



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**



**TITULACIÓN DE MÁSTER EN ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS
GEOESPACIALES**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a las fallas activas

Madrid, julio de 2021

Alumna: Carolina Alejandra Peña Raddatz Tutora: Dra. M^a Belén Benito Oterino

Cotutora: Dra. Alicia Rivas Medina



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA



TITULACIÓN DE MÁSTER EN ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS
GEOESPACIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a las fallas activas



Madrid, julio de 2021

Alumna: Carolina Alejandra Peña Raddatz

Tutora: Dra. M^a Belén Benito Oterino

Cotutora: Dra. Alicia Rivas Medina

Agradecimientos

A mi tutora y cotutora, Belén y Alicia, por su gran confianza y apoyo.

*A los profesores y compañeros de la Escuela
por estar siempre dispuestos a prestar ayuda.*

A Catalina, por la compañía y el apoyo constante.

*A la Fundación Carolina y a la Universidad Politécnica de Madrid,
por darme la oportunidad de cursar este master.*

Al proyecto Cyclo, por confiar en mi trabajo.

Y especialmente, gracias a mi familia, por su apoyo incondicional, siempre.

ÍNDICE

RESUMEN.....	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Alcance	4
1.4. Área de estudio	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Contexto geotectónico	6
2.2. Fallas en Chile	8
2.3. Peligrosidad sísmica	9
2.4. Método probabilista.....	13
2.4.1. Modelo de Terremoto Característico.....	13
2.4.2. Modelo de Gutenberg-Richter	14
2.5. Método determinista.....	15
DATOS Y METODOLOGÍA	17
3.1. Base de datos	18
3.2. Selección de fallas	20
3.3. Geometría de los planos de falla.....	22
3.4. Selección de modelos de movimiento fuerte.....	24
3.5. Hipótesis	26
3.6. Cálculo de la peligrosidad sísmica	28
3.6.1. Terremoto máximo	28
3.6.2. Cálculo probabilista.....	31

3.6.3. Cálculo determinista.....	33
RESULTADOS	35
4.1. Fallas activas de Chile	36
4.2. Geometría de los planos de falla.....	37
4.3. Terremoto máximo	40
4.3. Cálculo probabilista.....	41
4.3.1. Zona Norte.....	41
4.3.2. Zona Central	47
4.3.3. Zona Sur	54
4.3.4. Zona de Magallanes.....	60
4.4. Cálculo determinista	67
4.4.1. Falla Bajo Molle	67
4.4.2. Falla Mejillones	69
4.4.3. Falla San Ramón.....	70
4.4.4. Falla Los Palos	73
4.4.5. Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano.....	75
DISCUSIÓN.....	77
5.1. Validación de la recurrencia	78
5.2. Terremoto máximo	82
5.3. Modelos de movimiento fuerte.....	83
5.4. Peligrosidad sísmica según metodología probabilista.....	85
5.5. Zonas pobladas con un alto nivel de amenaza.....	87
5.6. Comparación con resultados de Catalina Cabello	90
5.7. Líneas de trabajo futuros	94
CONCLUSIONES.....	96

REFERENCIAS	99
ANEXO	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación área de estudio y zonas definidas.....	5
Figura 2. Contexto geotectónico de Chile continental. Tomado del Trabajo de Fin de Master de Catalina Cabello (2021).	7
Figura 3. Perfil esquemático del margen de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana con los principales tipos de fallas sismogénicas (en rojo). Tomado de Maldonado, 2020.	9
Figura 4. Factores que condicionan el movimiento resultante en el emplazamiento.	10
Figura 5. Modelo de recurrencia de terremoto característico. A) Periodicidad perfecta. B) Liberación de energía antes de llegar al momento sísmico asociado a la magnitud característica.	13
Figura 6. Fallas corticales más importantes en Chile. Líneas amarillas corresponden a Fallas Cuaternarias; líneas rojas corresponden a Fallas con registro histórico; líneas verdes corresponden a Fallas Neógenas. Tomado de: https://fallasdechile.sitios.ing.uc.cl/	18
Figura 7. Sistemas de fallas definidos en base de datos de fallas activas y potencialmente activas de Chile, Modificada de Maldonado et al. (2021).	36
Figura 8. Tasas de deslizamiento de las fallas activas de Chile.	37
Figura 9. Imágenes de los planos de falla analizados en este trabajo en profundidad. Los colores indican el sentido de movimiento. Rosa: inversa, calipso: normal, amarillo: dextral y verde: sinestral.	39
Figura 10. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.....	42
Figura 11. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.....	43
Figura 12. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.....	44

Figura 13. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV. .	45
Figura 14. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV. .	46
Figura 15. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.	46
Figura 16. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.....	48
Figura 17. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.....	49
Figura 18. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.....	50
Figura 19. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV. .	52
Figura 20. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV. .	53
Figura 21. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.	54
Figura 22. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.....	56
Figura 23. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.....	56
Figura 24. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.....	57

Figura 25. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV. .	58
Figura 26. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV. .	59
Figura 27. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.	60
Figura 28. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.	61
Figura 29. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.	62
Figura 30. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.	63
Figura 31. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.....	64
Figura 32. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.....	65
Figura 33. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.....	66
Figura 34. Escenario sísmico determinista para la falla Bajo Molle. A) PGA. B) SA (1.0s).	68
Figura 35. Escenario sísmico determinista para la falla Mejillones. A) PGA. B) SA (1.0s).	69
Figura 36. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura completa. A) PGA. B) SA (1.0s).....	71

Figura 37. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura segmento 1 (norte). A) PGA. B) SA (1.0s).....	72
Figura 38. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura segmento 2. A) PGA. B) SA (1.0s).....	73
Figura 39. Escenario sísmico determinista para la falla Los Palos. A) PGA. B) SA (1.0s). 74	
Figura 40. Escenario sísmico determinista para el Sistema de Falla Magallanes-Fagnano. A) PGA. B) SA (1.0s).....	75
Figura 41. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la falla El Yolki los últimos 150 años.....	79
Figura 42. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la falla El Liqueñe los últimos 150 años.....	80
Figura 43. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la localidad de Puerto Aysén, los últimos 150 años.....	81
Figura 44. Comparación aceleraciones sísmicas esperadas según modelo de Terremoto Característico y Tr de 975 años, variando el valor de terremoto máximo (Mmax). A) Valor obtenido mediante fórmulas empíricas. B) Valores propuestos por estudios paleosismológicos.....	83
Figura 45. Coeficiente de variación de los resultados obtenidos mediante el modelo de Terremoto Característico para la Zona Norte con un periodo de retorno de 975 años. A) Considerando el modelo de predicción de movimiento fuerte de Boore et al. (2014). (B) Sin considerar el modelo de Boore et al. (2014).....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales sismos corticales registrados en Chile. EWFS: Sistema de falla Este-Oeste, CAFS: Sistema de falla de los Andes Centrales, CFTF: Sistema de falla del Antearco Costero Central, LOFS: Sistema de falla Liquiñe-Ofqui, SFMF: Sistema de falla Magallanes-Fagnano.	2
Tabla 2. Sistemas de falla de la Base de Fallas activas y potencialmente activas de Chile con sus principales características. Modificado de Maldonado et al., 2021.	19
Tabla 3. Fallas pre-seleccionadas.. (L) Largo, (P) profundidad, (A) Ancho. Tomado de Carrizo & González (2003), Carrizo et al. (2008), Cortés-Aranda et al. (2015), Cortés et al. (2012), González et al. (2008), Heinze (2003), Legrand et al. (2007), González et al. (2003), Alvarado et al. (2009), Moreno et al. (2008), Ruiz et al. (2014), Melnick et al. (2019), Armijo et al. (2010), Aron et al. (2013), Legrand et al. (2011), Vargas et al. (2014), Astudillo-Sotomayor et al. (2021), De Pascale et al. (2021), Sandoval & De Pascale (2020), Allmendinger & González (2010), González et al. (2015), Pinto (2016), Lodolo et al. (2003).	21
Tabla 4. Fallas y segmentos de falla principales y secundarios. S: segmento, C: completa. Los 36 segmentos adicionales del SFLO que se consideraron en los cálculos no se diferencian según su nombre local por lo cual no se incluyen en la tabla.....	22
Tabla 5. Cálculo del acimut de los planos de falla considerando correcciones según el cuadrante que une el punto inicial de la traza de falla al punto final.	23
Tabla 6. Modelos de predicción de movimiento fuerte utilizados.	25
Tabla 7. Fórmulas empíricas utilizadas en el cálculo de Terremoto Máximo.....	30
Tabla 8. Parámetros geométricos de las fallas principales. Z: profundidad máxima alcanzada por la falla, W: ancho del plano de falla, Dr: diferencia de distancia en planta observada entre los puntos en profundidad y en superficie.	38
Tabla 9. Terremotos máximos de las fallas principales según diferentes regresiones. S: segmento.....	40
Tabla 10. Valores máximos de PGA obtenidos mediante el método probabilista para las diferentes zonas analizadas. ZN: Zona Norte, ZC: Zona Centro, ZS: Zona Sur, ZM: Zona de Magallanes.....	67

Tabla 11. Parámetros definidos para cada escenario sísmico. S1: segmento 1, S2: segmento 2.	67
Tabla 12. Aceleraciones máximas esperadas en las cercanías de la fuente y en el centro de las ciudades cercanas, tanto para PGA como para la ordenada espectral de 1.0s.	76
Tabla 13. Ejemplos de sismos corticales ocurridos en el mundo los últimos años con su respectivo valor de aceleración máxima registrada.	87
Tabla 14. Listado de localidades expuestas a aceleraciones por sobre los 0.1g producto de eventos sísmicos corticales.	89
Tabla 15. Comparación valores de aceleración obtenidos (PGA) mediante las metodologías probabilista zonificada y probabilista asociada a fuentes sísmicas definidas para las capitales regionales del país. 475 años de periodo de retorno, modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter.	91
Tabla 16. Comparación valores de aceleración obtenidos (PGA) mediante las metodologías probabilista zonificada y probabilista asociada a fuentes sísmicas definidas para las capitales regionales del país. 475 años de periodo de retorno, modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter. Los resultados del método probabilista zonificado corresponden al conjunto de subducción y cortical.	92

RESUMEN

Dado el régimen convergente que existe en Chile, la peligrosidad sísmica del país ha sido estudiada previamente como una amenaza fuertemente vinculada a la subducción. Sin embargo, terremotos como el de Aysén Mw 6.2 el año 2007, que dejó 9 víctimas fatales, evidencian la importancia de considerar la peligrosidad asociada a las fallas. Actualmente, trabajos recientes como el de Maldonado *et al.* (2021) y Santibáñez *et al.* (2019) están sentando las bases de futuros estudios en relación a la peligrosidad sísmica cortical.

Partiendo de la base de datos de fallas activas y potencialmente activas de Chile (Maldonado *et al.*, 2021), y asumiendo ciertas hipótesis en cuanto a tasa de deslizamiento, buzamiento y profundidad, se realizan cálculos de peligrosidad sísmica de aquellas fallas para las cuales se cuenta con mayor información. Por medio de trigonometría y operaciones matemáticas propuestas por la literatura, se caracteriza la geometría y los parámetros sísmicos de las diferentes fuentes.

Con dichos parámetros se estima la amenaza sísmica utilizando un método probabilista considerando 2 modelos de recurrencia, Terremoto Característico y Gutenberg-Richter, para 4 zonas definidas para el país: Zona Norte, Zona Centro, Zona Sur y Zona de Magallanes. Además, se estima la aceleración sísmica esperada de 7 escenarios concretos utilizando un método determinista.

Los resultados probabilistas muestran grandes aceleraciones para las zonas Sur y de Magallanes, donde los valores más altos para un periodo de retorno de 475 años y según el modelo de Gutenberg-Richter, se alcanzan en el Sistema de Falla Lliquiñe-Ofqui (Zona Sur), llegando a 1.4g. Por el contrario, las zonas Norte y Central presentan menores aceleraciones, pero, las fallas se ubican más cercanas a importantes centros poblados. Los resultados obtenidos utilizando una metodología determinista presentan las mayores aceleraciones para la falla San Ramón en Santiago (ruptura completa), seguida de la falla Bajo Molle en Iquique, alcanzando los 0.70g y 0.66g, evidenciando de esta forma una importante amenaza a la cual se ven expuestas dichas ciudades.

Estos resultados son posteriormente analizados, discutiendo la influencia de distintos factores como los valores de recurrencia, terremoto máximo y los modelos de predicción de movimiento fuerte. Se realiza además un listado con las principales localidades del país expuestas a grandes movimientos del suelo producto de un evento sísmico asociado a las fallas activas, una comparación con los resultados de peligrosidad sísmica obtenidos mediante un método probabilista zonificado y se plantean líneas de trabajo futuras.

Como conclusión se sostiene que es posible realizar estimaciones de peligrosidad sísmica considerando ciertos supuestos de las fuentes sísmicas, sin embargo, se requiere de parámetros clave de los cuales aún existe un vacío de conocimiento. Los resultados proporcionados por este trabajo reflejan el potencial sismogénico de las fallas del país y la importancia de los distintos parámetros. A pesar de necesitar de mayores estudios que permitan validar y complementar este estudio, se proporciona un panorama general de la peligrosidad sísmica cortical del país, buscando contribuir al desarrollo de futuros trabajos y a la implementación de medidas de prevención y mitigación.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Chile es un país sísmico por excelencia. Evidencias de grandes eventos se hacen presentes desde registros paleo-sísmicos, tradición oral y registros históricos, hasta llegar finalmente a la era instrumental, la cual contiene al terremoto de mayor magnitud en el mundo registrado en esta época, el terremoto de Valdivia del año 1960 Mw 9.5 (Ruiz & Madariaga, 2018). Tanto este evento como otros grandes terremotos a nivel mundial, son generados por la ruptura de fallas en los principales límites de placas, generalmente en zonas de subducción, produciendo fuertes movimientos del terreno y una destrucción generalizada a nivel regional, provocando en algunos casos verdaderas catástrofes (ej. terremoto de Sumatra, 2004; terremoto de Tohoku-oki, Japón, 2011).

Bajo este contexto, la peligrosidad sísmica en Chile ha sido estudiada principalmente desde el punto de vista de la subducción. Sin embargo, han ocurrido sismos históricos relacionados con fuentes de la corteza terrestre poco profundas, como es el caso del terremoto de Aysén en el año 2007 (Mw 6.2) o el terremoto de Pichilemu del 2010 (Mw 6.9; 7.0), confirmando la capacidad sismogénica de las fallas activas (ej. Ruiz *et al.*, 2014; Mora *et al.*, 2010). La Tabla 1 resume los sismos corticales registrados instrumentalmente en el país.

Tabla 1. Principales sismos corticales registrados en Chile. EWFS: Sistema de falla Este-Oeste, CAFS: Sistema de falla de los Andes Centrales, CFTF: Sistema de falla del Antearco Costero Central, LOFS: Sistema de falla Liquiñe-Ofqui, SFMF: Sistema de falla Magallanes-Fagnano.

Nombre Falla	Sistema de falla	Año	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)
Pisagua	EWFS	2007	5.7	26
Las Melosas	-	1958	6.9	5-9
Aroma	-	2001	6.3	5
El Fierro	CAFS	2004	6.3	4.7
Pichilemu	CFTF	2010	6.9; 7.0	12-16
Río Cuervo	LOFS	2007	6.1; 6.2	4-12
Neltume	LOFS	2021	4.7	10
Magallanes-Fagnano	SFMF	1879; 1949; 1950; 1970	7-7.5; 7.7 y 7.3; 7.0; 7.2	< 15

La ruptura de fallas, asociadas con la deformación interna de las placas, ubicadas cerca de zonas densamente pobladas, puede producir daños devastadores a nivel local debido a sus bajas profundidades, a pesar de que los eventos presenten una magnitud moderada (Santibáñez *et al.*, 2019). No obstante, su baja frecuencia y largos periodos de recurrencia dificultan su estudio y las comunidades pierden la noción del peligro al cual están expuestas. Por ende, siguen siendo aún desconocidas la naturaleza, la tasa de recurrencia y la tasa de deslizamiento de las fuentes sísmicas de la corteza (Santibáñez *et al.*, 2019).

El primer paso para la reducción del riesgo sísmico consiste en conocer la peligrosidad a la cual se encuentra expuesta la población. Sin embargo, los antecedentes antes mencionados reflejan el vacío de conocimiento que se tiene sobre la real amenaza que presentan las fallas activas del país. Es por esto que es necesario realizar un estudio y caracterización de las fuentes sísmicas superficiales, con el fin de contar con los antecedentes necesarios para realizar estudios de peligrosidad sísmica más detallados, incluyendo la contribución de estas fuentes, y evitar desastres en el futuro.

Afortunadamente, en los últimos años se han llevado a cabo diversos trabajos para identificar la ubicación y características de las fallas en Chile (ej. Santibáñez *et al.*, 2019; Maldonado *et al.*, 2021) los cuales sientan las bases para el desarrollo de estudios de peligrosidad sísmica asociada a fallas activas.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en caracterizar y estimar la peligrosidad sísmica asociada a las principales fallas activas de Chile. Este país aún requiere de varios estudios que llenen el vacío de conocimiento que se tiene sobre las propiedades de sus fallas activas. Por ello, contar con un cálculo preliminar realizado en base a los datos actualmente disponibles es un aporte que pretende ayudar tanto a la definición de lineamientos para futuros trabajos como a la concientización de la amenaza sísmica asociada a fallas que acecha al país.

El desarrollo de este estudio contempla, además, una serie de objetivos específicos, los cuales conducen y complementan al objetivo principal. Estos objetivos son:

- Actualizar la base de datos de fallas activas de Chile.
- Calcular la peligrosidad sísmica asociada a las principales fallas activas del país mediante una metodología probabilista.
- Calcular la peligrosidad sísmica a la cual se ven expuestas algunas de las principales ciudades del país mediante una metodología determinista.
- Comparar y discutir los resultados de este trabajo con los obtenidos por un método zonificado en el TFM de Catalina Cabello.
- Plantear líneas de trabajo futuras que promuevan el estudio y caracterización de las zonas más peligrosas del país.

1.3. Alcance

Este estudio aporta una caracterización y estimación de la peligrosidad sísmica asociada a fallas activas de Chile. Se estudia la amenaza sísmica utilizando los datos de fallas con los que se cuenta actualmente, proporcionando un panorama general y preliminar, que busque sentar las bases de futuros estudios.

Concretamente, se elaboran mapas de peligrosidad sísmica probabilista por zonas, estimados mediante dos modelos de recurrencia sísmica diferentes, Terremoto Característico y Gutenberg-Richter, además de mapas de amenaza para 7 escenarios sísmicos ubicados a distintas latitudes y asociados a diferentes fallas.

Hasta el momento, los estudios relacionados con la amenaza sísmica en Chile se enfocan en los terremotos de subducción, siendo pocos los estudios dedicados al peligro que presentan las fallas activas, y en su gran mayoría planteados a nivel local o con enfoque determinista.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo aborda la amenaza sísmica netamente desde la perspectiva cortical, aportando una caracterización y estimación de las principales fallas activas.

1.4. Área de estudio

El estudio se centra en Chile continental, enmarcado entre las longitudes 67 – 78°W y latitudes 14 - 56°S.

Con el fin de facilitar los cálculos, la representación y el análisis de los resultados, el área estudiada se divide en 4 grandes zonas: Zona Norte, Zona Centro, Zona Sur y Zona de Magallanes (Figura 1).

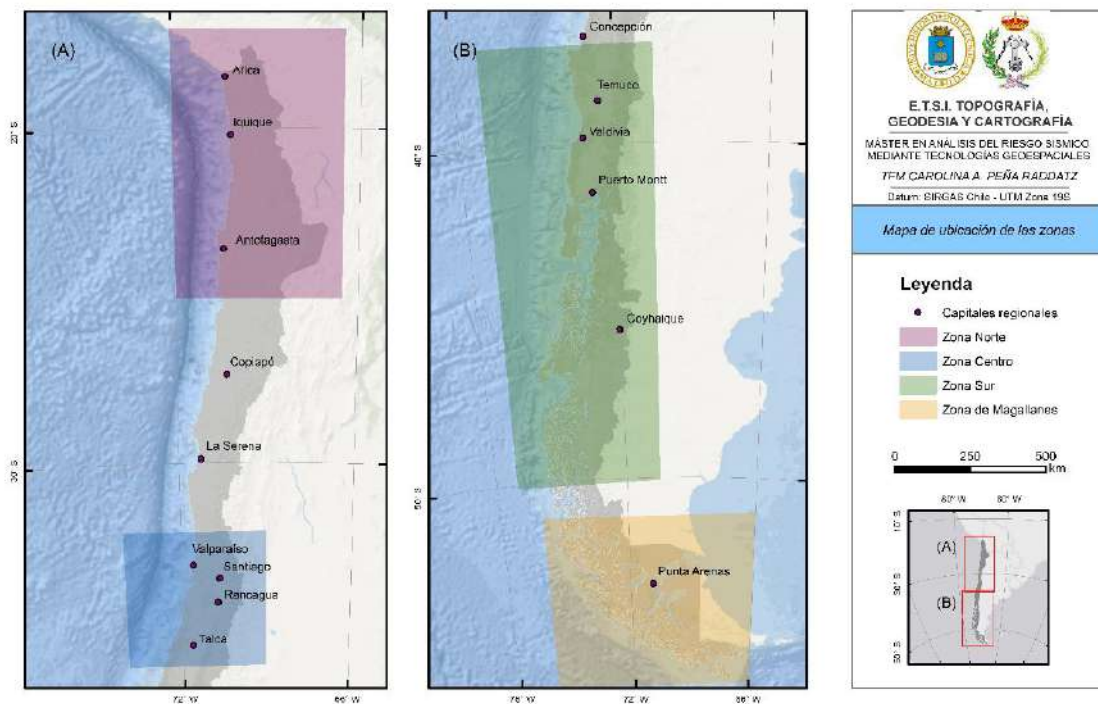


Figura 1. Ubicación área de estudio y zonas definidas.

Esta división se fundamenta en que, a pesar de evaluarse la peligrosidad a nivel regional, los datos, relativos a las fallas, requeridos para las estimaciones de peligrosidad son limitados,

siendo estas zonas los sectores en los que se concentran las principales fallas activas de las cuales se cuenta con información.

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO

2.1. Contexto geotectónico

Chile está ubicado en el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, presentando gran cantidad de actividad tanto sísmica como volcánica, por lo que es uno de los países con más peligrosidad sísmica a nivel mundial (Leyton *et al.*, 2009), convirtiéndolo en una zona de subducción fuertemente compresiva (Uyeda & Kanamori, 1979).

La convergencia oblicua de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana tiene lugar en dirección N-S, de forma paralela a la costa, a una velocidad de 66 mm/año (Angermann *et al.*, 1999), extendiéndose hasta los 46°S de latitud donde se ubica el Punto Triple entre las placas Nazca, Sudamericana y Antártica (Figura 2). La convergencia entre la placa de Nazca y la Sudamericana se da con un ángulo de ~12° con respecto a la dirección ortogonal (Angermann *et al.*, 1999), cuya componente paralela a la fosa provoca una partición parcial de la deformación de movimiento predominantemente dextral, la cual caracteriza el segmento de los Andes del Sur (38°S-46°S) y origina un gran sistema de fallas de dirección ~N10°E denominado Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) de extensión de 1200 km (Cembrano y Lara, 2009).

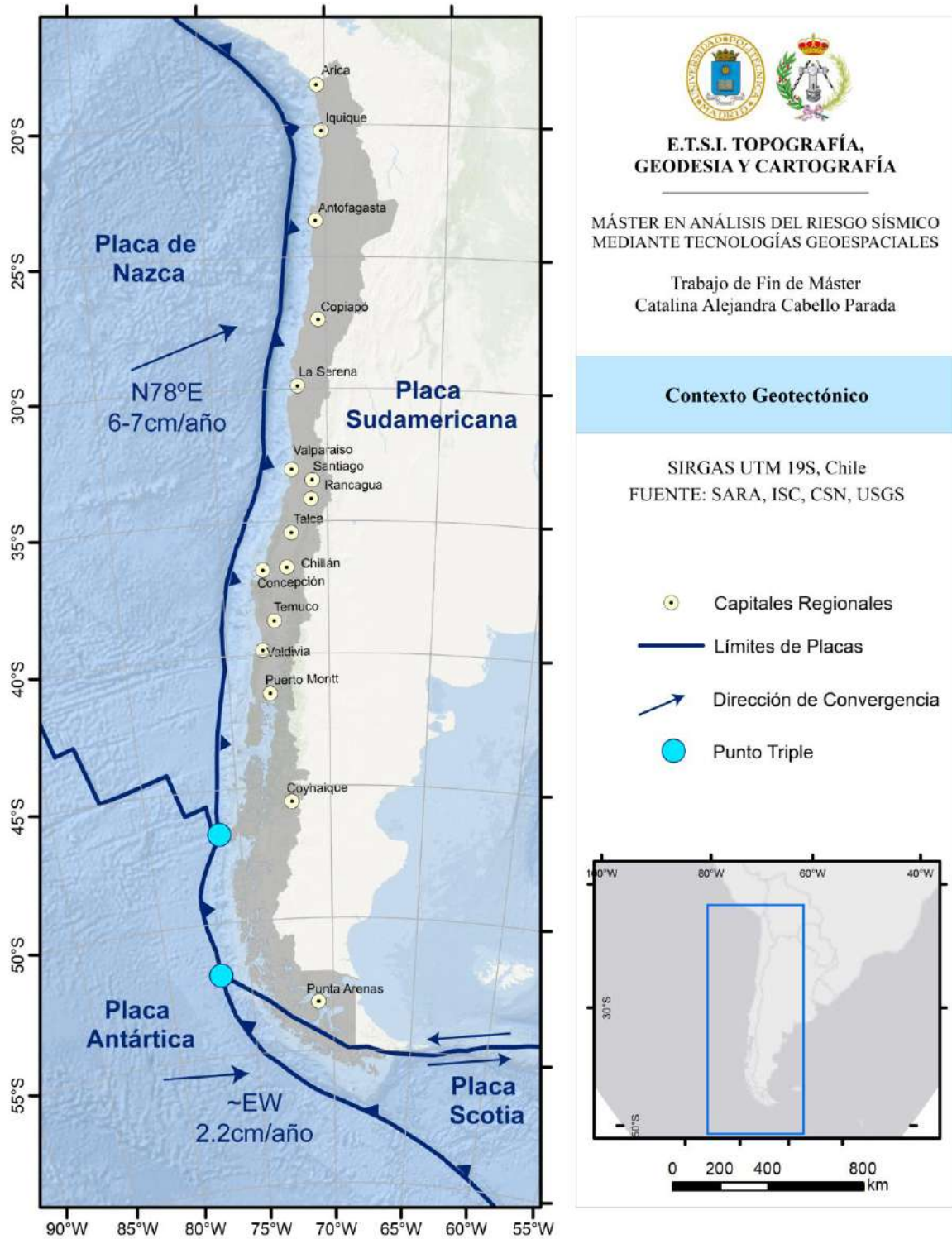


Figura 2. Contexto geotectónico de Chile continental. Tomado del Trabajo de Fin de Master de Catalina Cabello (2021).

La placa Antártica subduce bajo la Sudamericana con una velocidad estimada de 22 mm/año (De Mets *et al.*, 1994) y una dirección de convergencia perpendicular a la fosa desde el Eoceno temprano (Cande & Leslie, 1986). El margen tectónico más meridional de Chile se curva hacia el este y se caracteriza por un límite transformante de movimiento sinestral entre las placas Sudamericana y Scotia, cuyo segmento continental se conoce como Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano (SFMF). La tasa de deslizamiento actual de este sistema de fallas es ~10 mm/año en Chile y ~8 mm/año en la parte correspondiente a Argentina (Sandoval & De Pascale, 2020).

2.2. Fallas en Chile

Chile cuenta con una gran cantidad de fallas distribuidas a lo largo de todo el país. Sin embargo, no todas estas fallas pueden ser consideradas activas. Determinar la amenaza asociada a las fallas que sí son activas, depende en gran parte de los parámetros que definen su actividad, como son la recurrencia y las tasas de deslizamiento, factores aún no estudiados para la gran mayoría de las fallas. Además, los distintos modos de reactivación de las fallas tectónicas y el amplio rango de tasas de deslizamiento complican en gran medida la evaluación del riesgo sísmico de la corteza terrestre del país (Santibáñez *et al.*, 2019).

Las investigaciones en Chile se han centrado principalmente en fallas o sistemas de fallas locales y específicos. En 2000 el USGS & Lavenu presentan por primera vez una recopilación de estructuras neotectónicas del país como parte del proyecto “*World Map of Major Active Faults*”, incluyendo el primer mapa de fallas y pliegues. Esta base de datos se incorpora en trabajos recopilatorios posteriores que abordan la deformación cuaternaria de Sudamérica (ej. Costa *et al.*, 2020) y la neotectónica de Chile (Cembrano *et al.*, 2007). Posteriormente, por iniciativa del *Global Earthquake Model* (GEM), en 2016 se lleva a cabo el proyecto de evaluación del riesgo en Sudamérica (SARA, *South America Risk Assessment*), donde se incorporan las fallas de Chile a una base de datos global. En 2019, Santibáñez *et al.* elaboran el primer mapa de fallas activas del país, incorporando las estructuras anteriormente publicadas y discutiendo acerca de los parámetros clave de las fallas de la corteza y las condiciones generales relacionadas con su entorno tectónico y geomorfológico, introduciendo una primera aproximación para la evaluación de peligrosidad sísmica en fallas.

2. MARCO TEORICO

Recientemente, Maldonado *et al.* (2021) publican una base de datos unificada y actualizada de las fallas activas y potencialmente activas a escala nacional.

La Figura 3, tomada del trabajo de Maldonado (2020), muestra las fallas de intraplaca ubicadas en la zona sismogénica de la placa superior del margen de subducción activo de las placas Nazca y Sudamericana. Se observan los principales tipos de fallas sismogénicas con su ubicación relativa y cinemática simplificada.

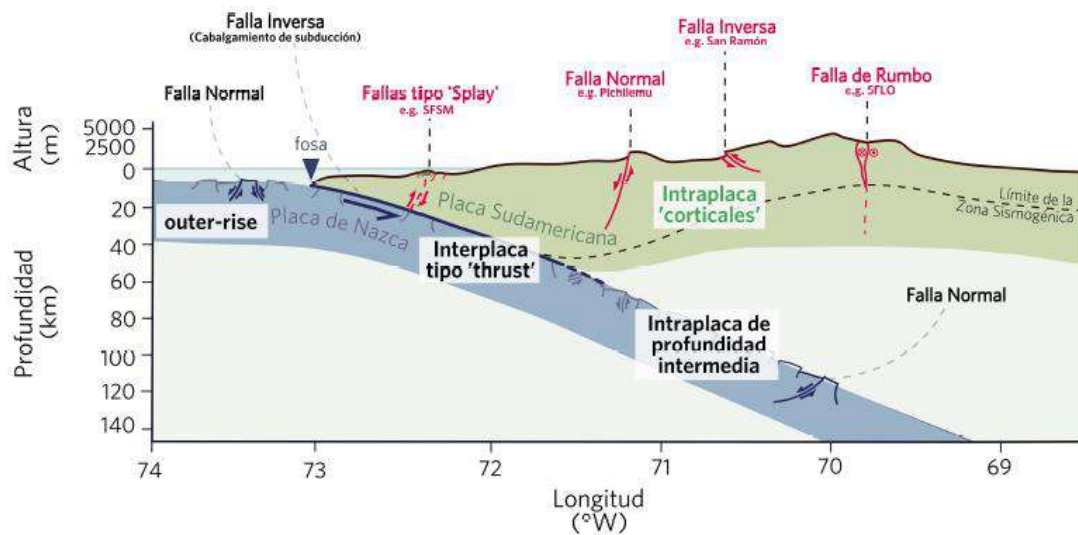


Figura 3. Perfil esquemático del margen de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana con los principales tipos de fallas sismogénicas (en rojo). Tomado de Maldonado, 2020.

2.3. Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica (H) se define como la probabilidad de que un cierto nivel de movimiento sea excedido durante un determinado periodo de exposición en un emplazamiento específico, como consecuencia de la ocurrencia de terremotos en la zona de influencia de fuentes sísmicas situadas alrededor del emplazamiento (Tomado de Rivas, 2014).

La peligrosidad se expresa también como la probabilidad anual de excedencia del valor del parámetro del movimiento $P = [y \geq Y]$ en lugar de la probabilidad en un tiempo arbitrario. Además, es habitual considerar la peligrosidad en términos de periodo de retorno (Tr), que se define como el inverso de la probabilidad anual de excedencia. La relación entre la probabilidad de excedencia en t años y el periodo de retorno, cuando se asume ocurrencia de sismos poissoniana, viene dada por la Ecuación 1 (Tomado de Rivas, 2014). Por ejemplo, para la construcción de estructuras de categoría normal se utiliza un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (t), lo que equivale a 475 años de Tr .

$$P = 1 - e^{-t/Tr} \quad (1)$$

Para la estimación de la peligrosidad sísmica es necesario considerar la influencia de 3 factores principales que condicionan el movimiento final resultante, correspondientes a la fuente sísmica, la trayectoria y el efecto local o de sitio (Figura 4).

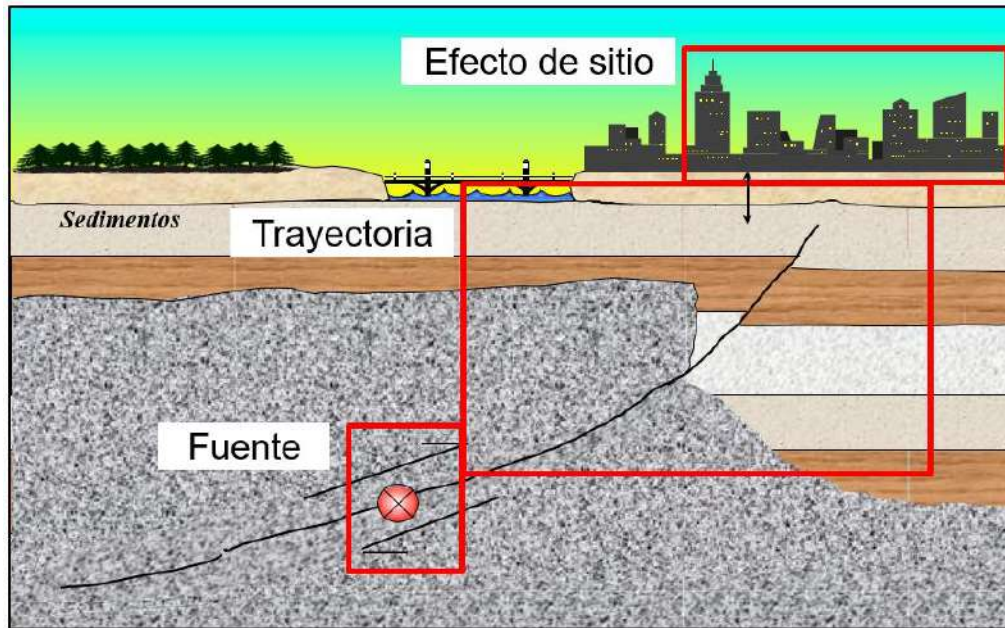


Figura 4. Factores que condicionan el movimiento resultante en el emplazamiento.

Considerando los factores antes mencionados, la peligrosidad sísmica se puede estimar mediante 2 métodos principales, la metodología determinista, DSHA (*Deterministic Seismic*

Hazard Assessment), y la metodología probabilista, conocida como PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*).

La caracterización de las fuentes sísmicas consiste en la identificación de todas las fuentes potencialmente activas que se encuentren en el área de influencia del emplazamiento a estudiar. Este efecto fuente implica la caracterización del potencial sísmico y las leyes de sismicidad asociadas a dichas fuentes. Por medio de modelos matemáticos que determinan el patrón de sismicidad y se establece la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos en función de su magnitud. Existen diversos modelos de recurrencia de la fuente, en el caso de los métodos probabilistas, se puede mencionar Terremoto Característico, Gutenberg-Richter, no poissonianos, entre otros.

Otro concepto a tener en consideración es el de terremoto máximo (M_{max}), el cual se utiliza en ambas metodologías de estimación de la peligrosidad sísmica y está asociado a la máxima magnitud que puede generar una falla según sus características. El escalamiento de las fallas sísmicas se ha estudiado y discutido durante mucho tiempo (ej. Wells & Coppersmith, 1994; Wesnousky, 2008; Stirling *et al.* 2013). Se basa en que la longitud de la ruptura en superficie es correlacionable con la magnitud (ej. Wells & Coppersmith, 1994) y para ello se proponen diversas relaciones. Estas relaciones son empíricas y se calculan por medio de datos sismológicos y la relación con la superficie que deslizó. Para ello se desarrollan análisis de regresión entre variables. La selección de un modelo de regresión para evaluar la relación entre un par de variables, se realiza seleccionando un determinado modelo funcional, y ajustando los datos a dicho modelo para deducir los coeficientes de la correlación resultante. Los modelos pueden ser lineales, no lineales, distribuciones normales y no paramétrica de los datos. Otra consideración es el proceso para tratar las incertidumbres en los datos.

Los criterios sismológicos que ayudan a definir estas relaciones empíricas pueden estar sesgados. Por ejemplo, la distribución de las réplicas puede no ser representativa de la verdadera zona de ruptura a lo largo del plano deslizante, o el producto de la longitud y el ancho de la falla puede sobreestimar el área de ruptura de la misma (Breneman *et al.*, 2019).

El efecto de la trayectoria se define como la caracterización de la atenuación del movimiento generado por las ondas sísmicas en su camino desde la fuente al emplazamiento. Esto se

realiza por medio de modelos empíricos o teóricos. El modelo de movimiento fuerte, también denominado ley de atenuación o ecuación de predicción del movimiento fuerte (GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*), es un factor determinante en el cálculo de la peligrosidad sísmica. Se han desarrollado diversas relaciones de atenuación para movimiento fuerte del suelo, como un componente importante del estudio de amenaza sísmica, utilizados tanto en métodos probabilistas como deterministas (Zhao *et al.*, 2006).

Tal como se menciona anteriormente, existen dos métodos fundamentales para obtener un modelo de movimiento fuerte: el empírico y el analítico. El primero, se basa en el ajuste por regresión de unos datos observados a una forma funcional, siendo los datos normalmente obtenidos a partir de registros acelerométricos. El análisis de regresión se realiza con ciertos requisitos matemáticos que dan cuenta de la bondad del ajuste. El segundo, parte de un modelo físico-teórico de generación y propagación de la energía sísmica que se calibra con datos sísmicos registrados, esencialmente acelerogramas. En ambos casos, se precisa contar con una base de datos de movimiento fuerte suficientemente amplia para que los modelos tengan una validación estadística. En la literatura, se pueden encontrar modelos de los dos tipos, pero lo más usual es el desarrollo y uso de modelos empíricos. Estos modelos, suelen ser clasificados atendiendo al régimen tectónico de la zona a estudiar, distinguiendo entre modelos de subducción (superficial y profunda), corticales y zonas volcánicas.

Finalmente, el efecto de sitio o efecto local consiste en la modificación de la señal sísmica debido a la influencia de condiciones geológicas y topográficas, durante o después de un sismo, en un emplazamiento dado. Esta modificación se entiende como una amplificación de la señal sísmica, mayor duración de la misma y de una modificación en su contenido frecuencial. En muchos casos, el efecto de sitio es el responsable de los mayores daños producidos por los terremotos, por lo cual, es fundamental su inclusión en el cálculo del movimiento esperado del suelo.

Cabe destacar que el estudio de la peligrosidad sísmica es no sólo el primer paso, sino que es además la base de los estudios de riesgo sísmico. Conocer la amenaza a la cual están expuestas las comunidades es crucial para disminuir el riesgo y prevenir catástrofes.

2.4. Método probabilista

2.4.1. Modelo de Terremoto Característico

Este modelo considera que la fuente solo rompe con una magnitud determinada, denominada magnitud característica (M_{TC}), con una periodicidad perfecta cada T años (Figura 5A). Por lo tanto, este modelo no considera la liberación de energía por medio de sismos de magnitud diferente a la característica. Si esto último sucediera, generaría una caída en el momento sísmico acumulado producto de la liberación de energía (Figura 5B), provocando un aumento del tiempo de recurrencia asociado a la magnitud característica (Rivas-Medina *et al.*, 2014).

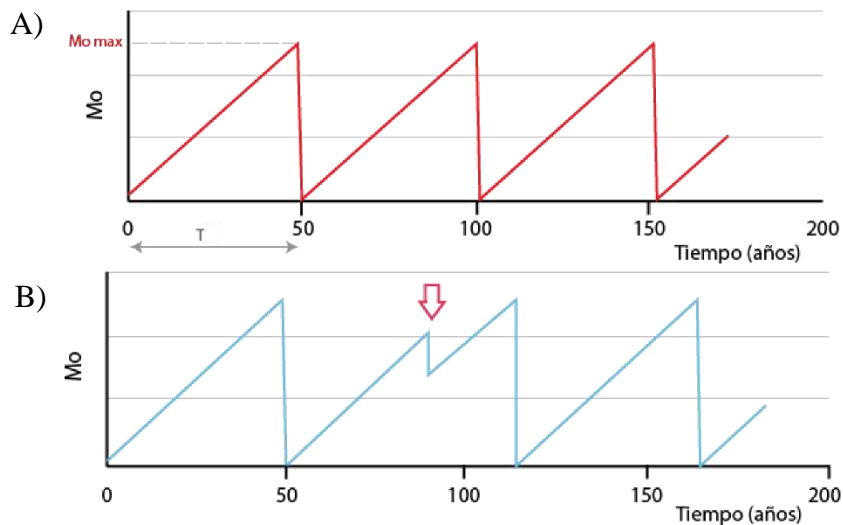


Figura 5. Modelo de recurrencia de terremoto característico. A) Periodicidad perfecta. B) Liberación de energía antes de llegar al momento sísmico asociado a la magnitud característica.

La ocurrencia de eventos de magnitudes menores a M_{TC} y menores tiempos de recurrencia, disminuye la frecuencia de sismos mayores, ya que produce un aumento de sus periodos de recurrencia (Rivas-Medina *et al.*, 2014).

Si se quiere considerar el hecho de que una falla pueda romper con eventos de diferente magnitud es necesario recurrir a otro modelo de recurrencia. El modelo más utilizado en la literatura es el modelo de Gutenberg-Richter, aplicado en su versión modificada y

considerando que no hay dependencia del tiempo desde el último evento (Rivas-Medina *et al.*, 2014).

2.4.2. Modelo de Gutenberg-Richter

El modelo clásico, que fue propuesto por Gutenberg & Richter (1944), propone una relación logarítmica entre la tasa de terremotos grandes y pequeños que tienen lugar en una fuente sísmica (Ecuación 2).

$$\log N(m) = a - bm \quad (2)$$

Donde $N(m)$ es la tasa anual de magnitud igual o mayor a m , y a y b son coeficientes obtenidos al ajustar la sismicidad a una recta.

La ecuación anterior también puede expresarse en términos de logaritmo natural, quedando de la siguiente manera (Ecuación 3).

$$\ln N = \alpha - \beta m \quad (3)$$

Si se considera un segmento de falla, la ecuación se puede expresar en términos de la tasa acumulada de sismos de magnitud mayor o igual a una magnitud m (Ecuación 4).

$$\dot{N}(m) = e^{\alpha - \beta m} \quad (4)$$

En la ecuación anterior se puede reemplazar según una magnitud mínima considerada (M_{min}). Por medio de diversas operaciones matemáticas, detalladas en el trabajo de Rivas-Medina *et al.* (2014), se obtiene la función de densidad del modelo $f(m)$. Sin embargo, al integrar la función de densidad de probabilidad de magnitud entre los límites M_{min} y M_{max} (límites de truncamiento) se obtiene un valor diferente a la unidad, por lo tanto, $f(m)$ no es una función de densidad en sí.

En consecuencia, para la correcta utilización de este modelo de recurrencia es necesario aplicar variaciones, dando de esta forma origen a modelos como el Gutenberg-Richter modificado. En este modelo, se fuerza a la integral a valer la unidad, multiplicando una constante k_1 a la función de probabilidad de ocurrencia de diferentes magnitudes.

Todo este proceso, con sus respectivas comprobaciones matemáticas, se explica más detalladamente en Rivas-Medina *et al.* (2014).

2.5. Método determinista

Estos métodos estiman el movimiento esperado en un emplazamiento dado considerando valores fijos de los parámetros antes mencionados, es decir, un escenario sísmico concreto. Generalmente se escogen los escenarios más desfavorables, cuya distancia al emplazamiento es mínima y las magnitudes corresponden al máximo terremoto posible, siguiendo un criterio conservador. La ventaja de este método es que proporciona las aceleraciones de un sismo de características conocidas (magnitud, distancia) proporcionando información útil para los diseños sismorresistentes. Por el contrario, la desventaja que presentan es el desconocimiento de la probabilidad de ocurrencia de dicho escenario, pudiendo estar asociado a grandes tiempos de recurrencia, por lo cual no tendría un uso práctico en ingeniería sísmica.

CAPÍTULO 3
DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. Base de datos

Para la realización de este trabajo se utiliza la base de datos de fallas continentales activas y potencialmente activas en Chile elaborada por Maldonado *et al.* (2021). Esta base de datos cuenta con 958 fallas (Figura 6) agrupadas en 17 sistemas de falla principales.



Figura 6. Fallas corticales más importantes en Chile. Líneas amarillas corresponden a Fallas Cuaternarias; líneas rojas corresponden a Fallas con registro histórico; líneas verdes corresponden a Fallas Neógenas. Tomado de: <https://fallasdechile.sitios.ing.uc.cl/>

Con el fin de contar con una base de fallas lo más completa posible, en este trabajo fueron actualizados algunos de los datos a partir de información del proyecto SARA y de trabajos publicados en el presente año (ej. Astudillo-Sotomayor *et al.*, 2021; De Pascale *et al.*, 2021).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

Adicionalmente, se incluye el Sistema de Fallas de Magallanes-Fagnano, el cual corresponde a un borde de placas transformantes de movimiento sinestral ubicado en el extremo sur del país, poniendo en contacto las placas tectónicas Scotia y Sudamericana (Perucca *et al.*, 2015). Se consideran los mismos sistemas de falla definidos por Maldonado *et al.* (2021), cuyas principales características se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Sistemas de falla de la Base de Fallas activas y potencialmente activas de Chile con sus principales características. Modificado de Maldonado *et al.*, 2021.

Sistema de falla	Zona	n° Fallas	n° Fallas probadas	n° Fallas probables	n° Fallas posibles	Acimut promedio	Sentido de movimiento dominante	Información tasa de deslizamiento
Atacama	N	75	29	34	12	72	Normal	Si
Andes Centrales	C	13	1	1	11	40	Inverso	No
Cachet	S	7	0	6	1	113	Dextral	Si
Caldera	N	32	0	8	24	87	Caldera	Si
Antearco Costero Central	C	56	11	25	20	116	Normal	No
Cordillera de la Sal	N	9	0	0	9	23	Inverso	Si
Este-Oeste	N	99	2	53	44	89	Inverso	Si
Exploradores	S	5	0	0	5	134	Inverso	No
Lanahue	S	25	0	20	5	134	Inverso	No
Lago Laja	C	40	9	30	1	101	Normal	Si
Liquiñe-Ofqui Transversal	S	380	2	354	23	53	Dextral	Si
Liquiñe-Ofqui	S	66	0	22	44	119	Sinestral	No
Los Vilos-Puerto Aldea	N	29	0	2	27	105	Normal	No
Antearco Costero Sur-Central	S	39	0	2	37	79	Sinestral	No
Santa María	C	21	1	20	0	66	Normal	No
Salar de Atacama	N	10	0	10	0	74	Inverso	No
Cabalgamiento Andino Occidental	C	48	25	1	22	97	Inverso	Si
No asignadas	-	5	1	1	3	29	-	No

Adicionalmente, la base de datos clasifica las fallas de acuerdo a su actividad en probadas, probables y posibles (ANEXO Figura A1.), donde las primeras corresponden a fallas asociadas a sismos históricos o con robusta evidencia publicada acerca de su actividad durante el Holoceno. Las fallas probables son aquellas cuya evidencia geológica o geomorfológica en superficie de ruptura o deformación permite plantear su actividad, mientras que las fallas posibles cuentan con menor evidencia asociada a movimiento reciente.

3.2. Selección de fallas

Idealmente, un estudio regional de peligrosidad sísmica probabilista (PSHA) se realiza con todas las fallas activas o potencialmente activas que representen una amenaza. Sin embargo, Chile no cuenta con la caracterización detallada de todas sus fallas, por lo cual, para llevar a cabo este estudio, como primera etapa se realiza una preselección de aquellas fallas que presentan mayor cantidad de información (estudios locales) o que llevan asociado algún sismo histórico (Tabla 3).

La caracterización de la peligrosidad sísmica de las fallas mediante el método probabilista requiere asignar a estas una tasa de acumulación de esfuerzos, razón por la cual se necesita conocer la tasa de deslizamiento. En la segunda etapa de selección de fallas, se escogen aquellas estructuras de las cuales se cuenta con dicha información.

Finalmente, con las fallas ya seleccionadas se realiza una tercera etapa en la cual se agrupan las diferentes trazas en 3 grandes grupos: principales, secundarias y segmentos del Sistema de fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO) (Tabla 4). Los segmentos principales corresponden a aquellos segmentos de mayor extensión en los cuales se han llevado a cabo la mayoría de los estudios. Los segmentos secundarios están asociados a los segmentos principales (geometrías complejas), sin embargo, presentan algunas características diferentes (orientación, extensión) y de los cuales generalmente se cuenta con menor información. Por último, los segmentos del SFLO corresponden a las trazas principales en las que se divide este gran sistema de falla. Dada su geometría compleja y falta de estudios en algunos sectores, estos segmentos presentan una mayor incertidumbre en comparación a los sistemas principales y secundarios en cuanto a sus características.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

Tabla 3. Fallas pre-seleccionadas.. (L) Largo, (P) profundidad, (A) Ancho. Tomado de Carrizo & González (2003), Carrizo et al. (2008), Cortés-Aranda et al. (2015), Cortés et al. (2012), González et al. (2008), Heinze (2003), Legrand et al. (2007), González et al. (2003), Alvarado et al. (2009), Moreno et al. (2008), Ruiz et al. (2014), Melnick et al. (2019), Armijo et al. (2010), Aron et al. (2013), Legrand et al. (2011), Vargas et al. (2014), Astudillo-Sotomayor et al. (2021), De Pascale et al. (2021), Sandoval & De Pascale (2020), Allmendinger & González (2010), González et al. (2015), Pinto (2016), Lodolo et al. (2003).

Sistema de Fallas	Fallas importantes	Rumbo/manteo	Geometría	Tasa deslizamiento (mm/año)
Este-Oeste	Falla Pisagua (RH)	N63°E/-	(L) 34 km	0.1-1.0
	Falla Bajo Molle	N78W/30-32N	(L) 12 km, (P) 20 km	0.4; 0.1-1.0
Atacama	Falla Mejillones	N10E/60-70°E	(L) 36 km, (P) 23 km	0.61 ± 0.26
	Falla Salar del Carmen	N15-20E/75-85°E	(L) 45 km	0.4; 0.1-1.0
	Falla Chomache	N40W/75 E	(L) 18 km	0.1-1.0
Cabalgamiento Andino Occidental	Falla San Ramón*	NS/40-60E	(A) 10 km	0.1-0.5; 0.4
Antearco Costero Central	Falla Pichilemu (RH)	N30W/55SW	(L) 40 km, (A) 20 km	0.1-1.0
	Falla El Yolki	N10W/-		5.0-6.0
Liquiñe-Ofqui	Falla Río Cuervo (RH)	N10E/-	(L) 20-30 km	1.0-5.0
	Falla Punta Cola (RH)	NS/80W	(L) 15-20 km	1.0-7.0; 1.0-5.0
	Falla Liquiñe	N10E/-	(L) 32 km, (A) 12 km	18.8 +- 2.0
	Falla Neltume (RH)	N35E/~80E	(L) 15 km	1.0-5.0
	Falla Golfo de Penas	N40E/-	(L) m a 60-100 km	3.6-12.3; 8.6-18.9; 21.7-24.6
Magallanes-Fagnano	Límite transcurrente (RH)	N68W/-	(L) hasta 200 km, (A) 15 km	7.8+-1.3; 10.5+-1.5
Los Vilos-Puerto Aldea	Falla Puerto Aldea	NNW/65°E	(L) 60 km	-
Andino Central	Falla El Fierro (RH)	~NS/W	(L) ~10 km	-
No asignadas	Falla Aroma (RH)	N14-17E/50SE	(L) 16 km, (A) 13km	-
	Falla Las Melosas (RH)	a. N20E/72SE. b. N80W/62N	Dos planos de fallas posibles. (L) 3 km	-

Tabla 4. Fallas y segmentos de falla principales y secundarios. S: segmento, C: completa. Los 36 segmentos adicionales del SFLO que se consideraron en los cálculos no se diferencian según su nombre local por lo cual no se incluyen en la tabla.

Fallas principales	Fallas Secundarias
Pisagua	Pisagua S1
Bajo Molle	Salar del Carmen S1
Mejillones	Salar del Carmen S2
Salar del Carmen	Salar del Carmen S3
Chomache	Salar del Carmen S4
San Ramón	San Ramón S1
Pichilemu	San Ramón S2
El Yolki	Pichilemu S1
Liquiñe	Pichilemu C2
Neltume	El Yolki S1
Río Cuervo	Neltume S1
Punta Cola	Río Cuervo S1
SFLO	Río Cuervo S2
SFMF S1	SFLO S1
SFMF S2	SFLO S2
SFMF S3	SFLO S3
SFMF S4	

Todos los segmentos se dibujan con una geometría simplificada, con el fin de facilitar el ingreso de los datos a los programas de cálculo. No obstante, se asegura que esta geometría sea lo más representativa posible de las trazas de falla. En el caso de la Falla San Ramón, la cual se divide en 2 segmentos principales (norte y sur), se considera como segmento principal un plano que se extiende a lo largo de ambos segmentos, representando de esta forma el peor escenario posible en el cual el evento sísmico genere una ruptura de todas las trazas.

3.3. Geometría de los planos de falla

La geometría en profundidad de las fallas se obtiene por medio de trigonometría a partir de las coordenadas (en metros) de los extremos superficiales de las trazas de falla, la profundidad mínima y máxima del plano de falla y el valor y dirección del buzamiento.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

En primer lugar, teniendo la profundidad máxima del plano de falla (z) y el ángulo de buzamiento (δ) se calcula el ancho de falla (W) en m (Ecuación 5).

$$W = \frac{z \text{ máxima (m)}}{\text{seno } (\delta)} \quad (5)$$

Con las coordenadas de los puntos inicial y final de cada segmento, se calcula el acimut de la falla (Ecuación 6), entendiéndose este como la dirección respecto al norte del segmento que une los puntos inicial y final.

$$\text{Acimut} = \text{atan} \frac{Xf - Xi}{Yf - Yi} = \text{atan} \frac{dx}{dy} \quad (6)$$

Donde X_i e Y_i corresponden a las coordenadas del punto inicial y X_f e Y_f corresponden a las coordenadas del punto final. Posteriormente, se realizan correcciones al valor de acimut resultante, de acuerdo a la posición espacial del punto final con respecto al punto inicial, es decir, según el cuadrante en el cual se ubica el segmento que va desde el punto inicial al punto final. En la Tabla 5 se muestra las fórmulas utilizadas para el cálculo del acimut considerando las correcciones según cuadrante.

Tabla 5. Cálculo del acimut de los planos de falla considerando correcciones según el cuadrante que une el punto inicial de la traza de falla al punto final.

Número de cuadrante	Fórmula acimut
1	$\text{Acimut} = \text{atg} \frac{dx}{dy}$
2	$\text{Acimut} = 180^\circ + \text{atg} \frac{dx}{dy}$
3	$\text{Acimut} = \text{atg} \frac{dx}{dy} + 180^\circ$
4	$\text{Acimut} = 360^\circ + \text{atg} \frac{dx}{dy}$

Después, con el buzamiento y el ancho de falla, se obtiene la distancia en m que se observa en planta (D_r) a la proyección del plano de falla en superficie (Ecuación 7).

$$Dr = \frac{W}{\text{coseno}(\delta)} \quad (7)$$

De acuerdo al acimut de la falla y la dirección del buzamiento se obtiene el acimut2, correspondiente a la dirección del buzamiento, el cual es perpendicular al acimut. Por medio de ecuaciones (Ecuación 8) se estima el delta x (Dx) y el delta y (Dy), es decir, la diferencia entre las coordenadas iniciales y finales en superficie con las coordenadas iniciales y finales en profundidad.

$$Dx = Dr * \text{seno}(\text{acimut2}) \quad Dy = Dr * \text{coseno}(\text{acimut2}) \quad (8)$$

Finalmente, a las coordenadas iniciales en superficie se les suma el valor correspondiente de Dx y Dy, obteniendo las coordenadas de los vértices del plano de falla en profundidad.

3.4. Selección de modelos de movimiento fuerte

En Chile se han definido 3 modelos de predicción de movimiento fuerte (Contreras & Boroscheck, 2012; Idini *et al.*, 2017; Montalva *et al.*, 2017). Sin embargo, todos están definidos para régimen de subducción (interfase, intraplaca). No existe hasta el momento ningún GMPE que se asocie a sismos corticales, lo cual se debe principalmente a que los registros de aceleración son aún insuficientes. Es por esta razón que para las estimaciones de peligrosidad realizadas en este trabajo se escogen modelos de atenuación definidos para otras regiones, teniendo en consideración el ambiente geotectónico y los rangos de valores de magnitud y distancia para los que cada modelo es aplicable. En la Tabla 6 se muestran los modelos escogidos junto con sus rangos de aplicabilidad y otras características. Cabe destacar que la mayoría de estos modelos ya se han aplicado anteriormente en estudios de peligrosidad para fallas en Chile (ej. Vargas *et al.*, 2014; Hussain *et al.*, 2020; Pérez-Estay, 2016).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

Tabla 6. Modelos de predicción de movimiento fuerte utilizados.

Modelo	Rango de magnitud (Mw)	Rango de distancia (km)	Tipo de distancia	Rango de profundidad (km)	T (s)	Unidad de aceleración	Tipo de mecanismo	Lugar donde fue definido	Vs30 roca (m/s)	Vs30 utilizado (m/s)	Z1 (km)
Abrahamson, Silva & Kamai, 2014	3.0-8.5	0-300	Rrup	0-20	PGA, PGV, 0.01-9	g	Todos	Base de datos PEER NGA Weat 2	1180	760	0.048
Akkar <i>et al.</i> , 2014	4.0-7.6	0-200	RJB	0-30	PGA, PGV, 0.01-10	g	Todos	Europa y Medio Oriente	750	760	-
Boore <i>et al.</i> , 2014	3.0-8.5	0-400	RJB	No considerada	PGA, PGV, 0.01-10	g	Todos, normal hasta Mw 7.0	Base de datos PEER NGA Wes 2	760	760	0.041
Campbell & Bogzonia, 2014	3.3-8.5	0-300	Rrup	0-20	PGA, PGV, 0.01-10	g	Todos	Base de datos PEER NGA Weat 2	1100	760	0.607 (Z2.5)
Chiou & Youngs, 2014	3.5-8.0	0-300	Rrup	0-20	0-10	g	Todos, desagarre hasta Mw 8.5	Base de datos PEER NGA West 2	1130	760	0.041
Idriss, 2014	5.0-8.0	0-150	Rrup	0-25	0.01-10	g	Todos	Base de datos PEER NGA West 2	> 600	760	-
Zhao <i>et al.</i> , 2006	5.0-8.3	0-300	Rrup	0-25	0-5	cm/s ²	Todos	Japón, USA e Irán	600 - 1100	> 600	-

Se estima la amenaza sísmica en cada región con cada uno de los 7 modelos de movimiento fuerte señalados, sin embargo, posteriormente se descarta el uso del modelo de Idriss (2014). La razón principal por la cual se desecha el uso de este modelo es que no tiene definido el cálculo para el valor de PGA, sumado a que el valor de la distancia máxima a la fuente es menor a la distancia definida por el resto de los modelos, dificultando su comparación. Finalmente, se obtiene un resultado en el que convergen todos los modelos. Se realiza un promedio simple con los restantes 6 modelos de atenuación para las zonas Sur y de Magallanes. Para las zonas Norte y Central no se considera el modelo de Boore *et al.* (2014) ya que sesgaba los resultados, tema que se desarrolla más ampliamente en el apartado de discusión.

3.5. Hipótesis

La falta de datos que se tiene sobre las fallas activas obliga a definir ciertos supuestos que permitan el cálculo de su peligrosidad. Los supuestos utilizados se describen a continuación.

- Tasas de deslizamiento. Se cuenta con las tasas de deslizamiento estimadas principalmente por paleosismología en segmentos específicos y locales, las cuales no necesariamente se corresponden con la tasa de deslizamiento presente a lo largo de toda la traza de falla. No obstante, se extrapolan estos valores para la longitud total de la falla, con el fin de realizar los cálculos del peor escenario posible (ruptura completa de la falla), incluyendo en algunos casos la extrapolación a los segmentos secundarios asociados a las fallas principales.

Otro aspecto en relación a este parámetro es la falta de un valor exacto para la mayoría de los segmentos, ya que las bases de datos y publicaciones frecuentemente proporcionan los valores en rangos. Se decide utilizar el valor medio de cada rango en el caso de no contar con un valor más preciso.

Un caso especial de este supuesto se presenta en el SFLO, ya que este sistema de gran extensión (~1200 km) sólo se ha estudiado exhaustivamente en relación a su tasa de deslizamiento en dos segmentos acotados dando valores extremadamente altos (~18

mm/año, Astudillo-Sotomayor *et al.*, 2021; De Pascale *et al.*, 2021), por lo cual no se considera correcto extrapolarlos al total de trazas del sistema. La base de datos del proyecto SARA le otorga al SFLO un rango de tasa de deslizamiento genérica para todo el sistema según el acimut de las trazas, siendo de 1.0-5.0 mm/año en trazas de dirección N-S y 0.1-1.0 mm/año en trazas de dirección NW. Por lo tanto, para aquellos segmentos sin estudios publicados se supone como valor de tasa de deslizamiento el valor medio del rango correspondiente según la dirección de los segmentos.

- Sentido de movimiento. No se conocen los sentidos de movimiento para todas las fallas del país, por lo cual, se extrapolan estos datos en segmentos de falla cercanas a alguna falla de la cual sí se cuenta con la información, siempre y cuando estas fallas pertenezcan al mismo sistema de falla y presenten un acimut similar. Se realiza este proceso con el fin de complementar la base de datos de fallas activas y potencialmente activas del país, señalando (con*) aquellos datos extrapolados con el fin de diferenciarlos de los datos medidos. Para las fallas seleccionadas utilizadas en el cálculo de peligrosidad, se cuenta con los sentidos de movimiento gracias a los estudios locales realizados sobre ellas.
- Buzamiento. El buzamiento se refiere al ángulo con que buza el plano de falla, medido desde la horizontal. Este parámetro puede variar a lo largo de la falla, razón por la que es común que la literatura proporcione rango de valores o lo describa de forma cualitativa. Se definen de esta forma, valores de buzamiento de forma arbitraria en base a bibliografía. Para aquellas fallas cuyos valores de buzamiento se tienen en rangos, se deja el valor promedio de ambos extremos. Las fallas descritas como subverticales o empinadas (El Yolki, Liquiñe, Aysén y el SFMF) se consideran con buzamiento de 90° a 80°. En el caso de Falla Pisagua se considera como buzamiento el ángulo que presentan grietas reactivadas posteriormente al terremoto del año 2007 (Allmendinger & González, 2010). Para los diferentes segmentos definidos para el SFLO se considera un valor constante de 90°, debido a la subverticalidad con la que

es descrito este sistema de falla en toda su extensión, a pesar de presentar variaciones latitudinales.

- **Profundidad.** Al igual que los parámetros anteriores, no se cuenta con los valores de profundidad para todas las fallas, por lo cual es necesario recurrir a criterios que permitan definirla. En la mayoría de los casos, se recurre a las profundidades de los dominios definidos por Santibáñez *et al.* (2019), quienes asocian un rango de profundidad de acuerdo a la ubicación de las fallas. Estas profundidades coinciden con valores propuestos por otros autores y con las profundidades de los hipocentros de los terremotos registrados (ej. Terremoto en la falla Pisagua o falla Neltume). La profundidad de las fallas Río Cuervo y Punta Cola se define según la profundidad propuesta por Villalobos *et al.* (2020) para el sector, coincidiendo con los hipocentros de los sismos del enjambre sísmico de Aysén el año 2007.

Por otro lado, con el fin de estimar el peor escenario y considerando que la mayoría de las fallas presenta una zona sismogénica somera, se define como profundidad mínima un valor de 0, es decir, la ruptura llegaría a superficie.

3.6. Cálculo de la peligrosidad sísmica

3.6.1. Terremoto máximo

Los modelos implementados en este trabajo requieren conocer el valor de la magnitud máxima posible que se puede alcanzar en un evento sísmico. Para estimar este parámetro se utilizan fórmulas empíricas que relacionan la magnitud de acuerdo a la longitud de la ruptura. En este trabajo los cálculos son realizados para el peor escenario, por lo cual las longitudes de rupturas corresponden al largo total de cada segmento de falla.

Dado que estas relaciones presentan una incertidumbre importante, se calculan los terremotos máximos utilizando las fórmulas propuestas por 4 autores diferentes: Wells & Coppersmith (1994), Leonard (2010), Stirling *et al.* (2013) y Brengman *et al.* (2019), definiendo como el valor de la magnitud máxima final el promedio de los 4 valores

3. DATOS Y METODOLOGÍA

obtenidos. Las fórmulas de regresión postuladas por cada autor y sus diferentes parámetros se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Fórmulas empíricas utilizadas en el cálculo de Terremoto Máximo.

Referencia Regresión	Tipo de falla	Fórmula	Coeficientes		Error estándar		Confianza	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Rango	
			a	b	Sigma a	Sigma b					
Wells & Coppersmith, 1994	Inversa	$Mw = a + b * \log(L)$	5	1.22	0.220	0.160	95%	0.28	0.88	Mw 5.6-8.1	
	Normal		4.86	1.32	0.340	0.260		0.34	0.81		
	Desgarre		5.16	1.12	0.130	0.080		0.28	0.91		
Leonard, 2010	Dip slip	$\text{Log}(M0) = a * \log(L) + b$	(1) 3.0 (2) 2.5	(1) 6.39 (2) 8.08	-	-	-	(2) 7.87-8.28* (1) 5.65-6.52*	-	(1) 0-2.5 km (2) >2.5 km	
	Desgarre		(1) 3.0 (2) 2.5 (3) 1.5	(1) 6.09 (2) 7.85 (3) 12.50	-	-	-	(2) 7.41-8.28* (3) 12.01-12.88*	-	(1) 0-3.4 km (2) 3.4-45 km (3) >45 km	
	Dip slip		1.67	4.17	-	-	-	-	-	-	
	Desgarre		$Mw = a * \log(L) + b$	1.67	4.32	-	-	-	-	-	-
	Inversa		4.11	1.88	-	-	-	-	0.24	-	-
Stirling <i>et al.</i> , 2013	Normal	$Mw = a + b * \log(L)$	6.12	0.47	-	-	-	0.24	-	Mw 5.9-7.9	
	Desgarre		5.56	0.87	-	-	-	0.24	-		
	Inversa		4.207	1.7219	0.328	0.144	-	-	0.910		-
Bregman <i>et al.</i> , 2019	Normal	$Mw = a + b * \log(L)$	3.957	1.7917	0.676	0.507	95%	-	0.848	-	
	Desgarre		4.826	1.2874	0.510	0.335		-	0.835	-	

Por otra parte, para algunas de las fallas se cuenta con registros históricos. Si las magnitudes registradas son mayores a los estimados mediante las fórmulas empíricas, se realizan las estimaciones de peligrosidad con los valores más altos.

3.6.2. Cálculo probabilista

3.6.2.1. Terremoto Característico

El cálculo de la peligrosidad sísmica por medio del modelo de Terremoto Característico requiere conocer la tasa de momento sísmico (\dot{M}_0) que se está acumulando en la falla. Este valor se puede obtener a partir del área del plano de falla (A , en km^2), la tasa de deslizamiento (\dot{u} , en mm/año) y el módulo de deformación de la corteza ($\mu=3*10^{10}$ Pa) por medio de la ecuación propuesta por Brune (1968), considerando una acumulación uniforme del momento sísmico (Ecuación 9).

$$\dot{M}_0 = \mu * \dot{u} * A \quad (9)$$

Asumiendo que la energía liberada es igual a la energía acumulada, se calcula el momento sísmico que se necesita acumular para generar un terremoto de magnitud igual a M_{max} . Esto se estima mediante la ecuación propuesta por Hanks & Kanamori (1979) (Ecuación 10).

$$M_0(M_{max}) = 10^{16.05+1.5*M_{max}} \quad (10)$$

Finalmente, la recurrencia se obtiene dividiendo el valor de M_0 (M_{max}) por \dot{M}_0 (Ecuación 11).

$$Recurrencia = \frac{M_0(M_{max})}{\dot{M}_0} \quad (11)$$

Donde el valor de \dot{M}_0 es en dina*cm*año^{-1} .

3.6.2.2. Gutenberg-Richter

Se utiliza el método de Gutenberg-Richter modificado para obtener los modelos de recurrencia asociados a sismos de diferente magnitud.

Se define en primer lugar el rango de magnitudes en el cual se trunca el modelo. En este trabajo se fija M_{min} en 4.5 y M_{max} es igual al valor de magnitud del terremoto máximo, asumiendo un valor β estándar de 1.8, utilizado en los Mapas de Riesgo y Probabilidad de Estados Unidos (USGS).

Utilizando la ecuación (Ecuación 12) se calcula el momento sísmico que se libera en diferentes grados de magnitud.

$$Mo(m) = e^{(\check{c} - \check{d}m)} \quad (12)$$

Donde \check{c} es igual a $16.05 \cdot \ln(10)$ y \check{d} es $1.5 \cdot \ln(10)$. En este estudio se calcula el valor del momento sísmico $Mo(m)$ para las magnitudes M_{min} y M_{max} .

Se considera, además, la fórmula propuesta por Anderson (1979), incorporando la tasa simple de sismos según el modelo de Gutenberg-Richter modificado (Ecuación 13)

$$\dot{N}o = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \dot{N}_{Mmin} * \beta * \left[\frac{e^{-\beta(m)}}{(e^{-\beta(Mmin)} - e^{-\beta(Mmax)})} \right] Mo(m) dm \quad (13)$$

Finalmente, incorporando la Ecuación 12 en la Ecuación 13, se obtiene la Ecuación 14, la cual permite calcular el valor de la tasa acumulada de la magnitud M_{min} .

$$\dot{N}_{Mmin} = \frac{\dot{N}o(\check{d} - \beta)(e^{-\beta Mmin} - e^{-\beta Mmax})}{\beta[e^{-\beta Mmax} Mo(Mmax) - e^{-\beta Mmin} Mo(Mmin)]} \quad (14)$$

Donde $\dot{N}o$ corresponde al valor obtenido en el cálculo del modelo de terremoto característico.

Para realizar las estimaciones probabilistas de ambos modelos se recurre al *software* R-CRISIS. Este programa realiza los cálculos de amenaza en base a los parámetros antes descritos. Una vez definida la malla de cálculo correspondiente al área estudiada, se requiere

ingresar en primer lugar, la geometría de las diferentes fuentes sísmicas, en este caso polígonos que representan los planos de falla. Posteriormente se le asigna a cada polígono los parámetros sísmicos. El modelo de Terremoto Característico requiere del tiempo de recurrencia, mientras que el modelo de Gutenberg-Richter necesita de la tasa acumulada de M_{min} definido y el valor de β . Ambos modelos requieren del valor de magnitud máxima esperada. Luego, se indica el modelo de predicción de movimiento fuerte a cada plano de falla, de acuerdo a su sentido de movimiento predominante. Finalmente, se definen las ordenadas espectrales y los periodos de retorno a estimar. El programa proporciona los valores de aceleración esperada para cada punto de la malla, para cada ordenada espectral y para cada periodo de retorno.

3.6.3. Cálculo determinista

Para la estimación de la peligrosidad considerando escenarios sísmicos específicos de forma determinista se recurre a la herramienta *OpenQuake Engine*. Es una aplicación de código abierto que permite a los usuarios calcular la peligrosidad sísmica y el riesgo sísmico de los terremotos a diferentes escalas, además de otras funciones.

La aplicación requiere, en primer lugar, la información de la ruptura, tanto la geometría como la discretización de la fuente. Como se busca modelar el peor escenario, se ingresa la magnitud correspondiente al valor de $M_{m\acute{a}x}$. Se ingresan además los parámetros de la geometría del plano de falla y las coordenadas y profundidad del hipocentro. Estos últimos parámetros de definieron arbitrariamente, considerando la menor distancia posible entre el plano de ruptura y el área poblada más cercana y una profundidad de 10 km, igual para todos los escenarios, excepto para la Falla Los Palos en la que la profundidad escogida es de 5 km, en base a la distribución en profundidad de los sismos del enjambre sísmico del año 2007 (Villalobos *et al.*, 2020; Mora *et al.*, 2010).

Posteriormente, se ingresan los parámetros de cálculo, indicando la malla de cálculo y el valor de discretización. Se pueden ingresar valores de V_{s30} con el fin de estimar la peligrosidad considerando el efecto local. No obstante, en este trabajo se desarrolla el cálculo para un valor homogéneo de V_{s30} igual a 760 m/s, correspondiente a un suelo duro. Luego,

se indican los modelos de predicción del movimiento fuerte y las ordenadas espectrales que se requieran. Los modelos GMPE ingresados corresponden a los descritos en la Tabla 6, mientras que las ordenadas espectrales calculadas son PGA; SA(T) para T de 0.1; 0.2; 0.5; 1.0 s, siendo la PGA y SA (1.0s) los que posteriormente se representan en mapas.

Se ingresa la distancia máxima fuente-emplazamiento, pudiendo variar, además, el valor del nivel de truncamiento (n° de ε). Para este trabajo se utiliza una distancia máxima de 200 km, la máxima permitida por los modelos, y se fija el valor de ε en 0, generando así las aceleraciones medias predichas por los modelos.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS

4.1. Fallas activas de Chile

La actualización de la base de datos de fallas activas y potencialmente activas de Chile (Maldonado *et al.*, 2021) realizada en base a bibliografía reciente, permite agregar a la base de datos 22 nuevos segmentos de falla, pertenecientes al Sistema de falla Magallanes-Fagnano (SFMF), llegando a una total de 980 fallas. Se mantienen los sistemas de falla definidos por Maldonado *et al.* (2021), agregando únicamente el SFMF (Figura 7). Las características de este sistema de falla se resumen en la Tabla A.1 del ANEXO.

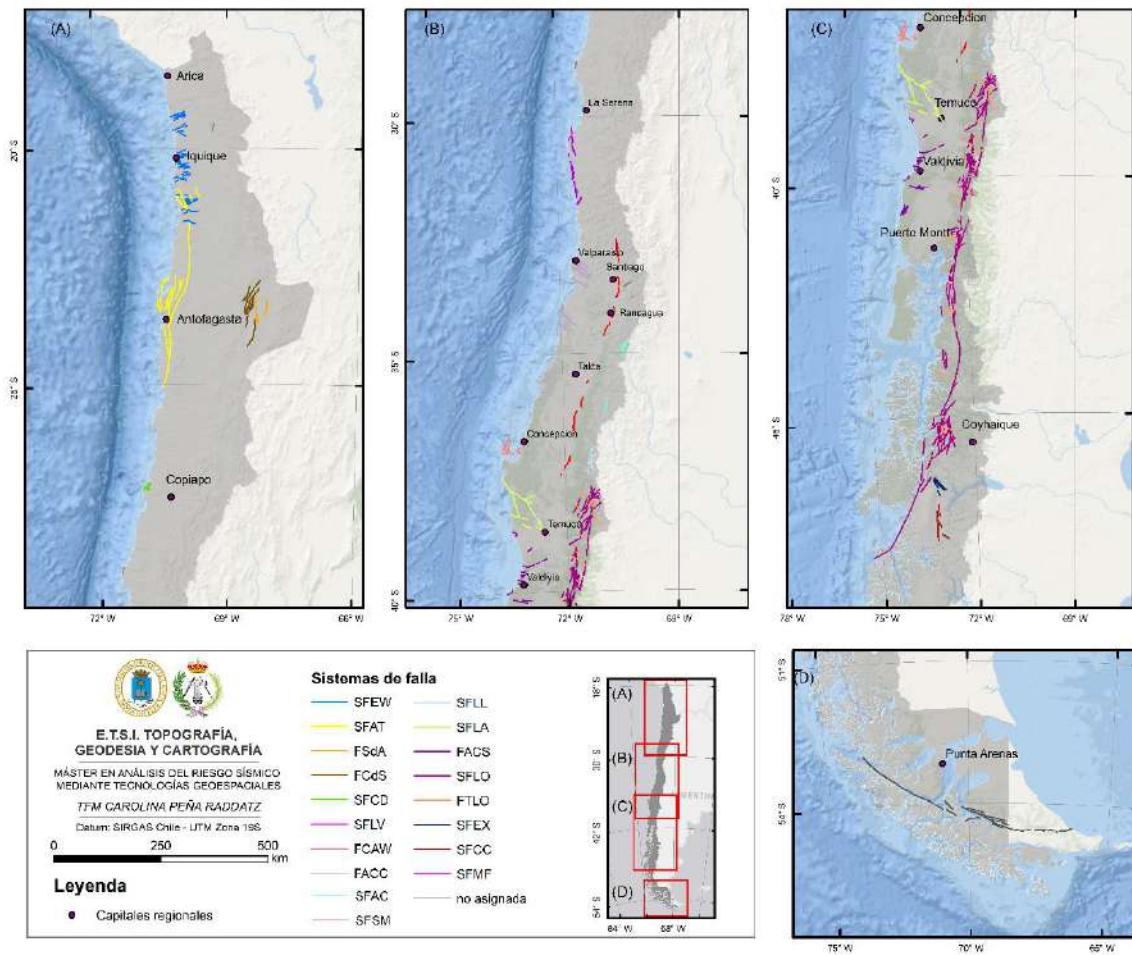


Figura 7. Sistemas de fallas definidos en base de datos de fallas activas y potencialmente activas de Chile, Modificada de Maldonado *et al.* (2021).

4. RESULTADOS

Se complementaron además los datos relativos a tasas de deslizamiento para 271 fallas y sentidos de movimiento para otras 181 fallas. La Figura 8 muestra los diferentes segmentos de falla representados según el valor de su tasa de deslizamiento. Cabe destacar, que a pesar de la complementación de los datos, aún no se cuenta con información para 698 fallas, las cuales representan un ~71% del total de fallas registradas.

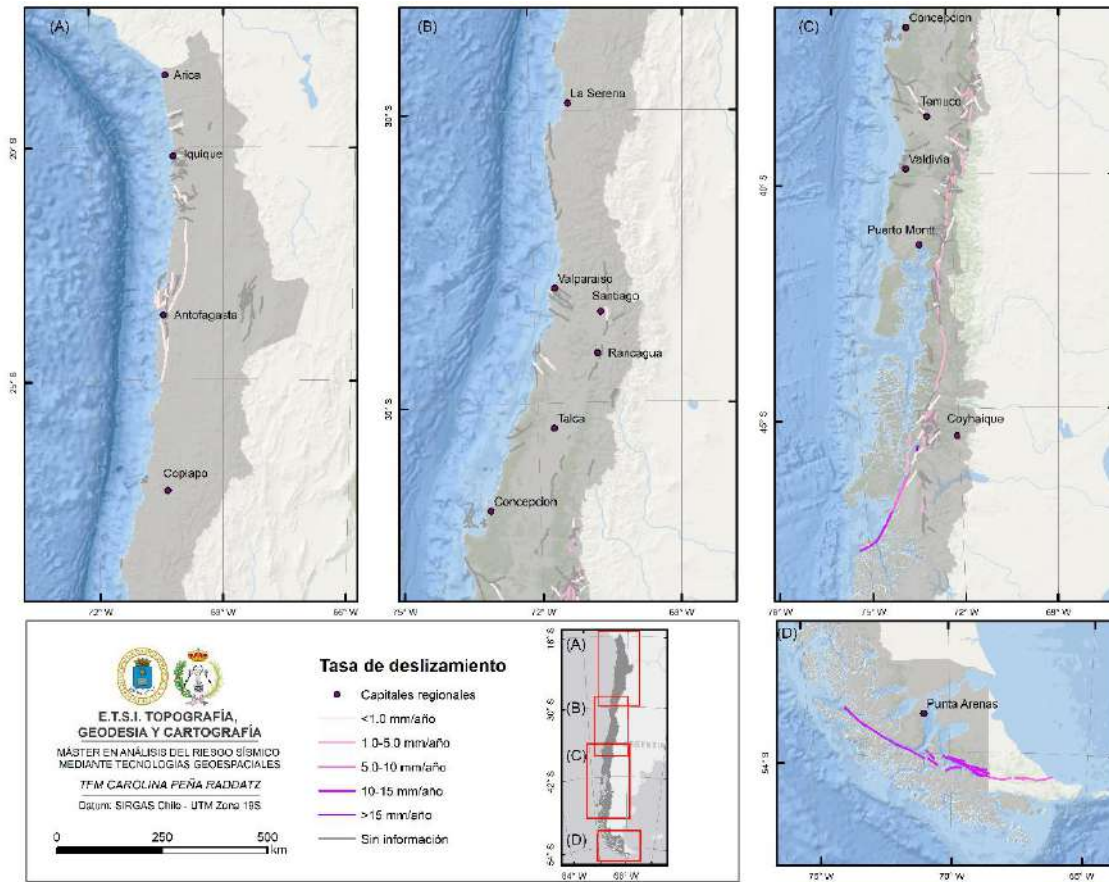


Figura 8. Tasas de deslizamiento de las fallas activas de Chile.

4.2. Geometría de los planos de falla

En la Tabla 8 se indican los valores con los cuales se estima la geometría en profundidad de las fallas principales y los datos geométricos obtenidos. En la Tabla A.2 del ANEXO se

muestran los parámetros para las fallas secundarias y segmentos del SFLO. Además, las coordenadas iniciales y finales que definen cada plano de falla se presentan en la Tabla A.3 del ANEXO.

Tabla 8. Parámetros geométricos de las fallas principales. Z: profundidad máxima alcanzada por la falla, W: ancho del plano de falla, Dr: diferencia de distancia en planta observada entre los puntos en profundidad y en superficie.

Nombre Falla	Sentido buzamiento	Buzamiento (δ)	Z max (m)	W (m)	Acimut ($^{\circ}$)	Dr (m)	Acimut2 ($^{\circ}$)
Pisagua	S	85	30000	30115	59.2	2624.7	149.2
Bajo Molle	N	31	20000	38832	283.4	33285.6	13.4
Mejillones	E	65	23000	25378	359.6	10725.1	89.6
Salar del Carmen	E	80	25000	25386	19.9	4408.2	109.9
Chomache	E	75	30000	31058	319.3	8038.5	49.3
San Ramón	E	45	12000	16971	355.5	12000.0	85.5
Pichilemu	W	55	24000	29299	321.2	16805.0	231.2
El Yolki	SW	90	25000	25000	292.9	0.0	202.9
Liquiñe	E	80	12000	12185	5.2	2115.9	95.2
Neltume	E	67	12000	13036	22.1	5093.7	112.1
Río Cuervo	E	75	10000	10353	5.6	2679.5	95.6
Punta Cola	W	80	10000	10154	4.7	1763.3	274.7
SFLO	E	80	12000	12185	13.9	2115.9	103.9
SFMF S1	-	90	15000	15000	271.5	0.0	181.5
SFMF S2	-	90	15000	15000	292.6	0.0	202.6
SFMF S3	-	90	15000	15000	301.4	0.0	211.4
SFMF S4	-	90	15000	15000	308.8	0.0	218.8

Con esta información se construye la Figura 9, en la cual se muestra cómo se disponen los distintos planos de falla en profundidad, coloreados según el sentido de movimiento que presentan.

4. RESULTADOS

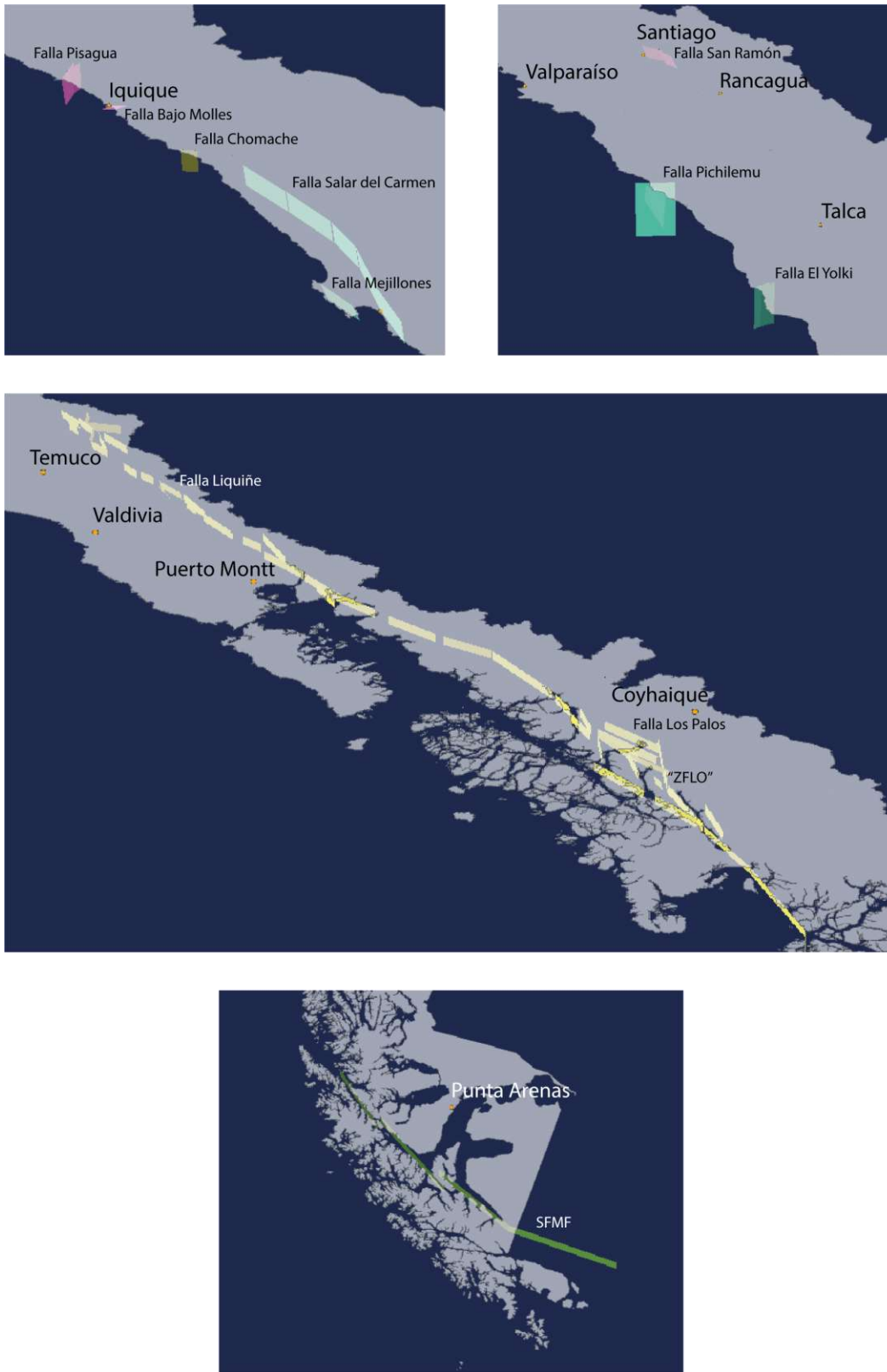


Figura 9. Imágenes de los planos de falla analizados en este trabajo en profundidad. Los colores indican el sentido de movimiento. Rosa: inversa, calipso: normal, amarillo: dextral y verde: sinistral.

4.3. Terremoto máximo

Se complementa la base de datos de fallas con los valores de terremoto máximo calculados para cada segmento de falla según las 4 ecuaciones descritas en el apartado de Datos y Metodología.

La Tabla 9 muestra los valores de magnitud máxima calculados para las trazas de las fallas principales, los valores de los segmentos secundarios y del SFLO se muestran en la Tabla A4 del ANEXO.

Tabla 9. Terremotos máximos de las fallas principales según diferentes regresiones. S: segmento.

Nombre Falla	Weels & Coppersmith, 1994	Leonard, 2010	Stirling <i>et al.</i> , 2013	Brengman <i>et al.</i> , 2019	PROMEDIO	Desviación
Pisagua	6.8	6.6	6.9	6.8	6.8	0.10
Bajo Molle	6.3	6.0	6.1	6.0	6.1	0.15
Mejillones	6.9	6.8	6.9	6.8	6.8	0.07
Salar del Carmen	7.1	7.0	6.9	6.9	7.0	0.07
Chomache	6.5	6.3	6.6	6.3	6.4	0.13
San Ramón	6.8	6.6	6.8	6.7	6.7	0.10
Pichilemu	6.8	6.6	6.8	6.5	6.7	0.13
El Yolki	6.2	5.9	6.6	5.8	6.1	0.36
Liquiñe	6.8	6.8	6.9	6.8	6.8	0.05
Neltume	6.4	6.1	6.5	6.2	6.3	0.17
Río Cuervo	6.9	6.9	6.9	6.8	6.9	0.04
Punta Cola	6.6	6.5	6.7	6.5	6.6	0.10
Mate Grande	6.3	6.0	6.4	6.1	6.2	0.19
SFMF S1	7.6	8.0	7.5	7.7	7.7	0.22
SFMF S2	7.5	7.9	7.4	7.6	7.6	0.20
SFMF S3	7.6	8.0	7.5	7.6	7.7	0.21
SFMF S4	7.5	7.8	7.4	7.5	7.5	0.18

Tal como indica la tabla anterior, se calcula un promedio simple entre los distintos valores obtenidos por medio de las diferentes ecuaciones. En el caso de los segmentos principales, se observa que los valores de terremoto máximo varían desde una magnitud Mw 6.1 para las fallas Bajo Molle y El Yolki, hasta Mw 7.7 para los segmentos 1 y 3 del SFMF.

4.3. Cálculo probabilista

A continuación se presentan los resultados obtenidos utilizando la metodología PSHA con los datos de ingreso detallados en la Tabla A5 del ANEXO en cada una de las zonas definidas. Se presentan como resultado final los mapas correspondientes a la PGA para los periodos de retorno de 475 años, 975 años y 2475 años. Se presentan además, los mapas del Coeficiente de Variación (COV) estimados a partir de la desviación estándar de los valores obtenidos con cada uno de los modelos de predicción de movimiento fuerte en relación al promedio del conjunto de resultados según la Ecuación 15.

$$COV = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Promedio}} \quad (15)$$

4.3.1. Zona Norte

4.3.1.1. Terremoto Característico

En las Figuras 10, 11 y 12 se muestran las aceleraciones esperadas considerando las 5 GMPE anteriormente mencionadas, para periodos de retorno (T_r) de 475, 975 y 2475 años respectivamente. Las aceleraciones representadas son los valores promedio de los obtenidos con cada uno de los GMPEs aplicados. Se puede apreciar como los altos valores se centran en las cercanías de las fallas, destacando los valores que se presentan en el sector norte, alrededor de las fallas Bajo Molle (en las cercanías de Iquique) y Pisagua (al norte de Iquique), en donde se alcanzan valores de PGA de 0.26g, 0.46g y 0.74g para 475, 975 y 2475 años de T_r respectivamente. Al observar los valores que se presentan en las cercanías de las principales ciudades nortinas, vemos que la ciudad de Iquique es la que se encuentra mayormente expuesta, superando los 0.1g en el periodo de retorno de 475 años.

Por otro lado, si observamos el valor de los coeficientes de variación para la zona se puede apreciar la predominancia de tonos verdes, lo que se traduce en bajos valores de COV, es decir, en una baja variabilidad entre los valores que proporciona cada modelo con respecto

al promedio. Esto viene a indicar que los resultados son bastante robustos. En términos generales, la distribución de los valores de COV en los 3 periodos de retorno considerados es similar, mostrando menores valores en las cercanías de las trazas de falla, aumentando levemente con la distancia y disminuyendo seguidamente.

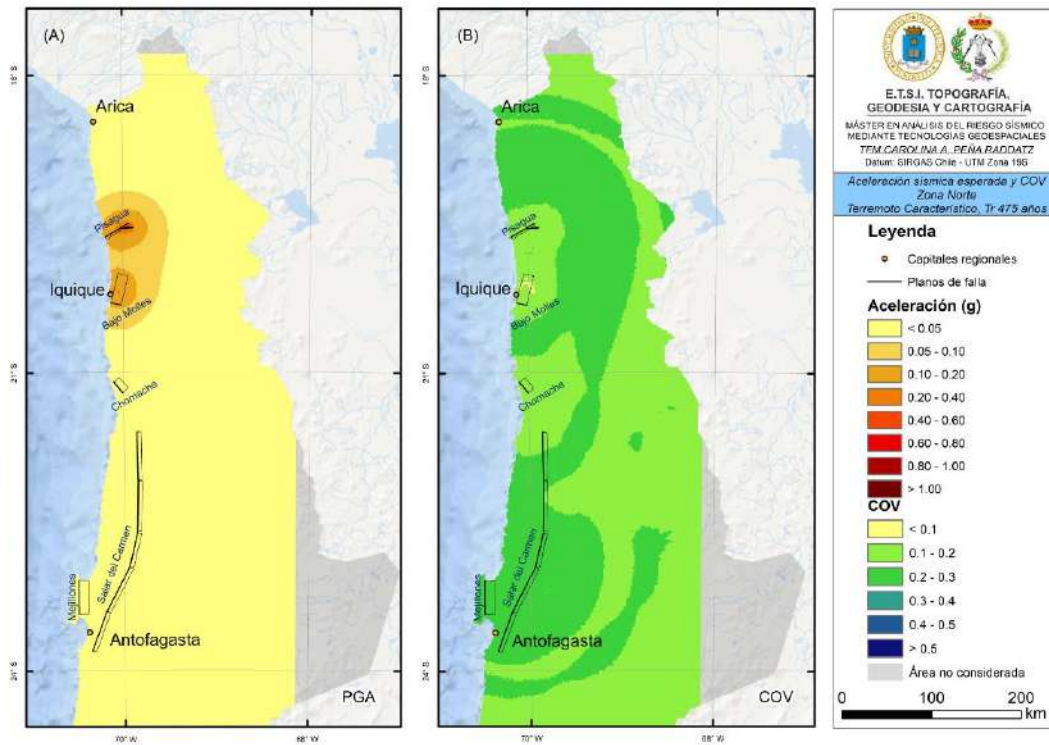


Figura 10. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

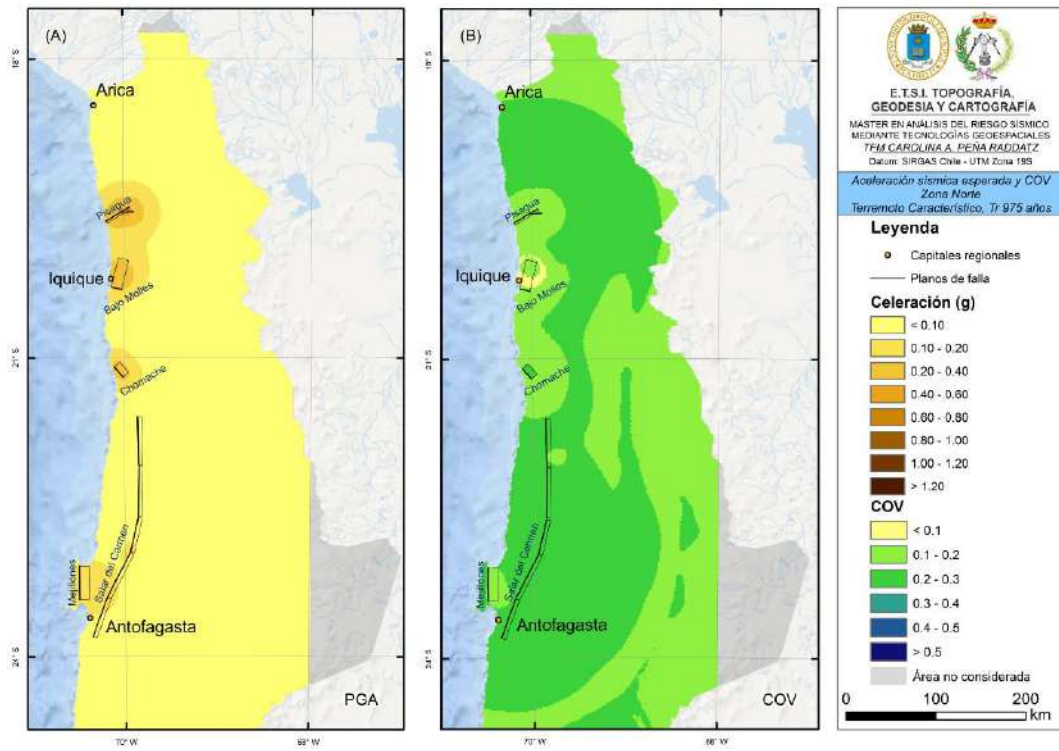


Figura 11. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV

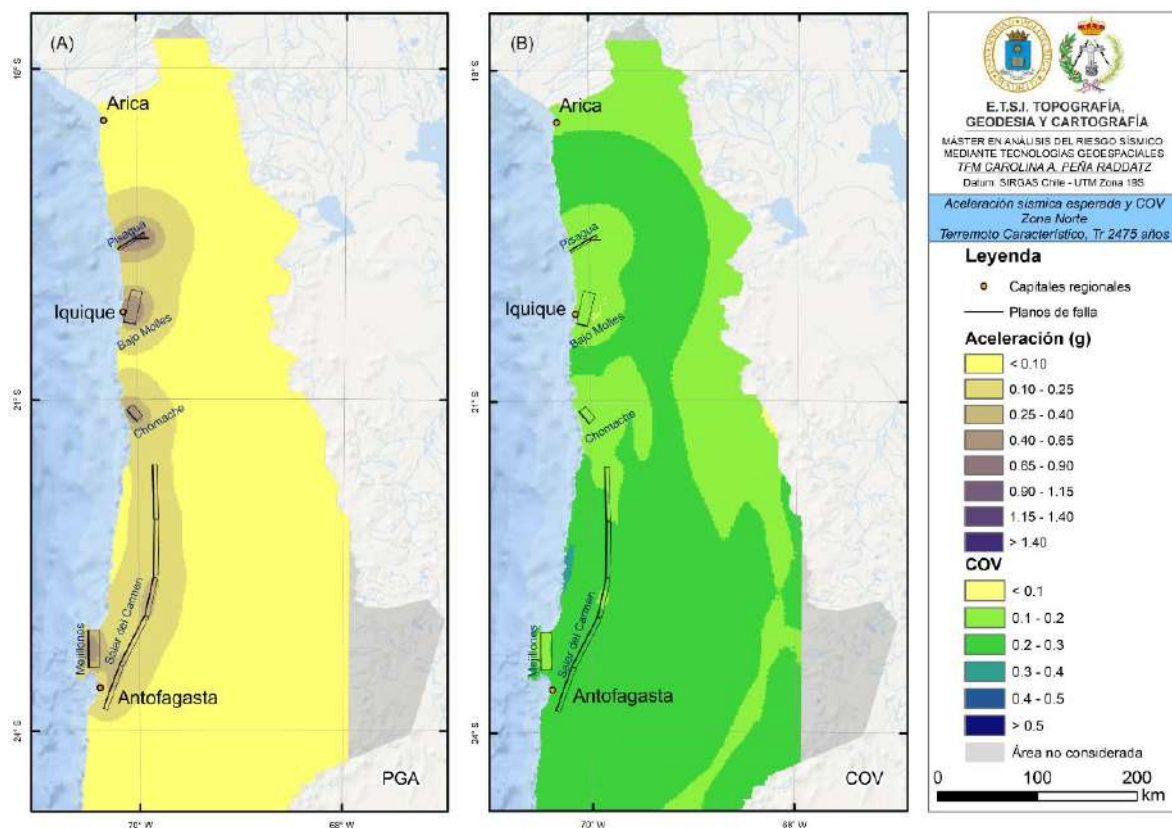


Figura 12. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV

4.3.1.2. Gutenberg-Richter

Los resultados obtenidos con este modelo para la Zona Norte se muestran en las Figuras 13, 14 y 15, correspondientes a los periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente. Las aceleraciones resultantes mediante este método son más altas que las estimadas por el método del Terremoto Característico, superando los valores de 0.5g de PGA para 475 años de periodo de retorno, 0.7g para Tr de 975 años y 1.0g para Tr 2475 años. Al igual que en el modelo de Terremoto Característico, las mayores aceleraciones se dan en las inmediaciones de la falla Pisagua, mientras que los segmentos de la falla Salar del Carmen son los que generan las menores aceleraciones. No obstante, en todas las trazas presentan altas aceleraciones. Las capitales regionales Iquique y Antofagasta están expuestas a sufrir aceleraciones considerables, ya que superan los 0.2g en el periodo de retorno de 475 años.

4. RESULTADOS

En cuanto a los coeficientes de variación COV, se observa que las variaciones son similares entre los diferentes Tr, al igual que en caso del modelo de Terremoto Característico. Los sectores en que los resultados son más consistentes (menores valores de COV) son las cercanías a la falla Pisagua y Mejillones, y los valores más variables se ubican unos 30 km al NE de la falla Bajo Molle.

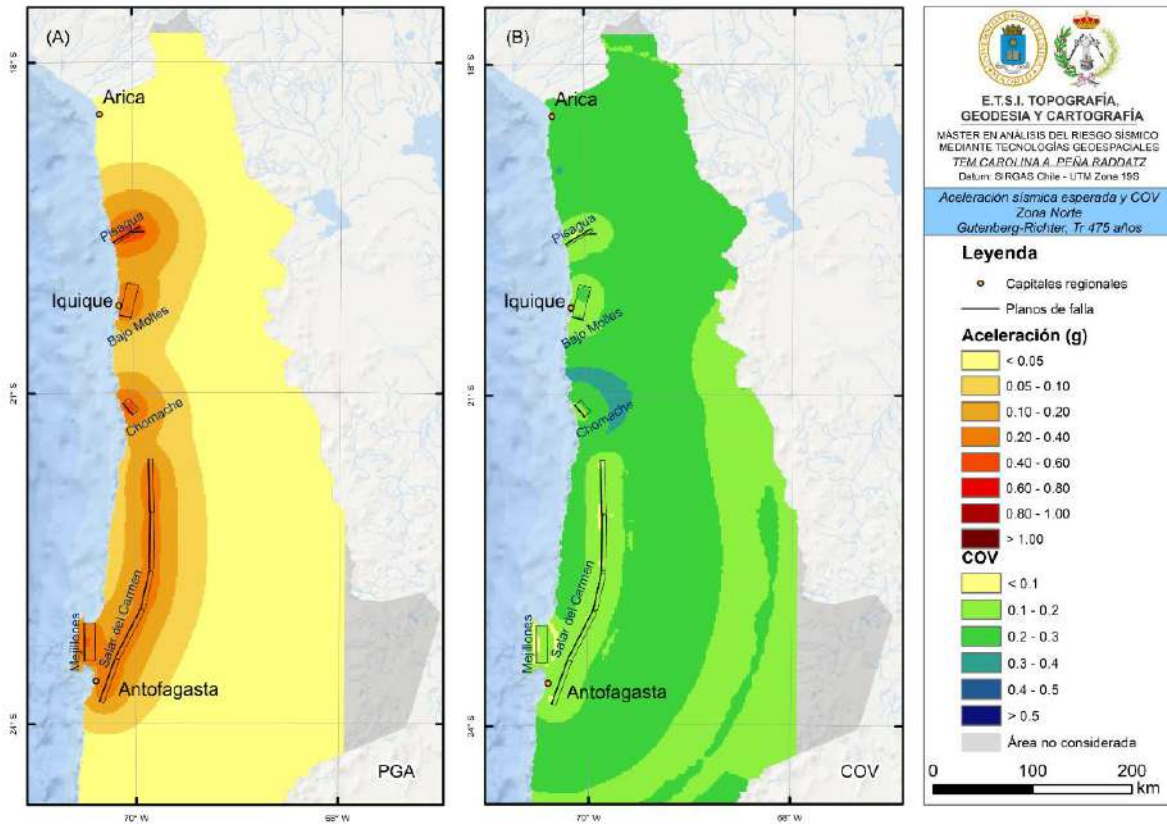


Figura 13. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

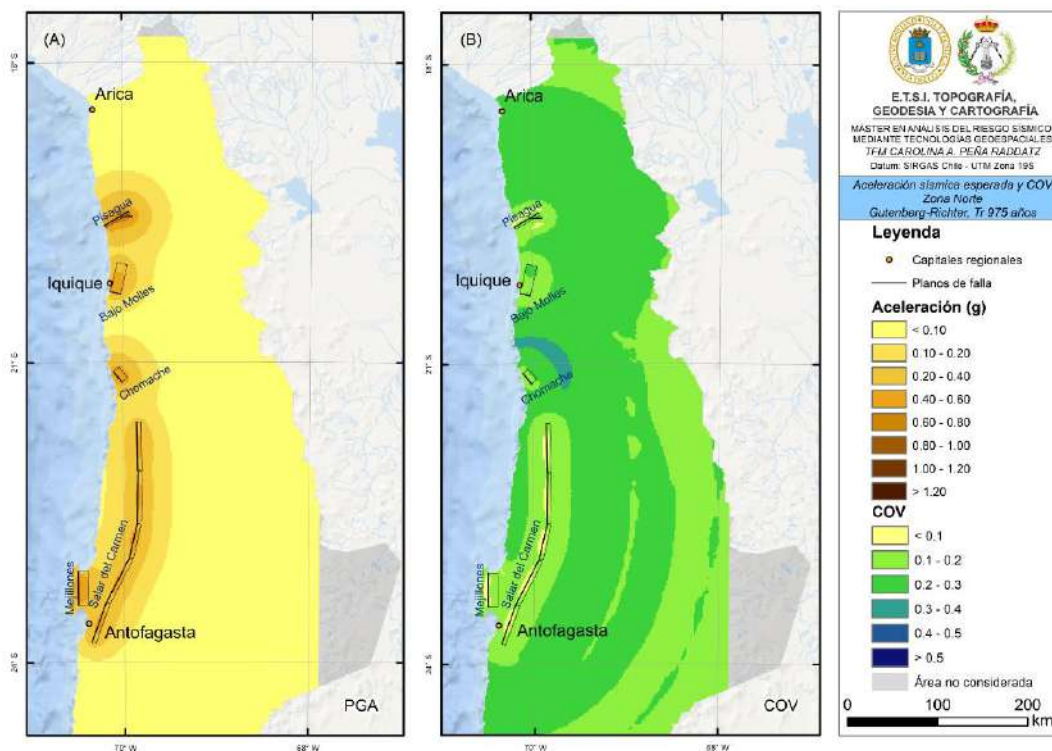


Figura 14. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

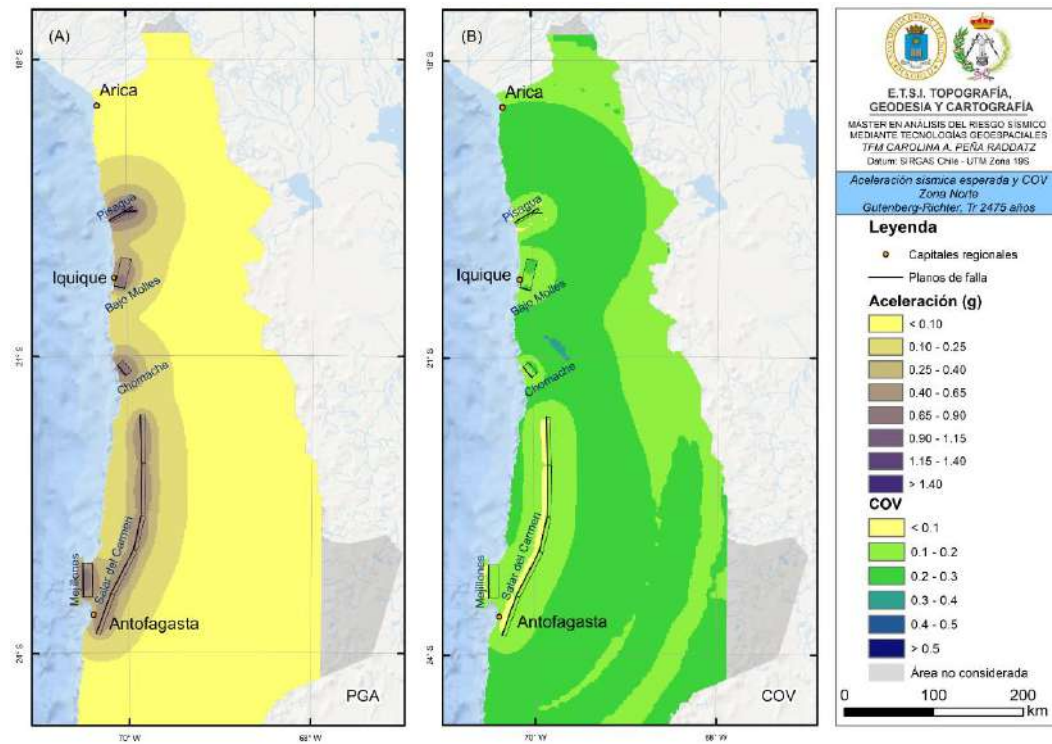


Figura 15. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Norte obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.2. Zona Central

4.3.2.1. Terremoto Característico

Las aceleraciones esperadas para la Zona Centro se concentran entorno a las fallas Pichilemu y San Ramón. Este modelo de recurrencia proporciona, para un periodo de 475 años, valores muy bajos de aceleración, cuyo máximo alcanzado en los alrededores de la falla Pichilemu no supera los 0.1g (Figura 16A). Para los periodos de retorno de 975 y 2475 años, las aceleraciones llegan a valores de 0.33g y 0.62g respectivamente (Figuras 17A y 18A). Las capitales regionales presentan aceleraciones despreciables, por debajo de los 0.1g, con excepción de Santiago. La capital del país se ubica en el área de influencia de la falla San Ramón, la cual puede generar un movimiento del suelo considerable para la ciudad, de hasta 0.25g en el centro de la ciudad para un Tr de 2475 años.

En relación a los valores de COV (Figuras 16B, 17B y 18B) estos presentan valores bajos, reflejando consistencia en las cercanías de ambas fallas. A medida que se aumenta la distancia desde la fuente, aumenta levemente el valor del COV, en especial en el área que rodea la falla San Ramón, donde se alcanza el rango 0.3-0.4 a una distancia de ~50 km (Figuras 17B y 18B).

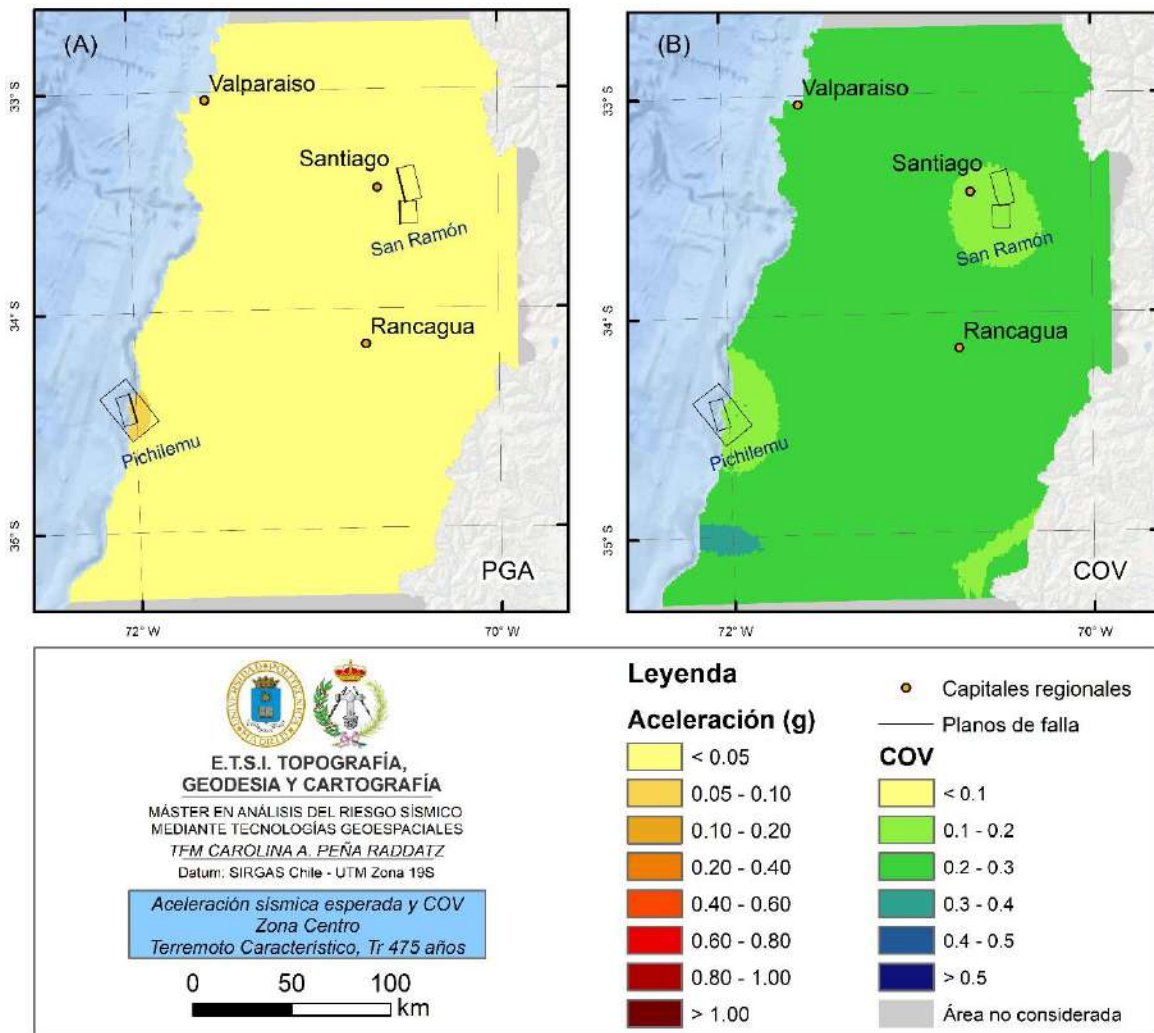


Figura 16. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

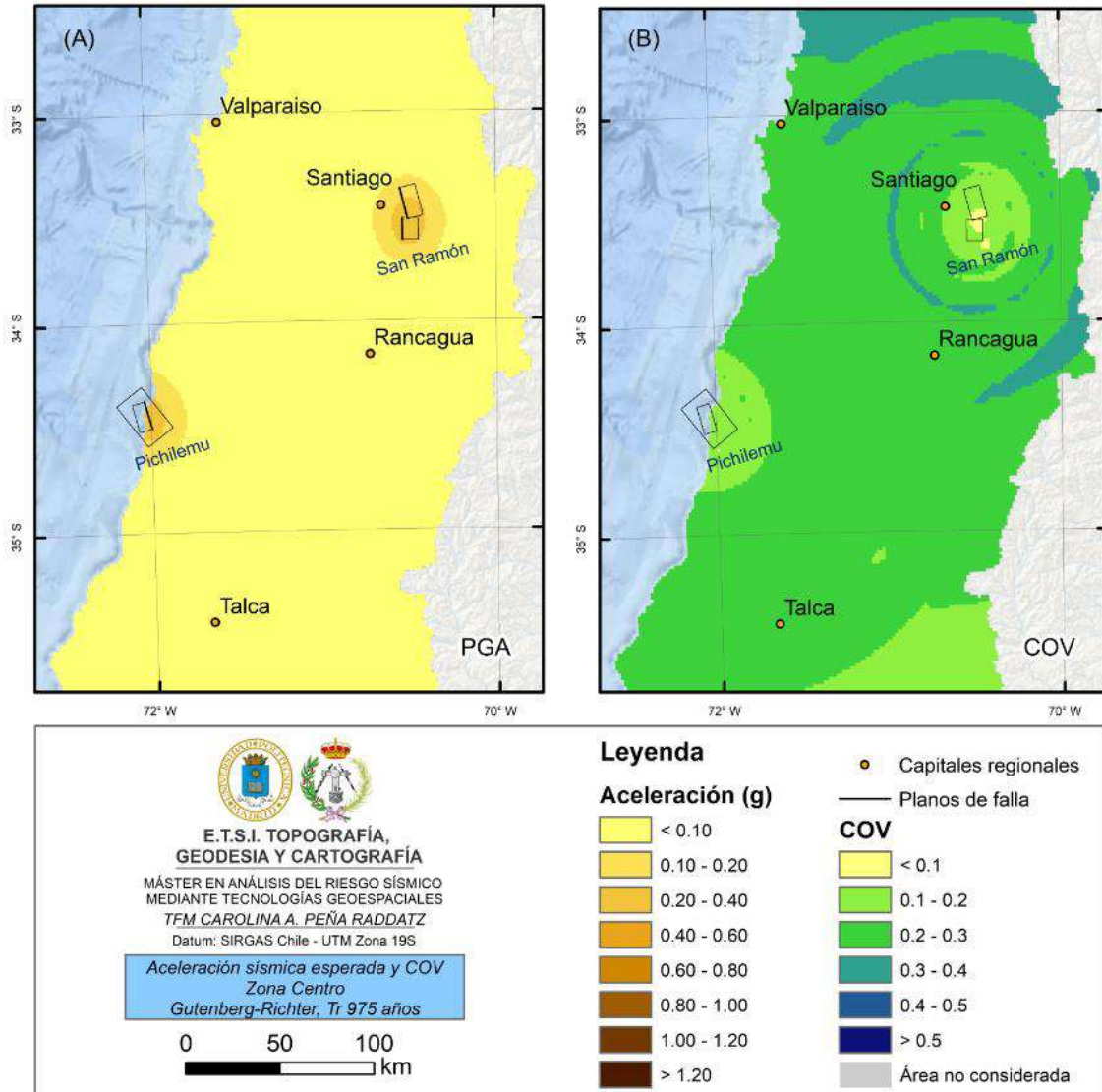


Figura 17. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

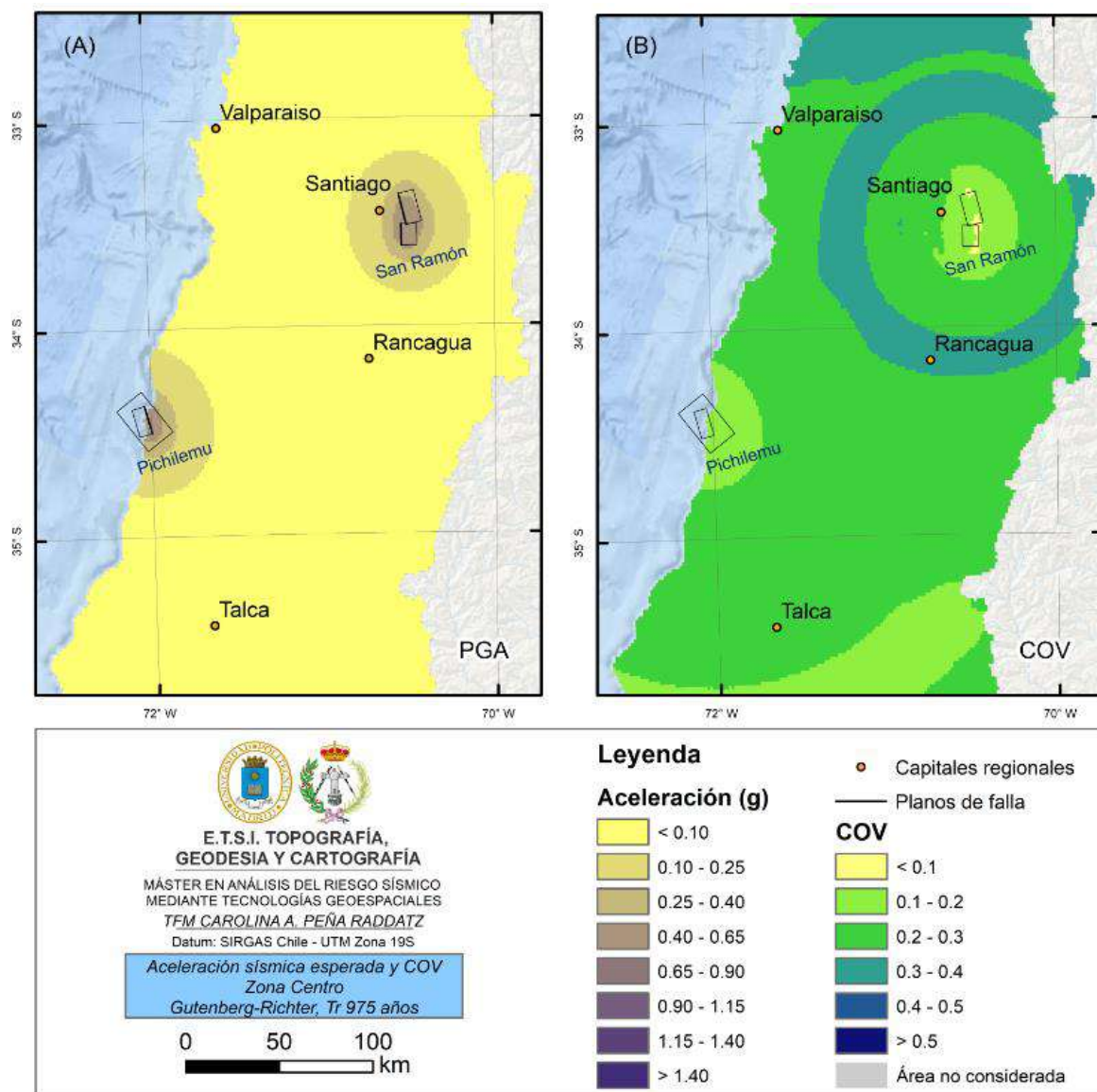


Figura 18. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.2.2. Gutenberg-Richter

Por medio de este modelo de recurrencia se obtienen aceleraciones PGA esperadas más altas que con el modelo de Terremoto Característico, siendo los valores máximos de 0.54g, 0.66g y 0.87g para Tr de 475, 975 y 2475 años respectivamente (Figuras 19A, 20A y 21A). Para la ciudad de Santiago, las aceleraciones que se alcanzan para un periodo de retorno de 475 años

4. RESULTADOS

son de alrededor de 0.2g. Al considerar los Tr de 975 y 2475 años, este valor asciende a 0.22g y 0.32g.

Las Figuras 19B, 20B y 21B muestran los valores de COV asociados a las aceleraciones antes descritas para cada periodo de retorno. En las 3 figuras se aprecian distribuciones similares con valores relativamente bajos, los cuales reflejan una buena consistencia de los datos especialmente en las cercanías de la falla San Ramón. Esta consistencia se va perdiendo con la distancia, llegando a valores del rango 0.3-0.4 en el sector Norte de la zona, destacando una distribución de estos valores de forma concéntrica a unos 50 km alrededor de la falla San Ramón.

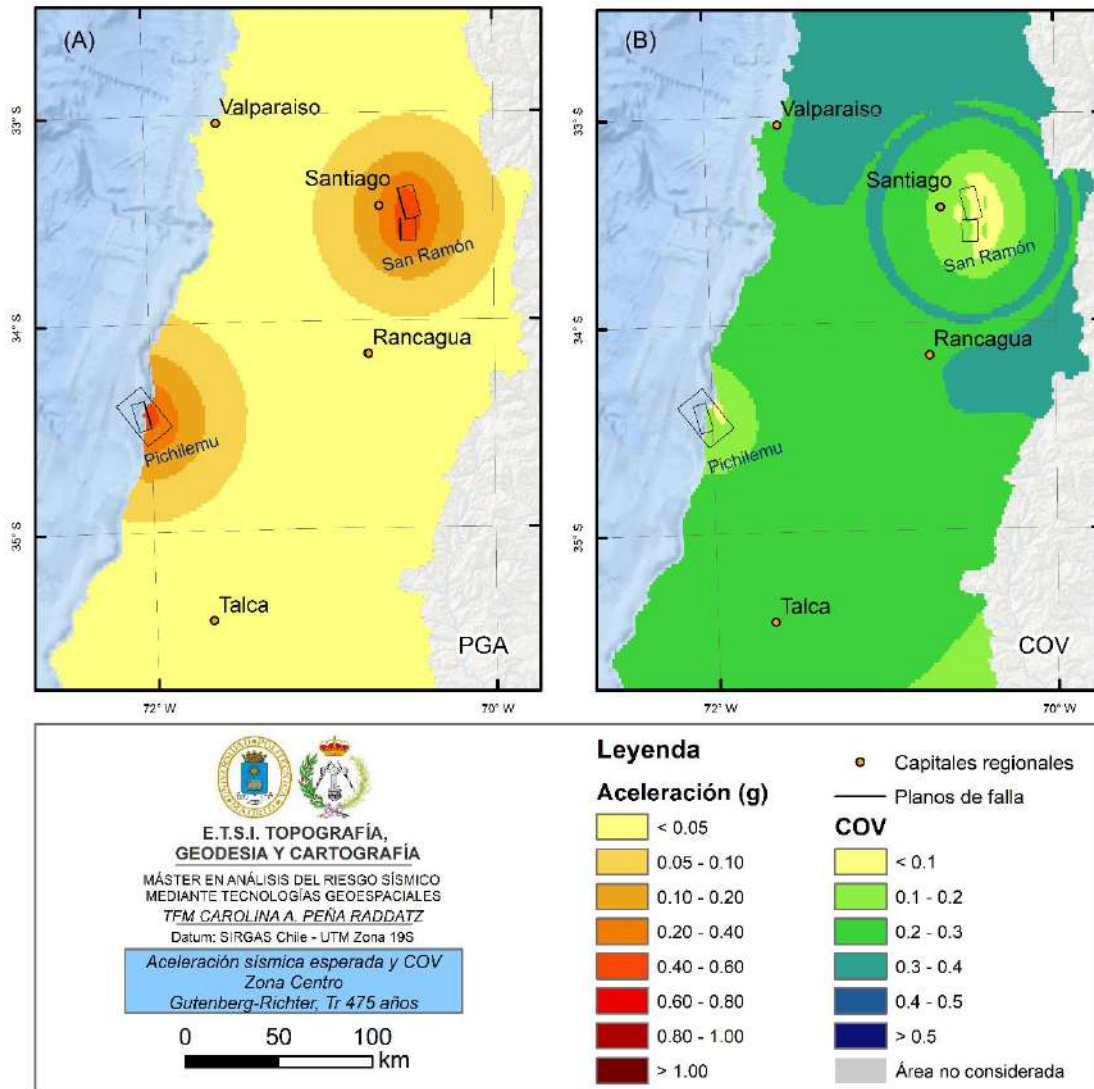


Figura 19. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

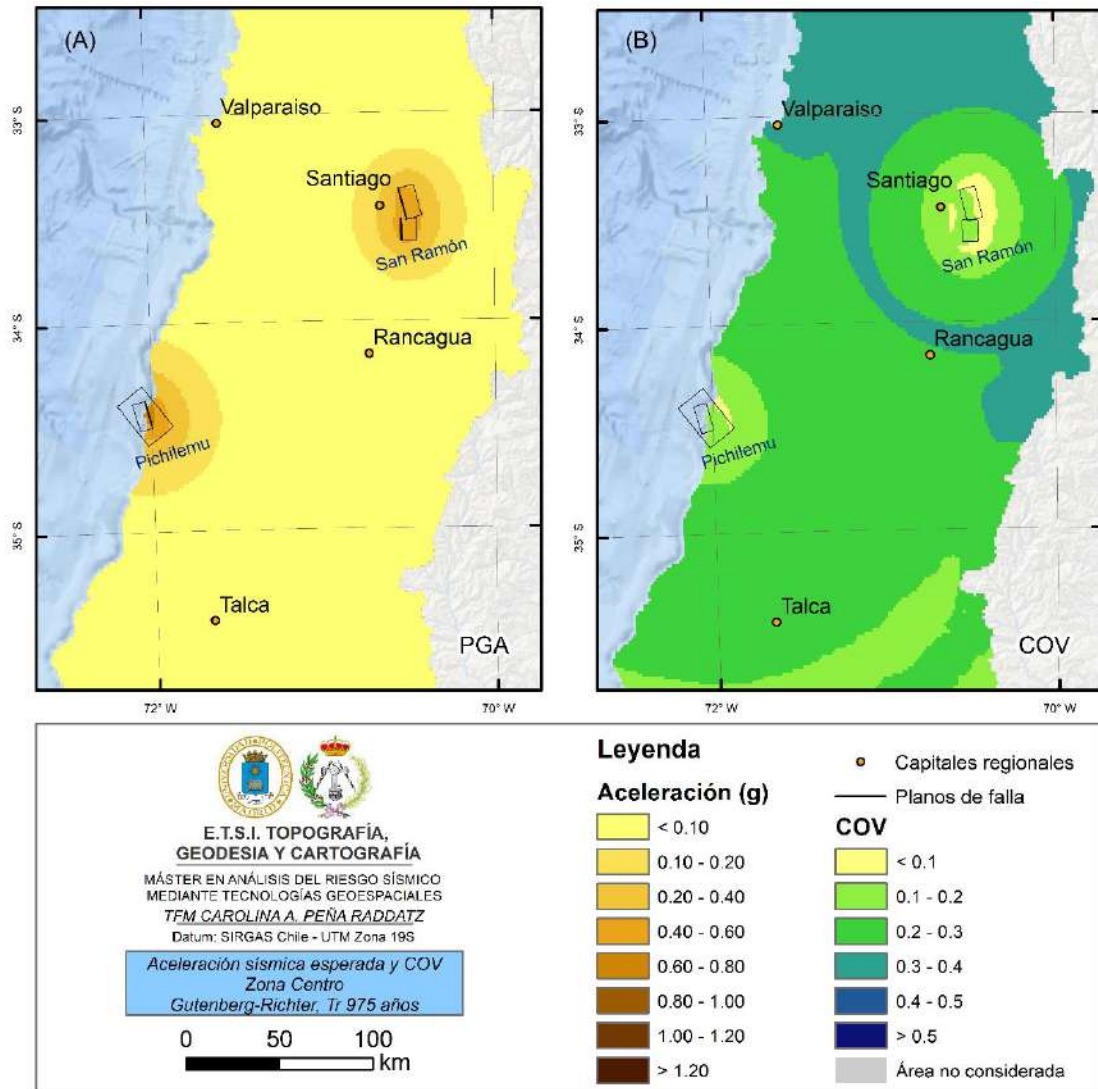


Figura 20. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

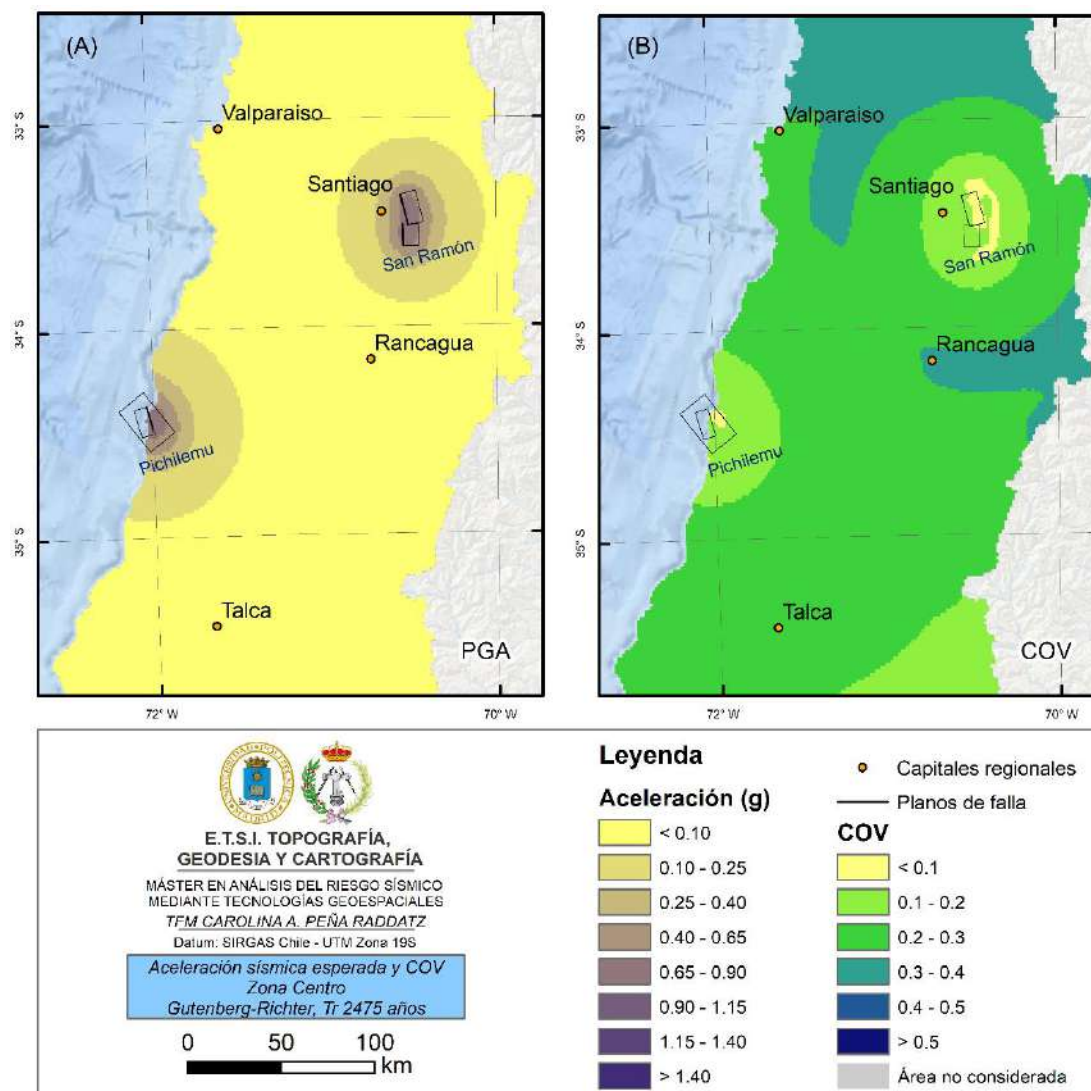


Figura 21. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Centro obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.3. Zona Sur

4.3.3.1. Terremoto Característico

Las Figuras 22, 23 y 24 muestran las aceleraciones esperadas para la Zona Sur, considerando periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años. Todos los segmentos de falla analizados se asocian a un mismo sistema de fallas, el SFLO, destacando 2 sectores en los cuales se han realizado estudios recientes (falla Liquiñe y sector al Suroeste de la localidad de Puerto

4. RESULTADOS

Aysén, cerca de los 46°S) en los cuales la información con la que se cuenta se condice con los mayores valores de aceleración obtenidos. Este sistema de fallas se asocia a grandes valores de aceleraciones. Para un periodo de retorno de 475 años las aceleraciones presentan un máximo de 1.1g hacia el Suroeste de la ciudad de Coyhaique, mientras que en el caso de Tr de 975 y 2475 años se sobrepasan los 1.3g y 1.5g respectivamente. Sin embargo, ninguna de las 4 capitales regionales ubicadas en la zona alcanza aceleraciones superiores a 0.1g en Tr de 475 años, llegando hasta 0.15g en Puerto Montt y Coyhaique en Tr de 975 y 2475 años.

Los coeficientes de variación de estos resultados, muestran gran consistencia entre sí, con predominancia de valores inferiores 0.3 para todos los periodos de retorno analizados. Las mayores diferencias se observan hacia el sector Sur de la zona, en especial para el Tr de 2475 años.

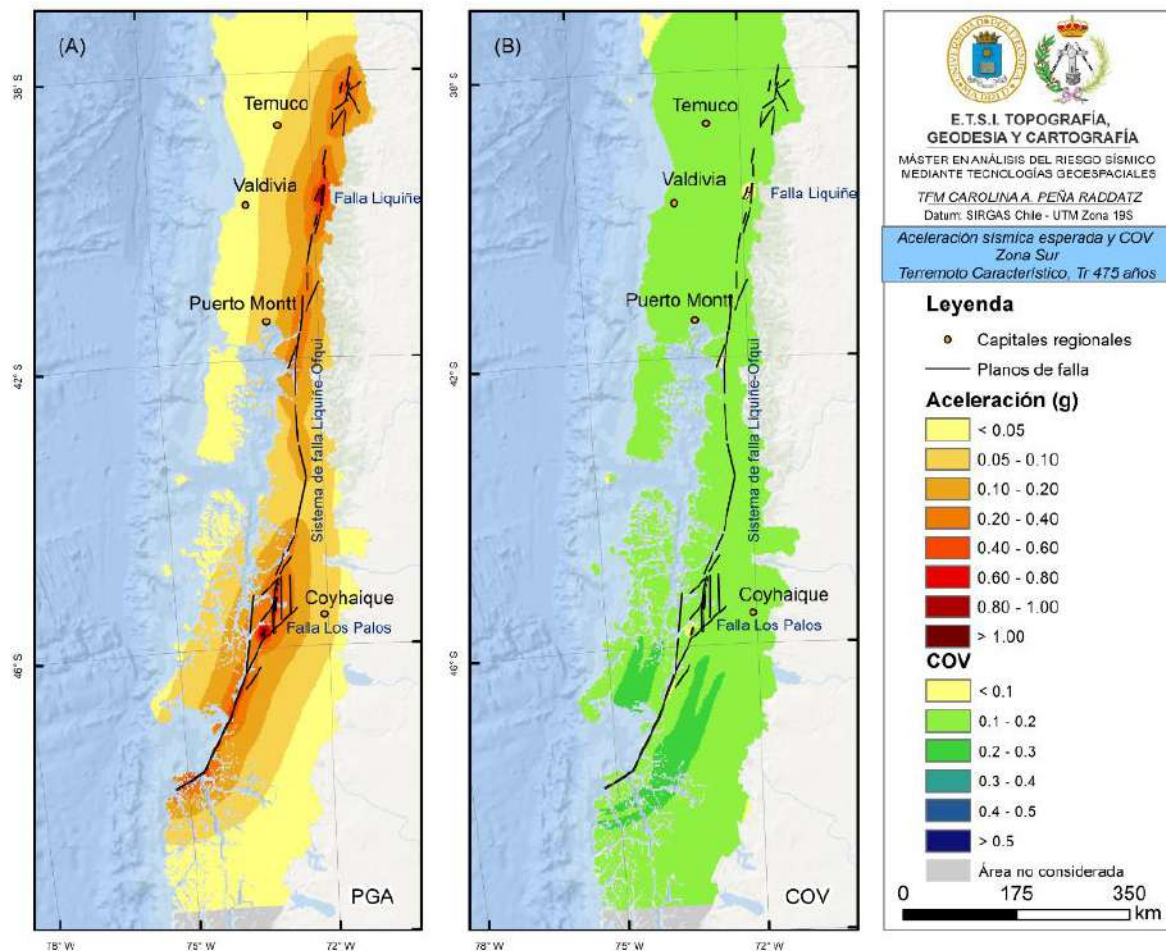


Figura 22. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

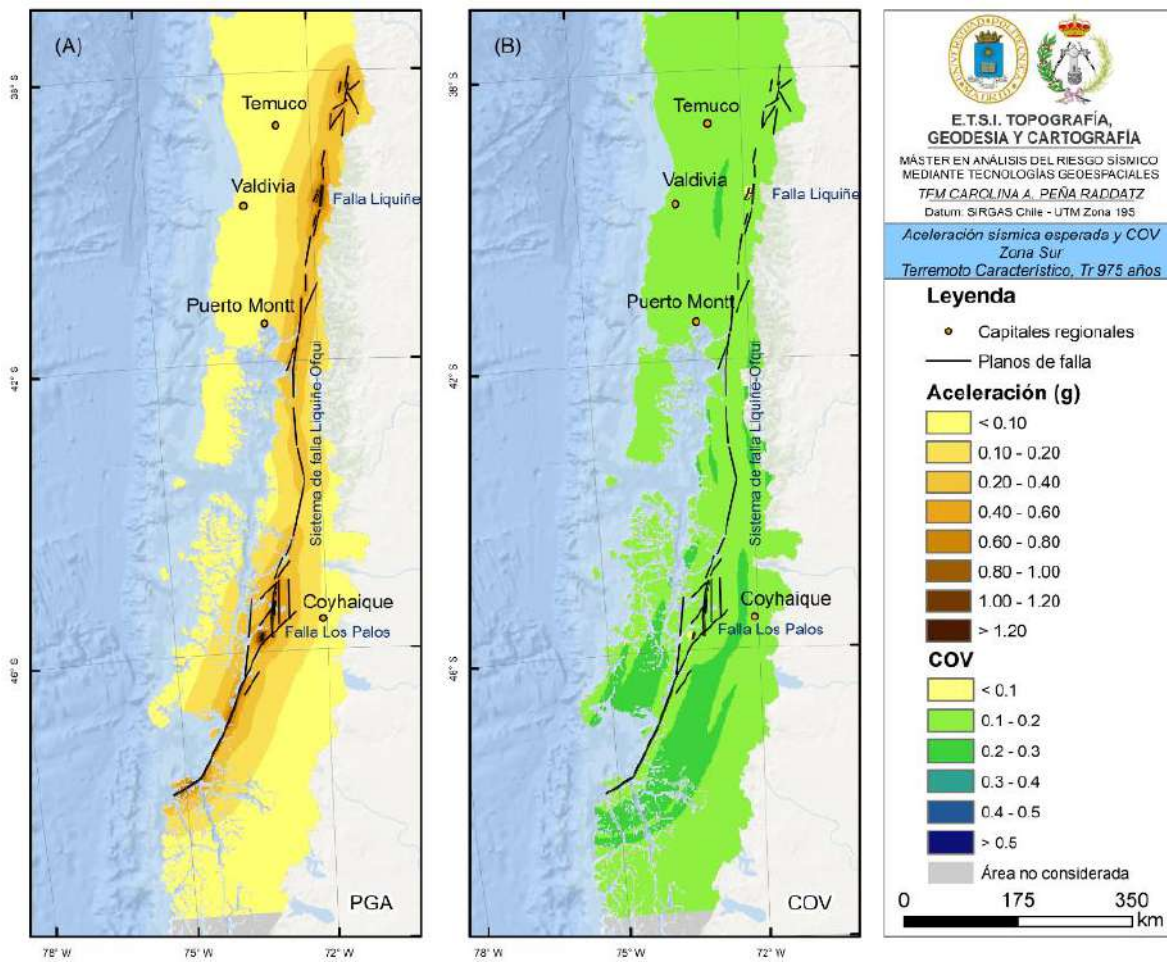


Figura 23. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

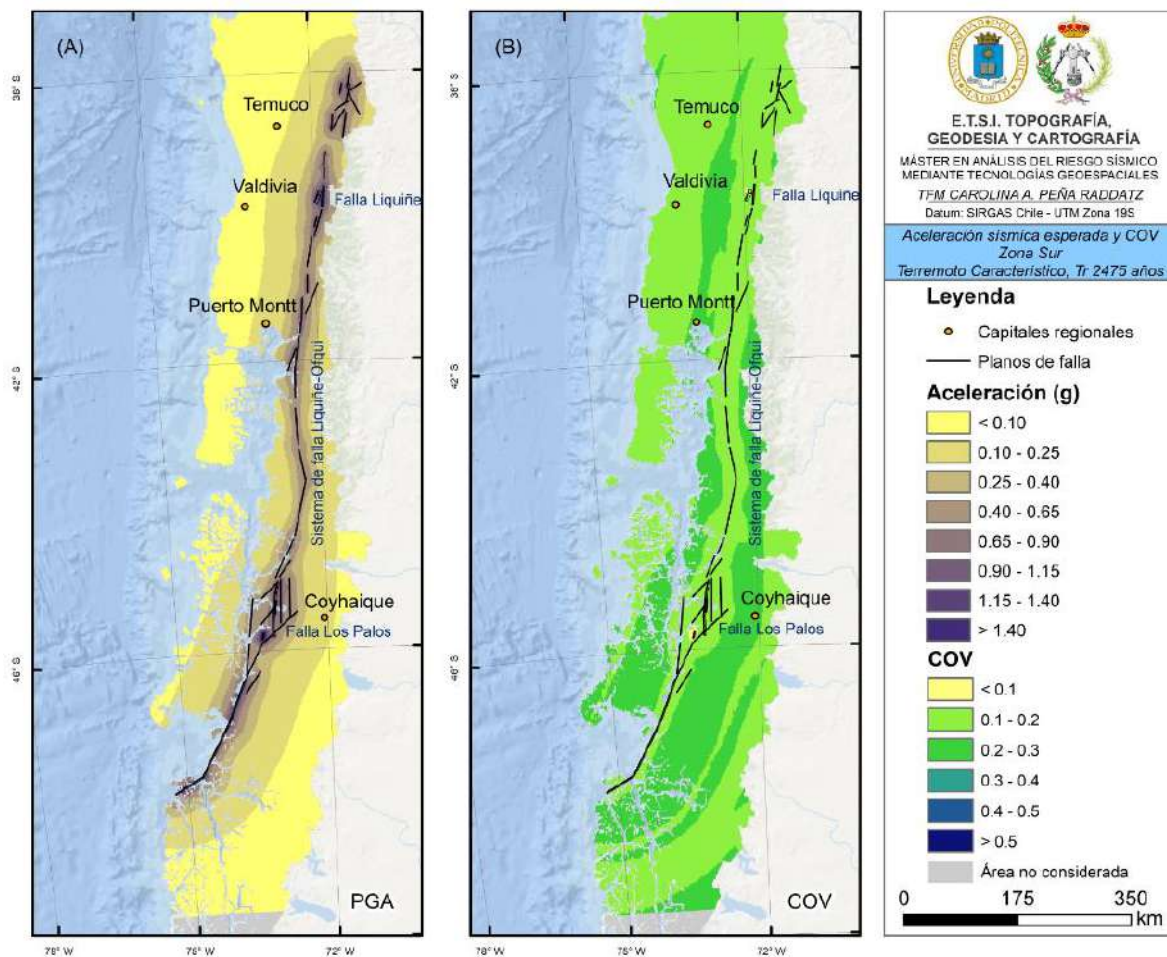


Figura 24. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.3.2. Gutenberg-Richter

Los valores de aceleración obtenidos por medio de este modelo son superiores a los estimados con el modelo anterior, de forma que se obtienen aceleraciones muy altas. Para un periodo de retorno de 475 años resulta una PGA máxima de 1.43g (Figura 25A), para 975 años de Tr la PGA alcanza un máximo de 1.67g (Figura 26A), mientras que para 2475 años el valor asciende hasta los 1.83g (Figura 27A). No obstante, se aprecia como las altas aceleraciones se concentran a cortas distancias desde las trazas de falla, atenuándose rápidamente a medida que aumenta la distancia a la fuente. En los 3 periodos de retorno, las

ciudades de Puerto Montt y Coyhaique se ven expuestas a aceleraciones superiores a los 0.1g, llegando a valores de 0.15g en el Tr de 2475 años.

Los valores de COV para estos periodos se muestran en las Figuras 25B, 26B y 27B. Al igual que los COV resultantes para Terremoto Característico, los valores se muestran consistentes, con poca desviación con respecto al valor promedio. Los valores se aprecian más consistentes en los alrededores de las trazas de falla, aumentando a partir de una distancia aproximada de 20 km.

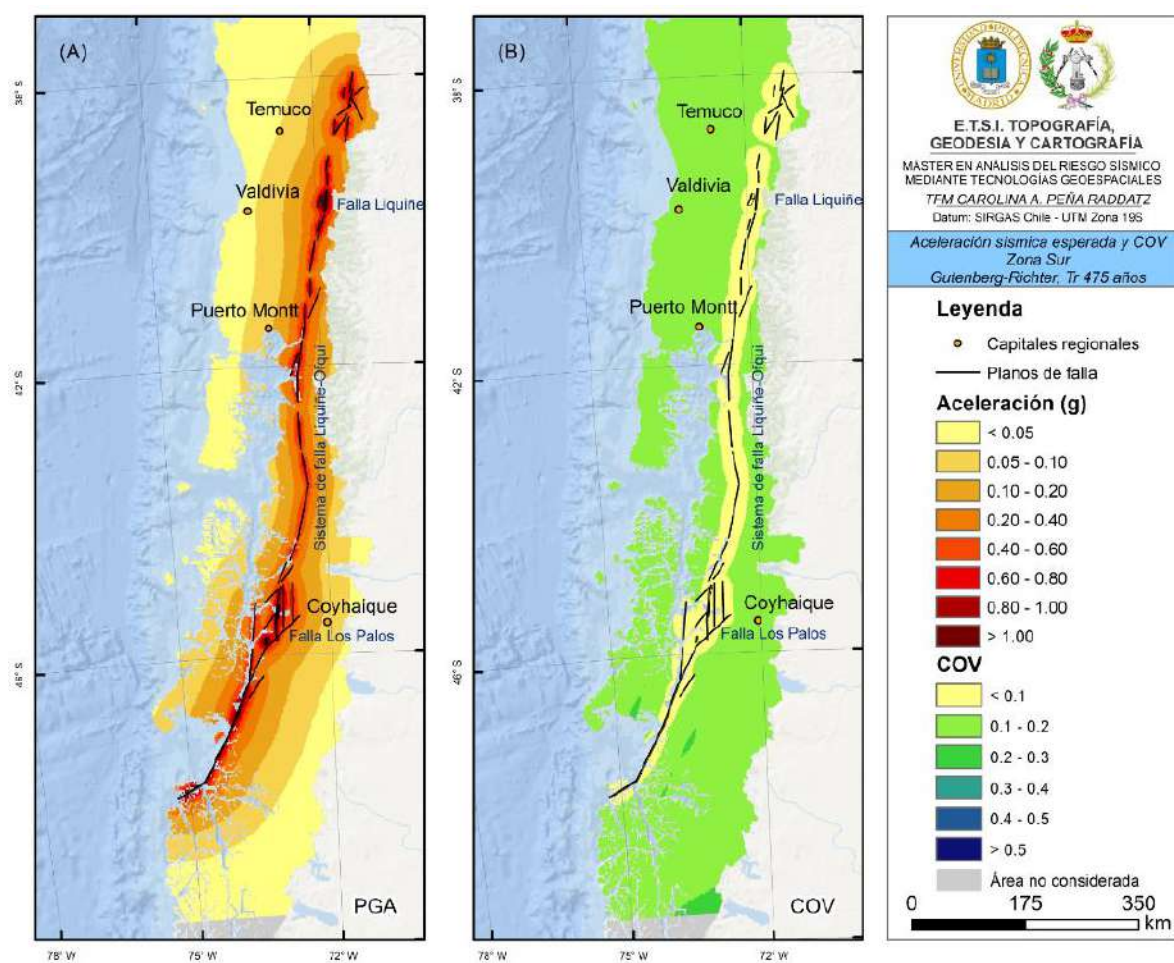


Figura 25. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

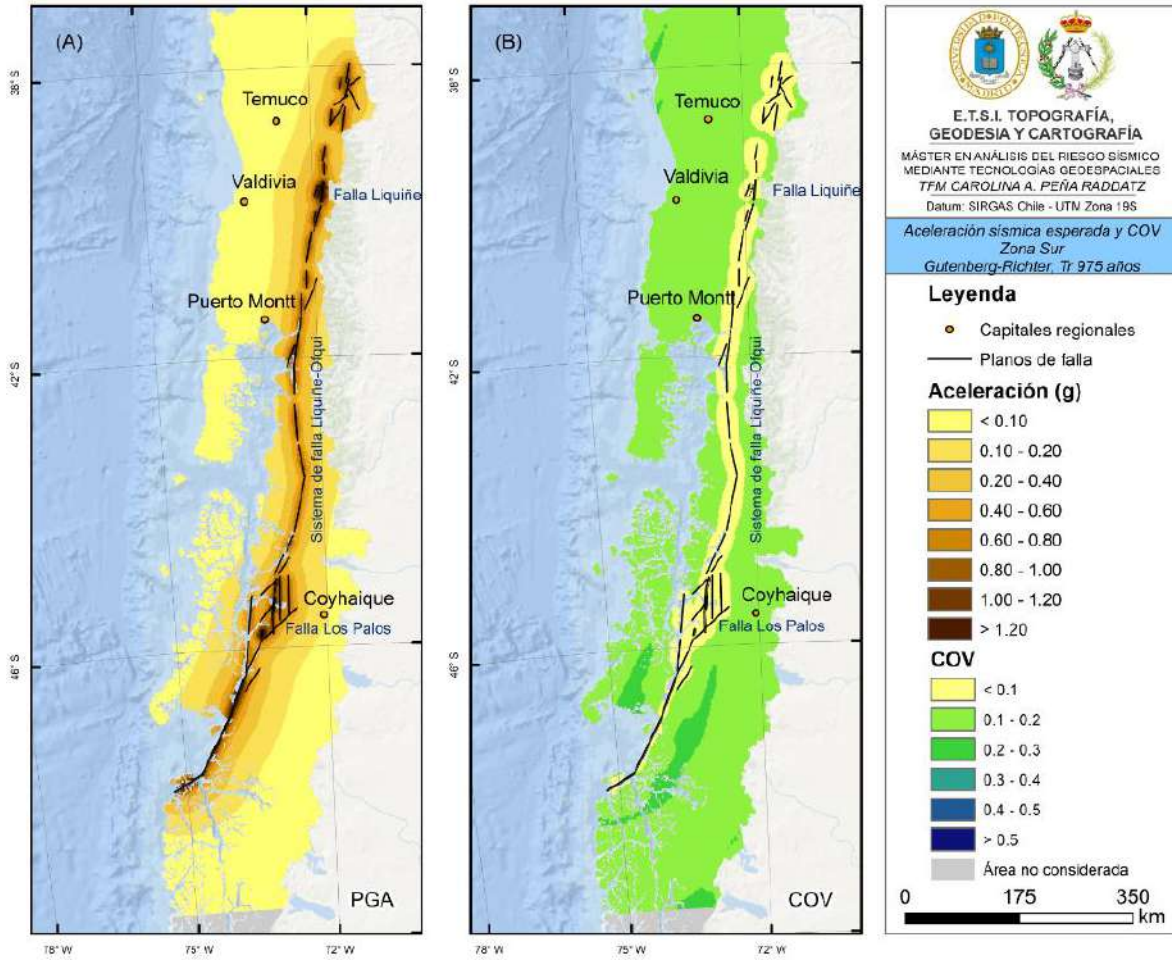


Figura 26. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

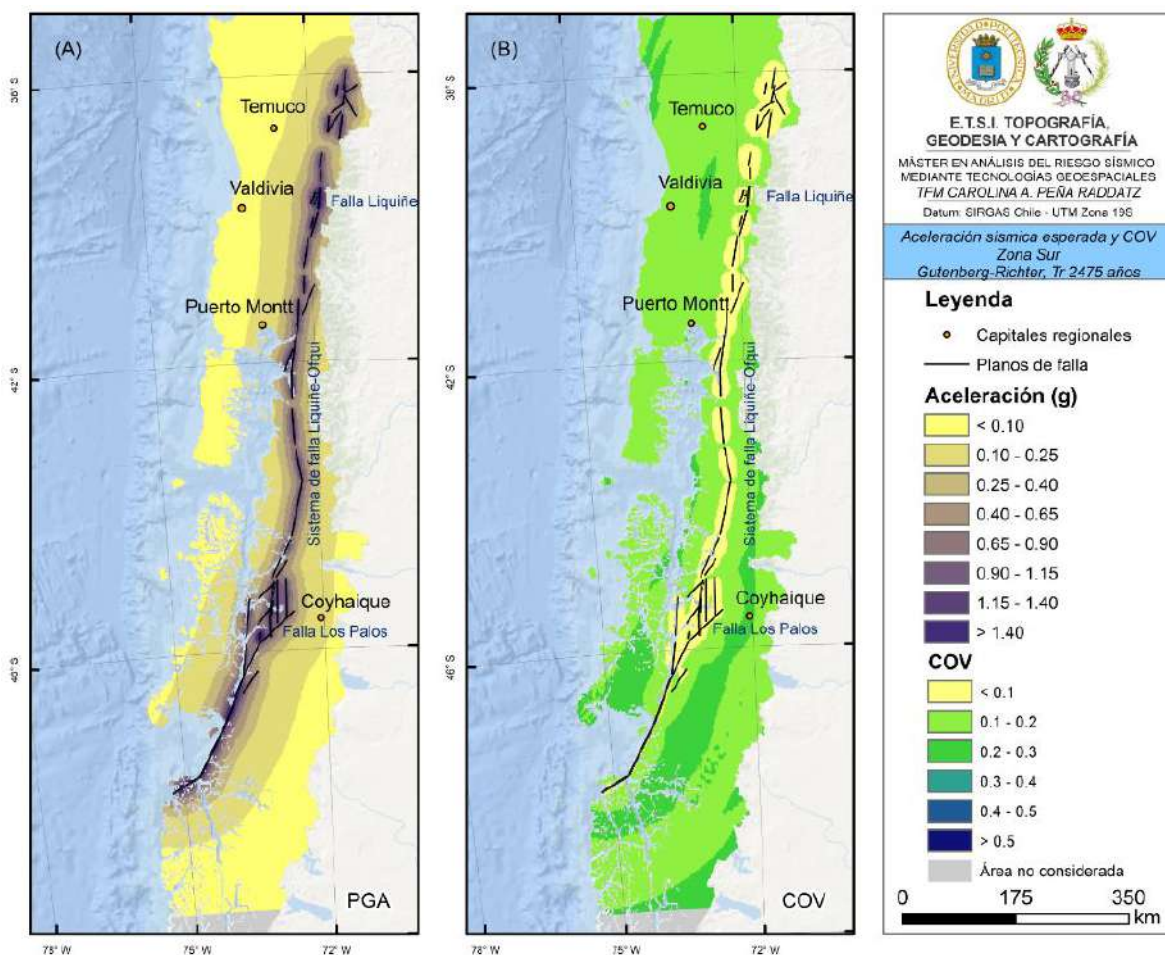


Figura 27. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona Sur obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.4. Zona de Magallanes

4.3.4.1. Terremoto Característico

En las Figuras 28A, 29A y 30A se observan aceleraciones esperadas considerando los segmentos de falla que conforman el SFMF. Se aprecian valores de aceleración máxima en las PGA de 0.4g, 0.6g y 0.9g para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente. Los mayores valores se concentran en las inmediaciones de las trazas de fallas, especialmente en aquellos sectores en los cuales se producen cruces de los segmentos. La ciudad más importante del sector, Punta Arenas, se ubica a una distancia suficiente como

4. RESULTADOS

para no presentar aceleraciones importantes, alcanzando apenas los 0.1g en el Tr de 2475 años.

Los coeficientes de variación asociados a estas aceleraciones se mantienen en valores bajos, variando principalmente entre 0.1 y 0.3 (Figuras 28B, 29B y 30B). Hacia el Norte los valores se observan más consistentes, aumentando ligeramente las variaciones hacia el sector Sur, lo cual se observa claramente en la Figura 30B.

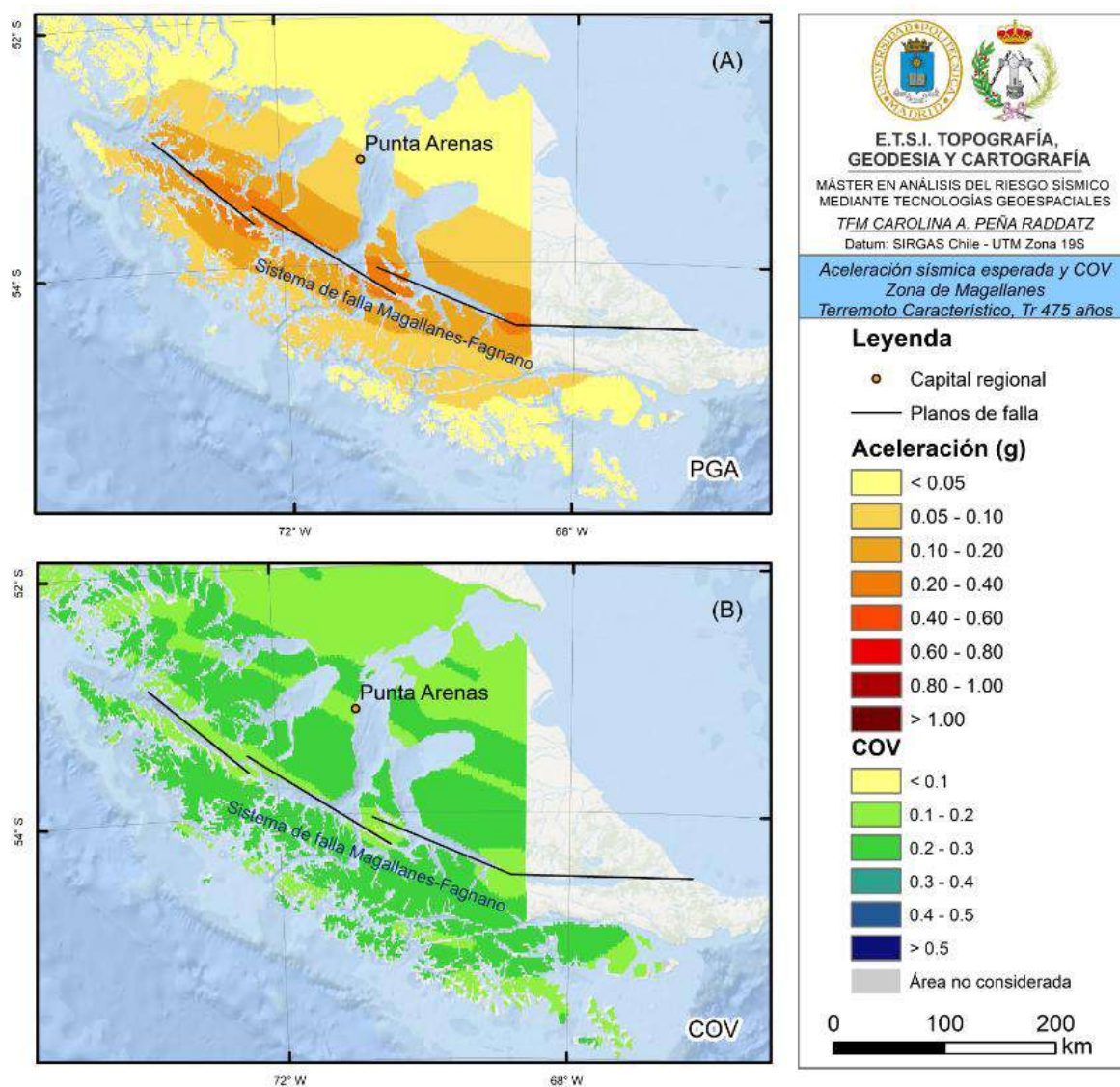


Figura 28. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

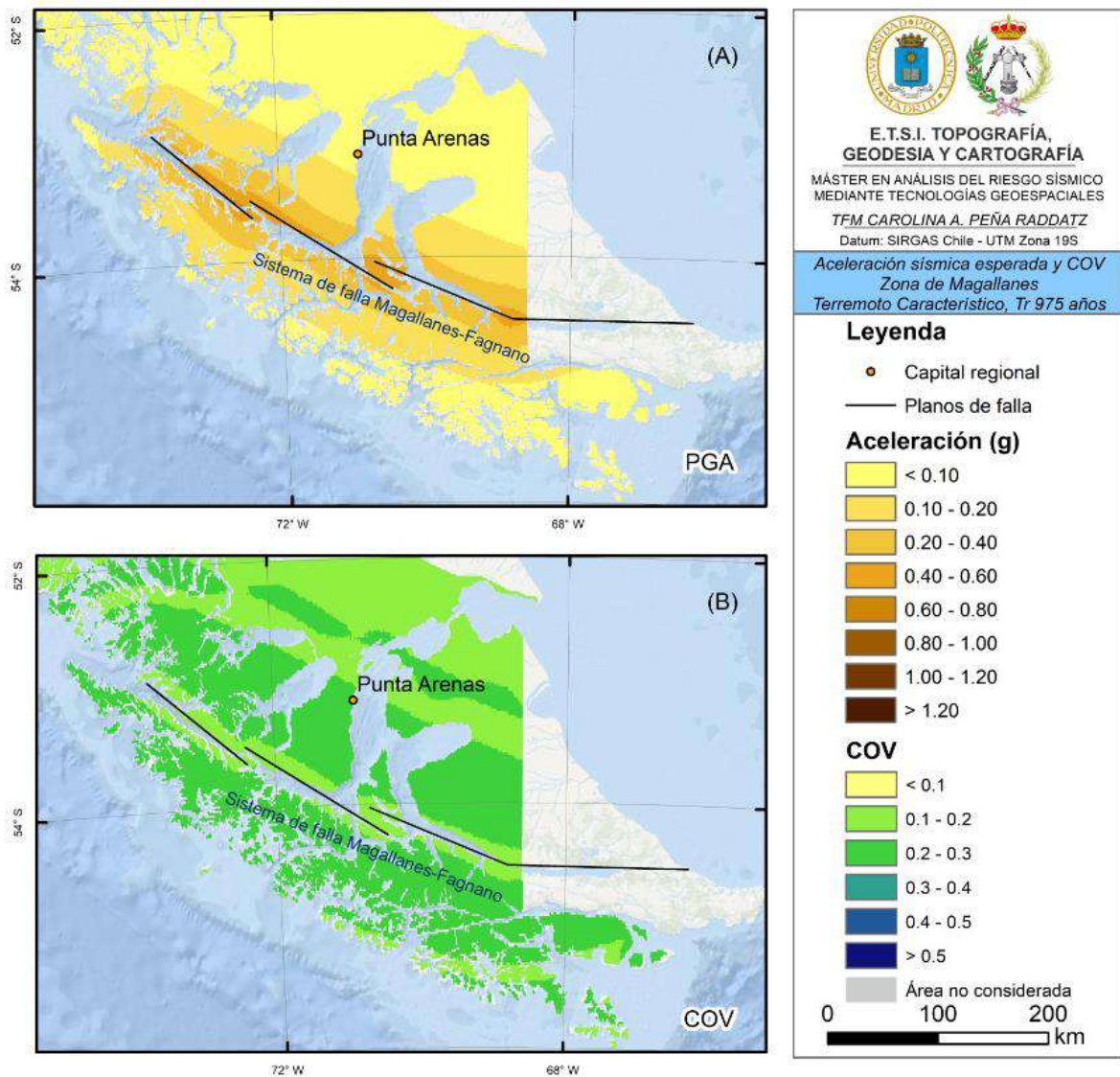


Figura 29. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

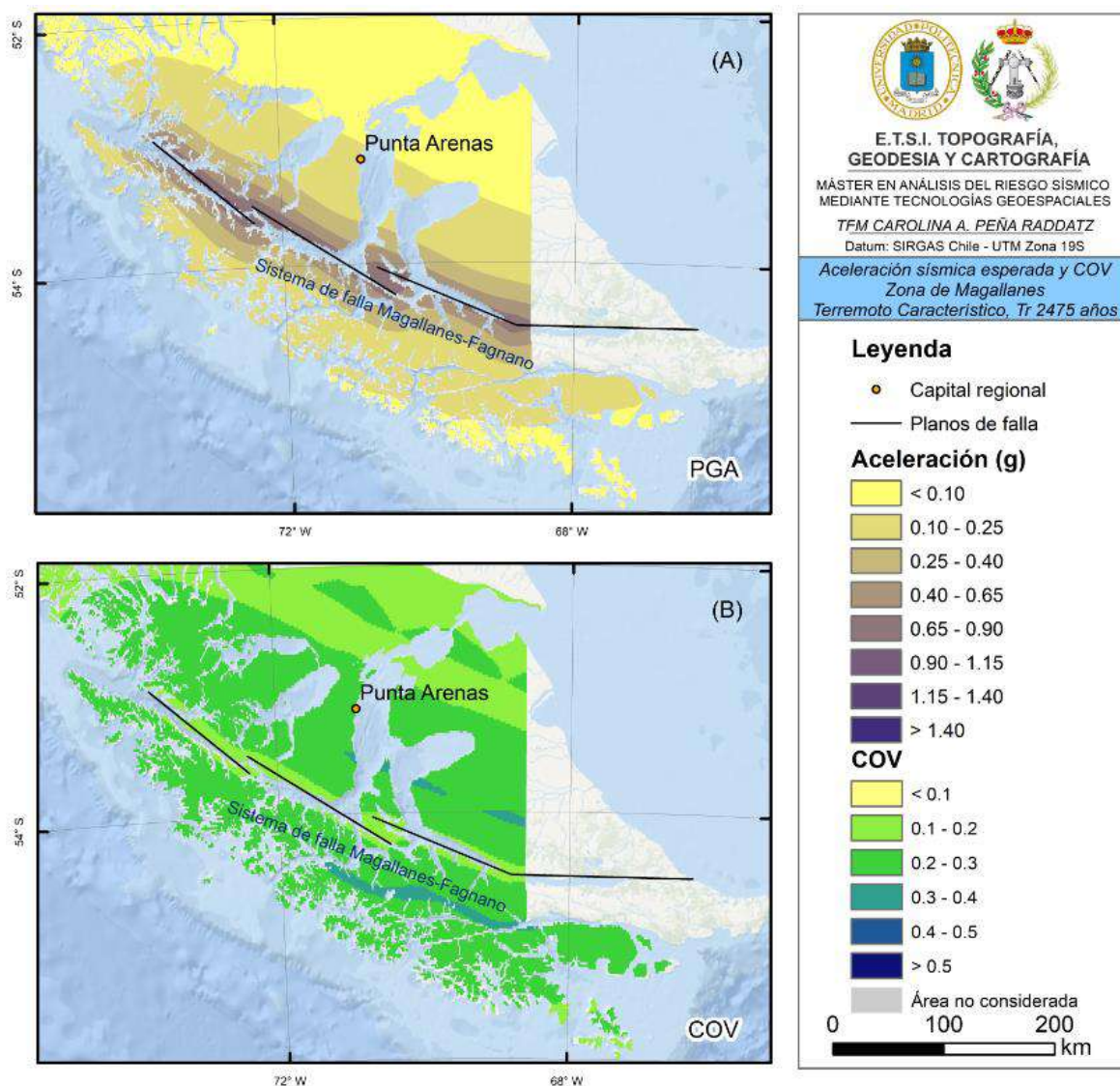


Figura 30. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

4.3.4.2. Gutenberg-Richter

Este modelo proporciona valores de aceleraciones más altos, alcanzando la PGA máxima esperada un valor cercano a 1.0g para Tr de 475 años (Figura 31A), llegando a valores de 1.2g y 1.5g para periodos de retorno de 975 y 2475 años respectivamente (Figuras 32A y 33A). Estos valores se distribuyen de forma similar a los obtenidos mediante el modelo de Terremoto Característico, concentrándose los altos valores en las cercanías de las trazas de la falla y disminuyendo con la distancia. No obstante, en las Figuras 32A y 33A se aprecia

que para la ciudad de Punta Arenas se podrían esperar aceleraciones en torno a los 0.1g, a pesar de ubicarse a más de 80 km de la traza de falla.

En relación al coeficiente de variación, sus valores y distribución (Figuras 31B, 32B y 33B) muestran una baja variación de los distintos resultados con respecto al promedio. Los valores más consistentes se concentran en los alrededores de las trazas de falla, mientras que los valores más altos, correspondientes al rango 0.3-0.4, se presentan al aumentar la distancia a la fuente.

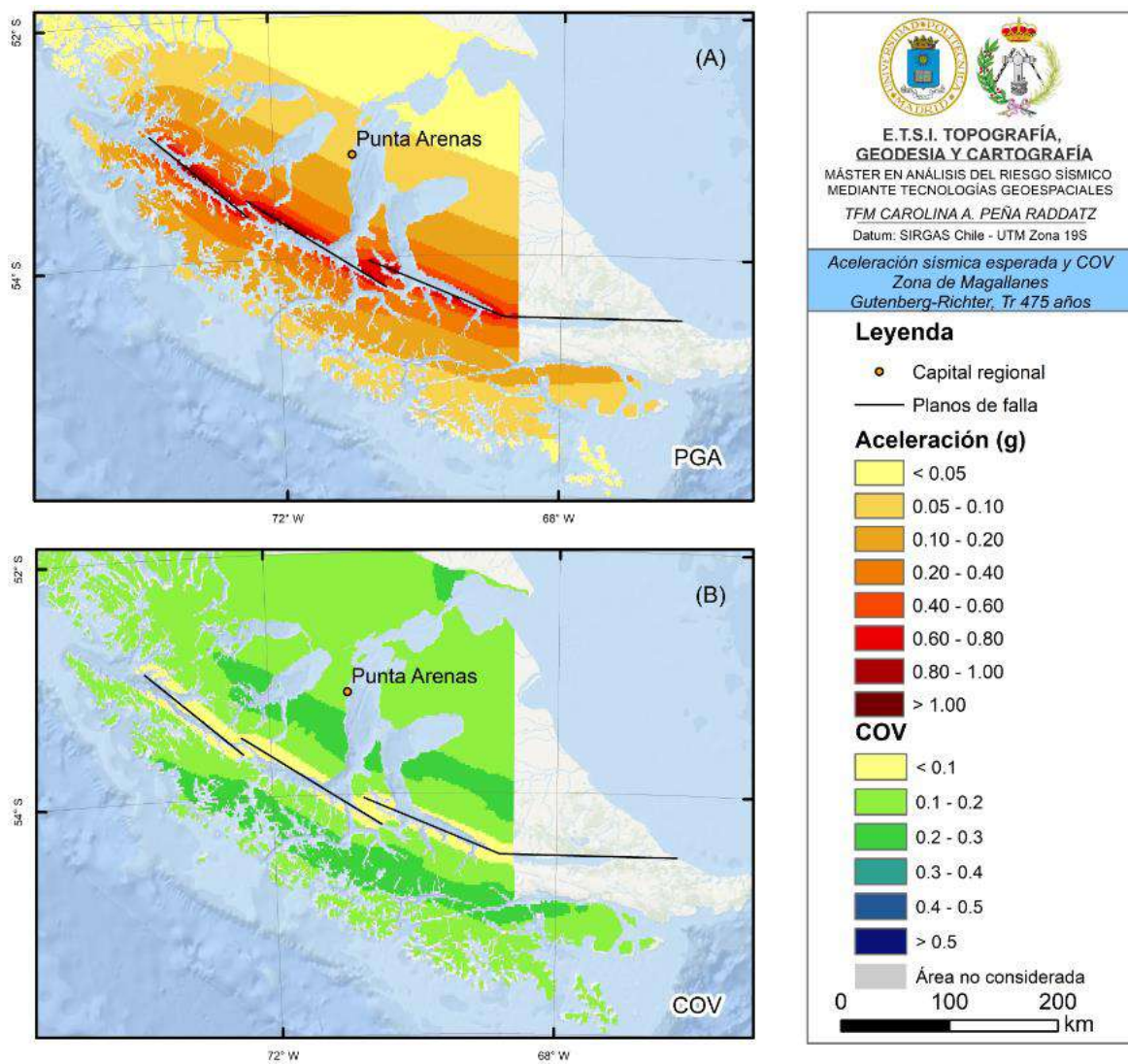


Figura 31. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años. (A) PGA. (B) COV.

4. RESULTADOS

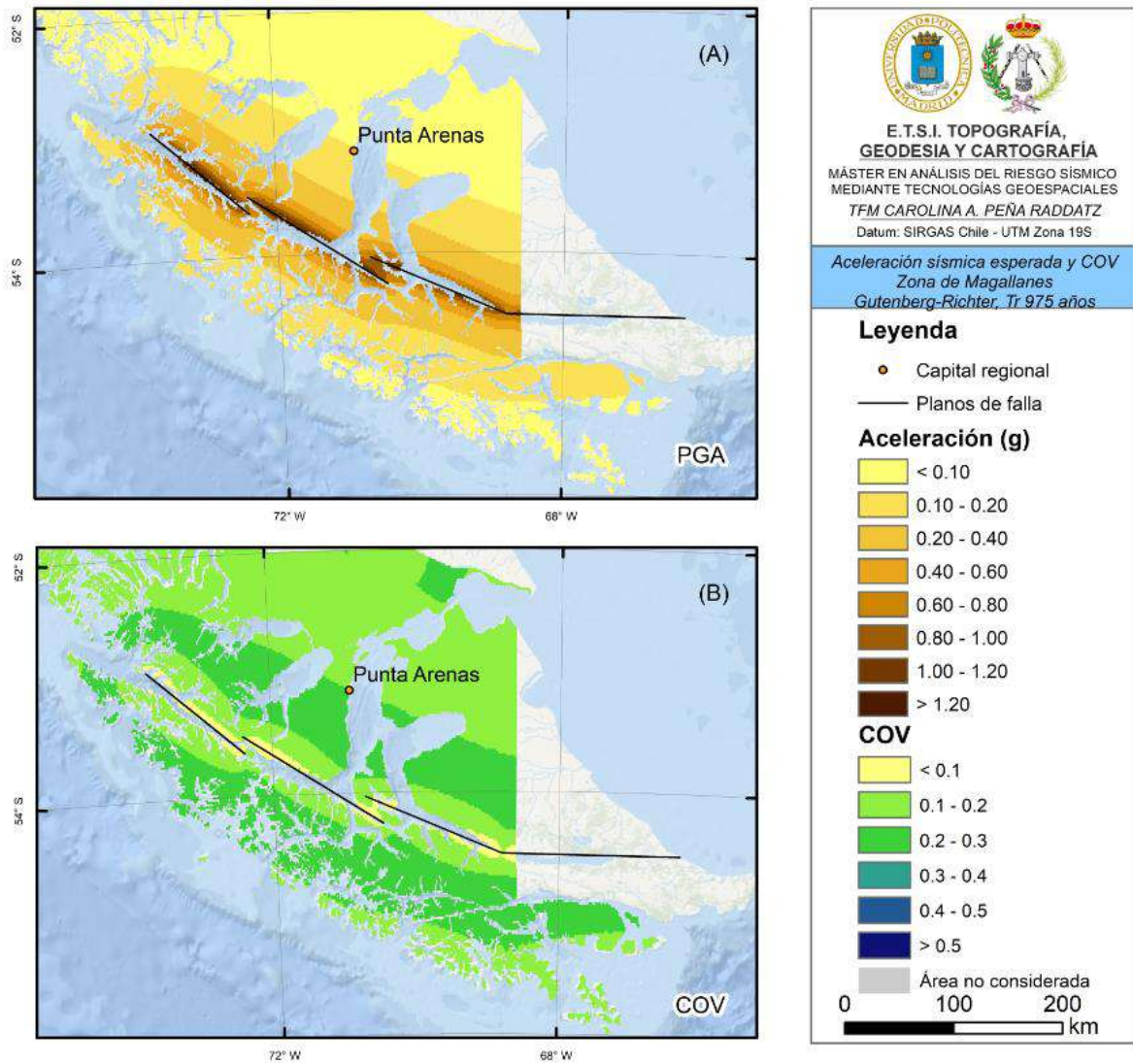


Figura 32. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 975 años. (A) PGA. (B) COV.

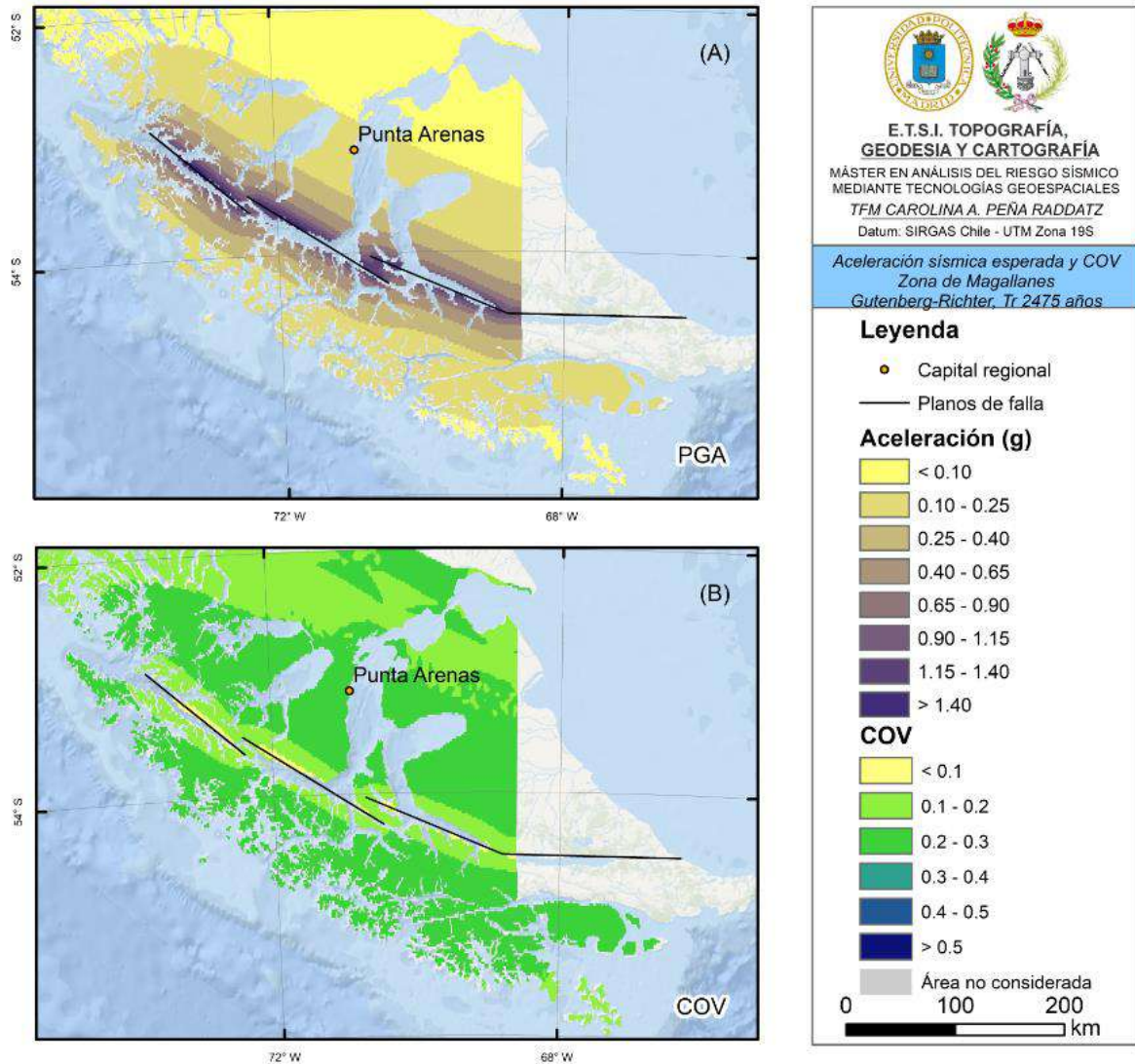


Figura 33. Aceleraciones sísmicas esperadas y COV para la Zona de Magallanes obtenidas mediante modelo Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 2475 años. (A) PGA. (B) COV.

La Tabla 10 resume los valores máximos de PGA que se obtuvieron para cada zona según el modelo de recurrencia utilizado. Destaca la diferencia de los valores de aceleración de la Zona Sur, que son considerablemente mayores en comparación al resto de las zonas. Por su lado, las menores aceleraciones se obtienen para las zonas Norte y Centro.

4. RESULTADOS

Tabla 10. Valores máximos de PGA obtenidos mediante el método probabilista para las diferentes zonas analizadas. ZN: Zona Norte, ZC: Zona Centro, ZS: Zona Sur, ZM: Zona de Magallanes.

Zona - Modelo de recurrencia	Valor máximo PGA (g)		
	Tr 475	Tr 975	Tr 2475
ZN Terremoto Característico	0.26	0.45	0.73
ZN Gutenberg-Richter	0.57	0.76	1.02
ZC Terremoto Característico	0.08	0.33	0.62
ZC Gutenberg-Richter	0.54	0.66	0.87
ZS Terremoto Característico	1.14	1.38	1.56
ZS Gutenberg-Richter	1.43	1.67	1.83
ZM Terremoto Característico	0.38	0.62	0.94
ZM Gutenberg-Richter	0.99	1.25	1.49

4.4. Cálculo determinista

A continuación se presentan los resultados de los 7 escenarios sísmicos escogidos, cuya peligrosidad sísmica se estima mediante una metodología determinista. La Tabla 11 muestra los parámetros definidos para cada escenario.

Tabla 11. Parámetros definidos para cada escenario sísmico. S1: segmento 1, S2: segmento 2.

Nombre Falla	Zona	Magnitud (Mw)	Buzamiento	Rake	Hipocentro		
					Latitud	Longitud	Profundidad (km)
Bajo Molle	N	7.00	31°	90°	-20.15	-70.09	10
Mejillones	N	7.00	65°	-90°	-23.36	-70.45	10
San Ramón completa	C	7.50	45°	90°	-33.45	-70.44	10
San Ramón S1	C	6.40	55°	90°	-33.45	-70.44	10
San Ramón S2	C	6.10	55°	90°	-33.54	-70.46	10
Los Palos	S	7.00	90°	-180°	-45.40	-72.70	5
Magallanes	M	7.50	90°	180°	-53.81	-71.62	10

4.4.1. Falla Bajo Molle

Esta falla inversa se ubica en los límites de las comunas de Alto Hospicio e Iquique, siendo esta última la capital de la Región de Tarapacá. La Figura 34 muestra la aceleración sísmica esperada en el caso de ocurrir un evento de magnitud Mw 7.0 a 10 km de profundidad, la

estrella marca la posición del epicentro. Al igual que los resultados del método probabilista, las aceleraciones representadas corresponden a los valores promedio de los distintos GMPEs. El valor de PGA máximo es de 0.66g en las cercanías de la falla, mientras que en el centro de la ciudad de Iquique la PGA tendría un valor de 0.5g. Si se considera la ordenada espectral de largo periodo (1.0s) se aprecian valores máximos que alcanzan los 0.49g, y un valor 0.34g en las inmediaciones de la ciudad.

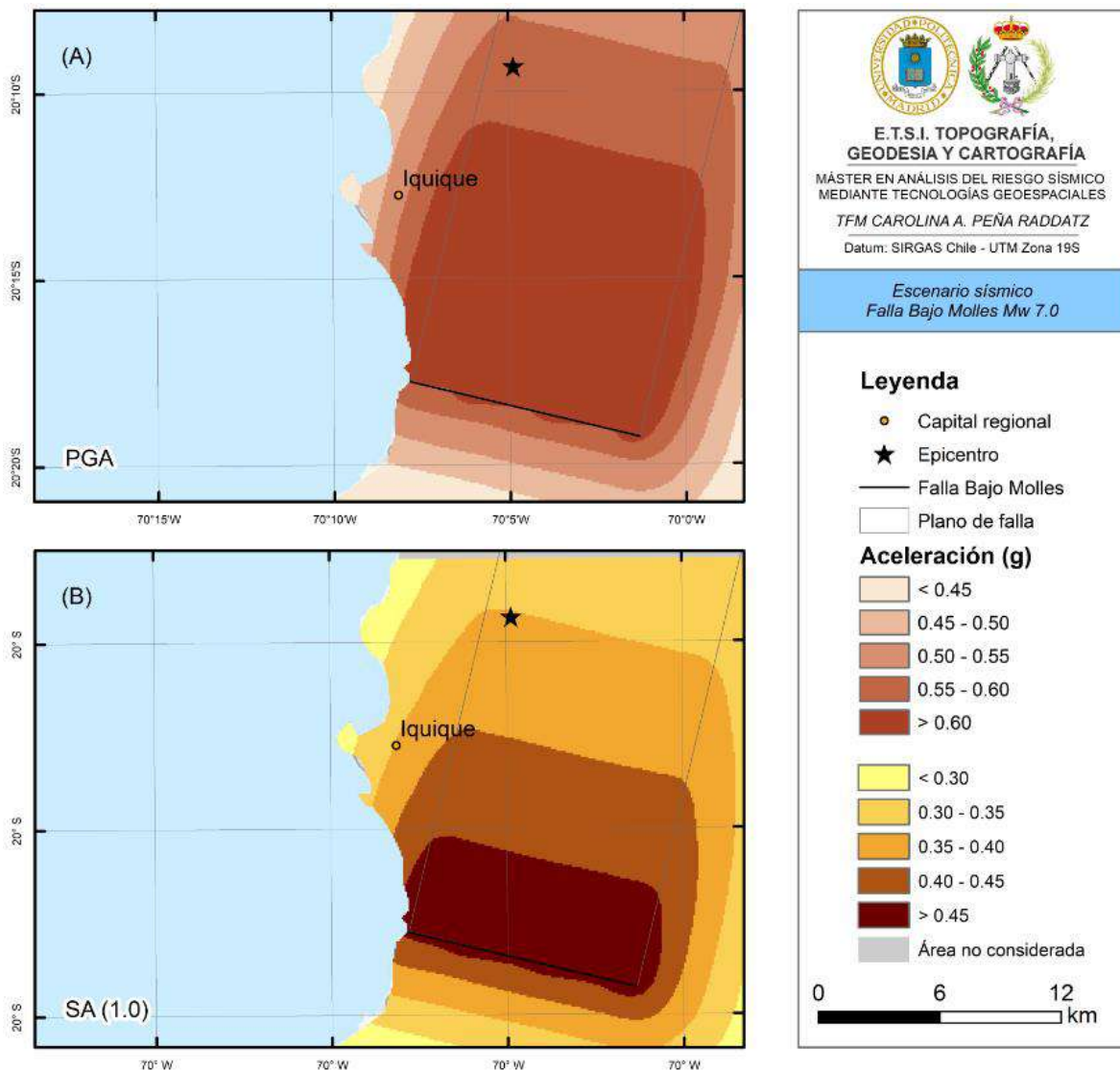


Figura 34. Escenario sísmico determinista para la falla Bajo Molle. A) PGA. B) SA (1.0s).

4. RESULTADOS

4.4.2. Falla Mejillones

Esta falla se ubica a unos ~20 km hacia el Noroeste de la ciudad de Antofagasta, capital de la región homónima. Corresponde a una falla normal con potencial de generar grandes sismos. El escenario sísmico esperado para un terremoto de magnitud Mw 7.0 a 10 km de profundidad se aprecia en la Figura 35. Se observan que las aceleraciones alcanzan su máximo para un PGA de 0.47g, en las proximidades de la falla, mientras que el valor esperado en el centro de la ciudad no supera los 0.2g. Para largos periodos se tiene una aceleración máxima de 0.39g para PGA.

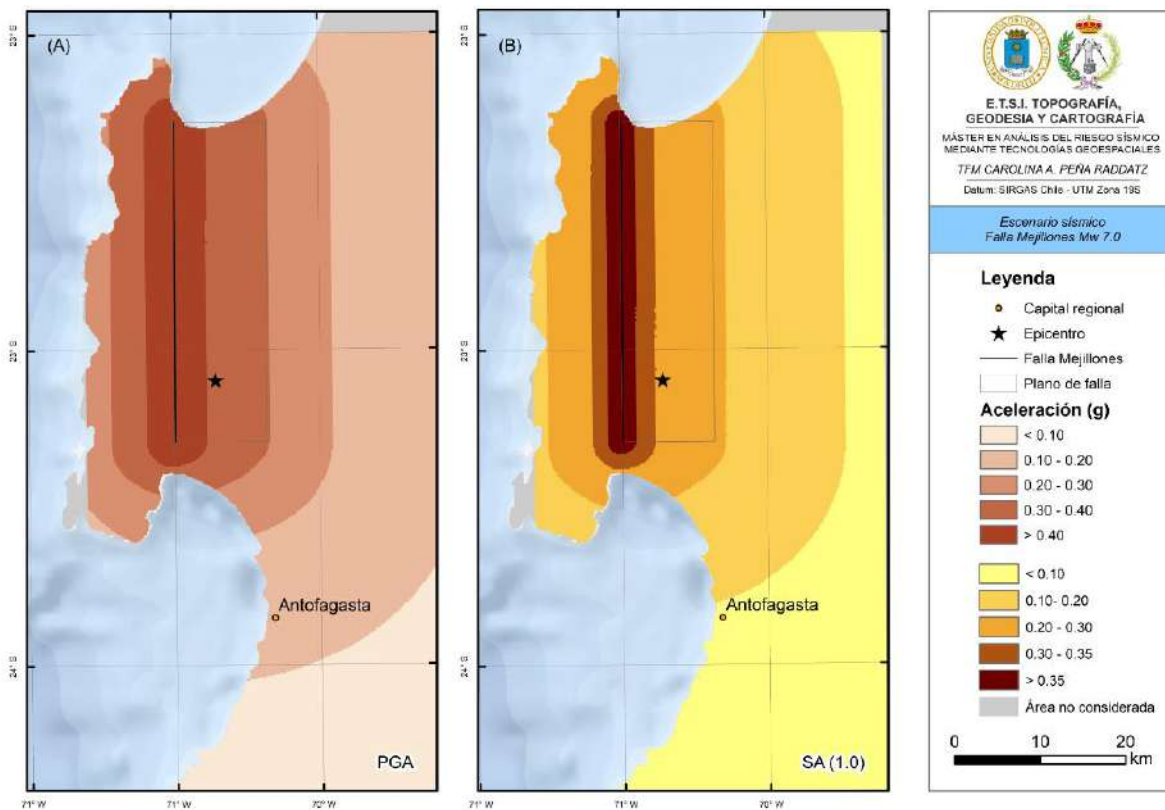


Figura 35. Escenario sísmico determinista para la falla Mejillones. A) PGA. B) SA (1.0s).

4.4.3. Falla San Ramón

La falla San Ramón es una falla inversa ubicada al Este de la ciudad de Santiago, la capital del país. Está conformada por diferentes segmentos, por lo cual se definen 3 escenarios diferentes: una ruptura completa conjunta de los 2 segmentos principales, ruptura del segmento norte (segmento 1) y por último la ruptura del segmento sur (segmento 2).

4.4.3.1. Escenario ruptura completa

Este escenario involucra una magnitud Mw 7.5, coincidente con la máxima estimada por paleosismología. El hipocentro se ubica a 10 km de profundidad. Se considera como centro de la ciudad el centro de la comuna de Santiago. No obstante, existen varias comunas con gran población ubicadas a una menor distancia a la falla.

La Figura 36 muestra el resultado de peligrosidad obtenido para este escenario. Se observa una aceleración máxima de 0.7g de PGA hacia el Este de la traza de falla, y una aceleración de 0.3g en el centro de la ciudad. Por su lado, para el periodo de 1.0s se espera una aceleración de 0.6g en las cercanías de la falla y de 0.3g en el centro de Santiago.

4. RESULTADOS

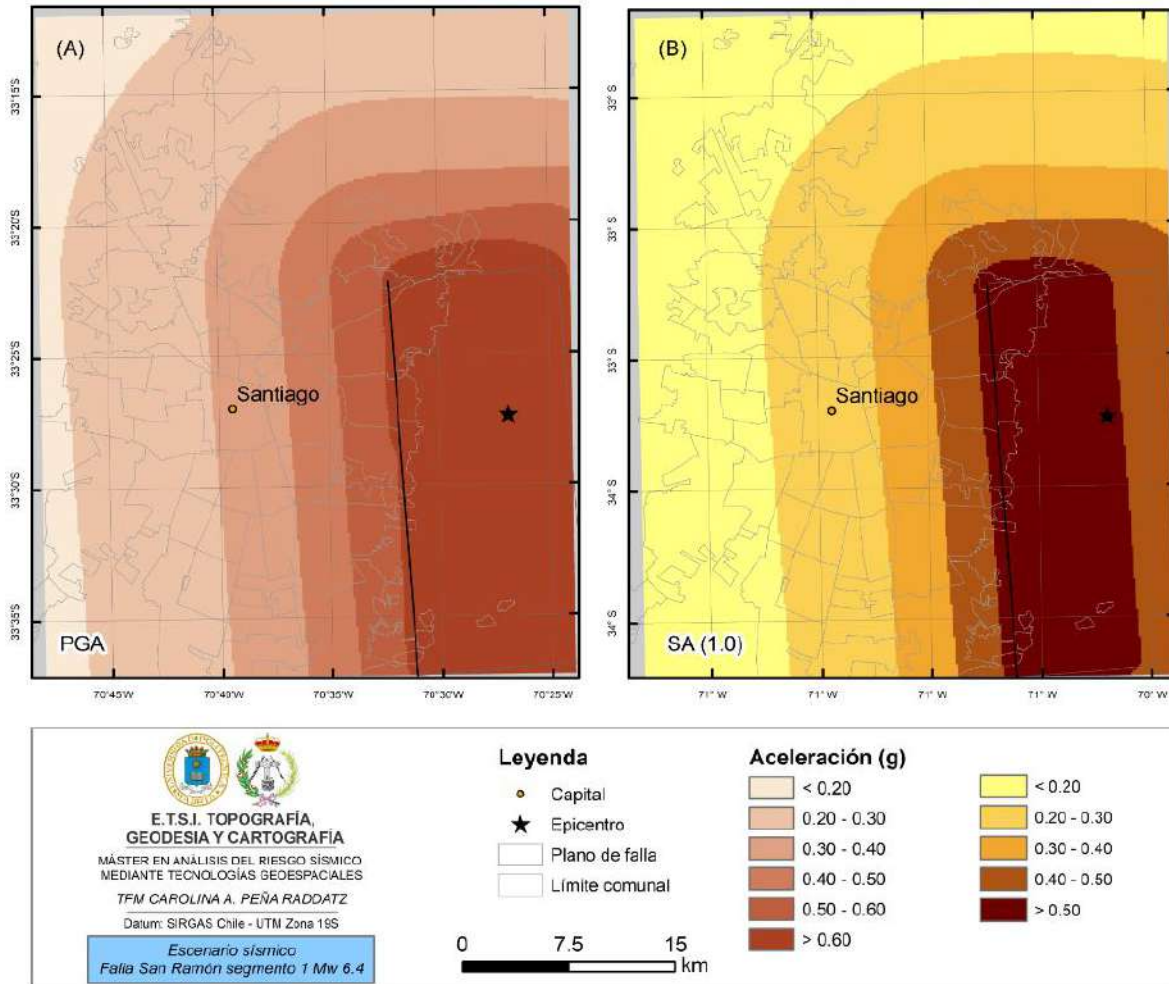


Figura 36. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura completa. A) PGA. B) SA (1.0s).

4.4.3.2. Escenario ruptura del segmento norte

El escenario sísmico definido para el segmento 1 (norte) alcanza una magnitud Mw 6.4, con el hipocentro ubicado en el mismo punto que en el escenario anterior, pero con la orientación de la traza de falla ligeramente diferente.

El resultado obtenido para esta estimación se muestra en la Figura 37, donde se aprecian que los valores de aceleración más grandes se ubican al Noreste de la ciudad. La PGA máxima esperada alcanza los 0.56g, atenuándose con la distancia y llegando a un valor de 0.20g en el centro de la ciudad. Para la ordenada espectral de 1.0s se espera una aceleración máxima de 0.37g en los alrededores de la falla y de 0.12g para Santiago Centro.

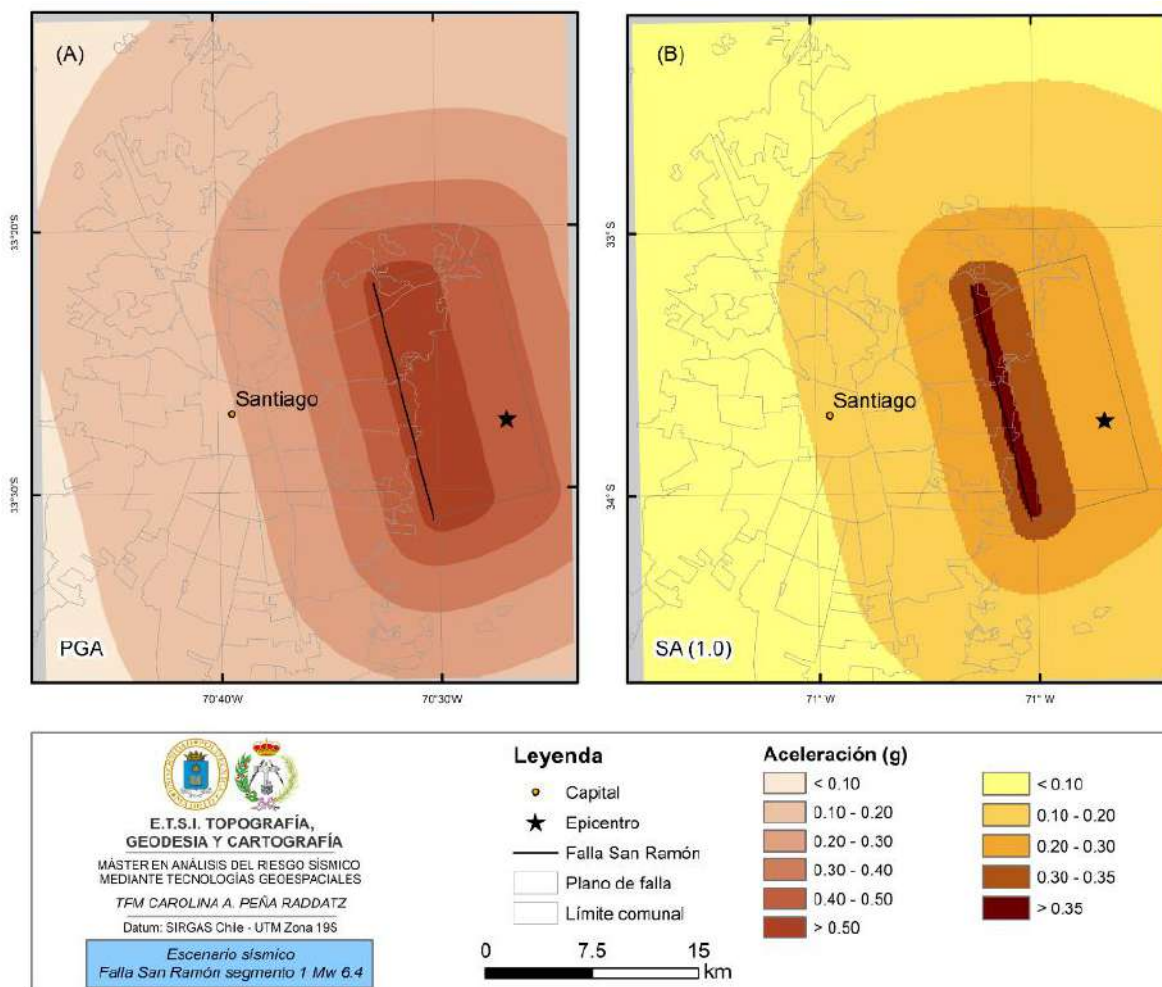


Figura 37. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura segmento 1 (norte). A) PGA. B) SA (1.0s).

4.4.3.3. Escenario ruptura del segmento sur

El segmento sur (segmento 2) de la falla San Ramón se ubica al Sureste de la ciudad de Santiago. Presenta menor longitud, por lo cual el escenario estimado considera una magnitud de Mw 6.1, con un rumbo ligeramente diferente y es el segmento más alejado de la ciudad.

El resultado de la amenaza estimada se muestra en la Figura 38. Las aceleraciones esperadas son menores en comparación a los otros escenarios, alcanzando una PGA máxima de 0.50g en la vecindad de la traza de falla, y de 0.15g en el centro de la ciudad. Para un periodo de 1.0s se esperarían movimientos equivalentes a 0.29g en las cercanías al segmento, mientras que en Santiago no se superarían los 0.10g.

4. RESULTADOS

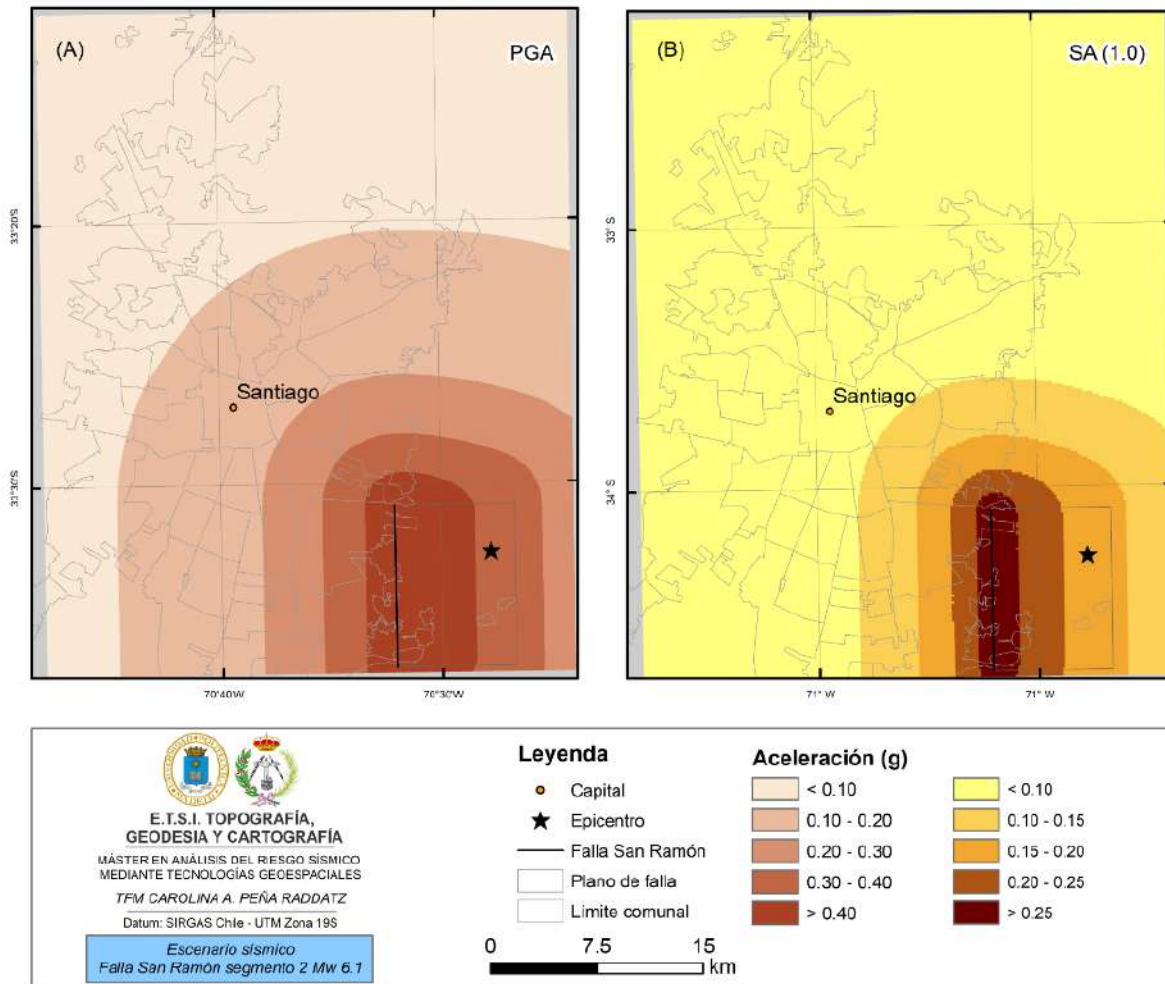


Figura 38. Escenario sísmico determinista para la falla San Ramón, ruptura segmento 2. A) PGA. B) SA (1.0s).

4.4.4. Falla Los Palos

La falla Los Palos es una falla asociada al SFLO que se ubica a menos de 2 km al Oeste de la ciudad de Puerto Aysén. Para este escenario se modela un terremoto Mw 7.0 a una profundidad de 5 km.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 39. Los valores máximos para PGA y para la ordenada espectral de 1.0s son 0.52g y 0.39g respectivamente. Si se analiza el movimiento

esperado para el centro de Puerto Aysén, las aceleraciones bajan ligeramente, siendo de 0.51g y 0.38g para PGA y SA (1.0).

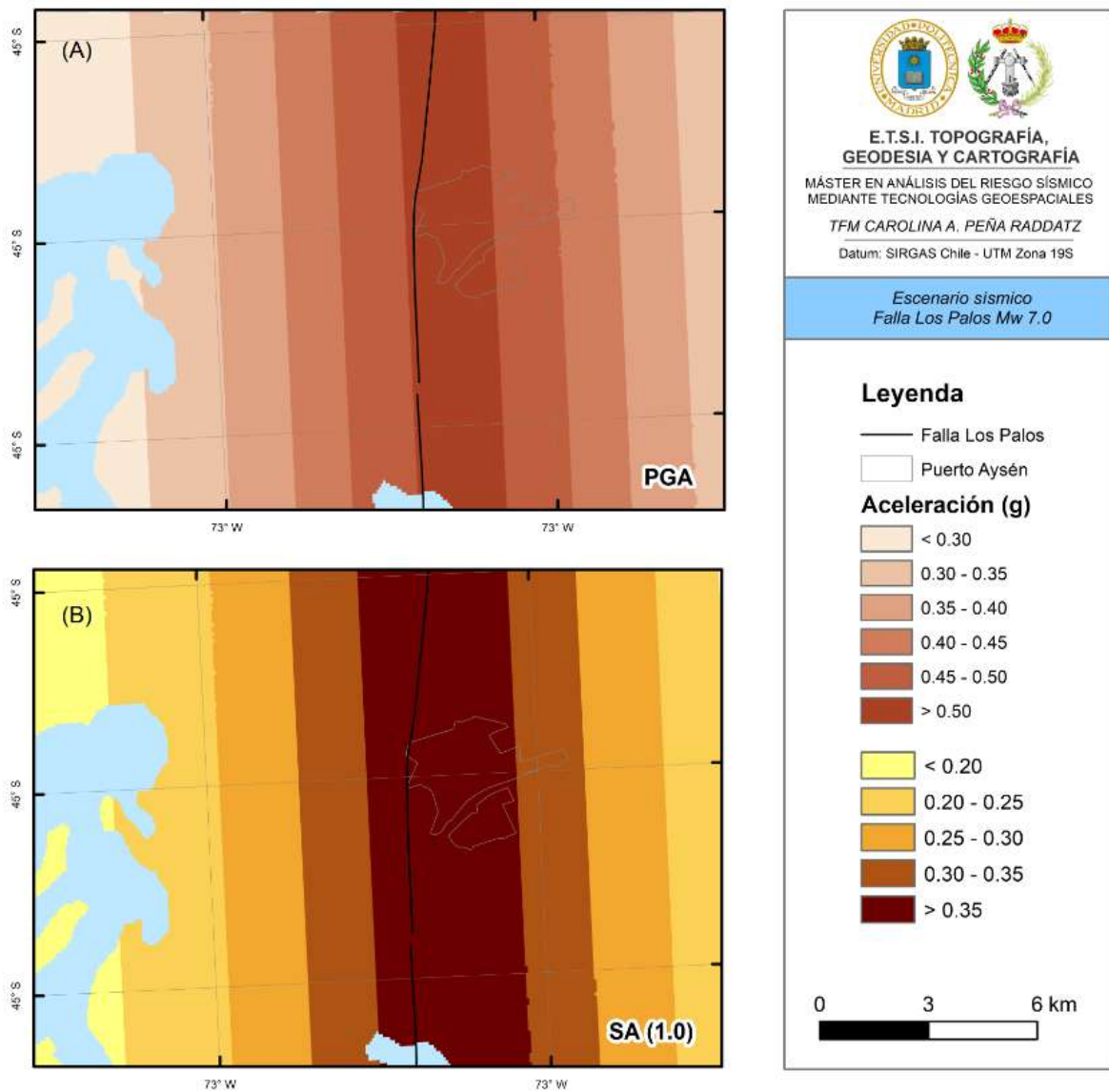


Figura 39. Escenario sísmico determinista para la falla Los Palos. A) PGA. B) SA (1.0s).

4. RESULTADOS

4.4.5. Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano

Este sistema de falla ubicado al extremo sur del país consiste en un límite de placas transformante de movimiento sinestral. Presenta varios sismos históricos registrados, por lo cual se modela con una magnitud de M_w 7.5. La ciudad más cercana es Punta Arenas, ubicada a más de 80 km hacia el Norte de la traza de falla.

Para este terremoto se esperan aceleraciones PGA que alcanzan los 0.51g (Figura 40), sin embargo, el movimiento se va atenuando con la distancia, llegando a Punta Arenas con un valor que no supera los 0.10g. Para altos periodos (1.0s) las aceleraciones llegan hasta los 0.47g en las inmediaciones de la ruptura.

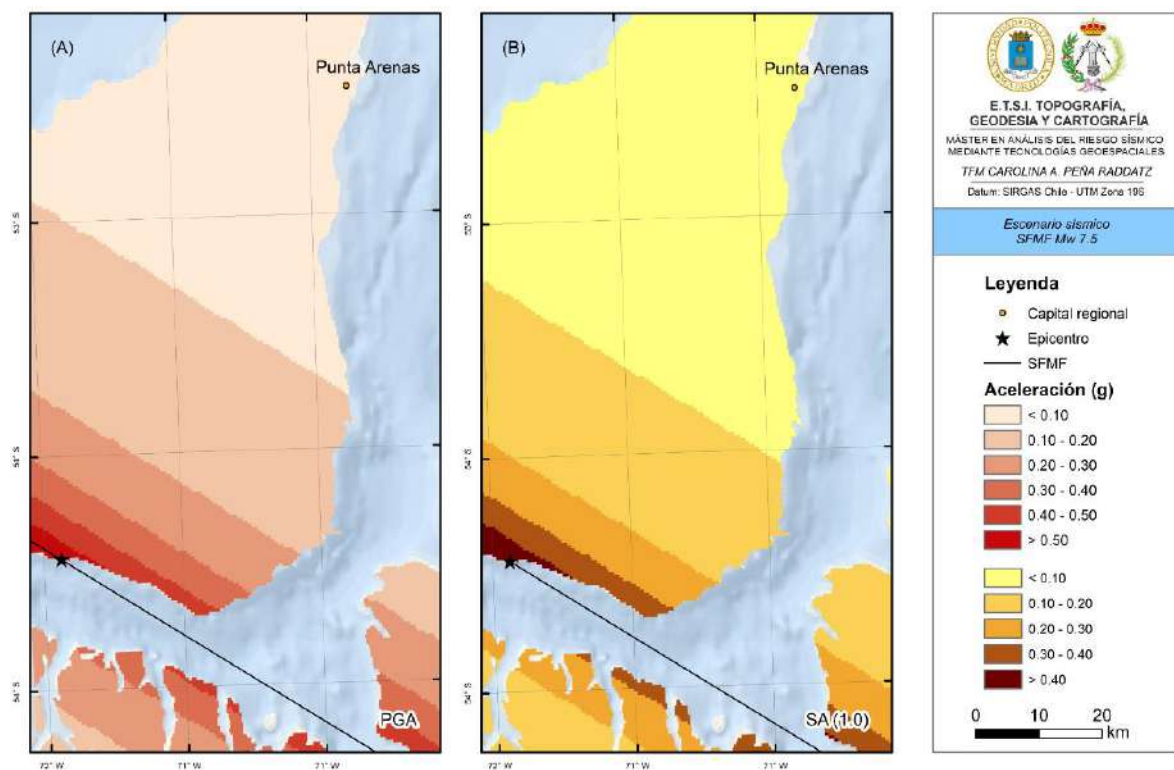


Figura 40. Escenario sísmico determinista para el Sistema de Falla Magallanes-Fagnano. A) PGA. B) SA (1.0s).

En la Tabla 12 se resumen los valores de aceleración anteriormente descritos. Los mayores valores se obtienen para la falla San Ramón considerando una ruptura completa, seguida de

la falla Bajo Molle, ambas muy cercanas a grandes centros poblados. Al observar únicamente los valores estimados en los centros de los emplazamientos analizados, la mayor aceleración (0.54g) afectaría a la ciudad de Iquique (falla Bajo Molle), mientras que las ciudades que recibirían menos movimientos corresponden a Punta Arenas (SFMF) y Antofagasta (falla Mejillones).

Tabla 12. Aceleraciones máximas esperadas en las cercanías de la fuente y en el centro de las ciudades cercanas, tanto para PGA como para la ordenada espectral de 1.0s.

Escenario (falla)	PGA		SA 1.0s	
	Máxima	Ciudad	Máxima	Ciudad
Bajo Molle	0.66	0.54	0.49	0.34
Mejillones	0.47	0.13	0.39	0.09
San Ramón completa	0.70	0.33	0.56	0.26
San Ramón norte	0.56	0.19	0.37	0.12
San Ramón sur	0.50	0.15	0.29	0.08
Los Palos	0.52	0.51	0.39	0.38
Magallanes	0.51	0.05	0.47	0.05

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

5.1. Validación de la recurrencia

Tal como se explica en el apartado de metodología, para poder estimar la peligrosidad sísmica es necesario contar con una serie de parámetros de las fuentes sísmicas a evaluar. Dichos parámetros no se encuentran detallados para muchas de las fallas de Chile, estando validados por publicaciones oficiales apenas en un par de las principales estructuras. Es por esta razón que se recurre a las tasas de deslizamiento para obtener información adicional con el fin de complementar los parámetros necesarios para aplicar el método probabilista.

Uno de estos parámetros es la recurrencia, es decir, el rango de tiempo que tiene lugar entre dos eventos consecutivos, siendo estos eventos equivalentes al terremoto característico. Por medio de la ecuación (11) se obtienen las recurrencias de las 69 trazas de falla analizadas en este trabajo, las cuales se observan en la Tabla A5 del ANEXO. Al analizar los resultados obtenidos se aprecian ciertas fallas que destacan por su periodo de recurrencia corto, es decir, se identifican aquellas fallas que debiesen presentar terremotos cada pocos años.

Del total de fallas analizadas, 3 de ellas presentan baja recurrencia: fallas El Yolki, Liquiñe y un segmento del SFLO ubicado al Suroeste de la localidad de Puerto Aysén. Para la falla El Yolki se obtiene una recurrencia de 40 años para sismos de magnitud Mw 6.1, en el caso de la falla Liquiñe la recurrencia es de 82 años para terremotos Mw 6.8 y para el segmento del SFLO la recurrencia serían 27 años para un terremoto máximo asociado de Mw 6.2.

Se recurre a la base de datos de sismos del NEIC en busca de sismos de magnitud superior a Mw 5.0 en los últimos 150 años, ubicados en las cercanías de las trazas de las fallas mencionadas con el fin de corroborar la recurrencia estimada.

Para la falla El Yolki no se encuentra ningún sismo que se pueda asociar directamente a la actividad de la falla (Figura 41), únicamente se aprecian un par de sismos atribuidos a la subducción donde los de mayor magnitud tuvieron lugar el año 2010 posterior al terremoto del 27 de febrero. La literatura tampoco contiene información acerca de registros históricos, los cuales de existir deberían estar presentes en la memoria de las personas que han habitado la costa central, ya que es un sector habitado hace más de 2 siglos. Por otro lado, Melnick *et al.* (2019) publican el primer trabajo acerca de esta falla, proponiendo una tasa de

5. DISCUSIÓN

deslizamiento de 5.0-6.0 mm/año en base a un estudio paleosísmico realizado en terrazas marinas. Sin embargo, los mismos autores concluyen que es improbable representar esta tasa de deslizamiento relativamente alta a largo plazo y que es poco probable que se haya mantenido en el tiempo. Esto es debido a una menor tasa de deslizamiento obtenida en otra terraza marina, donde la aparente variación en la tasa de deformación podría reflejar la agrupación de paleosismos muestreados en un intervalo corto, un deslizamiento asísmico o una modulación variable por ciclos sísmicos de mega terremotos de subducción. Es por esta razón, que se decide no considerar la falla El Yolki en los cálculos de peligrosidad, pues se podría estar sobrestimando la peligrosidad.

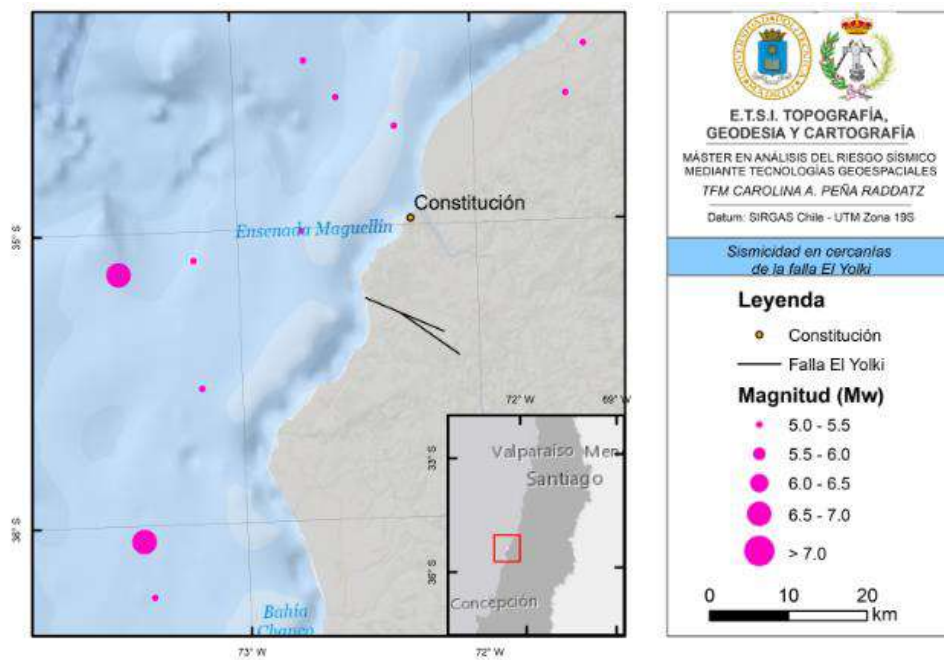


Figura 41. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la falla El Yolki los últimos 150 años.

Para la falla Liquiñe tampoco se detectaron eventos sísmicos (Figura 42). Astudillo-Sotomayor *et al.* (2021) estiman una tasa de deslizamiento de 18.8 ± 2.0 mm/año durante los últimos 9.0 ± 0.1 ka para un solo ramal del sistema de fallas Liquiñe-Ofqui. Esta tasa se calcula para un segmento estudiado de 32 km de largo, utilizando las relaciones empíricas propuestas por Thingbaijam *et al.* (2017). Los autores obtienen un terremoto máximo de Mw

6.4 (menor al estimado este trabajo, de Mw 6.8) el cual les proporciona una recurrencia de 24 años. Los autores sostienen que esta tasa es poco probable ya que no existen registros históricos y, que de provocar terremotos con recurrencias más larga que el registro (~500 años) las grandes magnitudes que se necesitarían quedarían registradas como evidencias geomorfológicas. La hipótesis que sostienen es que parte del deslizamiento sería acomodado asísmicamente, ayudado por la actividad volcánica e hidrotermal de la zona. Debido a que el desplazamiento holoceno de la falla es evidente, esta falla se considera dentro del cálculo de peligrosidad con la tasa de deslizamiento antes mencionada, ya que aún no se cuenta con estudios que cuantifiquen el porcentaje de deslizamiento que se acomodaría asísmicamente.

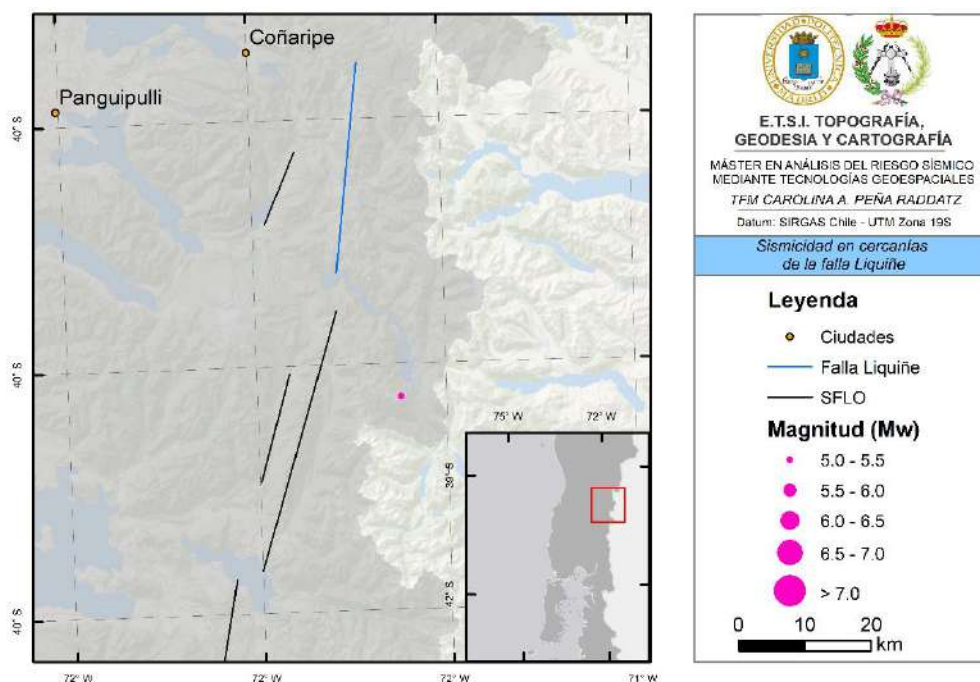


Figura 42. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la falla El Liquiñe los últimos 150 años.

Finalmente, hacia el Suroeste de la localidad de Puerto Aysén se observa una serie de segmentos de fallas los cuales conforman una geometría compleja (Figura 43). De Pascale *et al.* (2021) proponen varias tasas de deslizamiento para los segmentos más septentrionales del SFLO. En el caso del pequeño segmento estudiado en las cercanías del volcán Mate Grande, obtiene una tasa de deslizamiento de 21.7-24.6 mm/año lo cual resulta en una recurrencia de

5. DISCUSIÓN

27 años. La Figura 43 muestra los sismos corticales de gran magnitud registrados en el área, donde se aprecia una gran cantidad de ellos, la mayoría de magnitudes menores a Mw 6.0. Destaca un sismo de magnitud Mw 6.2 ocurrido durante el enjambre sísmico del año 2007 que se asocia a la falla Río Cuervo ubicada al norte de este segmento, además de un gran y anómalo evento de magnitud Mw 7.8 atribuido a una zona al Oeste del segmento, el cual tuvo lugar un par de días después del mega terremoto de Valdivia de 1960. Se aprecia, además, un pequeño enjambre de sismos menores (Mw ~5.0) ocurridos en 1991. Si se considera esta zona como un todo, debido a su geometría compleja, se podría afirmar que el valor de la recurrencia estimado se ajusta moderadamente bien a lo observado. En consecuencia, se incluye en las estimaciones la peligrosidad sísmica este segmento, considerando la tasa de deslizamiento postulada por De Pascale *et al.* (2021). Sin embargo, se deja como valor de terremoto máximo la magnitud calculada por fórmulas empíricas (Mw 6.2). Lo anterior se justifica ya que se requieren de mayores estudios para caracterizar el evento Mw 7.8 ocurrido en 1960.

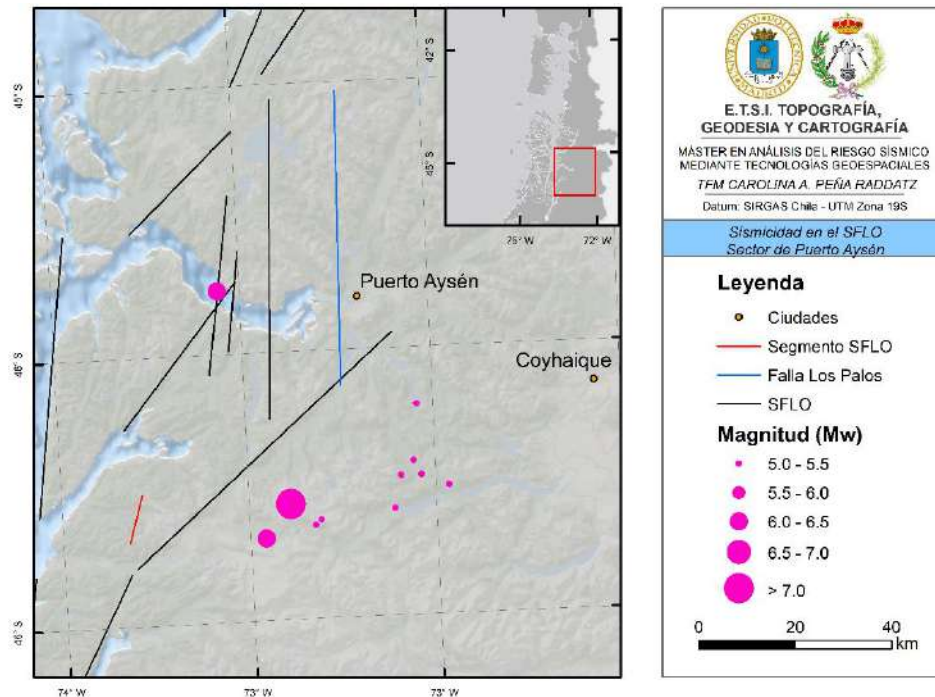


Figura 43. Sismicidad registrada (> Mw 5.0) en los alrededores de la localidad de Puerto Aysén, los últimos 150 años.

5.2. Terremoto máximo

En el apartado de metodología se explica que los valores de magnitud del terremoto máximo utilizados en este estudio corresponden a los obtenidos mediante las fórmulas empíricas que relacionan la extensión de la traza de falla con la magnitud esperada, con excepción de contar con registros históricos asociados a las fallas cuya magnitud registrada sea mayor a la obtenida mediante las fórmulas. No obstante, se están dejando de lado las magnitudes propuestas por los estudios paleosismológicos llevados a cabo en algunas fallas, los cuales en algunos casos sugieren sismos de mayores magnitudes. Por ejemplo Cortés-Aranda *et al.* (2015) sugiere que la falla Mejillones es capaz de generar sismos de Mw 7.0, mientras que con las fórmulas se obtiene una magnitud Mw 6.8, y Santibáñez *et al.* (2019) propone valores de terremoto máximo asociados a los dominios que definen, incluyendo valores más altos a los calculados en este estudio.

La razón por la cual no se consideran estos valores de terremoto máximo, a pesar de estar publicados en la literatura, es debido a, que al ser mayores los valores de magnitud máxima, los periodos de recurrencia obtenidos son mucho más altos y por ende la probabilidad de excedencia del movimiento asociada a estos eventos disminuye considerablemente, al punto de no verse reflejada en los mapas. La Figura 44 ejemplifica esta situación, comparando las aceleraciones sísmicas esperadas utilizando los valores calculados mediante fórmulas empíricas (Figura 44A) con las aceleraciones obtenidas con los valores proporcionados por los estudios paleosismológicos (Figura 44B) con el modelo de Terremoto Característico para un periodo de retorno de 975 años.

Al analizar la comparación mostrada en la Figura 44, resulta evidente que al considerar mayores valores de magnitud máxima (M_{max}), las aceleraciones sísmicas esperadas disminuyen su valor considerablemente, superando los 0.1g únicamente en las cercanías de la falla Pisagua, mientras que, al realizar los cálculos con los valores de M_{max} obtenidos por la relación con la extensión de las trazas de falla, se aprecia peligrosidad en las fallas del sector Sur. Esta peligrosidad observada en el resto de las fallas desaparece en el caso de las aceleraciones calculadas con las magnitudes propuestas por la paleosismología.

5. DISCUSIÓN

Cabe destacar que estas diferencias son más evidentes al utilizar el modelo de Terremoto Característico, ya que el modelo de Gutenberg-Richter, al considerar liberación de energía mediante sismos de magnitudes menores, proporciona más peligrosidad asociada a las fallas.

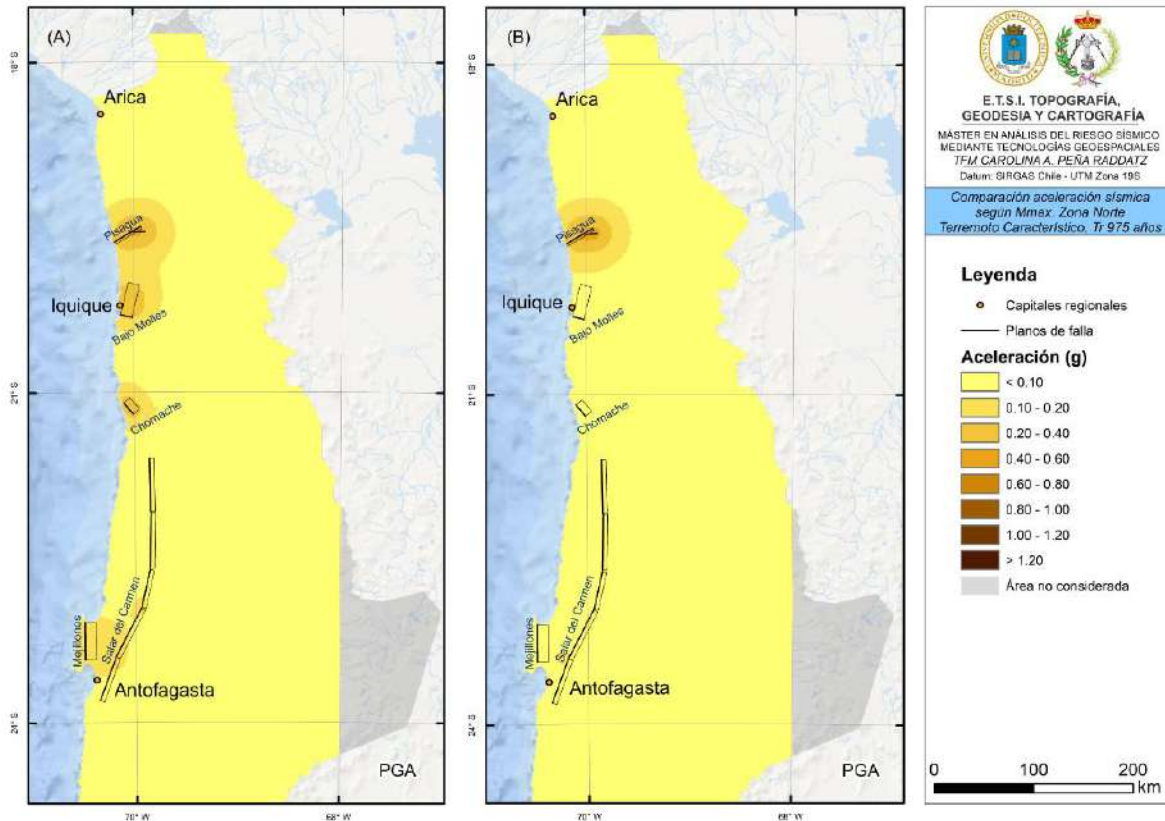


Figura 44. Comparación aceleraciones sísmicas esperadas según modelo de Terremoto Característico y T_r de 975 años, variando el valor de terremoto máximo (M_{max}). A) Valor obtenido mediante fórmulas empíricas. B) Valores propuestos por estudios paleosismológicos.

5.3. Modelos de movimiento fuerte

Dado que en Chile no se cuenta con un modelo propio de predicción de movimiento fuerte desarrollado únicamente con registros corticales del país, se debe recurrir a modelos definidos en otras regiones. Por esta razón se utilizaron 6 modelos diferentes, promediando de forma simple sus valores.

Sin embargo en algunos casos se observan importantes diferencias, como por ejemplo en el caso de los valores obtenidos con el modelo de Boore *et al.* (2014) para las fallas inversas. Para graficar esta diferencia se construye el mapa de coeficientes de variación (COV) para la Zona Norte para un periodo de retorno de 975 años y modelo de recurrencia de Terremoto Característico, incluyendo (Figura 45A) y no incluyendo (Figura 45B) el modelo de Boore *et al.* (2014).

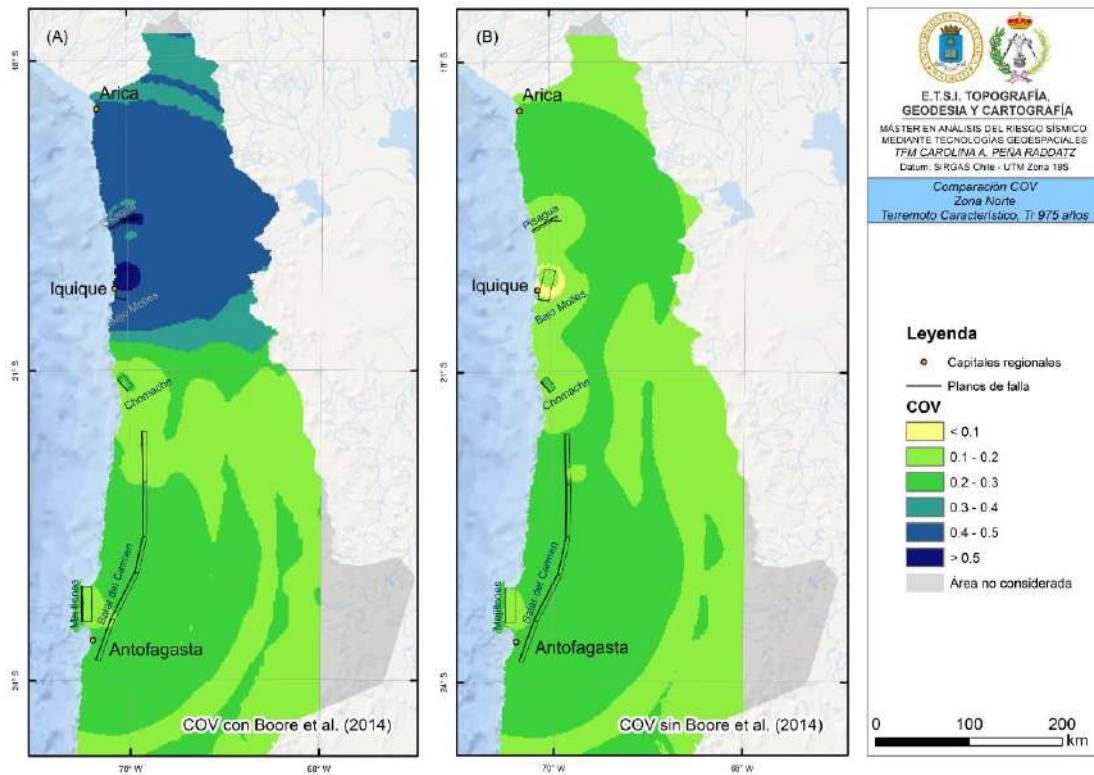


Figura 45. Coeficiente de variación de los resultados obtenidos mediante el modelo de Terremoto Característico para la Zona Norte con un periodo de retorno de 975 años. A) Considerando el modelo de predicción de movimiento fuerte de Boore *et al.* (2014). B) Sin considerar el modelo de Boore *et al.* (2014).

Si se comparan ambos casos, se aprecia claramente como en la Figura 45A, el sector Norte de la zona, donde se ubican las fallas Pisagua y Bajo Molle, concentra valores de COV altos, por encima de 0.4 y llegando a superar los 0.5 en las cercanías de dichas fallas. Lo anterior cambia considerablemente al no considerar el modelo de atenuación de Boore *et al.* (2014) en el promedio simple de modelos (Figura 45B), limitando los valores a un rango de 0.1-0.2

en los alrededores de las fallas mencionadas. En otras palabras, el modelo de Boore *et al.* (2014) introduce, por sí solo, una gran variabilidad a los resultados.

Inicialmente se consideraron los 6 modelos GMPE descritos anteriormente en la estimación de los resultados PSHA, incluido el modelo de Boore *et al.* (2014), sin embargo, los mapas COV dejaron en evidencia las diferencias en la consistencia de los resultados. Por esta razón se opta por descartar el modelo de Boore *et al.* (2014) de las estimaciones de peligrosidad sísmica para zonas Norte y Centro. A diferencia de estas zonas, los mapas obtenidos para las Zonas Sur y de Magallanes (ej. Figuras 23B, 29B) muestran bajos valores de COV para las desviaciones, es decir, son más consistentes.

De esta forma se evidencia que los mapas de Coeficiente de Variación ayudan a identificar las diferencias generadas por los modelos de predicción de movimiento fuerte. En este estudio se refleja que los modelos responden mejor a fallas de desgarre, ya que el SFLO (Zonas Sur) presenta un sentido de movimiento dextral y el SFMF (Zona de Magallanes) tiene movimiento sinistral. De la misma forma se puede sostener que los resultados más dispares se obtienen para los mecanismos inversos, como se observa por ejemplo en el caso de la Zona Norte.

5.4. Peligrosidad sísmica según metodología probabilista

En el apartado de resultados se presentan las aceleraciones sísmicas esperadas para las 4 zonas analizadas tanto por el modelo de Terremoto Característico como con el modelo de Gutenberg-Richter. Al comparar los resultados se comprueba que en todas las zonas las aceleraciones obtenidas con el modelo de Gutenberg-Richter son mayores, esto se debe que considera liberaciones de momento sísmico mediante eventos de menor tamaño con menor periodo de recurrencia, lo que se traduce en mayor probabilidad de excedencia del movimiento para un mismo periodo de retorno.

Por otro lado, al analizar y comparar los resultados por zona, se aprecia que las zonas con menores aceleraciones esperadas son las zonas Central y Zona Norte, mientras que, las zonas Sur y de Magallanes presentan aceleraciones mayores.

Los valores obtenidos son consistentes con los parámetros ingresados para cada plano de falla. Por ejemplo, las altas aceleraciones obtenidas para la Zona Sur se explican debido a las altas tasas de deslizamiento, estimadas para la falla Liquiñe y para los segmentos cercanos a Puerto Aysén, ya que es en los alrededores de estas trazas donde se concentran los mayores valores. Al resto de los segmentos del SFLO se les asigna una tasa de deslizamiento genérica definida en el proyecto SARA, obteniendo, en su mayoría, aceleraciones del orden de los 0.5g.

Si se consideran correctas las altas tasas de deslizamiento propuestas por Astudillo-Sotomayor *et al.* (2021) y De Pascale *et al.* (2021) y se extrapolaran para todo el SFLO debería verse una deformación consistente con el gran deslizamiento acomodado (asumiendo un movimiento asísmico), o por el contrario cabría esperar la ocurrencia de grandes terremotos. Como ninguna de las opciones coincide con lo observado en campo, se confirma que las diferencias de comportamiento en los segmentos de falla varían a lo largo del sistema, por lo cual, la tasa de deslizamiento propuesta por el proyecto SARA se muestra como una buena aproximación media del comportamiento del SFLO.

Ahora bien, el registro histórico de sismos corticales de las últimas décadas, a nivel mundial, cuenta con ejemplos de grandes aceleraciones registradas en las cercanías a las fallas, por lo cual, las aceleraciones obtenidas en este trabajo serían realistas. En la Tabla 13 se observan algunos ejemplos, con los parámetros del lugar en que fue registrado el movimiento. Cabe destacar que la mayoría fueron medidos en un suelo diferente a roca, por lo cual son afectados por efecto de sitio, lo que complica la comparación directa con los resultados obtenidos en este trabajo.

5. DISCUSIÓN

Tabla 13. Ejemplos de sismos corticales ocurridos en el mundo los últimos años con su respectivo valor de aceleración máxima registrada.

Terremoto	País	Magnitud (Mw)	PGA (g)	Tipo de suelo	Distancia (km)	Referencia
Lorca, 2011	España	5.2	0.36	Roca (A; EC8)	5 (Repi)	Benavent-Climent <i>et al.</i> , 2014
Christchurch, 2011	Nueva Zelanda	6.2	0.92	Suelo	7.1 (Rrup)	Cubrinovski <i>et al.</i> , 2011
L'Aquila, 2009	Italia	6.3	0.66	Suelo (B; EC8)	0 (RJB)	Akinci <i>et al.</i> , 2010
Kobe, 1995	Japón	7.2	0.83	Suelo	15 (Repi)	Minami & Sakai, 1996
Chi-chi, 1999	Taiwan	7.6	1.16	Suelo	25.5 (Repi)	Mebarki, 2009; Ku <i>et al.</i> , 2004
Northridge, 1994	USA	6.7	0.94	Suelo	10 (Repi)	Field <i>et al.</i> , 1997

Finalmente, destacar que uno de los factores más determinantes en la aceleración generada es la distancia a la fuente. A pesar de que las aceleraciones pueden alcanzar valores altos, estos se concentran netamente en las inmediaciones más próximas a la ruptura, atenuándose rápidamente a medida que nos alejamos. No obstante, la afirmación anterior sólo es válida si se habla de aceleraciones en roca, el considerar el efecto de suelo puede variar considerablemente la distribución de las mayores aceleraciones.

Por lo tanto, se puede sostener que es posible realizar estimaciones de peligrosidad sísmica considerando ciertas hipótesis de las fuentes sísmicas, sin embargo, se requiere de parámetros clave, de los cuales aún existe un vacío de conocimiento en el país. Trabajos como el de Maldonado *et al.* (2021) contribuyen en gran medida a achicar esta brecha de información. Además, los valores de magnitud para terremoto máximo obtenidos mediante fórmulas empíricas proporcionan una buena aproximación a las magnitudes esperadas, sin embargo, se requiere cuantificar las incertidumbres asociadas a cada regresión con el fin de validar su correcto uso

5.5. Zonas pobladas con un alto nivel de amenaza

Los escenarios deterministas calculados se definieron de acuerdo a la información disponible de las fallas sumado a la cercanía a centros poblados. De los 7 escenarios sísmicos calculados, las aceleraciones más altas se producen en la falla San Ramón considerando una ruptura

completa, donde los valores de PGA alcanzan los 0.7g, seguida de cerca por la falla Bajo Molle (0.66g). Por su parte, las menores aceleraciones se obtienen para la falla Mejillones, 0.47g, seguida de la falla San Ramón con ruptura del segmento 2, alcanzando en este caso valores de 0.5g.

De estos escenarios analizados, el que tendría mayor impacto en la población sería el escenario de la falla de San Ramón, especialmente si se considera una ruptura completa de los segmentos, ya que afectaría a una enorme cantidad de personas que habitan en la capital del país (Hussain *et al.*, 2020). Adicionalmente, los estudios paleosismológicos postulan una magnitud máxima probable de Mw 7.5 con una recurrencia entre 2500-10000 años (Armijo *et al.*, 2010). Considerando que en este momento ya se encuentra en el margen de su ciclo sísmico, ya que el último evento ocurrió hace 8000 años (Vargas *et al.*, 2014), se podría esperar la ocurrencia de un evento sísmico importante en cualquier momento.

El método probabilista, por su parte, proporciona una idea de las aceleraciones sísmicas esperadas en los diferentes centros urbanos asociadas a cierta probabilidad de excedencia. Con el fin de proporcionar un listado que incluya las principales poblaciones que se encuentran expuestas a efectos de movimientos sísmicos de origen cortical, se elabora la Tabla 14. Dicho listado se definió de forma arbitraria de acuerdo a la cercanía de los centros poblados (ciudades y pueblos) a fuentes sísmicas tipo falla que presentan aceleraciones esperadas PGA mayores a 0.1g, obtenidas mediante el método probabilista, utilizando el modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter para un periodo de retorno de 475 años.

5. DISCUSIÓN

Tabla 14. Listado de localidades expuestas a aceleraciones por sobre los 0.1g producto de eventos sísmicos corticales.

Localidad	Aceleración (g)	Zona	Categoría	Localidad	Aceleración (g)	Zona	Categoría
Pozo Almonte	0.11	N	Ciudad	Huiscapi	0.10	S	Pueblo
Iquique	0.37	N	Ciudad	Curarrehue	0.29	S	Pueblo
Alto Hospicio	0.32	N	Ciudad	Lican-Ray	0.21	S	Pueblo
María Elena	0.15	N	Ciudad	Coñaripe	0.42	S	Pueblo
Mejillones	0.27	N	Ciudad	Panguipulli	0.16	S	Ciudad
Antofagasta	0.21	N	Ciudad	Malalhue	0.11	S	Pueblo
Región Metropolitana	0.50	C	Ciudad	Los Lagos	0.14	S	Pueblo
Paredones	0.15	C	Pueblo	Futroneo	0.16	S	Pueblo
Bucalemu	0.17	C	Pueblo	Lago Ranco	0.14	S	Pueblo
Pichilemu	0.47	C	Ciudad	Entre Lagos	0.11	S	Pueblo
Ralco	0.13	S	Pueblo	Las Cascadas	0.13	S	Pueblo
Lonquimay	0.53	S	Pueblo	Río Negro	0.80	S	Ciudad
Curacautín	0.14	S	Ciudad	Chaitén	0.20	S	Pueblo
Cherquenco	0.13	S	Pueblo	Puerto Cisnes	0.40	S	Pueblo
Icalma	0.32	S	Pueblo	Puerto Aguirre	0.20	S	Pueblo
Melipeuco	0.41	S	Pueblo	Puerto Aysén	0.64	S	Ciudad
Cunco	0.13	S	Ciudad	Puerto Chacabuco	0.56	S	Pueblo
Pucón	0.36	S	Ciudad	Puerto Williams		M	Pueblo
Villarrica	0.14	S	Ciudad				

Destaca el caso de la Región Metropolitana, ya que ahí se incluyen varias comunas (ciudades y pueblos) que se verían afectadas ante un movimiento sísmico de la falla San Ramón. Sin embargo, debido a la gran cantidad de comunas, estas no se incluyen de forma individual en el listado de la Tabla 14. Cabe aclarar que no todas las comunas que pertenecen a esta región se encuentran expuestas a este nivel de movimiento, sino sólo aquellas ubicadas a menos de 30 km de la fuente, en especial las comunas más orientales.

Al igual que en el caso de los cálculos probabilistas, es necesario posteriormente considerar los efectos de sitio en los diferentes escenarios, ya que el panorama para las diferentes poblaciones puede variar al incluir el efecto de sitio.

5.6. Comparación con resultados de Catalina Cabello

En su Trabajo de Fin de Máster, Catalina Cabello (2021) estima la peligrosidad sísmica en Chile mediante un método probabilista zonificado, es decir, definiendo zonas en las cuales la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos se considera homogénea a lo largo de toda la zona analizada, a diferencia del presente trabajo en el cual se asocia la peligrosidad a fuentes sísmicas conocidas (fallas activas). Adicionalmente, los resultados de Cabello (2021) incluyen la peligrosidad asociada a la subducción y no sólo a sismos corticales, como es el caso de este estudio.

Para el cálculo de peligrosidad asociado a fuentes específicas es esencial contar con parámetros publicados que caracterizan la actividad de las diferentes fallas. Estos datos específicos de las fuentes no son necesarios en un estudio zonificado, ya que los parámetros sísmicos se calculan a nivel de zona a partir del catálogo sísmico. Por lo tanto, se puede afirmar que los métodos probabilistas zonificados son de mayor utilidad cuando no se cuenta con la información requerida de las fuentes sísmicas individuales.

Con el fin de comparar los resultados se elaboran las Tablas 15 y 16, en las cuales se muestra los valores de PGA máxima obtenida con ambas metodologías tanto para las capitales regionales del país (Tabla 15) como para aquellas localidades que se encuentran mayormente expuestas ante un evento sísmico cortical según este estudio (Tabla 16).

5. DISCUSIÓN

Tabla 15. Comparación valores de aceleración obtenidos (PGA) mediante las metodologías probabilista zonificada y probabilista asociada a fuentes sísmicas definidas para las capitales regionales del país. 475 años de periodo de retorno, modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter.

Región	Capital	Aceleraciones (g)				
		Método probabilista zonificado			Método probabilista con fuentes sísmicas	
		Subducción	Cortical	Subducción + cortical	Cortical	Determinista
Arica y Parinacota	Arica	0.90	0.18	0.75	0.02	-
Tarapacá	Iquique	0.85	0.18	0.72	0.28	0.54
Antofagasta	Antofagasta	0.89	0.18	0.74	0.20	0.13
Atacama	Copiapó	0.98	0.18	0.77	-	-
Coquimbo	La Serena	1.14	0.18	0.87	-	-
Valparaíso	Valparaíso	0.95	0.16	0.77	0.02	-
Metropolitana	Santiago	0.79	0.21	0.73	0.21	0.33/0.15/0.13
O'Higgins	Rancagua	0.76	0.21	0.71	0.03	-
Maule	Talca	0.85	0.19	0.75	0.01	-
Ñuble	Chillán	0.68	0.20	0.68	-	-
Biobío	Concepción	0.94	0.16	0.7	-	-
La Araucanía	Temuco	0.57	0.13	0.45	0.05	-
Los Ríos	Valdivia	0.67	0.10	0.51	0.04	-
Los Lagos	Puerto Montt	0.56	0.13	0.44	0.09	-
General Carlos Ibáñez del Campo	Coyhaique	-	-	-	0.08	-
Magallanes	Punta Arenas	-	0.06	-	0.08	0.05

Caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a fallas activas

Tabla 16. Comparación valores de aceleración obtenidos (PGA) mediante las metodologías probabilista zonificada y probabilista asociada a fuentes sísmicas definidas para las capitales regionales del país. 475 años de periodo de retorno, modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter. Los resultados del método probabilista zonificado corresponden al conjunto de subducción y cortical.

Localidad	Zona	Categoría	Aceleración (g)	
			Probabilista zonificado	Probabilista con fuentes sísmicas
Pozo Almonte	N	Ciudad	0.81	0.11
Iquique	N	Ciudad	0.70	0.37
Alto Hospicio	N	Ciudad	0.70	0.32
María Elena	N	Ciudad	0.79	0.15
Mejillones	N	Ciudad	0.87	0.27
Antofagasta	N	Ciudad	0.76	0.21
Región Metropolitana	C	Ciudad	0.72	0.50
Paredones	C	Pueblo	0.73	0.15
Bucalemu	C	Pueblo	0.75	0.17
Pichilemu	C	Ciudad	0.77	0.47
Ralco	S	Pueblo	0.31	0.13
Lonquimay	S	Pueblo	0.22	0.53
Curacautín	S	Ciudad	0.33	0.14
Cherquenco	S	Pueblo	0.34	0.13
Icalma	S	Pueblo	0.20	0.32
Melipeuco	S	Pueblo	0.27	0.41
Cunco	S	Ciudad	0.33	0.13
Pucón	S	Ciudad	0.29	0.36
Villarrica	S	Ciudad	0.35	0.14
Huiscapi	S	Pueblo	0.38	0.10
Curarrehue	S	Pueblo	0.22	0.29
Lican-Ray	S	Pueblo	0.32	0.21
Coñaripe	S	Pueblo	0.28	0.42
Panguipulli	S	Ciudad	0.35	0.16
Malalhue	S	Pueblo	0.38	0.11
Los Lagos	S	Pueblo	0.37	0.14
Futrono	S	Pueblo	0.34	0.16
Lago Ranco	S	Pueblo	0.37	0.14
Entre Lagos	S	Pueblo	0.39	0.11
Las Cascadas	S	Pueblo	0.38	0.13
Río Negro	S	Ciudad	0.48	0.80
Chaitén	S	Pueblo	0.34	0.20
Puerto Cisnes	S	Pueblo	0.27	0.40
Puerto Aguirre	S	Pueblo	-	0.20
Puerto Aysén	S	Ciudad	0.27	0.64
Puerto Chacabuco	S	Pueblo	-	0.56
Puerto Williams	M	Pueblo	-	0.13

5. DISCUSIÓN

Al comparar los resultados de aceleraciones esperadas debido a una fuente cortical (Tabla 15), se observa que en los sectores donde se cuenta con fallas caracterizadas, las aceleraciones obtenidas en este trabajo son mayores a las obtenidas por Cabello (2021), como es el caso de Iquique y Antofagasta. No obstante, esto cambia notoriamente si se considera la influencia de la subducción, ya que aumenta significativamente las aceleraciones esperadas en especial para los pueblos y ciudades costeras.

En este estudio al trabajar únicamente con aquellas fallas de las cuales se cuenta con información suficiente, se omite la amenaza que suponen otras fallas activas. Esto se refleja en mayores aceleraciones corticales obtenidas con el método probabilista zonificado, como ocurre en Arica, Valparaíso, Rancagua, Talca, Temuco y Valdivia (Tabla 15). En otras palabras, el método probabilista zonificado subestima la probabilidad en las áreas de influencia de las fallas, pero las sobrestima en los sectores en que no existen fallas o se tiene la información de estas.

De las localidades indicadas en la Tabla 16, destacan especialmente 12 de ellas: Iquique, Alto Hospicio, Mejillones, la Región Metropolitana (incluye varias comunas del sector oriente), Pichilemu, Icalma, Melipeuco, Pucón, Coñaripe, Río Negro, Puerto Cisnes y Puerto Aysén, ya que presentan valores de aceleración por sobre los 0.25g para ambas metodologías. Idealmente, estos sectores debiesen de contar con planes de emergencia y medidas de prevención y mitigación, ya que presentan mayores probabilidades de exceder el movimiento del suelo producto de un evento sísmico de origen tanto por subducción como cortical.

Dado que el porcentaje de fallas de las cuales se tiene información aún es muy bajo para el país, la mejor opción es evaluar la peligrosidad mediante un método probabilista zonificado. No obstante, en aquellas localidades que se encuentran en las cercanías de las fallas, es fundamental considerar la peligrosidad sísmica esperada estimada en este trabajo.

Hacia el futuro, se debería apuntar a la estimación de la amenaza a partir de modelos híbridos, los cuales complementen los resultados de ambos métodos.

5.7. Líneas de trabajo futuros

- Este trabajo se realiza en base a los datos con los que se cuenta actualmente sobre las fallas activas del país, sin embargo, queda en evidencia la falta de información y caracterización de las fuentes sísmicas tipo falla en Chile, las cuales son la base de los estudios de riesgo. Se requiere de mayores estudios, tanto locales como regionales, que ayuden a complementar la información conocida hasta ahora.
- Este trabajo pone en evidencia la importancia e influencia de los modelos GMPE, comprobando que algunos presentan niveles de movimiento muy dispares. Al no contar con un modelo propio de predicción de movimiento fuerte definido para sismos corticales, se requiere realizar una calibración de los diferentes modelos con datos sísmicos registrados en el país.
- Los resultados obtenidos en este trabajo no consideran las variaciones asociadas a las incertidumbres. Para lograr más detalle y mejor precisión de los valores de aceleración es fundamental cuantificar los errores asociados en cada etapa del estudio, como por ejemplo las incertidumbres propias de las fórmulas empíricas con las que se obtienen los valores de terremoto máximo o de los mismos modelos de atenuación.
- Tal como se menciona anteriormente, es importante considerar el efecto de sitio en la evaluación de las aceleraciones esperadas en un emplazamiento dado, ya que los valores pueden variar en gran medida condicionando tanto las medidas preventivas y mitigantes que se pueden implementar en cierta localidad como las normas de construcción.
- Sería ideal contar con información acerca del tiempo transcurrido desde el último evento (*elapsed time*). Hay fallas, como por ejemplo la falla San Ramón, las cuales presentan grandes tiempos de recurrencia, sin embargo, actualmente ya se ha cumplido el tiempo del ciclo, por lo cual la probabilidad de ocurrencia en los

5. DISCUSIÓN

próximos años aumenta, de manera más o menos significativa, lo cual no es considerado en las estimaciones.

- Desarrollo de trabajos que estudien la relación entre los sismos corticales con otros peligros naturales asociados, como por ejemplo, sismos de subducción, tsunamis, remociones en masa o actividad volcánica.
- Finalmente, mencionar en la norma chilena de construcción (NCh433) no se consideran los movimientos sísmicos generados por fallas locales, por lo cual se podría estar subestimando la peligrosidad en las localidades anteriormente mencionadas, donde la poca distancia a la falla puede traducirse en altas aceleraciones.

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Se realiza una estimación y caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a las principales fallas activas de las cuales se tiene información, siendo un total de 69 trazas de falla concentradas en 4 zonas a lo largo del país. Además, se define y calcula la peligrosidad para 7 escenarios sísmicos diferentes, considerando la cercanía a importantes centros poblados.

Los resultados probabilistas reflejan el potencial sismogénico de las fallas del país, alcanzando aceleraciones considerables en las inmediaciones de las trazas de falla. Las zonas Sur y de Magallanes presentan las mayores probabilidades de excedencia del movimiento del suelo, alcanzando una PGA máxima de 1.4g y 1.0g respectivamente, para 475 años de periodo de retorno según el modelo de Gutenberg-Richter. Para las zonas Norte y Centro se obtienen valores de aceleración asociadas a una menor amenaza, con valores máximos PGA de 0.6g y 0.5g para el mismo Tr.

A partir de las aceleraciones obtenidas se determinan las zonas pobladas del país que presentan mayor amenaza, alcanzando un total de 37 localidades, de categoría pueblo o ciudad, expuestas a la acción directa de movimientos sísmicos en caso de la ocurrencia de eventos en los segmentos de falla analizados. La falla San Ramón constituye uno de los mayores peligros para el país, debido a su cercanía a grandes zonas urbanas y su capacidad de provocar sismos de gran magnitud.

Los resultados reflejan la importancia de los distintos parámetros utilizados, principalmente la influencia de la magnitud del sismo, la distancia fuente-emplazamiento, el tipo de falla y en gran medida, el modelo de predicción de movimiento fuerte utilizado.

Se destaca, además, la comparación con los resultados del trabajo de Cabello (2021). Se analizan las variaciones de los diferentes valores de aceleración y se determinan aquellas zonas que concentran las diferencias y aquellas que presentan mayor exposición ante una amenaza sísmica, como por ejemplo Iquique y Santiago (Región Metropolitana).

Debido a la aún poca información con la que se cuenta y a las simplificaciones e hipótesis asumidas en las estimaciones, se requiere de mayores estudios que permitan validar y complementar este trabajo. No obstante, se proporciona un panorama general de la peligrosidad consistente con los datos observados hasta el momento.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.
- Akinci, A., Malagnini, L., & Sabetta, F. (2010). Characteristics of the strong ground motions from the 6 April 2009 L'Aquila earthquake, Italy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(5), 320-335.
- Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 359-387.
- Allmendinger, R. W., & González, G. (2010). Invited review paper: Neogene to Quaternary tectonics of the coastal Cordillera, northern Chile. *Tectonophysics*, 495(1-2), 93-110.
- Alvarado, P., Barrientos, S., Saez, M., Astroza, M., & Beck, S. (2009). Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1-2), 26-36.
- Anderson, J. G. (1979). Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1), 135-158.
- Angermann D, Klotz J, & Reigber C (1999) Space-geodetic estimation of the Nazca–South America Euler vector. *Earth Planet Sci Lett*, 171, 329–334.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).
- Aron, F., Allmendinger, R. W., Cembrano, J., González, G., & Yáñez, G. (2013). Permanent fore-arc extension and seismic segmentation: Insights from the 2010 Maule earthquake, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(2), 724-739.

Astudillo-Sotomayor, L., Jara-Muñoz, J., Melnick, D., Cortés-Aranda, J., Tassara, A., & Strecker, M. R. (2021). Fast Holocene slip and localized strain along the Liquiñe-Ofqui strike-slip fault system, Chile. *Scientific reports*, 11(1), 1-10.

Benavent-Climent, A., Escobedo, A., Donaire-Avila, J., Oliver-Saiz, E., & Ramírez-Márquez, A. L. (2014). Assessment of expected damage on buildings subjected to Lorca earthquake through an energy-based seismic index method and nonlinear dynamic response analyses. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(5), 2049-2073.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.

Brengman, C. M., Barnhart, W. D., Mankin, E. H. & Miller, C. N. (2019). Earthquake-scaling relationships from geodetically derived slip distributions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1701-1715.

Brune, J. N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73(2), 777-784.

Cabello Parada, Catalina Alejandra (2021). Cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica en Chile. Trabajo de Fin de Master. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica superior en Ingeniería Topográfica, Geodesia y Cartografía. pp 137.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.

Cande, S. C., & Leslie, R. B. (1986). Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B1), 471-496.

Carrizo, D., & González, G. (2003). Modelo de crecimiento de la Falla Salar del Carmen, Sistema de Fallas de Atacama, Cordillera de la Costa, norte de Chile. X Congreso Geológico Chileno, pp. 578-582.

- Carrizo, D., González, G. & Dunai, T. (2008). Constricción neógena en la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ^{21}Ne cosmogónico. *Revista geológica de Chile*, 35(1), 01-38.
- Cembrano, J. & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471, 96–113.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Yañez, G., Riquelme, R., Garcia, M., González, G., & Hérail, G. (2007). *Neotectonics*. The geology of Chile, 231-261.
- Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.
- Contreras, V. & Boroscheck, R. (2012). Strong Ground Motion Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquakes. XV World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- Cortés-Aranda, J., González, G., Rémy, D., & Martinod, J. (2015). Normal upper plate fault reactivation in northern Chile and the subduction earthquake cycle: From geological observations and static Coulomb Failure Stress (CFS) change. *Tectonophysics*, 639, 118-131.
- Cortés A, J., González L, G., Binnie, S. A., Robinson, R., Freeman, S. P. H. T. & Vargas E, G. (2012). Paleoseismology of the Mejillones Fault, northern Chile: Insights from cosmogenic ^{10}Be and optically stimulated luminescence determinations. *Tectonics*, 31(2).
- Costa, C., Alvarado, A., Audemard, F., Audin, L., Benavente, C., Bezerra, F. H., Cembrano, J., González, G., López, M., Minaya, E., Santibáñez, I., García, J., Pagani, M., Pérez, I., Delgado, F., Paolini, M. & Garro, H. (2020). Hazardous faults of South America; compilation and overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102837.
- Cubrinovski, M., Bradley, B., Wotherspoon, L., Green, R., Bray, J., Wood, C. & Wells, D. (2011). Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 205-226.

De Mets C, Gordon R, Argus D, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett*, 21(20), 2191–2194.

De Pascale, G. P., Froude, M., Penna, I., Hermanns, R. L., Sepúlveda, S. A., Moncada, D. & Gutiérrez, F. (2021). Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Scientific reports*, 11(1), 1-12.

Field, E. H., Johnson, P. A., Beresnev, I. A., & Zeng, Y. (1997). Nonlinear ground-motion amplification by sediments during the 1994 Northridge earthquake. *Nature*, 390(6660), 599-602.

U.S. Geological Survey & Lavenu, A. (2000). Maps and database of Quaternary faults in Bolivia and Chile. *Open-File Report 00-283*, 50.

González, G., Cembrano, J., Carrizo, D., Macci, A. & Schneider, H. (2003). The link between forearc tectonics and Pliocene–Quaternary deformation of the Coastal Cordillera, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(5), 321-342.

González, G., Gerbault, M., Martinod, J., Cembrano, J., Carrizo, D., Allmendinger, R., & Espina, J. (2008). Crack formation on top of propagating reverse faults of the Chuculay Fault System, northern Chile: Insights from field data and numerical modelling. *Journal of Structural Geology*, 30(6), 791-808.

González, G., Salazar, P., Loveless, J. P., Allmendinger, R. W., Aron, F. & Shrivastava, M. (2015). Upper plate reverse fault reactivation and the unclamping of the megathrust during the 2014 northern Chile earthquake sequence. *Geology*, 43(8), 671-674.

Gutenberg, B. & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 34(4), 185-188.

Hanks T.C. & Kanamori H. (1979), A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.

Heinze, B. (2003). Active intraplate faulting in the forearc of North Central Chile (30°-31° S): implications from neotectonic field studies, GPS data, and elastic dislocation modeling. Doctoral dissertation, GFZ Potsdam.

Hussain, E., Elliott, J. R., Silva, V., Vilar-Vega, M. & Kane, D. (2020). Contrasting seismic risk for Santiago, Chile, from near-field and distant earthquake sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1533-1555.

Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. & Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), 1853-1880

Idriss, I. M. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155-1177.

Ku, C. S., Lee, D. H., & Wu, J. H. (2004). Evaluation of soil liquefaction in the Chi-Chi, Taiwan earthquake using CPT. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9-10), 659-673.

Legrand, D., Barrientos, S., Bataille, K., Cembrano, J. & Pavez, A. (2011). The fluid-driven tectonic swarm of Aysen Fjord, Chile. (2007) associated with two earthquakes (Mw= 6.1 and Mw= 6.2) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone. *Continental Shelf Research*, 31(3-4), 154-161.

Legrand, D., Delouis, B., Dorbath, L., David, C., Campos, J., Marquez, L. & Comte, D. (2007). Source parameters of the Mw= 6.3 Aroma crustal earthquake of July 24, 2001 (northern Chile), and its aftershock sequence. *Journal of south American earth sciences*, 24(1), 58-68.

Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 1971-1988.

Leyton, F., Ruiz, S. & Sepúlveda, S. A. (2009). Preliminary re-evaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: from Arica to Taitao Peninsula. *Advances in Geosciences*, 22, 147-153.

Lodolo, E., Menichetti, M., Bartole, R., Ben-Avraham, Z., Tassone, A. & Lippai, H. (2003). Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America). *Tectonics*, 22(6).

Maldonado, V. (2020). Fallas corticales activas de Chile: inferencias de amenaza sísmica a partir de la interpretación de su expresión superficial a escala 1:25.000. Memoria para optar al Título de Geólogo. Escuela de geología, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile.

Maldonado, V., Contreras, M. & Melnick, D. (2021). A comprehensive database of active and potentially-active continental faults in Chile at 1: 25,000 scale. *Scientific Data*, 8(1), 1-13.

Mebarki, A. (2009). A comparative study of different PGA attenuation and error models: case of 1999 Chi-Chi earthquake. *Tectonophysics*, 466(3-4), 300-306.

Melnick, D., Hillemann, C., Jara-Muñoz, J., Garrett, E., Cortés-Aranda, J., Molina, D. & Strecker, M. R. (2019). Hidden holocene slip along the coastal El Yolki fault in central Chile and its possible link with megathrust earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7), 7280-7302.

Minami, T., & Sakai, Y. (1996). Extremely large potential destructiveness of the ground motions measured in the 1995 Kobe earthquake in Japan. XI World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 1587.

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

Mora, C., Comte, D., Russo, R., Gallego, A., & Mocanu, V. (2010). Aysén seismic swarm (January 2007) in southern Chile: Analysis using joint hypocenter determination. *Journal of seismology*, 14(4), 683-691.

Moreno, M. S., Klotz, J., Melnick, D., Echtler, H., & Bataille, K. (2008). Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36–39° S). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(12).

- NEIC-PDE. National Earthquake Information Center Preliminary Determination of Epicenters. *Epicenters (PDE) Bulletin*. <http://earthquake.usgs.gov>
- Pérez-Estay, N. A. (2016). Peligro sísmico asociado a fallas corticales: caso de estudio Falla San Ramón (33.2°-33.7° S). Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Perucca, L., Alvarado, P. & Saez, M. (2015). Neotectonics and seismicity in southern Patagonia. *Geological Journal*, 51(4), 545-559.
- Pinto Morales, L. R. (2016). Determinación de efectos de sitio en las estaciones sismológicas de la región de Tarapacá. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Rivas Medina, Alicia (2014). Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica superior en Ingeniería Topográfica, Geodesia y Cartografía. pp 255.
- Rivas-Medina, A., Aguiar, R., Benito, M. B., Gaspar, J. & Parra, H. (2014). Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19, 201-217.
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56.
- Ruiz, J. A., Hayes, G. P., Carrizo, D., Kanamori, H., Socquet, A., & Comte, D. (2014). Seismological analyses of the 2010 March 11, Pichilemu, Chile M w 7.0 and M w 6.9 coastal intraplate earthquakes. *Geophysical Journal International*, 197(1), 414-434.
- Sandoval, F. B., & De Pascale, G. P. (2020). Slip rates along the narrow Magallanes fault System, Tierra Del Fuego Region, Patagonia. *Scientific reports*, 10(1), 1-13.

Santibáñez, I., Cembrano, J. M., González, G., Aron, F., & Yáñez, G. A. (2013). Crustal Faults in the Chilean Andes: Tectonic significance and implications for geologic hazard. AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 2013, pp. T43A-2614.

Santibáñez Boric, I. V., Cembrano, J., García Pérez, T., Costa, C., Yáñez Carrizo, G. A., Marquardt, C. & González López, G. A. (2019). Crustal Faults in The Chilean Andes: Geological Constraints and Seismic Potential. *Andean Geology*, 46(1), 32-65.

Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., & Litchfield, N. (2013). Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 2993-3011.

Thingbaijam, K. K. S., Martin Mai, P., & Goda, K. (2017). New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2225-2246.

Uyeda, S., & Kanamori, H. (1979). Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B3), 1049-1061.

Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S. & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083-1086.

Villalobos, A., Easton, G., Maksymowicz, A., Ruiz, S., Lastras, G., De Pascale, G. P., & Agurto-Detzel, H. (2020). Active Faulting, Submarine Surface Rupture, and Seismic Migration Along the Liquiñe-Ofqui Fault System, Patagonian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9), e2020JB019946.

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4), 1609-1632.

7. REFERENCIAS

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T. & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.

ANEXO

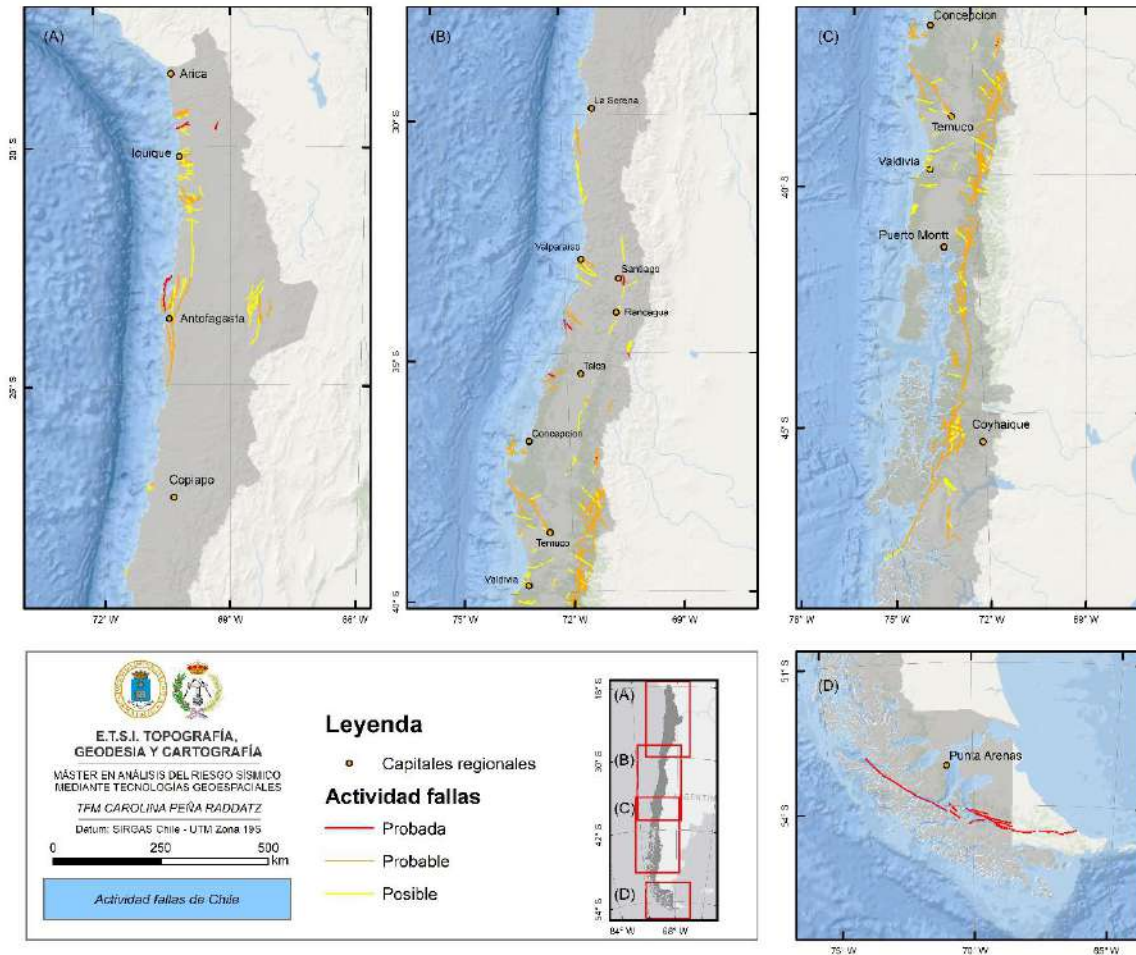


Figura A1. Mapa actividad de las fallas de Chile. Modificado de Maldonado et al., 2021.

Tabla A1. Características generales del Sistema de falla Magallanes-Fagnano (Tomado de Perucca et al., 2015; Sandoval & De Pascale, 2020).

Sistema de falla	Rumbo	Sentido de movimiento	Geometría	Tasa de deslizamiento (mm/año)	Recurrencia grandes eventos (años)
Magallanes-Fagnano	EW (este de Tierra del fuego); NW (oeste de Tierra del Fuego)	Sinistral	Sistema de fallas y lineamientos en "echelón"	10.5 ± 1.5 (Chile); 7.8 ± 1.3 (Argentina)	750-2000

Caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a fallas activas

Tabla A2. Parámetros geométricos de las fallas secundarias y segmentos del SFLO. Z: profundidad máxima alcanzada por la falla, W: ancho del plano de falla, Dr: diferencia de distancia en planta observada entre los puntos en profundidad y en superficie del plano de falla, S: segmento, C: completa, T: traza de falla.

Nombre falla secundaria	Sentido buzamiento	Buzamiento (δ)	Z max (m)	W	Acimut ($^{\circ}$)	Dr (m)	Acimut2 ($^{\circ}$)
Pisagua S1	S	90	30000	30000.0	87.0	1.84E-12	177.0
Salar del Carmen S1	E	80	25000	25385.7	27.3	4.41E+03	117.3
Salar del Carmen S2	E	80	25000	25385.7	12.7	4.41E+03	102.7
Salar del Carmen S3	E	80	25000	25385.7	0.7	4.41E+03	90.7
Salar del Carmen S4	E	80	25000	25385.7	358.7	4.41E+03	88.7
San Ramón S1	E	55	12000	14649.3	345.3	8.40E+03	75.3
San Ramón S2	E	55	12000	14649.3	359.2	8.40E+03	89.2
Pichilemu S1	W	74	24000	24967.2	343.4	6.88E+03	253.4
Pichilemu C2	W	51	24000	30882.2	318.3	1.94E+04	228.3
El Yolki S1	SW	90	25000	25000.0	304.8	1.53E-12	214.8
Neltume S1	E	67	12000	13036.3	12.6	5.09E+03	102.6
Río Cuervo S1	E	75	10000	10352.8	13.2	2.68E+03	103.2
Río Cuervo S2	E	75	10000	10352.8	357.2	2.68E+03	87.2
ZFLO S1	E	80	12000	12185.1	57.9	2.12E+03	147.9
ZFLO S2	E	80	12000	12185.1	26.0	2.12E+03	116.0
ZFLO S3	E	80	12000	12185.1	19.5	2.12E+03	109.5

n° traza del SFLO	Buzamiento (δ)	Z max (m)	W	Acimut ($^{\circ}$)	Dr (m)	Acimut2 ($^{\circ}$)
T1	90	12000	12000	32.8	0	302.8
T2	90	12000	12000	5.7	0	275.7
T3	90	12000	12000	25.0	0	295.0
T4	90	12000	12000	4.5	0	274.5
T5	90	12000	12000	46.7	0	316.7
T6	90	12000	12000	36.6	0	306.6
T7	90	12000	12000	358.7	0	268.7
T8	90	12000	12000	359.9	0	269.9
T9	90	12000	12000	44.3	0	314.3
T10	90	12000	12000	33.7	0	303.7
T11	90	12000	12000	22.3	0	292.3
T12	90	12000	12000	22.8	0	292.8
T13	90	12000	12000	11.1	0	281.1
T14	90	12000	12000	347.9	0	257.9
T15	90	12000	12000	355.5	0	265.5
T16	90	12000	12000	359.2	0	269.2
T17	90	12000	12000	7.4	0	277.4
T18	90	12000	12000	19.2	0	289.2

8. ANEXO

T19	90	12000	12000	5.9	0	275.9
T20	90	12000	12000	2.0	0	272.0
T21	90	12000	12000	21.8	0	291.8
T22	90	12000	12000	0.1	0	270.1
T23	90	12000	12000	9.1	0	279.1
T24	90	12000	12000	15.7	0	285.7
T25	90	12000	12000	14.6	0	284.6
T26	90	12000	12000	358.9	0	268.9
T27	90	12000	12000	10.1	0	280.1
T28	90	12000	12000	7.2	0	277.2
T29	90	12000	12000	32.3	0	302.3
T30	90	12000	12000	4.8	0	274.8
T31	90	12000	12000	55.4	0	325.4
T32	90	12000	12000	332.1	0	242.1
T33	90	12000	12000	12.4	0	282.4
T34	90	12000	12000	52.4	0	322.4
T35	90	12000	12000	9.6	0	279.6
T36	90	12000	12000	8.6	0	278.6

Caracterización de la peligrosidad sísmica en Chile asociada a fallas activas

Tabla A3. Coordenadas geométricas de los planos de falla. Donde dx: diferencia en la coordenada X, dy: diferencia en coordenada Y, prof: vértices en profundidad, S: segmento, C: completa, T: traza de falla.

WGS84										
-										
UTM19S										
Nombre falla principal	Inicio		Fin		dx (m)	dy (m)	Xi (prof)	Yi (prof)	Xf (prof)	Yf (prof)
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)						
Pisagua	375857	7828588	402092	7844245	1345.0	-2253.8	377202	7826335	403437	7841991
Bajo Molle	393308	7752666	382013	7755359	7721.1	32377.7	401029	7785043	389734	7787737
Mejillones	346860	7407971	346576	7445398	10724.8	81.5	357585	7408052	357301	7445480
Salar del Carmen	361861	7367035	377796	7411028	4144.7	-1501.2	366006	7365534	381940	7409527
Chomache	395066	7655161	385228	7666608	6096.4	5239.4	401162	7660401	391325	7671847
San Ramón	359097	6278831	356924	6306526	11963.2	938.8	371061	6279770	368887	6307465
Pichilemu	235823	6179310	218821	6200464	-13098.6	-10527.8	222724	6168782	205722	6189936
El Yolki	192963	6071014	182996	6075222	0.0	0.0	192963	6071014	182996	6075222
Liquiñe	255922	5582217	258785	5613755	2107.3	-191.3	258029	5582026	260893	5613564
Neltume	245064	5589420	249507	5600346	4718.5	-1918.8	249782	5587501	254225	5598428
Río Cuervo	180754	4949256	184375	4986414	2666.9	-259.9	183421	4948996	187041	4986155
Punta Cola	184735	4954135	186440	4974935	-1757.4	144.1	182977	4954279	184683	4975079
ZFLO	164401	4914306	166833	4924131	2054.0	-508.3	166455	4913798	168887	4923623
SFMF S1	675923	3955444	512561	3959716	0.0	0.0	675923	3955444	512561	3959716
SFMF S2	512561	3959716	387540	4011665	0.0	0.0	512561	3959716	387540	4011665
SFMF S3	403777	3987211	274673	4066065	0.0	0.0	403777	3987211	274673	4066065
SFMF S4	276402	4050656	185330	4123907	0.0	0.0	276402	4050656	185330	4123907
Nombre falla secundaria	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	dx (m)	dy (m)	Xi (prof)	Yi (prof)	Xf (prof)	Yf (prof)
Pisagua S1	392261	7838434	406526	7839178	9.57E-14	-1.84E-12	392261	7838434	406526	7839178
Salar del Carmen S1	377796	7411028	403228	7460265	3916.6	-2023.0	381712	7409005	407145	7458242
Salar del Carmen S2	403428	7461041	411924	7498845	4300.9	-966.6	407729	7460075	416225	7497879
Salar del Carmen S3	411916	7500284	412628	7556415	4407.8	-55.9	416323	7500228	417036	7556359

8. ANEXO

Salar del Carmen S4	412314	7557299	411084	7611312	4407.0	100.3	416721	7557399	415491	7611412
San Ramón S1	360325	6290162	355990	6306734	8129.1	2126.1	368454	6292288	364119	6308860
San Ramón S2	357606	6279253	357437	6290674	8401.6	124.5	366008	6279377	365839	6290799
Pichilemu S1	224820	6178324	220526	6192742	-6595.6	-1964.3	218225	6176360	213931	6190778
Pichilemu C1	248468	6167228	218821	6200464	-14503.2	-12937.2	233965	6154290	204318	6187527
El Yolki S1	194877	6068191	187426	6073378	0.0	0.0	194877	6068191	187426	6073378
Neltume S1	249507	5600346	250856	5606391	4971.4	-1109.6	254478	5599237	255827	5605281
Río Cuervo S1	184375	4986414	188280	5003089	2608.9	-611.1	186983	4985803	190889	5002478
Río Cuervo S2	182238	4918701	180754	4949256	2676.3	130.0	184915	4918831	183430	4949386
ZFLO S1	31394	4675862	72897	4701881	1123.9	-1792.8	32518	4674069	74021	4700088
ZFLO S2	72897	4701881	114036	4786106	1901.2	-928.6	74798	4700952	115937	4785178
ZFLO S3	114036	4786106	136741	4850313	1994.9	-705.4	116031	4785401	138736	4849608

n° traza del SFLO	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	dx (m)	dy (m)	Xi (prof)	Yi (prof)	Xf (prof)	Yf (prof)
T1	140067	4831256	162169	4865583	0	0	140067	4831256	162169	4865583
T2	140155	4859211	144890	4906718	0	0	140155	4859211	144890	4906718
T3	138714	4851738	164787	4907610	0	0	138714	4851738	164787	4907610
T4	145531	4919255	150158	4977501	0	0	145531	4919255	150158	4977501
T5	165978	4908866	218448	4958259	0	0	165978	4908866	218448	4958259
T6	163064	4937665	186025	4968533	0	0	163064	4937665	186025	4968533
T7	208024	4947103	206592	5008399	0	0	208024	4947103	206592	5008399
T8	193267	4940143	193136	5006350	0	0	193267	4940143	193136	5006350
T9	164045	4978250	185127	4999836	0	0	164045	4978250	185127	4999836
T10	191480	5011730	208087	5036597	0	0	191480	5011730	208087	5036597
T11	184957	5008984	197939	5040562	0	0	184957	5008984	197939	5040562
T12	202888	5045134	212924	5069055	0	0	202888	5045134	212924	5069055
T13	215158	5075508	231205	5157313	0	0	215158	5075508	231205	5157313
T14	231559	5160258	221240	5208332	0	0	231559	5160258	221240	5208332
T15	219715	5215772	215342	5271529	0	0	219715	5215772	215342	5271529
T16	215453	5287882	214813	5331219	0	0	215453	5287882	214813	5331219

T17	214813	5331219	221478	5382488	0	0	214813	5331219	221478	5382488
T18	204039	5329072	215612	5362292	0	0	204039	5329072	215612	5362292
T19	222887	5386329	225353	5410315	0	0	222887	5386329	225353	5410315
T20	225353	5410315	226426	5440705	0	0	225353	5410315	226426	5440705
T21	231610	5417150	250448	5464364	0	0	231610	5417150	250448	5464364
T22	234133	5450843	234164	5476348	0	0	234133	5450843	234164	5476348
T23	233759	5490239	241040	5535914	0	0	233759	5490239	241040	5535914
T24	244937	5537296	255903	5576403	0	0	244937	5537296	255903	5576403
T25	244659	5550626	248869	5566835	0	0	244659	5550626	248869	5566835
T26	260704	5624439	260380	5641838	0	0	260704	5624439	260380	5641838
T27	258217	5645288	262052	5666872	0	0	258217	5645288	262052	5666872
T28	288713	5689849	293515	5727656	0	0	288713	5689849	293515	5727656
T29	270929	5700213	291087	5732112	0	0	270929	5700213	291087	5732112
T30	270929	5700213	272928	5724191	0	0	270929	5700213	272928	5724191
T31	276329	5730881	297061	5745207	0	0	276329	5730881	297061	5745207
T32	314769	5724701	296776	5758642	0	0	314769	5724701	296776	5758642
T33	293406	5743715	299189	5770093	0	0	293406	5743715	299189	5770093
T34	300565	5761437	316100	5773404	0	0	300565	5761437	316100	5773404
T35	284063	5756382	286772	5772400	0	0	284063	5756382	286772	5772400
T36	294902	5765807	299435	5795726	0	0	294902	5765807	299435	5795726

8. ANEXO

Tabla A4. Terremoto máximo de las fallas secundarias y trazas del SFLO según diferentes regresiones. S: segmento, C: completa, T: traza de falla.

FALLAS SECUNDARIAS						
Nombre Falla	Weels & Coppersmith, 1994	Leonard, 2010	Stirling <i>et al.</i> , 2013	Brengman <i>et al.</i> , 2019	PROMEDIO	Desviación
Pisagua S1	6.4	6.1	6.3	6.2	6.2	0.13
Salar del Carmen S1	7.2	7.1	6.9	7.1	7.1	0.09
Salar del Carmen S2	7.0	6.8	6.9	6.8	6.9	0.07
Salar del Carmen S3	7.2	7.1	6.9	7.1	7.1	0.10
Salar del Carmen S4	7.1	7.1	6.9	7.1	7.1	0.09
San Ramón S1	6.5	6.2	6.4	6.3	6.4	0.12
San Ramón S2	6.3	5.9	6.1	6.0	6.1	0.15
Pichilemu S1	6.4	6.1	6.7	6.1	6.3	0.28
Pichilemu C2	7.0	6.9	6.9	6.9	6.9	0.06
El Yolki S1	6.1	5.8	6.6	5.7	6.0	0.41
Neltume S1	6.0	5.6	6.2	5.8	5.9	0.26
Río Cuervo S1	6.5	6.4	6.6	6.4	6.5	0.12
Río Cuervo S2	6.8	6.8	6.9	6.7	6.8	0.05
ZFLO S1	7.1	7.1	7.0	7.0	7.1	0.06
ZFLO S2	7.4	7.6	7.3	7.4	7.4	0.14
ZFLO S3	7.2	7.4	7.2	7.2	7.2	0.10

SFLO						
Nombre Falla	Weels & Coppersmith, 1994	Leonard, 2010	Stirling <i>et al.</i> , 2013	Brengman <i>et al.</i> , 2019	PROMEDIO	Desviación
T1	7.0	7.0	7.0	6.9	7.0	0.05
T2	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	0.06
T3	7.2	7.3	7.1	7.1	7.2	0.09
T4	7.1	7.3	7.1	7.1	7.2	0.08
T5	7.2	7.4	7.2	7.2	7.3	0.11
T6	6.9	7.0	6.9	6.9	6.9	0.04
T7	7.2	7.3	7.1	7.1	7.2	0.09
T8	7.2	7.4	7.1	7.2	7.2	0.10
T9	6.8	6.8	6.8	6.7	6.8	0.05
T10	6.8	6.8	6.8	6.7	6.8	0.05
T11	6.9	6.9	6.9	6.8	6.9	0.04
T12	6.7	6.7	6.8	6.6	6.7	0.06
T13	7.3	7.5	7.2	7.3	7.3	0.13
T14	7.1	7.1	7.0	7.0	7.1	0.06
T15	7.1	7.2	7.1	7.1	7.1	0.08
T16	7.0	7.1	7.0	6.9	7.0	0.05
T17	7.1	7.2	7.1	7.0	7.1	0.07
T18	6.9	6.9	6.9	6.8	6.9	0.04

T19	6.7	6.6	6.8	6.6	6.7	0.07
T20	6.8	6.8	6.9	6.7	6.8	0.05
T21	7.1	7.2	7.0	7.0	7.1	0.06
T22	6.7	6.7	6.8	6.6	6.7	0.07
T23	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	0.05
T24	7.0	7.0	7.0	6.9	7.0	0.04
T25	6.5	6.4	6.6	6.4	6.5	0.12
T26	6.5	6.4	6.6	6.4	6.5	0.11
T27	6.7	6.6	6.7	6.6	6.6	0.08
T28	6.9	7.0	6.9	6.9	6.9	0.04
T29	6.9	7.0	6.9	6.9	6.9	0.04
T30	6.7	6.6	6.8	6.6	6.7	0.07
T31	6.7	6.7	6.8	6.6	6.7	0.07
T32	6.9	7.0	6.9	6.9	6.9	0.04
T33	6.8	6.7	6.8	6.7	6.7	0.06
T34	6.6	6.5	6.7	6.5	6.6	0.10
T35	6.5	6.3	6.6	6.4	6.5	0.12
T36	6.8	6.8	6.8	6.7	6.8	0.05

Tabla A5. Parámetros sísmicos de las fallas principales, secundarias y trazas del SFLO. S: segmento, C: completa, T: traza de falla.

Nombre Falla	û medio (mm/año)	M₀ [dina × cm × yr⁻¹]	Mmax	M₀ (Mmax)	Recurrencia (años)
Pisagua	0.6	1.5E+23	7.0	3.5E+26	2341
Bajo Molle	0.4	5.4E+22	7.0	3.5E+26	6525
Mejillones	0.6	1.7E+23	7.0	3.5E+26	2044
Salar del Carmen	0.4	1.4E+23	7.0	3.2E+26	2241
Chomache	0.6	7.8E+22	7.0	3.5E+26	4555
San Ramón	0.4	5.7E+22	7.5	2.0E+27	35243
Pichilemu	0.6	1.3E+23	7.0	3.5E+26	2703
El Yolki	5.5	4.5E+23	6.1	1.8E+25	40
Liquiñe	18.8	2.2E+24	7.0	3.5E+26	163
Neltume	3.0	1.4E+23	6.3	3.1E+25	222
Río Cuervo	3.0	3.5E+23	6.9	2.6E+26	750
Punta Cola	3.0	1.8E+23	6.6	8.3E+25	450
ZFLO	23.1	8.6E+23	6.2	2.3E+25	27
SF MF S1	7.8	5.7E+24	7.7	4.0E+27	704
SF MF S2	10.5	6.4E+24	7.7	4.0E+27	622
SF MF S3	10.5	7.1E+24	7.7	3.5E+27	490
SF MF S4	10.5	5.5E+24	7.5	2.2E+27	393

8. ANEXO

Nombre Falla	\dot{u} medio (mm/año)	M_o [dina \times cm \times yr-1]	Mmax	M_o (Mmax)	Recurrencia
Pisagua S1	0.6	7.1E+22	6.2	2.6E+25	370
Salar del Carmen S1	0.4	1.7E+23	7.1	4.5E+26	2639
Salar del Carmen S2	0.4	1.2E+23	6.9	2.2E+26	1864
Salar del Carmen S3	0.4	1.7E+23	7.1	4.6E+26	2676
Salar del Carmen S4	0.4	1.6E+23	7.1	4.2E+26	2579
San Ramón S1	0.4	3.0E+22	6.4	4.5E+25	1486
San Ramón S2	0.4	2.0E+22	6.1	1.5E+25	756
Pichilemu S1	0.6	6.2E+22	6.3	3.4E+25	553
Pichilemu C2	0.6	2.3E+23	7.0	3.5E+26	1565
El Yolki S1	5.5	3.8E+23	6.0	1.3E+25	34
Neltume S1	3.0	7.3E+22	5.9	9.3E+24	128
Río Cuervo S1	3.0	1.6E+23	6.5	6.1E+25	385
Río Cuervo S2	3.0	2.8E+23	6.8	1.8E+26	631
ZFLO S1	13.8	2.5E+24	7.1	4.3E+26	175
ZFLO S2	8.0	2.7E+24	7.4	1.4E+27	526
ZFLO S3	13.8	3.4E+24	7.2	7.9E+26	231

n° traza del SFLO	\dot{u} medio (mm/año)	M_o [dina \times cm \times yr-1]	Mmax	M_o (Mmax)	Recurrencia
T1	0.6	8.1E+22	7.0	3.1E+26	3811
T2	3.0	5.2E+23	7.0	4.1E+26	799
T3	0.6	1.2E+23	7.2	6.6E+26	5422
T4	3.0	6.3E+23	7.2	6.0E+26	949
T5	0.6	1.4E+23	7.3	8.8E+26	6195
T6	0.6	7.6E+22	6.9	2.8E+26	3622
T7	3.0	6.6E+23	7.2	6.6E+26	989
T8	3.0	7.2E+23	7.2	7.6E+26	1056
T9	0.6	6.0E+22	6.8	1.8E+26	2942
T10	0.6	5.9E+22	6.8	1.7E+26	2920
T11	0.6	6.8E+22	6.9	2.2E+26	3270
T12	3.0	2.8E+23	6.7	1.3E+26	474
T13	3.0	9.0E+23	7.3	1.2E+27	1286
T14	3.0	5.3E+23	7.1	4.3E+26	819
T15	3.0	6.0E+23	7.1	5.5E+26	914
T16	3.0	4.7E+23	7.0	3.4E+26	735
T17	3.0	5.6E+23	7.1	4.8E+26	855
T18	3.0	3.8E+23	6.9	2.3E+26	615
T19	3.0	2.6E+23	6.7	1.2E+26	445
T20	3.0	3.3E+23	6.8	1.8E+26	543
T21	0.6	1.0E+23	7.1	4.6E+26	4596
T22	3.0	2.8E+23	6.7	1.3E+26	467

T23	3.0	5.0E+23	7.0	3.9E+26	777
T24	3.0	4.4E+23	7.0	3.1E+26	696
T25	3.0	1.8E+23	6.5	5.9E+25	326
T26	3.0	1.9E+23	6.5	6.3E+25	337
T27	3.0	2.4E+23	6.6	9.7E+25	410
T28	3.0	4.1E+23	6.9	2.7E+26	659
T29	0.6	7.5E+22	6.9	2.7E+26	3562
T30	3.0	2.6E+23	6.7	1.2E+26	444
T31	0.6	5.0E+22	6.7	1.3E+26	2522
T32	0.6	7.6E+22	6.9	2.8E+26	3617
T33	3.0	2.9E+23	6.7	1.4E+26	491
T34	0.6	3.9E+22	6.6	7.9E+25	2035
T35	3.0	1.8E+23	6.5	5.6E+25	318
T36	3.0	3.3E+23	6.8	1.8E+26	541