

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



DEFINICIÓN Y SIMULACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS
EN LA FALLA DE SAN RAMÓN MEDIANTE
SHAKERMAKER

EDUARDO DAVID TORRES MELO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN OBRAS CIVILES

PROFESOR GUÍA: JOSÉ ANTONIO ABELL MENA

SANTIAGO, FEBRERO DE 2023

Certifico que he leído esta memoria y que en mi opinión su alcance y calidad son completamente adecuados como para ser considerada una memoria conducente al título de Ingeniero.

José Antonio Abell Mena
(Profesor Guía)

Certifico que he leído esta memoria y que en mi opinión su alcance y calidad son completamente adecuados como para ser considerada una memoria conducente al título de Ingeniero.

Nombre Representante del Decano

Certifico que he leído esta memoria y que en mi opinión su alcance y calidad son completamente adecuados como para ser considerada una memoria conducente al título de Ingeniero.

Nombre Profesor Invitado

© Eduardo David Torres Melo 2023
Todos los derechos reservados.

Resumen

Recientes investigaciones plantean que la falla de San Ramón, ubicada al este de la ciudad de Santiago de Chile, representa una amenaza geológica para Santiago, por lo cual, se necesitan incluir medidas de mitigación y respuesta en las normativas sísmicas de las infraestructuras. Por lo tanto, es crucial anticipar el efecto de los movimientos sísmicos en las estructuras y reducir la incertidumbre en la ingeniería sísmica mediante estudios que combinan la ingeniería civil y la sismología.

En este trabajo se simularon registros sísmicos para distintas localidades de Santiago producidos por varios posibles escenarios sísmicos en la falla de San Ramón. A partir de dicho registros, se determinó medidas de intensidad local (por ejemplo: aceleración máxima e intensidades espectrales) y se comparará con lo estipulado por los códigos de diseño actuales. Además, se verificó que los resultados son coherentes con la literatura relevante y las normas chilenas, con el fin de establecer una base sólida para la realización de simulaciones mediante el método de reducción de dominio.

Los datos obtenidos se basan en la representación geológica de Santiago mediante el método UCSB y ShakerMaker, junto con la descripción detallada de la falla y la selección de las estaciones sísmicas propuestas. A partir de las simulaciones, se obtuvieron los primeros parámetros de la corteza terrestre relacionados con la falla, los cuales variaron ligeramente en comparación con otros estudios para las cuatro magnitudes consideradas. Los valores que se obtuvieron, pertenecen a los casos; $Mw = 6.5$ con ruptura bilateral 1, $Mw = 6.7$ con ruptura norte-sur 2, $Mw = 6.9$ con ruptura sur-norte 3 y $Mw = 7.0$ con ruptura bilateral 2, donde los resultados mostraron que a medida que aumenta la intensidad del sismo, también lo hacen los valores de PGD, PGV y PGA, excepto en la zona de hanging-wall (sector oriente de Santiago), la cual siempre tiene valores altos, donde norte-sur resulta ser el modo de ruptura más grave, seguido por el tipo bilateral.

Las simulaciones ilustran los impactos de cada sismo en la falla de San Ramón. Las amplitudes de PGD, PGV y PGA incrementan conforme la intensidad del sismo, excepto en la zona hanging-wall (justo sobre la falla en el sector oriente de Santiago), que muestra valores más elevados. Además, es fundamental llevar a cabo más estudios sobre la falla para asegurar la seguridad y estabilidad de las estructuras ante un sismo.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo. A mi profesor guía del proyecto de título, el académico José Antonio Abell de la Universidad de Los Andes, por su orientación, paciencia y conocimientos durante todo el proceso de investigación. Al académico Jorge Crempien de la Pontificia Universidad Católica, por otorgar su tiempo en orientar sobre los métodos sismológicos utilizados y facilitar resultados de sus investigaciones.

A mi familia, en especial a mis padres y hermano, por darme un apoyo incondicional en toda mi etapa universitaria. Hacia mi abuela y mi tía por siempre estar presentes hasta el final de mi carrera, dándome el ánimo y alegrías máspreciadas. A los amigos que conocí en el transcurso de estos años, brindando buenos momentos y apoyo en momentos difíciles. Agradezco a la Universidad de Los Andes y a la facultad de Ingeniería, por permitirme acceder a importantes recursos bibliográficos, instalaciones y recursos tecnológicos. Finalmente, quiero agradecer a los docentes que me acompañaron a lo largo de mi formación en Ingeniería Civil, por haberme brindado sus conocimientos teóricos, prácticos y valóricos, los cuales permitieron desenvolverme de manera efectiva en mi carrera profesional.

Este trabajo se lo dedico a mis seres queridos, en especial a mi familia.

Índice general

Resumen	IV
Agradecimientos	V
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Metodología	4
1.4. Estructura de la memoria	4
1.5. Alcances	5
2. Marco teórico	6
2.1. Conceptos previos a la simulación de escenarios en la FSR	6
2.1.1. Sismo	6
2.1.2. Ondas sísmicas	7
2.1.3. Falla Geológica	8
2.1.4. Geometría de la falla	9
2.1.5. Sismograma	10
2.1.6. Magnitud	10
2.2. Características de la FSR	11
2.3. Método de frecuencia - número de onda F-K	13
2.4. Método de simulación de movimientos en fallas UCSB	16
2.4.1. Funciones de Green	17
2.4.2. Limitaciones del método	19
2.5. ShakerMaker	20
2.5.1. Sistema de coordenadas en ShakerMaker	20
2.6. Clúster virtual de ejecución	21
2.7. Normas Chilenas	21

2.7.1. Norma NCh 433	22
2.7.2. Norma NCh 2369	25
3. Simulación de procesos de ruptura	26
3.1. Implementación de método UCSB	26
3.2. Configuración inicial de ShakerMaker	29
3.2.1. Setup general	29
3.2.2. Descripción de la geología de Santiago	30
3.2.3. Descripción del sistema de coordenadas de la FSR	32
3.3. Sitios escogidos pertenecientes a la FSR	34
3.3.1. Descripción de las estaciones en sistema UTM	36
3.4. Visualización del área de la FSR simulada	38
4. Simulación de registros sísmicos	40
4.1. Resultados iniciales de las realizaciones	40
4.1.1. Strike, dip y rake	41
4.1.2. Slip	47
4.1.3. Isócronas	52
4.1.4. Tiempos de ruptura	59
4.1.5. Resumen de los resultados iniciales	64
5. Análisis de resultados y sugerencias	66
5.1. Valores PGD, PGV y PGA obtenidos	67
5.1.1. Duración de llegada de ondas P y S	76
5.2. Pseudoespectros obtenidos por ShakerMaker	79
6. Conclusiones	86
Bibliografía	90
Anexos	92
A. Estructura de velocidades utilizada	92
B. Archivos de entrada .inp utilizados	93

Índice de figuras

2.1.	Límite Convergente de Placas	7
2.2.	Onda P y Onda SV	8
2.3.	Falla de San Andrés	9
2.4.	Notación geométrica del plano de falla	10
2.5.	Falla de San Ramón	12
2.6.	Semiespacio de N capas	14
2.7.	Desplazamiento vertical en función de k	15
2.8.	Integrando $F - K$	16
2.9.	Combinación de sismogramas de baja frecuencia y alta frecuencia . .	18
2.10.	Sistema de coordenadas ShakerMaker	21
2.11.	Zonificación sísmica de las Regiones IV a X y Región Metropolitana .	23
2.12.	Zonificación sísmica por comunas para la Región Metropolitana . .	24
3.1.	Ejemplo de archivo .inp	27
3.2.	Sección de código que crea el modelo, parametriza y ejecuta	29
3.3.	Valor de pt_rt y de las velocidades de propagación máxima y mínima	30
3.4.	Modelo de corteza utilizado para Santiago	31
3.5.	Lectura de <i>FFSP_OUTPUT</i> en ShakerMaker	32
3.6.	ShakerMaker genera velocidad de ruptura	33
3.7.	Zonas modeladas de la FSR	34
3.8.	Estaciones simuladas en ShakerMaker	35
3.9.	Carga de estaciones en ShakerMaker	36
3.10.	Estaciones simuladas relacionadas con archivo de salida	37
3.11.	FSR simulada en ShakerMaker	39
4.1.	Esquema referencial de las realizaciones	40
4.2.	Sistema de coordenadas strike, dip y rake	41
4.3.	Valor de strike en ShakerMaker	42
4.4.	Valor de dip en ShakerMaker	44

4.5. Valor de rake en ShakerMaker	46
4.6. Valor de slip en ShakerMaker para Mw = 6.5	48
4.7. Valor de slip en ShakerMaker para Mw = 6.7	49
4.8. Valor de slip en ShakerMaker para Mw = 6.9	50
4.9. Valor de slip en ShakerMaker para Mw = 7.0	51
4.10. Isócronas para Mw = 6.5 con ruptura bilateral 1	53
4.11. Isócronas para Mw = 6.5 con ruptura bilateral 2	54
4.12. Isócronas para Mw = 6.5 con ruptura bilateral 3	55
4.13. Isócronas para Mw = 6.7 con ruptura bilateral	56
4.14. Isócronas para Mw = 6.9 con ruptura bilateral	57
4.15. Isócronas para Mw = 7.0 con ruptura bilateral	58
4.16. Trigger time en ShakerMaker para Mw = 6.5 bilateral 1	60
4.17. Trigger time en ShakerMaker para Mw = 6.7 norte-sur 1	61
4.18. Trigger time en ShakerMaker para Mw = 6.9 sur-norte 1	62
4.19. Trigger time en ShakerMaker para Mw = 7.0 bilateral 1	63
5.1. PGD, PGV y PGA de estación H1 para Mw = 6.5 bilateral 1	69
5.2. PGD, PGV y PGA de estación N2 para Mw = 6.5 bilateral 1	70
5.3. PGD, PGV y PGA de estación I3 para Mw = 6.5 bilateral 1	71
5.4. PGD, PGV y PGA de estación F1 para Mw = 6.5 bilateral 1	73
5.5. Pseudoespectro dirección Este para Mw = 6.5 bilateral 1	81
5.6. Pseudoespectro para la norma NCh 2369	82
5.7. Pseudoespectro dirección Norte para Mw = 6.5 bilateral 1	83
5.8. Pseudoespectro dirección Vertical para Mw = 6.5 bilateral 1	84
A.1. Estructura de velocidades	92
B.1. Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 1 de Mw = 6.5	93
B.2. Diferencias en archivos .inp para los tipos de rupturas	95
B.3. Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 2 de Mw = 6.5	96
B.4. Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 3 de Mw = 6.5	96
B.5. Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 1 de Mw = 7.0	97

Índice de cuadros

2.1. Valores de la aceleración efectiva máxima del suelo A_0 (PGA)	25
4.1. Resumen de resultados iniciales	64
5.1. Valores máximos para $Mw = 6.5$ BL 1	74
5.2. Valores máximos para $Mw = 6.7$ NS 2	74
5.3. Valores máximos para $Mw = 6.9$ SN 3	75
5.4. Valores máximos para $Mw = 7.0$ BL 2	75
5.5. Tiempos de llegada de ondas P y S para $Mw = 6.5$ BL 1	77
5.6. Tiempos de llegada de ondas P y S para $Mw = 6.7$ NS 2	78
5.7. Tiempos de llegada de ondas P y S para $Mw = 6.9$ SN 3	78
5.8. Tiempos de llegada de ondas P y S para $Mw = 7.0$ BL 2	79

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La importancia de predecir de manera correcta el efecto que producen los movimientos sísmicos sobre las estructuras es de gran relevancia, debido a que se requiere de manera constante una necesidad de cuantificar y reducir la incertidumbre en la ingeniería sísmica. Por ende, los actuales estudios de predicciones sísmicas se basan en múltiples procesos físicos simulados por parte de la ingeniería civil, que van siendo de utilidad en conjunto con los propios estudios del área de la sismología.

En cuanto a la falla de San Ramón (FSR) la cual, en estos momentos, es una amenaza geológica en la ciudad de Santiago, no existen políticas públicas integrales que la consideren como riesgosa en la planificación urbana. Por lo tanto, es necesario comenzar a incluir en las normativas sísmicas de las infraestructuras como forma de mitigación y respuesta ante su eventual activación. Respecto a esto, un análisis histórico indica que, en los últimos 40 años, la urbanización en el sector, luego de la ampliación del suelo urbanizable hacia el sector cordillerano, se incrementó en un 55 % hasta el año 2017, lo que implica un gran riesgo para la población asentada en el lugar (Easton et al., 2022).

Ahora, la FSR, siendo un importante rasgo tectónico ubicado cerca del área metropolitana de Santiago de Chile, ha experimentado al menos dos terremotos mayores con magnitudes $Mw \geq 7$ en los últimos 17 mil años, según estudios paleo sísmicos. Recientemente, el Centro Sismológico de Chile ha ampliado su red sísmica permanente y ha detectado más de 900 terremotos de menor magnitud ($Mw \leq 2.5$) en la región de estudio, lo que ha permitido una mejor comprensión de la sismicidad de la zona.

Los resultados de los estudios sugieren que la sismicidad del cabalgamiento andino occidental está acomodando esfuerzos compresivos nor-este, consistentes con la convergencia de la Placa de Nazca. Basándose en la sismicidad mejorada, se ha podido refinar el escenario de un posible terremoto de magnitud Mw 7.5 en la Falla de San Ramón, con aceleraciones máximas del terreno cercanas a 0.8 g cerca de la escarpa de la falla (Ammirati et al., 2019).

Otros estudios indican que la actividad sísmica en fallas cercanas a ciudades puede causar daños catastróficos, pero la falta de un registro completo dificulta la mitigación de los efectos del terremoto. Se desplegó una red sismológica y se obtuvo una imagen de alta resolución de la geometría de la falla para determinar su ángulo de buzamiento y capacidad para penetrar la superficie. Utilizando las ecuaciones empíricas, se estimó la distribución de la aceleración en Santiago y se identificaron zonas de alto riesgo, como la pared colgante o (*hanging – wall*) y zonas estrechas donde la falla podría romper la superficie, con valores de *PGA* horizontales que podrían producir el colapso de los edificios (Estay et al., 2016).

El trabajo de este proyecto de título se enmarca en el contexto del proyecto Fondecyt de Iniciación N.^o 11220530, titulado “Quantification of incremental model uncertainty in earthquake performance assessment through multi-fidelity simulation and Bayesian inference”, donde se busca utilizar simulación de escenarios sísmicos en la falla de San Ramón y otras fuentes corticales en la cercanía del gran Santiago, para caracterizar la amenaza sísmica de este tipo de fuentes y la incerteza en distintos niveles de modelación.

Esta se demostrará mediante el modelado de fallas sísmicas en Santiago, sujeto a escenarios hipotéticos de terremotos de corteza terrestre. Este caso se elige principalmente por lo anteriormente planteado y porque respecto de la FSR, no hay registros sísmicos, existiendo buenas razones para sospechar que esta produciría grandes intensidades y daños en Santiago. Por lo tanto, una forma de contar con registros sísmicos que permitan postular espectros de respuesta y caracterizar el desempeño de estructuras es produciéndolos mediante simulación sísmica.

Además de poder determinar las medidas de intensidad sísmica, se busca comprobar que se pueden hacer estas simulaciones, las cuales entregan resultados coherentes

con la literatura relevante y así, tener certeza de que se cuenta con una buena base para realizar las simulaciones con el método de reducción de dominio.

Por último, cabe destacar que solo existe evidencia de sismos corticales que ocurrieron en la zona, como fueron el Terremoto de Las Melosas en 1958 y el de “Cristo de mayo” en 1647, resultando con un alto potencial destructivo. Por lo tanto, por ser lo suficientemente infrecuentes, están mal representados en las estimaciones estructurales de riesgo actuales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Para el presente estudio, se establece como objetivo general, postular escenarios sísmicos para la FSR mediante la creación de descripciones cinemáticas del proceso de ruptura, usando el programa ShakerMaker que se basa en el método de frecuencia-número de onda para simulación de registros sísmicos, comparando lo obtenido con lo que señala actualmente el código sísmico.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para el presente estudio, se establecen los siguientes objetivos:

- Describir la geología de Santiago con valores de espesores, velocidades P y S , densidad y factores de atenuación Q_p y Q_s , que corresponden a los rangos de valores para parámetros de las capas del modelo $F - K$.
- Describir la FSR en un sistema de coordenadas único, para parámetros como; traza superficial, ángulo de *dip*, *rake*, *strike*, deslizamiento o *slip*, área y el generador de rupturas.
- Definir sitios de análisis en Santiago pertenecientes a la FSR en sistema UTM.
- Simular algunos valores de los parámetros de corteza, usando las fallas cinemáticas en distintos sitios de Santiago.
- Recabar estadísticas de las distintas medidas de intensidad obtenidas mediante las simulaciones; peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), peak ground displacement (PGD), espectros y arribo de ondas P y S, para comparar con el espectro de las normas chilenas NCh433 y NCh2369.

1.3. Metodología

En primer lugar, se realizó una orientación y revisión bibliográfica acerca del método de frecuencia – número de onda $F - K$ y de la documentación necesaria. Junto con esto, se llevó a cabo la instalación de ShakerMaker y el entorno virtual necesario para realizar las simulaciones iniciales. Estos primeros escenarios obedecen a fuentes sismológicas puntuales con diversas capas en la corteza terrestre.

Luego se describió la FSR en un sistema de coordenadas único, para parámetros como; traza superficial, ángulo de *dip*, *rake*, *strike*, deslizamiento o *slip*, área y el generador de rupturas.

Posteriormente, se realizaron simulaciones sísmicas mediante ShakerMaker con 4 magnitudes distintas, de menor a mayor escala para distintos puntos de la Región Metropolitana (10 estaciones sismológicas), pertenecientes a la FSR. Para estas, se recabaron estadísticas de las cuales se destacan parámetros como *PGA*, *PGV*, *PGD*, espectros y duración del evento sísmico.

Finalmente, se recabaron las distintas medidas de intensidad obtenidas mediante las simulaciones *PGA*, *PGV*, *PGD*, espectros y duración, para comparar con otros estudios realizados anteriormente y con el espectro de las normas estructurales chilenas NCh433 y NCh2369.

1.4. Estructura de la memoria

La estructura de la presente investigación se organizó de la siguiente manera:

En el segundo capítulo se incluye un marco teórico con los principales temas de interés para esta investigación. En esta, se incluyen, conceptos y métodos utilizados, códigos y entorno de ejecución de las diversas simulaciones.

El tercer capítulo describe la configuración geológica de Santiago utilizando el método UCSB y ShakerMaker y también se describe la FSR en un sistema de coordenadas único, incluyendo los parámetros de la corteza. Además, se definen las estaciones sismológicas y su ubicación en relación con el centro de la falla.

El cuarto capítulo permite conocer las realizaciones, los tipos de rupturas y magnitudes para cada estación. Además, de los primeros resultados de parámetros de corteza; *strike* y *dip*, *rake*, *slip*, isócronas y tiempos de ruptura o *triggertime(tt)*.

En el quinto capítulo se analizan los eventos estudiados y se realiza la comparación de los parámetros con las normas chilenas. Además, se sugieren puntos importantes para futuras simulaciones.

En el sexto capítulo, se detallan las conclusiones y se sintetizan los principales resultados. Se agregan también las observaciones de cada objetivo propuesto, limitaciones del estudio y trabajo futuro propuesto.

1.5. Alcances

Este estudio se limita a realizar simulaciones solamente en el área que comprende la FSR, por lo que, si bien, la metodología utilizada puede ser llevada a múltiples casos, no es así respecto de los parámetros de entrada y de salida que resultan del análisis.

Junto a esto, la generación de datos para el uso del método de reducción de dominio queda fuera del alcance de este trabajo. Esta es útil para definir de manera correcta los sitios que se analizarán posteriormente con dicho método.

Además, está fuera del alcance de esta propuesta, la consideración de otras fuentes de incertidumbre, como la de los parámetros utilizados. Finalmente, entre los alcances de este trabajo está la caracterización de la incertidumbre incremental relativa entre las ubicaciones de los sitios por estudiar, y la desagregación de la incertidumbre entre los efectos de la fuente, la ruta, el sitio y la fidelidad del modelo en las diferentes escalas de propagación sísmica.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo, se describe la teoría y los métodos utilizados para entender y simular las fallas sísmicas, los programas ejecutados y el entorno en el que se realizan las simulaciones finales. Esto con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos.

2.1. Conceptos previos a la simulación de escenarios en la FSR

2.1.1. Sismo

Se define como sismo el proceso de generación y propagación de ondas elásticas al interior de la Tierra, lo que, al llegar a la superficie de manera súbita, producen movimiento y vibración del suelo, pudiendo causar daños en la superficie. En Chile, un sismo con intensidad en la Escala de Mercalli modificada (MM) de grado mayor o igual a VII es capaz de perjudicar estructuralmente y es lo que se denomina un terremoto.

Se debe señalar que la principal causa de la acumulación de energía es la interacción de las placas tectónicas en sus bordes activos, lugar donde ocurren esfuerzos y deformaciones. Como se puede ver en la Figura 2.1, según la tectónica de placas, la litosfera se divide en numerosas placas que se mueven constantemente unas respecto de otras.

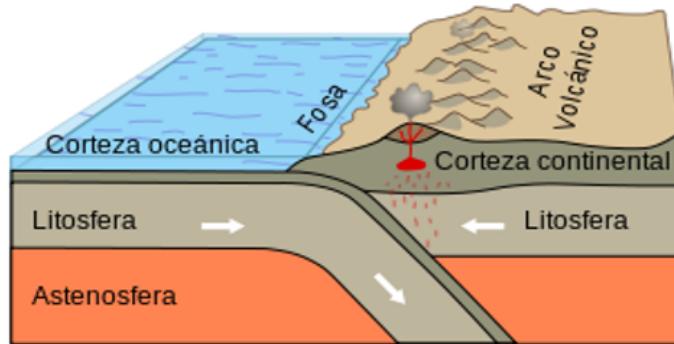


Figura 2.1: Límite Convergente de Placas
Fuente: USGS (2022)

Cuando dos placas convergen, una se desliza debajo de la otra, causando la acumulación de energía que puede liberarse en forma de terremoto. El territorio Chileno, en gran parte, se encuentra sobre la placa Sudamericana, cerca del margen convergente con la placa de Nazca, lo que aumenta la probabilidad de terremotos (CSN, 2022).

2.1.2. Ondas sísmicas

Al ocurrir un sismo, se producen diferentes tipos de ondas sísmicas, las cuales se dividen en: ondas de cuerpo y superficiales. Por un lado, las primeras, que pueden viajar por el interior de la Tierra, se subdividen, a su vez, en dos tipos: ondas P y ondas S.

En cuanto a las P, también denominadas primarias, de compresión o longitudinales, son análogas a las ondas sonoras. El movimiento de una partícula individual que atraviesa una onda P es paralelo a la dirección de desplazamiento del sismo. Al igual que las ondas sonoras, las ondas P pueden atravesar sólidos y fluidos.

Por otro lado, las ondas S, también conocidas como transversales, provocan deformaciones por corte al atravesar un material. El movimiento de una partícula individual es perpendicular a la dirección de desplazamiento de las ondas S. Ahora bien, la dirección del movimiento de la partícula puede utilizarse para dividir las ondas S en dos componentes, SV (movimiento en el plano vertical) y SH (movimiento en el plano horizontal) (Kramer, 1996). La Figura 2.2 representa lo recién mencionado.

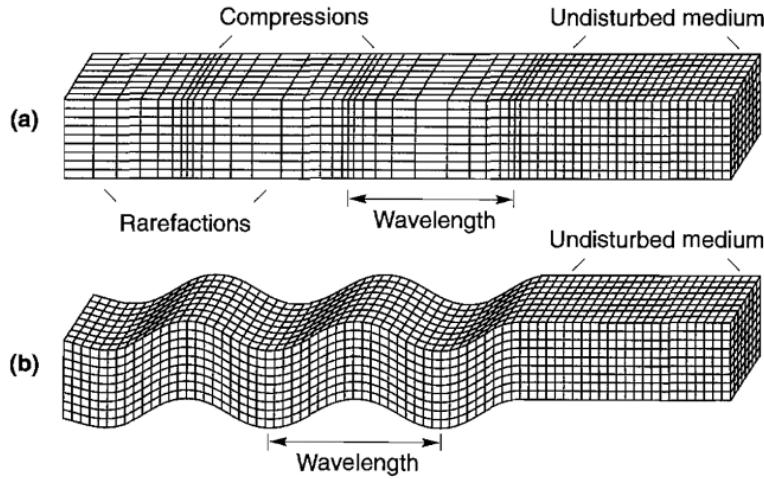


Figura 2.2: (a) onda P y (b) onda SV

Fuente: Bolt (1993)

Ahora, al conocer las velocidades de ondas, estas permiten hacer una localización precisa de sismos locales cerca de una estación sismológica, ya que se puede calcular la distancia utilizando la ecuación básica de velocidad (distancia dividido tiempo). Considerando ambas velocidades como constantes. Para esto se puede utilizar la Ec. (2.1).

$$(S - P)_{time} = \left(\frac{x}{v_s} - t_0 \right) - \left(\frac{x}{v_p} - t_0 \right) \Rightarrow x = (S - P)_{time} = \left(\frac{v_p v_s}{v_p - v_s} \right) . \quad (2.1)$$

donde v_p y v_s son las velocidades de las ondas P y S , respectivamente, y $(S - P)_{time}$ es la diferencia de los tiempos de llegada entre ambas ondas. El resultado que se obtiene de la variable x indica la distancia entre la estación sismológica y el sismo local. Para este estudio, las estructuras de velocidades fueron administradas mediante un archivo de entrada que se observa en detalle en el anexo A, y el cálculo mediante software de las distancias será explicado más adelante.

2.1.3. Falla Geológica

Se denomina falla a una fractura terrestre, en la cual se ha generado un movimiento entre dos porciones de la corteza que va a producir desplazamientos nuevos o preexistentes en la estructura geológica. Su longitud puede oscilar entre varios metros y cientos de kilómetros y se extienden desde la superficie del suelo hasta profundidades de varios kilómetros.

Cabe destacar que la presencia de fallas no significa necesariamente que se puedan esperar terremotos, porque el movimiento puede producirse asísmicamente o esta puede estar inactivo. Por otra parte, la ausencia de fallas superficiales observables, no implica que no puedan producirse terremotos, de hecho, la ruptura de las fallas no alcanza la superficie terrestre en la mayoría de los terremotos. A continuación, en la Figura 2.3 se observa una de las fallas observables más conocidas.



Figura 2.3: Falla de San Andrés
Fuente: Peter Menzel (2019)

2.1.4. Geometría de la falla

En notación geológica estándar, la orientación de una falla se describe por su rumbo y buzamiento (*strike* y *dip* respectivamente). El *strike* es la línea horizontal producida por la intersección del plano de falla y un plano horizontal, como se observa en la Figura 2.4, y se da como un acimut (por ejemplo, N600E) significa relativo al norte. El *dip* es el ángulo entre el plano de falla y el plano horizontal, medido perpendicularmente al *strike*. Una falla vertical tiene un *dip* de 90 (Kramer, 1996). Esto también se puede apreciar más adelante en la Figura 2.10, en el sistema de coordenadas de ShakerMaker.

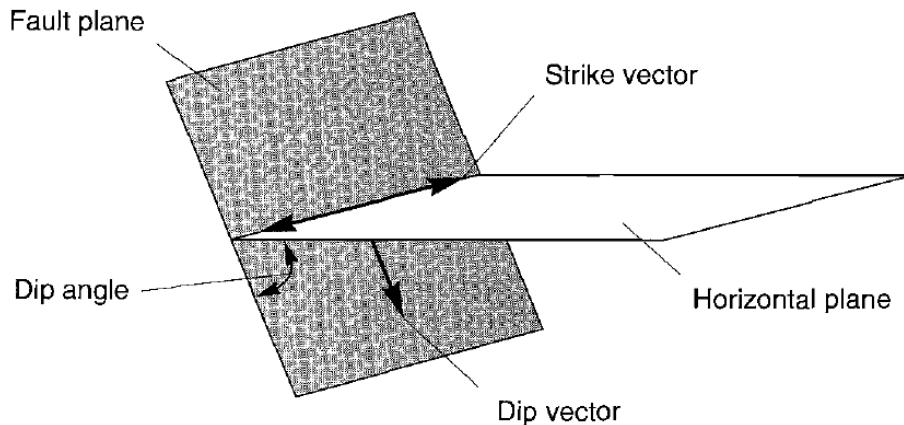


Figura 2.4: Notación geométrica de la orientación del plano de falla

Fuente: Kramer (1996)

2.1.5. Sismograma

Un sismograma es una representación gráfica de la intensidad de las ondas sísmicas producidas por un sismo, el cual permite conocer, localización e intensidad del sismo, así como información sobre el tipo de roca a través del cual pasaron las ondas sísmicas, entre otra información.

El sismómetro registra el movimiento natural o artificial del suelo, este tiene dos componentes horizontales y uno vertical para determinar la velocidad de las ondas sísmicas y localizar adecuadamente el hipocentro del sismo. Con el sismograma se puede visualizar el arribo de las ondas P y S, siendo la primera onda registrada la P debido a su mayor velocidad.

Es importante mencionar que los sismogramas de esta investigación fueron obtenidos mediante las simulaciones realizadas en Python, que se verán en detalle en el transcurso del documento.

2.1.6. Magnitud

Las magnitudes sísmicas Mw y M0 son dos formas de medir la magnitud de un terremoto, siendo Mw (Moment Magnitude) una medida de la energía liberada por un sismo, calculada a partir de la amplitud de las ondas sísmicas y la duración del evento. Esta magnitud se utiliza como una escala logarítmica, de manera que un au-

mento de 1 en la escala representa un aumento de 10 veces en la energía liberada. La escala Mw generalmente varía de 0 a 10.

Por otro lado, el momento sísmico M0, es otra medida de la energía liberada por un terremoto, que se calcula a partir de la magnitud de las ondas sísmicas y la distancia que se desplazan las rocas. Al igual que Mw, M0 es una escala logarítmica y se utiliza para comparar la energía liberada por diferentes terremotos. La relación entre las dos magnitudes se puede expresar como la ecuación 2.2.

$$Mw = \frac{2}{3} \times \log_{10}(M0) - 10,7 \quad (2.2)$$

Esta fórmula muestra que, en general, los terremotos de mayor magnitud (es decir, aquellos que liberan más energía) tendrán valores de M0 más altos y valores de Mw correspondientemente más altos.

Cabe destacar que la escala Mw suele ser más utilizada y más conocida que la escala M0 en la actualidad, ya que Mw es considerada una medida más precisa y confiable de la magnitud de un terremoto.

2.2. Características de la FSR

De acuerdo con Ammirati et al. (2019) la mayoría de la sismicidad registrada en el centro de Chile, se relaciona con la subducción de la Placa de Nazca. Hacia el este, una menor cantidad de sismos se observa a una profundidad de 0 - 30 km debajo del cabalgamiento andino occidental. Los estudios paleo sísmicos indican que al menos dos terremotos importantes ($M \geq 7$) han ocurrido en los últimos 17 mil años, asociados a la falla de San Ramón, una falla inversa situada al este de Santiago, cerca de la zona metropolitana de Santiago, que se puede observar en la Figura 2.5.

La ruptura cercana a la superficie representa una amenaza considerable para el centro urbano, especialmente para la ciudad de Santiago, que alberga a casi la mitad de la población de Chile, concentrando una gran parte de la actividad económica del país. El sismo de Las Melosas de 1958 fue el evento de corteza terrestre más fuerte registrado en la región y causó varias víctimas, derrumbes de edificios y daños severos a la infraestructura de distribución de agua (Ammirati et al., 2019).

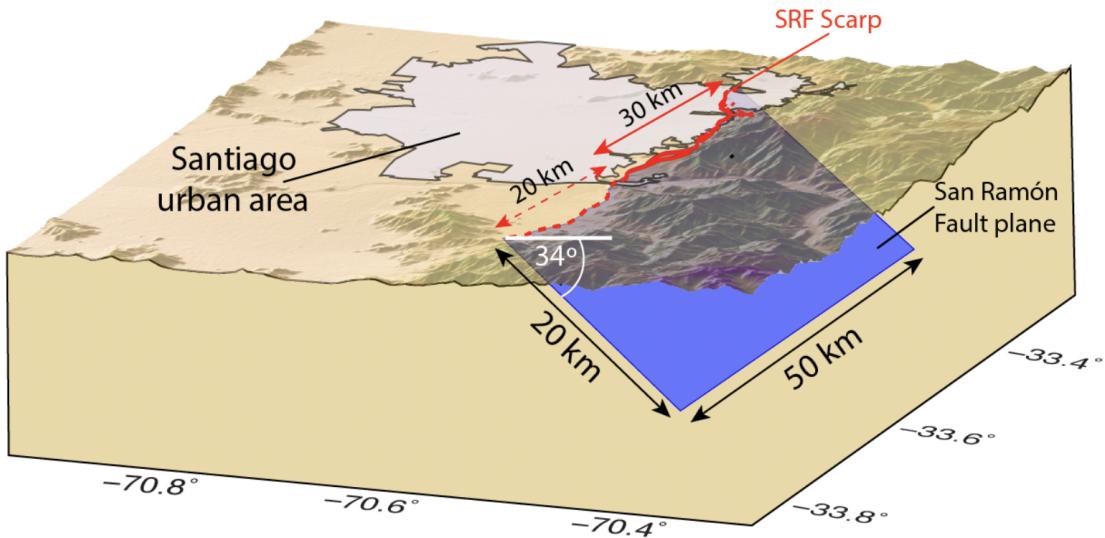


Figura 2.5: Falla de San Ramón
Fuente: Ammirati et al. (2019)

La Figura 2.5 ilustra la geometría del plano de la Falla de San Ramón, considerada para un escenario de ruptura mayor. La línea continua representa la escarpa de la falla descrita en estudios previos y la línea roja discontinua es la extensión sur de la falla inferida a partir de la sismicidad de corteza recientemente reportada. La ruptura de todo el plano de falla generaría un terremoto de magnitud Mw 7.5 y el área metropolitana de Santiago, que alberga a más de 6.5 millones de personas, se encuentra dentro de la zona de peligro potencial.

Estudios recientes han evidenciado la ocurrencia de 2 eventos sísmicos mayores en la FSR aproximadamente hace 8 mil y 1787 años, con un deslizamiento asociado estimado en 4.7 - 4.9 metros, correspondiendo a eventos sísmicos de magnitud comprendidos entre $7.2 < \text{Mw} < 7.4$.

En la zona metropolitana de Santiago, a una distancia de 20 km de la escarpa de la falla, estas magnitudes generarían aceleraciones del terreno mucho más fuertes que las observadas en terremotos de gran magnitud ocurridos en el margen chileno. Por ejemplo, el terremoto del Maule de 2010 (Mw 8.8) produjo una aceleración máxima del terreno de aproximadamente 0.3g en Santiago (Armijo et al., 2010).

Otros estudios previos que han simulado las aceleraciones del terreno generadas por la ruptura de la FSR han logrado valores PGA (Aceleración máxima en el suelo) de $\approx 0.7g$ cerca de la escarpa de la falla, para sismos entre $6.7 < Mw < 7.0$ (Ammirati et al., 2019).

2.3. Método de frecuencia - número de onda F-K

El método $F - K$ permite simular los movimientos en un punto específico de la corteza terrestre dada una o más fallas descritas cinemáticamente. El método asume un semiespacio plano estratificado en capas y aprovecha las simetrías y cálculos en el espacio de frecuencia - longitud de ondas, esto para lograr el cálculo de una manera muy eficiente sin requerir la simulación directa de la propagación de ondas desde la fuente al sitio de interés.

Para un vector de desplazamiento - tensión en un medio homogéneo sin fuentes, se establece un sistema de coordenadas cilíndricas ($er, e\theta, ez$), con ez apuntando hacia arriba. El desplazamiento en un medio verticalmente heterogéneo puede expandirse en términos de tres vectores ortogonales. De acuerdo con Zhu (2011) se muestra la fórmula 2.3.

$$u(r, \theta, z, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0, \pm 1, \dots} \int e^{-iwt} dw \int_0^\infty kdk (U_z R_m^k + U_r S_m^k + U_\theta T_m^k) \quad (2.3)$$

dónde R_m^k, S_m^k, T_m^k se denominan vectores armónicos de superficie.

Por su parte, un semiespacio estratificado consta de N capas sobre un semiespacio en el fondo. La fuente se encuentra a una profundidad de h entre la capa m y $m+1$ con idénticas propiedades elásticas, como se observa a continuación en la Figura 2.6.

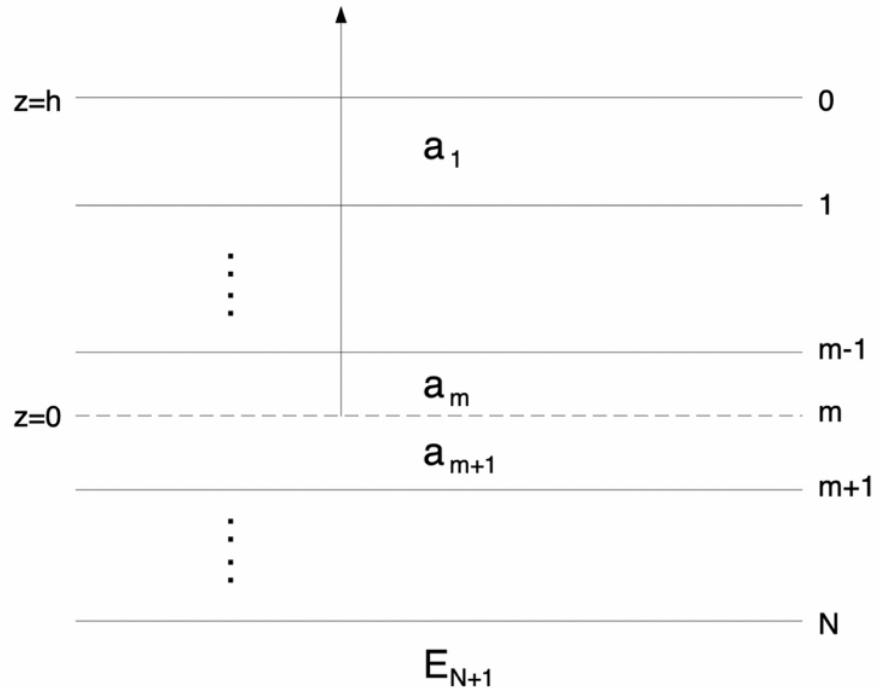


Figura 2.6: Semiespacio de N capas, método $F - K$
Fuente: Zhu (2011)

Luego, el cálculo de la función de Green implica la siguiente doble integración de la fórmula 2.4.

$$\int_0^\infty e^{i\omega t} dw \int_0^\infty U(w, k) J_n(kr) dk \quad (2.4)$$

De acuerdo con Zhu (2011) el método de integración frecuencia-número de onda, $F - K$ realiza primero la integración k mediante algún esquema de integración numérica. A continuación, en la fórmula 2.5, la integración ω se realiza fácilmente mediante la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT), pero, en este caso, se emplea la regla trapezoidal.

$$\int_{k1}^{k1+dk} g(k) dk = \frac{dk}{2} (g(k1) + g(k1 + dk)) \quad (2.5)$$

Así, el núcleo de desplazamiento vertical en función de k de la Figura 2.7 para diferentes valores de $Q\beta$ y Ω ($\omega = 0,47Hz$).

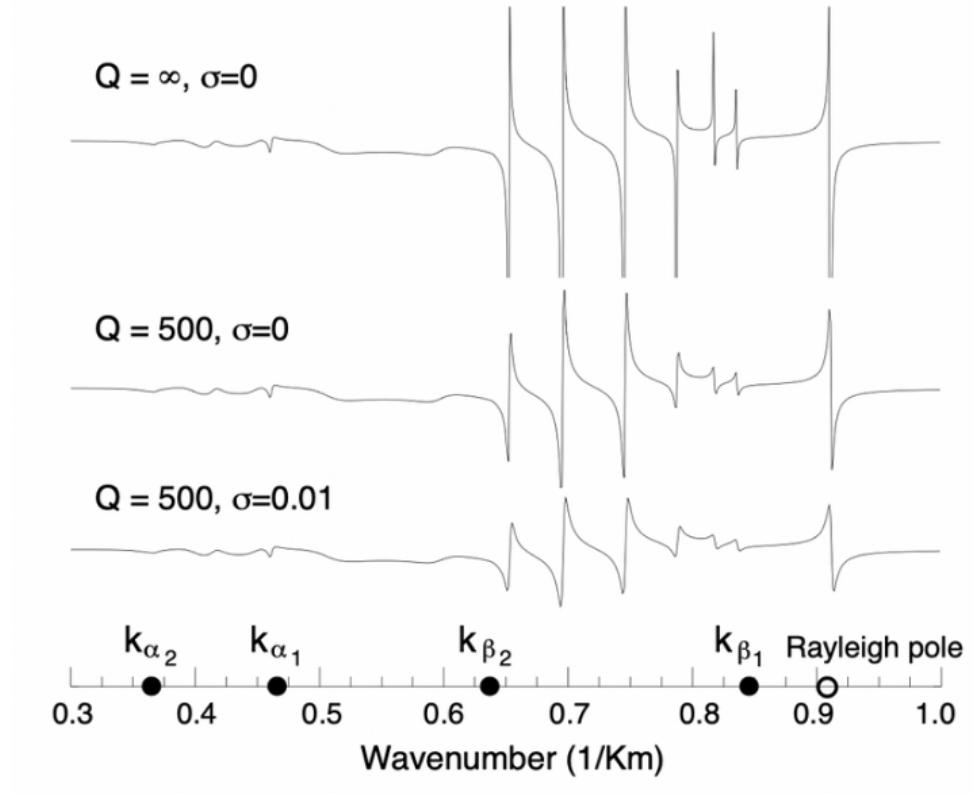


Figura 2.7: Desplazamiento vertical en función de k
Fuente: Zhu (2011)

Respecto a lo recién mencionado, el integrando $F - K$, $U(\omega, k)J_0(kx)$ en rangos de distancia de 100 km (arriba) y 1000 km (abajo), se obtiene la Figura 2.8.

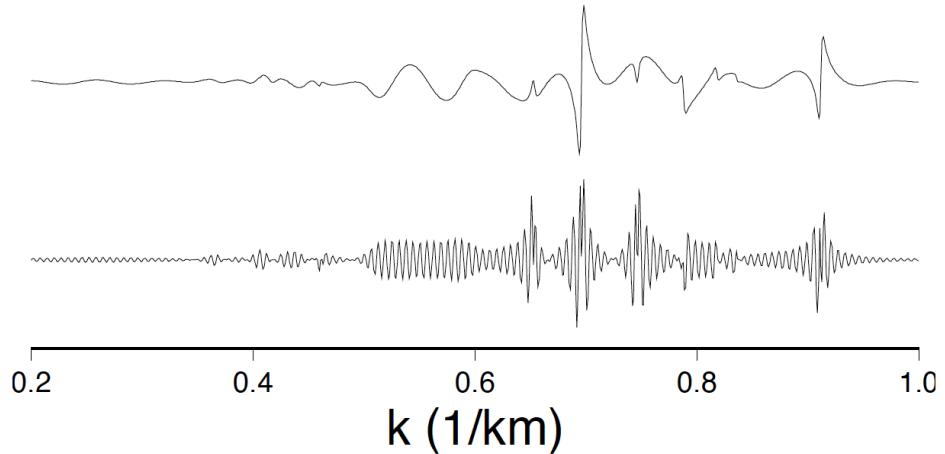


Figura 2.8: Integrando $F - K$

Fuente: Zhu (2011)

2.4. Método de simulación de movimientos en fallas UCSB

De acuerdo con Crempien and Archuleta (2015), a fin de conocer el método UCSB, es necesario comprender, en primer lugar, el teorema de representación de la ecuación 2.6. Este relaciona el deslizamiento en la falla con el desplazamiento del terreno en un punto arbitrario del campo.

$$\mu_n(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau = \iint_{\Sigma} s_i(x, \tau) c_{ijpq} v_j G_{np,q}(x, t - \tau; \xi, 0) d\Sigma \quad (2.6)$$

En la que $\mu_n(x, t)$ es la enésima componente del desplazamiento del suelo registrado en la posición x y el tiempo t ; $s_i(x, \tau)$ es la enésima componente del deslizamiento en el plano de la falla Σ en la posición ξ y el tiempo τ ; v_j es la j -ésima componente de la normal al plano de la falla; c_{ijpq} es el tensor de cuarto orden de los coeficientes elásticos; $G_{np,q}$ es la enésima componente de la función de Green para una fuente puntual aplicada en la dirección p . La integral sobre $d\Sigma$ es la suma sobre la falla de la convolución (la integral de $d\tau$) entre el deslizamiento sobre la falla y la derivada espacial de la función de Green $G_{np,q}$.

Para calcular el movimiento del suelo en un punto x debido a un terremoto en una falla específica, se necesitan la geometría de la falla (Σ y v_j), una descripción precisa del medio (densidades, velocidades elásticas y atenuación en el espacio 3D) y la función deslizamiento-tiempo en cualquier punto de la falla. El primer paso sería utilizar la reciprocidad de la función de Green y aplicar las fuerzas puntuales en la ubicación del observador para calcular las tracciones en la falla. Además, es necesario conocer la velocidad, la densidad y la estructura de atenuación en todo el espacio tridimensional.

Por otro lado, la descripción de la fuente, es decir, el deslizamiento $s_i(x, \tau)$ en la falla, en función del espacio y del tiempo, es completamente desconocida y es una elección individual, con dos restricciones globales: (1) el deslizamiento estático en las fallas debe reproducir el momento sísmico para el terremoto seleccionado, y (2) en relación con el tiempo de origen, el inicio del deslizamiento en cada punto de la falla debe ser causal con respecto a la velocidad de las ondas P en el medio (Crempien and Archuleta, 2015).

2.4.1. Funciones de Green

En el artículo de Crempien and Archuleta (2015), las funciones de Green se utilizan para calcular la propagación de ondas sísmicas en estructuras tridimensionales. Se utiliza un código de diferencias finitas de cuarto orden para calcularlas, pero su coste computacional limita su uso a frecuencias máximas de 0.5-2 Hz. Para frecuencias más altas, se utiliza el código 1D de frecuencia/número de onda otorgado por Zhu and Rivera (2002).

Ahora bien, las estructuras de velocidad 1D disminuyen la amplitud de las ondas de alta frecuencia (HF) a medida que aumenta la distancia a la falla. Para evitar esto, se calculan las funciones de Green a partir de un medio homogéneo con valores de ondas P y S justo por encima de la discontinuidad del Moho¹. Se utiliza el método de amplificación de cuarto de longitud de onda (QWAM) para aumentar las amplitudes de la función de Green en altas frecuencias. se cosen los sismogramas en las ondas de dominio utilizando el método otorgado por Liu and Archuleta (2004).

¹La discontinuidad del Moho es el límite entre la corteza terrestre y el manto. Se define por el claro cambio de velocidad de las ondas sísmicas al atravesar las distintas densidades de roca.

En la Figura 2.9, se muestra un ejemplo de la unión de sismogramas LF y HF para producir un sismograma de banda ancha (BB), se puede observar que el espectro de amplitud de Fourier (FAS) de LF es una década más pequeño que el FAS de HF a 20 Hz. Si el medio se especifica como una secuencia de capas horizontales, se utiliza el código 1D de frecuencia/número de onda de Zhu and Rivera (2002) por simplicidad.

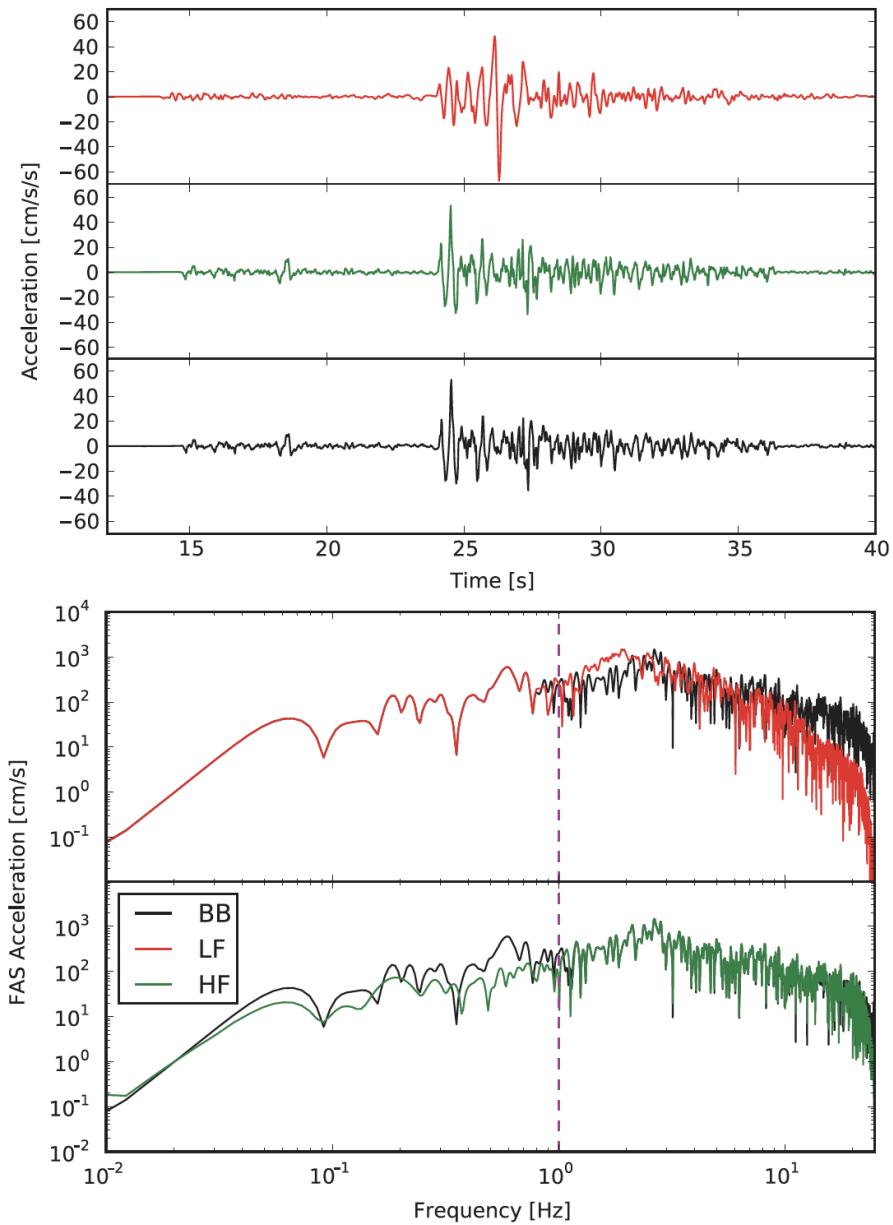


Figura 2.9: Sismogramas de baja frecuencia (LF) y alta frecuencia (HF)
 Fuente: Crempien and Archuleta (2015)

2.4.2. Limitaciones del método

Para Crempien and Archuleta (2015) existen limitaciones prácticas tanto para el código de diferencias finitas 3D como para el 1D. El código de frecuencia/número de onda de Zhu and Rivera (2002) no permite que una fuente y un receptor se encuentren a la misma profundidad. El cálculo de funciones de Green 1D se realiza utilizando matrices de profundidades y distancias epicentrales, pero no puede ser calculada para profundidad cero. Además, la descripción de la fuente cinemática tiene un estrechamiento cerca de los bordes de la falla que reduce el deslizamiento a cero en los bordes de la falla, por lo que el método no necesita calcular una función de Green a profundidad cero.

Existen otras limitaciones prácticas en el uso de funciones de Green HF, como el método QWAM, para calcular sismogramas en una estructura de corteza 1D. El método no tiene en cuenta la dispersión, lo que puede dar lugar a una duración incorrecta del movimiento del suelo. Además, el método de BB de UCSB no incluye la dispersión en los sismogramas. Otro problema es que la aproximación de un gradiente de velocidad puede requerir un gran número de capas, lo que aumenta el coste computacional. Sin un gradiente, puede haber cambios significativos en la amplitud causados por las reflexiones, lo que puede afectar la precisión de los sismogramas.

El método UCSB utiliza funciones de Green para estimar el movimiento del terreno durante un terremoto. Estas funciones son importantes para simular con precisión la propagación de las ondas LF y HF. Sin embargo, el método también se basa en otras fuentes de información sobre la estructura de la tierra, como la información sobre la attenuación (Crempien and Archuleta, 2015).

En cuanto a la integración y convolución del método, la falla se divide en varias sub fallas igualmente espaciadas en direcciones *strike* y *down – dip* (se pueden incluir puntos adicionales para minimizar artefactos de discretización), los valores de los parámetros cinemáticos se interpolan en estos puntos. Se aleatoriza el patrón de radiación para tener en cuenta la incoherencia en los sismogramas de alta frecuencia y el tiempo de cálculo está directamente relacionado con el número de puntos de cuadrícula internos y de sub fallas.

Al validar el método BB de la UCSB, se descubrió que el espectro de respuesta del HF estaba por debajo de la predicción debido a reflejos de rayos de longitud de onda

corta en las capas poco profundas de los modelos de estructura de velocidad 1D. Se cambió la estructura de velocidad 1D por una capa homogénea y elástica por encima del Moho y se modificó la función de velocidad de deslizamiento para garantizar un espectro Brune. Sin embargo, no se ha validado el código UCSB BB para terremotos de $M_w < 5.5$ debido a la falta de conocimiento de la estructura de correlación en esos casos (Crempien and Archuleta, 2015).

2.5. ShakerMaker

Esta herramienta permite, a ingenieros civiles y sismólogos, utilizar fácilmente el método de frecuencia – número de onda $F - K$. Además de permitir la generación de sismogramas artificiales, permite producir un conjunto de datos de movimientos del suelo para su análisis mediante el método de reducción de dominios (DRM). A su vez, los movimientos DRM se almacenan directamente en el formato H5DRM (Abell et al., 2022).

Respecto del método $F - K$, se implementa en lenguaje de programación Fortran, que se interconecta con Python a través de f2py². En estas, las clases que se construyen sobre f2py se elaboran para simplificar las tareas comunes de modelado.

Por último, el cálculo de las trazas de movimiento se realiza al emparejar todas las fuentes y todos los receptores, lo que, a su vez, se paralleliza utilizando MPI. Esto significa que ShakerMaker puede funcionar en ordenadores personales sencillos hasta en grandes clústeres de supercomputación, para aquellas simulaciones que requieran más capacidad (Abell et al., 2022).

2.5.1. Sistema de coordenadas en ShakerMaker

Este define sus coordenadas con x positivo hacia el Norte, y positivo hacia el Este y z positivo hacia abajo. El *strike* se define en el sentido de las agujas del reloj desde el Norte, el *dip* se mide desde la horizontal, y el ángulo de deslizamiento o *rake* aumenta en la dirección del *dip*, como se puede observar en la Figura 2.10.

²El propósito de la utilidad f2py, es proporcionar una conexión entre el lenguaje Python y Fortran. f2py es parte de NumPy (numpy.f2py) y también está disponible como una herramienta de línea de comandos independiente.

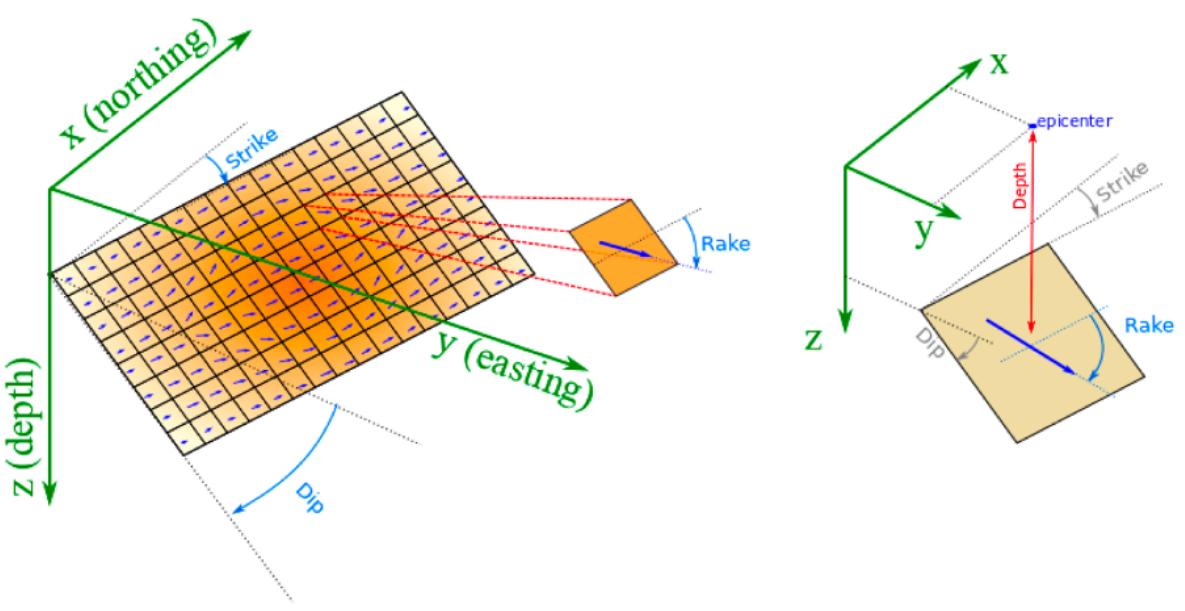


Figura 2.10: Sistema de coordenadas ShakerMaker
Fuente: Abell et al. (2022)

2.6. Clúster virtual de ejecución

Con el propósito de tener un mejor rendimiento y disponibilidad para realizar las simulaciones, se utiliza el clúster “Esmeralda” del laboratorio de Obras Civiles de la Universidad de Los Andes. Actualmente, está compuesto por 12 nodos de 32 GB, que se interconectan para facilitar tareas como aquellas simulaciones de gran escala que fueron necesarias para el estudio.

2.7. Normas Chilenas

Las normas NCh son un conjunto de normas técnicas, desarrolladas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) de Chile, que establecen requisitos y especificaciones para la calidad, seguridad y desempeño de productos, servicios y procesos en diversos sectores de la economía chilena.

El objetivo principal de las normas NCh es mejorar la calidad y la competitividad de los productos y servicios chilenos, garantizando su conformidad con los requisitos técnicos y de calidad establecidos en las normas. Las normas NCh se aplican en

diversos sectores de la economía, como la construcción, la minería, la energía, la alimentación, la salud, entre otros.

Las normas NCh son de carácter voluntario y recomendadas por el INN y la industria. Son desarrolladas por comités técnicos conformados por expertos y se actualizan periódicamente para mantener su relevancia. Para este estudio se utilizarán en el análisis 2 normas, la NCh 433 y la NCh 2369.

2.7.1. Norma NCh 433

La norma chilena NCh 433 establece los requisitos exigibles para el diseño sísmico de edificios, especificaciones, técnicas para el diseño y construcción de estructuras de hormigón armado y pretensado en Chile. La norma cubre los aspectos fundamentales del diseño, construcción, inspección y mantenimiento de estructuras de hormigón, incluyendo las cargas que deben soportar, las propiedades de los materiales, el diseño estructural, los requisitos de seguridad, la inspección y evaluación de las estructuras existentes (INN, 2012).

La NCh 433 se aplica a todas las estructuras de hormigón armado y pretensado, tales como edificios, puentes, torres, presas y muros de contención, estableciendo las normas mínimas de seguridad que deben cumplirse en su diseño y construcción. También proporciona directrices para la evaluación de la capacidad de carga y el estado de las estructuras existentes, lo que ayuda a garantizar su seguridad y durabilidad a lo largo del tiempo, lo que es fundamental para la protección de la vida humana y la propiedad.

Según la norma, la aceleración efectiva máxima PGA (A_0 en la norma), se determina de acuerdo a la zonificación sísmica del país indicada en la Figura 2.11. Donde las comunas pertenecientes a la superficie de la FSR a simular se encuentran detalladas en la Figura 2.12, donde se observa que todas se encuentran en la zona 2.

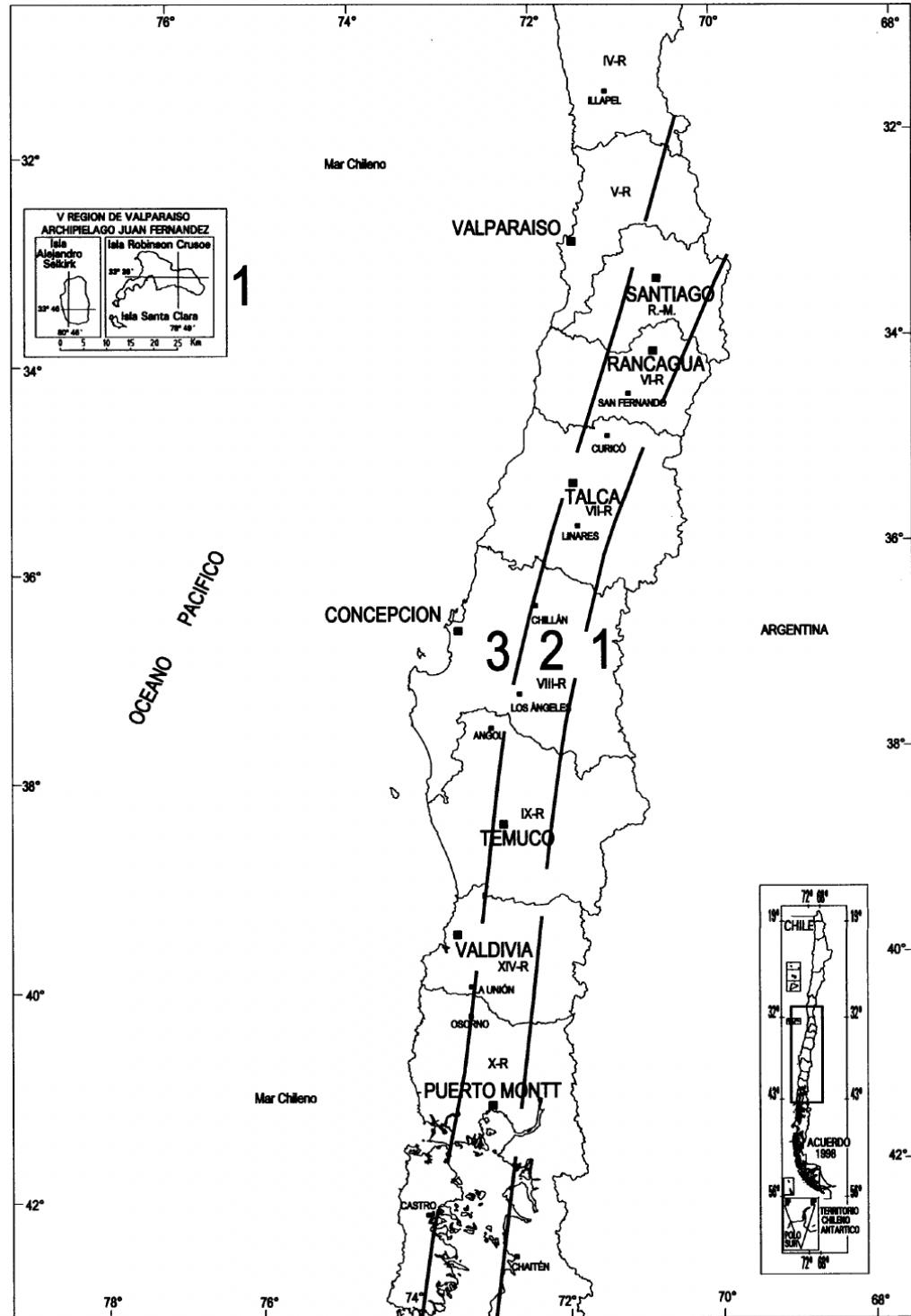


Figura 2.11: Zonificación sísmica de las Regiones IV a X y Región Metropolitana
Fuente: INN (2012)

Región	Zona 3	Zona 2	Zona 1
Metropolitana	Alhué Curacaví El Monte Lampa María Pinto Melipilla San Pedro Tiltil	Buin Calera de Tango Cerrillos Cerro Navia Colina Conchalí El Bosque Estación Central Huechuraba Independencia Isla de Maipo La Cisterna La Florida La Granja La Pintana La Reina Las Condes Lo Barnechea Lo Espejo Lo Prado Macul Maipú Ñuñoa Padre Hurtado Paine Pedro Aguirre Cerda Peñaflor Peñalolén Pirque Providencia Pudahuel Puente Alto Quilicura Quinta Normal Recoleta Renca San Bernardo San Joaquín San José de Maipo San Miguel San Ramón Santiago Talagante Vitacura	

Figura 2.12: Zonificación sísmica por comunas para la Región Metropolitana
Fuente: INN (2012)

Los valores de aceleración efectiva máxima PGA (A_0 en la norma), que la norma considera en el diseño sísmico estructural para cada zona, se observa a continuación. Ver la tabla 2.1.

Zona sísmica	A_0
1	0.20 g
2	0.30 g
3	0.40 g

Cuadro 2.1: Valores de la aceleración efectiva máxima del suelo A_0 (PGA)
Fuente: INN (2012)

2.7.2. Norma NCh 2369

La norma chilena NCh 2369 establece los requisitos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, ya sean livianas o pesadas. Se aplica, tanto a las estructuras propiamente tales, como a los sistemas de ductos y cañerías y a los equipos de proceso, mecánicos y eléctricos y a sus anclajes. También se aplica a las estructuras de bodegas o recintos de vocación industrial, y a las construcciones estructuradas con columnas en voladizo (INN, 2003).

Esta norma no se aplica a otros tipos de estructuras tales como centrales nucleares, centrales de energía eléctrica y líneas de transmisión, presas, tanques de relaves, puentes, túneles, muelas gravitacionales, muros de contención, líneas de ductos enterradas, etc.

Para esta norma, la aceleración efectiva máxima PGA (A_0 en la norma), se determina de la misma manera que la norma NCh 433, con la zonificación igualmente indicada en la Figura 2.11 y Figura 2.12, donde se observa que todas se encuentran en la zona 2. Además, los valores de aceleración efectiva máxima PGA (A_0 en la norma), que la norma considera, también se observan en la tabla 2.1.

Capítulo 3

Simulación de procesos de ruptura

En este capítulo se detalla cómo se ha llevado a cabo la descripción geológica de Santiago utilizando el método UCSB y ShakerMaker, con valores de espesores, velocidades P y S, densidad y factores de atenuación Q_p y Q_s , que corresponden a los rangos de valores para parámetros de las capas del modelo $F - K$.

Por otro lado, se indica la descripción de la FSR en un sistema de coordenadas único, para parámetros como; la traza superficial, ángulo de *dip*, *rake*, *strike*, deslizamiento o *slip*, área y el generador de rupturas.

Por último, se definen los sitios que se utilizarán como estaciones sismológicas para las simulaciones y su posterior análisis, las distintas áreas que componen el área superficial de la falla, y las distancias al centro de la falla de cada estación.

3.1. Implementación de método UCSB

Para comenzar a generar los datos relevantes que permitirán realizar las simulaciones en ShakerMaker, se implementa el método UCSB mediante un código creado en lenguaje Fortran, el cual necesita como entrada 2 archivos. Este código fue facilitado y autorizado para el uso del presente estudio por el actual académico de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Jorge Crempien.

En primer lugar, el método lee en conjunto la estructura de velocidades presentada en el anexo A, donde se detalla la velocidad de propagación de las ondas P y S en $[km/s]$, densidad ρ en unidades de $[g/cm^3]$, Q_p y Q_s los cuales representan los factores adimensionales de atenuación de P y S respectivamente. Esta estructura de

velocidades de 3 capas es la que se utiliza y se mantiene para cada caso simulado más adelante. En relación con el número de capas que se utiliza, es debido a que mientras mayor la cantidad, la dispersión sísmica irá en aumento, por ende, para iniciar los estudios las 3 capas son suficientes para observar el comportamiento.

Posteriormente, el segundo archivo de entrada de datos que se lee, de tipo *.inp* (archivo de texto *ASCII*) mostrado en modo de ejemplo en la Figura 3.1 y detallado en el anexo B, aporta múltiples datos al método, los cuales son; el índice de la función de tasa de deslizamiento (*slip*), el ancho y la longitud de la falla principal en [km], la distancia y profundidad del epicentro en [km], coordenadas del epicentro, el momento sísmico [M_0] en [N/m] para grandes sismos o la magnitud de momento sísmico [M_w] en caso de pequeños. Para todos los casos que se simularon en este documento fue utilizada la magnitud de momento [M_w].

También se incluye; la frecuencia angular [Hz] y la velocidad media de ruptura [km/s], la relación de tiempo entre el aumento de la velocidad de deslizamiento y el tiempo de subida (*rise time*), el valor de *strike*, *dip* y *rake* de la falla principal, el número de sub fallas a lo largo de *strike* y *dip*, entre otros.

El área de la falla utilizada para todas las simulaciones fue de 16 km de ancho por 30 km de largo, lo cual se ve en la línea 2 de la Figura 3.1. El número de sub-fallas es de 32768, lo cual es el resultado de los valores 126×256 de la línea 9.

```

1  8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 7.0 0.090000 3.000000 3.000000
6 0.300000
7 358.000000 40.000000 113.000000
8 15.000000 30.000000
9 256 128
10 5 5 5 5
11 52 448 4446
12 1 1
13 stgo_lf.vel
14 0.0
15 3
16 FFSP_OUTPUT

```

Figura 3.1: Ejemplo de archivo *.inp* para caso de ruptura bilateral de $M_w = 7.0$

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la lectura y ejecución del programa se genera un archivo de salida, el cual para cada caso de estudio tendrá el nombre de *FFSP_OUTPUT*. Este, genera realizaciones del modelo probabilístico del deslizamiento en la falla plana, entregando en cada punto los parámetros de la función de deslizamiento, el cual los genera al realizar la convolución de las funciones de Green apropiadas y sumarlas (sección 2.4.1). Estos parámetros son la duración total *rise time* o r_t , el tiempo que transcurre hasta llegar al máximo *peak time* o p_t y el tiempo de inicio de ruptura *rupture time* o t_0 , lo que especifica la velocidad de ruptura.

De todos los parámetros que controlan el generador de rupturas, solo *pt_rt* es “libre”, el cual representa la razón entre r_t y el momento en que ocurre el *peak* de la función de velocidad de ruptura de cada sub falla p_t . Está directamente relacionado con la aceleración máxima que se ve en los registros finales, de modo que este parámetro libre se “calibra” a base de los estudios disponibles sobre la amenaza sísmica esperada en la FSR. Este trabajo es, entonces, compatible con la literatura por diseño, por lo que tiene, a lo más, el mismo nivel de validez que los estudios en los que se basa.

3.2. Configuración inicial de ShakerMaker

La configuración de ShakerMaker se parametriza para que los datos obtenidos desde el método UCSB sean procesados e incorporados en las simulaciones del presente estudio, mediante un código en Python. A continuación, se presenta en detalle la configuración de ShakerMaker utilizada para las simulaciones.

3.2.1. Setup general

En primer lugar, se crea un modelo al cual ingresan a ShakerMaker los parámetros de la corteza, falla y estaciones sismológicas elegidas para los análisis, lo cual se muestra en la línea 470 de la Figura 3.2, estas tres variables se verán en detalle más adelante.

Para las líneas 471 en adelante, el modelo se ejecuta con los valores de importancia, los cuales son; el paso del tiempo dt , el número de muestras del registro realizado $nfft$, la discretización en espacio de longitud de onda dk , el tiempo de adelantamiento de la simulación tb (el cual para este estudio se mantuvo en valor $tb = 0$), el tiempo en el que comienzan los resultados finales $tmin$ y el tiempo en el que terminan $tmax$.

```
470 model = shakermaker.ShakerMaker(crust, fault, stations)
471 model.run(
472     dt=dt,
473     nfft=nfft,
474     dk=dk,
475     tb=tb,
476     tmin = tmin,
477     tmax=tmax,
478     smth=1,
479     sigma=2,
480     verbose=False,
481     debugMPI=False,
482     showProgress=True,
483 )
```

Figura 3.2: Sección de código que crea el modelo, parametriza y ejecuta
Fuente: Elaboración propia

Los valores utilizados para estas variables son; $dt = 0.025$, $nfft = 2048$, $dk = 0.02$, $tb = 0$, $tmin = 0.0$ y $tmax = 200$. En el caso de dk , cumple las siguientes condiciones del método $F - K$ que complementan lo visto en la sección 2.3:

$$L = \frac{2\pi}{dk} \quad (3.1)$$

Siendo L la distancia horizontal de separación entre las fuentes puntuales que satisfaga:

$$L > 2r, \quad (3.2)$$

$$\sqrt{(L - r)^2 + h^2} > v_{max}t, \quad (3.3)$$

el campo de ondas obtenido en (r, t) no se verá perturbado por la fuente vecina más próxima (Zhu, 2011).

Por otro lado, para la estimación de “ventanas” de llegada de ondas se utilizan las velocidades de propagación máxima (vp_max) y mínima (vs_min) que se muestran en las líneas 49 en adelante de la Figura 3.3, además del valor de pt_rt , siendo el parámetro libre que se mencionó anteriormente.

```
49 Vs_min = 3.14
50 Vp_max = 8.000
51 pt_rt = 0.055
```

Figura 3.3: Valor de pt_rt y de las velocidades de propagación máxima y mínima
Fuente: Elaboración propia

El valor de pt_rt se fue calibrando para obtener aceleraciones máximas similares a los estudios existentes que se utilizaron sobre la FSR. Así, luego de varias simulaciones, con $pt_rt = 0.055$ se obtuvieron valores de aceleraciones aceptables para continuar con el análisis correspondiente.

3.2.2. Descripción de la geología de Santiago

Para describir la geología, se crea un modelo de corteza compleja que se observa en la Figura 3.4, este modelo utilizado se compone de 3 capas, como se le indica al código en la línea 244. A modo de explicación se detalla la primera capa; con los valores de sus ondas de propagación vp y vs de 2.75 y 1.57 [$\frac{km}{s}$] respectivamente, la densidad $\rho = 2.75$ [$\frac{g}{cm^3}$], el espesor de la capa de 1.0 [km] y los factores de atenuación Q_p y Q_s (Q_a y Q_b en el código), con un valor de 100.0 para ambos.

```

242 if corteza_compleja:
243     crust = CrustModel(3)
245
246     vp,vs,rho,thick,Qa,Qb = 2.75, 1.57, 2.5 , 1.0, 1000.0, 1000.0
247     crust.add_layer(thick, vp, vs, rho, Qa, Qb)
248
249     vp,vs,rho,thick,Qa,Qb = 5.5, 3.14, 2.5000 , 14.5, 1000.0, 1000.0
250     crust.add_layer(thick, vp, vs, rho, Qa, Qb)
251
252     vp,vs,rho,thick,Qa,Qb = 7.0, 4.0, 2.6700 , 0.0, 1000.0, 1000.0
253     crust.add_layer(thick, vp, vs, rho, Qa, Qb)

```

Figura 3.4: Modelo de corteza utilizado para Santiago
Fuente: Elaboración propia

Además, es importante mencionar que los valores de las constantes de la corteza que se utilizaron, son; la densidad $\rho = 2500 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, velocidad de propagación $V_s = 3140 \left[\frac{m}{s} \right]$ y el módulo de elasticidad $\mu = \rho * V_s^2 \left[\frac{N}{m^2} \right]$. Junto a esto, la suma de las capas sería de una profundidad de 15.5 [km] (eje z positivo hacia abajo).

Por lo tanto, a modo de resumen, el orden que se observa de los parámetros que corresponden a los rangos de valores para parámetros de las capas del modelo $F - K$, sería: Capas → v_p | V_s | Densidad ρ | Espesor de capa o rho | Q_p | Q_s
El mismo orden que se utilizó para la estructura de velocidades que se explica en el anexo A.

Para el área de la falla que se utilizó (mencionada anteriormente), de 16 km de ancho por 30 km de largo y una profundidad de 15.5 km en el eje z , se escogió para tener, a modo de comparación, los artículos de Armijo et al. (2010), Estay et al. (2016) y Ammirati et al. (2019), que realizan estudios de movimientos sísmicos para esas superficies o similares, con magnitudes que van desde los $Mw = 6.5$ a $Mw = 7.5$. Es por esto, que sus estimaciones, al estar con iguales condiciones geográficas y geométricas, podrían considerarse coherentes con los resultados de este estudio.

3.2.3. Descripción del sistema de coordenadas de la FSR

En cuanto a los parámetros de ShakerMaker pertenecientes al sistema de coordenadas que fue mostrado en la Figura 2.10, posterior a la ejecución del programa del método UCSB, se obtiene el archivo de salida, *FFSP_OUTPUT* como se mencionó. Este archivo es leído por ShakerMaker, el cual convierte y ordena los parámetros de cada sub falla en; coordenadas *xyz* del modelo probabilístico del deslizamiento en la falla, el área, el valor de *dip*, *strike*, *rake* y *slip*.

```
224 data = np.loadtxt(folder+'/FFSP_OUTPUT.001',skiprows=1)
225
226
227 if rank == 0:
228     print(f'{x_ref_loc=} {y_ref_loc=}')
229
230 x_ref=x_ref_loc
231 y_ref=y_ref_loc
232
233 xyz = data[:,[0,1,2]]
234
235 slip = data[:,3]
236 strike = data[:,7]
237 dip = data[:,8]
238 rake = data[:,9]
239
240 rpti = data[:,4]
241 rsti = data[:,5]
242
243 depth_min = xyz[:,2].min()/1e3
244
245 nsubfaults = xyz.shape[0]
246
247 t0 = np.zeros(nsubfaults)
```

Figura 3.5: Lectura de *FFSP_OUTPUT* en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la línea 224 de la Figura 3.5, que el archivo de salida es leído, para posteriormente realizar en las líneas 230 y 231 un cambio en los ejes *x* e *y* ya que los ejes están volteados en el archivo. Posterior a esto, son ordenados los parámetros mencionados en listas de datos, además del valor de la profundidad mínima en la línea 243 y la cantidad de sub fallas en la línea 245. Para la línea 247 se genera un arreglo de ceros según la cantidad de sub fallas que se generen, para ser utilizado posteriormente para generar ingresar el valor de cada *rpti* en la obtención de velocidad de ruptura.

Luego, al generar la convolución de las funciones de Green y sumarlas, se obtienen los parámetros de; la duración total *rise time* o T_r en el código, el *peak time* o T_p y el *rupture time* o T_e . Con esto, es posible generar la velocidad de ruptura como se muestra en la Figura 3.6. En el código se genera la función con los parámetros antes mencionados, además del paso del tiempo dt , los cuales deben cumplir con condiciones de la descripción de fuente según la bibliografía de Crempien and Archuleta (2015).

```

104 def srf2(Tp,Te,Tr,dt):
105     a = 1.
106     b = 100.
107
108     t = np.arange(0, Tr, dt)
109     Nt = len(t)
110     svf = 0*t
111
112     i1 = t < Tp
113     svf[i1] = t[i1]/Tp*np.sqrt(a + b/Tp**2)*np.sin(np.pi*t[i1]/(2*Tp))
114     i2 = np.logical_and(t >= Tp, t < Te)
115     svf[i2] = np.sqrt(a + b/t[i2]**2)
116     i3 = t >= Te
117     svf[i3] = np.sqrt(a + b/t[i3]**2)*np.sin(5/3*np.pi*(Tr-t[i3])/Tr)
118
119     A = np.trapz(svf, dx=dt)
120
121     svf /= A
122
123     return Nt, svf
124
125
126 [Nt, vel] = srf2(pt_rt*rsti[i], 0.7*rsti[i], rsti[i] ,dt)

```

Figura 3.6: ShakerMaker genera velocidad de ruptura
Fuente: Elaboración propia

Es importante recalcar que de todos los parámetros que controlan este generador de rupturas, solo pt_rt es “libre” (el cual se utiliza en la línea 126 de la Figura 3.6 para calcular el parámetro de T_p), representando la razón entre r_t y el momento en que ocurre el *peak* de la función de velocidad de ruptura de cada sub falla p_t . Estando directamente relacionado con la aceleración máxima que se ve en los registros finales.

3.3. Sitios escogidos pertenecientes a la FSR

Los sitios a simular se escogen de manera que se logre abarcar toda el área de Santiago que se pueda ver afectada por la FSR, estos fueron separados en 4 zonas que se pueden observar en la Figura 3.7, las cuales son; la zona de hanging-wall¹ (*Near Field hanging – wall* en la figura), la zona cercana (*Near field*), intermedia (*Intermediate field*) y zona lejana (*Far field*).

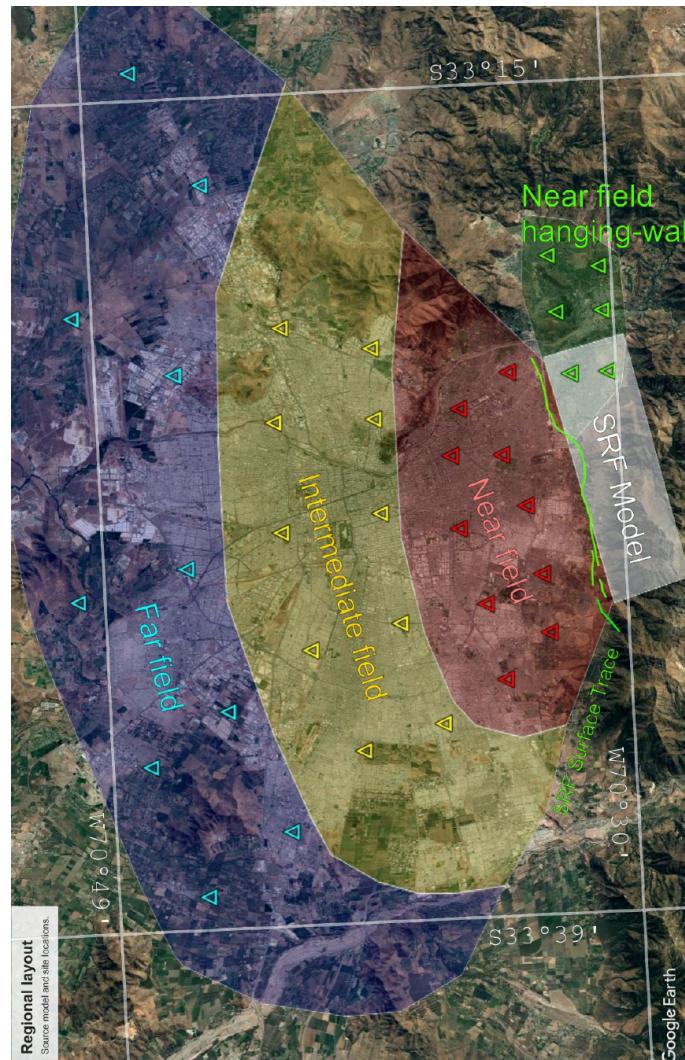


Figura 3.7: Zonas modeladas de la FSR
Fuente: Abell (2022)

¹Este término se utiliza en geología para referirse a la capa de roca o el lado de una falla que se encuentra encima de la zona de fractura en una estructura geológica, como una veta mineral o una falla inversa como en este caso.

En total se escogieron 10 estaciones, que se componen de 1 para la zona de hanging-wall, 3 para zona cercana, 3 para intermedia y 3 para lejana. En la Figura 3.8 se pueden ver como las estaciones están distribuidas en el mapa de Santiago, además de la ubicación escogida como centro de la falla para todas las simulaciones. Sus nombres son referenciales de cada zona a la que pertenecen, siendo la estación *H1* : *Ing* la estación de la zona de hanging-wall ubicada en el edificio de ingeniería de la Universidad de Los Andes.

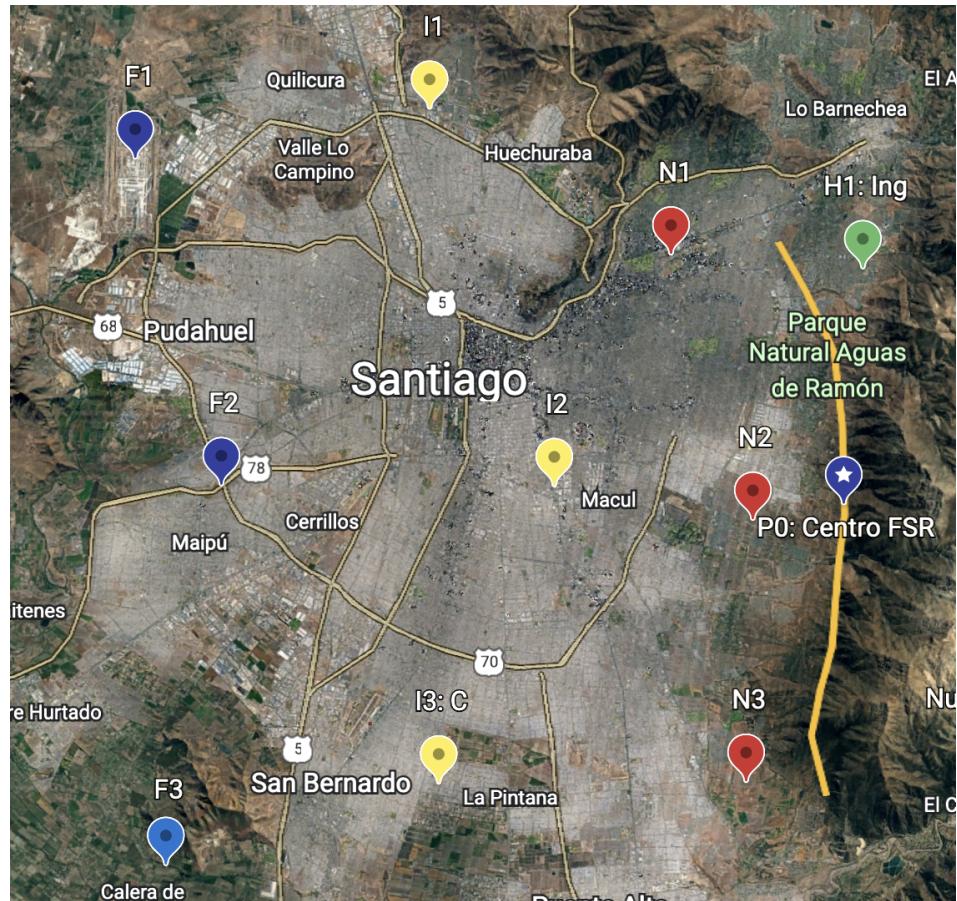


Figura 3.8: Estaciones simuladas en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

De las estaciones escogidas se pretende realizar simulaciones para distintas magnitudes y tipos de ruptura, así, poder ver diferencias en los tiempos de arribo de las ondas P y S, gráficos y valores de PGA, PGV y PGD, espectros de respuesta para las componentes $x - y$ y z y realizar comparaciones con las normas estructurales NCh433 y 2369.

3.3.1. Descripción de las estaciones en sistema UTM

Para incluir las estaciones escogidas en ShakerMaker de cada sitio, se cargaron las coordenadas x e y en sistema UTM mediante un archivo de texto (*.txt*). Estas, al estar en unidades de metros, son convertidas a kilómetros, como se puede ver desde las líneas 289 a 293 de la Figura 3.9, donde x_0 e y_0 componen el centro de la FSR escogido.

```
289  utm_x = np.loadtxt("utm_x.txt")
290  utm_y = np.loadtxt("utm_y.txt")
291
292  x0 = utm_x[0]/1e3
293  y0 = utm_y[0]/1e3
294
295  slist = []
296  Nstations = 10
297  sta_x = utm_x[1:]/1e3 #+ dx_station
298  sta_y = utm_y[1:]/1e3 #+ dy_station
299
300  for i in range(Nstations):
301      x_station, y_station = sta_y[i], sta_x[i]
302      z_station = 0.
303      s1 = Station([x_station, y_station, 0],
304                  metadata={
305                      "name": f"Santiago {i}",
306                      "filter_results": False,
307                      "filter_parameters": {"fmax": 10.}
308                  })
309      slist.append(s1)
310
311  if rank == 0:
312      for i, s in enumerate(slist):
313          output_filename = output_basename + f"_s{i}.npz"
314          s.save(output_filename)
```

Figura 3.9: Carga de estaciones en ShakerMaker

Fuente: Elaboración propia

Luego, desde la línea 295 se crea una lista, la cual va a contener los resultados finales para cada una de las 10 estaciones mencionadas anteriormente. Estas estaciones ingresar como parámetros a la variable de *Stations* de ShakerMaker, donde cada resultado será entregado en un archivo de tipo *.npz* (10 archivos para cada realización y tipo de sismo) con nombres de *resultado_s(i)*².

²(i) tomará el valor de 0 a 9 con relación a cuál de las 10 estaciones pertenece, siendo 0 la estación N.^o 1 y 9 la estación N.^o 10.

En la Figura 3.10, se aprecia la misma distribución de las estaciones mostrada anteriormente, pero esta vez, con el nombre en el mapa relacionado con el archivo de salida al cual pertenece. Así, por ejemplo, cuando se hable del archivo *s0* será el perteneciente a la estación H1. Las distancias que tienen cada una con respecto al centro de la FSR serán vistas en el análisis más adelante.



Figura 3.10: Estaciones simuladas relacionadas con archivo de salida
Fuente: Elaboración propia

3.4. Visualización del área de la FSR simulada

Los primeros resultados de las simulaciones que se obtuvieron, fueron los relacionados al área simulada de la FSR, con el objetivo de verificar que la base para las simulaciones posteriores fueran correctas. Además, observar la correcta posición del centro de la falla y las 10 estaciones escogidas.

A continuación, se muestra en la Figura 3.11 la imagen referencial de la FSR y la simulada en ShakerMaker, con un área de 16 km de ancho por 30 km de largo y una profundidad de 15.5 km en el eje z . También se aprecia el centro de la falla como un punto verde y los puntos azules de las estaciones, utilizadas para las simulaciones, que vendrían posicionándose en el área de Santiago urbano.

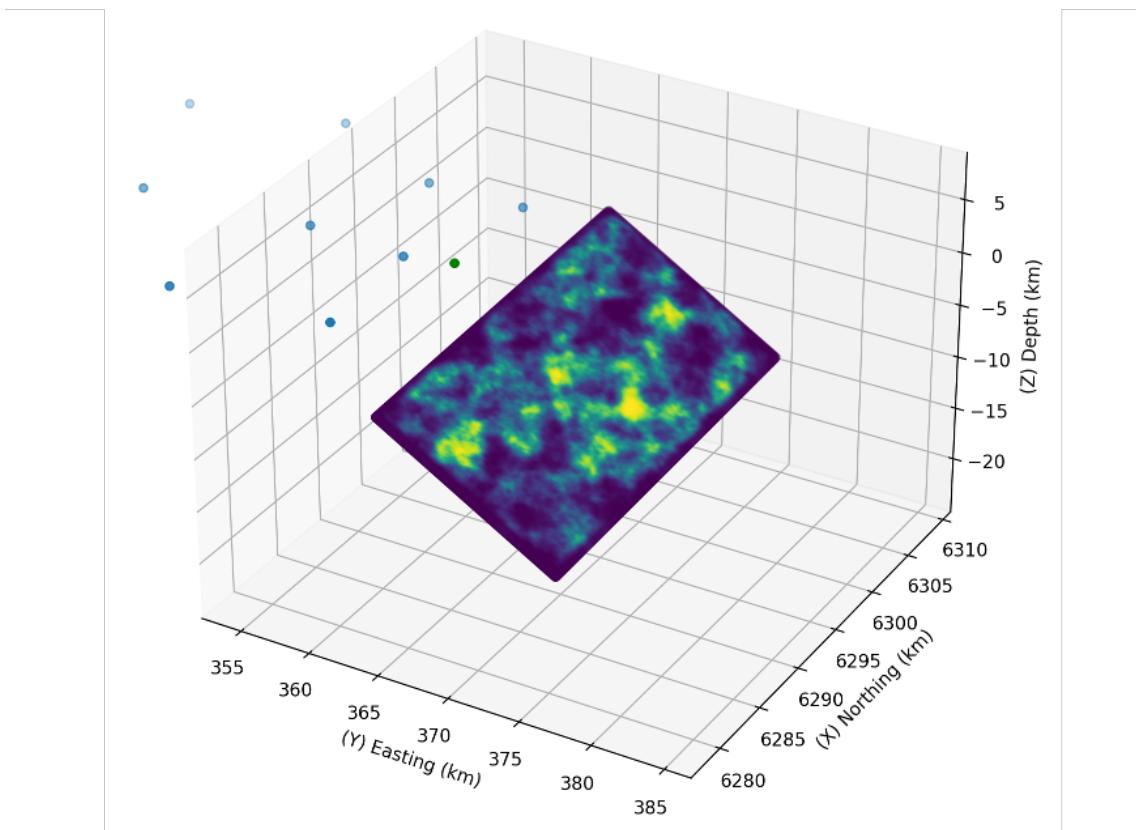
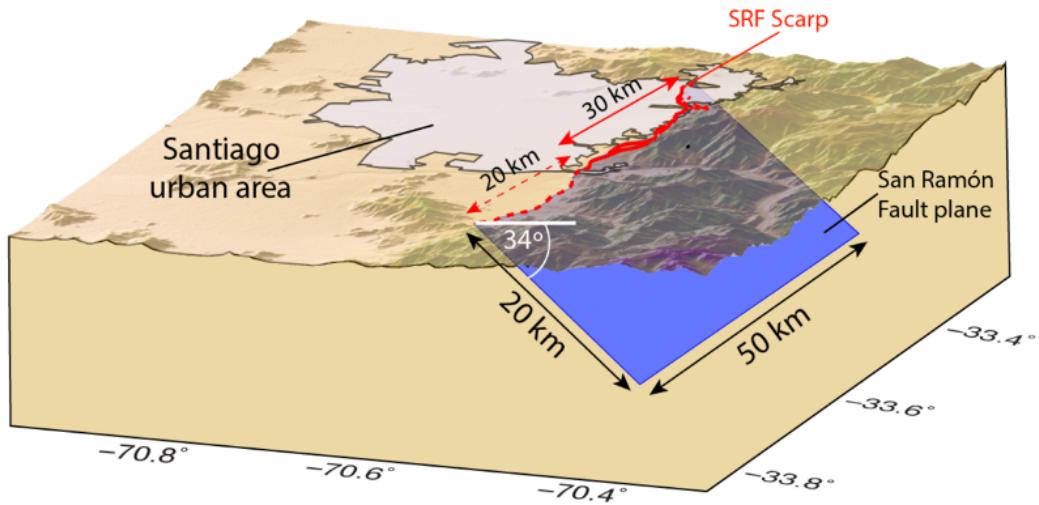


Figura 3.11: FSR simulada en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Simulación de registros sísmicos

En este capítulo, se muestran las realizaciones usando las fallas cinemáticas en los distintos sitios de Santiago, los tipos de rupturas y magnitudes para cada estación. Además, de los primeros resultados de parámetros de corteza; *strike* y *dip*, *rake*, *slip*, isócronas y tiempos de ruptura o *triggertime(tt)*.

4.1. Resultados iniciales de las realizaciones

En primer lugar, es fundamental conocer que se realizaron simulaciones para 4 magnitudes distintas, que son $Mw = \{6.5, 6.7, 6.9, 7.0\}$, cada una de las magnitudes con 3 modos de ruptura (MDR), con $MDR = \{\text{Bilateral (BL)}, \text{Norte-Sur (NS)}, \text{Sur-Norte (SN)}\}$. Ahora, para cada magnitud y tipo de ruptura se hicieron 3 realizaciones, para tener un muestreo aleatorio de los valores finales obtenidos. Un esquema referencial se observa en la Figura 4.1.

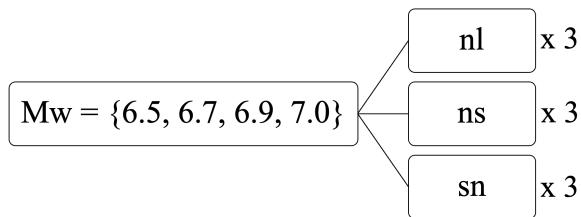


Figura 4.1: Esquema referencial de las realizaciones
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la aleatoriedad mencionada, es importante que para cada simulación en ShakerMaker, los parámetros de la falla, *strike* y *dip*, *rake*, *slip*, isócronas y tiempos de ruptura o *trigger time* (*tt*), isócronas y tiempos de ruptura resultan aleatorios, debido a que en la estructura de velocidades (explicada en B), es posible introducir semillas para generar números aleatorios, las cuales fueron modificadas manualmente.

4.1.1. Strike, dip y rake

En cuanto al rumbo, buzamiento e inclinación de la falla (*strike*, *dip* y *rake* respectivamente), siendo los términos utilizados en la sismología para describir la orientación y la dirección de los movimientos sísmicos, se pueden apreciar en la Figura 4.2, detallándose su sistema de coordenadas.

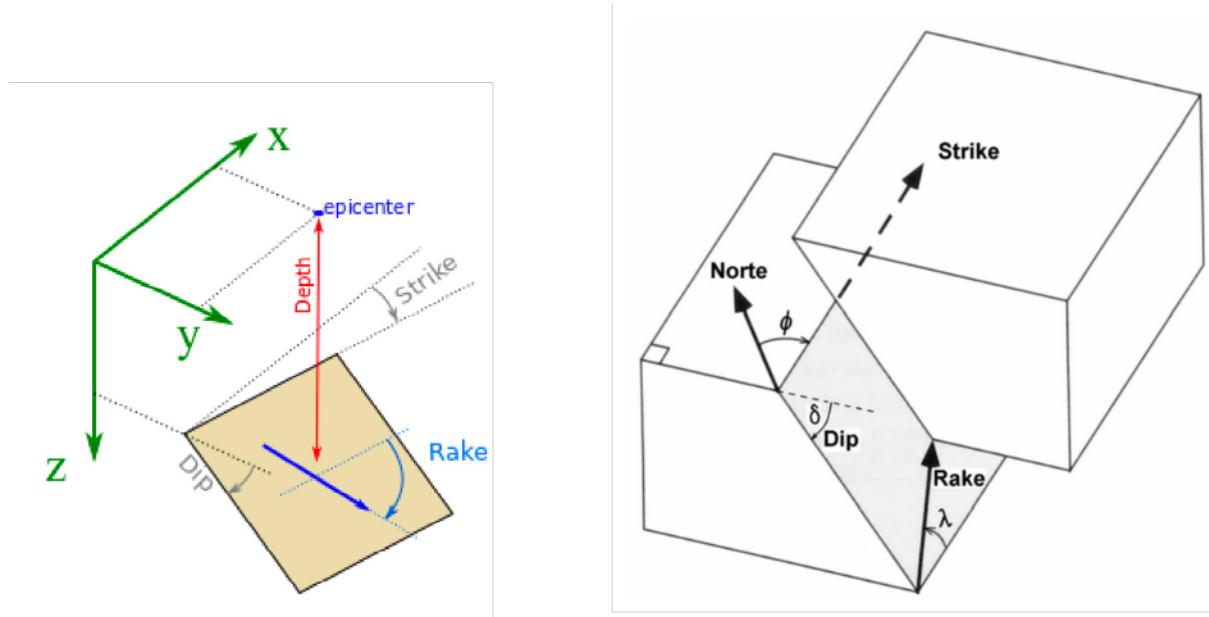


Figura 4.2: Sistema de coordenadas strike, dip y rake
Fuente: Abell et al. (2022)

El valor de *strike*, indica la dirección horizontal de la línea que representa la intersección de un plano inclinado (en este caso la FSR) con la superficie terrestre. Se mide en grados en sentido horario a partir del norte.

Con una falla de 30 km de largo por 16 km de ancho, y un hipocentro con profundidad de 8 km, estando relacionado con él *strike*, él *dip* y el *rake* de la falla durante

el evento sísmico. Por un lado, si el hipocentro está ubicado a mayor profundidad, el *strike* puede ser menos importante.

Se tiene que para todas las simulaciones, el *strike* ingresado en el método UCSB y posteriormente utilizado por ShakerMaker, tiene un valor de 358° , como se puede comprobar en la Figura 4.3, donde se ve graficado el parámetro en la simulación de la falla 3D.

El cambio en el *strike* de una falla durante un sismo puede ser difícil de medir directamente, pero se puede inferir a través de observaciones de la superficie del terreno después del sismo. Por ejemplo, si la superficie de la falla se desplaza lateralmente durante el sismo, se puede deducir que el *strike* de la falla cambió durante el sismo.

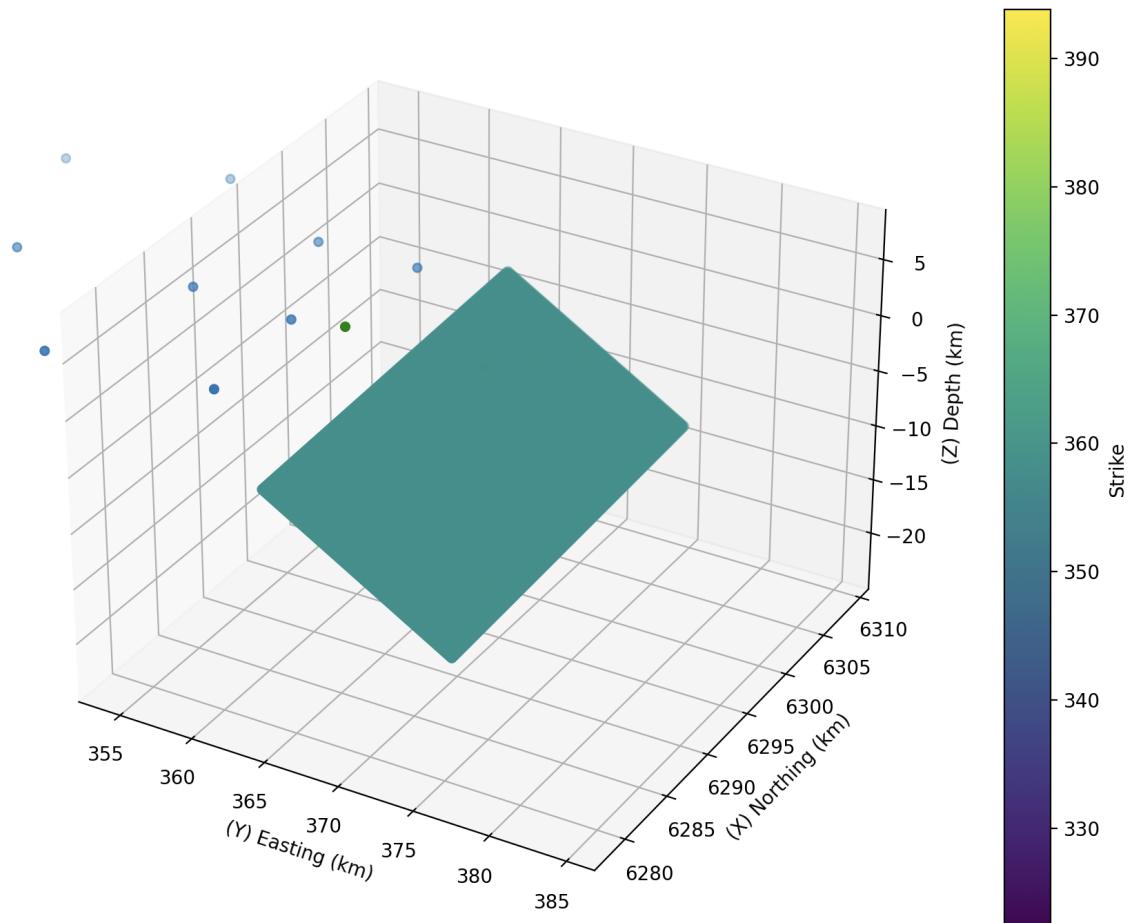


Figura 4.3: Valor de strike en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

El *dip*, es la inclinación del plano de la falla con respecto a la horizontal. Se mide en grados desde la horizontal hacia abajo. Ahora, si el *dip* es bajo, es decir, la falla se encuentra poco inclinada, el epicentro estará ubicado a mayor profundidad, en cambio, si el *dip* es alto, es decir, la falla se encuentra muy inclinada, el epicentro estará ubicado a menor profundidad.

Para el *dip* ingresado en el método UCSB y posteriormente utilizado por Shaker-Maker para todas las simulaciones, tiene un valor de 40° , como se puede comprobar en la Figura 4.4, donde se ve graficado el parámetro en la simulación de la falla 3D, el cual contiene valores entre $25^\circ - 55^\circ$, el cual promedia exactamente los 40° ingresados.

Cabe destacar que el *dip* de una falla puede cambiar durante un sismo debido a la deformación que ocurre en la roca cuando se produce el movimiento sísmico, lo que a su vez puede afectar la forma en que se propagan las ondas sísmicas y la intensidad del movimiento sísmico.

El cambio en el *dip* de una falla durante un sismo puede ser difícil de medir directamente, pero se puede inferir a través de observaciones de la superficie del terreno después del sismo. Por ejemplo, si la superficie de la falla se desplaza verticalmente durante el sismo, se puede inferir que el *dip* de la falla cambió durante el sismo.

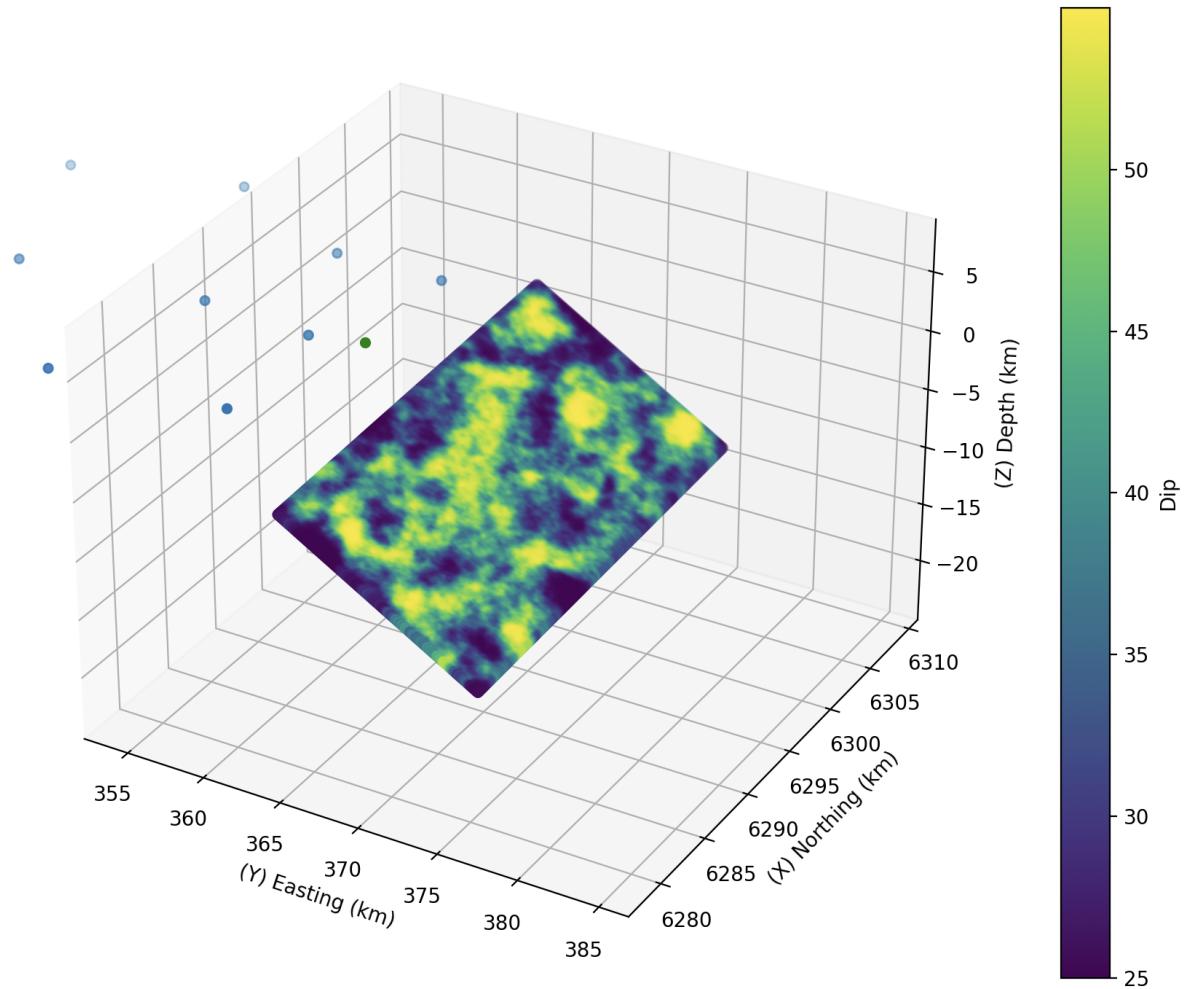


Figura 4.4: Valor de dip en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el *rake*, es la dirección del desplazamiento de un bloque de roca a lo largo de la falla durante un sismo. Se mide en grados desde la dirección de la línea de falla. Un ángulo de rake positivo indica que el bloque se movió hacia la derecha en relación con la línea de falla, mientras que un ángulo de rake negativo indica que el bloque se movió hacia la izquierda.

Ahora, si el epicentro se encuentra cerca de la superficie terrestre, el *rake* es importante para determinar la dirección de la propagación de las ondas sísmicas. Si el epicentro está ubicado a mayor profundidad, el *rake* puede ser menos importante.

Para el *rake* ingresado en el método UCSB y posteriormente utilizado por Shaker-Maker para todas las simulaciones, tiene un valor de 113° , como se puede comprobar en la Figura 4.5, donde se ve graficado el parámetro en la simulación de la falla 3D, el cual contiene valores entre $84^\circ - 142^\circ$, el cual promedia exactamente los 113° ingresados.

En cuanto al *rake* de una falla, este puede cambiar durante un sismo debido a que la fricción en la falla se rompe y se produce movimiento a lo largo de la misma, lo que puede cambiar la dirección del desplazamiento y, por lo tanto, el *rake* de la falla.

Además, el cambio en el *rake* de la falla durante un sismo puede tener importantes implicaciones para la intensidad y la magnitud del sismo. Por ejemplo, si el cambio en el *rake* hace que la falla se abra de manera más amplia, se puede liberar más energía y el sismo puede ser más fuerte. Por lo tanto, es importante considerar el *rake* de una falla al estudiar la sismicidad y predecir la intensidad y magnitud de los terremotos.

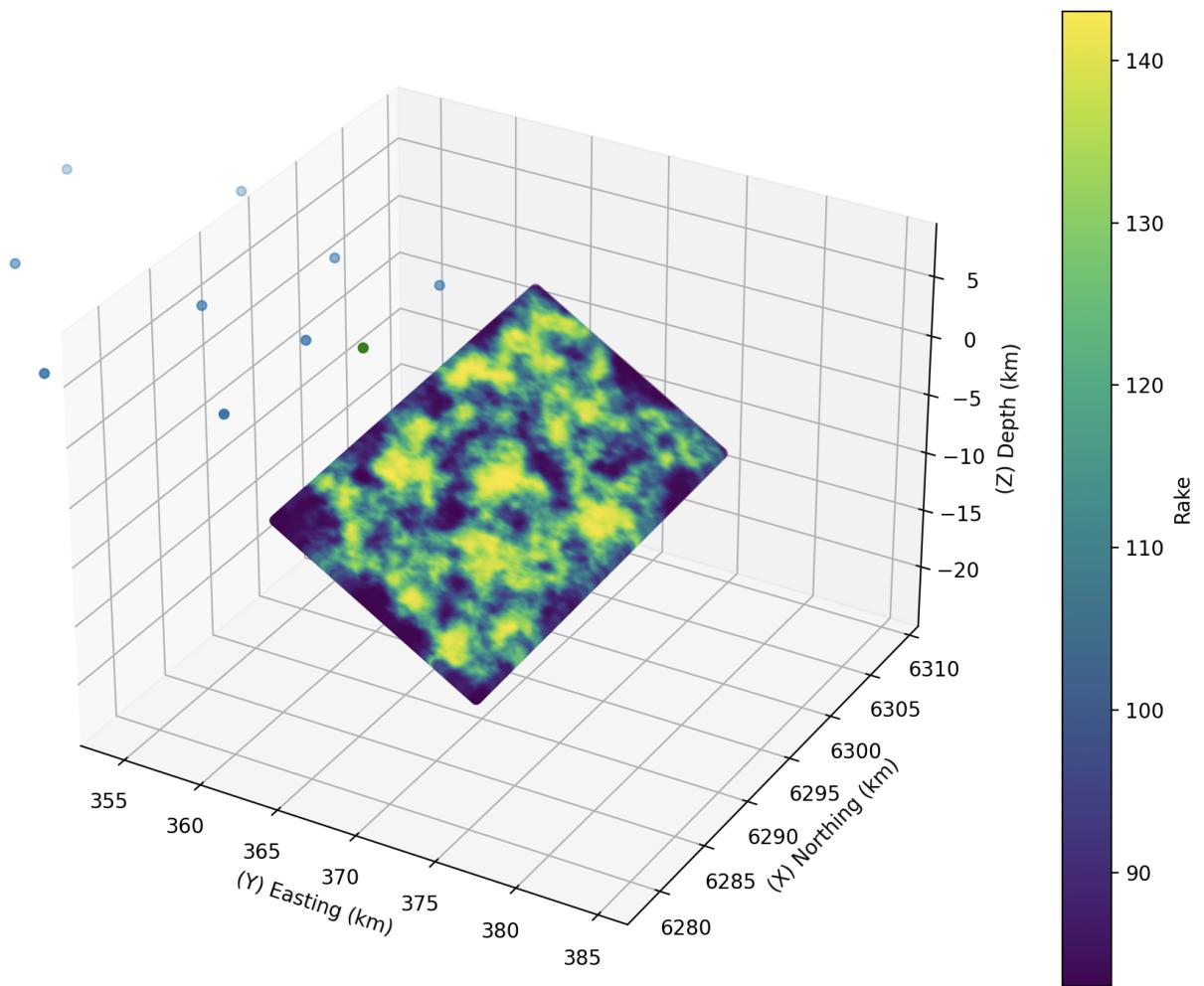


Figura 4.5: Valor de rake en ShakerMaker
Fuente: Elaboración propia

En resumen, los valores de *strike*, *dip* y *rake* utilizados en todas las simulaciones son de; 358° , 40° (promedio entre los valores 25° - 55°) y 113° (promedio entre los valores 84° - 142°) respectivamente. Estos valores son congruentes y comprueban que la simulación se realiza de manera correcta, debido a los valores mencionados en el anexo B.

4.1.2. Slip

Para el desplazamiento sísmico o *slip*, el cual se refiere a la cantidad de movimiento que ocurre a lo largo de la falla durante un sismo. Es decir, se trata del desplazamiento de las rocas a lo largo de la superficie de la falla durante la liberación de energía sísmica.

El *slip* es un indicador importante para entender la magnitud y la energía liberada durante un sismo, ya que se relaciona directamente con la amplitud de las ondas sísmicas que se propagan en el subsuelo y que pueden ser registradas. Además, el *slip* también es un factor importante a considerar en la evaluación de los riesgos sísmicos, ya que puede influir en la posibilidad de ocurrencia de réplicas.

Por otro lado, la relación entre el *slip* y los términos *PGA*, *PGV* y *PGD* que se verán en detalle más adelante, no es lineal, ya que la intensidad del movimiento sísmico registrado depende de varios factores adicionales, como la distancia al epicentro del sismo, la frecuencia del movimiento y las características de la corteza. Además, la relación también puede variar dependiendo del tipo de falla (en este estudio es falla inversa) y de la estructura geológica del área afectada por el sismo.

En los valores de *slip* que se verán a continuación, se muestra que existen distintos valores de *slip* en diferentes partes de la misma falla, o incluso en diferentes momentos durante el sismo. Esto se debe a la naturaleza compleja del proceso de ruptura sísmica, ya que el movimiento de la falla, implica la acumulación lenta y constante de tensión en la roca, que eventualmente se libera de manera brusca en forma de ondas sísmicas. Durante este proceso de ruptura, el deslizamiento a lo largo de la falla no es uniforme y puede ocurrir en diferentes segmentos o parches a lo largo de la falla.

Se tiene que para el primer análisis del *slip*, en un sismo de magnitud $Mw = 6.5$ presenta valores desde 0 hasta un *slip* máximo de 1.8 metros, lo que se puede ver en la Figura 4.6.

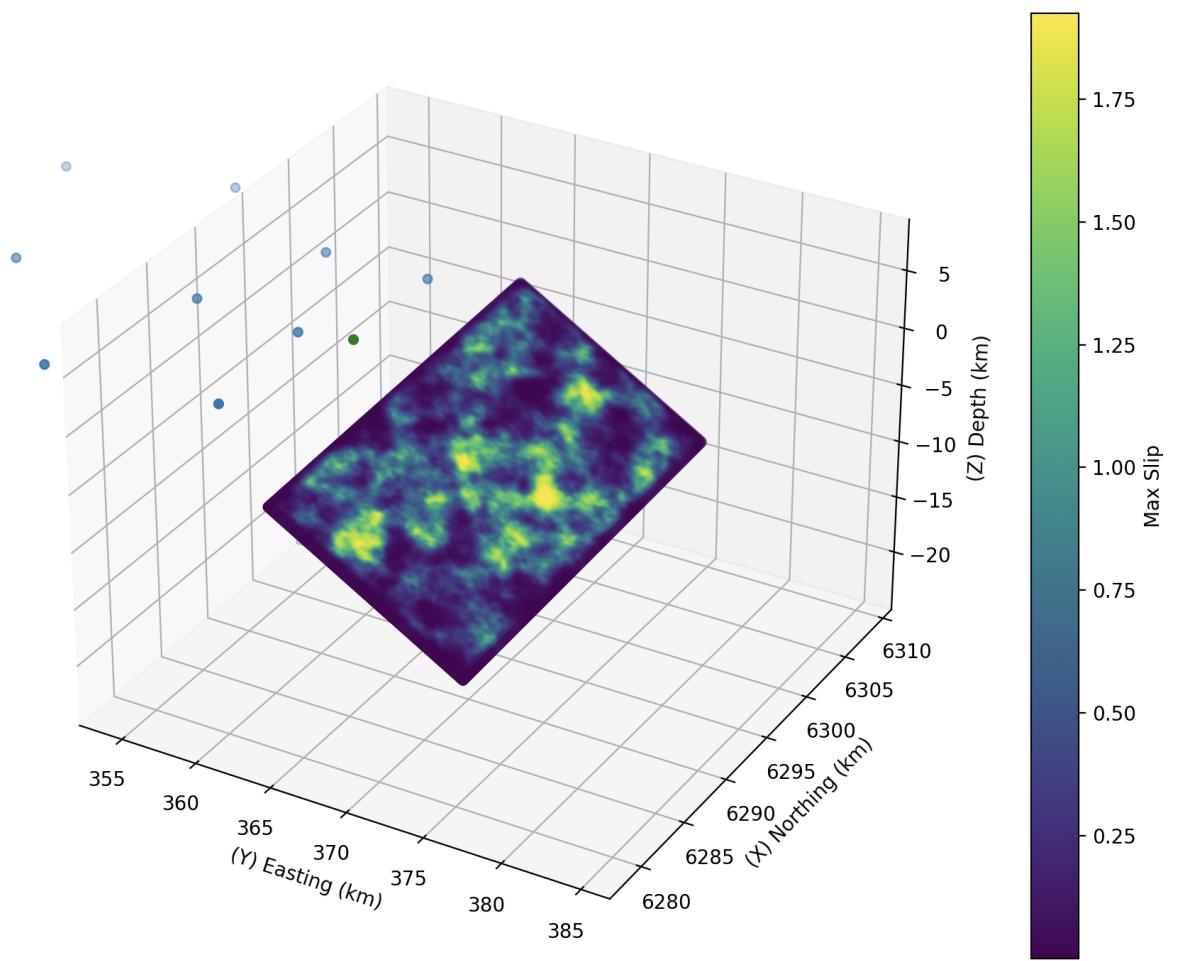


Figura 4.6: Valor de slip en ShakerMaker para $Mw = 6.5$
Fuente: Elaboración propia

Para el segundo análisis del *slip*, en un sismo de magnitud $Mw = 6.7$ presenta valores desde 0 hasta un *slip* máximo de 3.8 metros, lo que se puede ver en la Figura 4.7.

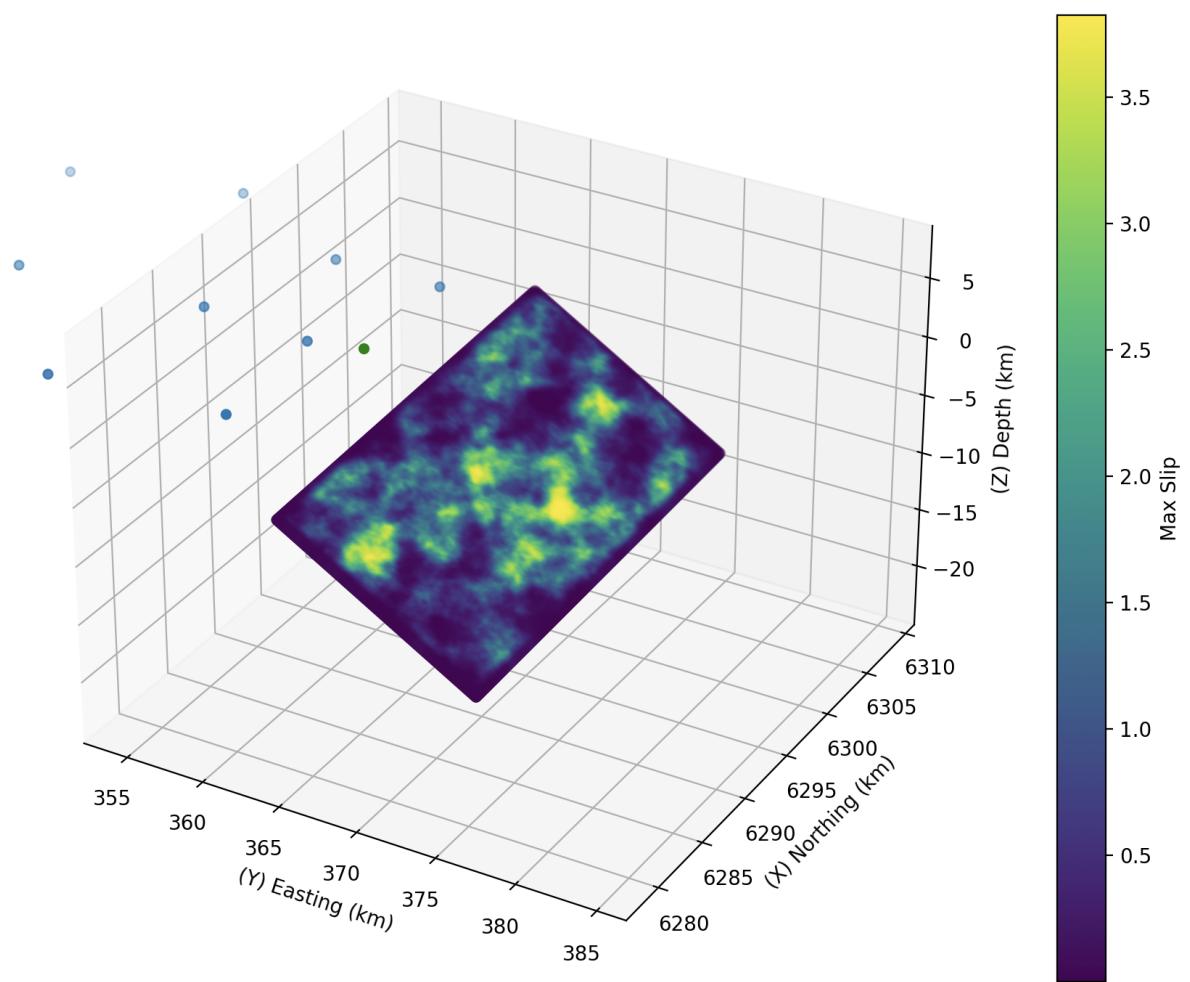


Figura 4.7: Valor de slip en ShakerMaker para $M_w = 6.7$
Fuente: Elaboración propia

Ahora, para el tercer análisis del *slip*, en un sismo de magnitud $M_w = 6.9$ presenta valores desde 0 hasta un *slip* máximo de 7.5 metros, lo que se puede ver en la Figura 4.8.

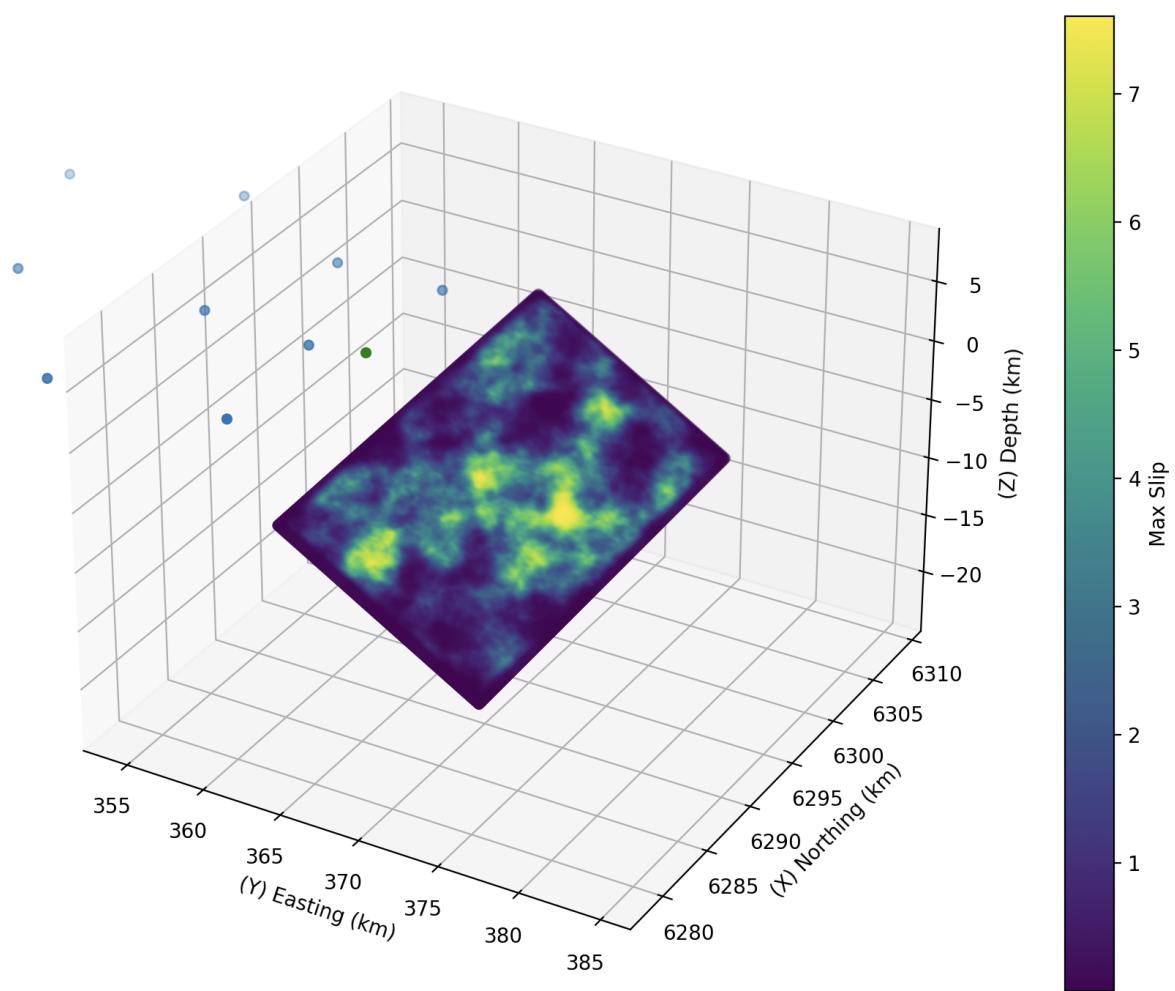


Figura 4.8: Valor de slip en ShakerMaker para $M_w = 6.9$
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el cuarto análisis del *slip*, en un sismo de magnitud $M_w = 7.0$ presenta valores desde 0 hasta un *slip* máximo de 10.5 metros, lo que se puede ver en la Figura 4.9.

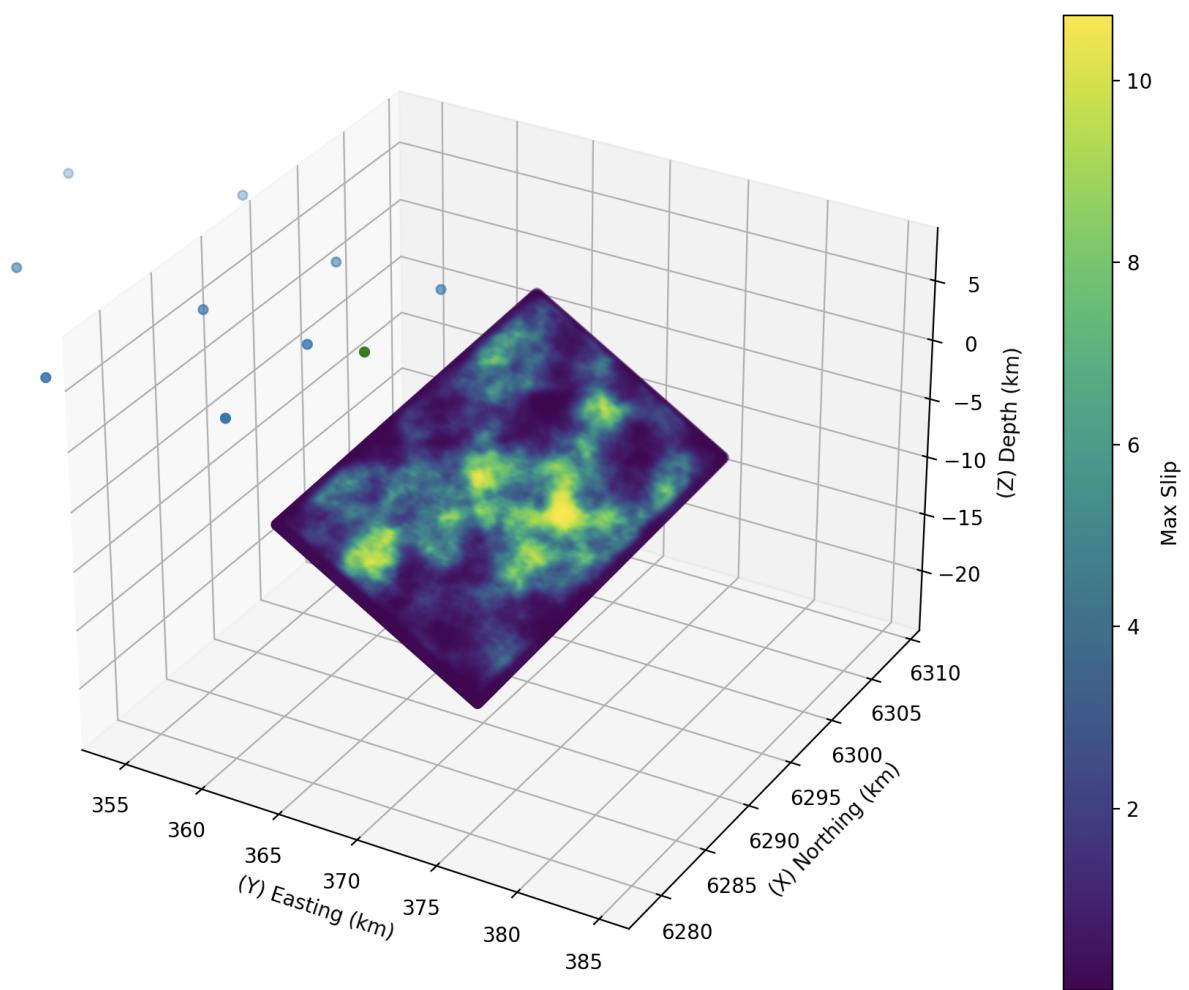


Figura 4.9: Valor de slip en ShakerMaker para $M_w = 7.0$
Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Isócronas

En relación con los valores de *slip* anteriores, es posible observar que las isócronas son líneas que conectan puntos en la superficie de la FSR simulada, que han sido alcanzados por ondas sísmicas en el mismo momento después de un sismo. En otras palabras, una isócrona sísmica representa la distancia igual desde el epicentro de un terremoto a todos los puntos en la superficie de la Tierra que experimentaron el mismo retraso en la llegada de las ondas sísmicas.

Las isócronas sísmicas se utilizan para trazar mapas de intensidad sísmica y para estimar la ubicación y la magnitud de un terremoto. También se pueden utilizar para determinar las propiedades del subsuelo de una región, como la profundidad y la orientación de las fallas tectónicas.

Las isócronas sísmicas se trazan utilizando información de las estaciones seismográficas utilizadas, que registran la llegada de ondas sísmicas en diferentes lugares. Al trazar las diferencias de tiempo en la llegada de las ondas sísmicas en diferentes estaciones, se pueden trazar las isócronas sísmicas en un mapa y así determinar la distribución espacial de la energía sísmica liberada durante un sismo.

Se observa que en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12, las isócronas poseen distintas distribuciones al ser nuevas realizaciones con llegadas de ondas sísmicas similares, pero con iguales valores de *slip*, lo cual se observa en la barra de colores, con valores que van desde 0 a 1.8 metros.

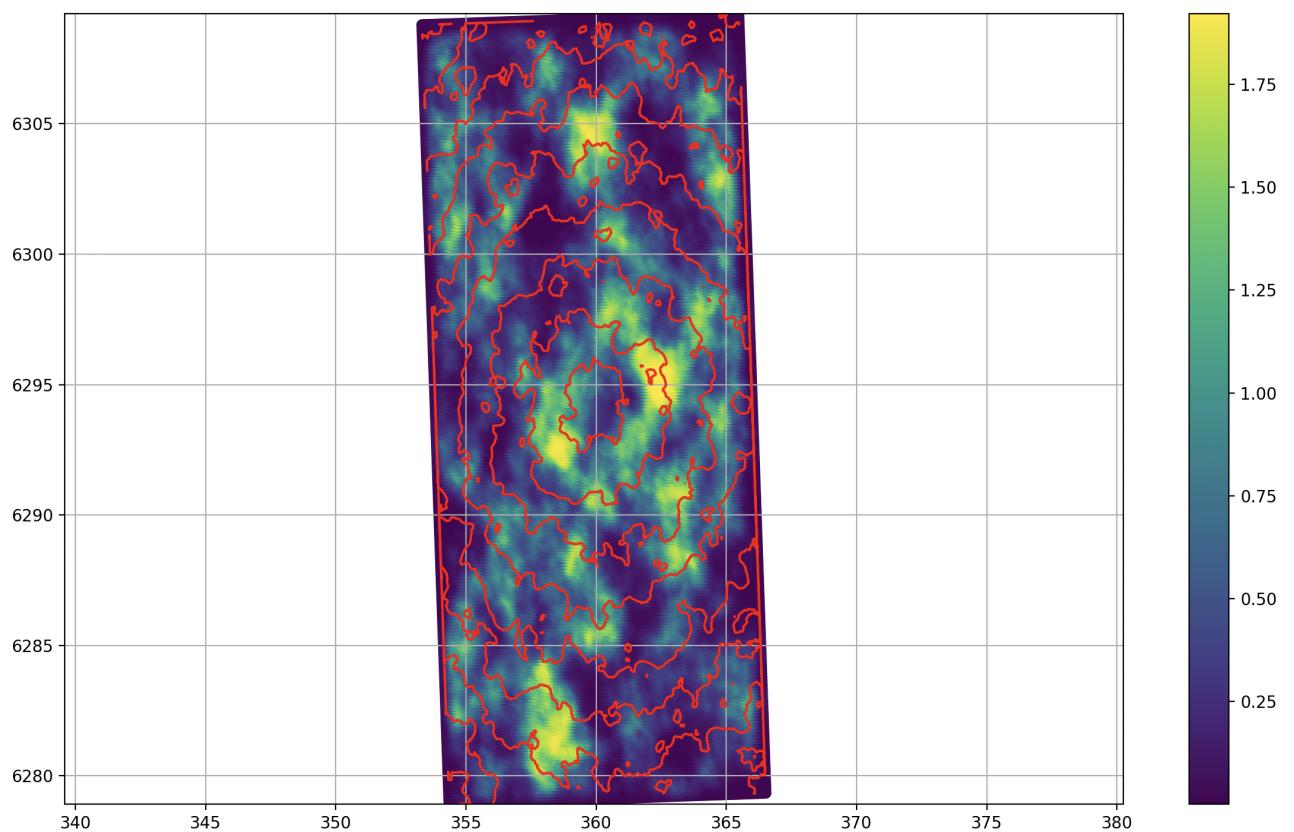


Figura 4.10: Isócronas para $M_w = 6.5$ con ruptura bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

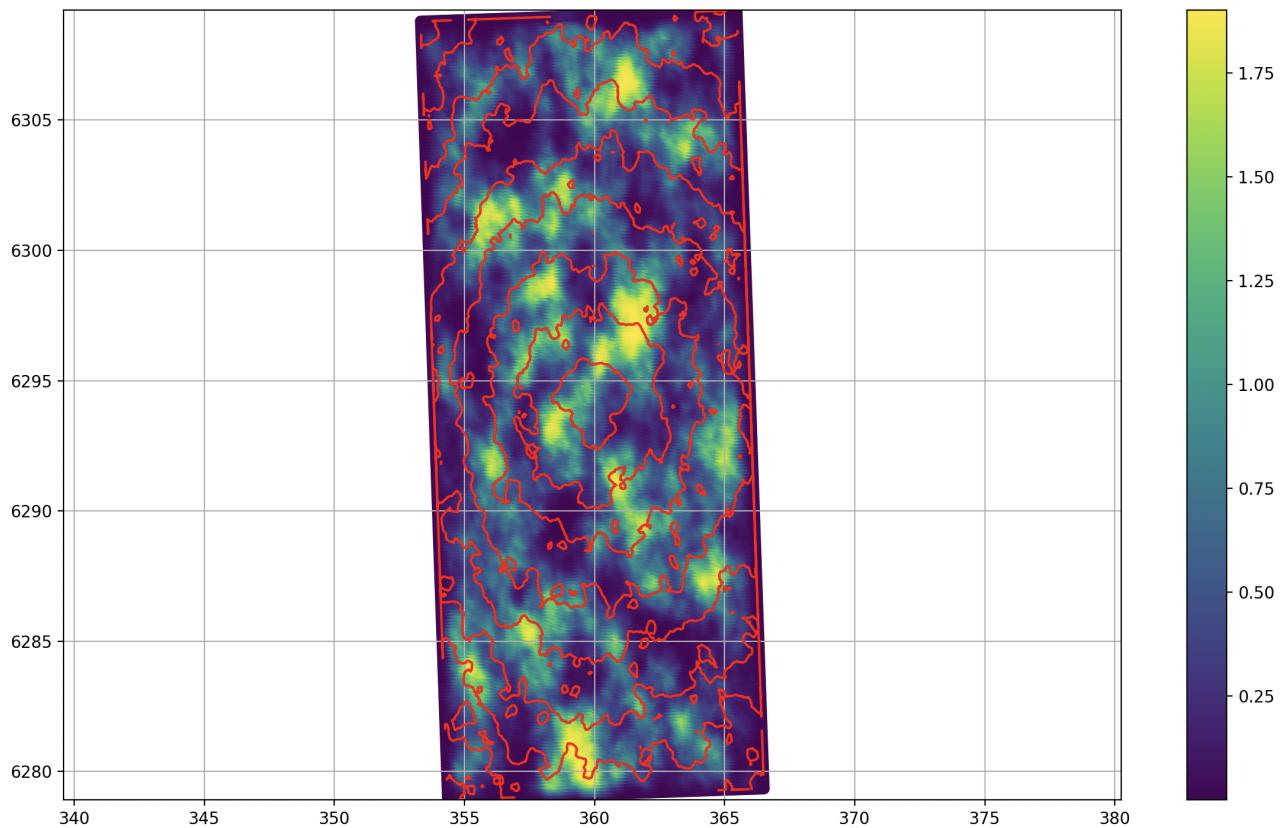


Figura 4.11: Isócronas para $M_w = 6.5$ con ruptura bilateral 2
Fuente: Elaboración propia

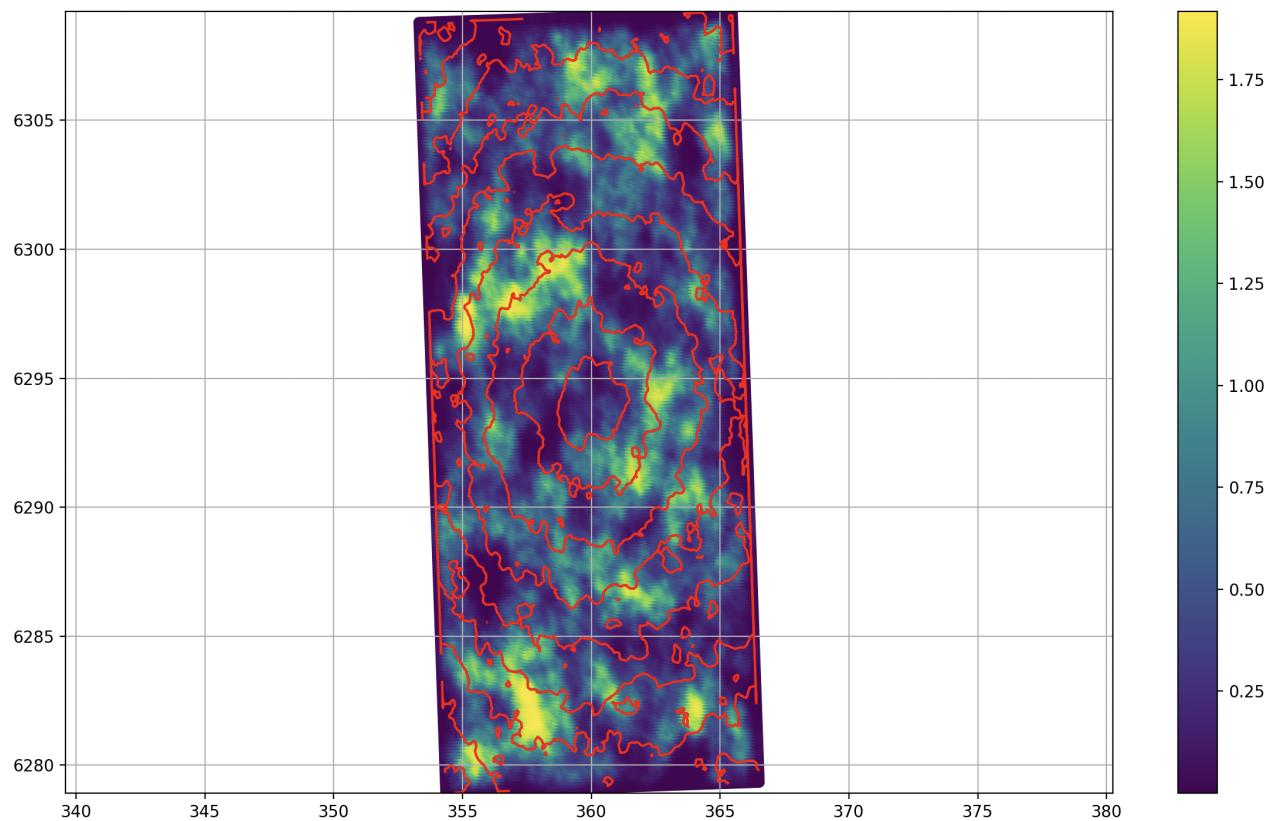


Figura 4.12: Isócronas para $Mw = 6.5$ con ruptura bilateral 3
Fuente: Elaboración propia

En cambio, para las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, las isócronas poseen distintas distribuciones y distintos valores de *slip*, lo cual se observa en la barra de colores, con valores que van desde 0 a 3.8 metros, 0 a 7.5 metros y 0 a 10.5 metros, respectivamente.

Se puede observar que, mientras mayor sea la magnitud del sismo, las isócronas poseen una menor distancia entre ellas, lo que significa que las diferencias de tiempo en la llegada de las ondas sísmicas en las estaciones van siendo menores a medida que aumenta el valor de la magnitud Mw .

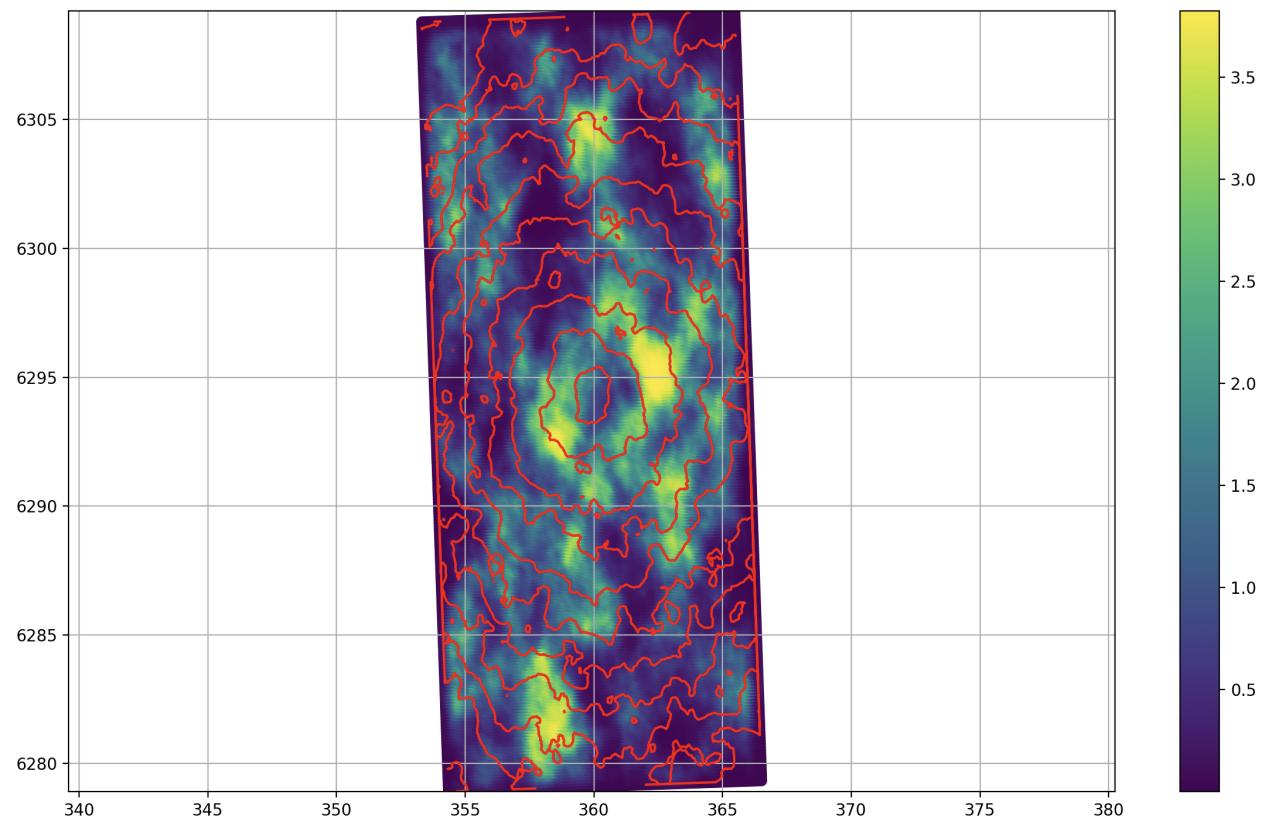


Figura 4.13: Isócronas para $M_w = 6.7$ con ruptura bilateral
Fuente: Elaboración propia

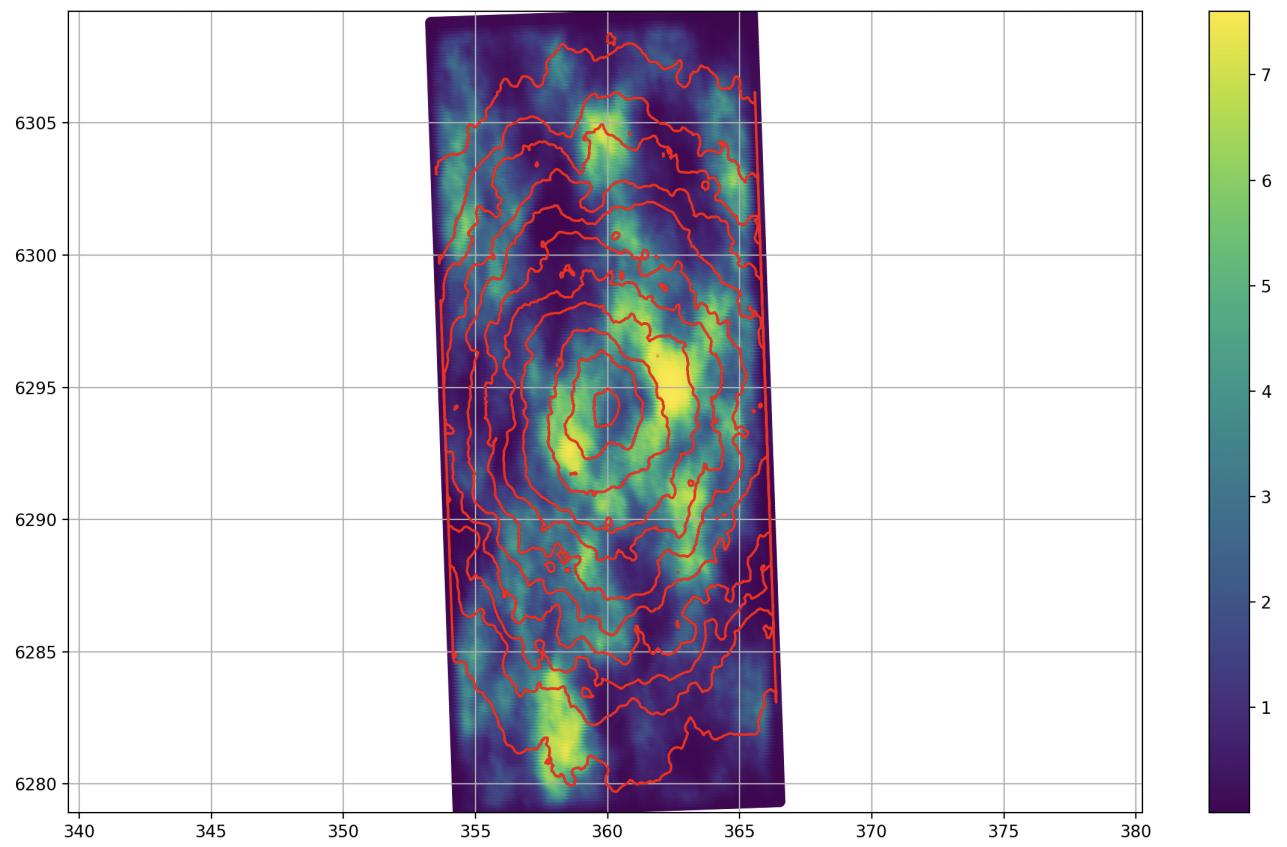


Figura 4.14: Isócronas para $M_w = 6.9$ con ruptura bilateral
Fuente: Elaboración propia

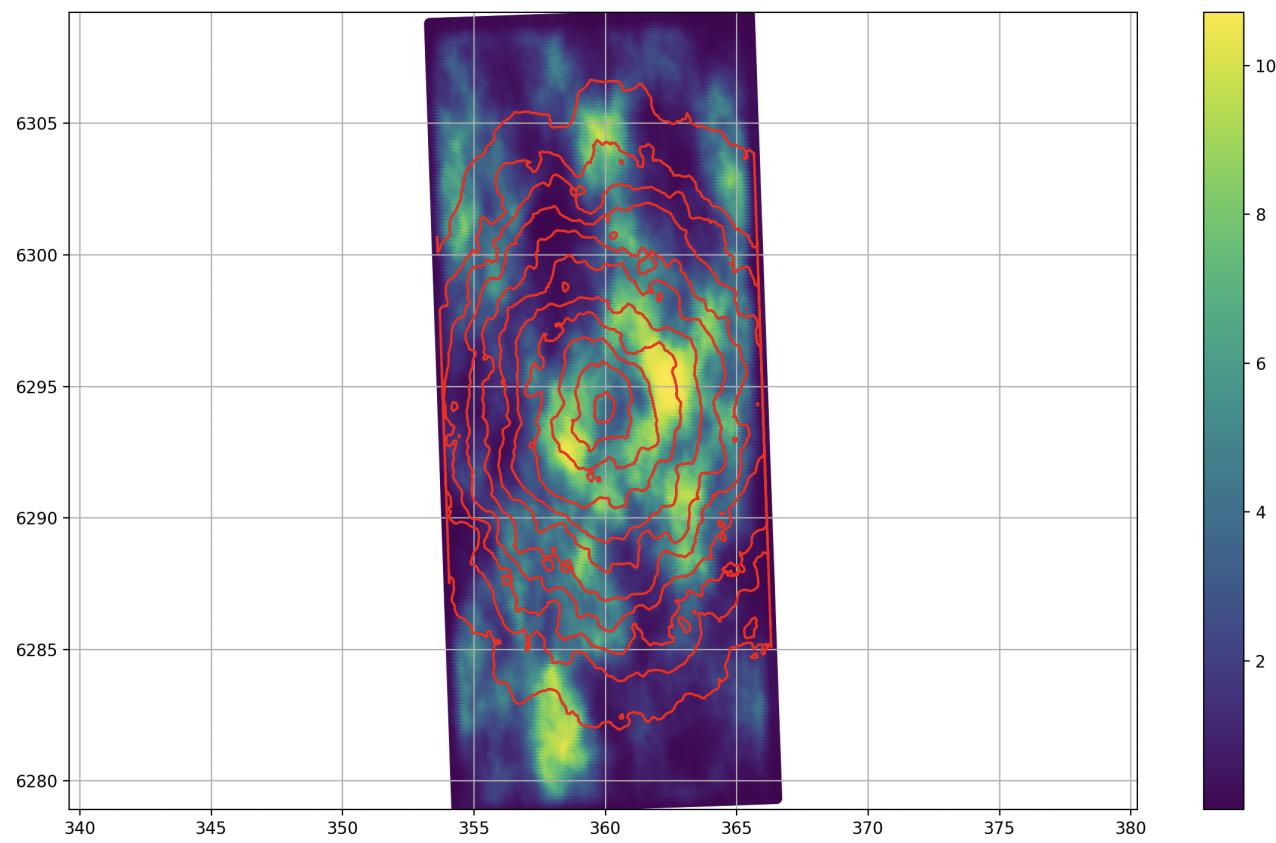


Figura 4.15: Isócronas para $M_w = 7.0$ con ruptura bilateral
Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Tiempos de ruptura

Para los tiempos de ruptura o *trigger time* (*tt*), indica el intervalo de tiempo durante el cual se produce el deslizamiento en la FSR durante el sismo. El *tt* puede medir utilizando datos de estaciones sismográficas que registran la propagación de las ondas sísmicas desde el epicentro del terremoto.

La duración del tiempo de ruptura está relacionada con la magnitud del sismo, ya que un terremoto de mayor magnitud implica una mayor cantidad de energía acumulada y, por lo tanto, un tiempo de ruptura más largo, como se podrá ver a continuación.

La medición del tiempo de ruptura es importante para comprender la naturaleza de la falla sísmica y para estimar la energía liberada durante un terremoto. Esta información se utiliza para mejorar los modelos de predicción de terremotos y para evaluar el riesgo sísmico en una región determinada.

Se observa que en la Figura 4.16, el valor de tiempo de ruptura *tt* para un sismo $M_w = 6.5$ de tipo bilateral, es de $tt = 9.4$ segundos. Con respecto a las otras realizaciones con la misma magnitud y tipo de ruptura, promedian 9.5, siendo coherente con la similitud que deben tener. Además, con los otros tipos de ruptura ocurre algo similar, con valores muy cercanos con los mencionados. Estos valores se verán más adelante en la tabla resumen 4.1.

En este caso, se observa la ruptura sísmica bilateral, siendo un tipo de falla que implica el deslizamiento en ambas direcciones de una falla tectónica. Durante un sismo de ruptura bilateral, la energía sísmica se libera simultáneamente en ambos lados de la falla, como se observa en la Figura 4.16, teniendo rangos de valores simétricos, desde 0 segundos con color oscuro en el centro hasta 9.5 segundos, con el color más amarillo en cada extremo.

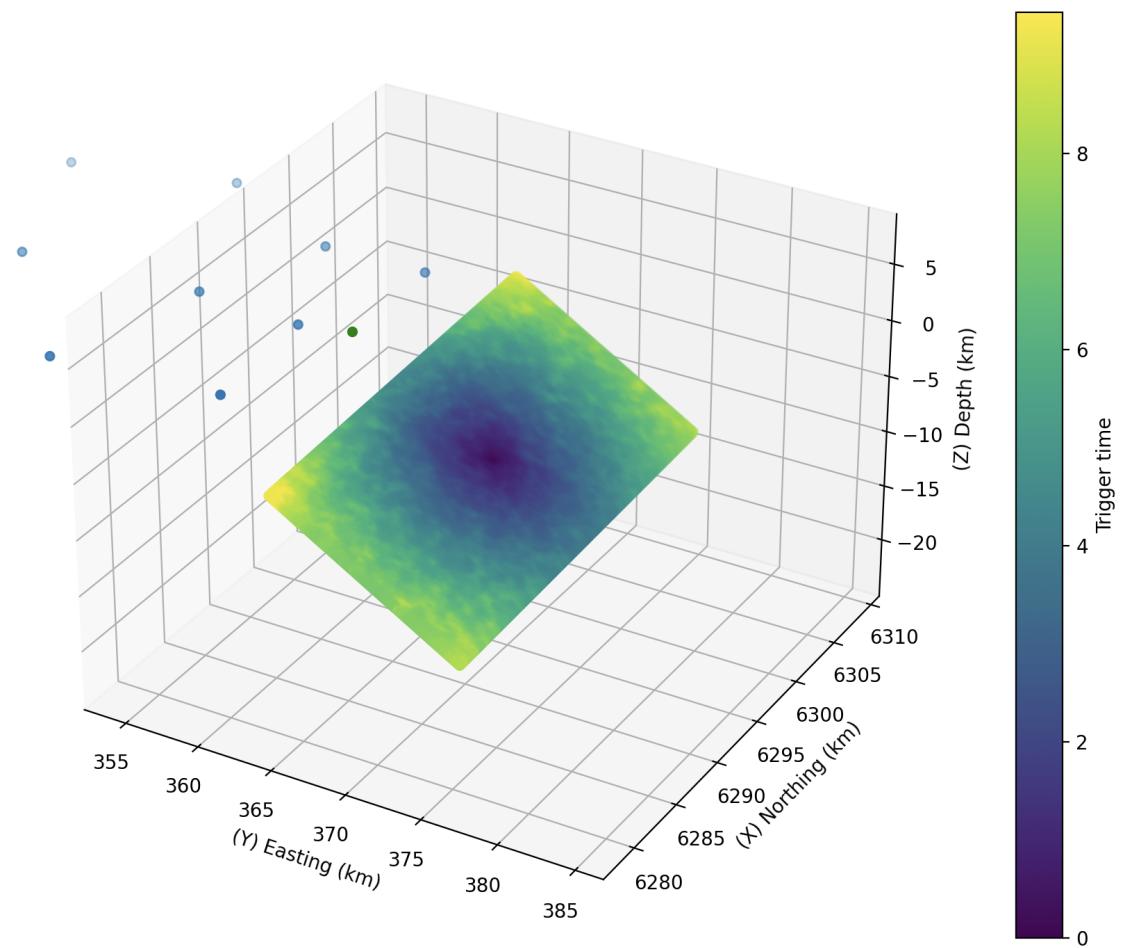


Figura 4.16: Trigger time en ShakerMaker para $Mw = 6.5$ bilateral 1
 Fuente: Elaboración propia

Dado que se desea observar la diferencia que existe con otros modos de ruptura, se muestra el siguiente tipo de ruptura en la Figura 4.17, donde el valor de tiempo de ruptura tt para un sismo $Mw = 6.7$ de tipo norte-sur, es de $tt = 11.8$ segundos. Con respecto a las otras realizaciones con la misma magnitud y tipo de ruptura, promedian 11.5, siendo coherente con la similitud que deben tener. Además, con los otros tipos de ruptura ocurre algo similar.

En este caso, se observa la ruptura sísmica norte-sur, siendo un tipo de falla que implica el deslizamiento en un solo lado de una falla tectónica. Durante un sismo de ruptura unilateral, la energía sísmica se libera en un solo lado de la falla, como se observa en la Figura 4.17, siendo asimétrico, desde 0 segundos con color oscuro en el norte de la falla, hasta 11.8 segundos, con el color más amarillo en el extremo sur.

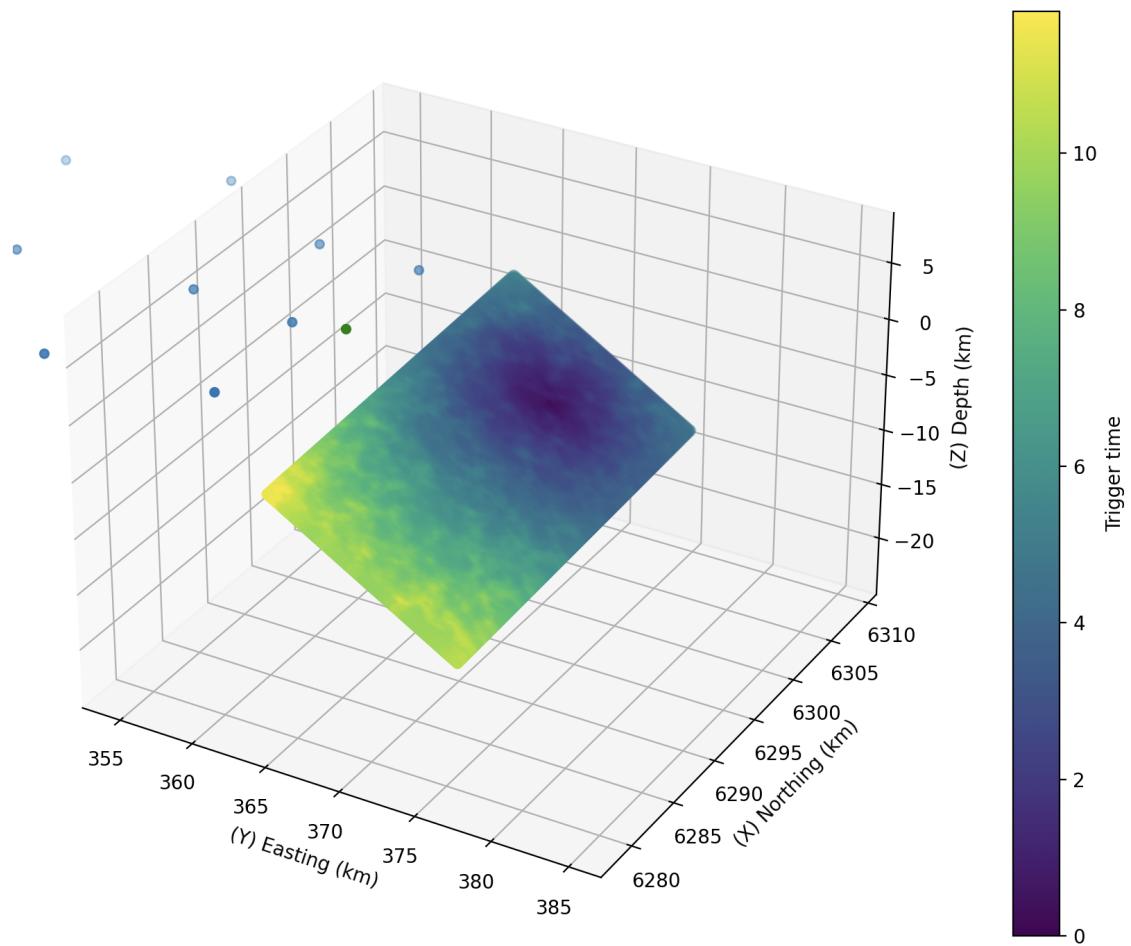


Figura 4.17: Trigger time en ShakerMaker para $Mw = 6.7$ norte-sur 1
 Fuente: Elaboración propia

Ahora se muestra el tercer tipo de ruptura en la Figura 4.18, donde el valor de tiempo de ruptura tt para un sismo $Mw = 6.9$ de tipo norte-sur, es de $tt = 14.6$ segundos. Con respecto a las otras realizaciones con la misma magnitud y tipo de ruptura, promedian 14.8, siendo coherente con la similitud que deben tener.

En este caso, se observa la ruptura sísmica sur-norte, siendo un tipo de falla que implica, a diferencia del anterior, el deslizamiento al lado norte de la FSR. Como se observa en la Figura 4.17, siendo nuevamente asimétrico, pero esta vez, desde 0 segundos con color oscuro en el sur de la falla hasta 14.6 segundos, con el color más amarillo en el extremo norte.

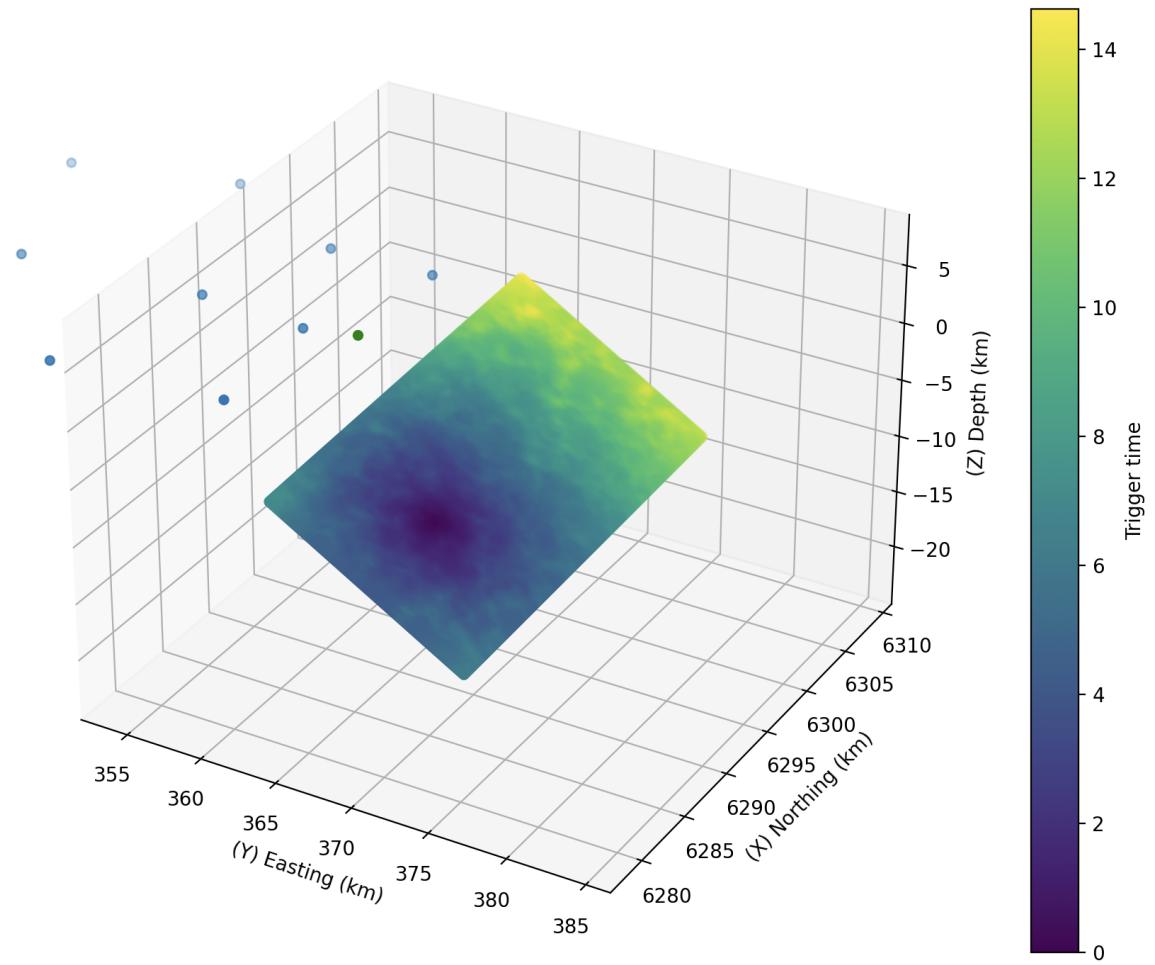


Figura 4.18: Trigger time en ShakerMaker para $Mw = 6.9$ sur-norte 1
 Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 4.19, el valor de tiempo de ruptura para un sismo $Mw = 7.0$ de tipo bilateral, es de $tt = 18.4$ segundos. Con respecto a las otras realizaciones con la misma magnitud y tipo de ruptura, promedian 18.6, siendo coherente con la similitud que deben tener.

En este caso, se observa nuevamente una ruptura sísmica bilateral explicada anteriormente, como se observa en la Figura 4.19, teniendo rangos de valores simétricos, desde 0 segundos con color oscuro en el centro hasta 18.6 segundos, con el color más amarillo en cada extremo.

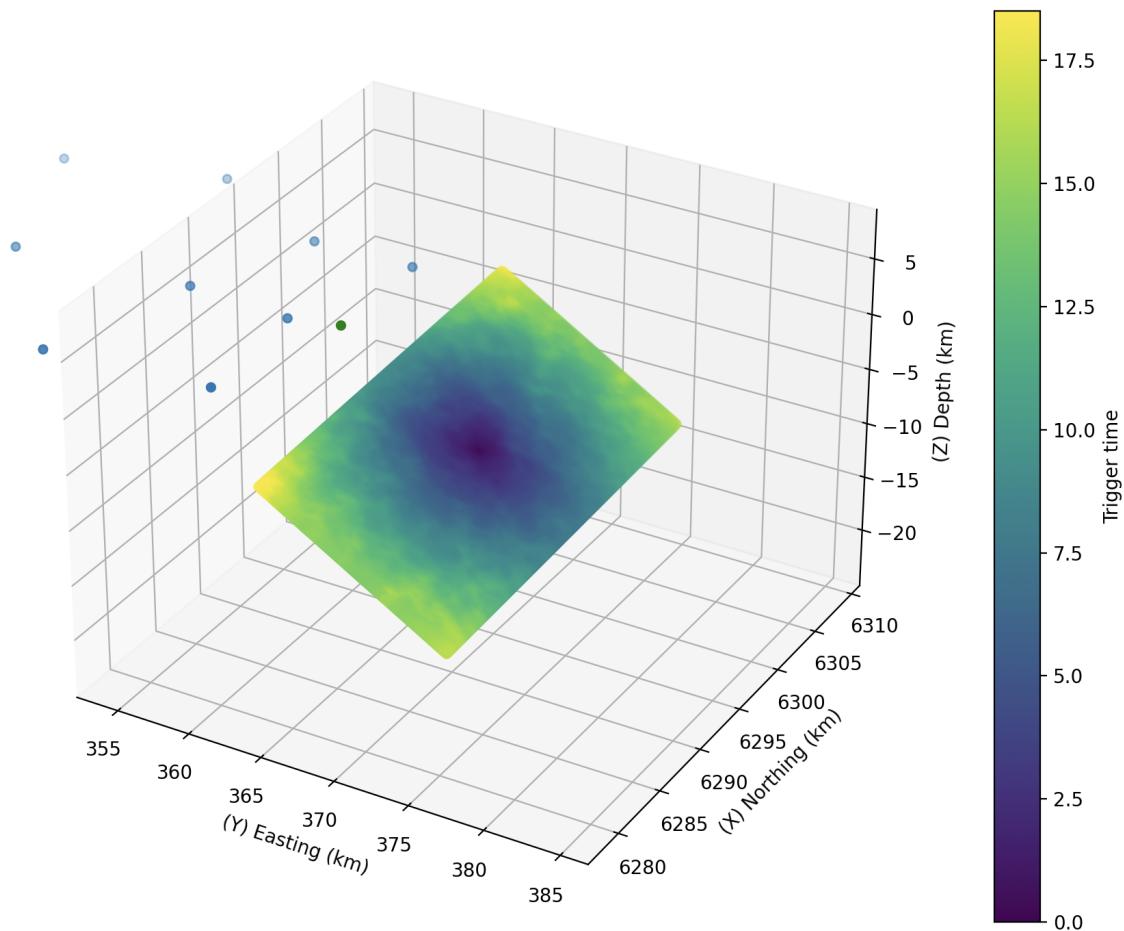


Figura 4.19: Trigger time en ShakerMaker para Mw = 7.0 bilateral 1
 Fuente: Elaboración propia

El tipo de ruptura sísmica, bilateral o unilateral (NS) o (SN), puede tener importantes implicaciones para la evaluación del riesgo sísmico en una región determinada. Debido a que si es bilateral, la liberación de energía sísmica al producirse en ambas direcciones, puede haber una mayor liberación de energía sísmica con respecto a las rupturas unilaterales y, por lo tanto, un mayor peligro sísmico para las comunidades cercanas a la falla.

4.1.5. Resumen de los resultados iniciales

Para visualizar los resultados iniciales en detalle, de *strike*, *dip*, *rake*, *slip* y tiempos de ruptura (*tt*), obtenidos de las simulaciones en la FSR, ver tabla 4.1.

Magnitud y tipo de ruptura	<i>Strike</i> [°]	<i>Dip</i> [°]	<i>Rake</i> [°]	<i>Slip</i> [m]	<i>tt</i> [s]
6.5 BL_1	358	40	113	1.8	9.4
6.5 BL_2	358	40	113	1.8	9.6
6.5 BL_3	358	40	113	1.8	9.5
6.7 BL_1	358	40	113	3.8	12.3
6.7 BL_2	358	40	113	3.8	12.6
6.7 BL_3	358	40	113	3.8	12.0
6.9 BL_1	358	40	113	7.5	16.2
6.9 BL_2	358	40	113	7.5	16.4
6.9 BL_3	358	40	113	7.5	16.1
7.0 BL_1	358	40	113	10.5	18.4
7.0 BL_2	358	40	113	10.5	18.8
7.0 BL_3	358	40	113	10.5	18.6
6.5 NS_1	358	40	113	1.8	9.2
6.5 NS_2	358	40	113	1.8	8.7
6.5 NS_3	358	40	113	1.8	8.6
6.7 NS_1	358	40	113	3.8	11.8
6.7 NS_2	358	40	113	3.8	11.5
6.7 NS_3	358	40	113	3.8	11.2
6.9 NS_1	358	40	113	7.5	15.0
6.9 NS_2	358	40	113	7.5	14.7
6.9 NS_3	358	40	113	7.5	14.1
7.0 NS_1	358	40	113	10.5	17.5
7.0 NS_2	358	40	113	10.5	17.0
7.0 NS_3	358	40	113	10.5	16.2
6.5 SN_1	358	40	113	1.8	8.7
6.5 SN_2	358	40	113	1.8	9.4
6.5 SN_3	358	40	113	1.8	8.8
6.7 SN_1	358	40	113	3.8	11.3
6.7 SN_2	358	40	113	3.8	12.2
6.7 SN_3	358	40	113	3.8	11.2
6.9 SN_1	358	40	113	7.5	14.6
6.9 SN_2	358	40	113	7.5	15.6
6.9 SN_3	358	40	113	7.5	14.2
7.0 SN_1	358	40	113	10.5	16.5
7.0 SN_2	358	40	113	10.5	18.0
7.0 SN_3	358	40	113	10.5	16.0

Cuadro 4.1: Resumen de resultados iniciales

Los resultados obtenidos en comparación a la literatura utilizada, tienen algunas diferencias. Por un lado, lo obtenido en el estudio de Armijo et al. (2010), donde se plantea que el *slip* obtenido es de unos 4 m, con magnitudes que van entre $Mw = 6.6 - 7.0$ (correspondiente a simulaciones realizadas a 10 km de profundidad).

En el presente estudio, el *slip* sísmico de esta dimensión podría ser considerado alto para un sismo de esa magnitud, ya que, por ejemplo, los valores típicos de *slip* para un sismo de $Mw = 6.5$ suelen estar en el rango de 0.5 a 1.5 m, y en este caso, para esa magnitud, fue de un slip máximo de 1.8 m. Esto debido a que ambos valores no tienen una relación directa, ya que el *slip* se mide en metros y además, puede variar según el tipo de falla y otras condiciones del terreno.

En cambio, en el caso del estudio de Estay et al. (2016), para magnitudes de $Mw = 6.2 - 7.0$, el *slip* obtenido también sería de 4 m en promedio, lo que se acerca de mejor manera a los resultados obtenidos. Esto, debido a que los resultados de este estudio, con magnitudes que van entre $Mw = 6.5 - 7.0$, se obtiene un *slip* promedio de $slip = 5.9$ (considerando los *slip* máximos de 1.8 y 10.5 de la tabla 4.1).

Los parámetros de cada sub-falla poseen relaciones realistas entre sí, lo que es resultado de la aplicación del método UCSB. Para los valores de *dip*, en el estudio de Armijo et al. (2010) se menciona que el utilizado para la FSR es de 50° - 60° y en Ammirati et al. (2019), para una falla de 50 km por 20 km es de 34° , es por esto, que en este estudio el valor utilizado en el método es de 40° . Un comportamiento similar ocurre para los valores de *strike* y *rake*.

Capítulo 5

Análisis de resultados y sugerencias

En este capítulo se muestran las estadísticas de las distintas medidas de intensidad obtenidas mediante las simulaciones; peak ground acceleration (*PGA*), peak ground velocity (*PGV*), peak ground displacement (*PGD*), espectros y duración de llegada de ondas P y S. También, se realiza la comparación con el espectro de las normas chilenas NCh433 y NCh2369, sugiriendo puntos importantes para futuras simulaciones.

Es necesario destacar, una vez más, que se realizaron 9 simulaciones para cada una de las magnitudes mencionadas, lo que equivale a un total de 36 simulaciones para cada estación sísmica. Dado que hay 10 estaciones sísmicas involucradas, se generaron 360 resultados diferentes con el fin de recopilar los datos necesarios.

A continuación, los resultados que se comentan, serán de algunas simulaciones de las mencionadas anteriormente. De todos modos, se adjunta un link¹ con todos las simulaciones, gráficos y tablas de resultados que se necesiten, con el fin de evitar la saturación del documento con imágenes.

Los resultados a analizar serán; $Mw = 6.5$ con ruptura bilateral 1, $Mw = 6.7$ con ruptura norte-sur 2, $Mw = 6.9$ con ruptura sur-norte 3 y $Mw = 7.0$ con ruptura bilateral 2.²

¹https://drive.google.com/drive/folders/1XKtqRdq0tzWyB4IZ-Hr15TeD_1QuXal

²1, 2 o 3 se refiere a qué número de realización pertenece. Recordar que se hicieron 3 por cada tipo de ruptura.

5.1. Valores PGD, PGV y PGA obtenidos

Estas son medidas de intensidad sísmica que se pueden correlacionar con los efectos del movimiento sísmico sobre la infraestructura. Dichas medidas, resultan esenciales para estimar los posibles daños, planificar medidas preventivas y de mitigación de riesgos sísmicos.

El PGD es la medida del desplazamiento máximo en una dirección horizontal o vertical durante un sismo y para este análisis se medirá en metros. Este valor se obtiene desde la integral de la velocidad con respecto al tiempo t . Por otro lado, el PGV, es la velocidad máxima del movimiento del suelo en cualquier dirección durante un sismo y para este análisis se medirá en metros por segundo.

Por último, el valor de PGA, se refiere a la aceleración máxima del movimiento del suelo en cualquier dirección durante un terremoto y para este análisis se medirá en metros por segundo al cuadrado. Este valor se obtiene desde la derivada de la velocidad con respecto al tiempo t (dv/dt).

Estos valores se relacionan entre sí porque todos miden diferentes aspectos del movimiento del suelo durante un sismo. Más importante, el PGA afecta más a estructuras rígidas (ej. Edificios bajos) mientras que el PGD es un predictor de las demandas de desplazamientos en sistemas flexibles (edificios altos o estructuras aisladas sísmicamente).

Se analizarán 4 de las 10 estaciones que se simularon, con tal de abarcar una de cada zona, siendo; la estación H1 perteneciente al campo hanging-wall o sobre la FSR, la N2 perteneciente al campo cercano, la I3 perteneciente al campo intermedio y la F1 perteneciente al campo lejano (estas ubicaciones fueron mostradas en la sección 3.3).

En cuanto las figuras que se mostrarán a continuación, se mantiene el mismo sistema de coordenadas visto anteriormente en la Figura 4.2, con eje z (hacia abajo positivo), e (este) y n (norte). Además, para el valor de las aceleraciones que se produce en el suelo mediante los sismos, se observa que los valores están en [m/s^2], pero para motivos de análisis se utilizará en unidades de aceleración de gravedad [g].

En la Figura 5.1, se observan los gráficos de PGD, PGV y PGA, para cada dirección de la estación H1, perteneciente a la zona de hanging-wall con un sismo de $Mw = 6.5$ y la realización N.^o 1 de una ruptura bilateral (a modo de referencia, la ubicación de H1 pertenece al edificio de ingeniería de la Universidad de Los Andes).

En cuanto al desplazamiento de la falla, se observa que el máximo desplazamiento es de 0.19 [m] hacia abajo en dirección z , 0.13 [m] en dirección e y 0.06 [m] en dirección n . Lo que significa que la roca por encima de la falla se ha elevado en relación con la roca por debajo de ella 0.19 metros, produciéndose durante el sismo, una elevación vertical y también, un movimiento en las otras 2 direcciones.

Ahora, respecto a la máxima velocidad de vibración del suelo mediante el sismo, se observa que la máxima velocidad es de 0.30 [m/s] en dirección z , 0.30 [m/s] en dirección e y 0.54 [m/s] en dirección n . Lo que significa que se experimentó una mayor velocidad de vibración en dirección z .

Finalmente, para el valor de la máxima aceleración, se obtiene que la máxima aceleración es de 0.45 [g] en dirección z , 0.68 [g] en dirección e y 0.8 [g] en dirección n . Lo que significa que se experimentó una mayor aceleración en la dirección n .

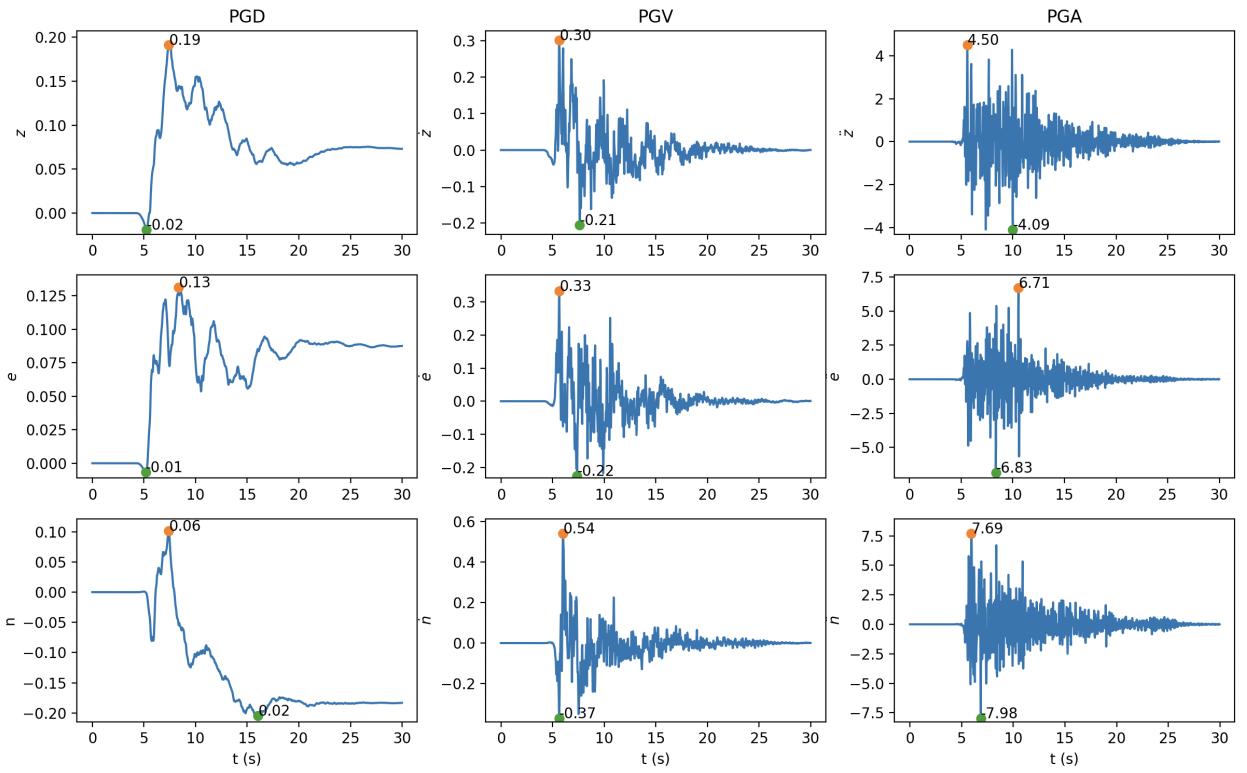


Figura 5.1: PGD, PGV y PGA de estación H1 para Mw = 6.5 bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.2, se observan los gráficos de PGD, PGV y PGA, para cada dirección de la estación N2, perteneciente a la zona cercana, con un sismo de Mw = 6.5 y la realización N.^o 1 de una ruptura bilateral.

En cuanto al desplazamiento de la falla, se observa que el máximo desplazamiento es de 0.12 [m] hacia abajo en dirección z , 0.32 [m] en dirección e y 0.06 [m] en dirección n . Lo que significa que la roca por encima de la falla se ha elevado en relación con la otra 0.12 metros, produciéndose durante el sismo, una elevación vertical y también, un movimiento en las otras 2 direcciones, con mayor desplazamiento en la dirección este.

Ahora, respecto a la velocidad máxima de vibración del suelo durante el sismo, se ha registrado que la velocidad máxima es de 0.20 metros por segundo [m/s] en dirección vertical z , 0.26 [m/s] en dirección este e y 0.30 [m/s] en dirección norte n . Esto indica que, en esta ocasión, la mayor velocidad de vibración se produjo en dirección este.

Finalmente, para el valor de la máxima aceleración que se produce en el suelo mediante este sismo, se obtiene que la máxima aceleración es de $0.37 [g]$ en dirección z , $0.41 [g]$ en dirección e y $0.46 [g]$ en dirección n . Lo que significa que para esta estación, se experimentó una mayor aceleración en la dirección n .

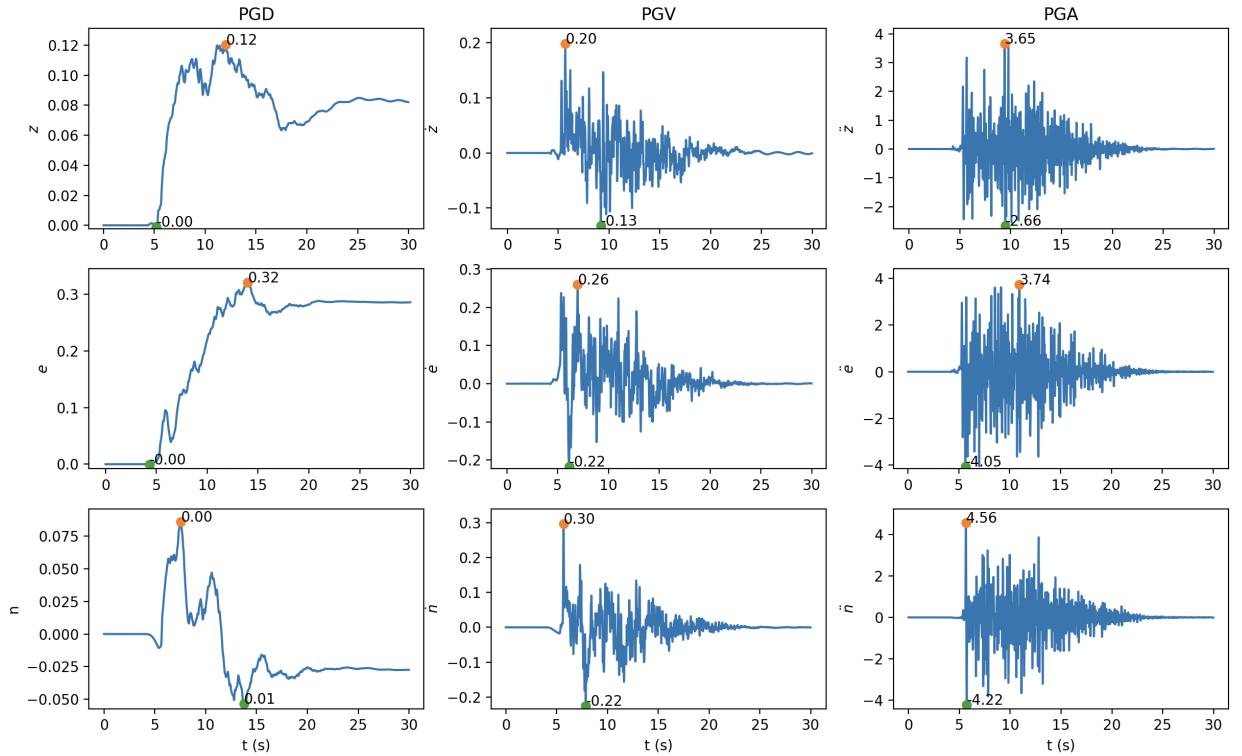


Figura 5.2: PGD, PGV y PGA de estación N2 para $Mw = 6.5$ bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.3, se observan los gráficos de PGD, PGV y PGA, para cada dirección de la estación I3, perteneciente a la zona intermedia, con un sismo de $Mw = 6.5$ y la realización N.^o 1 de una ruptura bilateral.

En cuanto al desplazamiento de la falla, se observa que el máximo desplazamiento es de $0.03 [m]$ hacia arriba en dirección z , $0.04 [m]$ en dirección e y $0.01 [m]$ en dirección n . Lo que significa que la roca por encima de la falla ha bajado 0.03 metros en relación con la otra, produciéndose durante el sismo, una elevación vertical y también, un movimiento en las otras 2 direcciones, con mayor desplazamiento en la dirección este.

Ahora, respecto a la velocidad máxima de vibración del suelo durante el sismo, se ha registrado que la velocidad máxima es de 0.08 metros por segundo [m/s] en dirección vertical z , 0.11 [m/s] en dirección este e y 0.1 [m/s] en dirección norte n . Esto indica que, en esta ocasión, la mayor velocidad de vibración se produjo en dirección este.

Finalmente, para el valor de la máxima aceleración que se produce en el suelo mediante este sismo, se obtiene que la máxima aceleración es de 0.13 [g] en dirección z , 0.20 [g] en dirección e y 0.18 [g] en dirección n . Lo que significa que para esta estación, se experimentó una mayor aceleración en la dirección e .

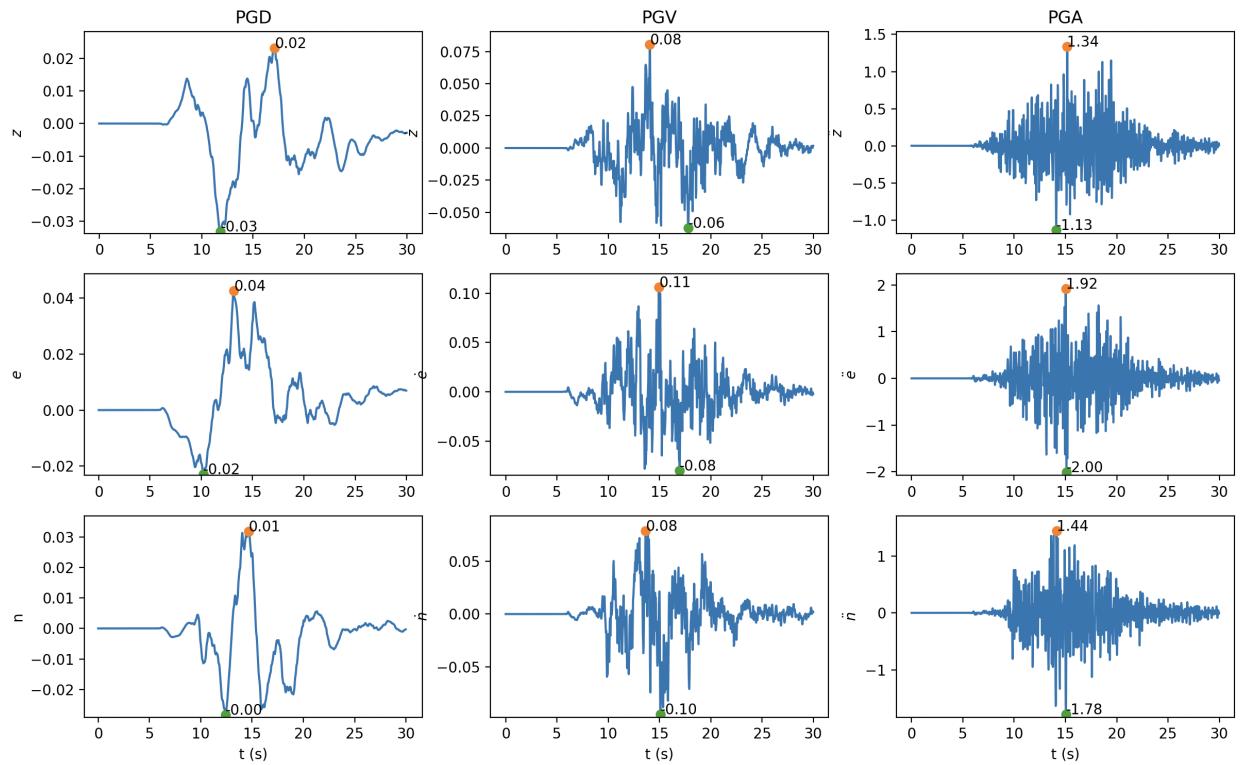


Figura 5.3: PGD, PGV y PGA de estación I3 para $Mw = 6.5$ bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.4, se observan los gráficos de PGD, PGV y PGA, para cada dirección de la estación F1, perteneciente a la zona lejana, con un sismo de $Mw = 6.5$ y la realización N.^o 1 de una ruptura bilateral.

En cuanto al desplazamiento de la falla, se observa que el máximo desplazamiento es de 0.08 [m] hacia abajo en dirección z , 0.06 [m] en dirección e y 0.0 [m] en dirección n . Lo que significa que la roca por encima de la falla se ha elevado en relación con la otra, 0.08 metros, produciéndose durante el sismo, una mínima elevación vertical y también, un movimiento en la dirección e , un nulo desplazamiento en la dirección n y un mayor desplazamiento en la dirección vertical.

Ahora, respecto a la velocidad máxima de vibración del suelo durante el sismo, se ha registrado que la velocidad máxima es de 0.06 metros por segundo [m/s] en dirección vertical z , 0.11 [m/s] en dirección este e y 0.14 [m/s] en dirección norte n . Esto indica que, en esta ocasión, la mayor velocidad de vibración se produjo en dirección este.

Finalmente, para el valor de la máxima aceleración que se produce en el suelo mediante este sismo, se obtiene que la máxima aceleración es de 0.17 [g] en dirección z , 0.22 [g] en dirección e y 0.31 [g] en dirección n . Lo que significa que para esta estación, se experimentó una mayor aceleración en la dirección n .

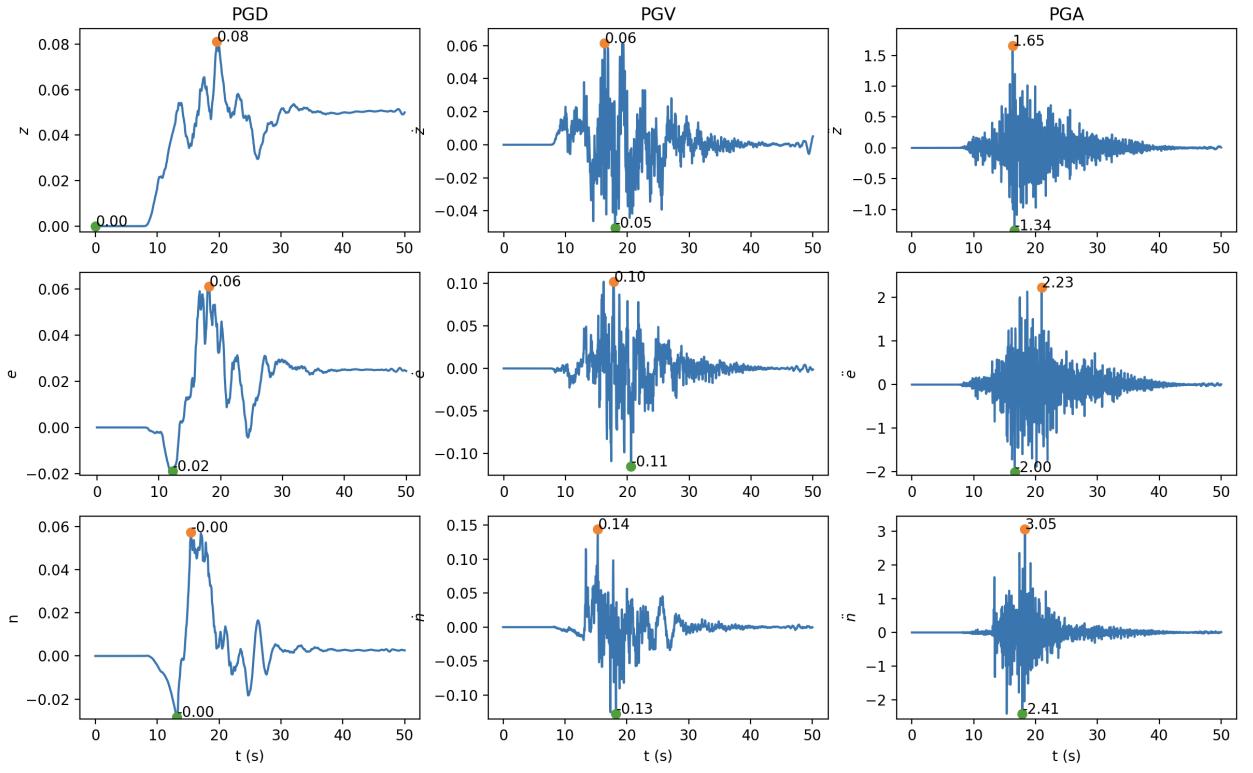


Figura 5.4: PGD, PGV y PGA de estación F1 para Mw = 6.5 bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

A continuación, para resumir los resultados obtenidos, en la tabla 5.1, se observan los resultados analizados anteriormente junto a las demás estaciones pertenecientes al caso del sismo Mw = 6.5 con ruptura bilateral 1. Se indica, además, la distancia hacia el centro de la FSR que tiene cada una de las estaciones y junto a cada valor en la tabla, se puede observar la dirección (z , n o e) que obtuvo el máximo desplazamiento, velocidad o aceleración. Esto se mantiene para todos los casos posteriores.

Estación	PGD [m]	PGV [m/s]	PGA [g]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	0.19 z	0.54 n	0.79 n	8.5
N1	0.23 e	0.28 n	0.46 e	10.9
N2	0.32 e	0.30 n	0.46 n	3.3
N3	0.20 e	0.32 n	0.41 n	10.6
I1	0.14 z	0.15 n	0.28 n	20.7
I2	0.13 e	0.24 n	0.36 n	10.4
I3	0.04 e	0.10 n	0.20 e	17.7
F1	0.08 z	0.14 n	0.31 n	28.5
F2	0.05 e	0.10 n	0.26 n	22.5
F3	0.04 e	0.10 e	0.17 e	28.6

Cuadro 5.1: Valores máximos para $Mw = 6.5$ BL 1

De los valores obtenidos para el presente caso, es posible afirmar que a medida que la distancia al centro de la falla aumenta, para las zonas de estaciones cercanas, intermedias y lejanas, el valor de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones también lo hace. Esto no ocurre de la misma manera con la zona de hanging-wall, ya que a pesar de estar a 8.5 km del centro de la falla, tiene velocidades y aceleraciones superiores a la estación N2, que se encuentra más cercana a la falla, pero en una zona distinta.

Para la tabla 5.2, se observan los resultados analizados anteriormente junto a las demás estaciones pertenecientes al caso del sismo $Mw = 6.7$ con ruptura norte-sur 2.

Estación	PGD [m]	PGV [m/s]	PGA [g]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	0.38 z	0.78 e	0.77 e	8.5
N1	0.40 e	0.44 n	0.48 e	10.9
N2	0.65 e	0.39 n	0.46 n	3.3
N3	0.72 e	0.57 e	0.44 n	10.6
I1	0.22 z	0.21 n	0.29 n	20.7
I2	0.27 e	0.19 n	0.32 e	10.4
I3	0.17 e	0.20 e	0.30 e	17.7
F1	0.19 z	0.20 e	0.24 n	28.5
F2	0.02 e	0.17 e	0.27 e	22.5
F3	0.12 e	0.17 e	0.23 e	28.6

Cuadro 5.2: Valores máximos para $Mw = 6.7$ NS 2

A pesar de que el sismo fue más fuerte y tuvo una ruptura diferente, algunos valores de los parámetros fueron similares al anterior. Se registraron valores mayores de desplazamiento y velocidad en la zona de hanging-wall, pero la aceleración fue ligeramente menor y en otra dirección.

Para la tabla 5.3, se observan los resultados analizados anteriormente junto a las demás estaciones pertenecientes al caso del sismo $Mw = 6.9$ con ruptura sur-norte 3.

Estación	PGD [m]	PGV [m/s]	PGA [g]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	1.35 z	1.84 n	2.14 n	8.5
N1	1.17 e	0.47 e	0.58 n	10.9
N2	1.20 e	0.68 e	0.98 n	3.3
N3	0.54 z	0.62 e	0.86 e	10.6
I1	0.71 e	0.43 e	0.56 n	20.7
I2	0.62 e	0.47 e	0.62 n	10.4
I3	0.24 e	0.25 n	0.40 n	17.7
F1	0.30 e	0.31 e	0.42 e	28.5
F2	0.18 e	0.37 n	0.35 n	22.5
F3	0.14 z	0.19 e	0.27 e	28.6

Cuadro 5.3: Valores máximos para $Mw = 6.9$ SN 3

De esta tabla, se puede destacar que al subir la magnitud y cambiar el modo de ruptura a SN, la zona de hanging-wall presenta un aumento considerable, con un valor muy alto en la dirección *n* con respecto al comportamiento sísmico en la región. Respecto a los demás valores, se observa el normal aumento de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, debido al aumento de la magnitud.

Para la tabla 5.4, se observan los resultados analizados anteriormente junto a las demás estaciones pertenecientes al caso del sismo $Mw = 7.0$ con la realización 2 de una ruptura bilateral.

Estación	PGD [m]	PGV [m/s]	PGA [g]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	1.43 z	1.10 n	1.35 e	8.5
N1	1.12 e	0.48 e	0.80 e	10.9
N2	1.76 e	0.49 e	0.95 e	3.3
N3	1.20 e	0.59 e	0.93 e	10.6
I1	0.58 e	0.30 e	0.46 e	20.7
I2	0.76 e	0.30 e	0.56 n	10.4
I3	0.14 e	0.24 e	0.50 e	17.7
F1	0.44 z	0.24 e	0.43 n	28.5
F2	0.17 e	0.22 n	0.36 e	22.5
F3	0.14 z	0.19 z	0.29 e	28.6

Cuadro 5.4: Valores máximos para $Mw = 7.0$ BL 2

Con estos resultados, junto a los adjuntos en el material complementario, es posible destacar que a medida que las intensidades de sismos van en aumento, también lo hacen los valores de PGD, PGV Y PGA, no así para la zona de hanging-wall, la que siempre tiene valores altos, sobre todo de aceleraciones, en comparación a las demás estaciones. También, la dirección que obtiene mayores valores en los parámetros obtenidos es la dirección *norte* seguida por la dirección *este*.

En cuanto al modo de ruptura, cabe señalar que los menores valores son obtenidos para el tipo norte-sur y los mayores para el modo de ruptura sur-norte, seguido muy cerca el tipo bilateral. Esto significa que la falla tiene un movimiento preferencial en dirección sur-norte, lo que puede deberse a factores geológicos, estructurales o tectónicos que afectan la forma en que se producen las fuerzas y la deformación en la zona de la falla.

Se destaca, que en casos de aceleraciones muy elevadas, como en el caso de hanging-wall (mayores a 0.9g, llegando a 2.0g incluso) probablemente se desencadenan efectos de sitio no-lineales que tenderían a reducir los valores de PGA y aumentar el PGD y duración. Debido a eso, hay que proceder con cuidado al aplicar estos registros directamente sin detenerse a pensar en respuesta no lineal de sitio antes de utilizarlos. Lo cual excede los alcances de este trabajo.

5.1.1. Duración de llegada de ondas P y S

En primer lugar, las ondas P y S son ondas sísmicas que se propagan después de un terremoto. Las ondas P son las más rápidas y se propagan a través de la Tierra a velocidades de 8 km/s en la corteza y hasta 23 km/s en el núcleo.

Las ondas S son más lentas, viajando a 4.5 km/s en la corteza y hasta 8 km/s en el manto, pero no pueden propagarse a través del núcleo líquido. El tiempo de llegada de las ondas P y S depende de la distancia al epicentro, y la diferencia de tiempo entre ellas se usa para calcular la distancia y magnitud del terremoto.

Para los sismos analizados anteriormente, se utilizaron los gráficos para ver de manera visual y aproximada los valores de tiempo de llegada de ambas ondas. Estos fueron resumidos en tablas junto a las distancias desde las estaciones al centro de la FSR.

En la tabla 5.5, se observa el tiempo de llegada de las ondas P y S para el sismo de $Mw = 6.5$ BL 1. Se obtiene que a medida que la estación se encuentra más lejana del centro de la falla, las ondas P y S tardan más tiempo en registrarse, llegando a 13 segundos para una distancia aproximada de 30 km.

Estación	Onda P [s]	Onda S [s]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	4	5	8.5
N1	5	7	10.9
N2	4	5	3.3
N3	4.5	6	10.6
I1	7	10	20.7
I2	5	7	10.4
I3	6	9	17.7
F1	8	13	28.5
F2	7	11	22.5
F3	8	13	28.6

Cuadro 5.5: Tiempos de llegada de ondas P y S para $Mw = 6.5$ BL 1

En la tabla Ver tabla 5.6, se observa el tiempo de llegada de las ondas P y S para el sismo de $Mw = 6.7$ NS 2. Se obtiene que a medida que la estación se encuentra más lejana del centro de la falla, las ondas P y S tardan más tiempo en registrarse, llegando a 14 segundos para una distancia aproximada de 30 km, lo que es superior a la registrada en el sismo anterior con menor magnitud y otro tipo de ruptura.

Por lo que en comparación a una magnitud menor y un tipo de ruptura bilateral, este sismo NS obtiene llegadas similares, casi todos levemente menores, debido al aumento de la magnitud. También, las ondas P y S que llegan al hanging-wall pueden experimentar cambios en su amplitud, velocidad y dirección, ya que, algunos de los factores que pueden afectar las ondas sísmicas en el hanging-wall incluyen la densidad y rigidez de las rocas.

Estación	Onda P [s]	Onda S [s]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	3.2	4	8.5
N1	4.3	6	10.9
N2	4	5.7	3.3
N3	5	7.5	10.6
I1	5.5	9	20.7
I2	4.7	7.7	10.4
I3	6.1	10.3	17.7
F1	7.4	12.4	28.5
F2	6.7	9.5	22.5
F3	8	14	28.6

Cuadro 5.6: Tiempos de llegada de ondas P y S para Mw = 6.7 NS 2

Para la tabla Ver tabla 5.7, se observa el tiempo de llegada de las ondas P y S para el sismo de Mw = 6.9 SN 3. Se obtiene que a medida que la estación se encuentra más lejana del centro de la falla, las ondas P y S tardan más tiempo en registrarse, llegando igualmente a 14 segundos para una distancia aproximada de 30 km, similar al sismo anterior de menor intensidad con ruptura NS.

Se observa que las ondas P y S que llegan al hanging-wall (H1), aumentan en mayor cantidad el tiempo de llegada de las ondas en comparación a las otras estaciones.

Estación	Onda P [s]	Onda S [s]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	5	6.6	8.5
N1	5	7.5	10.9
N2	3.8	5.5	3.3
N3	4	6	10.6
I1	6.7	10	20.7
I2	5	7.6	10.4
I3	5.5	9	17.7
F1	8.5	14	28.5
F2	7	11.5	22.5
F3	7.4	12	28.6

Cuadro 5.7: Tiempos de llegada de ondas P y S para Mw = 6.9 SN 3

Para la tabla Ver tabla 5.8, se observa el tiempo de llegada de las ondas P y S para el sismo de Mw = 7.0 BL 2. Se obtiene que los tiempos nuevamente no varían de manera gradual a medida que se aumenta la magnitud, como ocurrió con los casos anteriores.

Estación	Onda P [s]	Onda S [s]	Distancia al centro de la FSR [km]
H1	4	5	8.5
N1	5.5	7	10.9
N2	4.4	5.5	3.3
N3	5	6	10.6
I1	6.5	11	20.7
I2	5.2	7.6	10.4
I3	6	9	17.7
F1	9	13	28.5
F2	7	12	22.5
F3	8	13	28.6

Cuadro 5.8: Tiempos de llegada de ondas P y S para Mw = 7.0 BL 2

Finalmente, la intensidad de una onda sísmica no afecta el tiempo de llegada de las ondas P y S, ya que esto está determinado por la velocidad a la que se propagan cada una de las ondas y las características del medio por el que viajan. Sin embargo, el tipo de ruptura sísmica si puede afectar el tiempo de llegada de las ondas P y S, ya que la velocidad de propagación de ambas ondas está influenciada por el tipo de ruptura que ocurre en la fuente sísmica y las propiedades del medio a través del cual se propagan las ondas, donde para el tipo de ruptura SN se obtuvieron los tiempos mayores.

5.2. Pseudoespectros obtenidos por ShakerMaker

Un pseudoespectro de PGA (Ground Motion Pseudo-Spectral Acceleration) es una medida utilizada en ingeniería sísmica para caracterizar el movimiento del suelo durante un sismo. El pseudoespectro de PGA se utiliza para estimar la aceleración máxima que un edificio puede experimentar durante un terremoto y se calcula a partir de la respuesta del suelo a diferentes frecuencias de vibración.

En lugar de medir la aceleración real del suelo durante un sismo, se utilizan modelos matemáticos para simular la respuesta del suelo a diferentes frecuencias. Estos modelos se basan en datos empíricos recopilados de terremotos pasados y se utilizan para predecir la respuesta del suelo a futuros terremotos, como lo fue este estudio.

Los pseudoespectros de PGA son una herramienta importante en el diseño de estructuras resistentes a los terremotos y la evaluación del riesgo sísmico en un área determinada. Estos pseudoespectros se expresan en términos de la aceleración máxi-

ma que el suelo experimentaría en una determinada frecuencia y se representan como un gráfico que muestra la aceleración en el eje vertical y la frecuencia en el eje horizontal. Al utilizar modelos matemáticos basados en los pseudoespectros de PGA, los ingenieros pueden simular diferentes escenarios de terremotos y diseñar estructuras que puedan soportar las fuerzas sísmicas esperadas.

El pseudoespectro de cada dirección y el valor de PGA visto anteriormente, están estrechamente relacionados. El valor de PGA es la máxima aceleración del suelo en términos de gravedades (g) que se espera durante un terremoto en un lugar determinado. Por otro lado, el pseudoespectro de PGA es una curva que representa la respuesta del suelo en términos de aceleración sísmica en función de la frecuencia.

A continuación, se observan algunos de los pseudoespectros obtenidos, donde es posible resumir de manera más grafica los valores de las aceleraciones obtenidas en [m/s^2], para las componentes horizontales y para ambas direcciones, donde el espectro se calcula para varios periodos.

En la Figura 5.5 se muestra el pseudoespectro en dirección Este del sismo $Mw = 6.5$ bilateral 1, donde se observa con línea punteada el espectro de diseño que permite la norma NCh 433 (para la NCh 2369 se muestra otra figura más adelante), donde en las frecuencias altas, los valores de la aceleración son muy superiores, con un valor máximo de 2.5 [g] para la estación de hanging-wall (s0). Cabe destacar que el pseudoespectro de la norma está realizado para un suelo de tipo A (roca), edificio 2 y en zona sísmica 2 (a la cual pertenece la FSR) con respecto a la norma.

Para el espectro de la norma NCh 433, se seleccionaron parámetros para roca en la zona de Santiago, con una aceleración de 0.3g. Para un edificio se utilizan espectros elásticos ($R = 1$) y no reducidos, con 5 % de amortiguamiento, al igual que los demás espectros calculados.

Esto se traduce en que si en el pseudoespectro es de 2.5g como máximo y además, en los períodos más cortos sobrepasan el valor, significa que la estructura o edificación está experimentando una fuerza sísmica que excede su capacidad de resistencia. Esto puede provocar daños estructurales y en el peor de los casos, el colapso total o parcial de la estructura.

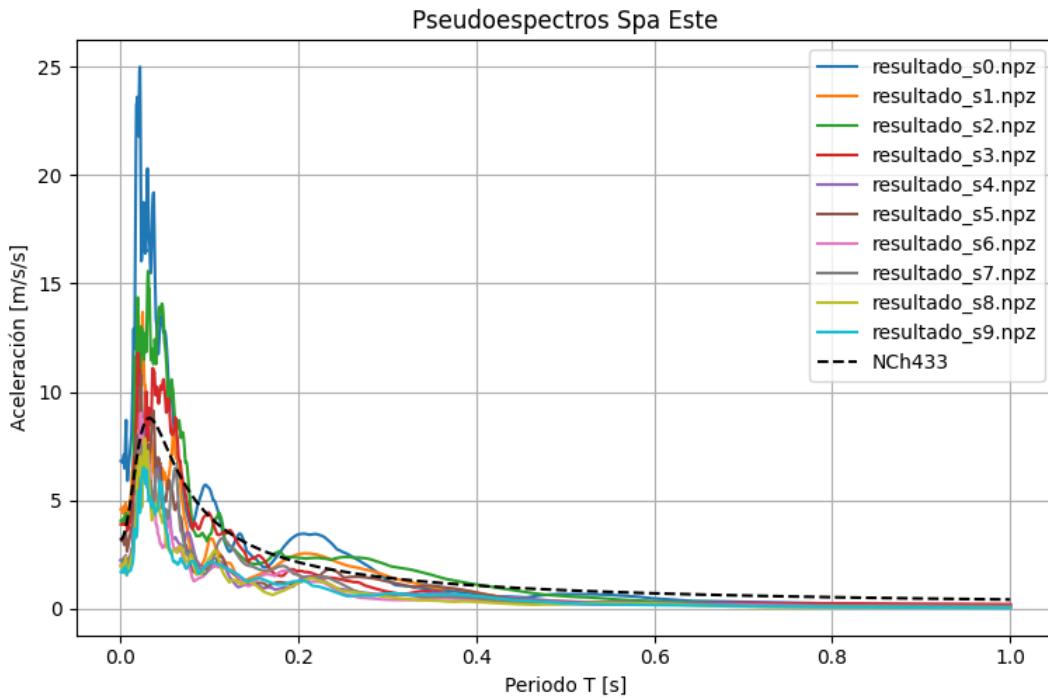


Figura 5.5: Pseudoespectro dirección Este para Mw = 6.5 bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

La aceleración registrada por una estación sismológica en el sector de hanging-wall de una falla puede ser alta si hay una actividad sísmica significativa en esa zona. La zona de hanging-wall es la zona de roca que está por encima de la falla, en la que se produce un desplazamiento hacia arriba durante una falla inversa.

Durante un terremoto, las ondas sísmicas se propagan desde el punto de origen del terremoto a través del subsuelo, y se pueden detectar en la superficie por medio de una estación sismológica. Si la estación se encuentra en el sector de hanging wall de una falla inversa activa, es posible que registre una aceleración sísmica más alta debido a que esta zona está experimentando un desplazamiento hacia arriba durante el terremoto.

Es importante tener en cuenta que la aceleración sísmica puede variar en función de la distancia a la fuente del terremoto, la magnitud del mismo, la orientación y geometría de la falla, así como las características de las rocas que se encuentran en la zona.

En cualquier caso, la detección y el registro de la aceleración sísmica por una estación sismológica en la zona de hanging wall de una falla activa puede proporcionar información importante sobre la actividad sísmica y la sismicidad potencial en esa zona.

Para las Figuras 5.7 y 5.8 se muestra el pseudoespectro en dirección norte y vertical, respectivamente, del sismo $M_w = 6.5$ bilateral 1, donde se observa con línea punteada el espectro de diseño que permite la norma NCh 433 (el de la NCh 2369 se muestra en la Figura 5.6), donde nuevamente en las frecuencias altas, los valores de la aceleración son muy superiores, con un valor máximo de $2.5 [g]$ para la estación de hanging-wall (s_0) en dirección Norte y $1.75 [g]$ en dirección vertical.

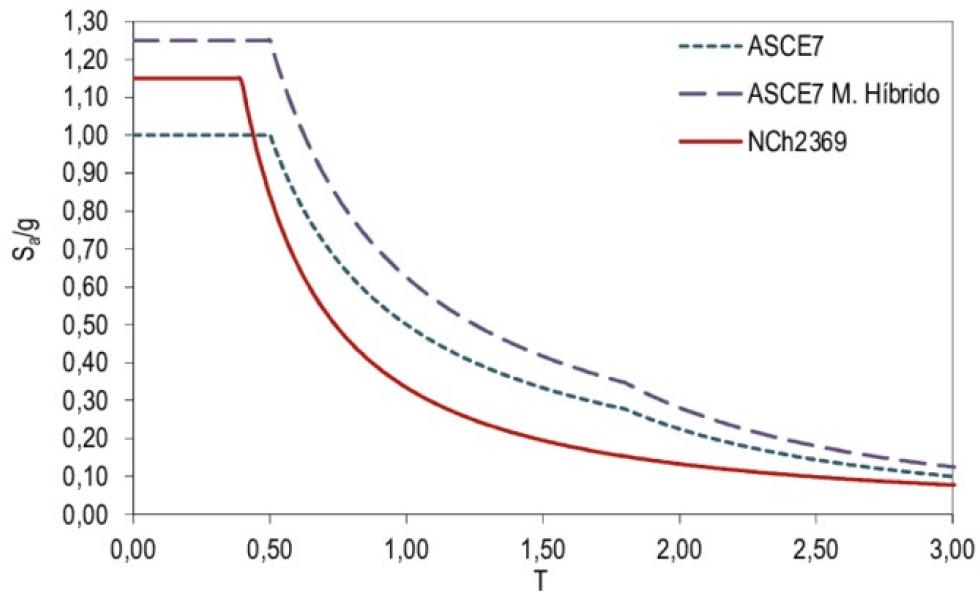


Figura 5.6: Pseudoespectro para la norma NCh 2369]
Fuente: Peña and Medalla (2015)

Este resultado tiene la misma implicancia estructural al sobreponer el pseudoespectro permitido para las normas NCh433 y NCh2369 que es $0.3g$ y $1.15g$, respectivamente. Además, es posible observar que en la dirección vertical, el valor es menor, lo que se asimila a lo observado en los valores de PGA para esta dirección, la cual nunca tuvo un valor máximo.

En cuanto a los edificios que se encuentren, en el campo intermedio o lejano a la FSR, estarían a salvo, debido a que están por debajo de la norma para todos los periodos. Lo que no ocurre con los que están en la zona cercana (s1, s2 y s3), que vendría siendo desde Lo Barnechea hasta Puente Alto, los cuales están por sobre la norma en periodos más bajos.

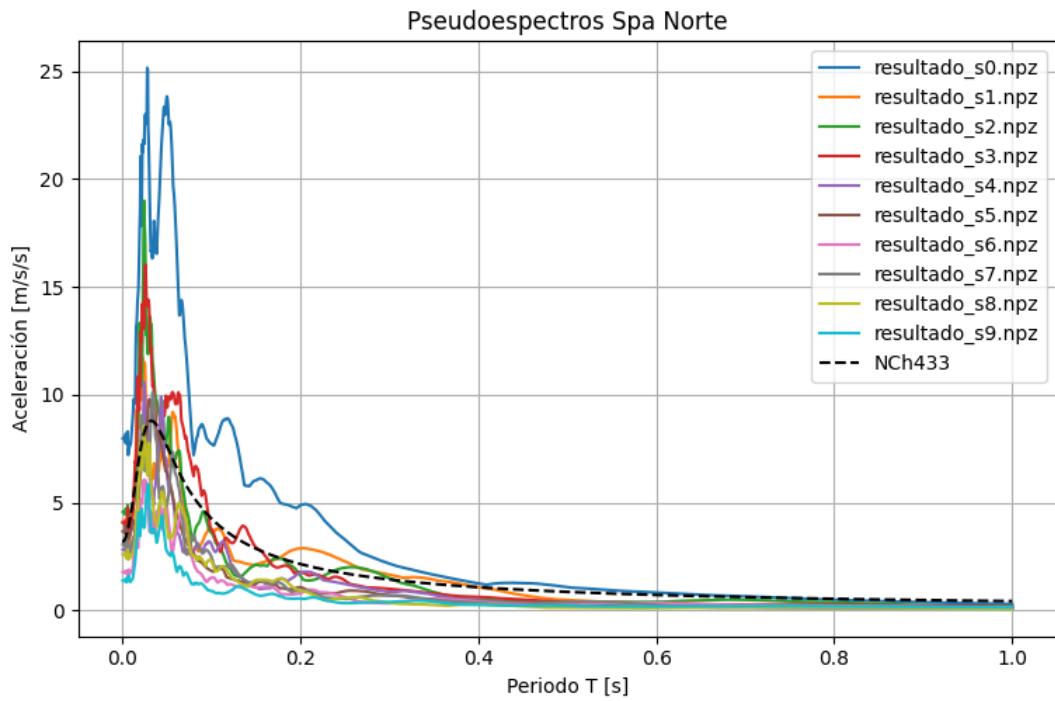


Figura 5.7: Pseudoespectro dirección Norte para Mw = 6.5 bilateral 1
Fuente: Elaboración propia

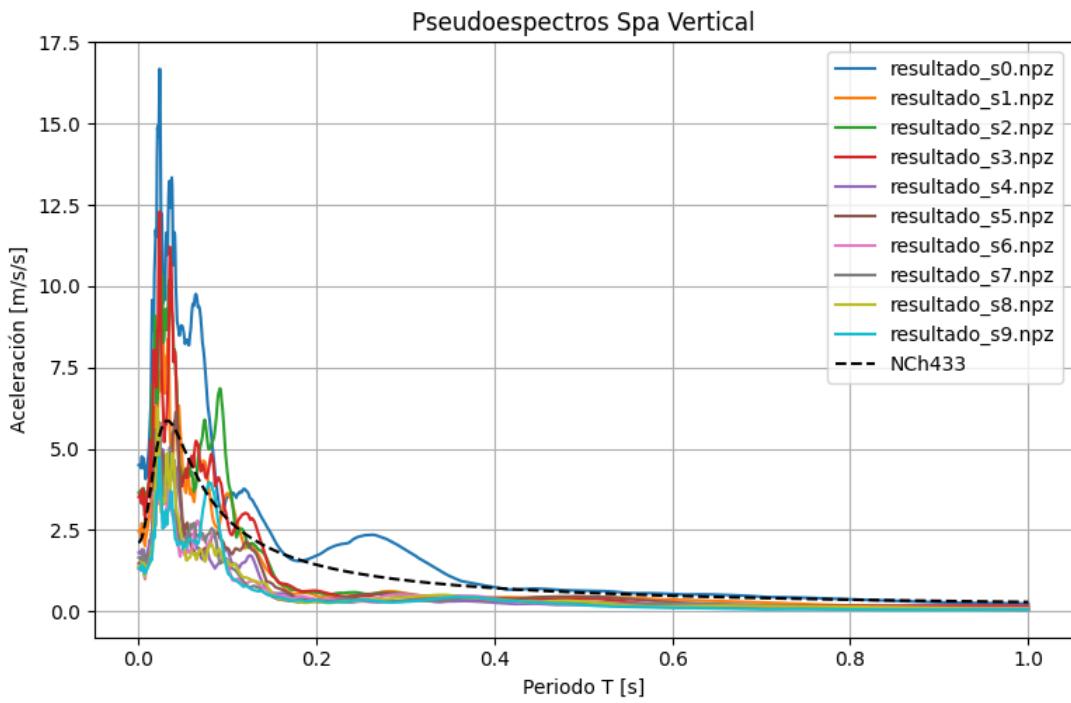


Figura 5.8: Pseudoespectro dirección Vertical para Mw = 6.5 bilateral 1
 Fuente: Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que los valores del pseudoespectro de PGA son simulados y se calculan a partir de modelos y datos sismológicos. Por lo tanto, los valores del pseudoespectro de PGA son una estimación de la respuesta del suelo a las vibraciones sísmicas y pueden variar en función de la ubicación y las características del terreno en el lugar de interés.

Si el pseudoespectro de aceleración indica que se alcanza la aceleración máxima a los 0.1 segundos, significa que la respuesta sísmica máxima del suelo a la frecuencia de 10 Hz (que es el inverso del período de 0.1 segundos) es mayor que en cualquier otra frecuencia en el rango de frecuencias considerado. Si el pseudoespectro de aceleración indica que se alcanza la aceleración máxima a una frecuencia de 10 Hz, significa que el suelo en esa ubicación específica es especialmente sensible a las ondas sísmicas de esa frecuencia y que la respuesta sísmica del suelo alcanzará un máximo en esa frecuencia en particular.

Obtener estos valores, permite analizar que para edificios bajos o estructuras rígidas que tienen periodos cortos, las aceleraciones estarán por sobre el espectro de la norma NCh 433, por lo que se podría considerar, estar en peligro. En cambio, para edificios de periodos más largos, que están por debajo de lo que indica la norma, por lo tanto, estarían bastante seguros (como estructuras aisladas o edificios altos).

Es necesario destacar que todos los datos obtenidos de las simulaciones realizadas para el análisis, incluyendo los valores de PGD, PGV Y PGA, así como los tiempos de llegada de las ondas P y S, y los pseudoespectros, están disponibles públicamente en el siguiente enlace de Google Drive: https://drive.google.com/drive/folders/1XKtqRdqm0tzWyB4IZ-Hr15TeD_1QuXal.

Capítulo 6

Conclusiones

Al sintetizar los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye, en primer lugar, que se ha demostrado describir la geología de Santiago con valores de espesores, velocidades P y S , densidad y factores de attenuación Q_p y Q_s , del modelo $F - K$, creando un modelo de corteza compleja compuesto de 3 capas.

También, se logró obtener un valor de pt_rt (la razón entre r_t y el momento en que ocurre el *peak* de la función de velocidad de ruptura de cada sub falla p_t), el cual se calibró hasta obtener aceleraciones máximas similares, a los estudios existentes que se utilizaron sobre la FSR. Así, luego de varias simulaciones, con $pt_rt = 0.055$ se obtuvieron estos valores de PGA aceptables, ya que es un parámetro libre, directamente relacionado con las aceleraciones máximas. Se destaca que este parámetro, al ser libre, puede ser modificado a libre elección para futuros estudios, y así, obtener resultados coherentes en relación con estudios anteriores.

Además, se logró describir la FSR en un sistema de coordenadas único, para parámetros como; traza superficial, ángulo de *dip*, *rake*, *strike*, deslizamiento o *slip*, área y el generador de rupturas, a través del archivo de entrada de datos que se lee, de tipo *.inp*

Se definieron sitios de análisis en Santiago pertenecientes a la FSR en, convirtiendo las coordenadas de las estaciones de geográficas a UTM, donde se crearon listas para almacenar los resultados de cada una de las 10 estaciones seleccionadas. Estas estaciones se usaron como parámetros de la variable *Stations* de ShakerMaker, lo que resulta en la generación de 10 archivos de tipo *.npz* para cada realización y tipo de sismo.

En cuanto a las simulaciones de los parámetros de corteza, en los distintos sitios de Santiago propuestos han proporcionado información valiosa sobre el comportamiento de las fallas sísmicas y el riesgo sísmico en la región de Santiago. La no uniformidad del deslizamiento a lo largo de la falla y la cercanía entre las isócronas a medida que aumenta la magnitud del sismo son factores a tener en cuenta en la evaluación del riesgo sísmico. Asimismo, la identificación del tipo de ruptura sísmica puede ayudar a determinar la posible magnitud del evento y la peligrosidad para las comunidades cercanas a la falla.

Tras las simulaciones, se recabaron estadísticas de las distintas medidas de intensidad obtenidas mediante las simulaciones, *PGA*, *PGV*, *PGD*, donde los resultados mostraron que a medida que aumenta la intensidad del sismo, también lo hacen los valores de PGD, PGV y PGA, excepto en la zona de hanging-wall que siempre tiene valores altos. La dirección norte obtiene los mayores valores en los parámetros obtenidos, seguida por la dirección este. El modo de ruptura más grave es sur-norte, seguido por el tipo bilateral.

Por otro lado, se obtuvo que el tiempo de llegada de las ondas P y S no es afectado por la intensidad de una onda sísmica, sino que depende de la velocidad y características del medio. Sin embargo, el tipo de ruptura sísmica puede influir en el tiempo de llegada, siendo el tipo SN el que produce los tiempos mayores en este estudio. Se mostró cómo la distancia, magnitud y tipo de ruptura del sismo afectan el tiempo de llegada de las ondas P y S, lo que se evidencia en el sismo de $Mw = 6.7$ NS 2 donde las ondas tardan hasta 14 segundos en llegar a una distancia de 30 km. Además, se destaca que las ondas P y S que llegan al hanging-wall pueden experimentar cambios en su amplitud, velocidad y dirección, demostrando la complejidad y diversidad del comportamiento de las ondas sísmicas y la importancia de considerar múltiples factores al analizarlas.

Es crucial seguir las normas chilenas de construcción sismorresistentes y actualizarlas para la zona de alta sismicidad, como se demostró por los espectros obtenidos. Los valores de aceleración máxima registrados durante el sismo $Mw = 6.5$ bilateral 1 en Santiago excedieron los límites permitidos por las normas, junto a los demás casos, lo que indica que las estructuras en la zona podrían estar experimentando fuerzas sísmicas que exceden su capacidad de resistencia.

Estructuras flexibles para períodos altos, no se verían tan afectadas (estructuras aisladas o edificios altos), mientras que estructuras rígidas (edificios bajos), probablemente sentirían intensidades de aceleración, por sobre lo estipulado por la norma 433, sobre todo en la zona de hanging-wall. Es esencial considerar esta información en el diseño y construcción de nuevas estructuras, así como en la evaluación y posible reforzamiento de las existentes. Además, se debe continuar investigando y actualizando constantemente las normas de construcción sismorresistente para garantizar la seguridad de las estructuras y las personas en caso de un sismo en la FSR.

También, se observó mediante los pseudoespectros que los edificios ubicados en el campo intermedio o lejano a la FSR estarían seguros, ya que están por debajo de la norma NCh 433 para todos períodos bajos y altos. Sin embargo, los edificios ubicados en la zona cercana, que vendría siendo desde Lo Barnechea hasta Puente Alto, están por encima de la norma en períodos más bajos, lo que los hace vulnerables y no seguros.

El estudio tiene limitaciones, ya que se enfoca en una zona específica y no se pueden generalizar los resultados. Además, no se generan datos para el método de reducción de dominio ni se consideran otras fuentes de incertidumbre. A pesar de esto, el estudio caracteriza la incertidumbre y desagrega los efectos de la propagación sísmica. En situaciones de aceleraciones muy altas, como en el caso de hanging-wall, ocurren efectos de sitio no lineales que afectan los valores de PGA, PGD y duración. Por lo tanto, es importante tener precaución al utilizar estos registros directamente sin considerar la respuesta no lineal del sitio. Esto requiere un análisis más detallado que no se aborda en este trabajo.

En el futuro, se podrían realizar investigaciones exhaustivas para evaluar el impacto de la FSR en edificios de Hormigón Armado en Chile y determinar si se requiere la implementación de condiciones adicionales en las normas chilenas o refuerzos estructurales en los edificios para garantizar su seguridad y estabilidad a largo plazo. Esto podría incluir estudios detallados de los efectos de la FSR en diferentes tipos de edificios, evaluación del impacto de diferentes factores y análisis de estudios similares en otros países. También, analizar la respuesta no-lineal de sitio. Podría ser factible, comparar con modelos de corteza más complejos (más capas) y quizás en tres dimensiones para ver la relevancia de esos factores.

Por último, el presente estudio ha logrado demostrar la viabilidad de la metodología de postular escenarios sísmicos para la FSR a través de la creación de descripciones cinemáticas del proceso de ruptura utilizando el programa ShakerMaker, basándose en el método de frecuencia-número de onda para la simulación de registros sísmicos. Los resultados obtenidos se compararon con las especificaciones del código sísmico actual y se encontraron diferencias significativas, como saber que la zona de hanging-wall sería la más afectada al ocurrir un sismo. Lo que sugiere que la metodología utilizada en este estudio puede ser útil para mejorar la capacidad de predicción de los sismos y, en consecuencia, para mejorar la seguridad estructural que existe sobre la FSR.

Bibliografía

- Abell, J. (2022). Proposed research fondecyt. *Uandes*.
- Abell, J., Crempien, J., and Recabarren, M. (2022). Shakermaker: A framework that simplifies the simulation of seismic ground-motions. *SoftwareX*, 17:100911.
- Ammirati, J. B., Easton, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., and Ruiz, S. (2019). The crustal seismicity of the western andean thrust (central chile, 33°–34° s): Implications for regional tectonics and seismic hazard in the santiago area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109:1985–1999.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Easton, G., Campos, J., Lacassin, R., and Kausel, E. (2010). The west andean thrust, the san ramón fault, and the seismic hazard for santiago, chile. *Tectonics*, 29.
- Bolt, B. (1993). *Earthquakes and Geological Discovery*. Diane Publishing Co, Pensilvania.
- Crempien, J. G. and Archuleta, R. J. (2015). Ucsb method for simulation of broadband ground motion from kinematic earthquake sources. *Seismological Research Letters*, 86(1):61–67.
- CSN (2022). Centro sismológico nacional. <https://www.sismologia.cl/informacion/glosario.html>. (Último acceso 03/10/2022).
- Easton, G., Boroschek Krauskopf, R. L., Rebolledo Lemus, S., Inzulza Contardo, J. A., Ejsmentewicz Cáceres, D. I., Vergara Saavedra, P. A., and Giesen, E. (2022). Policy brief: La falla san ramón y la sostenibilidad del piedemonte de santiago: recomendaciones para la política pública. *UChile*.
- Estay, N. P., Yáñez, G., Carretier, S., Lira, E., and Maringue, J. (2016). Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: study case san ramón fault, in southern andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12):2511–2528.
- INN (2003). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales nch 2369 of.2003. *INN*.
- INN (2012). Diseño sísmico de edificios nch 433 of.1996 modificada en 2012. *INN*.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

Liu, P. and Archuleta, R. J. (2004). A new nonlinear finite fault inversion with three-dimensional green's functions: Application to the 1989 loma prieta, california, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2).

Peña, C. and Medalla, M. (2015). (pdf) disposiciones nch2369 vs asce7 - aplicaciÓn a marcos de momento. https://www.researchgate.net/publication/281239655_DISPOSICIONES_NCh2369_vs_ASCE7_-APLICACION_A_MARCOS_DE_MOMENTO. (Último acceso 10/02/2023).

USGS (2022). United states geological survey. <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>. (Último acceso 04/10/2022).

Zhu, L. (2011). Synthetic seismograms and seismic waveform modeling. http://wzjwzj.github.io/docs/FK_note.pdf. (Último acceso 06/10/2022).

Zhu, L. and Rivera, L. A. (2002). A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*, 148(3):619–627.

Apéndice A

Estructura de velocidades utilizada

Para la estructura de velocidades utilizada en el análisis de cada sismo planteado, se llevó a cabo una recopilación y entendimiento in-situ del método UC Santa Barbara explicado en el capítulo 2.4. Este método computacional fue obtenido desde el trabajo realizado por Jorge G. F. Crempien and Ralph J. Archuleta, para el artículo académico *UCSB Method for Simulation of Broadband Ground Motion from Kinematic Earthquake Sources* (Crempien and Archuleta, 2015).

A continuación, en la Figura A.1 se detallan los parámetros que componen el archivo de velocidades de extensión *.vel* que también incluye otros parámetros de las simulaciones.

1	3	2.0				
2	5.50000	3.140000	2.5000	15.50000	1000.00000	1000.00000
3	7.00000	4.000000	2.6700	31.50000	1000.00000	1000.00000
4	8.00000	4.570000	2.8000	0.000000	1000.00000	1000.00000

Figura A.1: Estructura de velocidades

Fuente: Elaboración propia

Línea 1 → N° capas utilizadas en la simulación | Frecuencia de referencia (1 o 2)¹

Líneas 2 a 4 → V_p | V_s | Densidad ρ | Espesor de capa | Q_p | Q_s

donde V_p y V_s representan el valor de la velocidad de propagación de la onda P; V_s de la onda S, ambas en [km/s]; ρ a la densidad en unidades de [g/cm^3]; Q_p y Q_s son los factores adimensionales de atenuación de P y S respectivamente.

¹Arbitrariamente se utiliza el valor 1.0 o 2.0 en la estructura de velocidades.

Apéndice B

Archivos de entrada .inp utilizados

Los archivos de tipo *.inp* (archivo de texto *ASCII*), que son leídos por el método UCSB para generar los archivos de salida necesarios para ShakerMaker, aportan múltiples datos al método. Estos archivos de entrada tienen algunas variaciones dependiendo de la magnitud a usar para cada simulación y también, para el tipo de ruptura empleado.

A continuación, en la Figura B.1 se observan los valores de cada uno de los parámetros de entrada de cada archivo, los cuales todos siguen la misma estructura de 16 líneas. Este primer archivo es el utilizado para el caso de $Mw = 6.5$ con una ruptura bilateral (bilateral 1, ya que se hicieron 3 realizaciones para cada una).

```
1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000
6 0.300000
7 358.000000 40.000000 113.000000
8 15.000000 30.000000
9 256 128
10 5 5 5 5
11 52 448 4446
12 1 1
13 stgo_lf.vel
14 0.0
15 3
16 FFSP_OUTPUT
```

Figura B.1: Archivo *.inp* para caso de ruptura bilateral 1 de $Mw = 6.5$
Fuente: Elaboración propia

Línea 1 → Índice de la función de tasa de deslizamiento y parámetros que vienen por defecto en el método UCSB

Línea 2 → Largo ancho de la falla principal en [km]

Línea 3 → Distancia en la dirección de *strike*, *down dip* y la profundidad del epicentro

Línea 4 → Coordenadas del epicentro

Línea 5 → Momento [N-m] o Mw (para el método UCSB se puede ingresar momento sísmico o magnitud), la frecuencia angular (Hz) y la velocidad media de ruptura

Línea 6 → Relación de tiempo entre el aumento de la velocidad de deslizamiento y el tiempo de subida (*slip rate* y *rise time*)

Línea 7 → Rumbo o *strike*, buzamiento o *dip* e inclinación de la falla o *rake*

Línea 8 → Perturbación máxima en el *dip* y *rake*

Línea 9 → Número de sub fallas a lo largo del *strike* y el *dip*

Línea 10 → Número de sub fallas a estrechar a cada lado

Línea 11 → Semilla para generar números aleatorios

Línea 12 → Primer y último índice de las generaciones aleatorias

Línea 13 → Nombre del archivo con la estructura de velocidad de la región

Línea 14 → Ángulo en grados desde el Norte al eje X (en el sentido de las agujas del reloj)

Línea 15 → Imprime momento(1), área de deslizamiento (2) o *slip* (3)

Línea 16 → Nombre de archivo de los parámetros fuente de salida

De estos valores, las líneas 3 y 4 cambian su valor dependiendo si es tipo de ruptura bilateral, norte-sur o sur-norte, lo cual se puede ver en la Figura B.2. Donde la distancia en la dirección de *strike* (línea 3) es 15 km para ruptura bilateral, 22.5 km para norte-sur y 7.5 para sur-norte. Además, las coordenadas del epicentro (línea 4) son (0, 0) bilateral, (7.5, 0) norte-sur y (-7.5, 0) sur-norte.

```

1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000

```

a) Bilateral

```

1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 22.5 8. 8.
4 7.5 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000

```

b) Norte – Sur

```

1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 7.5 8. 8.
4 -7.5 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000

```

c) Sur – Norte

Figura B.2: Diferencias en archivos .inp para los tipos de rupturas

Fuente: Elaboración propia

Otras líneas que cambian de valor son la línea 5, la cual solamente cambia su magnitud, dependiendo si es $Mw = \{6.5, 6.7, 6.9, 7.0\}$, y la línea 11, la cual contiene los números semillas elegidos manualmente para generar los valores aleatorios de las realizaciones 1, 2 y 3 para todos los tipos de ruptura.

En las Figuras B.1, B.3 y B.4, se ven los diferentes números semillas utilizados (líneas 11) y en la Figura B.5 se observa la diferencia de magnitud (línea 5).

```
1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000
6 0.300000
7 358.000000 40.000000 113.000000
8 15.000000 30.000000
9 256 128
10 5 5 5 5
11 -13436 -84743 -76377
12 1 1
13 stgo_lf.vel
14 0.0
15 3
16 FFSP_OUTPUT
```

Figura B.3: Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 2 de Mw = 6.5
Fuente: Elaboración propia

```
1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 6.5 0.090000 3.000000 3.000000
6 0.300000
7 358.000000 40.000000 113.000000
8 15.000000 30.000000
9 256 128
10 5 5 5 5
11 -84442 -75795 -42057
12 1 1
13 stgo_lf.vel
14 0.0
15 3
16 FFSP_OUTPUT
```

Figura B.4: Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 3 de Mw = 6.5
Fuente: Elaboración propia

```
1 8 0.01 24.0
2 30.000000 16.000000
3 15. 8. 8.
4 0. 0.
5 7.0 0.090000 3.000000 3.000000
6 0.300000
7 358.000000 40.000000 113.000000
8 15.000000 30.000000
9 256 128
10 5 5 5 5
11 52 448 4446
12 1 1
13 stgo_lf.vel
14 0.0
15 3
16 FFSP_OUTPUT
```

Figura B.5: Archivo .inp para caso de ruptura bilateral 1 de Mw = 7.0
Fuente: Elaboración propia

Para las demás líneas de los archivos .inp, se mantienen los valores en todas las simulaciones de este estudio.