



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

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS FINOS DEL NORTE
DE LA CUENCA DE SANTIAGO CONSIDERANDO EFECTOS NO LINEALES

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

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARCO ANDRÉS CHIORINO TALA

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SERGIO RUIZ TAPIA

RODRIGO ASTROZA EULUFI

Esta tesis fue financiada por el Proyecto FONDECYT 1190995

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA, MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MARCO ANDRÉS CHIORINO TALA
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: CÉSAR PASTÉN PUCHI

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS SUELOS FINOS DEL NORTE DE LA CUENCA DE SANTIAGO CONSIDERANDO EFECTOS NO LINEALES

Simulaciones numéricas de la respuesta sísmica de la Cuenca de Santiago han evidenciado que en suelos competentes, como la grava de Santiago, no hay gran diferencia entre el modelamiento unidimensional (1D) y bidimensional (2D), mientras que en suelos blandos, el modelamiento 1D es insuficiente, ya que no se generan ondas superficiales. Sin embargo, el efecto de las ondas superficiales en este tipo de simulaciones parece ser demasiado pronunciado cuando se asume que el suelo se comporta elásticamente. En este trabajo, se realizan simulaciones numéricas dinámicas 2D de una sección transversal de suelos finos del norte de la Cuenca, utilizando el software de elementos finitos Plaxis 2D. Se compara la respuesta sísmica de la sección cuando los materiales se modelan con un modelo lineal elástico y el modelo no lineal Hardening Soil Small (HSS). Las fuentes sísmicas en ambos casos corresponden a tres pulsos de Gabor polarizados como ondas SV. Cada uno de los pulsos se modula en amplitud para generar distintas aceleraciones máximas en un afloramiento en roca del modelo (aproximadamente, 0.01g, 0.05g y 0.1g). Además, en diferentes puntos de interés de la sección modelada, se generaron perfiles para calcular la respuesta 1D y compararla con la respuesta 2D. Para estudiar el efecto de la no linealidad del modelo HSS, se modificó el parámetro de deformación angular al 70% de degradación del módulo de corte ($\gamma_{0.7}$) de $1 \cdot 10^{-4}$ a $3 \cdot 10^{-4}$, observándose que para el caso $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$ la no linealidad es más pronunciada que para el caso $\gamma_{0.7} = 3 \cdot 10^{-4}$, donde el modelo HSS responde parecido al caso elástico. Se calcularon aceleraciones espectrales, aceleraciones máximas del terreno (PGA), velocidades máximas del terreno (PGV), velocidades absolutas acumuladas (CAV) e Intensidades de Arias (AI) sobre la superficie de los 3 modelos HSS y el modelo lineal elástico. A partir de estas medidas de intensidad, se calcularon factores de amplificación del suelo con respecto a un afloramiento en roca y se calcularon factores de agravación de la respuesta sísmica 2D sobre 1D y factores de reducción de amplificación del comportamiento no-lineal sobre el lineal. Los resultados indican que la respuesta del modelo HSS se asemeja a la respuesta del modelo elástico para el pulso de menor amplitud, y que la no linealidad se incrementa a medida que aumenta la amplitud del input sísmico, donde el mayor pulso presenta la degradación más pronunciada y la menor amplificación relativa. Los factores de agravación señalan que PGA y PGV tienen una respuesta cercana a la unidad, no así CAV y AI, debido al alargamiento del movimiento fuerte en el caso 2D.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciéndole a mi papá, por todo su apoyo en mi etapa universitaria y durante toda mi vida. Por hacer mis pagos de la U mes a mes y por acompañarme en la decisión de meterme al Magíster, donde nunca me apuró y siempre me entregó todo lo que necesité. Por ser una persona ejemplar y enseñarme a ser cada día una mejor persona. También le quiero agradecer a mi hermana, por todo el cariño y la preocupación que me ha entregado desde pequeño, por cuidarme tanto en los momentos que lo necesité y por la bonita relación que siempre hemos tenido. Agradecerle a mi mamá por su amor y consejos, deseando siempre lo mejor para mí. También quiero agradecerle a mi abuela Oyoní, que me cuidó y crió cuando niño, siendo mi segunda madre, entregándonos tanto a mí y a mi hermana. También le quiero agradecer a mi Lunita, que desde que llegó ha sido una luz de esperanza en la casa, dándonos tanto amor a cada integrante de la familia y acompañarnos en los momentos buenos y sobre todo en los difíciles.

Agradecerle al profesor César Pastén, por confiar en mí y darme la oportunidad de realizar este trabajo junto a él, por enseñarme el mundo de la geotecnia y preocuparse semanalmente de mi desarrollo de la Tesis, quién me otorgó los mejores consejos con una muy buena disposición, siendo un profesor muy presente durante toda esta etapa. Por esa semana de terreno al sur, donde aprendí y tuve una grata experiencia. También agradecerle al profesor Sergio Ruiz y Rodrigo Astroza, por aceptar ser parte de mi comisión y dedicarme de su tiempo.

Quiero agradecerle a José Bustos y a Bastian Garrido, porque no me pudo haber tocado unos mejores compañeros de la línea de investigación del profesor Pastén. Desde que los conocí en el Magíster siempre me ayudaron y aconsejaron de la mejor manera posible y con la mejor disposición. Gracias por todos esos zooms a cualquier hora para resolver alguna duda que haya tenido, por ayudarme tanto en Plaxis, Matlab y entregarme de su conocimiento. Sin ustedes, todo este camino habría sido mucho más difícil. Agradecerles también a ustedes y al profesor Pastén por darse el espacio de compartir fuera de lo académico, las salidas a comer, los pádel, los squash, entre otras cosas. También le quiero dar las gracias a mis otros compañeros del grupo de investigación, al Nico, Fabián, entre otros, por siempre ayudarme cuando lo solicité.

También le quiero agradecer a toda la gente que conocí en la salita de Civil desde que comencé con la Tesis. Gracias a todos mis compañeros que siempre me hicieron sentir muy bien y hacer que tenga un momento grato los días de trabajo en la Tesis. Por toda esa ayuda académica y sobre todo por esas conversaciones, almuerzos, escuchar música, ver partidos de fútbol, los cachitos, entre otras cosas. Agradecerle también a la tía Isabel y a la Mariela, por siempre preguntarme como estoy en las mañanas.

Por último, quiero darles las gracias a mis amigos. A mis amigos del colegio, que me acompañan hasta el día de hoy. A los 'Heickr', que los conocí en inducción el primer día de U y seguimos siendo amigos. A los 'Huillinchés', que los conocí en el plan común, por esos almuerzos en la U, los carretes y siempre la buena onda. A 'Los Chaquetas', mis amigos que conocí cuando entré a Civil. A 'Los 3 ½ Fantásticos', por todo ese apañe en los ramos y ser grandes amigos. A mi equipo de fútbol 'Los Viga Grande', que cada partido era despejarse de la carga académica. Por todo ese aguante, garra y cariño que le teníamos al equipo, donde logramos ser campeones el 2022. También agradecerle a los 'Palers', por todos esos 'palones', viajes y risas.

El apoyo para esta investigación fue otorgado por el proyecto FONDECYT 1190995.

A todos ustedes infinitas gracias, fueron quiénes hicieron que siempre vaya con ganas de seguir hacia adelante y poder ir logrando mis metas.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1 Hipótesis	1
1.2 Objetivo general	1
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Estructura del trabajo.....	2
Capítulo 2 : Revisión del Estado del Arte.....	3
Capítulo 3 : Simulaciones Numéricas.....	5
3.1 Sección transversal geológica	5
3.2 Propiedades dinámicas.....	5
3.3 Modelo Numérico	10
Capítulo 4 : Resultados	14
4.1 Movimiento superficial del suelo	14
4.2 Factores de Amplificación, Agravación y Reducción	19
4.3 Factores de Amplificación Espectral	23
4.4 Comparación de puntos de interés	26
Capítulo 5 : Discusión	28
5.1 Amplificación sísmica 2D	28
5.2 Comparación 1D y 2D.....	29
5.3 Amplificación sísmica no-lineal	30
Capítulo 6 : Conclusiones y recomendaciones	31
6.1 Conclusiones.....	31
6.2 Recomendaciones	32
Capítulo 7 Bibliografía.....	33

Lista de Tablas

Tabla 1 Parámetros dinámicos del suelo.....	5
Tabla 2 Parámetros en el Modelo Lineal Elástico.....	6
Tabla 3 Parámetros en el Modelo HSS.....	8

Lista de Figuras

Figura 1 Geología superficial de la Cuenca de Santiago propuesta por Leyton et al.(2010)....	4
Figura 2 Curva de degradación del módulo de corte G/G_0 en función de la deformación cortante (Kramer 2014).....	6
Figura 3 Parámetros de rigidez en un ensayo de corte cíclico (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022).	7
Figura 4 Influencia del índice de plasticidad (IP) en la reducción de la rigidez según Vucetic & Dobry (1991) (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022).	8
Figura 5 Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) obtenidos a partir de modelos constitutivos Lineal Elástico y HSS, comparado con perfil de Bustos (2021) para los suelos finos del norte	9
Figura 6 Sección transversal modelada en Plaxis 2D con puntos de monitoreo 1D y 2D	11
Figura 7 Pulso de Gabor adoptado como función fuente se muestra en (a), (b) indica la amplitud de Fourier de la función fuente.	12
Figura 8 Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$	14
Figura 9 Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 3 \times 10^{-4}$	15
Figura 10 Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 1D con modelo HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$	15
Figura 11 Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$	16
Figura 12 Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 3 \times 10^{-4}$	16
Figura 13 Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 1D con modelo HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$	17
Figura 14 Medidas de intensidad PGA, PGV, CAV y AI, obtenidas a partir de simulaciones 1D y 2D , considerando modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$ y pulsos de aceleración máxima en superficie de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g	18
Figura 15 Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 2D Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 1 \times 10^{-4}$	19
Figura 16 Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 2D Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7}= 3 \times 10^{-4}$	20

Figura 17 Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 1D y 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	20
Figura 18 Factores de agravación 2D sobre 1D para PGA, PGV, CAV y AI	21
Figura 19 Factores de reducción de intensidad por efectos no lineales para PGA, PGV, CAV y AI, considerando simulaciones 2D para HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	22
Figura 20 Factores de reducción de intensidad por efectos no lineales para PGA, PGV, CAV y AI, considerando simulaciones 2D para HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$	22
Figura 21 Espectros de aceleración (S_a) normalizados, considerando simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	23
Figura 22 Espectros de aceleración (S_a) normalizados, considerando simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$	23
Figura 23 Espectros de aceleración (S_a) normalizados, considerando simulaciones 1D para modelos HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	24
Figura 24 Razones espectrales de simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	24
Figura 25 Razones espectrales de simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$	25
Figura 26 Razones espectrales de simulaciones 1D para modelos HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	25
Figura 27 Comparación de aceleraciones en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	26
Figura 28 Comparación de velocidades en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	26
Figura 29 Comparación de espectros de aceleración (S_a) en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos Lineal Elástico y HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	27
Figura 30 Comparación de factor de amplificación espectral en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos Lineal Elástico y HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	27
Figura 31 PGA del sitio vs PGA en afloramiento rocoso, de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$	29

Capítulo 1: Introducción

Se han efectuado diversos estudios de la Cuenca de Santiago para determinar las variables geológicas y geotécnicas que influyen en la respuesta sísmica de los distintos tipos de suelo. Investigaciones basadas en razones espectrales H/V han identificado que en sedimentos rígidos, como las gravas de Santiago, no existe una gran amplificación de sitio, mientras que en sedimentos blandos, como depósitos aluviales no consolidados y pumicitas, es muy probable que se produzca una importante amplificación del movimiento del suelo, debido principalmente a los menores valores de velocidad de onda de corte y fuertes contrastes de velocidad en profundidad (Bonnefoy-Claudet et al., 2009).

Modelaciones numéricas han comprobado que los suelos finos del norte de la Cuenca presentan una mayor amplificación sísmica, producida por efectos 2D generados por las ondas superficiales en los bordes de la Cuenca con los afloramientos de roca (Pavéz, 2020 y Bustos, 2021). Trabajos anteriores han generado modelos de velocidad 3D de la Cuenca de Santiago (Cortés, 2018), caracterizando los suelos de la Cuenca como una sola unidad, principalmente como grava. Acevedo (2021) generó un modelo tridimensional de velocidades de onda de corte para la Cuenca de Santiago, donde evidenció que, en los suelos finos del norte, la medida de intensidad sísmica CAV o Velocidad Absoluta Acumulada, presentó los mayores valores de intensidad relativa. Cabe destacar que esta intensidad es relativa ya que las intensidades las normalizó por la estación sísmica R03M ubicada en la comuna de La Granja, por lo que dependen de este punto. Las componentes transversales del PGV son similares a las obtenidas con el CAV, pero las diferencias relativas entre los valores son menores.

Investigaciones de análisis no lineal de respuesta sísmica de sitio, como la Cuenca de Fuzhou, China (Chen et al., 2015) y la Cuenca de Grenoble, Francia (Bonilla et al., 2006), postularon que existe una fuerte amplificación y duración del movimiento del suelo, siendo más significativo en suelos blandos y más alto en el modelamiento 2D en comparación al 1D. Cortés (2018), concluyó en su estudio de la Cuenca de Santiago que no existen grandes influencias del comportamiento del suelo no lineal, lo que se debe a que modeló solamente con grava, siendo un suelo rígido y competente.

Con respecto a lo descrito en los párrafos anteriores, surge la necesidad de estudiar más en detalle los suelos finos del norte de la Cuenca considerando efectos no lineales, a modo de analizar de una manera más profunda la simulación de la respuesta sísmica de los suelos blandos, comparando el comportamiento 1D y 2D.

1.1 Hipótesis

El uso de modelos constitutivos no lineales de suelo permite determinar de manera más precisa la amplitud y duración de la respuesta sísmica de los suelos finos del norte de la Cuenca de Santiago.

1.2 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es evaluar el efecto del uso de modelos constitutivos lineal y no-lineal en la simulación de la respuesta sísmica de una sección transversal de suelos finos del norte de la Cuenca de Santiago, considerando simulaciones unidimensionales y bidimensionales.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta tesis son:

1. Comparar la amplificación sísmica 2D de una sección transversal en suelos finos del norte evaluada numéricamente con un modelo constitutivo lineal elástico y uno no-lineal.
2. Comparar la amplificación sísmica no-lineal 1D y 2D de la sección transversal.
3. Evaluar la amplificación sísmica no-lineal 2D de la sección transversal, considerando dos niveles distintos de no-linealidad a través del parámetro de deformación angular por corte ($\gamma_{0.7}$) del modelo HSS.

1.4 Estructura del trabajo

La presente Tesis se compone de 7 capítulos, comenzando por la introducción, objetivos generales y específicos, presentados en el primer capítulo. El capítulo 2 corresponde a la revisión del estado del arte, donde se reseña las investigaciones previas que se estudiaron para desarrollar el presente trabajo. En el capítulo 3, se describe la modelación de la sección transversal estudiada. Además, se señalan los perfiles 1D creados, los cuales se utilizan para la comparación con el modelo 2D. El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos de las respuestas de los modelos 1D y 2D. En el capítulo 5, se discuten dichos resultados. En el capítulo 6, se indican las principales conclusiones y recomendaciones de la investigación. Por último, en el capítulo 7, se señala la bibliografía utilizada para este trabajo.

Capítulo 2: Revisión del Estado del Arte

La Cuenca de Santiago está ubicada en Chile Central (latitud 33.5°S, longitud 70.7°W) y corresponde a la mayor parte de la depresión intermedia en la Región Metropolitana de Santiago, Chile. Ésta da inicio al valle central chileno, con una extensión de 90 km en su eje Norte-Sur y un ancho promedio de 40 km (Pastén, 2007). Se encuentra rellena de sedimentos de origen glacial, eólico, fluvial, gravitacional y volcánico (Pastén et al., 2016). Recurrentemente se ve afectada por terremotos generados por la subducción de la placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana a una velocidad aproximada de 6,6 cm/año (Vigny et al., 2009).

La primera carta de los tipos de suelo de la Cuenca de Santiago fue elaborada por Valenzuela (1978), quién distinguió 4 principales unidades geológicas: Finos del Noroeste, Pumicitas de Pudahuel, Conos de Deyección en el frente cordillerano y Gravas de los ríos Mapocho y Maipo. La geología superficial fue modificada por Leyton et al. (2011) (Figura 1) quienes proponen que la Unidad I corresponde a rocas, que afloran en los cordones montañosos que rodean la Cuenca de Santiago, y que la Unidad II corresponde a grava, constituida principalmente por materiales gruesos con predominio de gravas arenosas de compacidad media a alta. Esta Unidad es la central y principal de la Cuenca, constituida por depósitos subactuales de los ríos Maipo, Mapocho y Clarillo, siendo un tipo de suelo rígido, resistente y competente. Hacia el este de la Cuenca, existen depósitos de abanicos aluviales (Unidades IIIa, IIIb y Va). Se encuentran constituidos por grava y matriz areno arcillosa, con intercalaciones de arena, limo y arcilla, siendo moderadamente rígidos. Hacia el oeste de la Cuenca, hay sedimentos constituidos por espesores mayores a 20 metros de ceniza volcánica con fragmentos líticos y pómez, asignada a la unidad denominada Ignimbrita Pudahuel, con intercalaciones de arenas, limos y gravas (Unidad VI). Esta unidad se fusiona con los depósitos de limo y arcilla, con intercalaciones de grava, arena y ceniza, ubicados en la zona norte de la Cuenca (Unidad VII). Estas dos unidades corresponden a suelos blandos, los cuales tienen un fuerte contraste de impedancia con respecto al basamento rocoso, siendo suelos poco competentes.

Pavéz (2020) elaboró tres perfiles que cruzan la Cuenca de Santiago, los cuales fueron actualizados por Bustos (2021), quién evidenció que en los suelos rígidos de la Cuenca de Santiago no existen diferencias significativas en la amplificación 1D y 2D. Esta similitud puede estar asociada con el bajo contraste de impedancia entre el suelo y el basamento rocoso. Por otra parte, propone que en los suelos finos los efectos 2D se manifiestan como una mayor duración del movimiento fuerte en comparación al modelamiento 1D. Esto se debe a los efectos generados por ondas superficiales en los límites de la Cuenca, junto a los eventos de reflexión y refracción de las ondas de cuerpo.

Bonilla et al. (2006) estudiaron la respuesta de sitio lineal y no lineal con modelos 1D y 2D en el área de Grenoble, Francia, y concluyeron que el fuerte contraste de impedancia entre el suelo y el basamento rocoso produce una fuerte amplificación sísmica, independiente de la geometría de la Cuenca. Este contraste de velocidad ayuda al desarrollo de ondas superficiales en los bordes de la Cuenca. Como consecuencia, genera que la amplificación del caso 2D sea mayor al resultado 1D. Por otro lado, los efectos no lineales son responsables de una fuerte deamplificación del movimiento del suelo, que ayuda a controlar el movimiento de la Cuenca de una manera más coherente que su contraparte lineal. Los resultados no lineales indican que existe una evidente deamplificación entre 1 y 5 Hz con respecto a los lineales, lo que sugiere que la combinación de la geometría 2D y 3D con el comportamiento no lineal del suelo, produce una respuesta compleja de la Cuenca, lo que no se puede predecir con la geometría 1D.

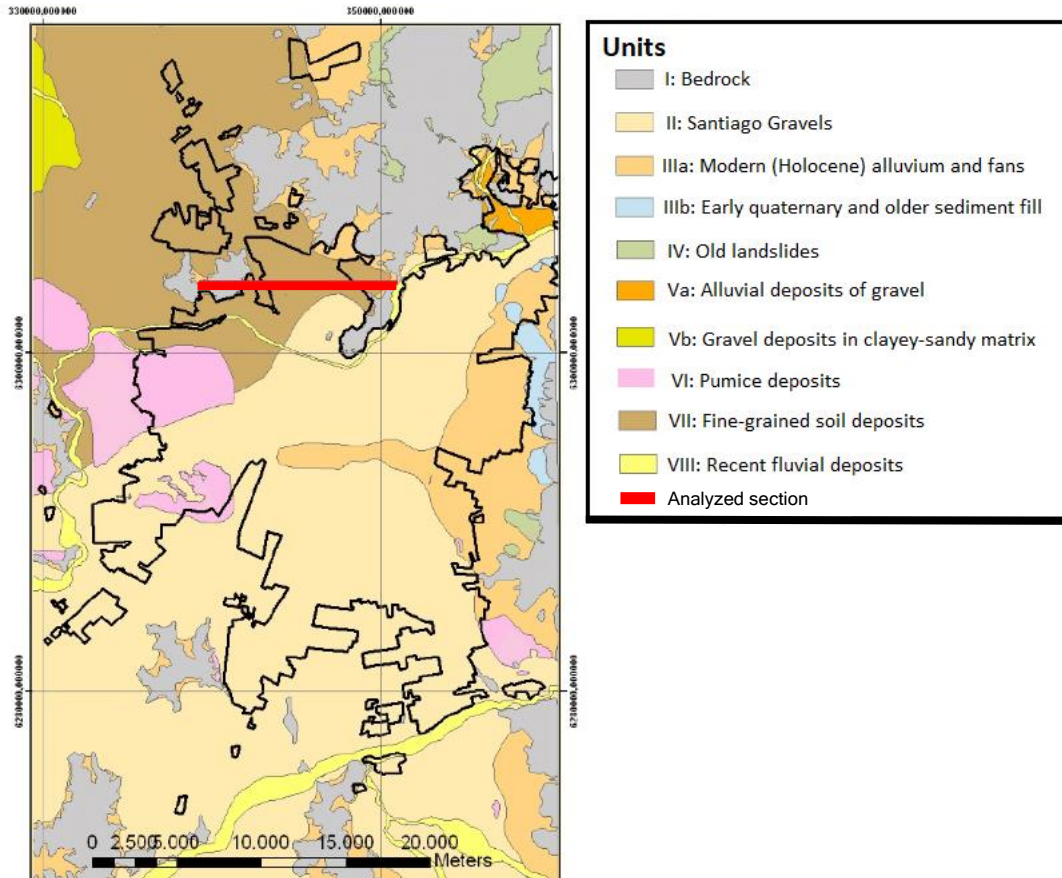


Figura 1: Geología superficial de la Cuenca de Santiago propuesta por Leyton et al.(2011).

Continuando con estudios no lineales, Chen et al. (2015), investigaron la respuesta sísmica no lineal en la Cuenca de Fuzhou, China. Para ello, realizaron un modelo no lineal de elementos finitos a gran escala en 2D, utilizando el software ABAQUS. También efectuaron un análisis de propagación de ondas lineales 1D para suplementación y calibración. Los resultados 2D indicaron una mayor amplificación del movimiento fuerte y los componentes de movimiento del suelo de período moderado y largo fueron claramente amplificados, pero menos pronunciado que el 1D.

Asimismo, lo mencionado en el párrafo anterior ocurre en Ciudad de México, donde Bard et al. (1988) señalaron que existen suelos blandos con características dinámicas no lineales peculiares, donde los suelos de período largo pueden amplificarse drásticamente y prolongar la duración de fuertes movimientos en las capas de suelo blando. Esto también acontece en la Cuenca de Santiago, donde Bustos et al. (2023) postulan que las simulaciones 2D, a diferencia de la 1D, predicen una prolongación de la duración del movimiento del suelo, que se convierte más pronunciado en depósitos profundos.

Capítulo 3: Simulaciones Numéricas

3.1 Sección transversal geológica

En el presente trabajo, se estudia una sección transversal de la Cuenca de Santiago, en la dirección Este – Oeste, ubicada entre los cerros Renca y San Cristóbal (Figura 1) y que atraviesa los suelos finos del Norte (Unidad VII). Este perfil fue generado por Bustos (2021) en base a información de las secciones transversales geológicas 2D propuestas por Gálvez (2012).

3.2 Propiedades dinámicas

Para estimar la velocidad de onda de corte de los suelos, se utilizó como referencia los perfiles propuestos por Bustos (2021), quién ajustó modelos de velocidad para la grava de Santiago y los suelos finos del norte, basándose en mediciones de ruido sísmico ambiental de Pastén (2007), complementadas con mediciones en áreas con poca información. Bustos (2021) midió en total 24 sitios, concentrados principalmente en la parte noreste de la Cuenca. Para modelar la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad, se utiliza la Ecuación 1 propuesta por Pilz et al. (2011), donde V_{s0} corresponde a la velocidad de onda de corte en la superficie y dV_s es la razón de aumento de V_s en profundidad.

$$V_s = V_{s0} + dV_s \cdot \sqrt{\frac{z}{1m}} \quad (1)$$

Los parámetros propuestos por Bustos (2021) utilizados en la Ecuación (1) son los que mejor se ajustan a los perfiles de velocidad que se midieron en la Cuenca y se muestran en la Tabla 1. Las densidades de los materiales se seleccionaron en base a los valores de referencia reportados por Bonnefoy-Claudet et al. (2009).

Tabla 1: Propiedades dinámicas del suelo

Tipo de suelo	V_{s0} (m/s)	dV_s (m/s)	ρ (kg/m ³)
Arcilla limosa	200	30	1600

En el presente trabajo se modela un solo tipo de suelo, además del basamento rocoso. Este material corresponde a la Arcilla Limosa, el cual es un tipo de suelo fino, mostrado en la Tabla 1. Una vez calculadas las velocidades de onda de corte con la Ecuación 1, se calculó el módulo de corte (G) y el módulo elástico (E), con las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente. Cada uno de los 3 parámetros mencionados se obtienen cada un metro de profundidad, desde la superficie hasta la profundidad máxima de la sección transversal a modelar, que corresponde a 245 metros. El módulo de Poisson utilizado es 0.27, según lo adoptado por Acevedo (2021) en el perfil de los suelos finos.

$$G = V_s^2 \cdot \rho \quad (2)$$

$$E = 2G \cdot (1 + \nu) \quad (3)$$

A partir del módulo elástico obtenido, se cuantificó el incremento de este parámetro en profundidad. El modelo lineal elástico se separó en 3 capas: la primera desde la superficie hasta los 20 metros, la segunda a partir de los 20 metros hasta los 75 metros y la tercera desde los 75 a 245 metros. A cada una de las capas se le asignó un aumento del módulo elástico por metro lineal para ajustar la curva de Vs de Bustos (2021). Para precisar dichas curvas, se definieron estas 3 capas a modo de tener un aumento de rigidez constante por metro más considerable dentro de los primeros 20 metros, luego un incremento menor hasta los 75 metros y en la tercera capa el aumento más bajo hasta la roca. Los parámetros adoptados en cada capa se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros utilizados en el modelo lineal elástico.

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Peso específico, γ_{unsat} (kN/m ³)	16	16	16
Módulo de Poisson, ν (-)	0.27	0.27	0.27
Módulo de Elasticidad, E (MPa)	165.708	410.864	872.018
Incremento de Módulo de Elasticidad, E_{inc} (MPa/m)	12.258	8.385	6.233
Profundidad referencial, y_{ref} (m)	0	20	75

Se ha observado que el rango de deformaciones en las cuales el suelo se puede asumir completamente elástico es muy acotado, exhibiendo un comportamiento altamente no lineal en términos de reducción de rigidez y aumento de amortiguamiento histerético con el aumento de la deformación angular por corte γ_s . El modelo constitutivo Hardening Soil Small (HSS) permite capturar el comportamiento no lineal del suelo, al reducir la rigidez con el aumento de la deformación por corte. Al plotear la rigidez del suelo con respecto a la deformación en escala logarítmica, se producen curvas características de reducción de rigidez en forma de S (Figura 2) (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022). Este modelo incorpora el módulo de corte (G) para pequeñas deformaciones y una curva de degradación de rigidez en función de la deformación angular, permitiendo estimar con precisión el rango de pequeñas deformaciones.

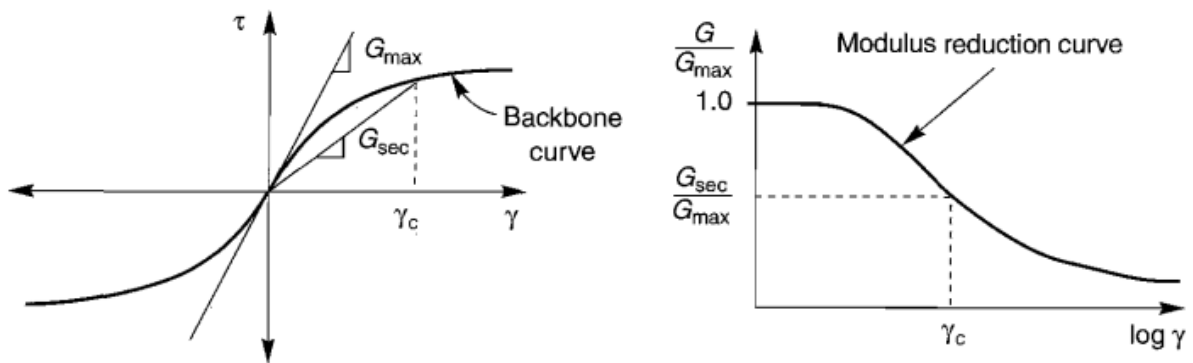


Figura 2: Curva de degradación del módulo de corte G/G_0 en función de la deformación cortante (Kramer 2014).

Este modelo considera como parámetros la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (ϕ), el ángulo de dilatación (ψ), el módulo de deformación edométrico (E_{oed}^{ref}), el módulo de deformación triaxial (E_{50}^{ref}), la presión de confinamiento de referencia (p^{ref}) y la razón de resistencia (R_f). Para el suelo analizado, se emplearon los valores de los parámetros propuestos por Araneda (2020), quien calibró los parámetros en suelos finos a partir de un análisis inverso de resultados de ensayos de placa de carga horizontal cíclica, utilizando el software Plaxis 3D. Dicha calibración se basó en los valores medios estimados por Poblete (2004) y Petrus Ingenieros (2011) para una caracterización general del suelo.

El módulo de deformación de carga y descarga (E_{ur}^{ref}), se obtuvo a partir de la relación propuesta por Obrzud y Truty (2018), que establece que el módulo de deformación de carga y descarga es entre 2 y 6 veces mayor al módulo de deformación triaxial. El valor del módulo de Poisson para pequeñas deformaciones (ν) es el mismo considerado en el modelo constitutivo Lineal Elástico. El parámetro de potencia (m) es seleccionado entre 0.7 a 1.0, de acuerdo a Benz (2007) para arcillas. Además, Obrzud y Truty (2018) sugieren que el rango del parámetro 'm' observado para el módulo edométrico varía entre 0.6 y 1.0 en suelos finos. En cuanto al módulo de corte secante referencial (G_0^{ref}), se utilizaron los valores planteados por Araneda (2020), los cuales varían entre 120 [MPa] a 160 [MPa]. El coeficiente de empuje en reposo (K_0^{NC}), se calculó según la siguiente ecuación propuesta por Jaky (1944b):

$$K_0^{NC} = 1 - \sin(\phi) \quad (4)$$

La Figura 3 ilustra una curva tensión deformación del modelo HSS y los parámetros de rigidez para una condición de carga de corte cíclico drenado a carga controlada.

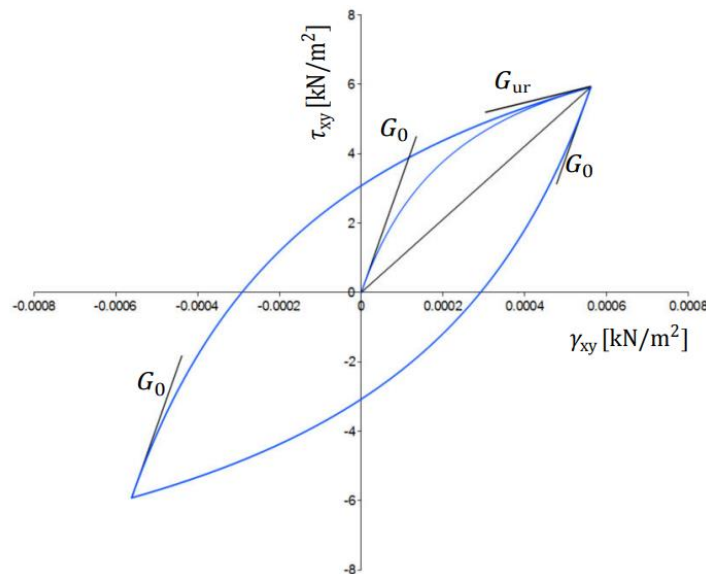


Figura 3: Parámetros de rigidez en un ensayo de corte cíclico (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022).

Dos parámetros describen la variación de la rigidez con la deformación. Uno de ellos es el módulo de corte inicial o de deformación a pequeñas deformaciones (G_0). El otro es el parámetro de deformación angular por corte ($\gamma_{0.7}$), que define la deformación por corte a la cual el módulo de corte secante (G_s) se reduce al 70% de G_0 . Este valor se obtiene a partir del ajuste de la curva de degradación de rigidez teórica del modelo HSS y las curvas de degradación propuestas por Vucetic y Dobry (1991) como función del índice de plasticidad (IP), señaladas en la Figura 4. Para el suelo fino del norte de este trabajo, se seleccionaron dos valores que permiten sensibilizar la magnitud del efecto no lineal en los modelos: $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$, correspondiente a un índice de plasticidad de 0 y $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$, lo que equivale a un IP de 30. Estos valores se asumen para comparar la respuesta de un caso con mayor reducción de rigidez ($\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$) y otro caso con un comportamiento de menor degradación de rigidez ($\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$), por ende, más similar al caso lineal elástico.

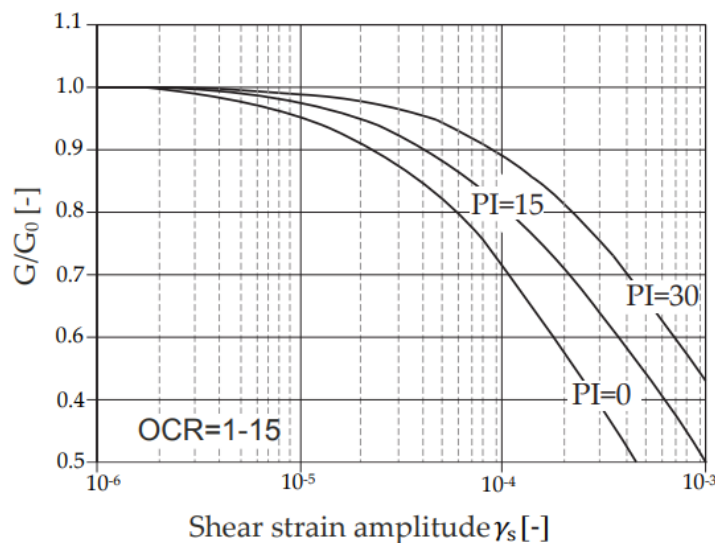


Figura 4: Influencia del índice de plasticidad (IP) en la reducción de la rigidez según Vucetic & Dobry (1991) (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022).

Los parámetros adoptados para el modelo constitutivo HSS se indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros utilizados en el modelo HSS.

Parámetro	Valor
Peso específico, γ_{unsat} (kN/m ³)	16
Cohesión, c (kPa)	30
Ángulo de fricción interno, ϕ (°)	28
Ángulo de dilatancia, Ψ (°)	0
Módulo de deformación triaxial, E_{50}^{ref} (MPa)	20
Módulo de deformación edométrico, E_{oed}^{ref} (MPa)	20
Módulo de deformación de carga y descarga, E_{ur}^{ref} (MPa)	120
m (-)	0.7
Módulo de Poisson en carga y descarga, ν (-)	0.27
Presión de referencia, p^{ref} (kPa)	100
Coefficiente de empuje en reposo, K_0^{NC} (-)	0.53
Razón de resistencia, R_f (-)	0.9
Módulo de corte secante referencial, G_0^{ref} (MPa)	120
Deformación angular por corte, $\gamma_{0.7}$ (-)	1×10^{-4}

Para establecer el perfil de velocidades de onda de corte del modelo HSS, se calcula el módulo de corte máximo (G_0) desde la superficie hasta la profundidad máxima del suelo en la sección transversal (245 metros). El módulo de corte máximo es función del nivel de confinamiento de acuerdo con la Ecuación 5 (Plaxis 2D Materials Manuals, 2022).

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma'_3 \cdot \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) + p_{ref} \cdot \sin(\phi)} \right)^m \quad (5)$$

El esfuerzo horizontal efectivo (σ'_3) de la Ecuación (5) se obtiene a partir de la relación con el esfuerzo vertical efectivo (σ'_1) y el coeficiente de empuje en reposo (K_0^{NC}) (Benz, 2007), conforme a las Ecuaciones (6) y (7):

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot K_0^{NC} \quad (6)$$

$$\sigma'_1 = z \cdot \gamma \quad (7)$$

Donde 'z' es la profundidad y 'γ' es el peso específico del material. Una vez obtenido el valor del módulo de corte máximo (G_0) para cada metro de profundidad, se calcula el valor de la velocidad de onda de corte V_s utilizando la Ecuación (2). El perfil de velocidad de Bustos (2021) y los perfiles estimados a partir de los modelos constitutivos Lineal Elástico y HSS se muestran en la Figura 5.

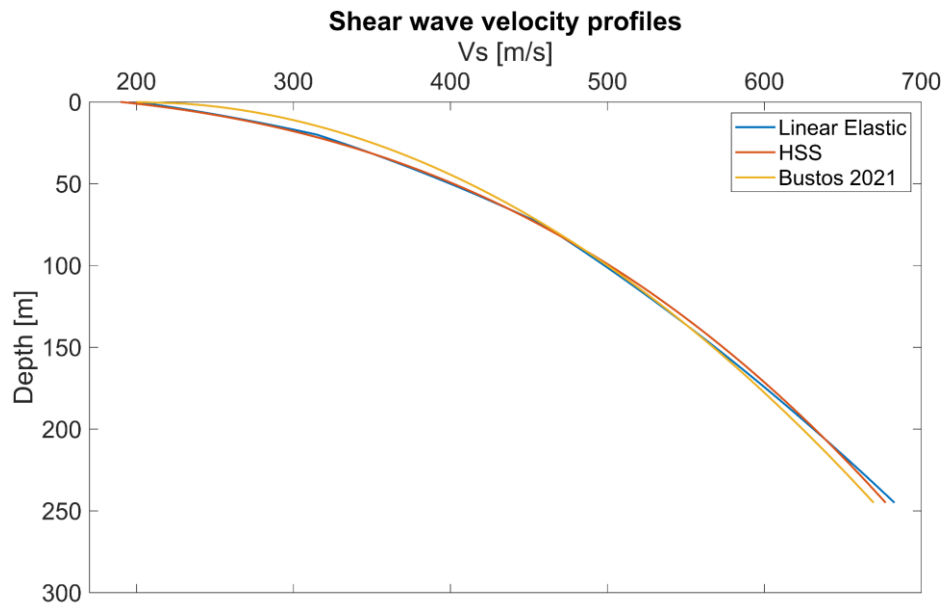


Figura 5: Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) obtenidos a partir de modelos constitutivos Lineal Elástico y HSS, comparado con perfil de Bustos (2021) para los suelos finos del norte.

El basamento rocoso se asume lineal-elástico con un V_s de 1.900 m/s, peso específico de 26 kN/m³, módulo de Poisson de 0.3 y módulo de elasticidad de 24.870 MPa, de acuerdo con los valores adoptados por Acevedo (2020).

Para el amortiguamiento, se utilizaron los factores de atenuación para ondas P y S, las cuales fueron estimadas según las Ecuaciones (8) y (9) (Makra et al., 2016).

$$Q_s = \frac{V_s}{10} \quad (8)$$

$$Q_p = 2 \cdot Q_s \quad (9)$$

Las relaciones anteriores fueron adoptadas por Bustos (2021), donde la velocidad de onda de corte fue ajustada de acuerdo con la Ecuación (1). Con ello, se obtuvo un amortiguamiento del tipo viscoso, inversamente proporcional al V_s , dado por la Ecuación (10) (Ortiz, 2022).

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot Q_s} \quad (10)$$

A partir de la Ecuación (10), se obtuvieron amortiguamientos desde 0.8% a 2.5%, según la profundidad del perfil de suelo (Ecuación (1)). Para el basamento rocoso, Bustos (2021) adoptó un amortiguamiento de un 0.26% para profundidades menores a 500 metros.

Se relacionó el amortiguamiento del tipo viscoso señalado en la Ecuación (10) con el amortiguamiento de Rayleigh, dado por las Ecuaciones (11) y (12) (Romero et al., 2012).

$$\alpha = \xi \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad (11)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{w_i + w_j} \quad (12)$$

Los modos i y j se eligen de forma que proporcionen coeficientes de amortiguamiento aceptables para todos los modos que contribuyen significativamente a la respuesta del sistema. En las ecuaciones anteriores se supone que ambos modos tienen el mismo coeficiente de amortiguamiento ξ .

En el presente trabajo, se utilizó una sola capa de suelo con un amortiguamiento mínimo de un 1% para todo el estrato. Se usan valores de frecuencia de 0.5 a 4 Hz, cubriendo más del 95% de la energía total de las fuentes sísmicas correspondientes a cada modelo. Se utilizó un amortiguamiento ξ de 2.2% para ambos modos, lo que corresponde a un amortiguamiento de Rayleigh con parámetros $\alpha=0.1181$ y $\beta=7.680 \times 10^{-4}$, los que se obtuvieron con las Ecuaciones (11) y (12), respectivamente. Para el basamento rocoso, se consideró un amortiguamiento mínimo de un 0.26%, con un amortiguamiento ξ de 0.52% para ambos modos, equivalente a un amortiguamiento de Rayleigh con parámetros $\alpha=0.02912$ y $\beta=2.324 \times 10^{-4}$. Cabe mencionar que los amortiguamientos utilizados son los mismos en ambos modelos constitutivos. Por otra parte, los suelos fueron modelados como drenados en ambos casos.

3.3 Modelo Numérico

Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo con el software Plaxis 2D, que es un programa de elementos finitos bidimensional, diseñado específicamente para análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. La sección transversal modelada, que se indica en la Figura 1, se encuentra entre los cerros Renca y San Cristóbal, específicamente entre las comunas de Quilicura y Huechuraba. La sección tiene una longitud de 8.4 kilómetros de suelo y 1.5 kilómetros de basamento rocoso desde los bordes del perfil. La profundidad máxima del perfil de suelo es de 245 metros y de la roca 500 metros, como se indica en la Figura 6.

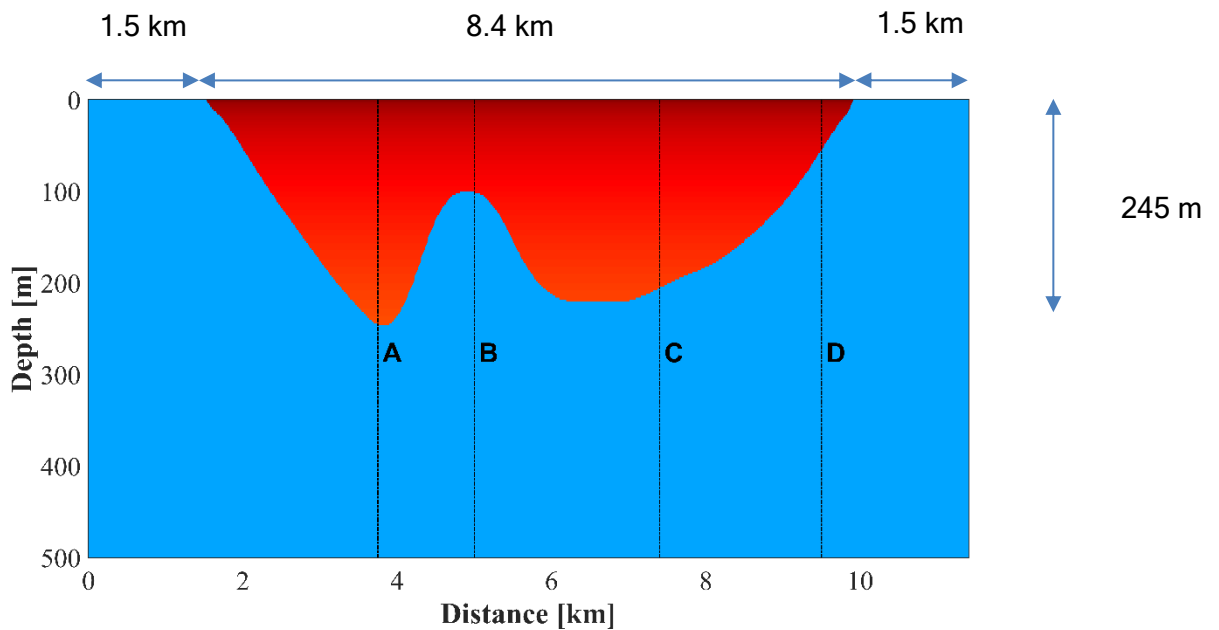


Figura 6: Sección transversal modelada en Plaxis 2D con puntos de monitoreo 1D y 2D.

La geometría del modelo se ingresa al programa mediante un archivo de texto con las coordenadas de la sección a analizar. Esta geometría debe ser discretizada en elementos finitos. La malla de elementos finitos requiere ser lo suficientemente fina para obtener resultados numéricos precisos y debe tener una buena calidad, es decir, los elementos deben ser regulares sin ser excesivamente largos y delgados. Esto se requiere especialmente en aquellas áreas donde se esperan cambios significativos de tensión y deformación durante el análisis. Para el análisis 2D, el modelo se discretiza en 35.147 elementos y 284.386 nodos, con una dimensión promedio aproximada de 6 metros. En el caso 1D, la malla tiene 6.818 elementos y 56328 nodos, con una dimensión promedio de 4 metros aproximadamente. La distensión de los elementos del caso 2D, permite una precisión sobre los 4 Hz, mientras que en el caso 1D es sobre los 6 Hz, considerando que la longitud de onda mínima debería ser al menos 8 espacios de la grilla.

En cuanto a las fases de construcción, se comienza por la Fase Inicial, donde las tensiones se inicializan a partir del peso propio del suelo, al aplicar la gravedad (Plastic Calculation). En la segunda fase, se realiza el cálculo dinámico. La carga dinámica se introduce al modelo como una carga sísmica, mediante multiplicador de desplazamiento.

Las condiciones de borde en el modelo permiten representar el comportamiento de campo lejano del medio, para evitar reflexiones de las ondas dentro del suelo. La condición de borde lateral (x_{min} y x_{max}) utilizada en ambos límites verticales del modelo es 'Free - Field', la cual simula la propagación de ondas en el campo lejano con una reflexión mínima en el borde, con la utilización de elementos amortiguadores. El movimiento de campo libre se transfiere al dominio principal mediante la aplicación de fuerzas normales y de corte. Para la absorción de las ondas reflejadas, se requiere la creación de interfaces a lo largo del borde vertical del modelo. Esta opción se prefiere para el análisis de terremotos, donde la entrada de carga dinámica es aplicada a lo largo del límite inferior del modelo.

Acerca de la condición de borde en la base del modelo (y_{\min}), corresponde a ‘Compliant base’, la cual simula la continuación de las ondas en el suelo profundo con un mínimo de reflexión. Esta opción es formada por una combinación de una línea de desplazamiento prescrito y un borde viscoso. La señal de entrada se transfiere al dominio principal a través de la aplicación de fuerzas normales y de corte. El borde viscoso consiste en puntos de amortiguamiento, en la dirección normal y de corte, en cada nodo de la base, para absorber ondas de compresión y de corte que se propagan hacia abajo. Solamente las ondas que se propagan hacia arriba deben ser consideradas en la señal aplicada en esta condición de bode.

‘Compliant base’ puede ser utilizada para el análisis de respuesta de sitio, donde el borde inferior del modelo se encuentra dentro de un basamento rocoso con una alta velocidad de onda de corte, lo que ocurre para el presente modelo dinámico. Se requiere la presencia de elementos de interfaz a lo largo del borde inferior (Plaxis 2D Reference Manuals, 2022).

La función fuente adoptada en este trabajo es el pulso de Gabor polarizado en la componente vertical y longitudinal al plano (Ecuación (13), Figura 7) utilizada por Bustos et al (2023). Se define a partir de los siguientes parámetros: $f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.18 \text{ Hz}$, $\gamma = 0.2$, $\theta = 0.0$ y $ts = 0.45 \cdot \frac{\gamma}{f}$. La amplitud del pulso decae alrededor de 5 Hz, siendo consistente con la resolución de otros modelos numéricos (Chávez-García 2003; Kristek et al. 2018). Dicho pulso se modula en amplitud para generar distintas aceleraciones máximas en un afloramiento en roca del modelo (0.01g, 0.05g y 0.1g), donde la Ecuación (13) se pondera por 3 distintos factores. De este modo, se tienen 3 fuentes sísmicas cuando se considera el modelo HSS. El modelo Lineal Elástico sólo se somete al pulso que genera un PGA de 0.05g en superficie, ya que, al ponderar este mismo pulso, se pueden obtener las otras 2 amplitudes, al ser de carácter lineal. Para asegurar la estabilidad numérica de las simulaciones, para cada *input* se define un paso de tiempo de $\Delta t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. Cada pulso se simula hasta los 15 segundos, teniendo un total de 3 mil muestras por cada uno.

$$s(t) = e^{-\left[\frac{\omega_p(t-t_s)}{\gamma}\right]^2} \cdot \cos [\omega_p(t-t_s) + \theta] \quad (13)$$

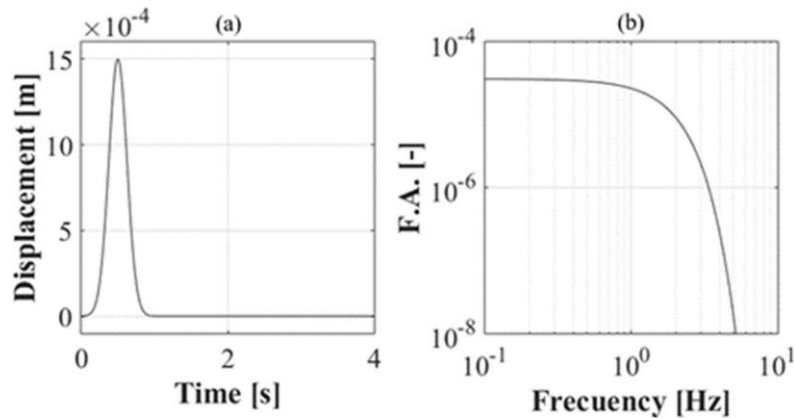


Figura 7: Pulso de Gabor adoptado como función fuente se muestra en (a), (b) indica la amplitud de Fourier de la función fuente.

Para poder extraer información de los modelos realizados y analizarlos, se ubican 115 receptores en superficie para el modelamiento 2D, separados cada 100 metros cada uno. Esto se genera en los 11.4 kilómetros de longitud del modelo, donde 8.4 kilómetros corresponden al suelo y 3 kilómetros al basamento rocoso (ver Figura 6).

En el caso de la simulación unidimensional, se procesa solamente el modelo constitutivo HSS con una deformación angular por corte $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$, con los mismos parámetros utilizados en el caso 2D, mostrados en la Tabla 3. Se lleva a cabo para los 3 niveles de amplitud en superficie de roca (0.01 g, 0.05 g y 0.1 g).

Para el análisis unidimensional, en algunos casos se utilizó en más de una ocasión un mismo perfil 1D. Estos fueron los que tenían una misma profundidad total del suelo en una distinta longitud, a lo largo de la sección transversal 2D estudiada (Figura 6). Debido a lo anterior, se sitúan un total de 42 receptores en superficie, los cuales se encuentran distanciados cada 300 metros aproximadamente.

Los tiempos de ejecución de los modelos HSS 2D fueron de aproximadamente 4 horas y para el lineal elástico 2 horas, mientras que los modelos 1D requirieron 1 hora para su análisis.

Particularmente, se analizaron 4 puntos de interés tanto en 2D como en 1D. El punto A se ubica donde se alcanza la mayor profundidad del suelo estudiado (245 metros) con una distancia de 2.2 kilómetros del borde oeste. El sitio B se encuentra al centro de las zonas más profundas de la sección, hacia el lado oeste y este, siendo la zona más cercana a la superficie (100 metros), a una distancia de 3.5 kilómetros del borde oeste de la sección. El punto C se localiza a una distancia de 5.9 kilómetros del borde oeste, cercano a la zona más profunda de la sección del lado este (205 metros). Por último, el sitio D se emplaza a 8 kilómetros del borde oeste, próximo al término del perfil por la parte este, con el motivo de analizar el efecto que generan las ondas superficiales en el borde de la sección. Tiene una profundidad total de 50 metros.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Movimiento superficial del suelo

En la Figura 8 y Figura 9 se muestran las aceleraciones obtenidas en cada receptor en superficie de los modelos 2D, normalizadas por el PGA (Peak Ground Acceleration) del receptor ubicado en afloramiento rocoso a 500 metros del borde oeste, señalado con un símbolo de estrella. Se consideró un modelo HSS con deformación angular por corte $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$ y 3×10^{-4} , respectivamente, y tres niveles de solicitación en afloramiento en roca (0.01 g, 0.05 g y 0.1 g). En cada figura se indica además la respuesta obtenida para el modelo Lineal Elástico con una aceleración máxima en superficie de roca de 0.05g.

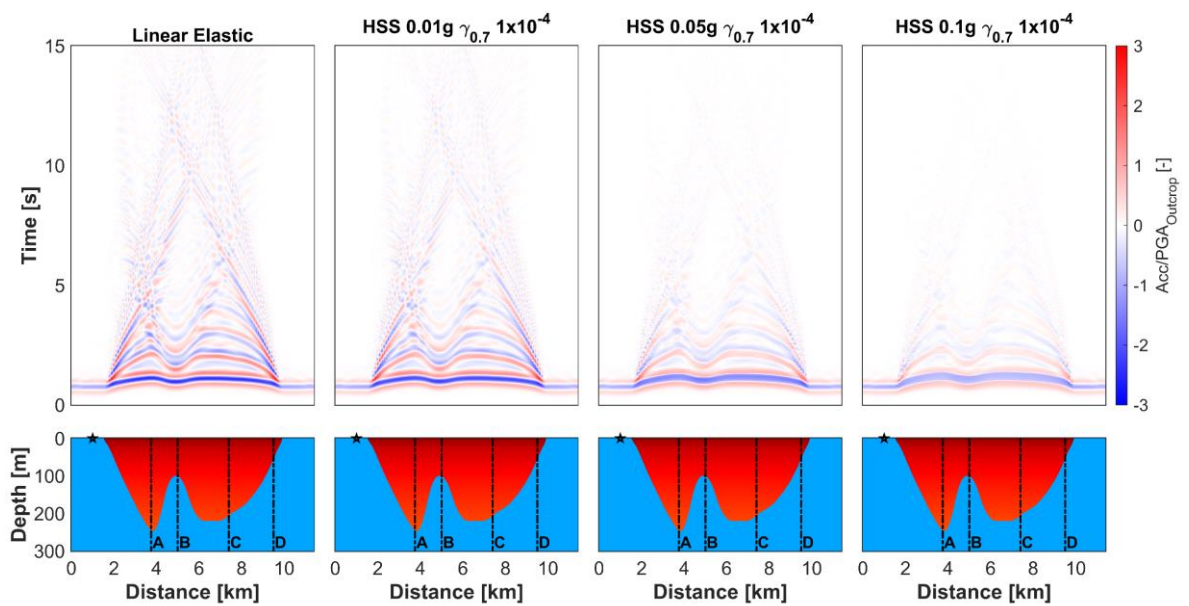


Figura 8: Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

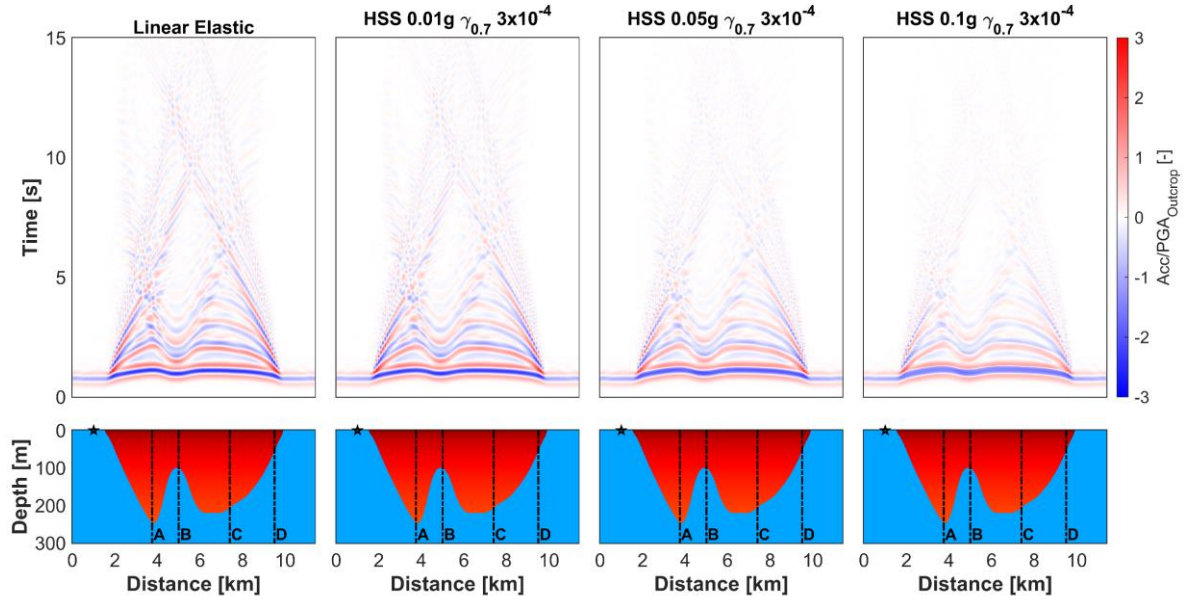


Figura 9: Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \cdot 10^{-4}$.

En la Figura 10, se muestran las aceleraciones superficiales obtenidas con el modelamiento 1D, normalizadas con respecto al PGA del mismo receptor ubicado en afloramiento rocoso descrito en el caso 2D. Se consideró el modelo HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$ para los 3 niveles de amplitud en superficie de roca (0.01 g, 0.05 g y 0.1 g).

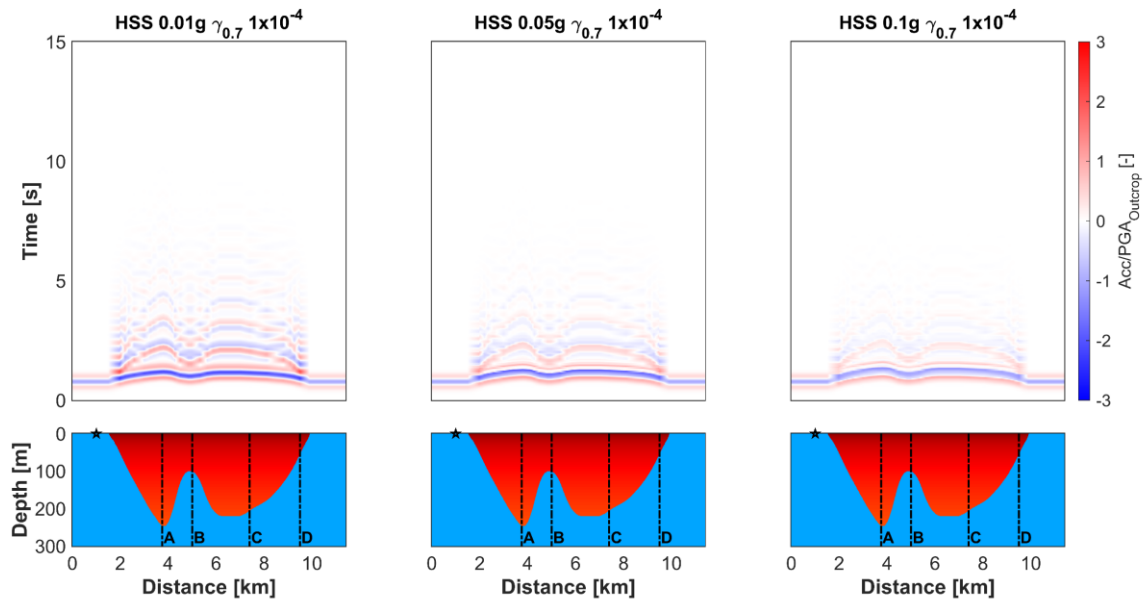


Figura 10: Aceleraciones normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 1D con modelo HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

En la Figura 11 y Figura 12 se señala la velocidad en superficie de los modelos 2D, las cuales son normalizadas con respecto al PGV (Peak Ground Velocity) del receptor ubicado en afloramiento rocoso, a 500 metros del borde oeste, señalado con un símbolo de estrella. Se genera el mismo procedimiento detallado para la aceleración.

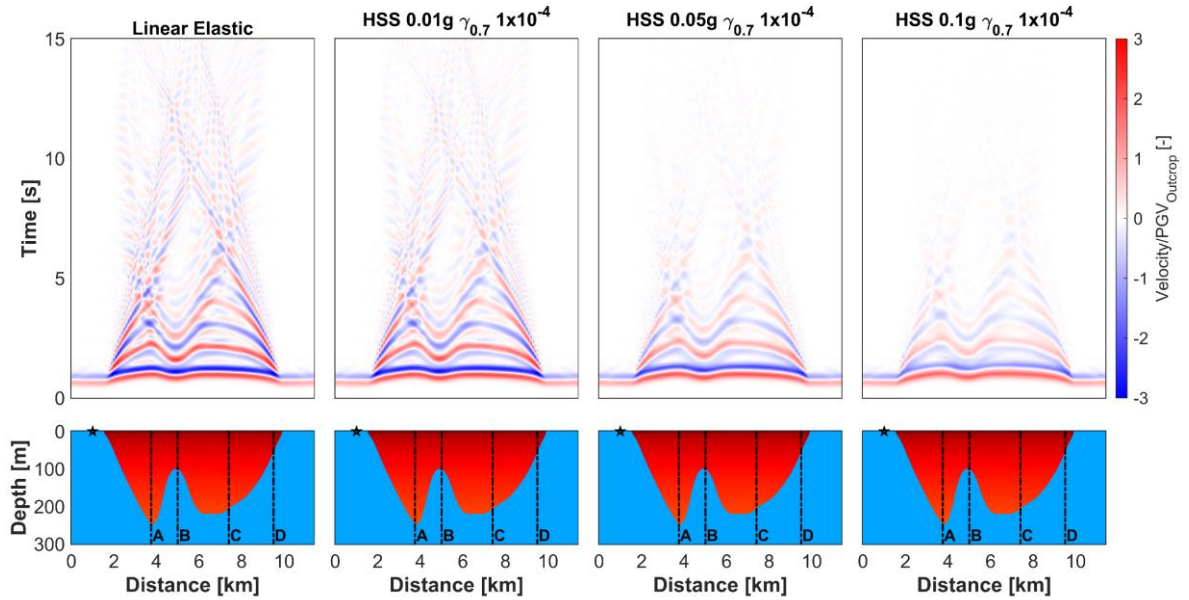


Figura 11: Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

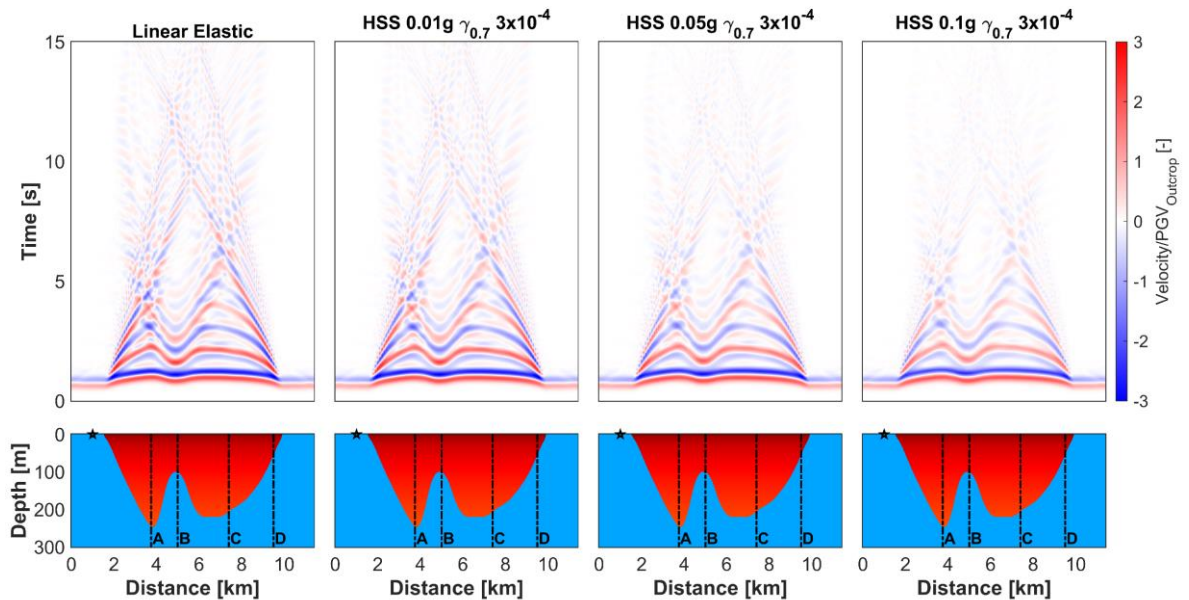


Figura 12: Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \cdot 10^{-4}$.

En la Figura 13, se indica la velocidad obtenida con el modelamiento 1D, donde se hace el mismo procedimiento descrito para el caso 2D. Se realiza para $\gamma_{0.7}$ de 1×10^{-4} , para los 3 pulsos en el modelo HSS.

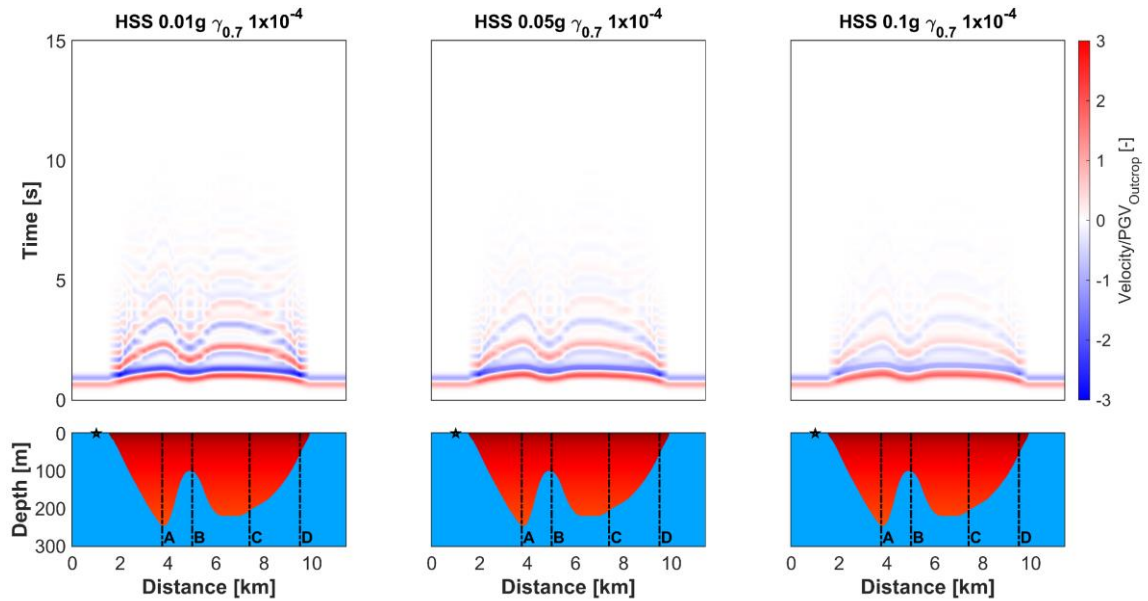


Figura 13: Velocidades normalizadas en la superficie de la sección transversal para simulaciones 1D con modelos HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

La Figura 14 resume las medidas de intensidad (IM, por sus siglas en inglés), PGA, PGV, Velocidad Absoluta Acumulada (EPRI, 1991) (CAV, por sus siglas en inglés) e Intensidad de Arias (1970) (AI, por sus siglas en inglés) como función de la distancia del borde de la sección transversal. Las IM se muestran para los 3 pulsos en estudio, considerando las simulaciones 1D y 2D con el modelo HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$, y para el pulso de 0.05g en el caso Lineal Elástico 2D.

Las definiciones de las mencionadas medidas de intensidad se muestran en las Ecuaciones (14) y (15):

$$CAV = \int_{t_0}^{t_0+D} |a(t)| dt \quad (14)$$

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_{t_0}^{t_0+D} a(t)^2 dt \quad (15)$$

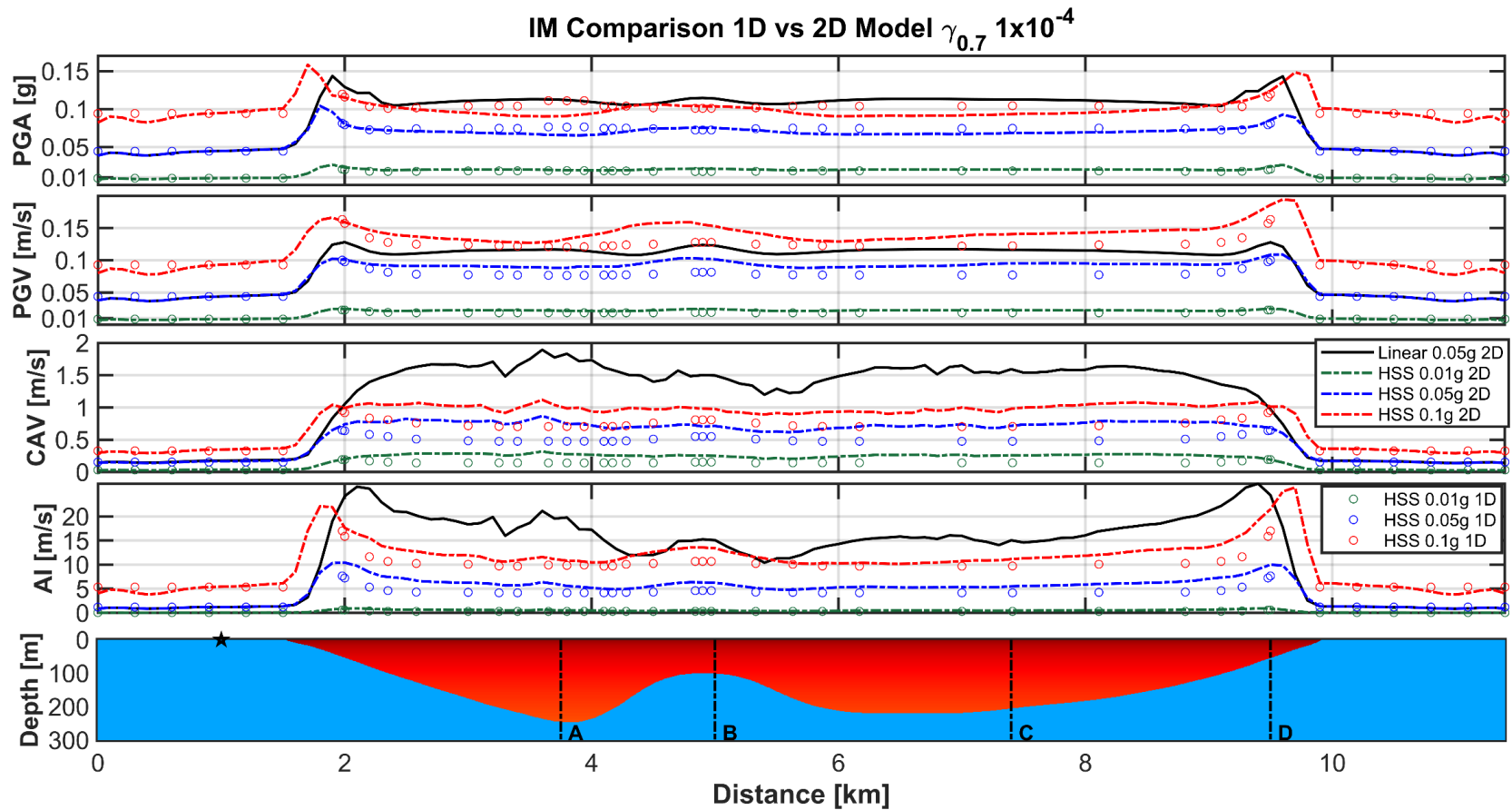


Figura 14: Medidas de intensidad PGA, PGV, CAV y AI, obtenidas a partir de simulaciones 1D y 2D, considerando modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$ y pulsos de aceleración máxima en superficie de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g. La estrella indica la ubicación del receptor de referencia considerado para el cálculo de los factores de amplificación (AF).

4.2 Factores de Amplificación, Agravación y Reducción

Se calcularon factores de amplificación (AF) para las medidas de intensidad PGA, PGV, CAV y AI, normalizando la medida de intensidad en cada ubicación del perfil por la medida de intensidad obtenida en el receptor en afloramiento rocoso, ubicado a 500 m del borde del modelo (ver ubicación en Figura 14).

En la Figura 15 y Figura 16, se muestran los factores de amplificación obtenidos para valores de deformación angular por corte $\gamma_{0.7}$ de $1 \cdot 10^{-4}$ y $3 \cdot 10^{-4}$, respectivamente, con simulaciones 2D. En ambos casos, se comparan los resultados del modelo Lineal Elástico de pulso 0.05g con los del modelo constitutivo HSS para los 3 pulsos.

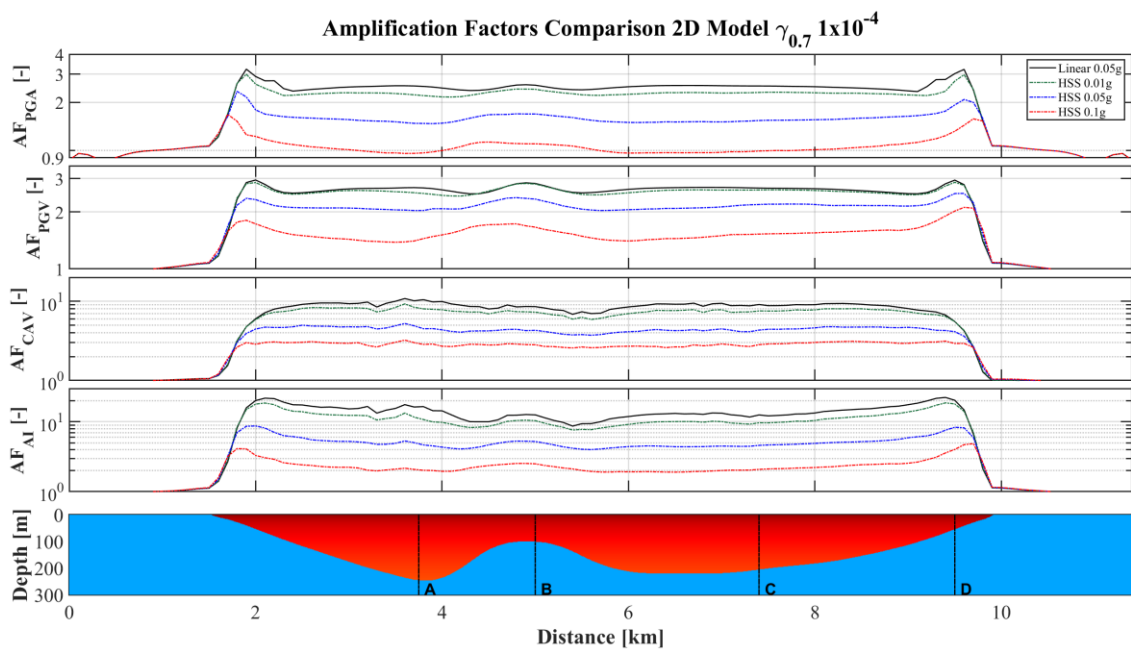


Figura 15: Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 2D Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

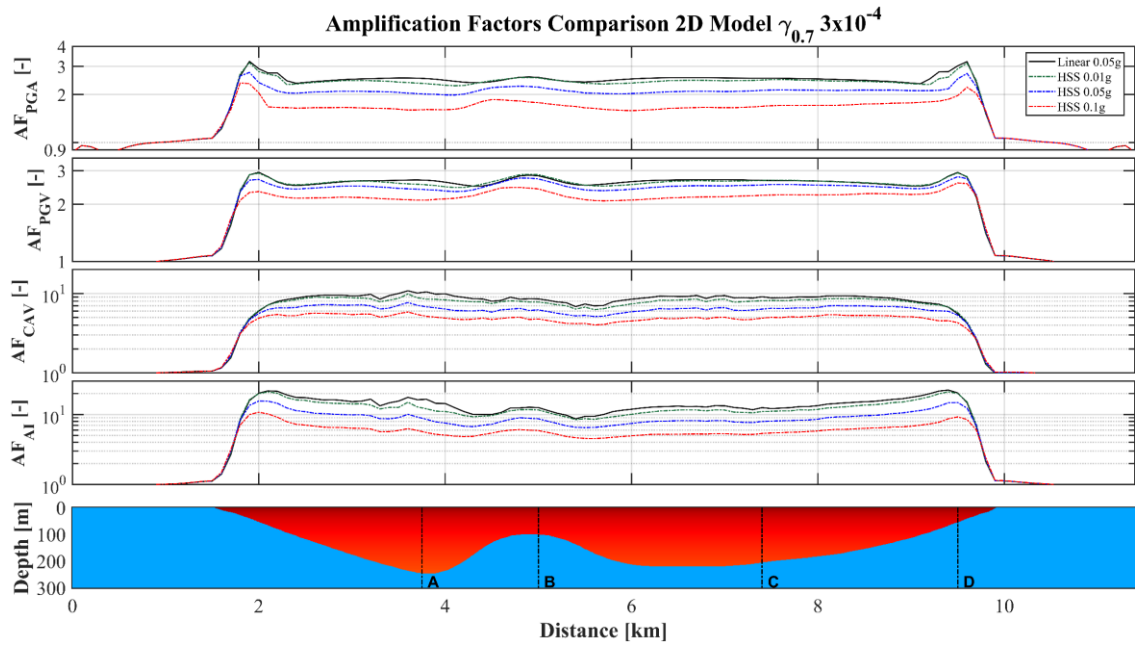


Figura 16: Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 2D Lineal Elástico y HSS, $\gamma_{0.7} = 3 \cdot 10^{-4}$.

En la Figura 17 se muestran los factores de amplificación para las IM descritas, comparando simulaciones 1D con 2D. El comportamiento no lineal se evalúa con el modelo HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$ (Figura 15 para el caso 2D). El modelo Lineal Elástico 2D se evalúa con el pulso de 0.05g y el modelo HSS 1D y 2D se evalúa para los 3 pulsos.

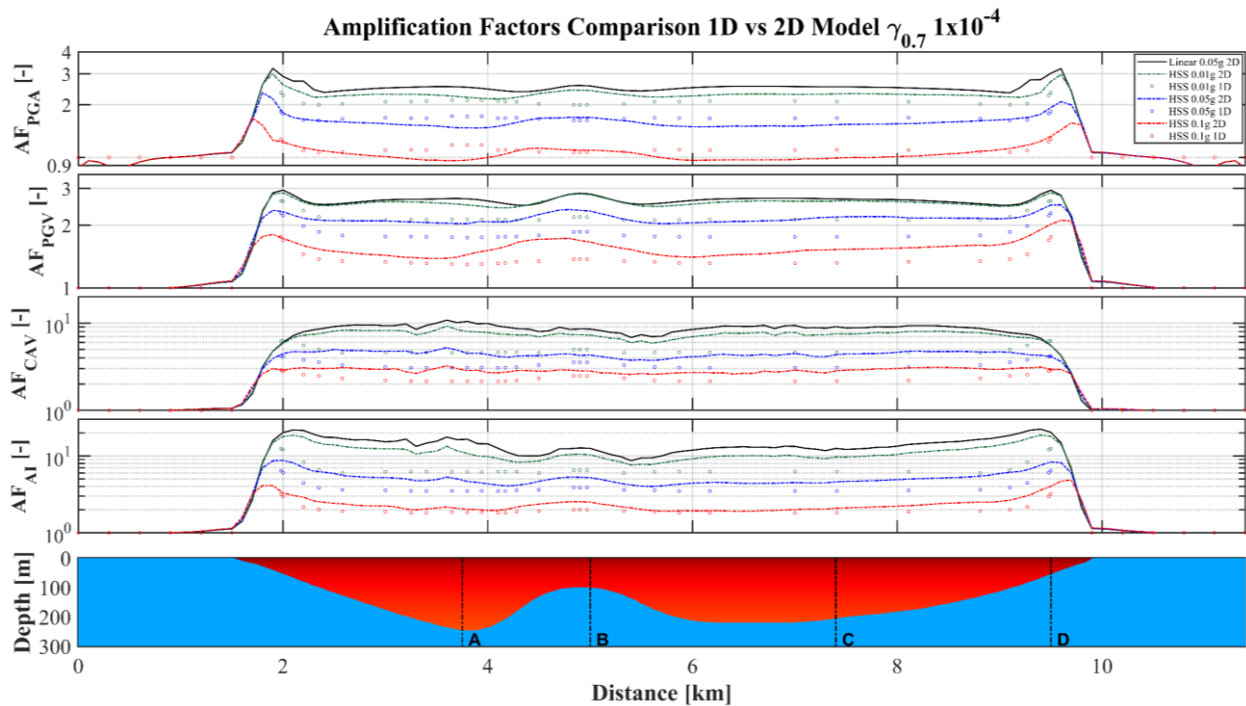


Figura 17: Factores de amplificación de PGA, PGV, CAV y AI, para simulaciones 1D y 2D con modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \cdot 10^{-4}$.

Los factores de agravación (AGF) de respuesta 2D sobre 1D se calcularon como la razón entre los factores de amplificación de las IM de simulaciones 2D y 1D en cada receptor en superficie, como se indica en la Ecuación (16) (Bustos et al., 2023).

$$AGF = \frac{AF_{IM}^{2D}}{AF_{IM}^{1D}} \quad (16)$$

Los AGF se calculan para las medidas de intensidad PGA, PGV, CAV y AI y los resultados se muestran en la Figura 18.

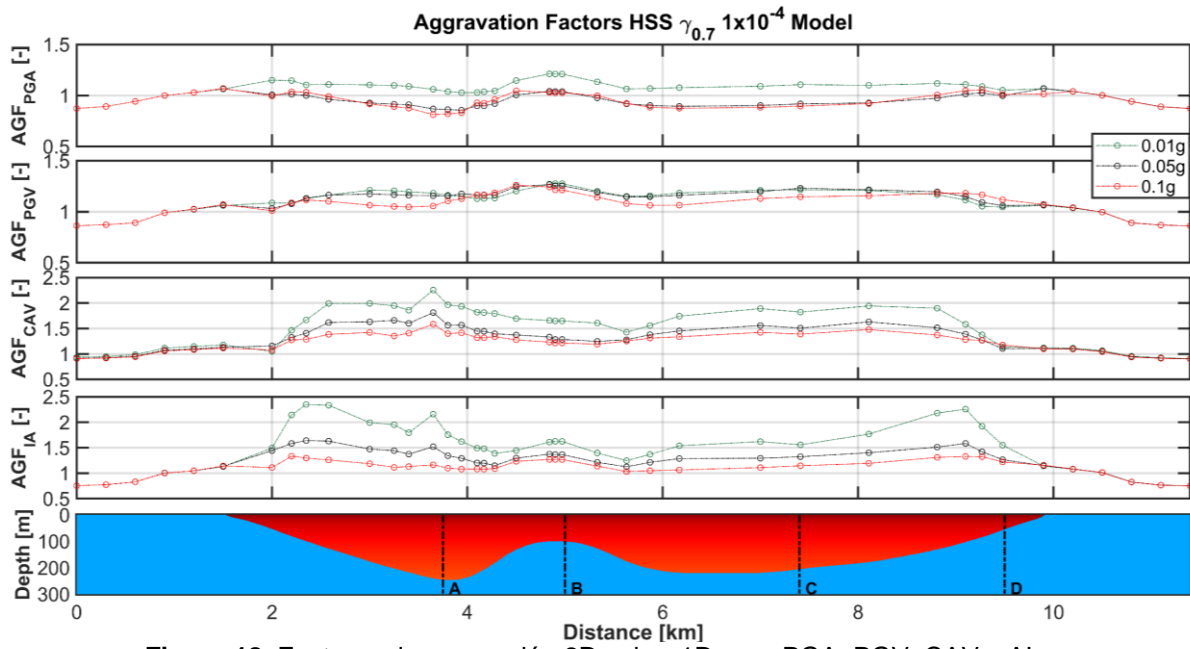


Figura 18: Factores de agravación 2D sobre 1D para PGA, PGV, CAV y AI.

Se obtuvieron factores de reducción (RF) de intensidad por efectos no-lineales como la razón entre los resultados del modelo constitutivo HSS con respecto al lineal, considerando simulaciones 2D, lo que se muestra en la Ecuación (17).

$$RF = \frac{AF_{HSS}^{2D}}{AF_{Linear}^{2D}} \quad (17)$$

Los resultados se muestran en la Figura 19 y Figura 20 para $\gamma_{0.7}$ de 1×10^{-4} y 3×10^{-4} , para los 3 pulsos en estudio.

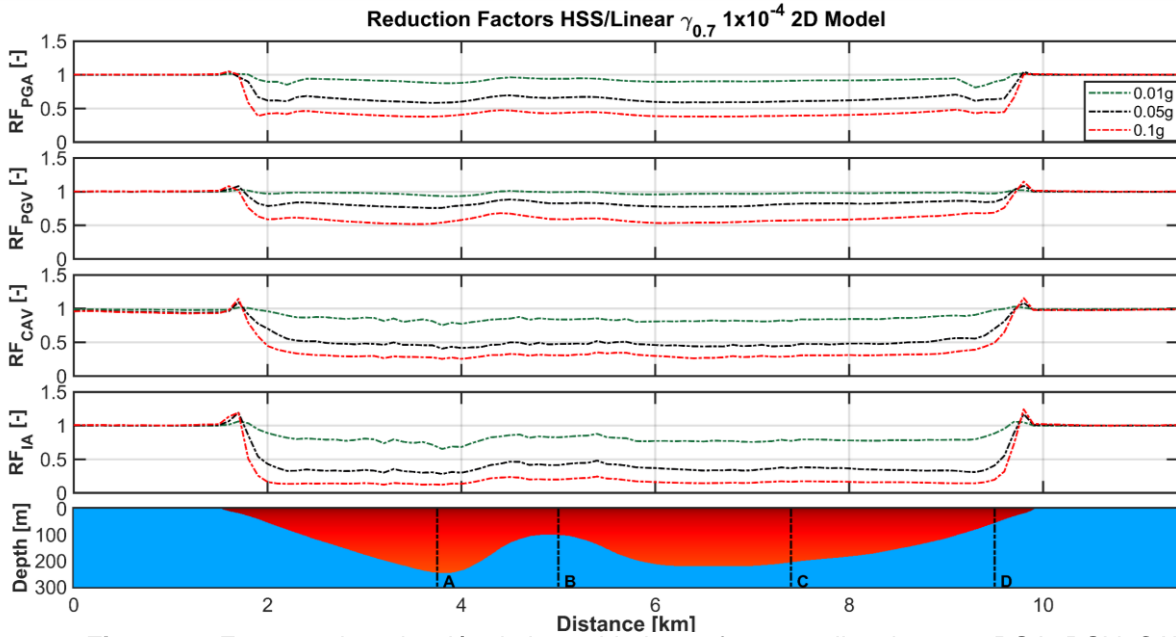


Figura 19: Factores de reducción de intensidad por efectos no-lineales para PGA, PGV, CAV y AI, considerando simulaciones 2D para HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

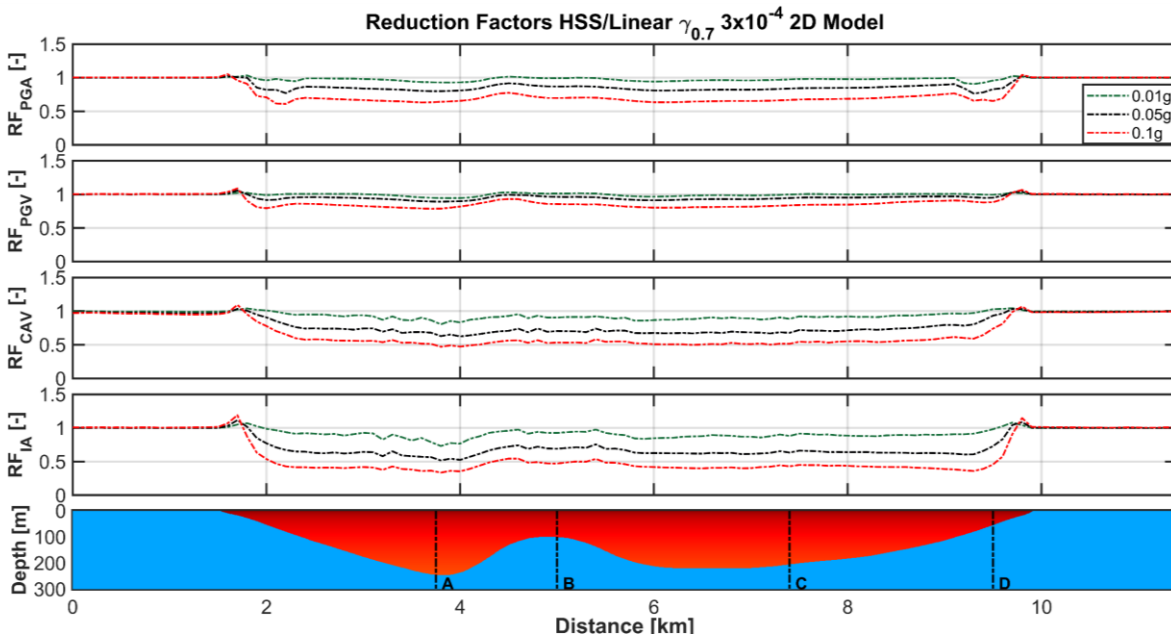


Figura 20: Factores de reducción de intensidad por efectos no-lineales para PGA, PGV, CAV y AI, considerando simulaciones 2D para HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$.

4.3 Factores de Amplificación Espectral

Se calcula para cada receptor en superficie el espectro de respuesta para un 5% del amortiguamiento crítico y las aceleraciones espectrales se normalizan por el PGA en el afloramiento rocoso. Esto se lleva a cabo para el modelo Lineal Elástico considerando el pulso de 0.05 g, y para el modelo HSS, considerando los 3 pulsos en estudio. Este último modelo considera $\gamma_{0.7}$ igual a 1×10^{-4} y 3×10^{-4} . Los resultados para simulaciones 2D se muestran en la Figura 21 y Figura 22.

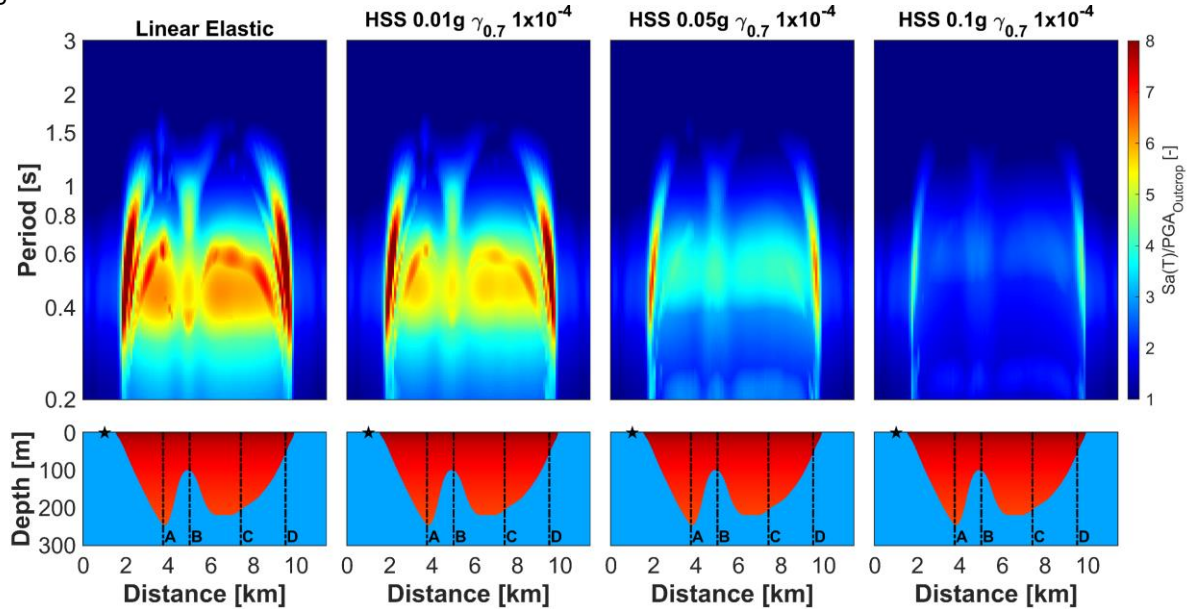


Figura 21: Espectros de aceleración (Sa) normalizados, considerando simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

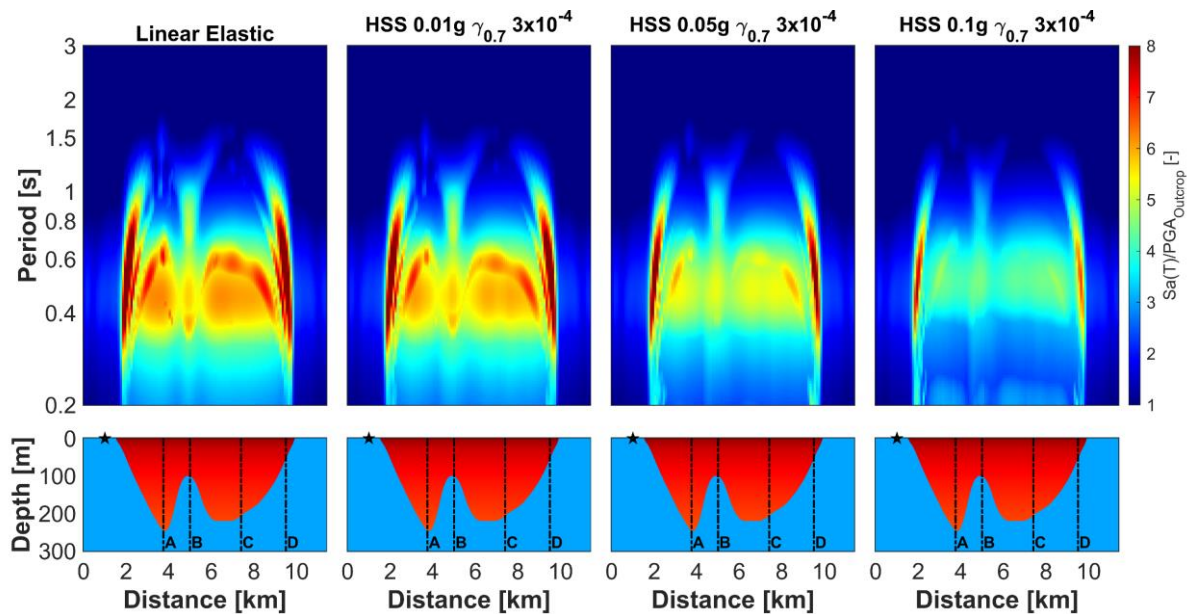


Figura 22: Espectros de aceleración (Sa) normalizados, considerando simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$.

En la Figura 23, se muestran los espectros de aceleración (S_a) que se obtienen para el modelamiento 1D, calculados de la misma forma que en el caso 2D, para los 3 pulsos en estudio con el modelo HSS, donde se utiliza el parámetro $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

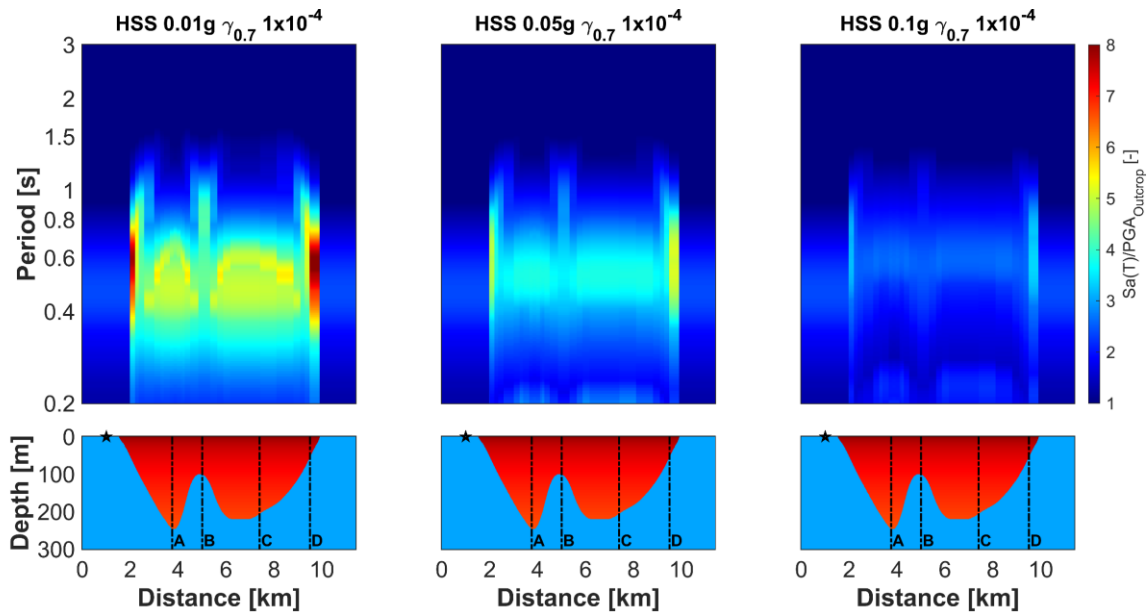


Figura 23: Espectros de aceleración (S_a) normalizados, considerando simulaciones 1D para modelos HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

Luego, se obtienen razones espectrales dividiendo los espectros de aceleración (S_a) de cada receptor en superficie por el espectro en afloramiento rocoso. Al igual que lo detallado anteriormente, el cálculo se realiza para el modelo Lineal Elástico de pulso 0.05 g, y para los 3 pulsos en estudio en el modelo HSS. Este último modelo se simula con el parámetro $\gamma_{0.7}$ igual a 1×10^{-4} y 3×10^{-4} . Los resultados para el modelamiento 2D se muestran en la Figura 24 y Figura 25.

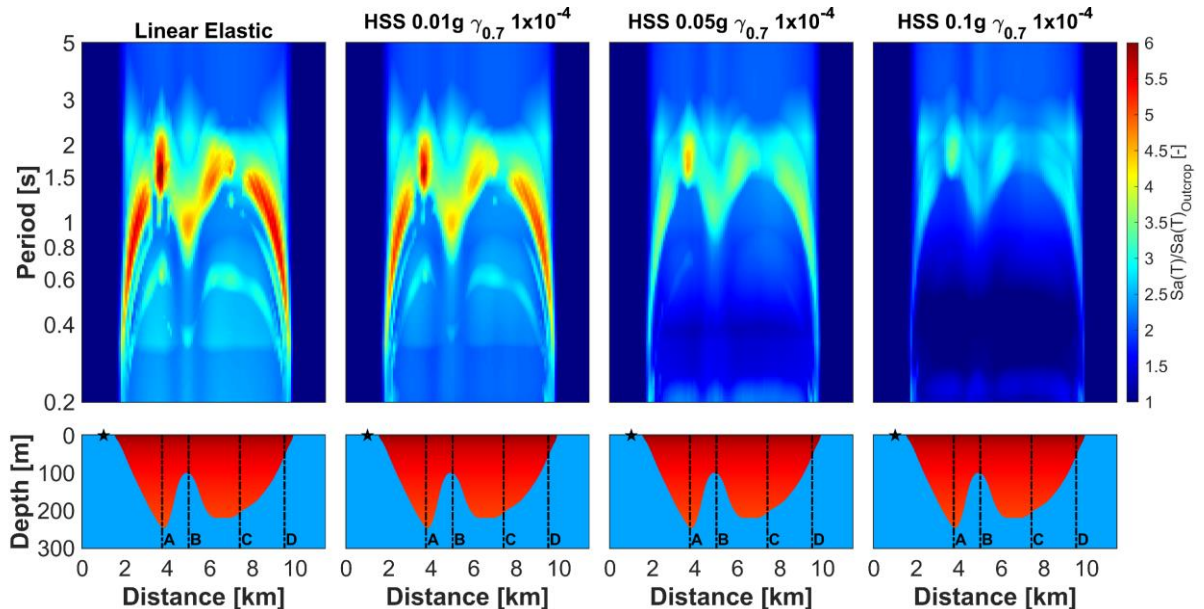


Figura 24: Razones espectrales a partir de simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

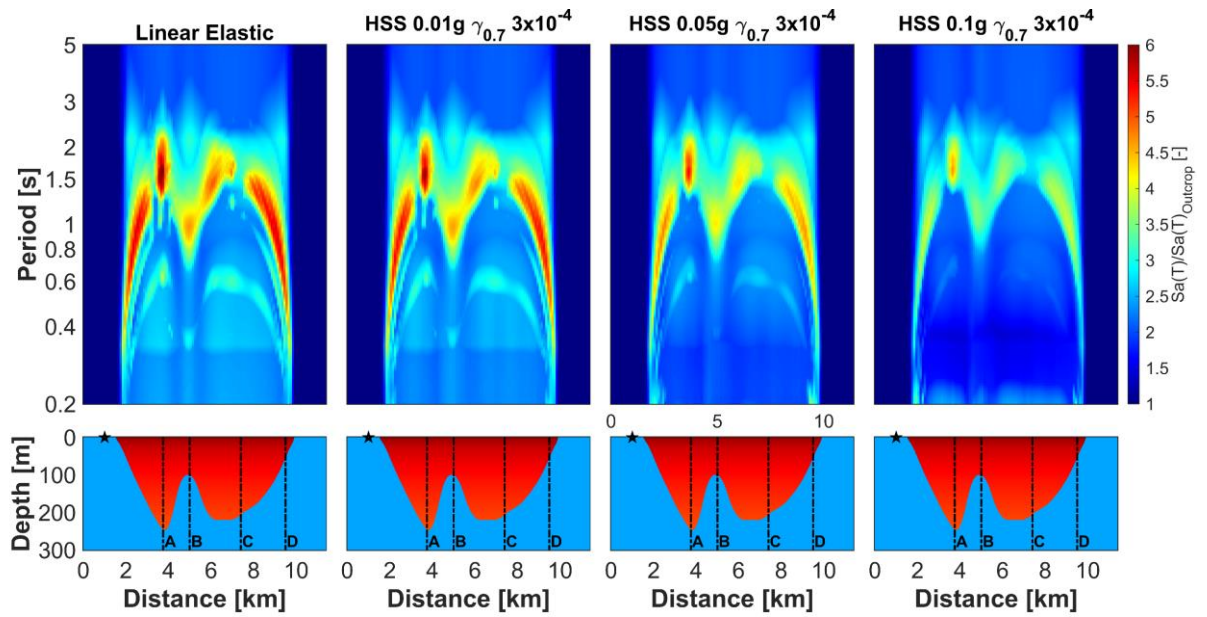


Figura 25: Razones espectrales a partir de simulaciones 2D para modelos Lineal Elástico y HSS con $\gamma_{0.7} = 3 \times 10^{-4}$.

En la Figura 26, se muestran razones espectrales que se procesan para el modelamiento 1D, siguiendo la misma metodología descrita para el caso 2D y considerando los 3 pulsos en estudio con el modelo HSS y $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

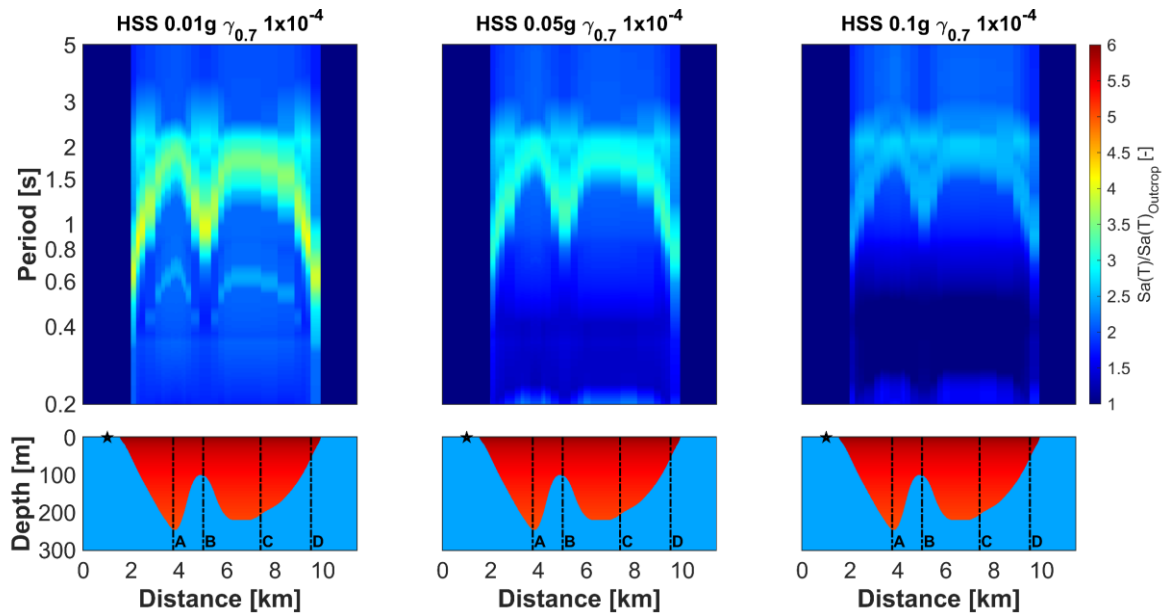


Figura 26: Razones espectrales de simulaciones 1D para modelos HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$

4.4 Comparación de puntos de interés

Se analizan 4 puntos de interés mencionados en la sección 3.3. Se compara la aceleración (Figura 27) y velocidad (Figura 28) de dichos puntos para simulaciones 1D y 2D, considerando el modelo HSS con $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$ y tres niveles de sollicitación (0.01 g, 0.05 g y 0.1 g).

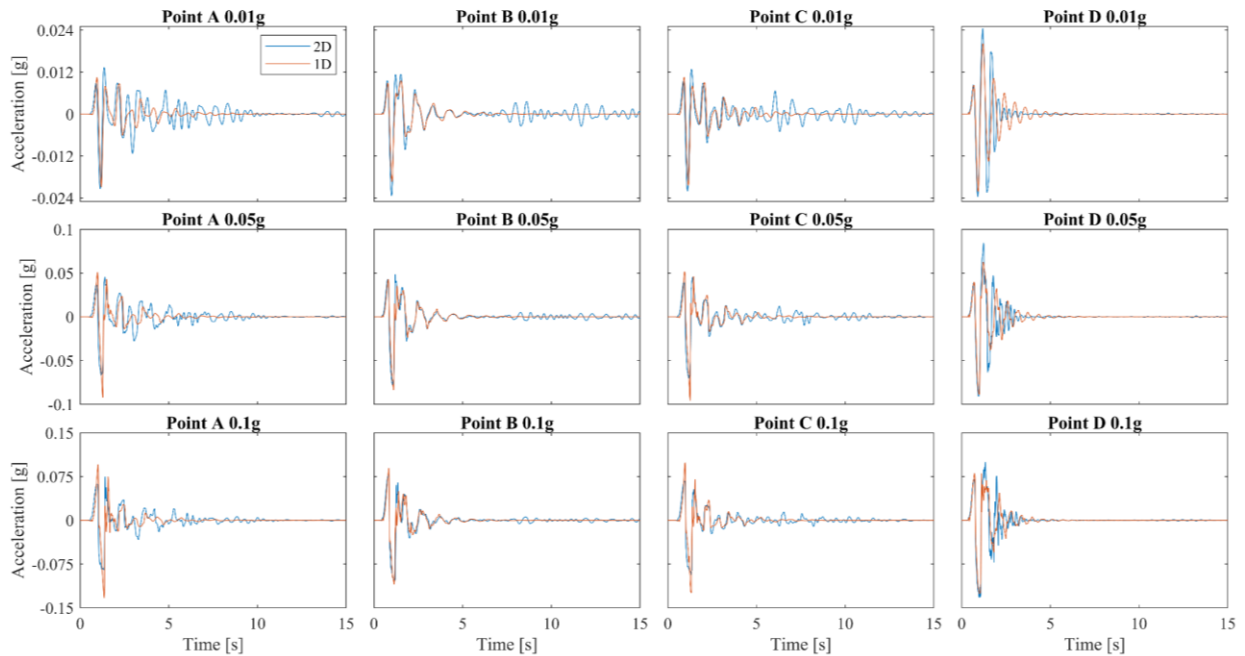


Figura 27: Comparación de aceleraciones en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

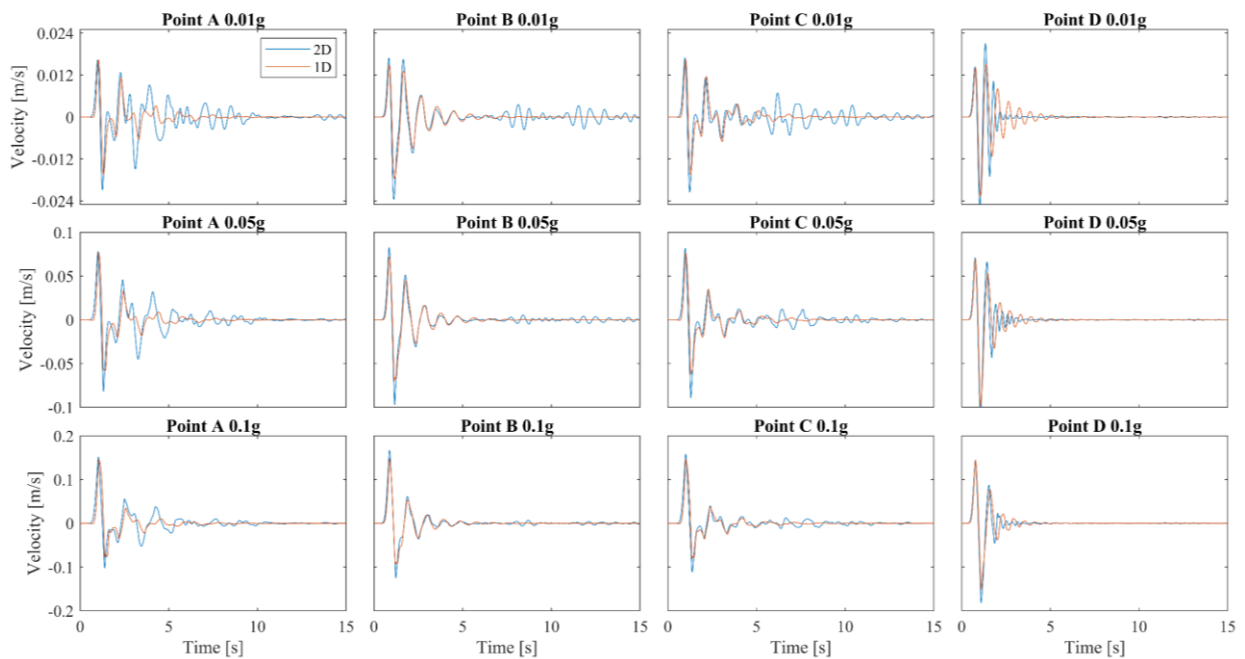


Figura 28: Comparación de velocidades en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

A partir de las aceleraciones en cada punto de interés, se calculan los espectros de aceleración (S_a) para el modelo Lineal Elástico en 2D con un pulso de 0.05 g y para el modelo HSS en 1D y 2D con los 3 pulsos de interés y $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$. Los resultados se indican en la Figura 29. En la Figura 30, se comparan los factores de amplificación espectral en los puntos de interés calculados con respecto al receptor en afloramiento rocoso.

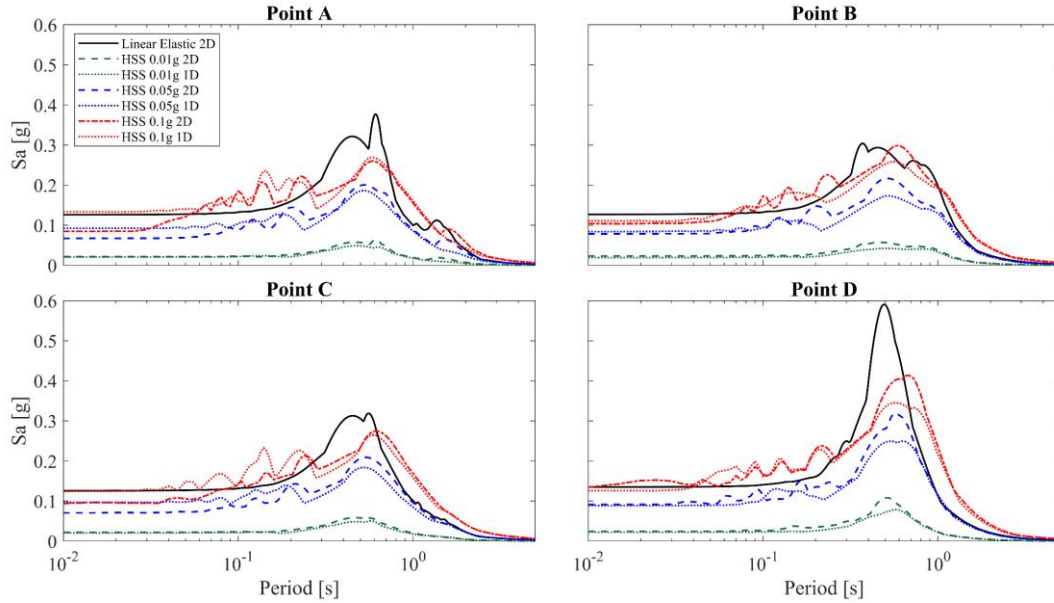


Figura 29: Comparación de espectros de aceleración (S_a) en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos lineal-elástico y HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

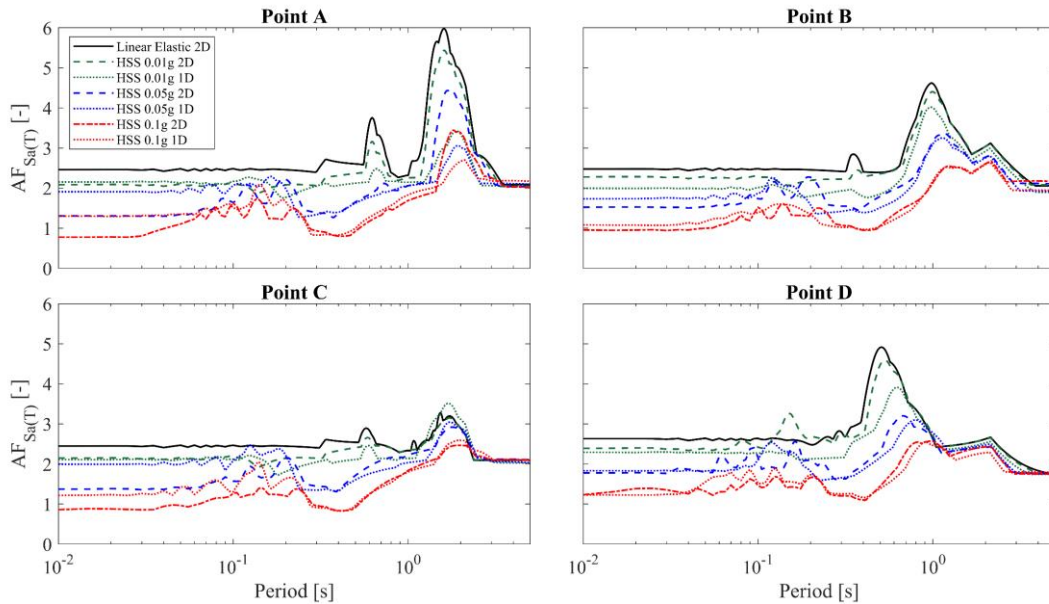


Figura 30: Comparación de factor de amplificación espectral en puntos de interés obtenidos de simulaciones 1D y 2D con modelos lineal-elástico y HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

Capítulo 5: Discusión

5.1 Amplificación sísmica 2D

Al observar los factores de amplificación (FA) de las medidas de intensidad (Figura 15), para $\gamma_{0.7}=1\cdot 10^{-4}$, se puede ver que los mayores valores se alcanzan para CAV y AI, ya que se generan largas amplitudes producto de las ondas superficiales, extendiendo la duración del movimiento fuerte.

En la Figura 15, para el PGA existe una deamplificación del suelo con respecto al afloramiento rocoso en el caso HSS para el pulso de mayor amplitud, lo que ocurre en las zonas más profundas del perfil. El comportamiento no lineal del suelo puede ser una explicación razonable de la reducción de los FA a medida que aumenta la amplitud del *input*.

Se puede observar una atenuación relativa de las ondas en el tiempo, la cual se mide con respecto al caso lineal elástico. Las simulaciones con este modelo y el modelo HSS no exhiben grandes diferencias cuando son sometidos al pulso de menor amplitud (Figura 15), no así para los 2 pulsos de mayor amplitud, donde es notorio el efecto de la no linealidad del modelo HSS. El mayor pulso induce una degradación de rigidez más pronunciada y por ende una menor amplificación relativa.

En cuanto a las razones espectrales de los 4 puntos de interés que se muestran en la Figura 24, se puede establecer lo siguiente. La mayor razón espectral en el Sitio A se alcanza a un período de 1.5 s, aproximadamente. Este sitio se ubica donde se alcanza la mayor profundidad del perfil, lo que genera una mayor duración del movimiento fuerte, debido a la reflexión y refracción de las ondas de cuerpo, las cuales se suman constructivamente y se podría generar un efecto de focalización, lo que aumenta la razón espectral. El Punto D exhibe razones espectrales considerablemente altas, debido a que el movimiento del suelo se amplifica por las ondas superficiales generadas en los bordes de la Cuenca. Cabe mencionar que dichos efectos se producen en un rango de período de 0.4 a 0.7 s, aproximadamente. En el Sitio C, se puede notar que a un período de 1.6 s disminuye considerablemente la razón espectral. Esto se puede deber a la reflexión de las ondas, las cuales se focalizan en la zona de mayor profundidad, a 600 metros aproximadamente hacia el oeste del Sitio C. Esto se encuentra más marcado para el caso Lineal Elástico y para el HSS de pulso 0.01g., los cuales no presentan grandes diferencias en los resultados.

5.2 Comparación 1D y 2D

Debido a la deamplificación del PGA para el caso 2D mencionada en la sección 5.1, se realizó una comparación del PGA del sitio (puntos A, B, C y D) con respecto al PGA en afloramiento rocoso, para el caso 1D y 2D. En cada caso se tienen 3 puntos, que corresponden a la respuesta que generan los 3 pulsos en estudio. También se realiza para las medidas de intensidad PGV, CAV y AI. Los resultados se indican en la Figura 31.

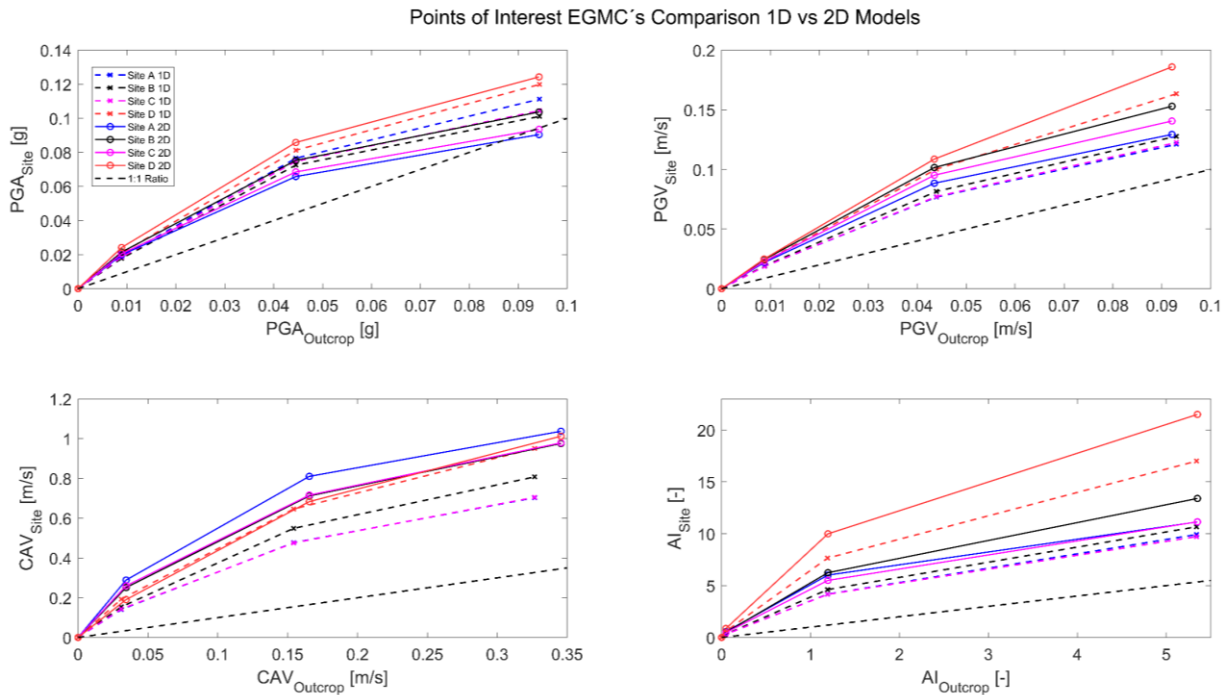


Figura 31: PGA del sitio vs PGA en afloramiento rocoso, de simulaciones 1D y 2D con modelos HSS $\gamma_{0.7} = 1 \times 10^{-4}$.

En la figura anterior, se verifica que los sitios A y C deamplifican para el modelamiento 2D con el pulso 0.1g (el mayor simulado), lo que no ocurre para el caso 1D. Esto indica que los efectos no lineales son responsables de una deamplificación del suelo, a medida que se tiene una entrada sísmica mayor.

En la misma Figura 31, se contempla que el mayor PGA, PGV y AI ocurre en el sitio D, con el tipo de modelamiento 2D. Esto se puede explicar debido al fuerte contraste de impedancia entre el depósito de suelo y el basamento rocoso, lo que genera una fuerte amplificación y desarrollo de ondas superficiales en los bordes de la Cuenca.

En cuanto a los factores de agravación (Figura 18), se puede observar que el AGF de PGA y PGV tienen valores cercanos a 1 a lo largo de todo el perfil de suelos, por lo que no presentan mayores diferencias. El PGA para los dos pulsos de mayor amplitud presenta una respuesta más elevada en el caso 1D, teniendo valores menores a la unidad, principalmente en las zonas más profundas. Para el PGV en todos los casos se tiene una respuesta mayor en el modelo 2D que el 1D, por ende, el suelo degrada menos en el caso 2D. Esto se debe a que la duración del movimiento fuerte simulada en el modelamiento 2D, no se puede predecir de la misma manera para el caso unidimensional, el cual tiene una menor duración en su respuesta. Esto ocurre por la generación de ondas superficiales en la simulación 2D junto con la refracción y reflexión de

ondas de cuerpo, lo que se puede evidenciar en los AGF CAV y AI, los cuales presentan los mayores factores de agravación cercano a los bordes del modelo 2D.

Los AGF dependen de la profundidad y velocidad de ondas de corte. Esto se debe al fuerte contraste de impedancia producto de la geometría y profundidad, donde en las zonas con fuertes variaciones de V_s , presentan los mayores factores de agravación, lo que se puede deber al fuerte contraste lateral en las propiedades dinámicas del material en la interfaz suelo-roca (ver Figura 18).

En la comparación de aceleraciones 1D y 2D de los sitios de interés (Figura 27), se muestra que con el modelamiento 1D se alcanzan mayores *peaks* para los pulsos 0.05g y 0.1g, excepto en el punto D. Esto se puede deber a que la simulación 2D permite estudiar la variación lateral del perfil. Caso contrario ocurre para la velocidad (Figura 28), donde se obtienen amplitudes máximas mayores con la simulación 2D en todos los puntos estudiados, para los 3 pulsos.

Como se puede observar en ambas figuras mencionadas en el párrafo anterior, en todos los casos se tienen una llegada de onda y una respuesta bastante similares, hasta los 3 segundos aproximadamente. Posteriormente, se perciben diferencias debido a que el modelamiento 1D, a diferencia del 2D, no permite simular el efecto que generan las ondas superficiales. A causa de lo anterior, se genera un rebote de las ondas en el modelamiento 2D y un comportamiento residual en el caso 1D.

Los períodos donde se alcanzan los mayores valores de las razones espectrales no presentan grandes diferencias entre las simulaciones 1D y 2D. Sin embargo, en el modelamiento 1D (Figura 26) presentan resultados menores al caso 2D (Figura 24), para los 3 pulsos estudiados. Esto se puede deber a que el tipo de modelamiento 2D, a diferencia del 1D, permite incorporar la desigualdad topográfica, cuyas variaciones pueden provocar una amplificación del suelo.

5.3 Amplificación sísmica no-lineal

Al observar los factores de reducción de intensidad por efectos no-lineales, se puede ver que tanto para el caso de $\gamma_{0.7} 1 \cdot 10^{-4}$ (Figura 19) y $3 \cdot 10^{-4}$ (Figura 20), la variación en la respuesta a lo largo del perfil de suelos es muy leve, por lo que no se encuentra influenciado en gran medida por el período del suelo. Además, se verifica que en el modelo de $\gamma_{0.7}$ mayor (Figura 20), se tienen factores de reducción más cercanos a la unidad en los 3 pulsos en estudio, debido a que en este caso el modelo HSS presenta una respuesta más cercana al caso lineal elástico, siendo menos pronunciado el efecto de la no-linealidad.

El factor de reducción del caso sometido al pulso de menor amplitud, presenta una respuesta bastante similar para ambos valores de $\gamma_{0.7}$, cercano a la unidad en todas las medidas de intensidad, siendo más marcado aún para PGA y PGV. En los casos de 0.05g y 0.1g se puede notar la atenuación relativa de las ondas con el tiempo, donde es más marcado para el caso de $\gamma_{0.7}$ menor. En estos casos, se puede evidenciar el efecto de la no linealidad por una pérdida de rigidez y un aumento del amortiguamiento histerético, donde disminuyen los factores de reducción a medida que aumenta la amplitud del pulso.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

El modelamiento 1D puede ser deficiente en comparación al 2D, ya que no permite simular el efecto de las ondas superficiales en los bordes laterales de la sección transversal, las cuales generan que la duración de movimiento fuerte del suelo sea mayor. Las mencionadas ondas superficiales interactúan con las ondas de cuerpo incidentes, las cuales permiten interferencias constructivas y generan repetidas reflexiones de ondas sísmicas en la sección transversal. Además, en el modelamiento 1D, a diferencia del 2D, no se puede estudiar la variación lateral de la sección transversal y las variaciones de la profundidad de la roca. Esto provoca que a medida que aumenta la amplitud del pulso, la respuesta de los factores de amplificación de las medidas de intensidad para el tipo de modelamiento 1D y 2D, difiere (Figura 17).

Se obtienen los mayores factores de amplificación y agravación para las medidas de intensidad CAV y AI. Esto se debe a que se encuentran relacionadas con la generación de ondas superficiales en los bordes de la sección analizada de la Cuenca, extendiendo la duración del movimiento fuerte.

La no-linealidad del material y la atenuación relativa de las ondas sísmicas se puede evidenciar a partir de una amplitud del pulso de 0.05g, siendo más notorio aún para el mayor pulso simulado en este trabajo, correspondiente a 0.1g. La no-linealidad no se evidencia con el pulso de menor amplitud (0.01g), el cual presenta una respuesta similar al modelo lineal elástico, lo que se observa en los factores de amplificación y reducción.

La magnitud de la no-linealidad es notoria en los modelos realizados, donde al aumentar el valor de la deformación angular al 70% de degradación del módulo de corte ($\gamma_{0.7}$) de $1 \cdot 10^{-4}$ a $3 \cdot 10^{-4}$ se obtiene en el modelo HSS un comportamiento más similar al modelo Lineal Elástico (Figura 20).

La respuesta del suelo bajo efectos no lineales depende del input sísmico y las propiedades dinámicas, como lo es la deformación angular por corte ($\gamma_{0.7}$), la cual modifica notoriamente la respuesta en los factores de amplificación y reducción.

Los modelamientos numéricos realizados sugieren que el análisis no-lineal 2D podría permitir obtener una respuesta más completa que con la simulación 1D para efectos sísmicos de sitio, ya que es capaz de predecir la degradación de la rigidez y de reflejar la influencia de las características del terreno y la heterogeneidad lateral de la sección transversal, donde se produce la refracción y reflexión de las ondas de cuerpo, además de la generación de las ondas superficiales, lo que se corrobora con lo planteado por Bustos et al. (2023).

6.2 Recomendaciones

Este trabajo de análisis no lineal 2D podría reflejar de una manera más precisa los efectos de la amplificación de sitio, al tener una mejor capacidad de simulación del efecto de enfoque de la propagación de las ondas sísmicas. Además, la no-linealidad del suelo pareciera simular el movimiento de la Cuenca de una manera más realista que el caso lineal. Sin embargo, aún no se han realizado los suficientes estudios para tener una mayor claridad en los mencionados efectos no-lineales, por ende, se recomienda continuar con el estudio de los efectos no-lineales con una caracterización sísmica de los suelos finos del norte de la Cuenca de Santiago.

Se recomienda realizar simulaciones con pulsos mayores a 0.1g, para poder analizar la atenuación de las ondas sísmicas y observar una posible deamplificación del suelo con respecto al afloramiento rocoso. Se sugiere continuar con una aceleración de 0.2g y 0.3g, para estudiar si se puede obtener una relación del efecto de la no-linealidad con respecto a la amplitud del pulso, lo que se podría obtener mediante el AF_{PGA} .

También, para continuar con la respuesta dinámica del suelo, se sugiere determinar las curvas de degradación de módulo de corte y aumento del amortiguamiento histerético. Estas permitirían facilitar la representación del comportamiento del suelo al poder determinar las zonas en las cuales el suelo se comporta de una manera lineal y no-lineal y la degradación de la rigidez.

Se recomienda realizar una caracterización geotécnica en los suelos finos del norte de la Cuenca de Santiago (Unidad VII), ya que, la precisión de los resultados de la investigación depende, entre otras cosas, de los valores de los parámetros que se ingresen en el modelo numérico. Uno de los más relevantes es el módulo de corte secante referencial, el cual permite obtener el módulo cortante a cualquier nivel de deformación, lo que se puede observar en las curvas de degradación del módulo de corte. También sería importante tener más información en los módulos de deformación y la deformación angular por corte.

Se recomienda realizar un análisis de registros de sismos de distinta magnitud que afecten la Cuenca de Santiago para corroborar que los efectos no-lineales se evidencian empíricamente también, y comparar con los modelos simulados. Sería pertinente alcanzar frecuencias mayores, a modo de validar los modelos numéricos y de velocidades.

Es importante continuar desarrollando códigos y herramientas computacionales para ayudar a agilizar y precisar los resultados obtenidos con los modelos numéricos, en cuanto a la manipulación de los resultados y el tiempo de espera de ejecución de dichos modelos. Por ejemplo, se podría estudiar cuanto cambia en los resultados aumentar el paso del tiempo del registro, lo cual es una forma de acelerar la ejecución del modelo.

Para poder hacer un estudio más profundo, se podría utilizar un análisis 3D para los suelos de la zona norte de la Cuenca de Santiago, ya que permite incluir dentro de un mismo modelo numérico, todas las posibles complejidades que se pueden presentar en la Cuenca. Se sugiere continuar con el estudio de los factores de amplificación de las medidas de intensidad, obteniendo factores de agravación y reducción, para que de este modo se puedan comparar con el modelamiento bidimensional. Luego sería relevante determinar si es de mayor necesidad continuar con el modelamiento tridimensional, ya que requiere herramientas computacionales más avanzadas.

Capítulo 7: Bibliografía

- Acevedo Plaza, M. (2021). Modelo de velocidades de la Cuenca de Santiago y estimación de su respuesta sísmica. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183383>
- Aravena Laucirica, M. (2020). Análisis del comportamiento sísmico de entibaciones en suelos finos del Sector Oriente de Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. HANSEN, R.(Editor). Seismic Design for Nuclear Power Plant. Cambridge, MA, The M.I.T. Press., 438–483.
- Bard, P. Y., M. Campillo, F. J. Chavez-Garcia, and F. J. Sanchez-Sesma (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985—A theoretical investigation of large- and small-scale amplification effects in the Mexico City valley, *Earthq. Spectra*. 4, 609–633.
- Benz, T., 2007. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart
- Boada Campos, G. E. (2021). Curvas de fragilidad para depósitos de relaves abandonados en la zona centro-norte de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Bonilla, F., Liu, P., Nielsen, S., 2010. 1D and 2D linear and nonlinear site response in the Grenoble area. In Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L.F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P., Verdugo, R., 2009. Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophys. J. Int.* 176 (3), 925–937.
- Bustos Fonseca, J. (2021). Simulation of the seismic response of the Santiago basin, Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181344>
- Bustos, J., Pastén, C., Pavez, D., Acevedo, M., Ruiz, S., Astroza, R., 2023. Two-dimensional simulation of the seismic response of the Santiago Basin, Chile. <https://authors.elsevier.com/c/1fv86ytxOPYwo>
- Chávez-García, F.J., 2003. Site effects in Parkway Basin: comparison between observations and 3-D modelling. *Geophys. J. Int.*, 154, 633-646.
- Chen, G., Jin, D., Zhu, J., Shi, J., Li, X., 2015. Nonlinear analysis on seismic site response of Fozhou basin, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 2A, pp. 928–949, April 2015, doi: 10.1785/0120140085
- Cortés Camus, M. (2018). 3D physics-based numerical scenarios for earthquake strong ground motion prediction: the case of the San Ramón fault in Santiago de Chile basin. Thesis to obtain the academic degree of Master of Science in Civil Engineering for Risk Mitigation. Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano. <http://hdl.handle.net/10589/145614>
- EPRI. (1991). Standardization of the cumulative absolute velocity. EPRI T R-100082 (Tier 2). Electrical Power Research Inst., Palo Alto, USA., 14.

- Falcone, G., Boldini, D., & Amorosi, A. (2018). Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109, 33-45.
- Fernández, J.C. (2003). Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental N°1.
- Frid, M., & Kamai, R. (2022). Characterizing Nonlinear Effects in Vertical Site Response of Dry Soils Using KiK-Net Data. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-17.
- Gálvez, C., 2012. Microzonificación sísmica en los sectores de Lampa y Batuco, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Jáky, J. (1944b). A nyugalmi nyomás tényezője. *A Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönyének* 78(22), 355-358
- Kramer, S. L. (2014). *Geotechnical earthquake engineering*. Essex, UK: Pearson, 2014.
- Kristek, J., Moczo, P., Bard, P.-Y., Hollender, F. & Stripajová, S. 2018. Computation of amplification factor of earthquake ground motion for a local sedimentary structure. *Bull. Earthquake Eng.*
- Leyton, F., Sepúlveda, S. A., Astroza, M., Rebolledo, S., Acevedo, P., Ruiz, S., ... & Foncea, C. (2011, January). Seismic zonation of the Santiago basin, Chile. In *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.
- Makra, K., Chávez-García, F.J., 2016. Site effects in 3D basin using 1D and 2D models: an evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest. *Bull Earthq. Eng* 14, 1177–1194. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9862-7>
- Moczo, P., Kristek, J., Galis, M., Pazak, P., Balazovjeh, M., 2007. The FiniteDifference and Finite-Element Modeling of Seismic Wave Propagation and Earthquake Motion. *Acta Physica Slovaca* 57, 177-406.
- Obrzud, R., Truty, A., Edition 2018. *The hardening soil model – a practical guidebook*.
- Ortiz Olea, F. (2022). Simulación de la respuesta sísmica de la Cuenca de Santiago sometida a terremotos corticales superficiales. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185708>
- Parra Silva, M. A. (2022). Diseño sísmico paramétrico de túneles mediante métodos numéricos e inteligencia artificial. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Pastén, C., 2007. Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Pastén, C., Sáez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J., Poli, P., 2016. Deep characterization of the Santiago Basin using HVSr and cross-correlation of ambient seismic noise. *Eng. Geol.* 201, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.021>
- Pavez Carrillo, D. (2020). Modelamiento dinámico de perfiles geotécnicos bidimensionales de gran escala en la Cuenca de Santiago. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177318>

- Petrus Ingenieros S.A. (2011). Informe N°3177-ING-1006/2011. Informe Consolidado de Mecánica de Suelos - Proyecto Línea 3 Metro de Santiago. Santiago, Chile.
- Pilz, M., Parolai, S., Picozzi, M., Wang, R., Leyton, F., Campos, J., Zschau, J., 2010. Shear wave velocity model of the Santiago de Chile basin derived from ambient noise measurements: A comparison of proxies for seismic site conditions and amplification. *Geophys. J. Int.* 182, 355–367. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04613.x> siempre
- Pilz, M., Parolai, S., Stupazzini, M., Paolucci, R., Zschau, J., 2011. Modelling basin effects on earthquake ground motion in the Santiago de Chile basin by a spectral element code. *Geophysical Journal International*, 187(2), 929-945.
- Plaxis 2D-Reference Manuals, 2022. Connect Edition V22.02. https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-05-58/1212.2D_2D00_2_2D00_Reference.pdf
- Plaxis Material Models Manuals, 2022. Connect Edition V22.02. https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-05-58/5315.2D_2D00_3_2D00_Material_2D00_Models.pdf
- Poblete, M. (2004). Arcilla Arenosa Aluvional del Sector Oriente de Santiago. Propiedades Geomecánicas. Santiago, Chile: V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
- Romero, A., Galvín, P., Domínguez, J., 2012. Comportamiento dinámico de viaductos cortos considerando la interacción vehículo-vía-estructura-suelo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*; 28(1):55-63.
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56.
- Salomón, J., 2017. Tomografía de ruido sísmico de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Estructura, Sísmica y Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Valenzuela, G. (1978). Suelo de fundación del gran Santiago. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N° 33.
- Vergara, Loreto, & Verdugo, Ramón. (2015). Condiciones geológicas-geotécnicas de la cuenca de Santiago y su relación con la distribución de daños del terremoto del 27F. *Obras y proyectos*, (17), 52-59. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000100007>
- Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J. C., Madariaga, R., Campos, J., & Alvarez, M. (2009). Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1-2), 86-95.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(1), 89–107.