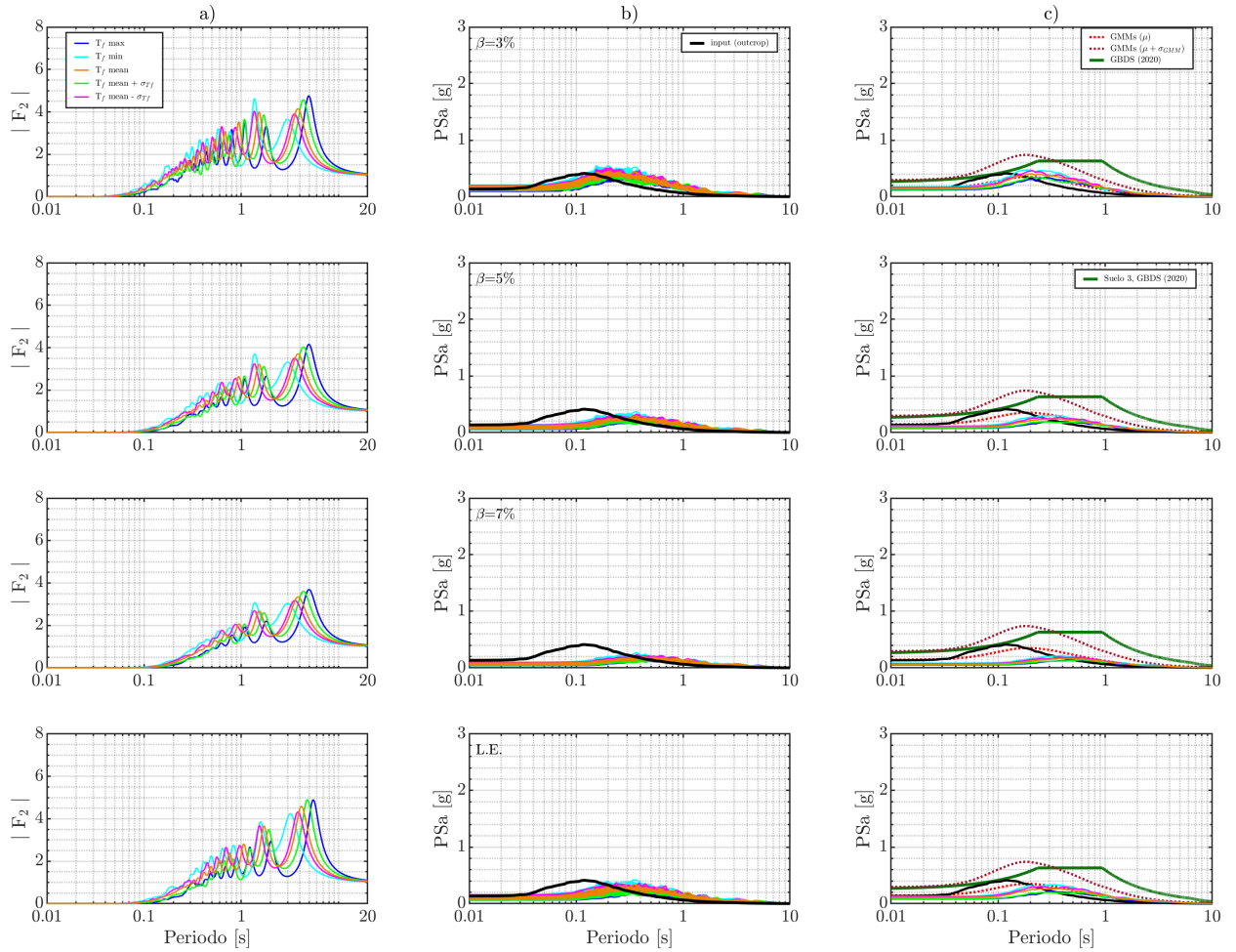


Figura H.15: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

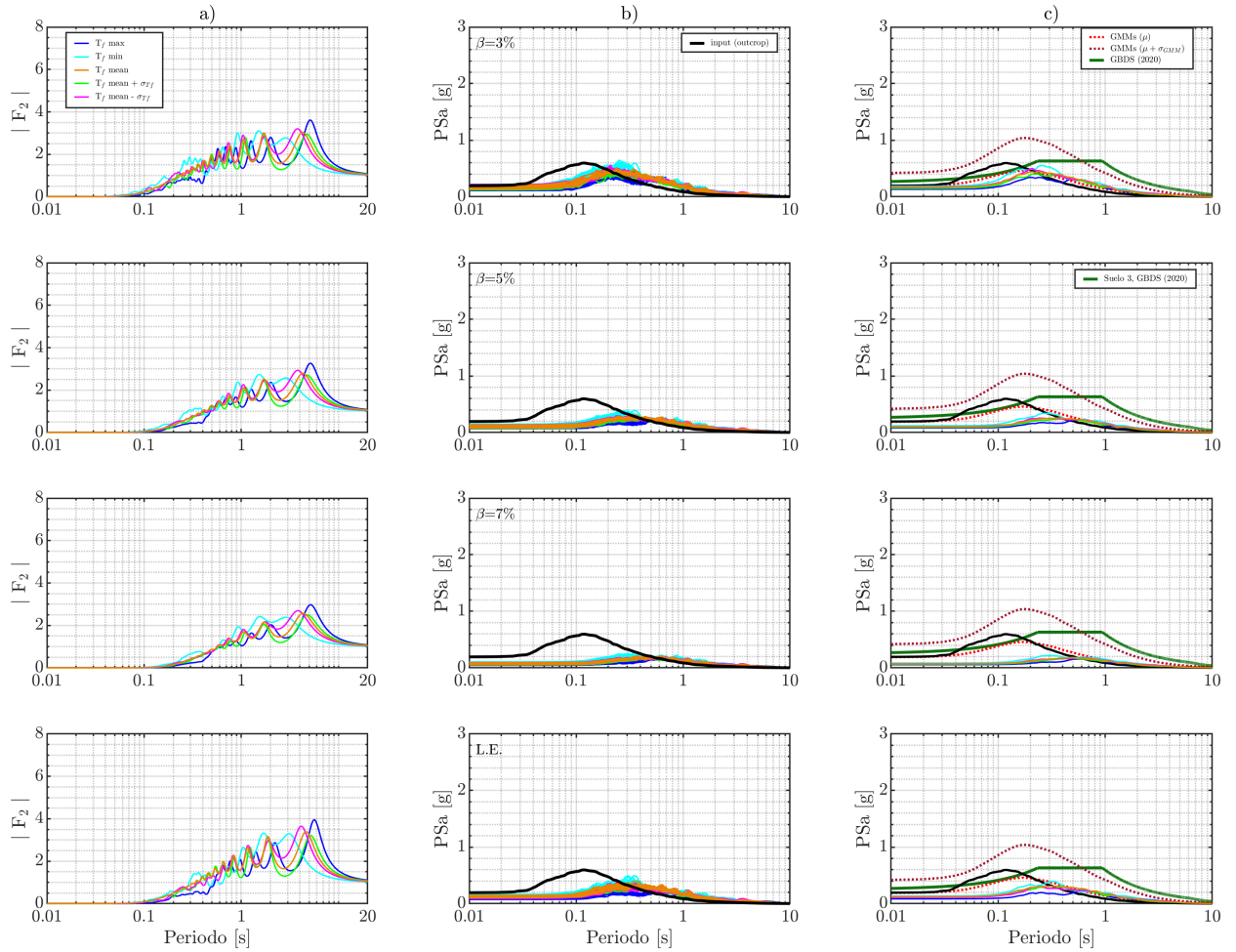


Figura H.16: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.1.d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

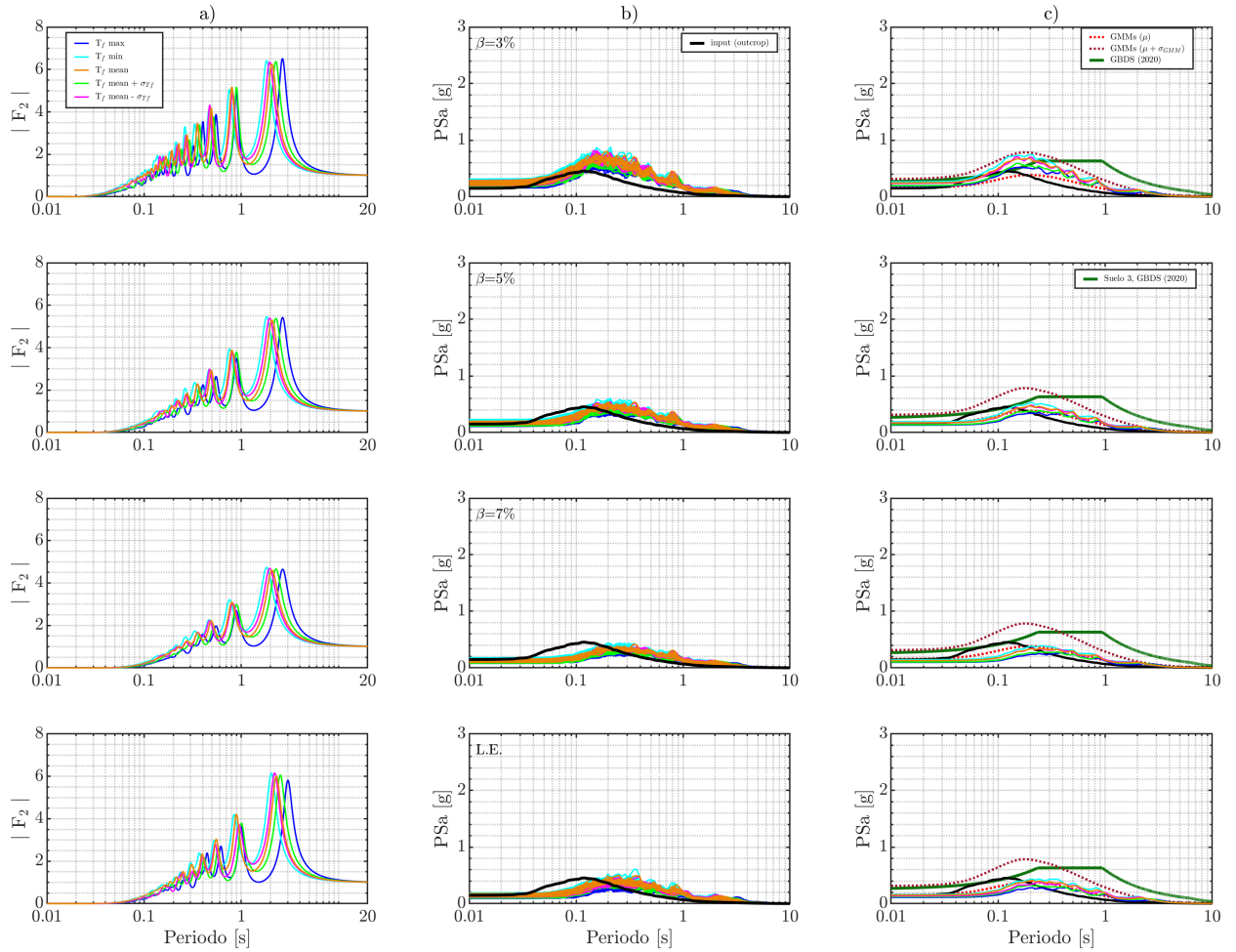


Figura H.17: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

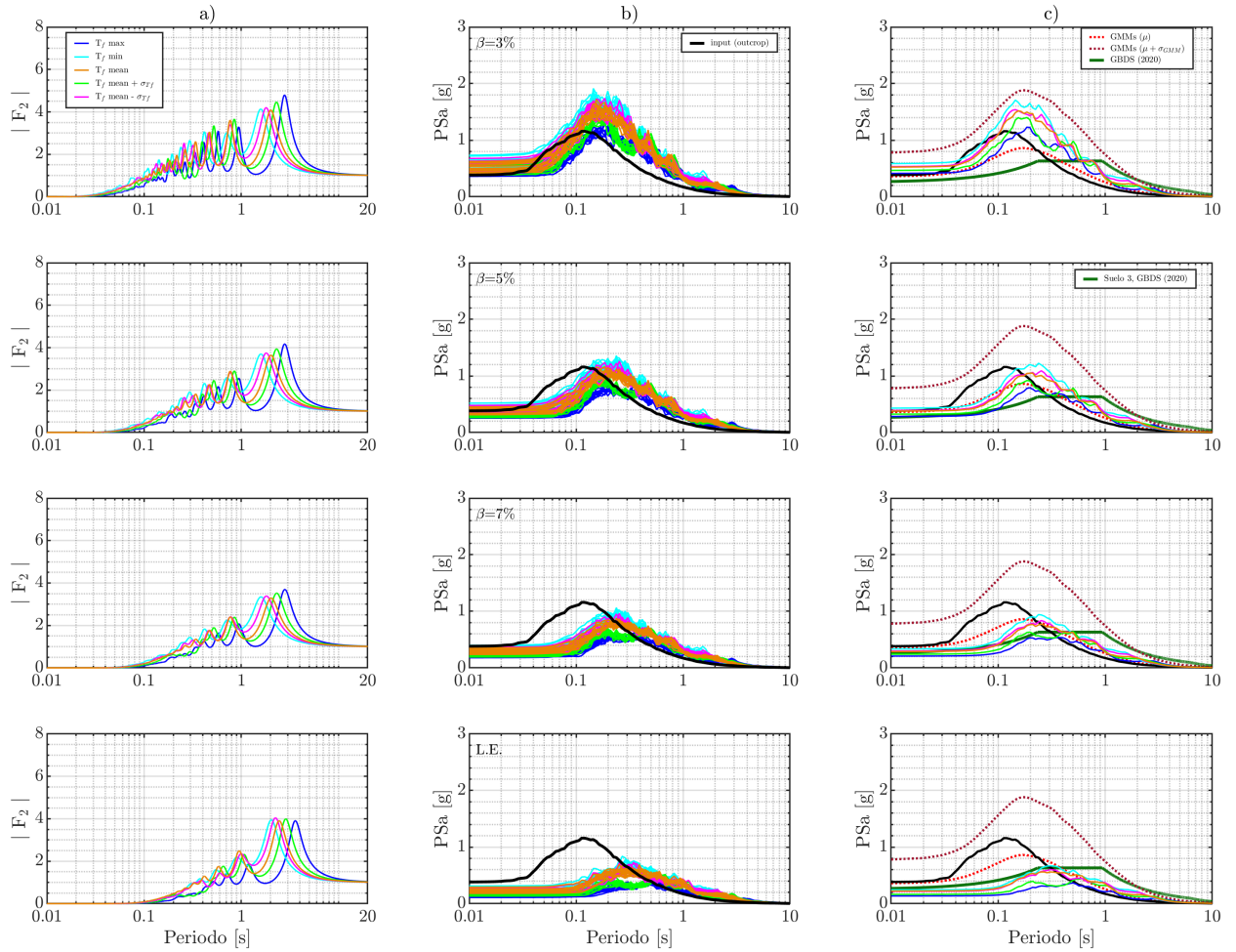


Figura H.18: Resultados obtenidos de la propagación 1D de registros espectro-compatibles para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe, considerando variabilidad en la velocidad de ondas de corte. a) Funciones de transferencia del depósito de suelo.

Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.2g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$) y lineal equivalente del suelo (LE). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

H.2.2. Variabilidad en la profundidad al basamento rocoso

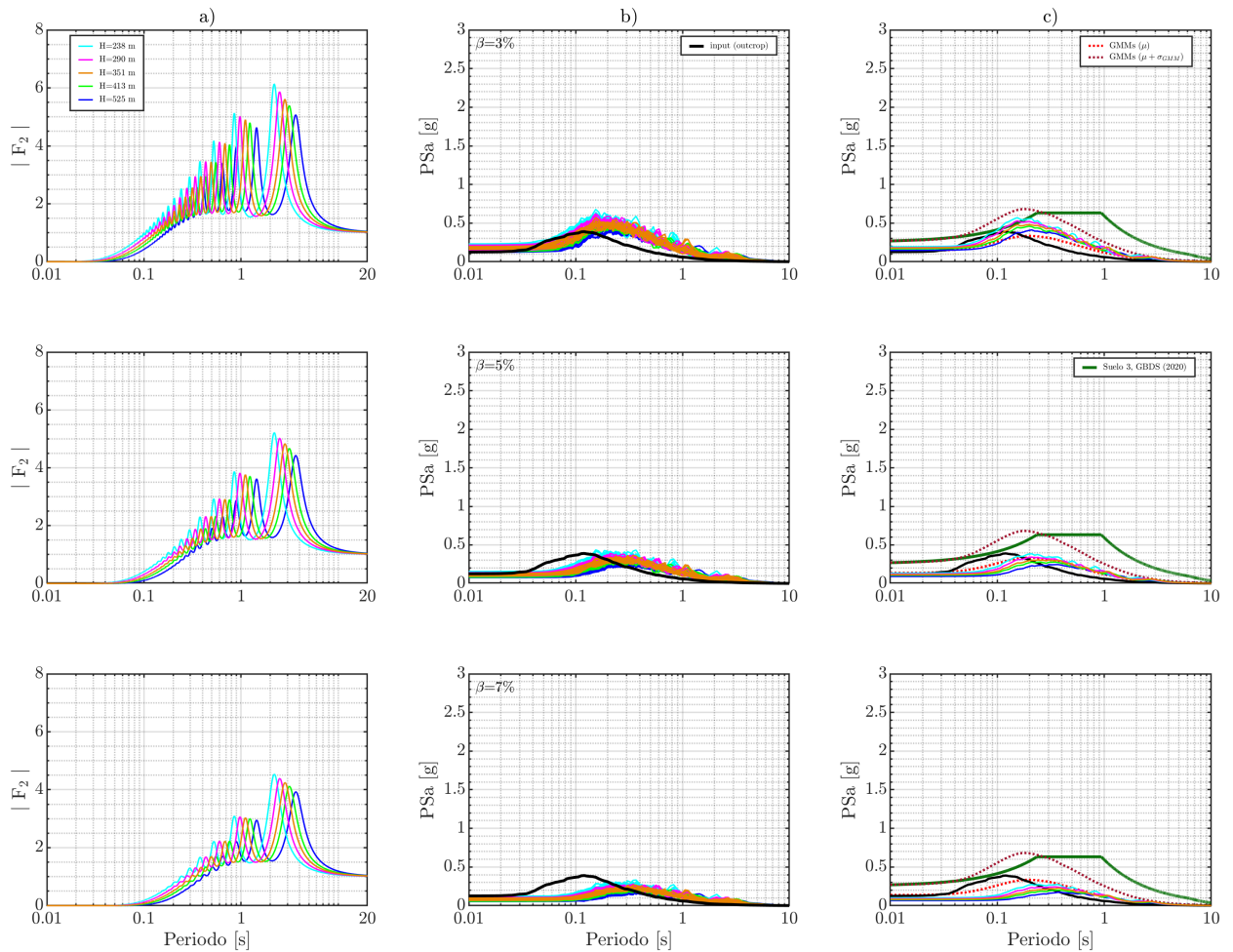


Figura H.19: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura 5.6. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

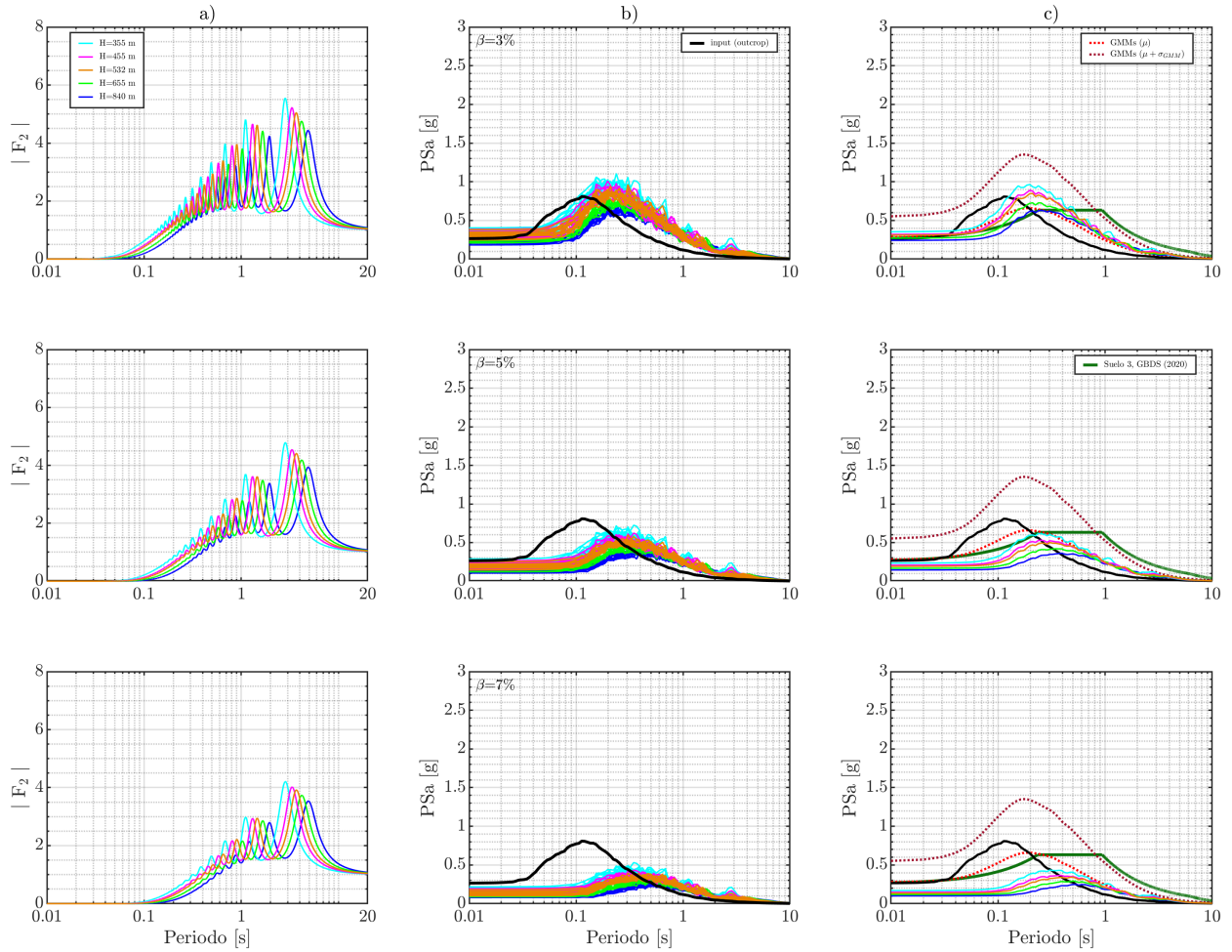


Figura H.20: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.3b. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta=3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

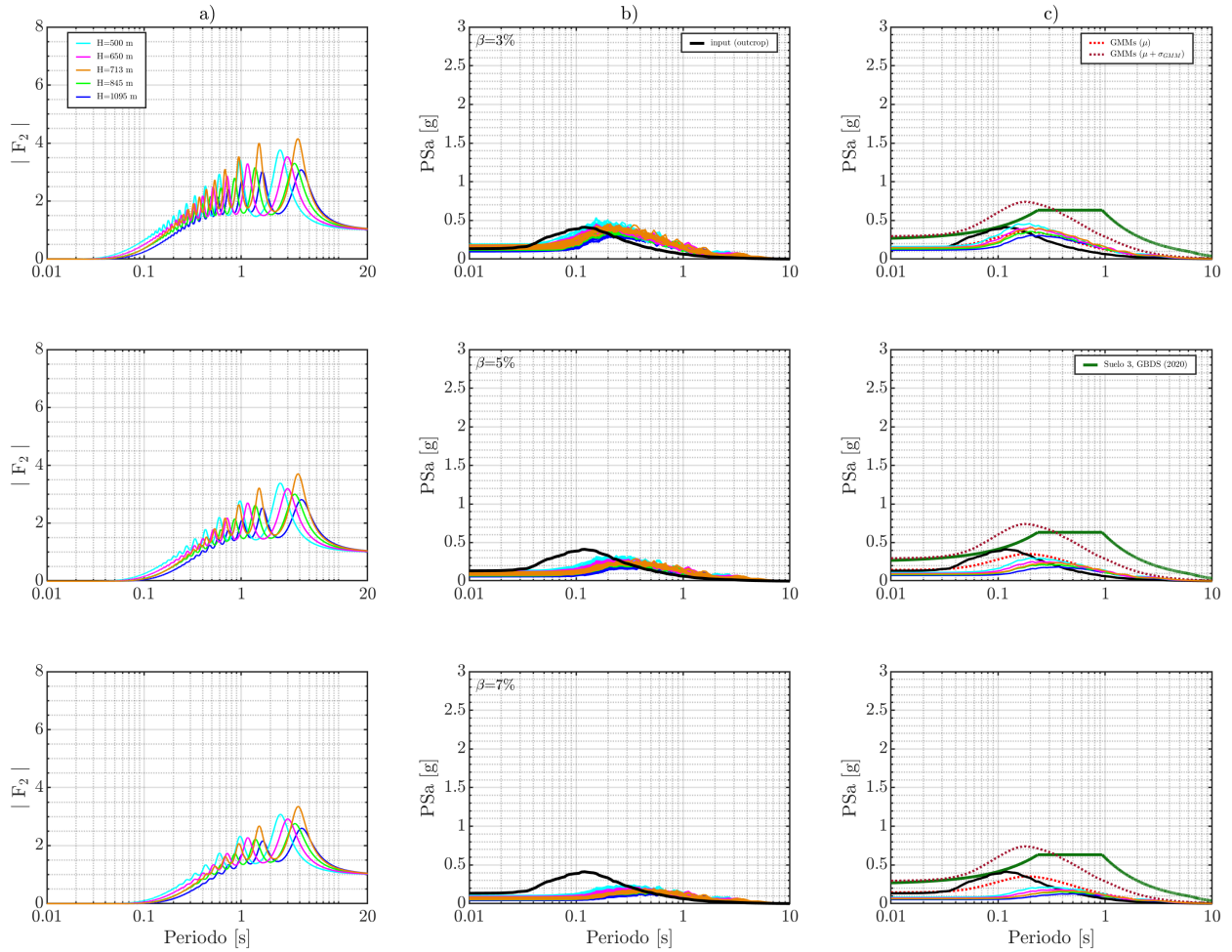


Figura H.21: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3c. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

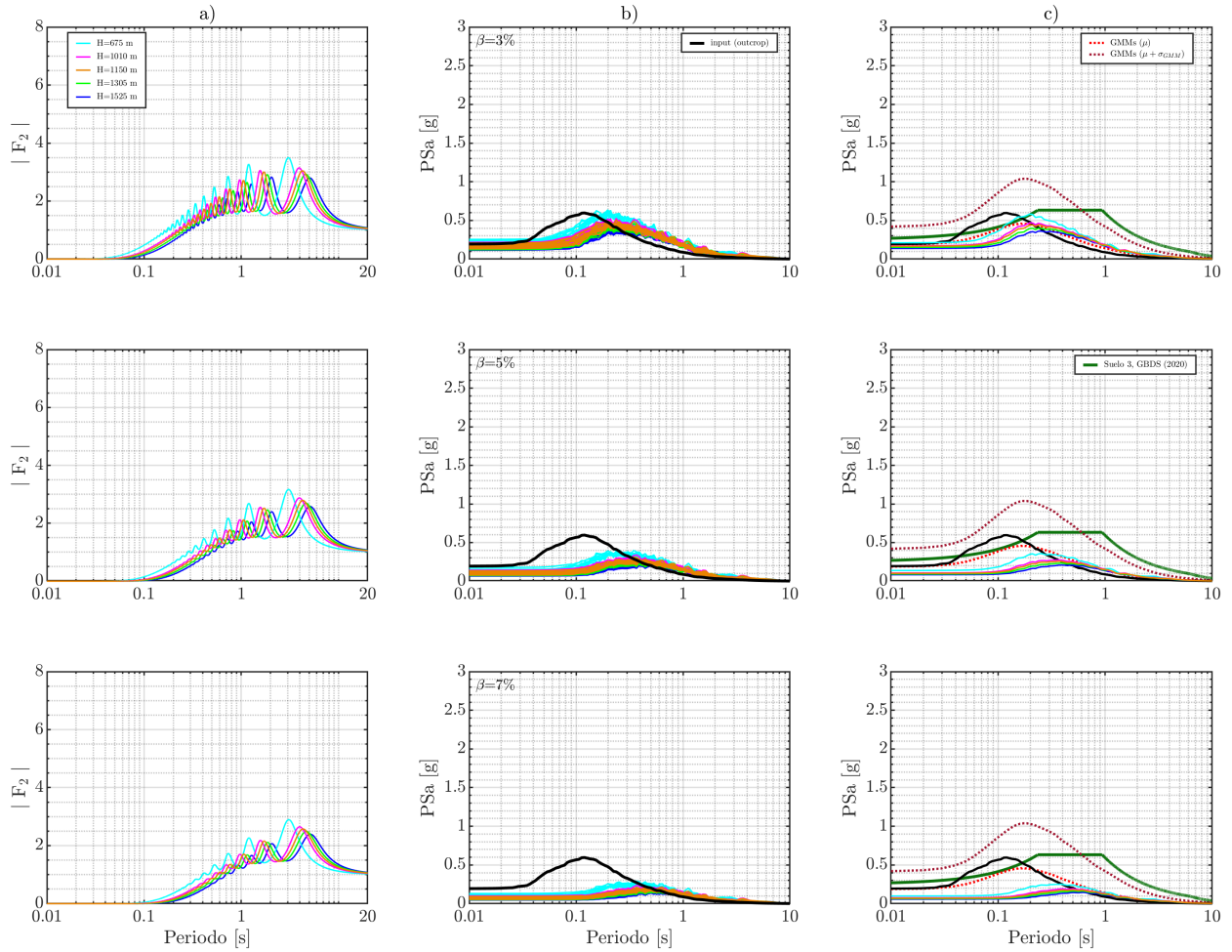


Figura H.22: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.3d. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

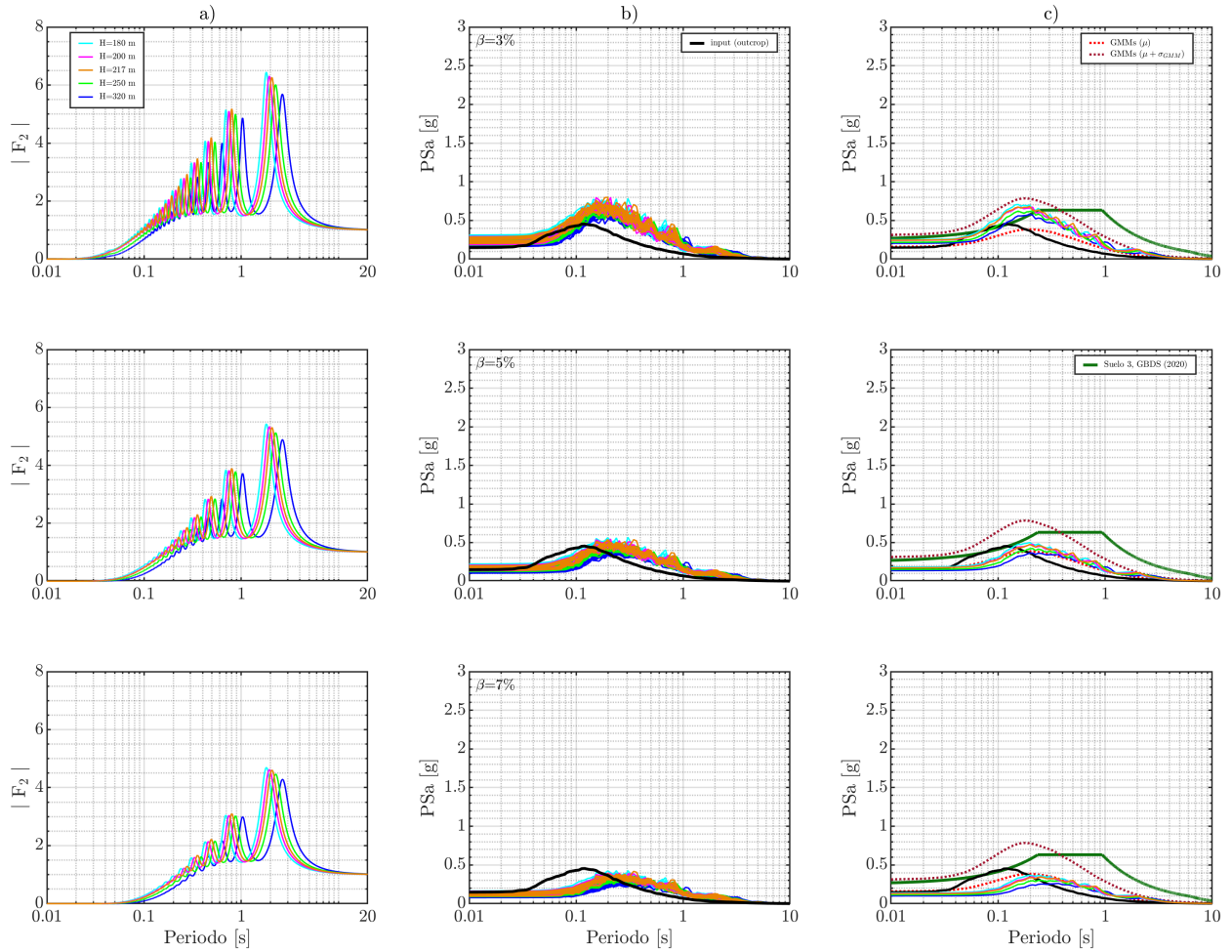


Figura H.23: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de V_s de la Figura E.4e. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta= 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

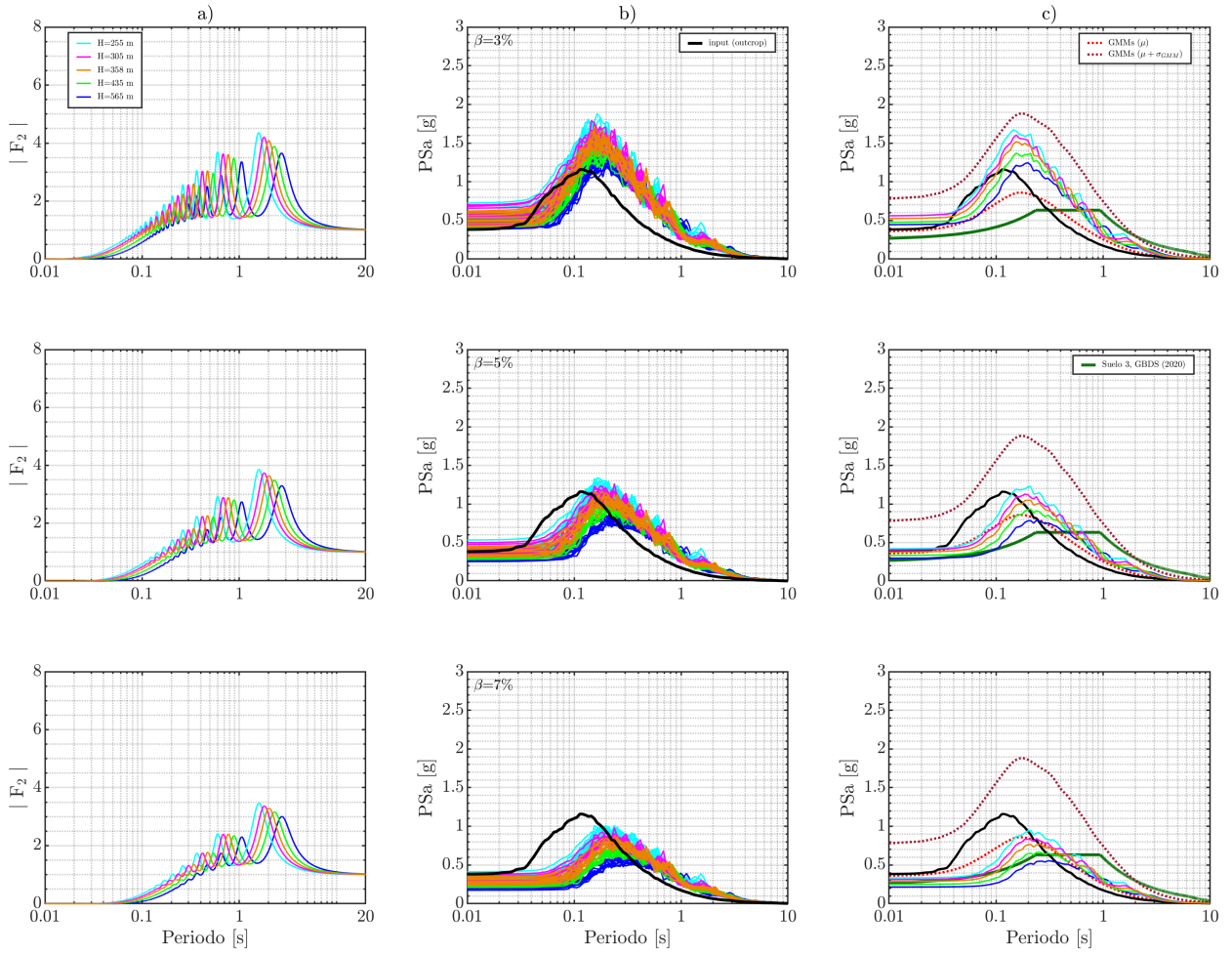


Figura H.24: Variabilidad en la profundidad al basamento analizado en la propagación 1D para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe. a) Funciones de transferencia del depósito de suelos. Cada color representa uno de los 5 perfiles de Vs de la Figura E.4g. b) Espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos considerando un comportamiento lineal ($\beta = 3, 5, 7\%$). c) Promedio de los espectros de pseudo-aceleraciones obtenidos de la propagación 1D y comparación con los obtenidos del promedio de resultados entregados por los GMMs y el espectro elástico construido según GBDS (2020) para suelo tipo S3.

Anexo I

Resumen de valores de PGA en puntos de control)

I.1. Falla Cochabamba (M_w 7)

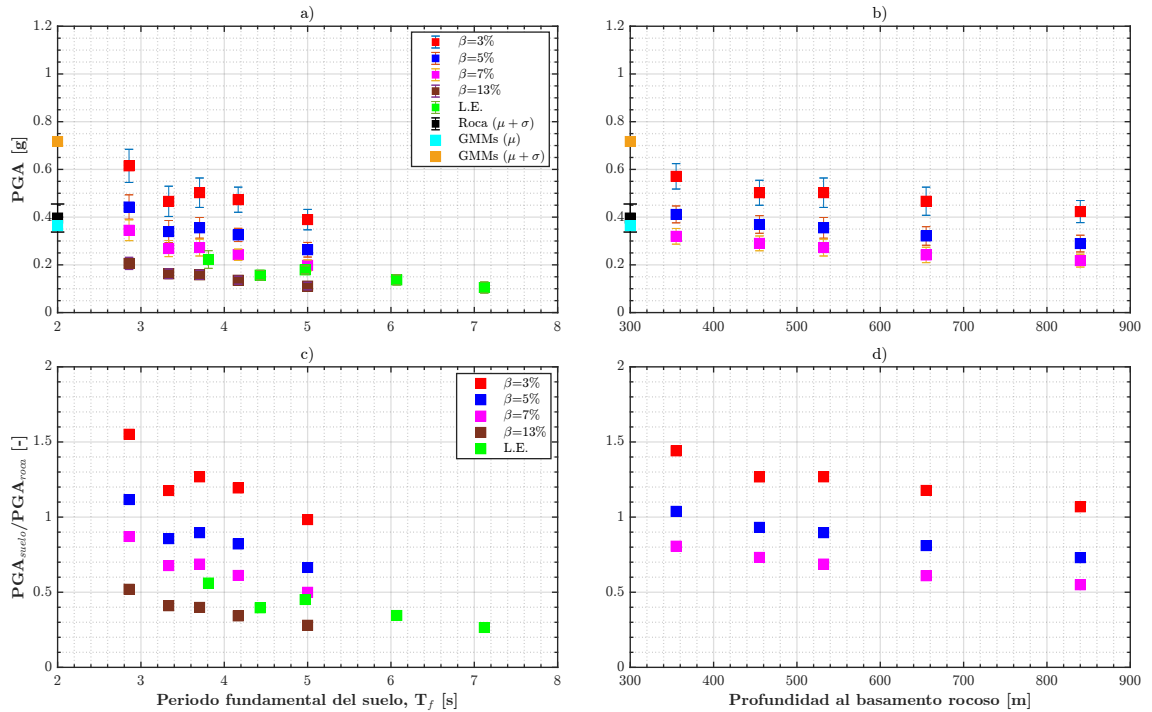


Figura I.1: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba. a) Variación del PGA en función del periodo fundamental del suelo. b) Variación del PGA en función de la profundidad al basamento. c) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función del periodo fundamental. d) Variación de la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} en función de la profundidad al basamento rocoso.

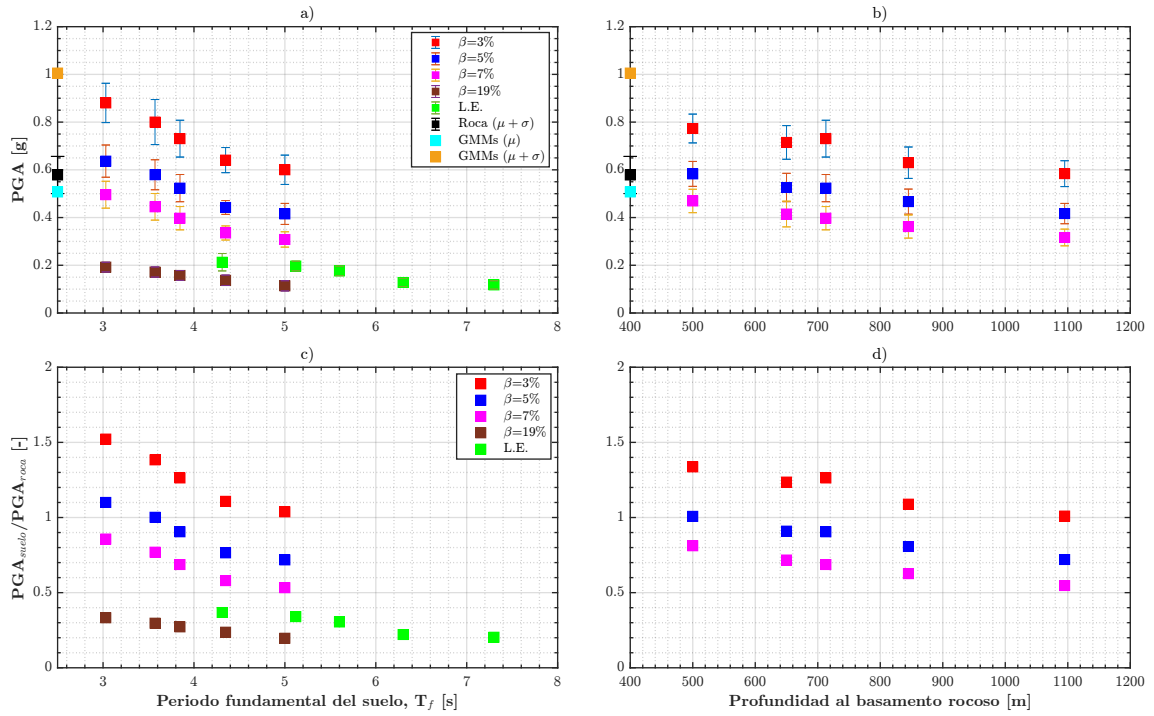


Figura I.2: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 3 y evento de magnitud $M_w 7$, generado por la falla Cochabamba.

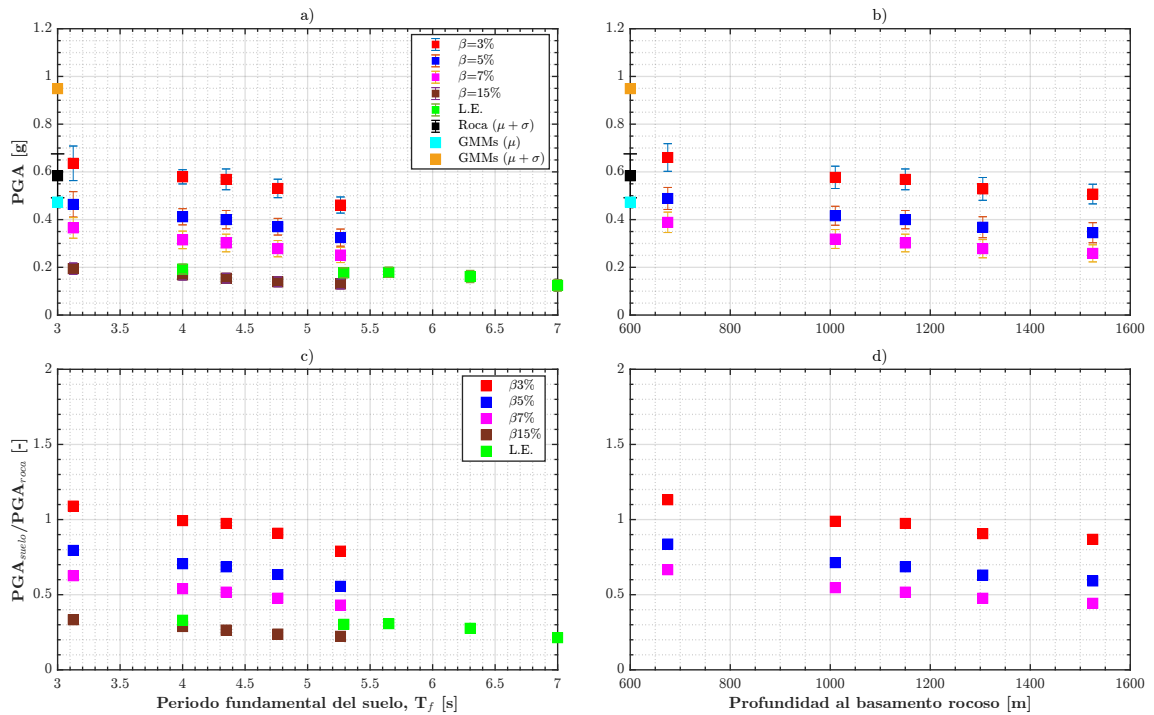


Figura I.3: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 4 y evento de magnitud $M_w 7$, generado por la falla Cochabamba.

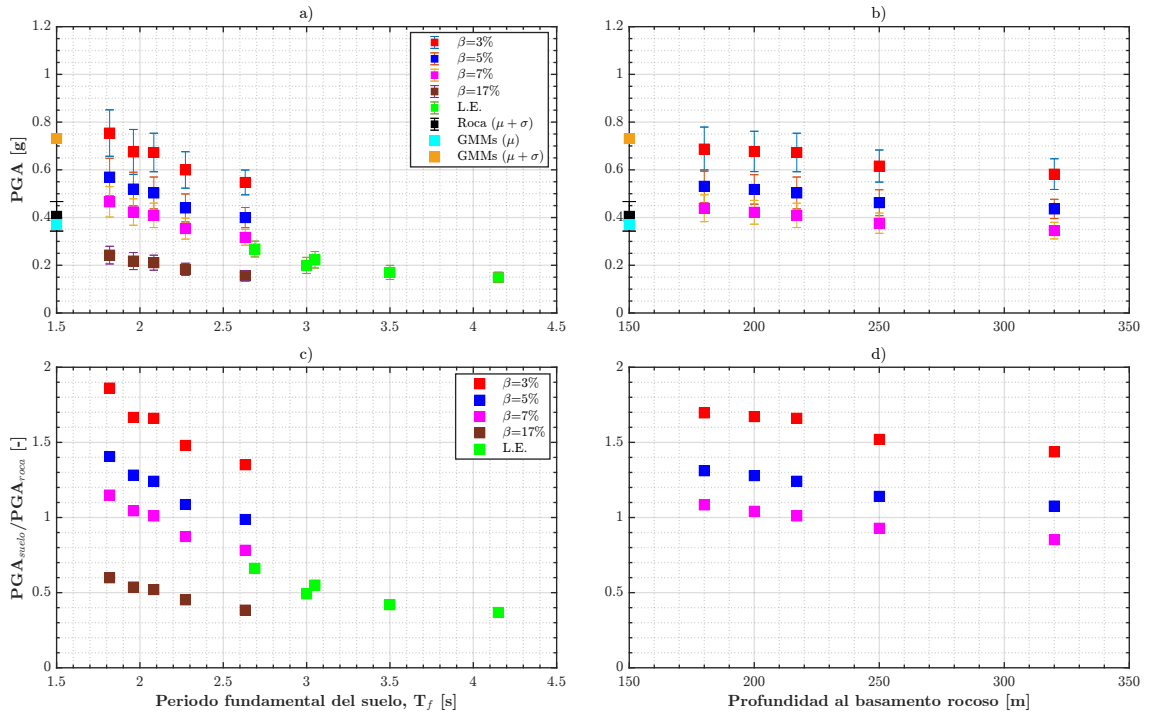


Figura I.4: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 5 y evento de magnitud $M_w 7$, generado por la falla Cochabamba.

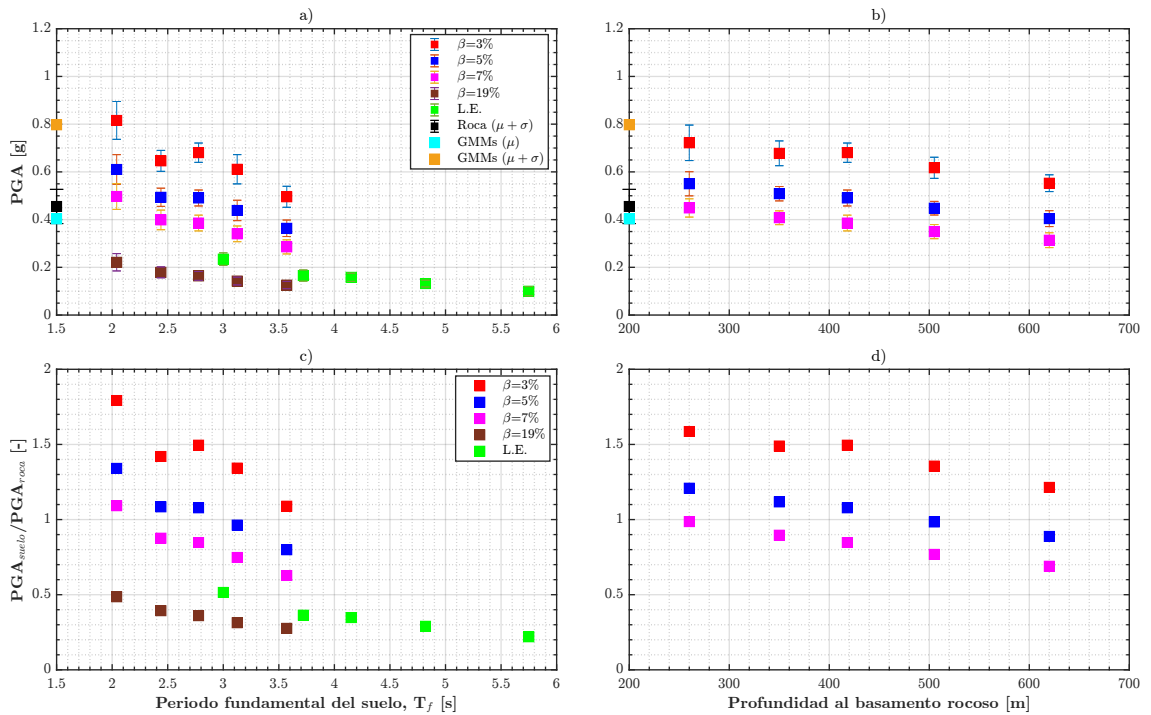


Figura I.5: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 6 y evento de magnitud $M_w 7$, generado por la falla Cochabamba.

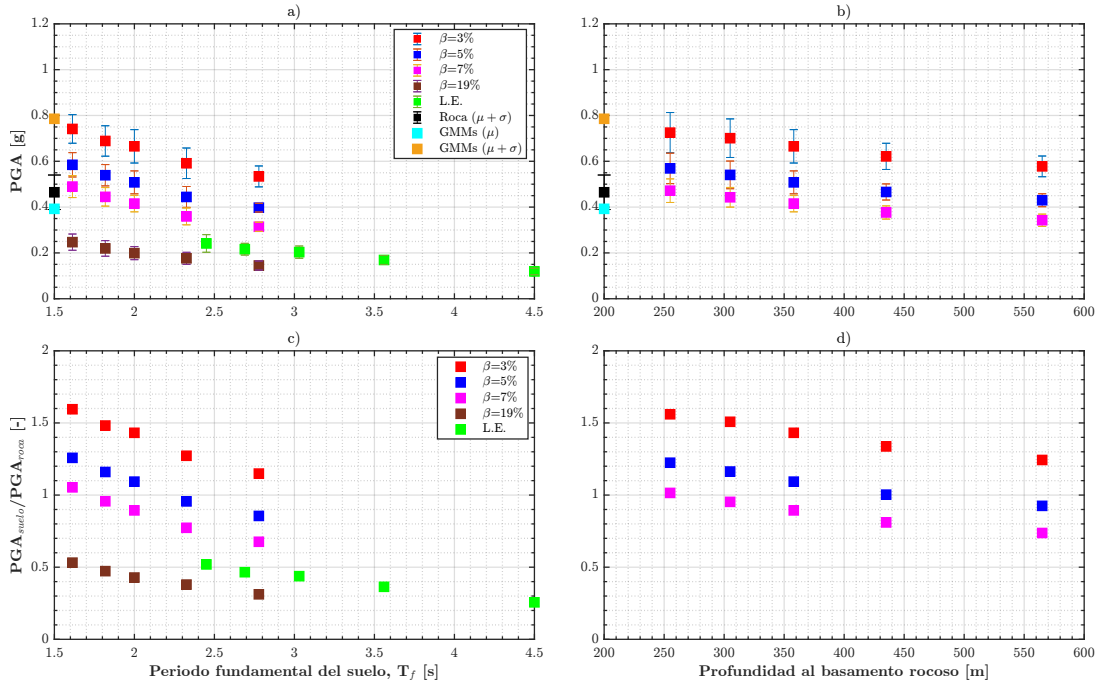


Figura I.6: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla Cochabamba.

I.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)

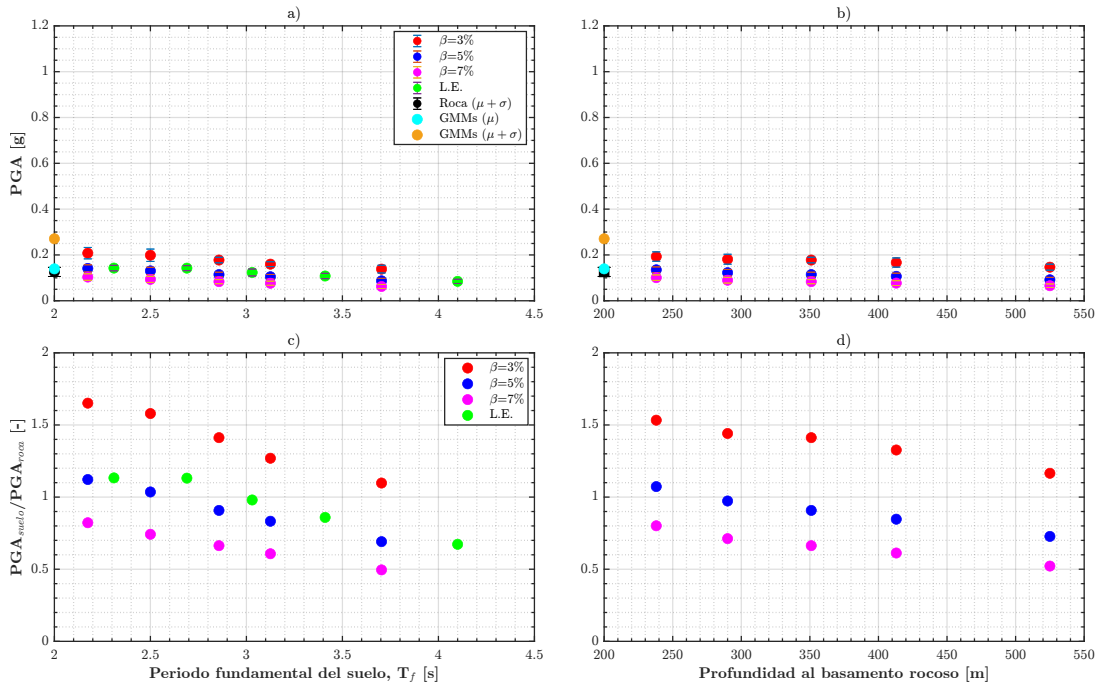


Figura I.7: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 1 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

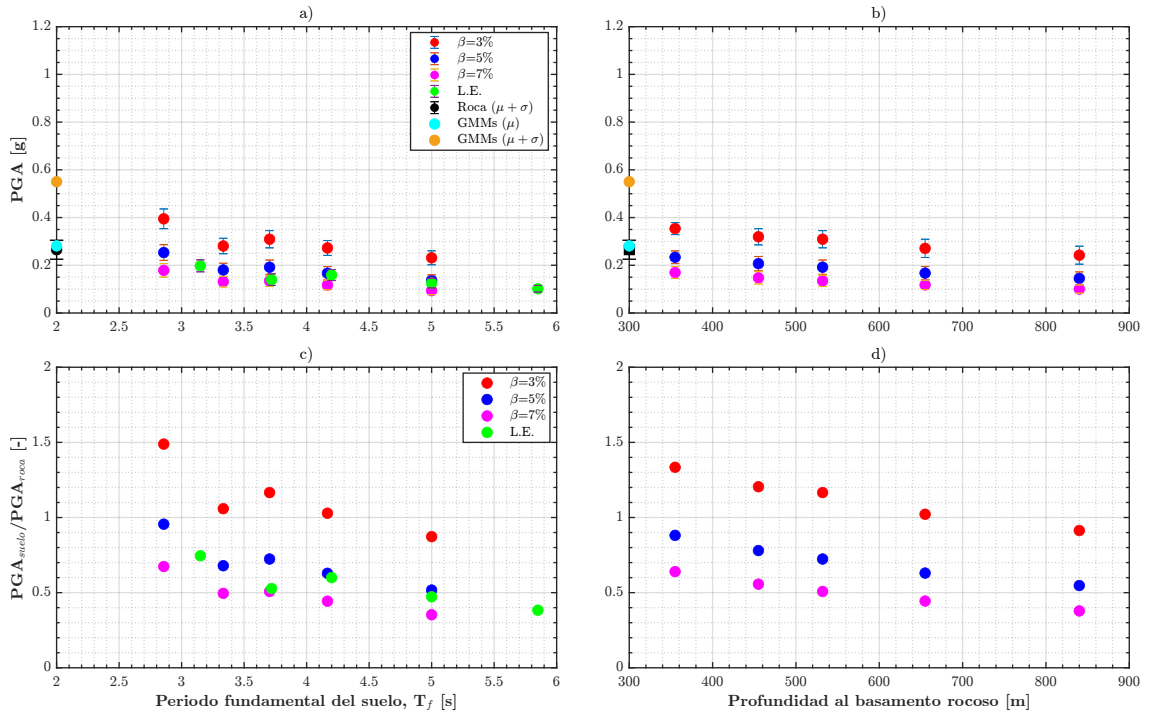


Figura I.8: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 2 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

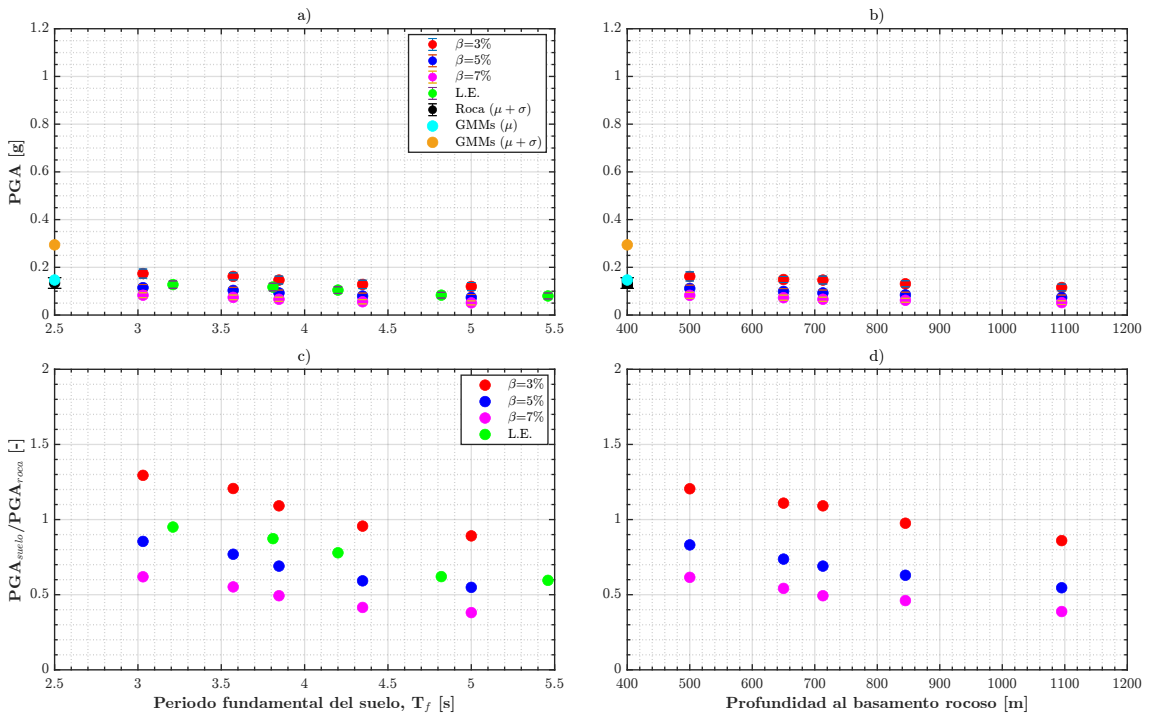


Figura I.9: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 3 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

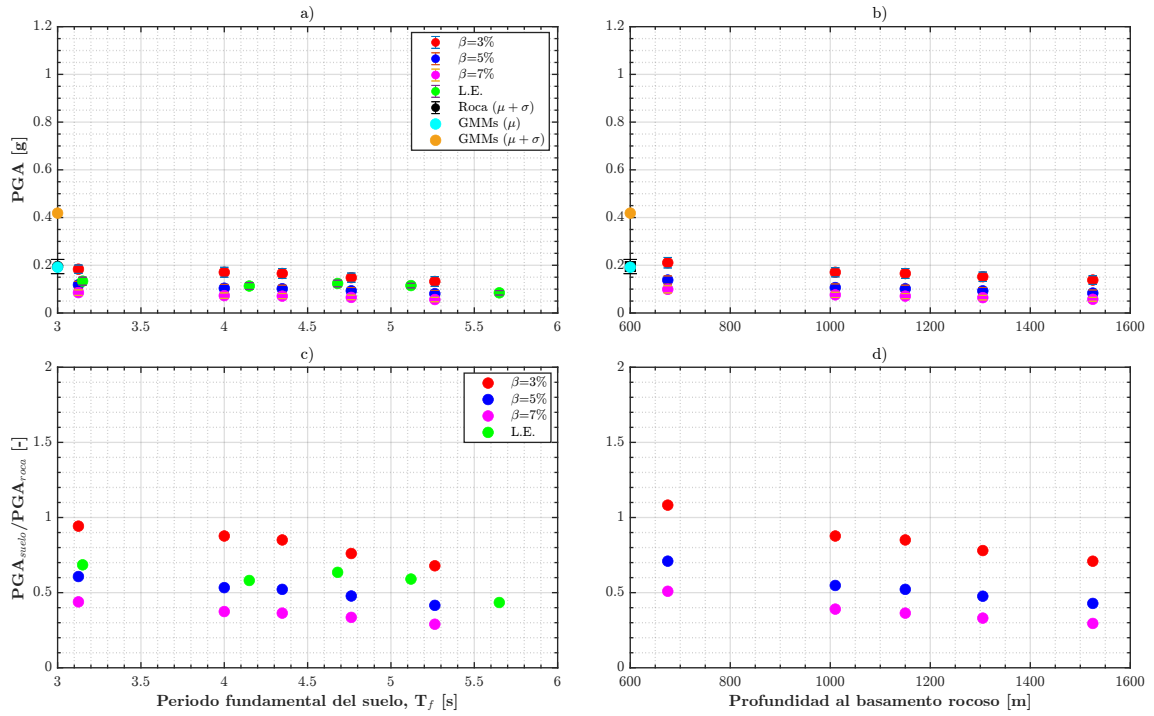


Figura I.10: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 4 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

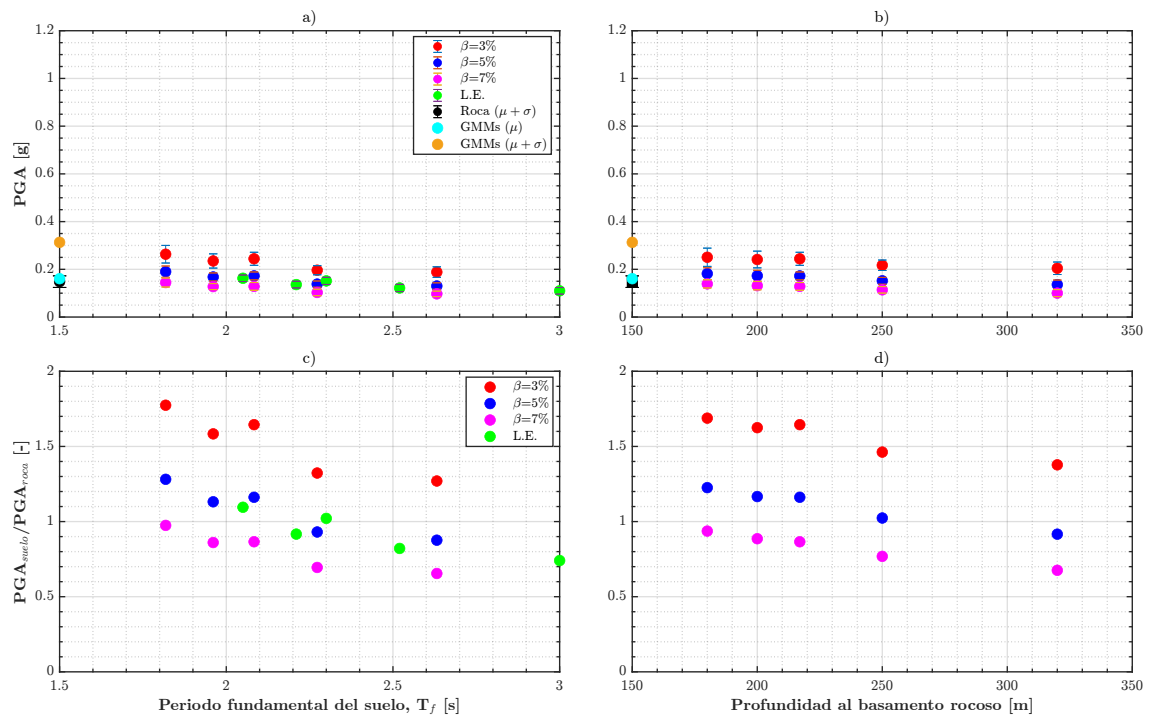


Figura I.11: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 5 y evento de magnitud M_w 6.2, generado por la falla de Sipe Sipe.

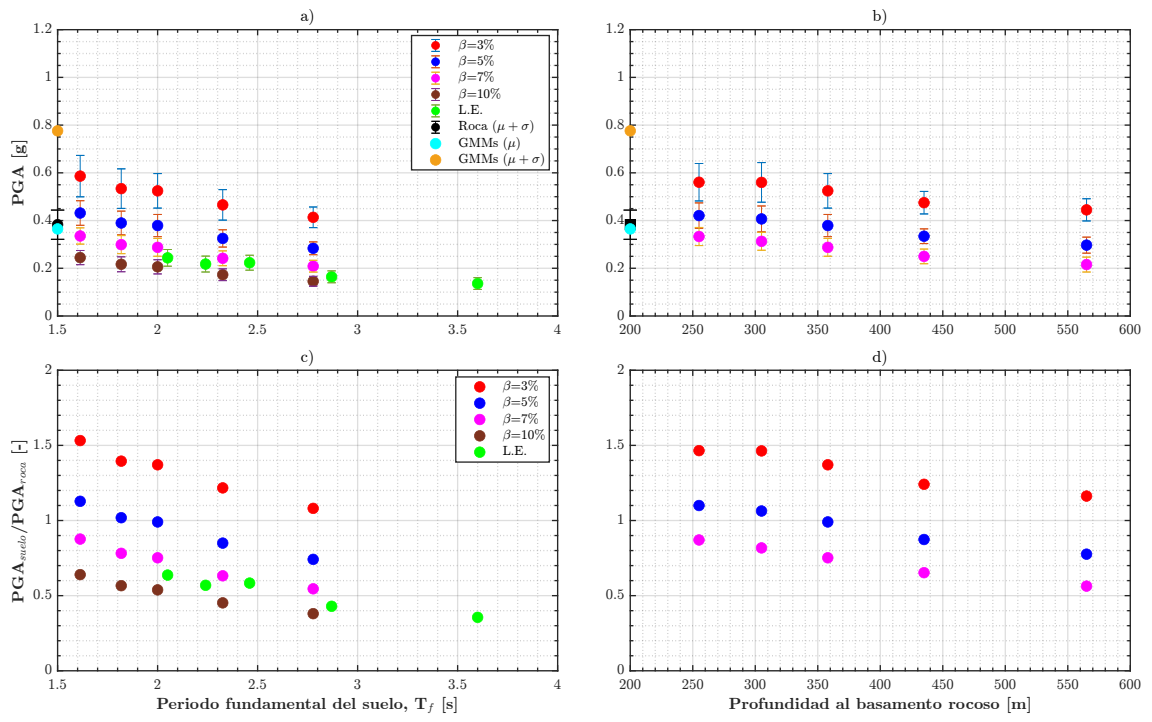


Figura I.12: Resumen de resultados obtenidos en la evaluación del PGA y la razón PGA_{suelo}/PGA_{roca} para el punto de control 7 y evento de magnitud M_w 7, generado por la falla de Sipe Sipe.

Anexo J

Amplificación relativa)

J.1. Falla Cochabamba (M_w 7)

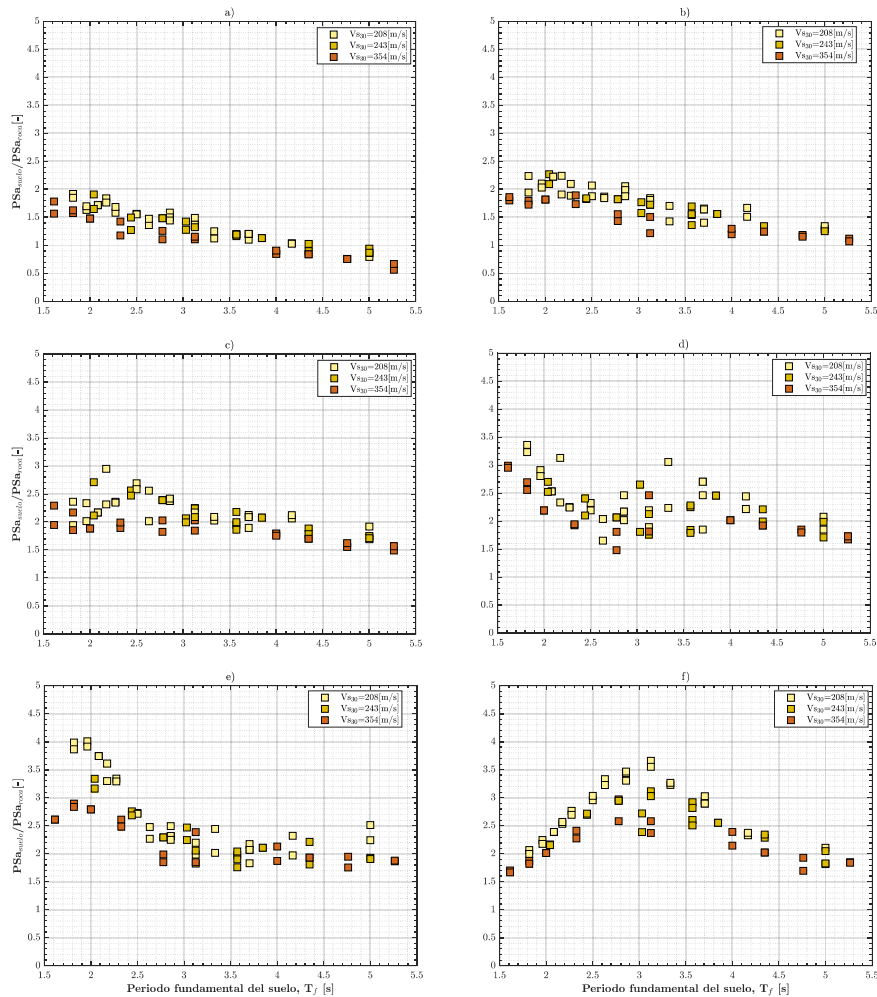


Figura J.1: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 5% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) $T = 0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.

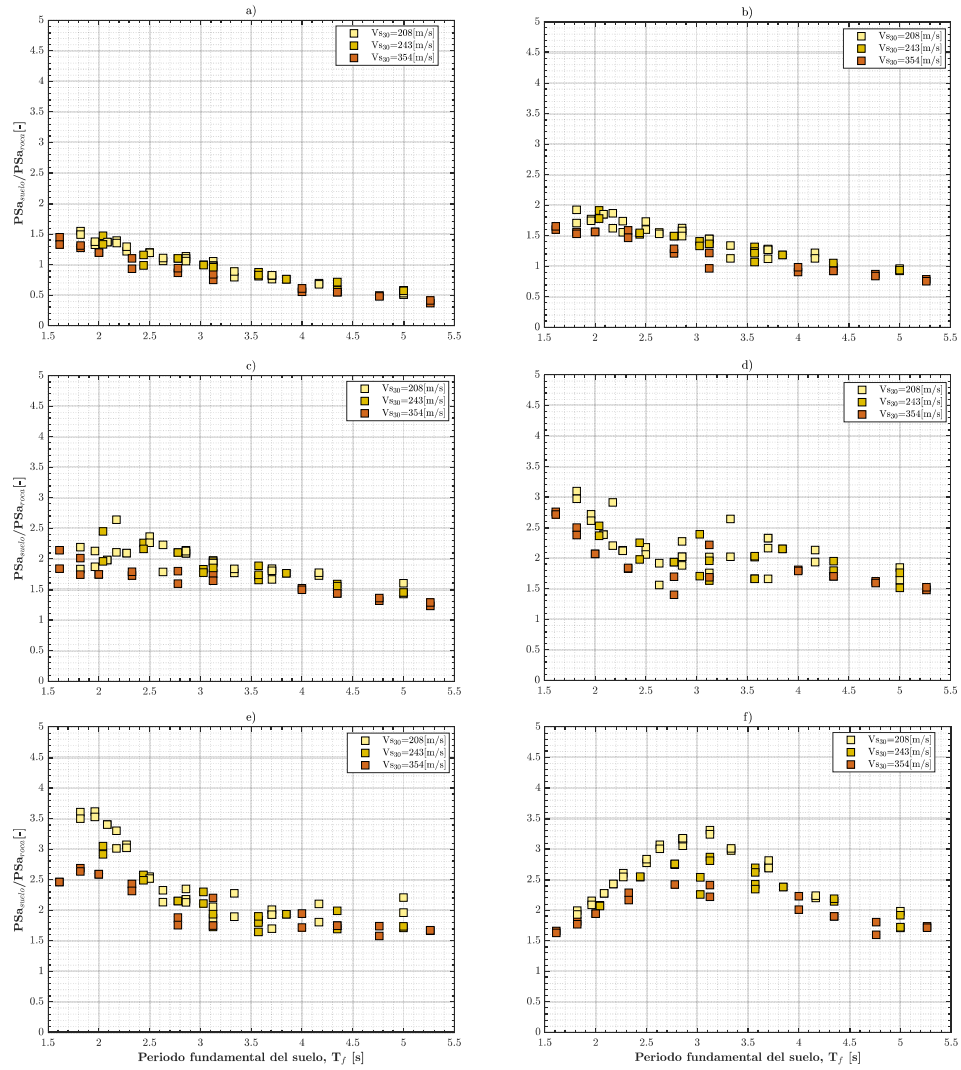


Figura J.2: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 7% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla Cochabamba (M_w 7). a) $T = 0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.

J.2. Falla de Sipe Sipe (M_w 6.2)

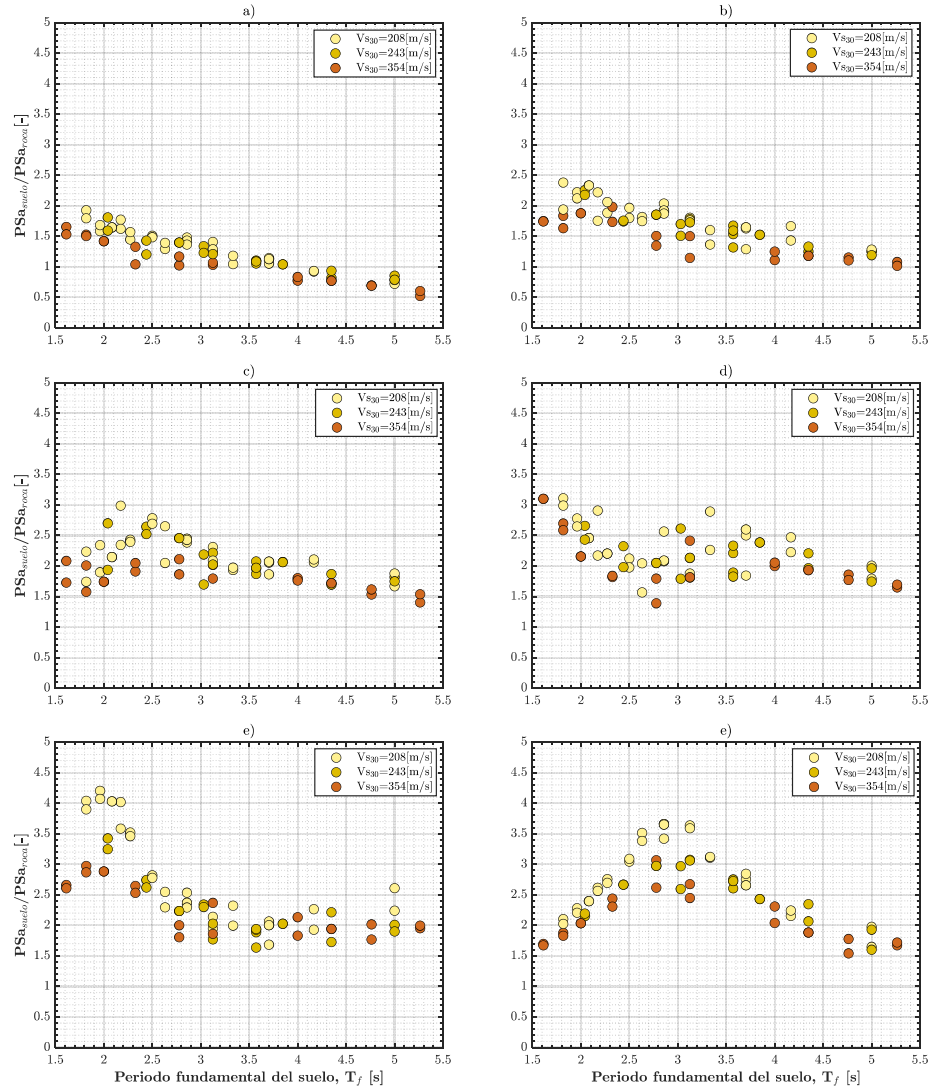


Figura J.3: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 5% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) $T=0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.

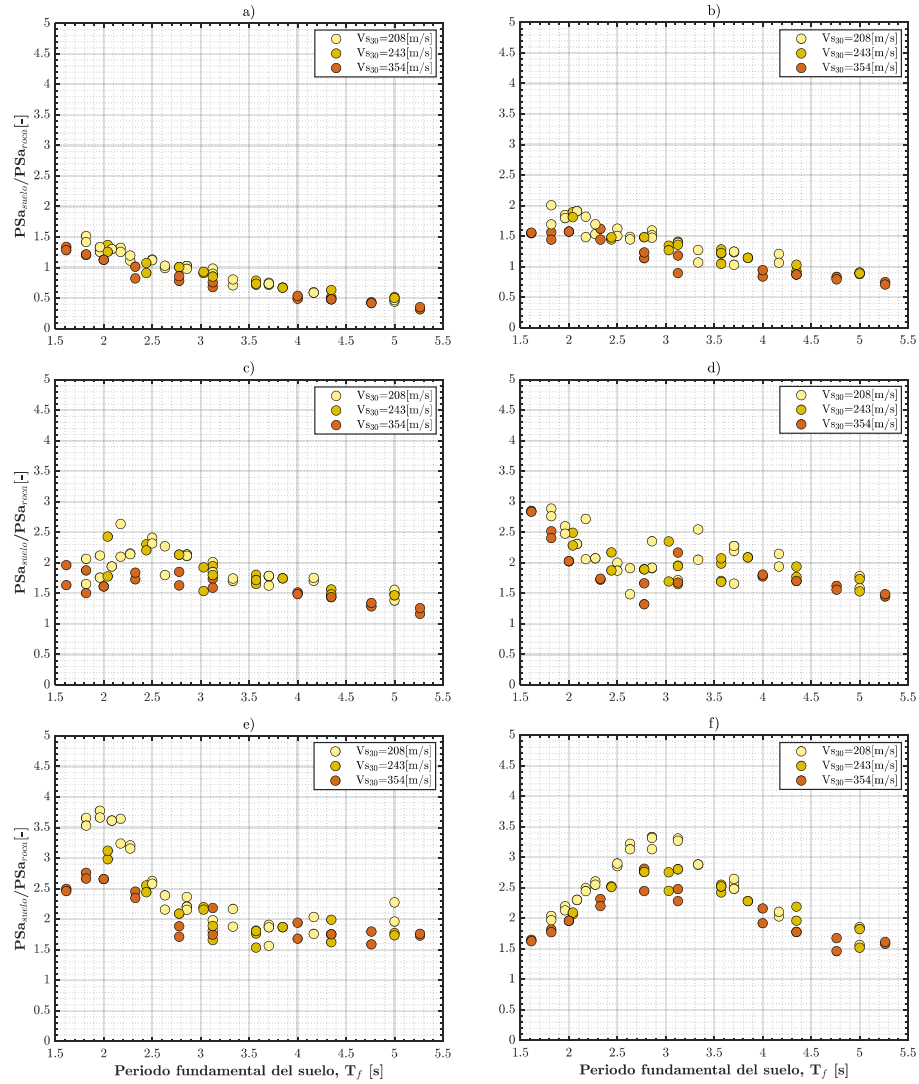


Figura J.4: Correlación entre la razón PSa_{suelo}/PSa_{roca} y el periodo fundamental del suelo para un amortiguamiento constante del suelo igual a 7% y diferentes periodos, los cuales son asociados a la activación sísmica de la falla de Sipe Sipe (M_w 6.2). a) $T=0.3$ s. b) 0.5 s. c) 1.0 s. d) 1.5 s. e) 2.0 s. f) 3.0 s.