



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

NUEVO PELIGRO SÍSMICO PARA CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO ADOLFO NÚÑEZ LAZCANO

**PROFESOR GUÍA:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF**

**PROFESOR CO-GUÍA:
DIANA COMTE SELMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VICTOR CONTRERAS LUARTE**

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL DE 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA
POR: IGNACIO NÚÑEZ LAZCANO
FECHA: 17 DE ABRIL DE 2014
PROF. GUÍA: SR. RUBÉN BOROSCHEK K.

NUEVO PELIGRO SÍSMICO PARA CHILE.

En este trabajo se ha realizado un estudio de Peligro Sísmico para Chile considerando como parámetros de intensidad sísmica la aceleración máxima del suelo y, por primera vez a nivel nacional, utilizando parámetros de aceleración espectral. Esto último tiene como ventaja que permite generar espectros de aceleraciones de peligro uniforme.

Como primera etapa se recopilaron datos sismológicos necesarios para la caracterización de las zonas sismogénicas. Para ello se consideró una base de datos de sismos de contacto entre placas o interplaca y sismos intraplaca de profundidad intermedia. Luego se definieron y caracterizaron nuevas zonas sismogénicas a lo largo del territorio nacional diferenciando por sismos interplaca e intraplaca profundidad intermedia. Posteriormente se definieron las leyes de Gutenberg-Richter que caracterizan a cada una de las zonas y se establecieron los parámetros a y b asociados a este tipo de curvas con dos metodologías distintas: mínimos cuadrados y máxima verosimilitud. También, se modeló la geometría de cada fuente sismogénica estimando la geometría de la zona de contacto entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, y se comparó con el modelo de Tassara et al. (2006). Se generaron 3 modelos distintos tomando la geometría superior como base.

Se utilizaron curvas de atenuación espectrales modernas aplicables a zonas de subducción, incluyendo curvas generadas con datos globales y también el modelo de atenuación local desarrollado por Contreras y Boroschek (2009, 2012). Aplicando la metodología probabilística de Cornell (1968) y Esteva (1970), se determinaron las probabilidades de excedencia de las aceleraciones en roca, generando mapas de isoaceleraciones espectrales para distintos períodos de retorno y también espectros de peligro uniforme. La incertidumbre propia del proceso se consideró mediante el uso de árboles lógicos de decisión.

Los resultados se presentan en mapas de aceleración con distinta probabilidad de ser excedidas en un período de tiempo dado (2% y 10% en 50 años de vida útil) y para distintos períodos estructurales ($T= 0, 0.2$ y 1 segundo). Finalmente, se efectúa una comparación entre los espectros obtenidos y el nivel de amenaza sísmica establecido en la normativa sísmica nacional. Se observa que en la gran mayoría de las ciudades el espectro del DS61 predice aceleraciones mayores para períodos entre 0.1 y 0.4 s aproximadamente, siendo superado por los espectros obtenidos en este estudio para períodos mayores que 0.4 s.

*" El mejor nunca gana,
porque el mejor nunca compite"*

Facundo Cabral

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el último suspiro de mi etapa Universitaria, una etapa que trajo consigo muchos momentos que quedarán grabados en la experiencia y madurez adquirida en estos siete años de aprendizaje constante.

Quiero partir agradeciendo a mis padres Manuel y Cristina, su apoyo y cariño incondicional hicieron que este viaje fuera aún más maravilloso.

A mi mujer Elizabeth por su alegría y respaldo, en resumen su amor absoluto, que me mantiene día a día con la convicción de que la vida junto a ella es la mejor decisión que he tomado.

A los que de alguna u otra forma colaboraron en este trabajo, a mis profesores Rubén Boroschek y Diana Comte, por su disposición constante a entregar las herramientas y conocimientos para que el resultado de este trabajo fuera óptimo, a Víctor Contreras por su apoyo y siempre buena voluntad para resolver consultas y aportar su gran conocimiento en la materia, a Ariel Hernández por su conocimiento computacional que mas de algún apuro resolvió, a mi hermano Ítalo, mi prima Natalia y mi madrina Mónica por su compañía voluntaria en las noches de trabajo, y a Carlos Poblete colega de estadio y persona atesorable, que desde un comienzo hizo sentir su apoyo.

Es un agrado y un orgullo haber compartido con grandes amigos, Sebastián, Cristóbal, Carlos H., Raúl, Héctor, Jorge, Javier, la amistad es lo más lindo pues es una familia cuyos individuos se escogen a voluntad.

Soy feliz, pues me siento dichoso de la cosecha que he acumulado en este viaje y no me queda más que utilizar la frase de un grande para expresar mi goce....

GRACIAS... TOTALES!

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.5 ALCANCES.....	4
CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....	5
2.1 MARCO SISMOTÉCTONICO.....	5
2.1.2 Tectónica de Placas.....	5
2.2 ANTECEDENTES CONFECCIÓN CATÁLOGO.....	8
2.3 ANTECEDENTES DEL PELIGRO SÍSMICO.....	9
2.4 ANTECEDENTES SOBRE REGIONALIZACIÓN SÍSMICA.....	10
2.4.1 Regionalización de Gajardo y Lomnitz (1960).....	10
2.4.2 Regionalización de Welkner (1964).....	10
2.4.3 Regionalización de Labbé (1976).....	11
2.4.4 Regionalización de Barrientos (1980).....	12
2.4.5 Regionalización de Andrés Martin (1990).....	12
2.4.6 Regionalización de Davor Susa (2004).....	13
2.5 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO.....	14
2.5.1 Método Determinístico.....	14
2.5.2 Método Probabilístico.....	15
2.6 ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES.....	19
CAPÍTULO III: ZONIFICACIÓN Y CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.....	21
3.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO.....	21
3.2 BASE DE DATOS.....	23
3.2.1 Generación de Base de Datos.....	23
3.2.2 Homologación Escala de Magnitud.....	30
3.2.3 Identificación de las Fuentes Sismogénicas.....	35
3.2.4 Complejidad del Catálogo.....	43
3.3 GENERACIÓN DE LAS CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.....	57
3.3.1 Cálculo de parámetros asociados a las Curvas de Recurrencia Sísmica.....	57
3.3.2 Determinación Magnitudes Máximas Esperadas.....	63

CAPÍTULO IV: MODELO DE LAS FUENTES Y SELECCIÓN DE CURVAS DE ATENUACIÓN.....	66
4.1 DEFINICIÓN FUENTES SÍSMOGÉNICAS.....	66
4.1.1 Modelo de Área de Ruptura.	72
4.2 LEYES DE ATENUACIÓN.....	74
CAPÍTULO V: MÉTODO DE CORNELL-ESTEVA Y GENERACIÓN MAPA DE PELIGRO SÍSMICO.	83
5.1 CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO.....	88
5.2 PROGRAMA CRISIS 2007 V7.6.....	88
5.3 ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES.	90
5.4 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO.....	91
5.4.1 Mapas.	91
5.4.2 Espectros de Peligro Uniforme.....	100
5.4.3 Espectros Decreto Supremo 61 y NCH 2745.....	107
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	112
REFERENCIAS.	125
ANEXO A: TEORÍA DE LAS PROBABILIDADES UTILIZADAS.	128
A.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ASOCIADOS A GUTENBERG-RICHTER.....	128
A.1.1 Máxima Verosimilitud.....	128
A.2 CÁLCULO DE LA INTEGRAL DE PELIGRO SÍSMICO: FUENTE PUNTUAL.	136
ANEXO B: FIGURAS Y TABLAS.....	141
B.1 ZONIFICACIÓN Y CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.....	141
B.1.1 ZONA 1.....	141
B.1.2 ZONA 2.....	150
B.1.3 ZONA 3.....	159
B.1.4 ZONA 4.....	168
B.1.5 ZONA 5.....	177
B.1.6 ZONA 6.....	186
B.1.7 ZONA 7.....	195
B.1.8 ZONA 8.....	204
B.1.9 ZONA AUSTRAL.....	210
B.2 PERFILES DE SISMICIDAD.....	213
B.3 GEOMETRÍAS DEL PLANO DE SUBDUCCIÓN UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.....	233

B.4	COMPARACIÓN GEOMETRÍA BASE DE ESTE ESTUDIO CON TASSARA ET AL. (2006).	259
B.5	ESPECTROS CAPITALES PROVINCIALES.	285
B.6	COMPARACIÓN ESPECTROS CON DS61 Y NCH 2745.	325
B.7	MAPAS DE ISOACELERACIONES PARA SA(0.2S) Y SA(1S) PARA 475 Y 2475 AÑOS DE PERÍODO DE RETORNO.	345

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Zonas definidas según la Regionalización de Gajardo y Lomnitz (1960)	10
Tabla 2: Zonas definidas según la Regionalización de Welkner (1964)	11
Tabla 3: Zonas definidas según la Regionalización de Labbé (1976)	11
Tabla 4: Zonas definidas según la Regionalización de Barrientos (1980)	12
Tabla 5: Zonas definidas según la Regionalización de Martin (1990)	13
Tabla 6: Zonas definidas según la Regionalización de Susa (2004)	13
Tabla 7: Zonas utilizadas en este estudio definidas según Susa (2004)	21
Tabla 8: Distribución de Magnitudes Ms Catálogo SISRA	25
Tabla 9: Distribución de Magnitudes mb Catálogo SISRA	25
Tabla 10: Distribución de Magnitudes mb Catálogo NEIC	26
Tabla 11: Distribución de Magnitudes Ms Catálogo NEIC	28
Tabla 12: Magnitudes Mw calculadas con la relación de Dorbath(1990)	32
Tabla 13: Resumen de homologación Final	34
Tabla 14: Clasificación de los Sismos según fuente Sismogénica	37
Tabla 15: Años de Completitud del Catálogo para todo Chile	44
Tabla 16: Años de Completitud del Catálogo para las Zonas 1-4	47
Tabla 17: Años de Completitud del Catálogo para las Zona 5 – Zona Austral	48
Tabla 18: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca para todo Chile	49
Tabla 19: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia para todo Chile	52
Tabla 20: Años de Completitud del Catálogo por Fuentes: Subducción Interplaca e Intraplaca-Profundidad Intermedia, para las Zonas 1-4	55
Tabla 21: Años de Completitud del Catálogo por Fuentes: Subducción Interplaca e Intraplaca-Profundidad Intermedia, para las Zonas 1-7	56
Tabla 22: Información Gutenberg-Richter – Zona: Chile	60
Tabla 23: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona:Chile....	61
Tabla 24: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona:Chile....	62
Tabla 25: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Todo el Catálogo	64
Tabla 26: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Sismos Subducción Interplaca.....	64
Tabla 27: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Sismos Subducción Intraplaca.....	65
Tabla 28: Relaciones de Atenuación utilizadas en este estudio	76
Tabla 29: Parámetros resultantes para los espectros de Peligro Sísmico; 475 años Período de Retorno	103
Tabla 30: Parámetros resultantes para los espectros de Peligro Sísmico; 2475 años Período de Retorno	106
Tabla 31: Definición Espectro de Diseño (SDI).....	108
Tabla 32: Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433.....	108

Tabla 33: Rango de variación del parámetro b de Gutenberg-Richter para Zonas Subducción Interplaca	112
Tabla 34: Rango de variación del parámetro b de Gutenberg-Richter para Zonas Subducción Intraplaca	112
Tabla 35: Diferencias entre límites de la Zona 1	114
Tabla 36: Análisis de Sensibilidad de Magnitud Máxima; Caso $M1=M2=E(M)$	115
Tabla 37: Análisis de Sensibilidad de Magnitud Máxima; Caso Distribución Gaussiana truncada	115
Tabla 38: Diferencias% entre SA de Máxima Verosimilitud y Mínimos Cuadrado para Concepción; PR=475 años	121

INDICE DE TABLAS ANEXO B

	Pág.
Tabla B 1: Años de Completitud del Catálogo para Zona 1	141
Tabla B 2: Información Gutenberg-Richter – Zona 1	143
Tabla B 3: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 1	144
Tabla B 4: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 1	146
Tabla B 5: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia Zona 1	147
Tabla B 6: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 1	149
Tabla B 7: Años de Completitud del Catálogo para Zona 2	150
Tabla B 8: Información Gutenberg-Richter – Zona 2	152
Tabla B 9: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 2	153
Tabla B 10: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 2	155
Tabla B 11: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia Zona 2	156
Tabla B 12: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 2	158
Tabla B 13: Años de Completitud del Catálogo para Zona 3	159
Tabla B 14: Información Gutenberg-Richter – Zona 3	161
Tabla B 15: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 3 ..	162
Tabla B 16.: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 3	164
Tabla B 17: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia Zona 3	165
Tabla B 18: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 3	167
Tabla B 19: Años de Completitud del Catálogo para Zona 4	168
Tabla B 20: Información Gutenberg-Richter – Zona 4	170
Tabla B 21: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 4 ..	171
Tabla B 22: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 4	173
Tabla B 23: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia Zona 4	174

Tabla B 24: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona.....	176
Tabla B 25: Años de Completitud del Catálogo para Zona 5.....	177
Tabla B 26: Información Gutenberg-Richter – Zona 5	179
Tabla B 27: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 5 ..	180
Tabla B 28: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 5.....	182
Tabla B 29: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca– Profundidad Intermedia Zona 5.....	183
Tabla B 30: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 5.....	185
Tabla B 31: Años de Completitud del Catálogo para Zona 6.....	186
Tabla B 32: Información Gutenberg-Richter – Zona 6	188
Tabla B 33: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 6 ..	189
Tabla B 34: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 6.....	191
Tabla B 35: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca– Profundidad Intermedia Zona 6.....	192
Tabla B 36: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 6.....	194
Tabla B 37: Años de Completitud del Catálogo para Zona 7.....	195
Tabla B 38: Información Gutenberg-Richter – Zona 7	197
Tabla B 39: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 7 ..	198
Tabla B 40: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 7.....	200
Tabla B 41: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca– Profundidad Intermedia Zona 7.....	201
Tabla B 42: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 7.....	203
Tabla B 43: Años de Completitud del Catálogo para Zona 8.....	204
Tabla B 44: Información Gutenberg-Richter – Zona 8	206
Tabla B 45: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 8 ..	207
Tabla B 46: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 8.....	209
Tabla B 47: Años de Completitud del Catálogo para Zona Austral.....	210
Tabla B 48: Información Gutenberg-Richter – Zona Austral.....	212

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Tectónica de placas correspondiente a Chile.....	6
Figura 2: Esquema de la subducción sudamericana.....	6
Figura 3: Principales Fuentes Sismogénicas a lo largo Chile: (1) Superficial o Cortical, (2) Ante-Arco o Outer-Rise, (3) Subducción Interplaca, (4) Subducción Intraplaca de Profundidad Intermedia, (5) Subducción Intraplaca Profundo.....	8
Figura 4: Esquema Método Determinístico (DSHA).....	15
Figura 5: Esquema Método Probabilístico (PSHA).....	17
Figura 6: Esquema Árbol Lógico de Decisiones.....	20
Figura 7: Zonas utilizadas en este estudio definidas según Susa (2004).....	22
Figura 8: Distribución de Magnitudes mb Catálogo NEIC.....	27
Figura 9: Distribución de Magnitudes Ms Catálogo NEIC.....	28
Figura 10: Relación entre escala de magnitud Ms y Mw.....	30
Figura 11: Relación entre escala de magnitud mb y Mw.....	33
Figura 12: Relación entre Magnitudes Mw y ML (Contreras, 2009).....	34
Figura 13: Sismicidad total de la Zona de Estudio (S.P.A.).....	35
Figura 14: Ejemplo de perfil de Clasificación Latitud° -20.79 Poblete J. (2008).....	36
Figura 15: Sismicidad Superficial Cortical (S.P.A.).....	38
Figura 16: Sismicidad Superficial Ante-Arco (S.P.A.).....	39
Figura 17: Sismicidad Subducción-Interplaca (S.P.A.).....	40
Figura 18: Sismicidad Subducción-Intraplaca-Profundidad Intermedia (S.P.A.).....	41
Figura 19: Sismicidad Subducción-Intraplaca-Profundo (S.P.A.).....	42
Figura 20: Distribución de Sismos en Chile.....	44
Figura 21: Histograma de Sismos en Chile.....	45
Figura 22: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona: Chile.....	46
Figura 23: Distribución de Sismos Subducción Interplaca en Chile.....	49
Figura 24: Histograma de Sismos Subducción Interplaca en Chile.....	50
Figura 25: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona: Chile.....	51
Figura 26: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia en Chile.....	52
Figura 27: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia en Chile.....	53
Figura 28: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona:Chile.....	54
Figura 29: Curva Recurrencia Sísmica –Zona: Chile.....	60
Figura 30: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona: Chile...	61
Figura 31: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona: Chile....	62
Figura 32: Esquema de los polígonos que definen los perfiles de sismicidad de la Zona Norte.....	68
Figura 33: Perfil de sismicidad utilizado para la definición de la Geometría.....	68

Figura 34: Geometría fuentes sísmicas consideradas en software Crisis 2007	69
Figura 35: Perfil de sismicidad que muestra el segmento sub-horizontal	69
Figura 36: Geometría en Planta de las Fuentes Interplaca e Intraplaca de las distintas Zonas	70
Figura 37: Geometría de la superficie de subducción 3-D generado con los perfiles de sismicidad	70
Figura 38: Perfil con las 3 Geometrías Utilizadas	71
Figura 39: Esquema distancias fuente-sitio	72
Figura 40: Regresión Papazachos et al(2004)	73
Figura 41: Atenuación para Sismos Interplaca, H=30 [km].....	78
Figura 42: Atenuación para Sismo Intraplaca, H=60 [km].	79
Figura 43: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca Mw=8;H=30 [km];Rrup=35 [km]... 80	
Figura 44: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca Mw=8;H=30 [km];Rrup=50 [km]... 80	
Figura 45: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca Mw=8;H=30 [km];Rrup=120 [km]. 81	
Figura 46: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca Mw=8;H=60 [km];Rrup=65 [km]... 81	
Figura 47: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca Mw=8;H=60 [km];Rrup=100 [km]. 82	
Figura 48: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca Mw=8;H=60 [km];Rrup=200 [km]. 82	
Figura 49: Curva de atenuación del movimiento (log y) para M=m2 a diferentes distancia r (r1, r2, r3, rN) (Camacho & Benito-RESIS II, 2008).....	87
Figura 50: Grilla de Sitios equiespaciadas 0.2°; Norte Grande.....	89
Figura 51: Árbol lógico de decisiones utilizado en este estudio	90
Figura 52: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=475 años; GR: MMC.....	92
Figura 53: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=475 años; GR: MMC.....	93
Figura 54: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=475 años; GR: MMC.....	93
Figura 55: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Sur para PR=475 años; GR: MMC.....	94
Figura 56: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=475 años; GR: MV.....	94
Figura 57: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=475 años; GR: MV	95
Figura 58: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=475 años; GR: MV	95
Figura 59: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Sur para PR=475 años; GR: MV	96
Figura 60: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=2475 años; GR: MMC	96
Figura 61: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=2475 años; GR: MMC	97

Figura 62: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MMC	97
Figura 63: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MMC	98
Figura 64: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=2475 años; GR: MV.....	98
Figura 65: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=2475 años; GR: MV.....	99
Figura 66: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MV.....	99
Figura 67: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MV.....	100
Figura 68: Espectro de Aceleración de Iquique; Período de Retorno 475 años.	101
Figura 69: Espectro de Aceleración de Valparaíso; Período de Retorno 475 años.	101
Figura 70: Espectro de Aceleración de Santiago; Período de Retorno 475 años.	102
Figura 71: Espectro de Aceleración de Chillán; Período de Retorno 475 años.	102
Figura 72 Espectro de Aceleración de Concepción; Período de Retorno 475 años.	103
Figura 73: Espectro de Aceleración de Iquique; Período de Retorno 2475 años.	104
Figura 74: Espectro de Aceleración de Valparaíso; Período de Retorno 2475 años.	104
Figura 75: Espectro de Aceleración de Santiago; Período de Retorno 2475 años.	105
Figura 76: Espectro de Aceleración de Chillán; Período de Retorno 475 años.	105
Figura 77 Espectro de Aceleración de Concepción; Período de Retorno 475 años.	106
Figura 78: Definición Espectro de Aceleración Nch 2745.....	108
Figura 79: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Iquique generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	109
Figura 80: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Valparaíso generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	109
Figura 81: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Santiago generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	110
Figura 82: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Concepción generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	110
Figura 83: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Chillán generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	111
Figura 84:Límite Inferior horizontal de la Zona 1.....	113
Figura 85: Límite Inferior diagonal Zona 1.....	114
Figura 86: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Iquique.....	117
Figura 87: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Valparaíso.....	117
Figura 88: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Santiago	118

Figura 89: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Concepción.....	118
Figura 90: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Chillán	119
Figura 91: Comparación Mapa Isoaceleraciones en términos de PGA para PR=475 años	120
Figura 92: Relación entre Aceleraciones para 475 años y 2475 años de período de retorno	122
Figura 93: Espectros para las distintas Zonas de la Norma Nch 433. Of.1996, mod.2009	123

INDICE DE FIGURAS ANEXO B

Figura B 1: Distribución de Sismos Zona 1	141
Figura B 2: Histograma de Sismos Zona 1.....	142
Figura B 3: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 1.....	142
Figura B 4: Curva Recurrencia Sísmica – Zona 1	143
Figura B 5: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 1	144
Figura B 6: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 1	145
Figura B 7: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 1.....	145
Figura B 8: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 1	146
Figura B 9: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 1	147
Figura B 10: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 1	148
Figura B 11: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 1	148
Figura B 12: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 1.....	149
Figura B 13: Distribución de Sismos Zona 2	150
Figura B 14: Histograma de Sismos Zona 2.....	151
Figura B 15: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 2.....	151
Figura B 16: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 2.....	152
Figura B 17: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 2	153
Figura B 18: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 2.....	154
Figura B 19 Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 2.....	154
Figura B 20: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 2	155
Figura B 21: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 2	156
Figura B 22: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 2	157
Figura B 23: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 2.....	157
Figura B 24: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 2.....	158
Figura B 25: Distribución de Sismos Zona 3	159

Figura B 26: Histograma de Sismos Zona 3.....	160
Figura B 27: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 3.....	160
Figura B 28: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 3.....	161
Figura B 29: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona3	162
Figura B 30: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 3.....	163
Figura B 31: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 3.....	163
Figura B 32: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 3	164
Figura B 33: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 3	165
Figura B 34: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 3	166
Figura B 35: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 3.....	166
Figura B 36: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 3.....	167
Figura B 37: Distribución de Sismos Zona 4	168
Figura B 38: Histograma de Sismos Zona 4.....	169
Figura B 39: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 4.....	169
Figura B 40: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 4.....	170
Figura B 41: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 4	171
Figura B 42: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 4.....	172
Figura B 43: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 4.....	172
Figura B 44: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 4	173
Figura B 45: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 4	174
Figura B 46: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 4	175
Figura B 47: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 4.....	175
Figura B 48: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 4.....	176
Figura B 49: Distribución de Sismos Zona 5	177
Figura B 50: Histograma de Sismos Zona 5.....	178
Figura B 51: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 5.....	178
Figura B 52: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 5.....	179
Figura B 53: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 5	180
Figura B 54: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 5.....	181
Figura B 55: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 5.....	181
Figura B 56: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 5	182
Figura B 57: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 5	183
Figura B 58: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 5	184

Figura B 59: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 5	184
Figura B 60: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 5.....	185
Figura B 61: Distribución de Sismos Zona 6	186
Figura B 62: Histograma de Sismos Zona 6.....	187
Figura B 63: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 6.....	187
Figura B 64: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 6.....	188
Figura B 65: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 6	189
Figura B 66: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 6.....	190
Figura B 67: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 6.....	190
Figura B 68: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 6	191
Figura B 69: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 6	192
Figura B 70: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 6	193
Figura B 71: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 6.....	193
Figura B 72: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 6.....	194
Figura B 73: Distribución de Sismos Zona 7	195
Figura B 74: Histograma de Sismos Zona 7.....	196
Figura B 75: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 7.....	196
Figura B 76: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 7.....	197
Figura B 77: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 7	198
Figura B 78: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 7.....	199
Figura B 79: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 7.....	199
Figura B 80: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 7	200
Figura B 81: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 7	201
Figura B 82: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 7	202
Figura B 83: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 7	202
Figura B 84: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 7.....	203
Figura B 85: Distribución de Sismos Zona 8	204
Figura B 86: Histograma de Sismos Zona 8.....	205
Figura B 87: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 8.....	205
Figura B 88: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 8.....	206
Figura B 89: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 8	207
Figura B 90: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 8.....	208
Figura B 91: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 8.....	208
Figura B 92: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 8	209
Figura B 93: Distribución de Sismos Zona Austral.....	210

Figura B 94: Histograma de Sismos Zona Austral	211
Figura B 95: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona Austral	211
Figura B 96: Curva Recurrencia Sísmica –Zona Austral	212
Figura B 97: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.01;-16.31]	213
Figura B 98: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.31;-16.61]	213
Figura B 99: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.61;-16.91]	213
Figura B 100: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.91;-17.21]	214
Figura B 101: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.21;-17.51]	214
Figura B 102: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.15;-17.81]	214
Figura B 103: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.81;-18.11]	215
Figura B 104: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.11;-18.41]	215
Figura B 105: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.41;-18.71]	215
Figura B 106: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.5;-18.83]	216
Figura B 107: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.71;-19.01]	216
Figura B 108: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.83;-19.17]	216
Figura B 109: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.01;-19.41]	217
Figura B 110: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.17;-19.51]	217
Figura B 111: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.41;-19.81]	217
Figura B 112: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.81;-20.22]	218
Figura B 113: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.22;-20.62]	218
Figura B 114: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.5;-21.01]	218
Figura B 115: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.62;-21.03]	219
Figura B 116: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.01;-21.52]	219
Figura B 117: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.03;-21.44]	219
Figura B 118: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.44;-21.85]	220
Figura B 119: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.52;-22.03]	220
Figura B 120: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.85;-22.26]	220
Figura B 121: Perfil de Sismicidad Latitud°[-22.26;-22.67]	221
Figura B 122: Perfil de Sismicidad Latitud°[-22.67;-23.12]	221
Figura B 123: Perfil de Sismicidad Latitud°[-23.12;-23.57]	221
Figura B 124: Perfil de Sismicidad Latitud°[-23.57;-24.02]	222
Figura B 125: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.02;-24.46]	222
Figura B 126: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.46;-24.91]	222
Figura B 127: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.91;-25.36]	223
Figura B 128: Perfil de Sismicidad Latitud°[-25.36;-25.79]	223
Figura B 129: Perfil de Sismicidad Latitud°[-25.79;-26.23]	223
Figura B 130: Perfil de Sismicidad Latitud°[-26.23;-26.67]	224
Figura B 131: Perfil de Sismicidad Latitud°[-26.67;-27.11]	224
Figura B 132: Perfil de Sismicidad Latitud°[-27.11;-27.54]	224
Figura B 133: Perfil de Sismicidad Latitud°[-28.86;-29.34]	225
Figura B 134: Perfil de Sismicidad Latitud°[-29.34;-29.82]	225
Figura B 135: Perfil de Sismicidad Latitud°[-29.82;-30.3]	225

Figura B 136: Perfil de Sismicidad Latitud°[-30.3;-30.78].....	226
Figura B 137: Perfil de Sismicidad Latitud°[-30.78;-31.26].....	226
Figura B 138: Perfil de Sismicidad Latitud°[-31.5;-31.74].....	226
Figura B 139: Perfil de Sismicidad Latitud°[-31.74;-32.15].....	227
Figura B 140: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.15;-32.56].....	227
Figura B 141: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.46;-32.96].....	227
Figura B 142: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.56;-32.97].....	228
Figura B 143: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.96;-33.45].....	228
Figura B 144: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.97;-33.39].....	228
Figura B 145: Perfil de Sismicidad Latitud°[-33.39;-33.82].....	229
Figura B 146: Perfil de Sismicidad Latitud°[-33.82;-34.24].....	229
Figura B 147: Perfil de Sismicidad Latitud°[-34.24;-34.67].....	229
Figura B 148: Perfil de Sismicidad Latitud°[-34.67;-35.1].....	230
Figura B 149: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.1;-35.49].....	230
Figura B 150: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.49;-35.89].....	230
Figura B 151: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.89;-36.29].....	231
Figura B 152: Perfil de Sismicidad Latitud°[-36.29;-36.69].....	231
Figura B 153: Perfil de Sismicidad Latitud°[-36.69;-37.09].....	231
Figura B 154: Perfil de Sismicidad Latitud°[-37.09;-37.49].....	232
Figura B 155: Perfil Latitud: -15.85° ; Geometrías utilizadas en el estudio	233
Figura B 156: Perfil Latitud: -16.63° ; Geometrías utilizadas en el estudio	233
Figura B 157: Perfil Latitud: -16.80° ; Geometrías utilizadas en el estudio	234
Figura B 158: Perfil Latitud: -17.04° ; Geometrías utilizadas en el estudio	234
Figura B 159: Perfil Latitud: -17.47° ; Geometrías utilizadas en el estudio	235
Figura B 160: Perfil Latitud: -17.64° ; Geometrías utilizadas en el estudio	235
Figura B 161: Perfil Latitud: -17.87° ; Geometrías utilizadas en el estudio	236
Figura B 162: Perfil Latitud: -18.17° ; Geometrías utilizadas en el estudio	236
Figura B 163: Perfil Latitud: -18.35° ; Geometrías utilizadas en el estudio	237
Figura B 164: Perfil Latitud: -18.63° ; Geometrías utilizadas en el estudio	237
Figura B 165: Perfil Latitud: -19° ; Geometrías utilizadas en el estudio	238
Figura B 166: Perfil Latitud: -20.41° ; Geometrías utilizadas en el estudio	238
Figura B 167: Perfil Latitud: -20.73° ; Geometrías utilizadas en el estudio	239
Figura B 168: Perfil Latitud: -21.75° ; Geometrías utilizadas en el estudio	239
Figura B 169: Perfil Latitud: -22.09° ; Geometrías utilizadas en el estudio	240
Figura B 170: Perfil Latitud: -22.7° ; Geometrías utilizadas en el estudio	240
Figura B 171: Perfil Latitud: -22.94° ; Geometrías utilizadas en el estudio	241
Figura B 172: Perfil Latitud: -24.29° ; Geometrías utilizadas en el estudio	241
Figura B 173: Perfil Latitud: -24.73° ; Geometrías utilizadas en el estudio	242
Figura B 174: Perfil Latitud: -25.4° ; Geometrías utilizadas en el estudio	242
Figura B 175: Perfil Latitud: -25.66° ; Geometrías utilizadas en el estudio	243
Figura B 176: Perfil Latitud: -26.55° ; Geometrías utilizadas en el estudio	243
Figura B 177: Perfil Latitud: -26.99° ; Geometrías utilizadas en el estudio	244

Figura B 178: Perfil Latitud: -27.86° ; Geometrías utilizadas en el estudio	244
Figura B 179: Perfil Latitud: -28.9° ; Geometrías utilizadas en el estudio	245
Figura B 180: Perfil Latitud: -29.13° ; Geometrías utilizadas en el estudio	245
Figura B 181: Perfil Latitud: -30.09° ; Geometrías utilizadas en el estudio	246
Figura B 182: Perfil Latitud: -30.57° ; Geometrías utilizadas en el estudio	246
Figura B 183: Perfil Latitud: -31.7° ; Geometrías utilizadas en el estudio	247
Figura B 184: Perfil Latitud: -31.98° ; Geometrías utilizadas en el estudio	247
Figura B 185: Perfil Latitud: -32.39° ; Geometrías utilizadas en el estudio	248
Figura B 186: Perfil Latitud: -32.80° ; Geometrías utilizadas en el estudio	248
Figura B 187: Perfil Latitud: -32.82° ; Geometrías utilizadas en el estudio	249
Figura B 188: Perfil Latitud: -33.32° ; Geometrías utilizadas en el estudio	249
Figura B 189: Perfil Latitud: 33.34-° ; Geometrías utilizadas en el estudio	250
Figura B 190: Perfil Latitud: -33.76° ; Geometrías utilizadas en el estudio	250
Figura B 191: Perfil Latitud: -34.25° ; Geometrías utilizadas en el estudio	251
Figura B 192: Perfil Latitud: -35.1° ; Geometrías utilizadas en el estudio	251
Figura B 193: Perfil Latitud: 35.41-° ; Geometrías utilizadas en el estudio	252
Figura B 194: Perfil Latitud: -35.81° ; Geometrías utilizadas en el estudio	252
Figura B 195: Perfil Latitud: -36.24° ; Geometrías utilizadas en el estudio	253
Figura B 196: Perfil Latitud: -37.5° ; Geometrías utilizadas en el estudio	253
Figura B 197: Perfil Latitud: -37.74° ; Geometrías utilizadas en el estudio	254
Figura B 198: Perfil Latitud: -38.61° ; Geometrías utilizadas en el estudio	254
Figura B 199: Perfil Latitud: 39.04-° ; Geometrías utilizadas en el estudio	255
Figura B 200: Perfil Latitud: -39.91° ; Geometrías utilizadas en el estudio	255
Figura B 201: Perfil Latitud: 40.36-° ; Geometrías utilizadas en el estudio	256
Figura B 202: Perfil Latitud: 40.79-° ; Geometrías utilizadas en el estudio	256
Figura B 203: Perfil Latitud: -41.21° ; Geometrías utilizadas en el estudio	257
Figura B 204: Perfil Latitud: -41.65° ; Geometrías utilizadas en el estudio	257
Figura B 205: Perfil Latitud: -42.11° ; Geometrías utilizadas en el estudio	258
Figura B 206: Perfil Latitud: -43.15° ; Geometrías utilizadas en el estudio	258
Figura B 207: Comparación Perfil Latitud° -15.85	259
Figura B 208: Comparación Perfil Latitud° -16.63	259
Figura B 209: Comparación Perfil Latitud° -16.80	260
Figura B 210: Comparación Perfil Latitud° -17.04	260
Figura B 211: Comparación Perfil Latitud° -17.47	261
Figura B 212: Comparación Perfil Latitud° -17.64	261
Figura B 213: Comparación Perfil Latitud° -17.87	262
Figura B 214: Comparación Perfil Latitud° -18.17	262
Figura B 215: Comparación Perfil Latitud° -18.35	263
Figura B 216: Comparación Perfil Latitud° -18.63	263
Figura B 217: Comparación Perfil Latitud° -19	264
Figura B 218: Comparación Perfil Latitud° -20.41	264
Figura B 219: Comparación Perfil Latitud° -20.73	265

Figura B 220: Comparación Perfil Latitud° -21.75	265
Figura B 221: Comparación Perfil Latitud° -22.09	266
Figura B 222: Comparación Perfil Latitud° -22.7	266
Figura B 223: Comparación Perfil Latitud° -22.94	267
Figura B 224: Comparación Perfil Latitud° -22.29	267
Figura B 225: Comparación Perfil Latitud° -24.73	268
Figura B 226: Comparación Perfil Latitud° -25.4	268
Figura B 227: Comparación Perfil Latitud° -25.66	269
Figura B 228: Comparación Perfil Latitud° -26.55	269
Figura B 229: Comparación Perfil Latitud° -26.99	270
Figura B 230: Comparación Perfil Latitud° -27.86	270
Figura B 231: Comparación Perfil Latitud° -28.9	271
Figura B 232: Comparación Perfil Latitud° -29.13	271
Figura B 233: Comparación Perfil Latitud° -30.09	272
Figura B 234: Comparación Perfil Latitud° -30.57	272
Figura B 235: Comparación Perfil Latitud° -31.7	273
Figura B 236: Comparación Perfil Latitud° -31.98	273
Figura B 237: Comparación Perfil Latitud° -32.39	274
Figura B 238: Comparación Perfil Latitud° -32.8	274
Figura B 239: Comparación Perfil Latitud° -32.82	275
Figura B 240: Comparación Perfil Latitud° -33.32	275
Figura B 241: Comparación Perfil Latitud° -33.34	276
Figura B 242: Comparación Perfil Latitud° -33.76	276
Figura B 243: Comparación Perfil Latitud° -34.25	277
Figura B 244: Comparación Perfil Latitud° -35.1	277
Figura B 245: Comparación Perfil Latitud° -35.41	278
Figura B 246: Comparación Perfil Latitud° 35.81	278
Figura B 247: Comparación Perfil Latitud° -36.24	279
Figura B 248: Comparación Perfil Latitud° -37.5	279
Figura B 249: Comparación Perfil Latitud° -37.74	280
Figura B 250: Comparación Perfil Latitud° -38.61	280
Figura B 251: Comparación Perfil Latitud° -39.04	281
Figura B 252: Comparación Perfil Latitud° -39.91	281
Figura B 253: Comparación Perfil Latitud° -40.36	282
Figura B 254: Comparación Perfil Latitud° -40.79	282
Figura B 255: Comparación Perfil Latitud° -41.22	283
Figura B 256: Comparación Perfil Latitud° -41.65	283
Figura B 257: Comparación Perfil Latitud° -42.11	284
Figura B 258: Comparación Perfil Latitud° -43.15	284
Figura B 259: Espectro de Aceleración de Arica; Período de Retorno 475 años.....	285
Figura B 260: Espectro de Aceleración de Arica; Período de Retorno 2475 años.....	285
Figura B 261: Espectro de Aceleración de Putre; Período de Retorno 475 años	286

Figura B 262: Espectro de Aceleración de Putre; Período de Retorno 2475 años	286
Figura B 263 Espectro de Aceleración de Pozo Almonte; Período de Retorno 475 años..	287
Figura B 264 Espectro de Aceleración de Pozo Almonte; Período de Retorno 2475 años	287
Figura B 265: Espectro de Aceleración de Antofagasta; Período de Retorno 475 años	288
Figura B 266: Espectro de Aceleración de Antofagasta; Período de Retorno 2475 años ..	288
Figura B 267: Espectro de Aceleración de Calama; Período de Retorno 475 años	289
Figura B 268: Espectro de Aceleración de Calama; Período de Retorno 2475 años	289
Figura B 269: Espectro de Aceleración de Tocopilla; Período de Retorno 475 años	290
Figura B 270: Espectro de Aceleración de Tocopilla; Período de Retorno 2475 años	290
Figura B 271: Espectro de Aceleración de Chañaral; Período de Retorno 475 años	291
Figura B 272: Espectro de Aceleración de Chañaral; Período de Retorno 2475 años	291
Figura B 273: Espectro de Aceleración de Copiapó; Período de Retorno 475 años	292
Figura B 274: Espectro de Aceleración de Copiapó; Período de Retorno 2475 años	292
Figura B 275: Espectro de Aceleración de Vallenar; Período de Retorno 475 años.....	293
Figura B 276: Espectro de Aceleración de Vallenar; Período de Retorno 2475 años.....	293
Figura B 277: Espectro de Aceleración de Coquimbo; Período de Retorno 475 años.....	294
Figura B 278: Espectro de Aceleración de Coquimbo; Período de Retorno 2475 años.....	294
Figura B 279: Espectro de Aceleración de Illapel; Período de Retorno 475 años	295
Figura B 280: Espectro de Aceleración de Illapel; Período de Retorno 2475 años	295
Figura B 281: Espectro de Aceleración de Ovalle; Período de Retorno 475 años.....	296
Figura B 282: Espectro de Aceleración de Ovalle; Período de Retorno 2475 años.....	296
Figura B 283: Espectro de Aceleración de La Ligua; Período de Retorno 475 años.....	297
Figura B 284: Espectro de Aceleración de La Ligua; Período de Retorno 2475 años	297
Figura B 285: Espectro de Aceleración de Los Andes; Período de Retorno 475 años	298
Figura B 286: Espectro de Aceleración de Los Andes; Período de Retorno 2475 años	298
Figura B 287: Espectro de Aceleración de Quillota; Período de Retorno 475 años	299
Figura B 288: Espectro de Aceleración de Quillota; Período de Retorno 2475 años	299
Figura B 289: Espectro de Aceleración de Quilpué; Período de Retorno 475 años.....	300
Figura B 290: Espectro de Aceleración de Quilpué; Período de Retorno 2475 años.....	300
Figura B 291: Espectro de Aceleración de San Antonio; Período de Retorno 475 años ...	301
Figura B 292: Espectro de Aceleración de San Antonio; Período de Retorno 2475 años .	301
Figura B 293: Espectro de Aceleración de San Felipe; Período de Retorno 475 años.....	302
Figura B 294: Espectro de Aceleración de San Felipe; Período de Retorno 2475 años.....	302
Figura B 295: Espectro de Aceleración de Colina; Período de Retorno 475 años.....	303
Figura B 296: Espectro de Aceleración de Colina; Período de Retorno 2475 años.....	303
Figura B 297: Espectro de Aceleración de Melipilla; Período de Retorno 475 años.....	304
Figura B 298: Espectro de Aceleración de Melipilla; Período de Retorno 2475 años.....	304
Figura B 299: Espectro de Aceleración de Puente Alto; Período de Retorno 475 años.....	305
Figura B 300: Espectro de Aceleración de Puente Alto; Período de Retorno 2475 años...	305
Figura B 301: Espectro de Aceleración de San Bernardo; Período de Retorno 475 años..	306
Figura B 302: Espectro de Aceleración de San Bernardo; Período de Retorno 2475 años	306
Figura B 303: Espectro de Aceleración de Talagante; Período de Retorno 475 años.....	307

Figura B 304: Espectro de Aceleración de Talagante; Período de Retorno 2475 años.....	307
Figura B 305: Espectro de Aceleración de Pichilemu; Período de Retorno 475 años	308
Figura B 306: Espectro de Aceleración de Pichilemu; Período de Retorno 2475 años	308
Figura B 307: Espectro de Aceleración de Rancagua; Período de Retorno 475 años.....	309
Figura B 308: Espectro de Aceleración de Rancagua; Período de Retorno 2475 años.....	309
Figura B 309: Espectro de Aceleración de San Fernando; Período de Retorno 475 años ..	310
Figura B 310: Espectro de Aceleración de San Fernando; Período de Retorno 2475 años	310
Figura B 311: Espectro de Aceleración de Cauquenes; Período de Retorno 475 años	311
Figura B 312: Espectro de Aceleración de Cauquenes; Período de Retorno 2475 años	311
Figura B 313: Espectro de Aceleración de Curicó; Período de Retorno 475 años.....	312
Figura B 314: Espectro de Aceleración de Curicó; Período de Retorno 2475 años.....	312
Figura B 315: Espectro de Aceleración de Linares; Período de Retorno 475 años	313
Figura B 316: Espectro de Aceleración de Linares; Período de Retorno 2475 años	313
Figura B 317: Espectro de Aceleración de Talca; Período de Retorno 475 años.....	314
Figura B 318: Espectro de Aceleración de Talca; Período de Retorno 2475 años.....	314
Figura B 319: Espectro de Aceleración de Lebu; Período de Retorno 475 años	315
Figura B 320: Espectro de Aceleración de Lebu; Período de Retorno 2475 años	315
Figura B 321: Espectro de Aceleración de Los Ángeles; Período de Retorno 475 años ...	316
Figura B 322: Espectro de Aceleración de Los Ángeles; Período de Retorno 2475 años ..	316
Figura B 323: Espectro de Aceleración de Angol; Período de Retorno 475 años.....	317
Figura B 324: Espectro de Aceleración de Angol; Período de Retorno 2475 años.....	317
Figura B 325: Espectro de Aceleración de Temuco; Período de Retorno 475 años	318
Figura B 326: Espectro de Aceleración de Temuco; Período de Retorno 2475 años	318
Figura B 327: Espectro de Aceleración de La Unión; Período de Retorno 475 años	319
Figura B 328: Espectro de Aceleración de La Unión; Período de Retorno 2475 años	319
Figura B 329: Espectro de Aceleración de Valdivia; Período de Retorno 475 años.....	320
Figura B 330: Espectro de Aceleración de Valdivia; Período de Retorno 2475 años.....	320
Figura B 331: Espectro de Aceleración de Castro; Período de Retorno 475 años	321
Figura B 332: Espectro de Aceleración de Castro; Período de Retorno 2475 años	321
Figura B 333: Espectro de Aceleración de Futaleufú; Período de Retorno 475 años	322
Figura B 334: Espectro de Aceleración de Futaleufú; Período de Retorno 2475 años	322
Figura B 335: Espectro de Aceleración de Osorno; Período de Retorno 475 años.....	323
Figura B 336: Espectro de Aceleración de Osorno; Período de Retorno 2475 años.....	323
Figura B 337: Espectro de Aceleración de Puerto Montt; Período de Retorno 475 años ..	324
Figura B 338: Espectro de Aceleración de Puerto Montt; Período de Retorno 2475 años	324
Figura B 339 Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Arica PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	325
Figura B 340 Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Putre PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	325
Figura B 341: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Pozo Almonte PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	326

Figura B 342: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Antofagasta PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	326
Figura B 343: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Calama PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	327
Figura B 344: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Tocopilla PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	327
Figura B 345: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Chañaral PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	328
Figura B 346: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Copiapó PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	328
Figura B 347: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Vallenar PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	329
Figura B 348: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Coquimbo PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	329
Figura B 349: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Illapel PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	330
Figura B 350: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Ovalle PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	330
Figura B 351: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para La Ligua PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	331
Figura B 352: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Los Andes PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	331
Figura B 353: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Quillota PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	332
Figura B 354: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Quilpué PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	332
Figura B 355: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Antonio PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	333
Figura B 356: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Felipe PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	333
Figura B 357: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Colina PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	334
Figura B 358: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Melipilla PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	334
Figura B 359: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Puente Alto PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	335
Figura B 360: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Bernardo PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	335
Figura B 361: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Talagante PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	336
Figura B 362: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Pichilemu PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	336

Figura B 363: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Rancagua PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	337
Figura B 364: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Fernando PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	337
Figura B 365: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Cauquenes PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	338
Figura B 366: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Curicó PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	338
Figura B 367: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Linares PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	339
Figura B 368: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Talca PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	339
Figura B 369: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Lebu PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	340
Figura B 370: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Los Ángeles PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	340
Figura B 371: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Angol PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	341
Figura B 372: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Temuco PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	341
Figura B 373: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para La Unión PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	342
Figura B 374: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Valdivia PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	342
Figura B 375: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Castro PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	343
Figura B 376: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Futaleufú PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	343
Figura B 377: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Osorno PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	344
Figura B 378: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Puerto Montt PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61	344
Figura B 379: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MMC	345
Figura B 380: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MMC	345
Figura B 381: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MMC	346
Figura B 382: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MMC	346
Figura B 383: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MV	347

Figura B 384: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MV.....	347
Figura B 385: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MV.....	348
Figura B 386: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MV	348
Figura B 387: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MMC	349
Figura B 388: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MMC	349
Figura B 389: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MMC	350
Figura B 390: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MMC.....	350
Figura B 391: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MV.....	351
Figura B 392: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MV.....	351
Figura B 393: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MV.....	352
Figura B 394: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MV	352
Figura B 395: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MMC	353
Figura B 396: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MMC.....	353
Figura B 397: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MMC.....	354
Figura B 398: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MMC.....	354
Figura B 399: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MV.....	355
Figura B 400: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MV	355
Figura B 401: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MV	356
Figura B 402: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MV	356
Figura B 403: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MMC	357
Figura B 404: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MMC	357

Figura B 405: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MMC	358
Figura B 406: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MMC.....	358
Figura B 407: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MV.....	359
Figura B 408: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico PR=2475 años; GR: MV.....	359
Figura B 409: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro PR=2475 años; GR: MV.....	360
Figura B 410: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur PR=2475 años; GR: MV	360

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del planeta, por lo que está expuesto a una constante ocurrencia de terremotos. En razón de lo dicho anteriormente, es necesario realizar estudios de Peligro Sísmico, que permitan estimar la demanda generada por estos sismos a lo largo del territorio nacional. La estimación del Peligro Sísmico constituye el primer eslabón en la cadena de medidas y acciones para mitigar los efectos adversos de los terremotos. Su conocimiento es un elemento básico en la reducción de desastres causados por terremotos, ya que facilita el desarrollo e implementación de medidas de prevención que constituyen los mecanismos más efectivos para la reducción del riesgo sísmico.

Nuestro país, entre los 18° y 47° de latitud Sur, se encuentra sobre la zona de contacto de las placas de Nazca y Sudamericana, subductando la primera bajo la segunda. Bajo este ambiente tectónico, Chile es afectado principalmente por cinco tipos de terremotos o fuentes sismogénicas: de contacto entre placas o interplaca, intraplaca de profundidad intermedia, intraplaca superficial o cortical, transcurrentes y tras-arco. Cada una de estas fuentes sismogénicas posee características particulares, afectando de manera diferente a las estructuras, por lo que para su análisis se debe considerar cada una de ellas en forma independiente (Saragoni, 2004; Astroza, 2002, 2005; Ruiz y Saragoni, 2005).

El Peligro Sísmico es básicamente: la probabilidad que un parámetro representativo del movimiento del suelo sea alcanzado o superado en un intervalo de tiempo dado. Este parámetro puede ser la aceleración, la intensidad, la pseudo velocidad espectral, la pseudo aceleración espectral, entre otros.

Los primeros estudios realizados en Chile en este campo estaban orientados a identificar regiones en las cuales la sismicidad pudiese ser considerada uniforme (Gajardo y Lomnitz, 1960; Welkner, 1964; Labbe, 1976). El primer antecedente relacionado con el Peligro Sísmico en Chile es el trabajo de Greve (1948), quien determinó los coeficientes de seguridad de la respuesta sísmica de estructuras para diferentes zonas en Chile. Lomnitz (1969) realizó los primeros cálculos probabilísticos, construyendo el primer mapa de Peligro Sísmico en Chile, considerando solo sismos con magnitud $M_s \geq 7,5$ y que la distribución temporal de la actividad sísmica sigue un comportamiento de Poisson. Posteriormente, se han realizado una serie de estudios utilizándose la metodología probabilística para estimar el Peligro Sísmico para todo Chile (Barrientos, 1980; Villablanca y Riddell, 1985; Martín, 1990; Álvarez, 2002; Leyton, 2009). La mayoría de estos trabajos han estudiado el Peligro Sísmico considerando la totalidad de los sismos, sin separar en forma precisa la influencia de cada uno de los tipos de terremotos o fuentes sismogénicas.

Una primera aproximación en la determinación del Peligro Sísmico, son los trabajos de Susa (2004) y Neira (2005). El primero realiza una evaluación del Peligro asociado a sismos de tipo

interplaca en Chile y el sur del Perú. El segundo realiza una estimación del Peligro Sísmico asociado a sismos intraplaca en Chile. Posteriormente el estudio de Leyton, Ruiz y Sepúlveda (2010) permitió reevaluar el Peligro Sísmico en la zona central de Chile.

En nuestro caso, se ha realizado una zonificación a lo largo de la superficie de contacto de las placas desde Arica hasta el Punto Triple, que corresponde al punto donde se encuentran la Placa Sudamericana, la Placa de Nazca y la Placa Antártica. En el Punto Triple hay pocos sismos interplaca y ausencia de sismos profundos, por lo que más hacia el sur de este punto es difícil asignar los sismos a las fuentes en estudio.

Los parámetros en estudio son: la aceleración máxima del suelo o PGA, y la aceleración espectral o SA entre 0 y 3 segundos, asociada a una razón de amortiguamiento crítico de 5%. La estimación de estos parámetros se ha efectuado considerando suelo tipo A (Roca), de acuerdo a la clasificación del DS61 (2011).

Este estudio permitirá mejorar el conocimiento del Peligro Sísmico asociado a cada tipo de fuente sísmica; como también reanalizar los estudios de zonificación sísmica desarrollados previamente, entregando mayor información para una mejor preparación y prevención frente a eventuales desastres producto de grandes terremotos.

1.3 OBJETIVOS.

- Objetivos Generales:

Desarrollar un mapa de Peligro Sísmico para Chile en base a los parámetros espectrales.

- Objetivos Específicos:

Mejorar la zonificación sísmica de Chile.

Obtención de un mapa de isoaceleraciones para distintos períodos de retorno.

1.4 METODOLOGÍA.

Para el desarrollo de este estudio la metodología adoptada es la siguiente:

- Revisión de Antecedentes

Se estudian las referencias bibliográficas principales, poniendo especial énfasis en el análisis de aquellas que están referidas a métodos modernos de determinación del Peligro Sísmico.

- Desarrollo de Curvas Gutenberg-Richter

Se clasifican las distintas zonas de estudio por fuente sismogénicas y por zona geográfica seleccionando de los datos disponibles los sismos de magnitud de momento sísmico $M_w \geq 5$. Con esto se definieron las leyes de Gutenberg-Richter asociadas a cada una de las zonas.

- Selección de Curvas de Atenuación

Se utilizan las curvas de atenuación desarrolladas por Youngs et al. (1997), Atkinson y Boore (2003), Zhao et al. (2006), Contreras y Boroschek (2009, 2012) y Abrahamson et al.(2012) para cada una de las zonas definidas, lo que permite estimar las aceleraciones a nivel de superficie considerando los distintos parámetros en estudio.

- Generación de un Modelo Único y obtención de un mapa de isoaceleraciones

Se utiliza la metodología probabilística de Cornell (1968) y Esteva (1970), por medio de Crisis 2007, software que permite el cálculo del Peligro Sísmico. Incorporando las curvas de Gutenberg-Richter y las leyes de atenuación, se determinan las probabilidades de excedencia de las aceleraciones y además se genera un mapa de Peligro Sísmico que se caracteriza por mostrar un esquema de isoaceleraciones para distintos períodos de retorno.

1.5 ALCANCES.

Los alcances por capítulos son los siguientes:

- **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL.**

En este capítulo se presenta el tema de manera general, donde se resumen los Objetivos, Contenidos, Metodología y Alcances del informe.

- **CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.**

En este capítulo se presentan los principales temas estudiados en las referencias bibliográficas y los antecedentes utilizados en este estudio; poniendo especial énfasis en el análisis de aquellas que están referidas a métodos modernos de obtención del Peligro Sísmico.

- **CAPÍTULO III: ZONIFICACIÓN Y CONFECCIÓN DE CURVAS DE RECURRENCIA SÍSMICA.**

En este capítulo se establece una zonificación que permite agrupar distintos terremotos con características similares de acuerdo a los parámetros en estudio, con el fin caracterizar las distintas fuentes sismogénicas y desarrollar las curvas de Gutenberg-Richter asociadas a estas.

- **CAPÍTULO IV: MODELO DE LAS FUENTES Y SELECCIÓN DE CURVAS DE ATENUACIÓN.**

En este capítulo se confecciona un modelo que define las coordenadas (Latitud [°], Longitud [°], Profundidad [km]) de la zona geométrica donde se localizan las diferentes fuentes sismogénicas y también se selecciona un modelo adecuado para estimar el área de ruptura de los sismos. Además se seleccionan las relaciones de atenuación, las que entregan el valor de las aceleraciones en la superficie de estudio.

- **CAPÍTULO V: MÉTODO DE CORNELL-ESTEVA Y GENERACIÓN DE MAPA DE PELIGRO SÍSMICO.**

En este capítulo se utiliza la metodología probabilística de Cornell (1968) y Esteva (1970), que usa las curvas de Gutenberg-Richter y las leyes de atenuación para estimar el Peligro Sísmico en las distintas zonas de estudio. Por medio de un software especializado (Crisis 2007), se obtienen las probabilidades de excedencia de las aceleraciones y se genera un mapa de isoaceleraciones para distintos períodos de retorno.

- **CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

En este capítulo se discuten los resultados encontrados en el apartado anterior, realizando un juicio de los valores obtenidos y una comparación con trabajos anteriores. Además, se enuncian las conclusiones finales a partir de todo el trabajo desarrollado y se realizan algunas recomendaciones para futuros trabajos sobre el tema.

CAPÍTULO II: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.

2.1 MARCO SISMOTÉCTONICO.

Nuestro país presenta una gran extensión territorial cubriendo una de las zonas sísmicas más extensas del mundo. Chile presenta diferentes rangos de actividad sísmica a lo largo de su geografía.

Para entender porqué Chile es una de las zonas de mayor actividad sísmica a nivel mundial, es que se debe recurrir a la tectónica de placas.

2.1.2 Tectónica de Placas.

La superficie del planeta está dividida en grandes placas rígidas que conforman la litósfera, la cual se desplaza sobre capas más dúctiles y que se encuentran a mayor temperatura, que componen la astenósfera, ambas regiones pertenecientes al manto superior de la Tierra. En la mayor parte de Chile, se presenta una zona de convergencia entre la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana, situación en que la placa más densa subduce en el manto terrestre, generándose lo que se conoce como proceso de subducción. Ver *Figura 1* y *Figura 2*.

La subducción de Nazca (ver *Figura 2*) se produce según un plano inclinado hacia el Este conocido como Plano de Wadati&Benioff, con buzamientos que fluctúan en ángulos comprendidos entre 15° y 40° con respecto a la horizontal.

La placa de Nazca, una de las más veloces y jóvenes, se desplaza hacia el Este con una velocidad de convergencia cercana a 6.6 cm/año (Kendrick et al., 2003) y la dirección de convergencia o rumbo de la placa es de N 78.4 °E (Vigny et al., 2009).

La placa Sudamericana a su vez se desplaza unos 3 cm/año en dirección aproximada hacia el Oeste, lo que hace una tasa neta de convergencia estimada entre 8 a 9 cm/año (Kendrick et al., 2003).

Estas características, en particular, el alto valor de la velocidad de convergencia, genera una gran acumulación de tensiones en las zonas de asperezas de las placas, las cuales resisten hasta un cierto valor límite, luego del cual se produce una liberación de energía ocasionando lo que se conoce como terremoto.

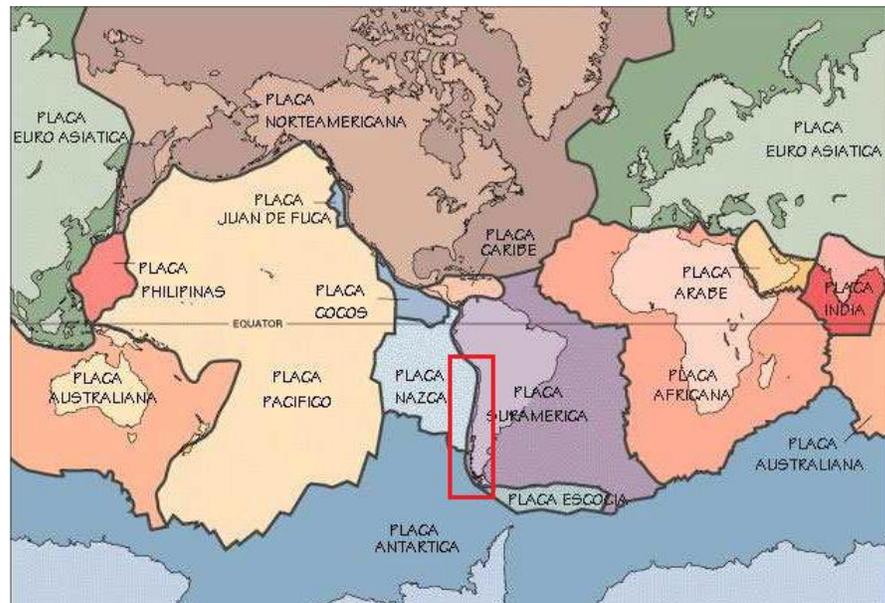


Figura 1: Tectónica de placas correspondiente a Chile.

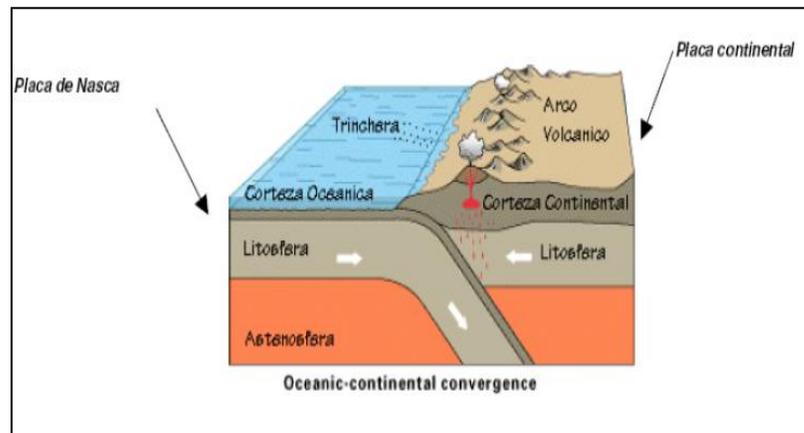


Figura 2: Esquema de la subducción sudamericana.

En el sur de Chile, más allá de Puerto Aysén (aproximadamente a los 46° L.S.), desaparece la influencia de la placa de Nazca. A partir de este punto se produce el contacto de la placa Antártica con la Sudamericana, con una velocidad relativa de convergencia menor que más al norte ,2 [cm/año] velocidad promedio (De Mets et al., 1990), es por esto, que en esta zona la actividad sísmica decae notoriamente.

Conocida la situación tectónica del territorio nacional, siendo la subducción a lo largo de la costa del Pacífico el principal causante de la alta sismicidad del país y en casi todo el continente Sudamericano, a continuación se muestran las principales fuentes sismogénicas presentes en la zona de estudio:

1. Sismicidad Superficial – Cortical:

Es aquella sismicidad que ocurre en el interior de la placa Sudamericana, principalmente en los sectores precordilleranos y cordilleranos, ubicándose a una profundidad menor de 30 km. De estos terremotos se puede mencionar el sismo de las Melosas del 4 de Septiembre de 1958, de una magnitud de Richter 6.9, el terremoto de Aroma del 24 de Julio de 2001 ($M_w=6.3$), y el terremoto de El Fierro del 28 de Agosto de 2004 ($M_w=6.5$) (Campos et al., 2005).

2. Ante-arco:

Sismos intraplaca oceánica, también conocidos como sismos “Outer-Rise”, producida por la flexión de la placa de Nazca previa a la subducción. Es caracterizada por generar sismos de magnitud moderada a distancias mayores a 150 km de la costa (Contreras-Reyes, et al., 2007; Tilman et al., 2008; Moscoso y Contreras-Reyes, 2012), por lo que no produce daños significativos en la zona de estudio.

3. Subducción Interplaca:

Sismos que se asocian a la interacción interplaca, producto del contacto entre la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana, extendiéndose desde la fosa hasta unos 50 a 60 km de profundidad (Suarez y Comte, 1993). La mayor parte de los grandes sismos en Chile son de este tipo, entre los más conocidos se encuentran: terremoto de Valparaíso de 1906 ($M_w=8.2$), Talca de 1928 ($M_w=7.6$), Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$), La Ligua 1971 ($M_w=7.5$), Valparaíso 1985 ($M_w=7.9$), Antofagasta de 1995 ($M_w=8.0$), Tocopilla 2007 ($M_w=7.7$) y Maule 2010 ($M_w=8.8$).

4. Subducción Intraplaca de Profundidad Intermedia:

Sismos intraplaca oceánica que ocurren al interior de la placa de Nazca. Esta zona se extiende desde el desacoplamiento de las placas, a una profundidad de 60 km aproximadamente, hasta profundidades no mayores a 250 km, ejemplos de estos sismos son los de Chillán 1939 ($M_s=7.8$), Santiago 1945 ($M_s=7.1$), La Ligua 1965 ($M_s=7.1$), Punitaqui 1997 ($M_w=7.1$) y Tarapacá 2005 ($M_w=7.8$).

5. Subducción Intraplaca Profundo:

Sismos que también ocurren al interior de la placa de Nazca, pero a una profundidad hipocentral mayor de 250 km.

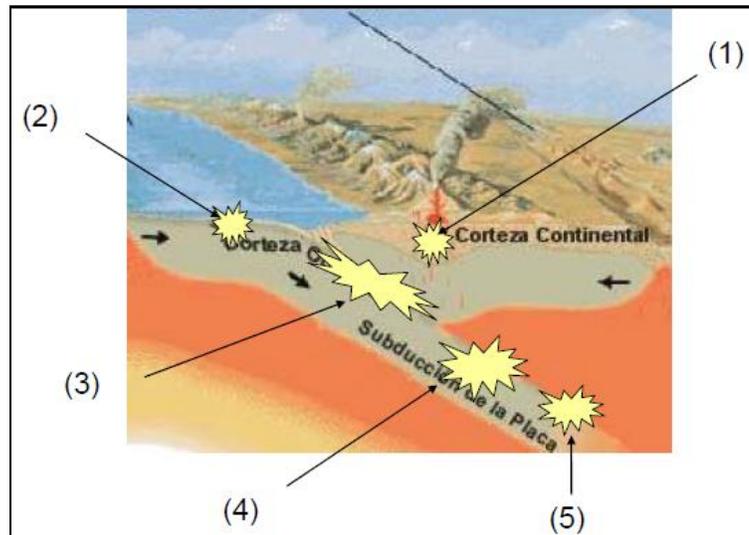


Figura 3: Principales Fuentes Sismogénicas a lo largo Chile: (1) Superficial o Cortical, (2) Ante-Arco o Outer-Rise, (3) Subducción Interplaca, (4) Subducción Intraplaca de Profundidad Intermedia, (5) Subducción Intraplaca Profundo

2.2 ANTECEDENTES CONFECCIÓN CATÁLOGO.

Una de las herramientas fundamentales para comenzar un estudio de Peligro Sísmico, es contar con una base de datos confiable que permita estimar de buena manera los parámetros asociados a este trabajo.

Los catálogos que se utilizan en este trabajo son:

- Catálogo SISRA-Chile y SISRA-Perú, que contiene la sismicidad histórica de la zona de estudio. Fue confeccionado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur, cuenta con información desde 1471. Este catálogo se crea por la necesidad de unificar los catálogos de América del Sur bajo el auspicio del "Programa para la Mitigación de los efectos de los terremotos en la Región Andina" (conocido como el Proyecto SISRA, 1985)
- Catálogo USGS/NEIC (PDE) 1973- Presente
- Catálogo del proyecto Global Centroid Moment Tensor (CMT)

2.3 ANTECEDENTES DEL PELIGRO SÍSMICO.

El cálculo del Peligro Sísmico permite determinar la demanda o amenaza sísmica, en particular para este estudio desde Arica hasta el Punto Triple.

Los diferentes métodos utilizados para estimar el Peligro Sísmico, difieren entre ellos fundamentalmente en la manera de considerar la sismicidad del área de influencia.

Los primeros, propuestos durante la década de los años 60, son métodos determinísticos, que dan cuenta del movimiento esperado a causa del escenario sísmico más desfavorable, por ejemplo, la ocurrencia del sismo de mayor tamaño en la zona-fuente más cercana. Sin embargo, los métodos determinísticos no permiten determinar la probabilidad de ocurrencia de dicho movimiento, lo que supone un problema desde el punto de vista del diseño sismorresistente.

Posteriormente, surgieron los métodos probabilísticos (Esteva, 1970; Cornell, 1968), que ofrecen las probabilidades anuales de excedencia para el parámetro del movimiento fuerte que se considera representativo del Peligro Sísmico. En este período, la caracterización del movimiento fuerte con fines sismorresistentes se realizaba a través de un espectro de diseño basado en una forma espectral estándar de varios tramos (Newmark y Hall, 1973), construida como promedio de una familia de acelerogramas representativa del movimiento y escalada al valor de la aceleración máxima o valor de PGA correspondiente al periodo de retorno establecido para el diseño de la estructura. La amenaza se evaluaba entonces únicamente en términos de PGA como probabilidad de excedencia de un valor fijado de este parámetro.

Con el desarrollo de leyes de atenuación o modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo para parámetros espectrales (no sólo valores máximos) a lo largo de los años 80, se hizo posible la construcción de espectros de diseño, en los que se considera la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los períodos de interés en ingeniería sísmica, y no sólo de la asociada a los valores máximos. De este modo surgen los espectros de amenaza uniforme, que se construyen representando “punto a punto” las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo período de retorno.

El hecho de que el método determinístico y el método probabilístico muchas veces proporcionen resultados muy diferentes ha producido una especie de dicotomía entre los dos métodos, aunque en realidad no debería existir, ya que el método probabilístico permite seleccionar un escenario dentro de una amplia gama de escenarios determinísticos posibles. Ambos métodos pueden complementarse y proporcionar resultados adecuados si se aplican correctamente.

Existen varios trabajos relacionados a la estimación del Peligro Sísmico en Chile: Greve(1948), Lomnitz (1969), Barrientos (1980), Martin (1990), Susa (2004), Neira (2005) y Silva (2008).

2.4 ANTECEDENTES SOBRE REGIONALIZACIÓN SÍSMICA.

Existen diversos antecedentes con respecto a la regionalización sísmica de Chile, los cuales se describen a continuación:

2.4.1 Regionalización de Gajardo y Lomnitz (1960).

En el año 1960, Gajardo y Lomnitz realizaron una regionalización aplicando el método estadístico del coeficiente de correlación propuesto por Tsuboi en Japón el año 1958. El método consiste en el cálculo de un coeficiente de correlación sísmico entre dos comportamientos i, j ($r(i, j)$), que puede variar entre -1 y 1, y representa la correlación existente entre estos comportamientos. Para efectuar la regionalización se consideraron comportamientos de un grado de latitud con el correspondiente ancho de Chile en esa latitud.

Si el valor del coeficiente es alto, quiere decir, que la sismicidad es similar en ambos comportamientos. Valores negativos del coeficiente de correlación indican que si una zona está activa, la otra esta menos activa que lo normal.

A partir de los resultados, se llegó a la distinción de cuatro zonas sísmicas importantes:

ZONA SÍSMICA	LÍMITES (Latitud °S)
Pampa del Tamarugal	19 - 22
Provincia de Atacama	26 - 29
Chile Central	31 - 35
Chile Sur	37 - 40

Tabla 1: Zonas definidas según la Regionalización de Gajardo y Lomnitz (1960)

2.4.2 Regionalización de Welkner (1964).

Al igual que Gajardo y Lomnitz (1960), Welkner (1964), subdividió el país en compartimientos de un grado de latitud, aumentando la cantidad de datos al incluir la información recopilada por Montessus de Ballore (1915). Con esto se obtienen dos períodos desde 1906-1913 y desde 1942-1958. Una vez hecho esto, representó en cada compartimento el número de sismos destructores y el número total de sismos sensibles en cada período.

Con lo mencionado anteriormente las zonas determinadas son las siguientes:

ZONA SÍSMICA	LÍMITES (Latitud °S)
Arica	18 - 19
Iquique	19 - 22
Tocopilla-Antofagasta	22 - 24
Taltal	24 - 26
Copiapó-Vallenar	26 - 29
La Serena-Illapel	29 - 33
Santiago-Valparaíso	33 - 34
Rancagua-Concepción	34 - 37
Angol-Valdivia	37 - 40
Osorno-Puerto Montt	40 - 42
Chiloé	42 - 45
Aysén-Taitao	45 - 48
Taitao-Puerto Natales	48 - 52
Punta Arenas	52 - 55

Tabla 2: Zonas definidas según la Regionalización de Welkner (1964)

2.4.3 Regionalización de Labbé (1976).

Labbé en el año 1976, realizó una regionalización a partir de datos homogeneizados aplicando el método de Tsuboi (1958). Además calculó los coeficientes asociados a la relación empírica de Gutenberg-Richter (1958).

$$\log_{10}N(M) = a - b \cdot M \quad (1)$$

Donde N es el número acumulativo de sismos con magnitud \geq que M, y a y b son constantes que caracterizan la sismicidad de la zona.

Labbé homogeneizó una muestra de 573 sismos de un período de 65 años, recurriendo a los archivos históricos para averiguar las características de los sismos de magnitudes mayores. Una vez realizado esto, se basó en parte, en el trabajo de Gajardo y Lomnitz (1960) y calculó las constantes a y b de la ecuación de Gutenberg-Richter a cada una de las regiones, obteniendo los siguientes resultados:

ZONA SÍSMICA	LÍMITES (Latitud °S)
Arica-Taltal	18 - 26
Taltal-Linares	26 - 36
Linares-Puerto Aysén	36 - 45
Puerto Aysén-Cabo de Hornos	45 - 56

Tabla 3: Zonas definidas según la Regionalización de Labbé (1976)

2.4.4 Regionalización de Barrientos (1980).

Barrientos en el año 1980 realizó otra regionalización, considerando la localización, tamaño y promedio de ocurrencia de los sismos, utilizando para esto las curvas de Gutenberg-Richter tal como lo hizo Labbé (1976).

En el análisis utilizó un catálogo de 1095 sismos, donde reúne los sismos con magnitud \geq que 5.5 Ms. Para homologar el catálogo utilizó las técnicas empleadas por Labbé (1976), quedando finalmente un catálogo de 443 sismos.

Debido a que en el margen occidental de Sudamérica los focos de los sismos tienden a profundizarse a medida que se internan en el continente, se plantea por primera vez una división del país en una zona costera y una cordillerana; de forma de introducir así la posibilidad de que la actividad sísmica varíe de acuerdo a la longitud y no tan solo con respecto a la latitud como se había realizado hasta ese instante. La frontera entre las regiones costera y cordillerana, se traza como una línea paralela al eje de la fosa Chileno-Peruana.

Los resultados se muestran a continuación:

ZONA COSTERA (Latitud °S)	ZONA CORDILLERANA (Latitud °S)
ZONA A : 18 – 20	ZONA E : 18 – 26
ZONA B : 20 – 25	ZONA F : 26 – 27.5
ZONA C : 25 – 33.5	ZONA G : 27.5 – 33.5
ZONA D : 33.5 – 45	ZONA H : 33.5 – 45

Tabla 4: Zonas definidas según la Regionalización de Barrientos (1980)

2.4.5 Regionalización de Andrés Martín (1990).

Martín utilizó dos criterios de división, uno longitudinal y otro transversal, calculando los parámetros de la ecuación de Gutenberg-Richter para cada una de estas zonas, utilizando un catálogo entre los años 1906-1985, agregando los registros históricos, para magnitudes de Richter \geq 4.5. Para realizar la división longitudinal tomó en cuenta los perfiles de interacción entre la placa de Nazca y Sudamericana entre las latitudes 15°S y 47°S. La zona cordillerana queda definida por focos que se encuentran a grandes profundidades y la zona costera se identifica por presentar sismos que tienen focos ubicados a profundidades menores a los 40[km].

Para la división por latitud de la zona costera y cordillerana, realizó histogramas de la sismicidad de las posibles regiones sísmicas, determinando los parámetros asociados a la relación de Gutenberg-Richter para cada una de ellas procediendo de forma iterativa a determinar los límites definitivos.

Como resultado estableció 9 zonas que se detallan en la siguiente Tabla.

ZONA	Latitud °S
Costera	Z1: 15 – 25
	Z2: 25 – 36
	Z3: 36 – 47
Cordillerana	Z4: 15 – 18
	Z5: 18 – 25
	Z6: 25- 31
	Z7: 31 – 38
Cordillerana Superficial	Z8: 27 -33
Magallanes	Z9: 51- 57

Tabla 5: Zonas definidas según la Regionalización de Martin (1990)

2.4.6 Regionalización de Davor Susa (2004).

Susa elabora un catálogo de sismos interplaca con magnitudes mayores o iguales que 7.0 Ms. Cada una de las zonas sismotectónicas queda definida por el largo de ruptura de los sismos históricos mayores. La zonificación de Susa se muestra en la siguiente Tabla.

ZONA	Latitud °S
Z1: Definida por el terremoto de 1868	16.5 - 19
Z2: Definida por el terremoto de 1877	18.7 - 22.7
Z3: Definida por Límite inferior del terremoto de 1877 y Límite superior terremoto de 1922	22.7 - 25.4
Z4: Definida por el terremoto de 1922	25.4 - 28.9
Z5: Definida por Límite inferior del terremoto de 1922 y Límite superior terremoto de 1906	28.9 - 31.7
Z6: Definida por el terremoto de 1906	31.7 - 35.1
Z7: Definida por Límite inferior del terremoto de 1906 y Límite inferior terremoto de 1835	35.1 -37.5
Z8: Definida por Límite inferior del terremoto de 1835 y Límite inferior terremoto 1960	37.5 - 47

Tabla 6: Zonas definidas según la Regionalización de Susa (2004)

2.5 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO.

A lo largo de los estudios realizados en el ámbito de la evaluación del Peligro Sísmico se han utilizado distintas metodologías para determinar los parámetros asociados a las leyes que se encuentran en cuestión (Gutenberg-Richter; Leyes de Atenuación). El Cálculo del Peligro Sísmico, principalmente se ha dividido en dos grandes metodologías, la determinística y la probabilística, tal como se mencionó anteriormente. A continuación se describen ambas, poniendo mayor hincapié en la última debido a que se utiliza en este estudio.

2.5.1 Método Determinístico.

Si bien con este método se obtienen a menudo resultados muy conservadores, sigue siendo utilizado en el cálculo de Peligro Sísmico de alguna zona, región o emplazamiento de interés.

El método determinístico implica el desarrollo de un escenario particular sobre el cual se basa el estudio de Peligro Sísmico. Este escenario consiste en la selección de un sismo máximo representativo de la fuente en una determinada locación.

Un Análisis Determinístico del Peligro Sísmico (DSHA, por su sigla en inglés) se describe principalmente en cuatro etapas que se mencionan a continuación.

- Paso 1: Identificación y caracterización de las fuentes capaces de producir movimientos considerables en el sitio de estudio. Esta caracterización incluye la descripción geométrica de la fuente (punto, línea o área) y su potencial sísmico (magnitud).
- Paso 2: Selección de un parámetro de distancia entre la fuente y el sitio. En la mayoría de estos estudios se utiliza la distancia más corta entre ambos.
- Paso 3: Selección de un sismo de control.
- Paso 4: Finalmente se tiene un escenario que presenta el caso seleccionado.

En la **Figura 4** se puede ver un esquema del DSHA.

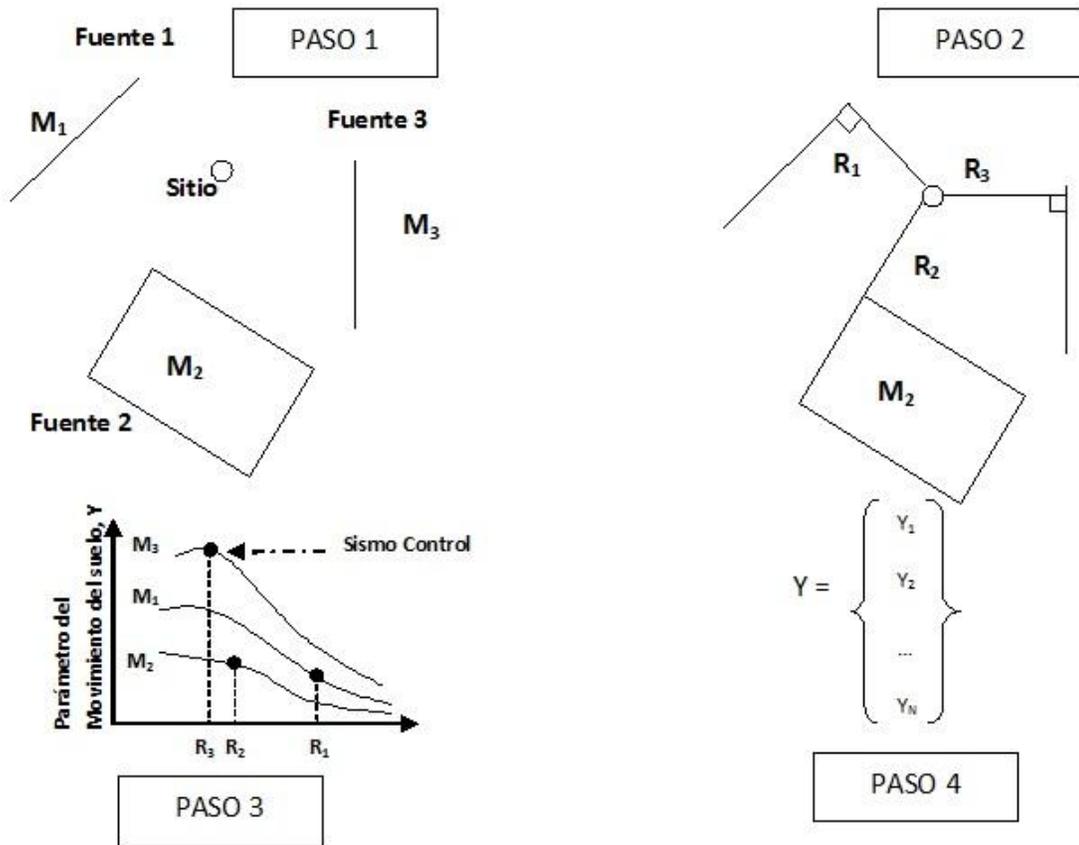


Figura 4: Esquema Método Determinístico (DSHA)

2.5.2 Método Probabilístico.

Los modelos de sismicidad y atenuación buscan simplificar una realidad compleja. Los catálogos sísmicos cubren períodos relativamente cortos de sismicidad, por lo que estas variables generan incertidumbre. Esto conlleva que muchos investigadores utilicen el método probabilístico para el cálculo del Peligro Sísmico.

Para el cálculo del Peligro Sísmico probabilístico, definido como la probabilidad de ocurrencia de al menos un sismo que supere un cierto valor de intensidad y para un período de interés dado, se recurre a la metodología desarrollada por Cornell en 1968 y Esteva 1970, con la cual se puede determinar probabilidades de superar ciertos valores de intensidad para períodos de vida útil de interés como por ejemplo, 10, 50, 100 ó 250 años.

El Análisis Probabilístico del Peligro Sísmico (PSHA, por su sigla en inglés), puede ser descrito también en 4 etapas que tienen algún grado de similitud con el DSHA.

- Paso 1: Identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas: es idéntica al primer paso de del análisis determinístico, excepto que la distribución de probabilidad de la localización de una potencial falla también es caracterizada. En la mayoría de los casos, se asume una distribución uniforme para cada zona, esto quiere decir que un sismo tiene la misma probabilidad de ocurrir en cualquier punto de la zona definida. Esta distribución luego se combina con la geometría de la fuente para obtener la correspondiente distribución de probabilidad de la distancia fuente-sitio.
- Paso 2: Se caracteriza la distribución temporal de la recurrencia sísmica. Esta relación de recurrencia, que especifica la tasa anual de excedencia de un terremoto de determinada magnitud, es utilizada para caracterizar la sismicidad de cada una de las fuentes.
- Paso 3: El efecto que produce en la superficie un terremoto de una determinada magnitud en un determinado punto de la fuente debe ser estimado con el uso de relaciones de atenuación. La incertidumbre asociada al cálculo de estas relaciones también es considerada en el PSHA.
- Paso 4: Finalmente, la incertidumbre en la ubicación del sismo, la magnitud de este, y en la estimación del parámetro asociado al movimiento del suelo son integrados para obtener la probabilidad de que ese parámetro sea superado durante un período de tiempo particular.

En la **Figura 5** se puede ver un esquema del PSHA.

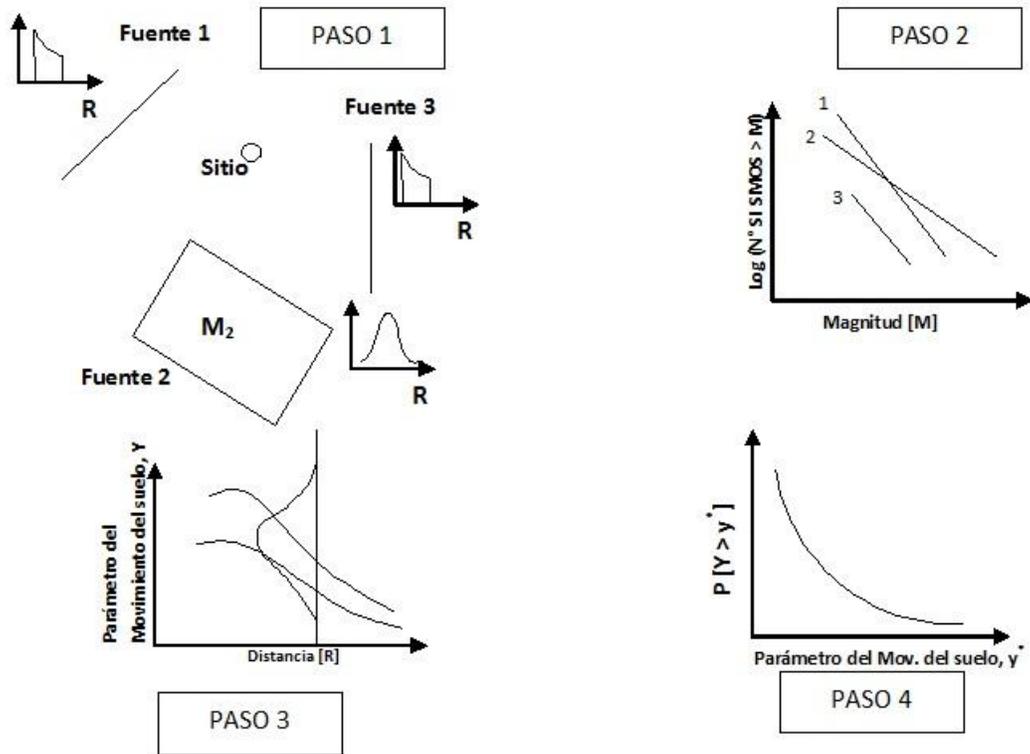


Figura 5: Esquema Método Probabilístico (PSHA)

Como se dijo anteriormente diversos son los parámetros que pueden influenciar el resultado final en el PSHA, los que contribuyen a su nivel de incertidumbre.

2.5.2.1 Modelos de Recurrencia de la Sismicidad.

Estos métodos son importantes ya que permiten determinar tiempos de recurrencia, en un área sismogénica.

Existen varios modelos de recurrencia, pero en este estudio se utilizó el Modelo de Gutenberg-Richter.

Modelo de Gutenberg-Richter

Este método describe la tasa anual de ocurrencia de los sismos. Esta queda definida por la Ecuación (1), donde $N(M)$ es el número de sismos por año mayores o iguales que M . En este análisis esta expresión se utiliza de manera acumulativa, incorporando una magnitud como límite inferior M_{min} y una magnitud máxima M_{max} para cada fuente. El valor de b representa la tasa de los sismos pequeños en relación con los de mayor magnitud. El valor de a representa la actividad sísmica, que es el número de sismos con magnitud \geq que cero.

2.5.2.2 Atenuación de la Aceleración Espectral.

Una vez determinado el modelo de sismicidad de cada una de las fuentes para la región de interés en que se realiza el PSHA, se debe establecer el modelo de predicción del movimiento fuerte del suelo en el sitio en estudio, conocido como ley de atenuación. Dicho modelo relaciona un parámetro del movimiento del suelo con la magnitud y la distancia fuente sísmica-sitio, y una medida de dispersión del modelo.

Generalmente, las leyes de atenuación tienen la siguiente forma.

$$\log Y = \Phi(r, m, , \dots) + \varepsilon \sigma_{logy} \quad (2)$$

Donde:

- $\log(Y)$ es el logaritmo (natural o en base 10 en algunos casos), de la variable Y que suele representar PGA, o algún parámetro espectral en estudio.
- $\Phi(r, m, , \dots)$ es una función de la magnitud, de la distancia y eventualmente de otras variables (tipo de suelo, fuente sismogénica, etc.). Por definición, para $\varepsilon = 0$ se tiene que este valor es la media de la distribución normal. Es decir:

$$\Phi(r, m, , \dots) = \overline{\log Y}$$

- El término $\varepsilon \sigma_{logy}$ se conoce como término de error del modelo de atenuación y tiene gran importancia en el PSHA. El parámetro ε es un número real que indica el número de desviaciones estándar σ_{logy} que se utilizan para evaluar el movimiento $\log(Y)$. Y σ_{logy} corresponde la desviación estándar de $\log(Y)$.

Como en este estudio se realizó un análisis solo para sismos de carácter subductivo, se utilizaron leyes apropiadas para este tipo de fuente en el cálculo de las aceleraciones espectrales entre 0 y 3 segundos.

Estas leyes de atenuación son: las de Youngs et. al (1997), que utiliza una base de datos que incluye registros de aceleraciones de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú e islas Solomon para el cálculo de las aceleraciones. Luego Atkinson & Boore (2003) también utiliza una base de datos mundial, Zhao et al. (2006) que utiliza una base de datos principalmente de Japón para sus cálculos, las leyes de atenuación desarrolladas por Contreras & Boroscsek (2009, 2012) que utiliza registros de acelerogramas exclusivamente obtenidos en territorio nacional e incluye los registros del terremoto del Maule 2010 $M_w=8.8$ y las de Abrahamson (2012) que utiliza una base de datos mundial.

2.5.2.3 Modelo de las fuentes.

Estos modelos describen la distribución espacio temporal de los sismos, integrando la sismicidad histórica e instrumental, la cartografía de las fallas activas y la evidencia geodésica y geodinámica. Son dos modelos los que se utilizan en la actualidad: el modelo de Áreas y el de Fallas.

Modelo de Áreas

La sismicidad observada con características similares es agrupada en polígonos. Este modelo tiene la ventaja de que permite incluir fallas o fuentes que no estén bien definidas.

Modelo de Fallas

Si se tiene la certeza de la existencia de una falla en el área de estudio, y su localización y su extensión es bien conocida, se emplea el modelo de fallas. Cada falla es caracterizada por su largo bien definido, su ancho y sus características sismogénicas.

2.6 ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES.

Para lograr un refinamiento en el PSHA se utiliza la técnica del árbol lógico de decisiones. Lo que se pretende con el uso de esta técnica es tomar en cuenta la incertidumbre asociada a la zonificación y caracterización sísmica y a las relaciones de atenuación. Esta metodología sistematiza y formaliza las decisiones que se han tomado. En este análisis se le asigna una probabilidad de ser correcta a cada decisión. Se puede incluir la incertidumbre en la localización de las fallas, los modelos de recurrencia, relaciones de atenuación y cualquier otro parámetro que se estime conveniente.

La razón que da cabida a este análisis como herramienta de cuantificación de incertidumbre, es que muchas veces el conocimiento sobre determinado factor que entra en juego en el análisis del Peligro Sísmico es incompleto, por lo que es necesario considerar todas las opciones posibles para explicar el comportamiento de dicho factor, asignando una ponderación a cada una de las opciones y atribuyéndole mayor peso a las más realistas.

Un esquema aproximado de esta técnica se muestra en la **Figura 6**, que como se ve consta de diversos nodos y ramas. Los nodos representan los elementos asociados al PSHA cuya incertidumbre se quiere cuantificar. Las ramas representan las distintas opciones que se tienen para cada nodo, y a cada una se le asigna un ponderador que represente el valor esperado por un experto o un grupo de expertos.

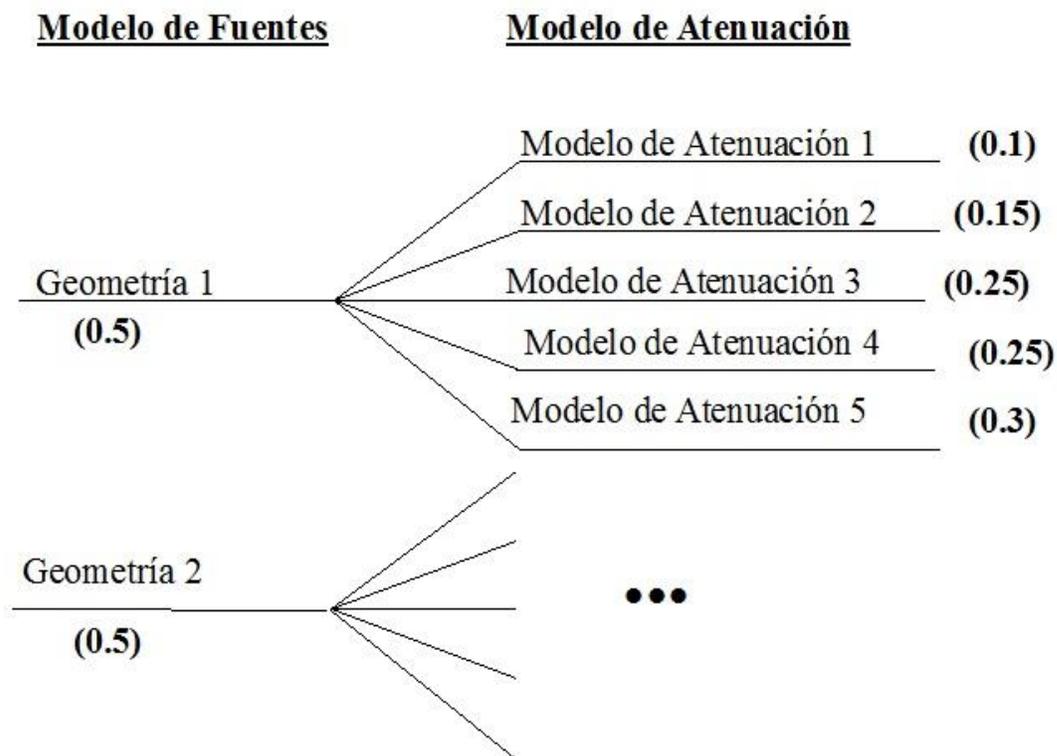


Figura 6: Esquema Árbol Lógico de Decisiones

La suma de cada una de las ramas de un mismo nodo debe ser la unidad. Es importante que las ramas del árbol lógico representen alternativas creíbles o esperables y no opciones que suceden en algunas ocasiones. Los valores de ponderación también pueden representar la confiabilidad o idoneidad que se le asocia a algún método o procedimiento, por ejemplo: leyes de atenuación.

Un suceso cualquiera del árbol lógico, que corresponde a la adopción de un conjunto de opciones de entrada para el cálculo del PSHA, viene definido por una sucesión de ramas pertenecientes a sucesivos nodos, por lo tanto la posibilidad de que ocurra este suceso representado por esta sucesión de ramas, corresponde al producto de los pesos de cada una de las ramas. El resultado final corresponde a la suma de estos valores.

CAPÍTULO III: ZONIFICACIÓN Y CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.

3.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO.

Chile es el sitio preciso para estudiar fenómenos geofísicos y sísmicos ya que es un laboratorio experimental por excelencia en toda su extensión, lo que favorece y enriquece los estudios que se hacen al respecto y permite desarrollar nuevas técnicas y teorías acerca de todo tipo de sismos presentes en nuestro país.

Para definir el área de estudio, se estableció un polígono rectangular entre las latitudes 12°S y 56°S, y las longitudes 80°S y 65°S, que abarca toda la zona de interés.

Luego de tener establecida el área completa del territorio chileno, considerando parte de la zona sur del Perú, se procedió a dividir esta área según la Zonificación de Susa (2004) y se agregó la Zona Austral, tal como se detalla en la *Tabla 7*

ZONA	LATITUD °S
Z1: Definida por el terremoto de 1868	16.5 – 19
Z2: Definida por el terremoto de 1877	18.7 – 22.7
Z3: Definida por Límite inferior del terremoto de 1877 y Límite superior terremoto de 1922	22.7 – 25.4
Z4: Definida por el terremoto de 1922	25.4 – 28.9
Z5: Definida por Límite inferior del terremoto de 1922 y Límite superior terremoto de 1906	28.9 – 31.7
Z6: Definida por el terremoto de 1906	31.7 – 35.1
Z7: Definida por Límite inferior del terremoto de 1906 y Límite inferior terremoto de 1835	35.1 - 37.5
Z8: Definida por Límite inferior del terremoto de 1835 y Límite inferior terremoto 1960	37.5 – 47
ZONA AUSTRAL:	47 – 56

Tabla 7: Zonas utilizadas en este estudio definidas según Susa (2004)

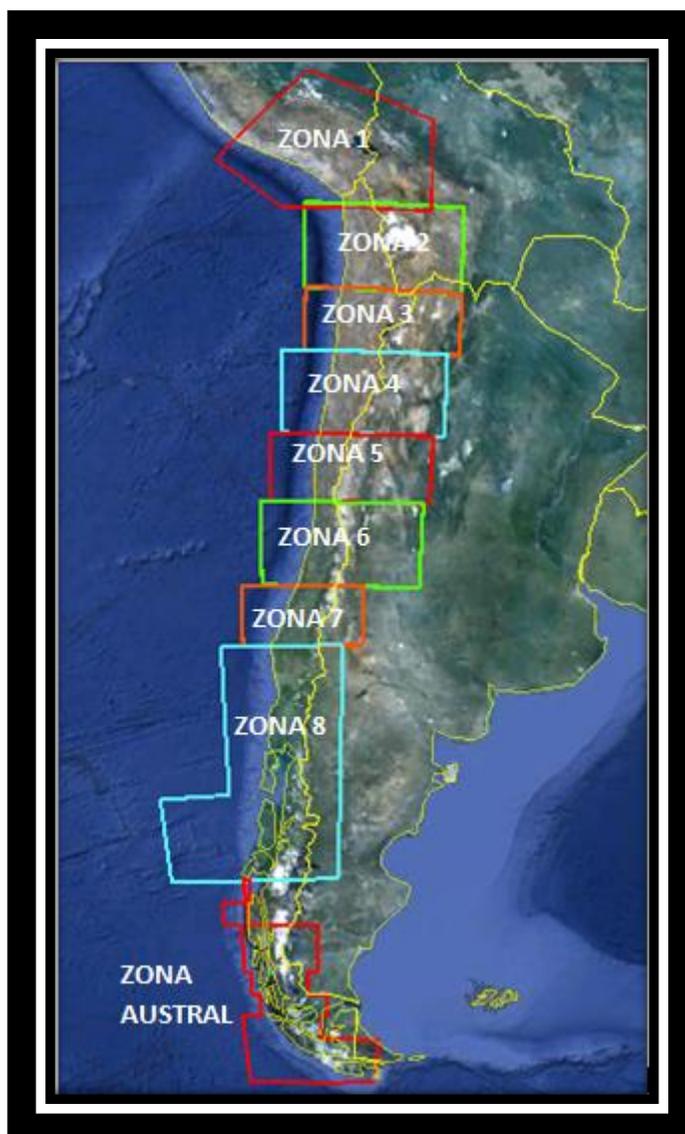


Figura 7: Zonas utilizadas en este estudio definidas según Susa (2004)

3.2 BASE DE DATOS.

3.2.1 Generación de Base de Datos.

El análisis de la sismicidad histórica proporciona criterios para estimar las magnitudes asociadas a los grandes terremotos que afectaron a Chile a partir del siglo XVI.

Tal como se mencionó anteriormente en este estudio se utilizaron los catálogos USGS/NEIC (PDE) y el catálogo SISRA.

Además, desde 1976 a la fecha, Harvard determina el Centroid Moment Tensor de los sismos de magnitudes mayores a $M_w=5.5$; esta base de datos proporciona datos confiables, no solo del mecanismo focal, sino que también de sus magnitudes mb , M_s y M_w , además de una profundidad también determinada en forma muy robusta. Aquellos sismos a los cuales no se les pudo asignar una profundidad o por sus efectos no se les pudo discriminar la fuente sismogénica a la cual pertenecen, serán considerados en el análisis total (sin discriminación de fuente sismogénica) de cada una de las zonas y a nivel país.

A continuación se detalla la información entregada por los catálogos mencionados anteriormente, y de qué forma se confeccionó el catálogo final.

CATALOGO SISRA (USGS/ South America)

(1471-1981)

El NEIC posee varios catálogos entre los cuales se encuentra el determinado por el SISRA generado por CERESIS, que comprende entre 1471 y 1981, aunque la información es idéntica a la entregada por el NEIC. En el catálogo final 4 sismos tienen asignada su magnitud de momento (M_w), 734 tienen su magnitud de ondas superficiales (M_s) y 1984 con magnitud de onda de cuerpo (mb). Estos sismos se encuentran en el período transcurrido entre 1471 y 30/12/1972, ya que desde 1973 en adelante se consideró el catálogo NEIC, que será descrito más adelante.

A continuación se describe la sismicidad histórica proporcionada.

- Magnitudes M_w (4 sismos)

En el catálogo SISRA, se tienen 4 sismos con su magnitud de momento (M_w) asignada. Corresponden a terremotos importantes, que se mencionan a continuación.

- 17/08/1906 8.2 M_w
- 11/11/1922 8.5 M_w
- 06/04/1943 8.2 M_w
- 22/05/1960 9.5 M_w

- **Magnitudes M_s (734 sismos)**

Antes de entregar la cantidad de sismos en los distintos intervalos de magnitud, es necesario mencionar los sismos históricos que fueron incorporados, ya sea porque no tenían su magnitud asignada o porque no se encontraban registrados en el catálogo. Para obtener la información de cada uno de estos sismos se utilizó la fuente SISRA/Chile, del proyecto Ceresis, y los datos del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (GUC), además de algunos trabajos elaborados anteriormente, Susa (2004).

Los sismos históricos agregados son los siguientes:

- Terremoto 9/10/1831 :
Se agrega según la información entregada por la fuente del GUC.
- Terremoto 18/9/1833:
Se agrega según la información entregada por la fuente del GUC.
- Terremoto 3/7/1836:
Se agrega según la información entregada por Susa (2004)
- Terremoto 26/5/1851:
Se agrega según la información entregada por Susa (2004)
- Terremoto 23/1/1878:
Se agrega según la información entregada por la fuente del GUC.
- Terremoto 8/2/1954:
Se agrega según la información entregada por la fuente del GUC.
- Terremoto 21/12/1967:
Se agrega según la información entregada por la fuente del GUC.

Una vez que fueron agregados, se pueden agrupar en distintos intervalos de magnitud, para tener una noción de la cantidad de sismos que serán homologados con los criterios descritos más adelante.

- $M_s < 5$: 88 sismos
Tienen magnitud entre 3.3 y 4.9 M_s .
- $5 \leq M_s < 8$: 629 sismos
Tienen magnitud entre 5 y 7.9 M_s .
- $M_s \geq 8$: 17 sismos
Tienen magnitud entre 8 y 8.7 M_s .

Vistos en la **Tabla 8**:

SISRA	
<i>M_s</i>	
<5	90
5-5.4	149
5.5-5.9	157
6-6.4	102
6.5-6.9	99
7-7.4	82
7.5-7.9	38
≥8	17
TOTAL	734

Tabla 8: Distribución de Magnitudes M_s Catálogo SISRA

- **Magnitudes m_b (1984 sismos)**

Esta escala de magnitud comienza a registrarse a partir del año 1963 (fuente SISRA/Chile, proyecto Ceresis). Los rangos de magnitud están 3.3 y 6.1 m_b .

SISRA	
<i>m_b</i>	
<5	1682
5-5.4	243
5.5-5.9	53
6-6.4	6
TOTAL	1984

Tabla 9: Distribución de Magnitudes m_b Catálogo SISRA

CATÁLOGO NEIC

(1973 – 10/4/2012)

A continuación se entrega el detalle del catálogo entregado por USGS/NEIC. Los sismos han sido clasificados según su tipo de magnitud, y agrupados de tal manera que sea factible buscar la información del catálogo de eventos sísmicos del proyecto Global Centroid Moment Tensor (CMT) de la Universidad de Harvard, que entrega la magnitud de momento de gran parte de los reportes.

- **MAGNITUDES mb :**

Se tiene un total de 15,585 sismos con esta escala de magnitud, los que se encuentran agrupados de la siguiente forma.

- $mb < 5$: 13,485 sismos
Del catálogo CMT se tiene información para 28 registros.
- $5 \leq mb < 6.5$: 2.099 sismos
Del catálogo CMT se tiene información para 454 registros. Los 1,645 sismos restantes que se encuentran entre 5 y 6.2 mb , serán homologados con el criterio descrito más adelante.
- $mb > 6.5$: 1 sismo
Se encontró la información de este sismo en el catálogo del CMT.

Mostrados en la *Tabla 10* y *Figura 8*.

Mb	N° de sismos		
	TOTAL	CMT	Por Homologar
<5	13485	28	13457
5-5.4	1771	278	1493
5.5-5.9	291	152	139
6-6.5	37	24	13
>6.5	1	1	0
TOTAL	15585		

Tabla 10: Distribución de Magnitudes mb Catálogo NEIC

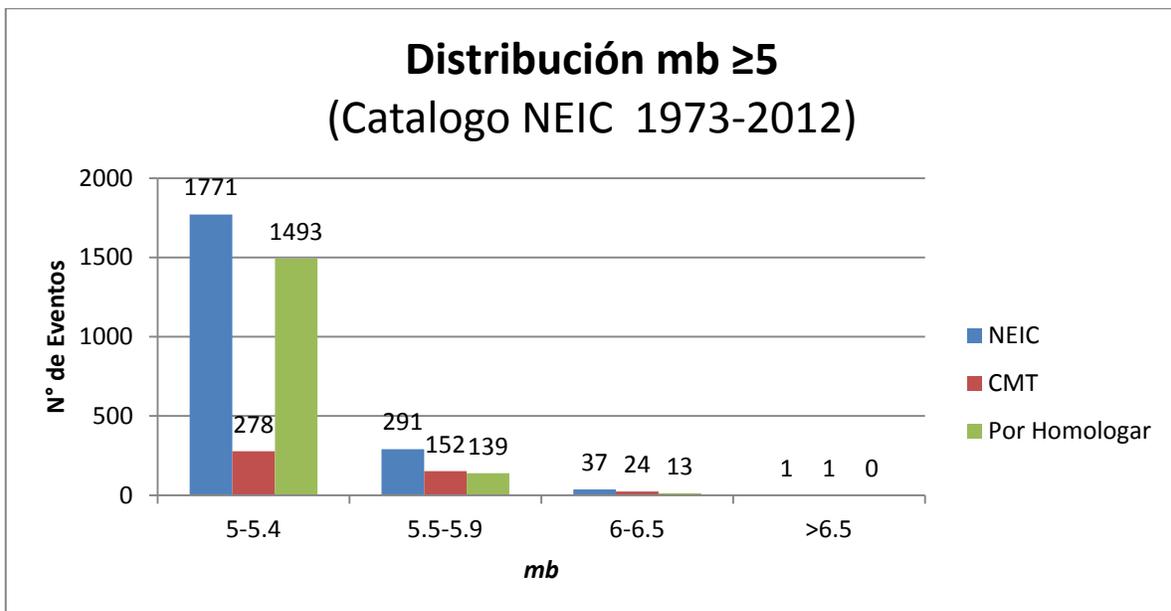


Figura 8: Distribución de Magnitudes m_b Catálogo NEIC

- **MAGNITUDES M_s :**

Se tienen un total de 151 sismos con esta escala de magnitud. De 70 de estos se tiene información en el CMT, el resto de los sismos (81) tienen magnitudes entre 3.3 y 7.6 M_s .

- $M_s < 5$: 16 sismos

A ninguno de los sismos que cae en este rango se pudo asociar su magnitud M_w , se encuentran entre 3.3 y 4.9 M_s , y serán homologados según el criterio descrito más adelante.

- $5 \leq M_s < 8$: 135 sismos

A 70 de estos sismos se les pudo asignar su magnitud M_w del catálogo CMT, los 65 restantes se mueven entre 5 y 7.6 M_s , y serán homologados con el criterio descrito más adelante.

- $M_s \geq 8$:

No se encuentran sismos en este intervalo.

Mostrados en la **Tabla 11** y **Figura 9**.

<i>M_s</i>	N° de sismos		
	TOTAL	CMT	Por Homologar
<5	16	0	16
5-5.4	38	16	22
5.5-5.9	46	20	26
6-6.4	27	18	9
6.5-6.9	13	9	4
7-7.4	7	4	3
7.5-7.9	4	3	1
>8	0	0	0
TOTAL	151		

Tabla 11: Distribución de Magnitudes *M_s* Catálogo NEIC

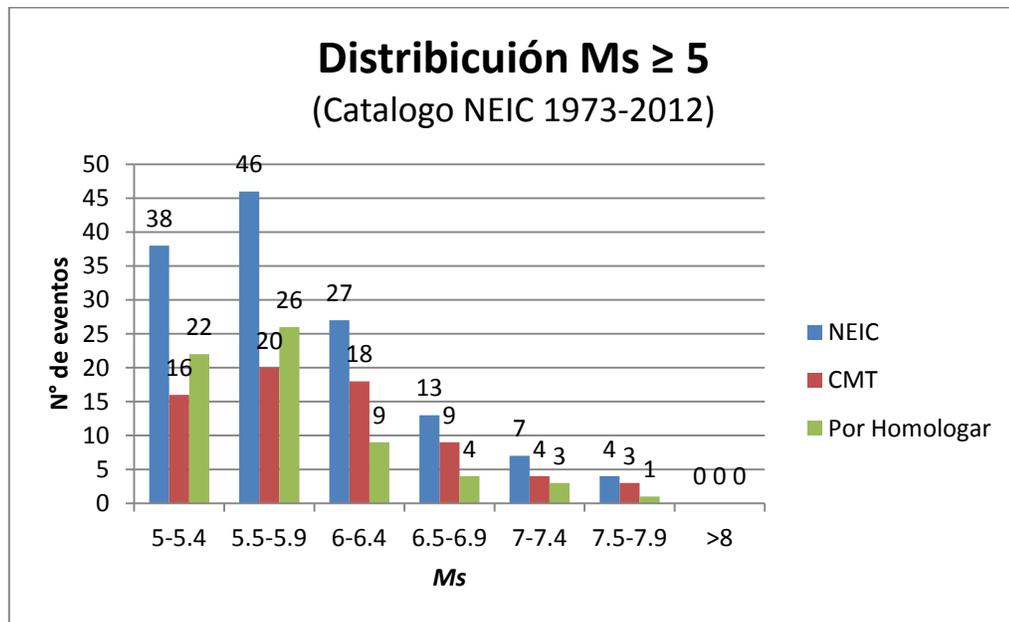


Figura 9: Distribución de Magnitudes *M_s* Catálogo NEIC

- **MAGNITUDES MD:**

Se tiene un total de 20,443 sismos con este tipo de magnitud asignada, los que se dividen de la siguiente forma:

- *MD* < 5 : 20,401 sismos

A ninguno de los sismos que cae en este rango se pudo asociar su magnitud *M_w*.

- $5 \leq MD < 6$: 42 sismos
No se tiene información para ninguno de estos registros, por los que serán homologados según el criterio descrito más adelante. Tienen magnitudes entre 5 y 5.3 MD .
- $MD \geq 6$:
No se encuentran sismos en este intervalo.

- **MAGNITUDES Ml :**

Se tiene un total de 5,246 sismos con esta magnitud asignada, los que se dividen de la siguiente forma:

- $Ml < 5$: 5,238 sismos
A ninguno de los sismos que cae en este rango se pudo asociar su magnitud Mw
- $5 \leq Ml < 6$: 8 sismos
No se tiene información para ninguno de estos registros, por los que serán homologados según el criterio descrito más adelante. Tienen magnitudes entre 5 y 5.2 Ml .
- $Ml \geq 6$:
- No se encuentran sismos en este intervalo.

- **MAGNITUDES UK (Determinada por British Geological Survey)**

Se tiene un total de 1,157 sismos con magnitud UK . Para encontrar la información de estos registros se utilizaron varias fuentes: CMT, NEIC, ISC y GUC

Entre el año 1973- 1980

Se tienen 17 sismos con magnitud UK , de los cuales se tiene la siguiente información.

- 10 sismos que registran magnitudes entre 5.6 y 7.3 UK , tienen información del CMT.
- 7 sismos se tiene información tanto en ISC como NEIC, por lo que se trabajó con la proporcionada por la fuente NEIC.

Entre los días 9/10/2005 y 28/12/2011

Se tienen 1,140 sismos donde:

- 39 registran magnitudes entre 3.8 y 4,6 UK , tienen información del NEIC.
- 1,101 registran magnitudes entre 2.5 y 5.2 UK , tienen información del GUC.

3.2.2 Homologación Escala de Magnitud.

En este trabajo se utilizará como escala única la Magnitud de Momento M_w , que ha sido obtenida del catálogo de eventos sísmicos del proyecto Global Centroid Moment Tensor (CMT) de la Universidad de Harvard. Este catálogo solo tiene registros desde el año 1976 a la fecha, para sismos con magnitud ≥ 5 . Para los sismos que no figuran en él, se estimaron relaciones lineales entre las distintas escalas a partir de los datos disponibles, con el objetivo de trabajar con una escala de magnitud única.

A continuación se explican los distintos criterios que se utilizaron. Estos, están en orden de uso:

Criterio 1: Homologación de Magnitud M_s a M_w

Para los sismos con magnitud de ondas de superficie M_s , se utilizó la regresión lineal mostrada en la **Figura 10**. Esta relación se utilizó para sismos con magnitud $5.5 \leq M_s < 8$.

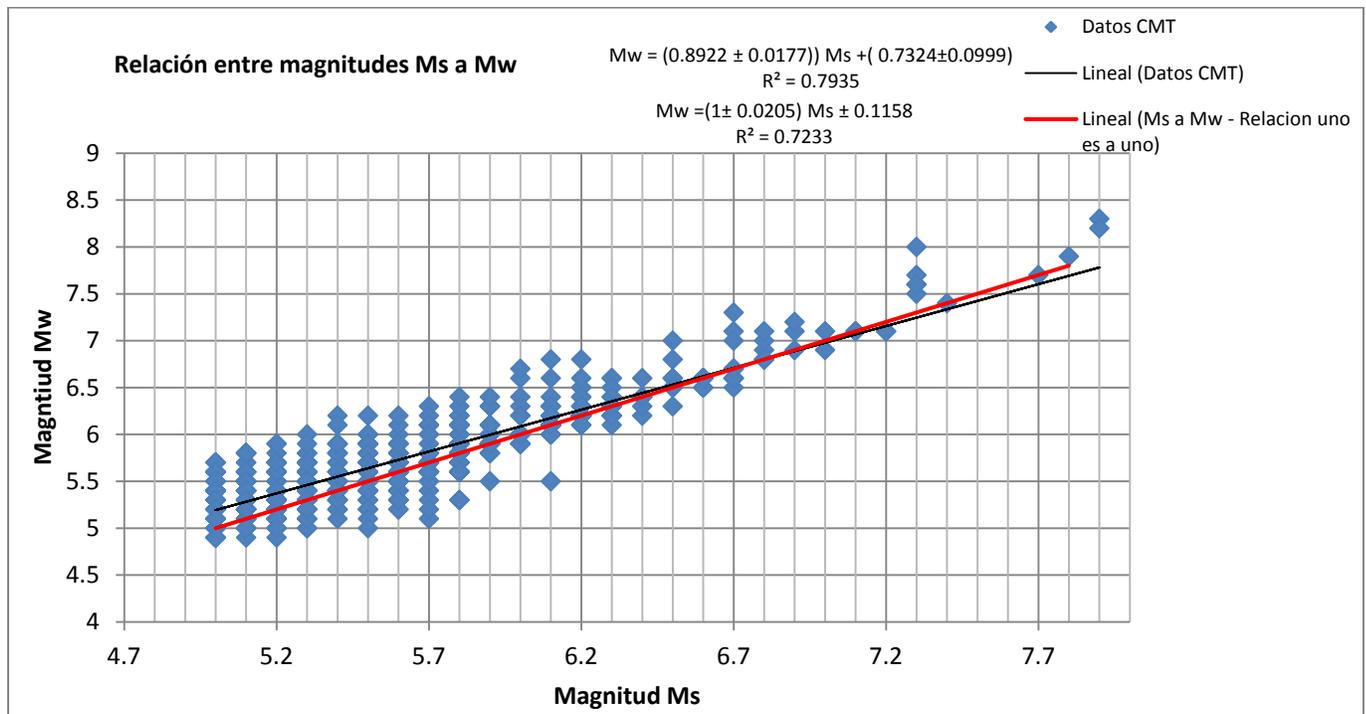


Figura 10: Relación entre escala de magnitud M_s y M_w

Para magnitudes mayores iguales que 8 M_s , la saturación de esta escala de magnitud es bien conocida (Dorbath, 1990); por lo que la utilización del largo de ruptura, permite una mejor estimación de la magnitud M_w .

Dorbath (1990), determinó una relación entre el largo de ruptura (L_r) y la magnitud M_w . Para varios terremotos de Sudamérica se conoce M_w (Kanamori, 1977; Kanamori and McNally, 1982),

y también su L_r (Kelleher, 1972; Nishenko, 1985). Con esto construyó una relación lineal entre M_w y L_r , lo que permitió homologar la magnitud para los terremotos históricos que tienen como dato conocido su largo de ruptura.

La relación es la siguiente:

$$[M_w] = \log(L_r) + 4.44 \quad (3)$$

Los sismos para los cuales se determinó su Magnitud M_w según la Ecuación (3) se muestran en la **Tabla 12**.

Año	Mes	Dia	Magnitud	Largo. Ruptura		Magnitud de Momento [Mw]		
				Proyección Vertical		Susa (2004)	Dorbath (1990)	Mw max
				Ms	[km] ¹				[km]^{2}
1570	2	8	8.3	233		8.3		8.3
1575	3	17	7.3	133		7.9		7.9
1575	12	16	8.5	444		8.7		8.7
1582	1	22		56	80	7.3	7.5	7.5
1604	11	24	8.3	378	450	8.6	8.7	8.7
1615	9	16	7.5	133		7.9		7.9
1647	5	14	8.5	400		8.7		8.7
1657	3	15	8	156		8		8
1664	5	12	7.3		75		7.5	7.5
1687	10	20	7.6	94		7.6		7.6
1687	10	21			150		8	8
1715	8	23		78	75	7.5	7.5	7.5
1730	7	8	8.7	444		8.7		8.7
1737	12	24	7.7	111		7.8		7.8
1751	5	25	8.5	333		8.5		8.5
1784	5	13	7.8	222	300	8.2	8.5	8.5
1796	3	30	7.7	222		8.2		8.2
1819	4	11	8.3	278		8.4		8.4
1822	11	20	8.5	233		8.3		8.3
1833	9	18	7.7		100		7.7	7.7
1835	2	20	8.1	300		8.5		8.5
1836	7	3	7.5	44		7.1		7.1
1837	11	7	8	589		8.9		8.9
1849	12	17	7.5	89		7.6		7.6
1851	5	26	7.2	178		8.1		8.1
1859	10	5	7.6	111		7.8		7.8
1868	8	13	8.5	278	500	8.4	8.7	8.7
1869	8	24	7.4	67		7.4		7.4
1871	10	5	7.3	100		7.7		7.7
1877	5	10	8.3	444		8.7		8.7
1880	8	15	7.7	111		7.8		7.8
1918	12	4	7.8	111		7.8		7.8
1928	12	1	8	133	90	7.9	7.6	7.9
1933	2	23	7.6	56		7.3		7.3
1942	8	24	8.1		200		8.2	8.2
1955	4	19	7	67		7.4		7.4
1966	12	28	7.8	89		7.6		7.6
1971	7	9	7.5	122		7.8		7.8

Tabla 12: Magnitudes Mw calculadas con la relación de Dorbath(1990)

¹ Largos de Ruptura proyección vertical, Susa (2004)

²Largos de Ruptura proyección vertical, Dorbath (1990)

Criterio 2: Homologación de Magnitud mb a M_w

Para los sismos con magnitud de ondas de cuerpo $mb \geq 5$, se utilizó la regresión lineal mostrada en la **Figura 11**. Para los sismos con magnitud menor a 5 se consideraron ambas escalas equivalentes. Aunque la relación no es buena, es una opción razonable usar esta homologación.

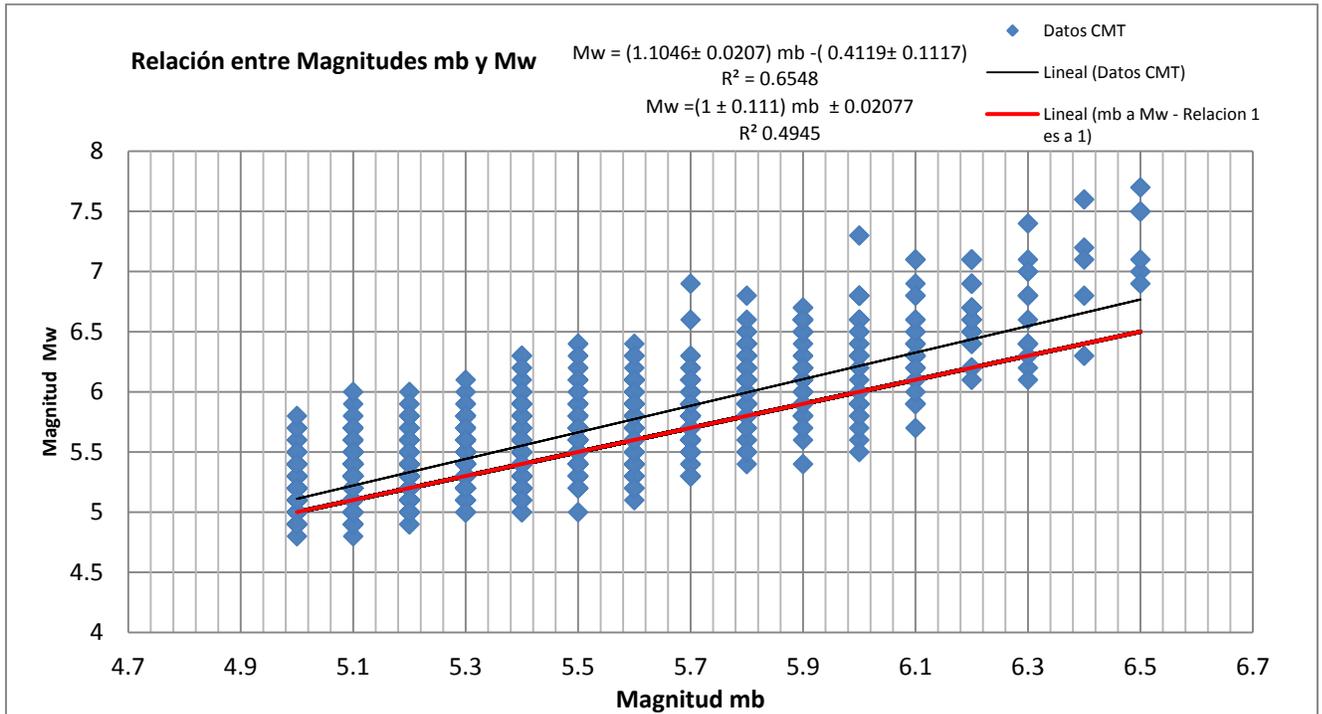


Figura 11: Relación entre escala de magnitud mb y M_w

Criterio 3: Homologación de Magnitud ML a M_w (Contreras 2009)

Para los sismos con magnitud local $ML \geq 5$ reportada se utilizó la relación de la **Figura 12**. Para los sismos con magnitud local $ML < 5$ reportada se consideraron ambas escalas equivalentes.

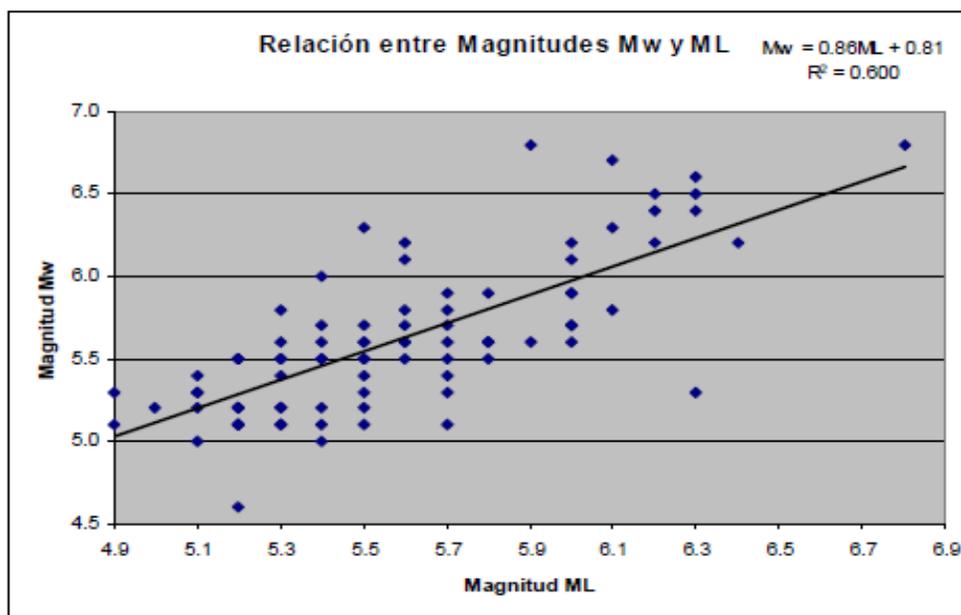


Figura 12: Relación entre Magnitudes Mw y ML (Contreras, 2009).

Criterio 4: Homologación de Magnitud MD a Mw (Contreras, 2009)

Por la falta de antecedentes se consideró que es homólogo a la conversión de ML, es decir, para los sismos con magnitud de duración MD ≥ 5 reportada se utilizó la relación de la **Figura 12**. Para los sismos con magnitud local MD < 5 reportada se consideraron ambas escalas equivalentes.

Una vez homologado y depurado el catálogo queda definido por 4.121 sismos con magnitud $M_w \geq 5$, definidos en las distintas zonas de estudio.

La homologación en porcentajes es la siguiente.

Fuente	Cantidad de Sismos Homologados	[%]
CMT	1598	38.78
Ms a Mw	621	15.07
mb a Mw	1798	43.63
MD a Mw	42	1.02
ML a Mw	16	0.39
USGS	2	0.05
NEIC³	4	0.10
SISRA	5	0.12
L. Ruptura	35	0.85
TOTAL	4121	

Tabla 13: Resumen de homologación Final

³U.S. Geological Survey (2010)

3.2.3 Identificación de las Fuentes Sismogénicas.

Determinada la base de datos de los sismos registrados en el Catálogo, es decir, teniendo registros de magnitudes hasta diciembre del 2012, además de definir los límites de magnitudes que se considerarán y las zonas que se estudiarán, se procede a caracterizar cada fuente sismogénica, definiendo sus límites y su características sismogénicas.

La **Figura 13** ilustra los distintos sismos, Sismos con Profundidad Asignada (S.P.A.), clasificados según magnitud y profundidad, que corresponden a los sismos de cada zona descrita en la sección 3.1 de este Capítulo.

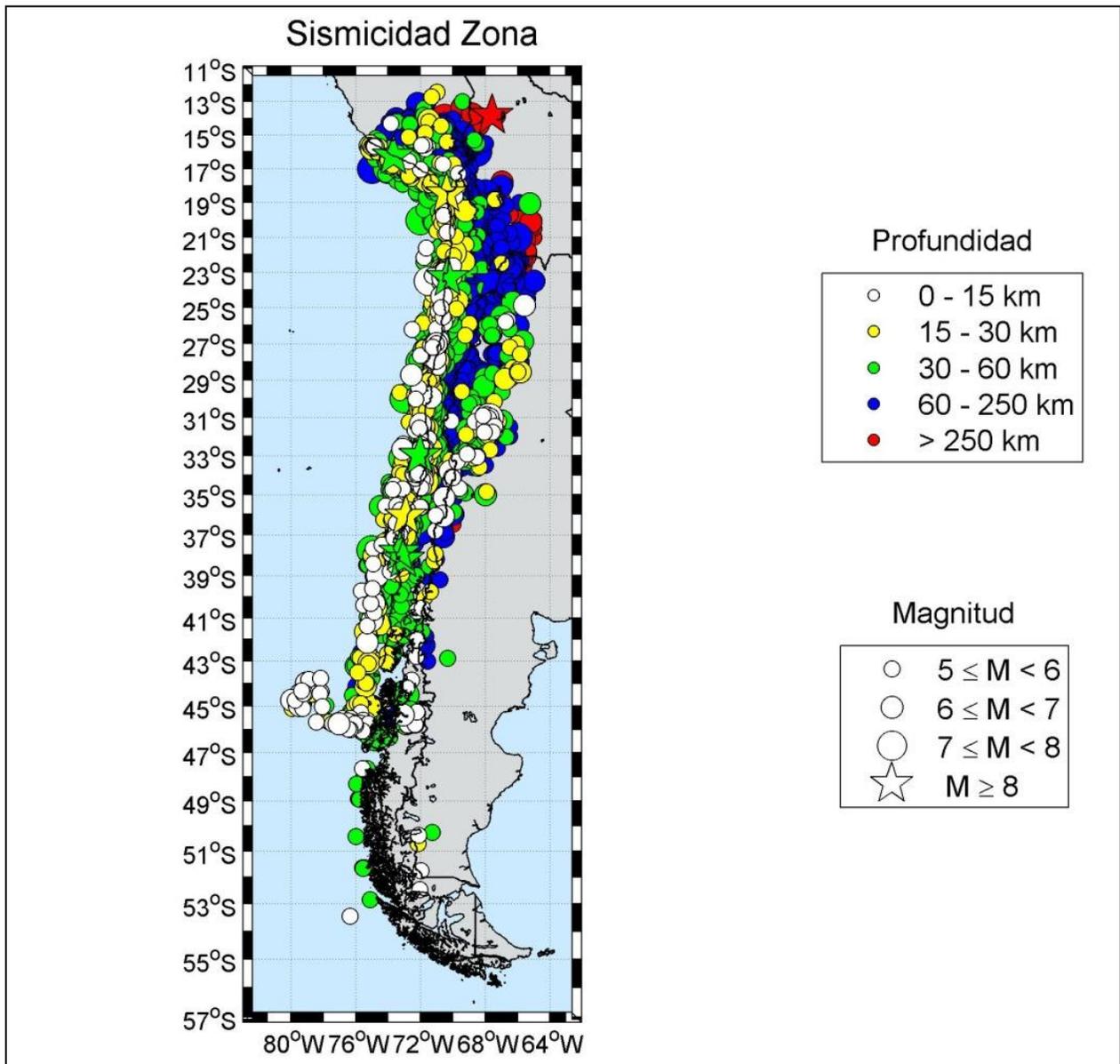


Figura 13: Sismicidad total de la Zona de Estudio (S.P.A.)

Como primera etapa de clasificación se utilizó el criterio utilizado por Poblete J. (2008). Este consiste básicamente en ver la posición relativa de los distintos hipocentros de los sismos, con respecto al perfil de la Placa de Nazca subductada para la misma latitud del hipocentro. Una vez obtenido el perfil se determinan las longitudes para las cuales las profundidades de la Placa son de 10, 60 y 250 km, dividiendo el perfil en cuatro *zonas A, B, C y D* respectivamente, como se ve en la **Figura 14**. El perfil queda definido según la geometría de Tassara et al. (2006), con el que Poblete creó un modelo tridimensional de la placa subductada.

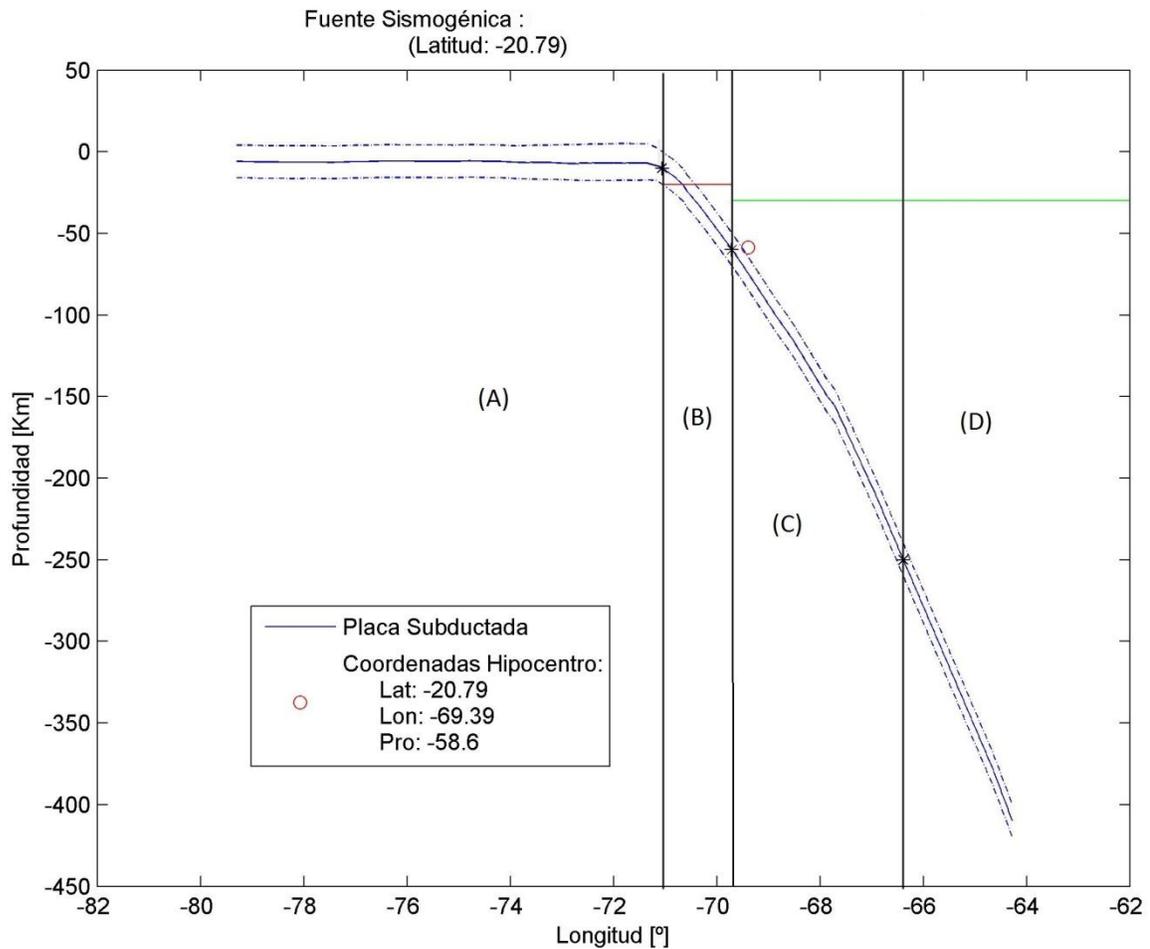


Figura 14: Ejemplo de perfil de Clasificación Latitud° -20.79 Poblete J. (2008)

Los sismos se clasifican según la *Tabla 14*.

Fuente Sismogénica	Descripción c/r al Hipocentro
Superficial-Cortical	Zona B , con profundidad menor a 20 km y menor a la profundidad de la placa. Zona C o D con profundidad menor a 30 km.
Ante-Arco	Zona A
Subducción-Interplaca	Zona B y profundidad mayor a la profundidad de la placa y mayor a 20 km.
Subducción-Intraplaca-Profundidad Intermedia	Zona C y profundidad mayor a la profundidad de la placa y mayor a 30 km.
Subducción-Intraplaca-Profundo	Zona D y profundidad mayor a la profundidad de la placa y mayor a 30 km.
Transcurrente	La identificación de los sismos de fuente sismogénica Transcurrente se realiza en forma manual únicamente, no pudiendo ser identificado por este método, el cual solo contempla sismos subductivos.
Sin información	Si el hipocentro del sismo no cumple con ninguna de las categorías anteriores, se considera <i>Sin Información</i> , pudiendo ser identificada su fuente manualmente.

Tabla 14: Clasificación de los Sismos según fuente Sismogénica

Los sismos que no pudieron ser clasificados mediante este método se clasificaron de forma manual. A continuación se muestra en los mapas de sismicidad, los distintos sismos del catálogo según su fuente sismogénica⁴.

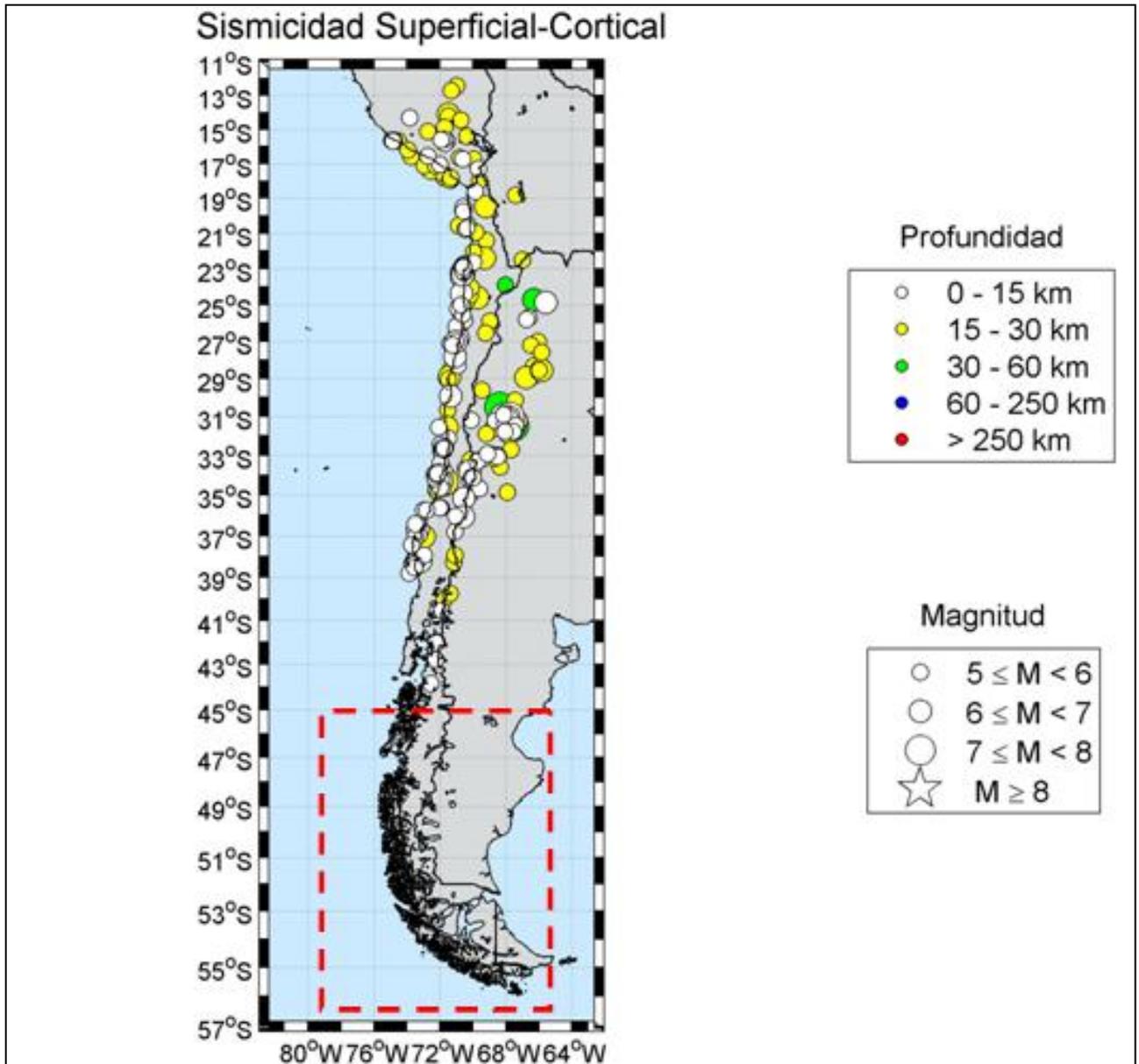


Figura 15: Sismicidad Superficial Cortical (S.P.A.)

⁴ En recuadro rojo se muestra la Zona posterior al punto Triple donde la sismogénesis queda determinada por otros mecanismos que escapan del alcance de este trabajo.

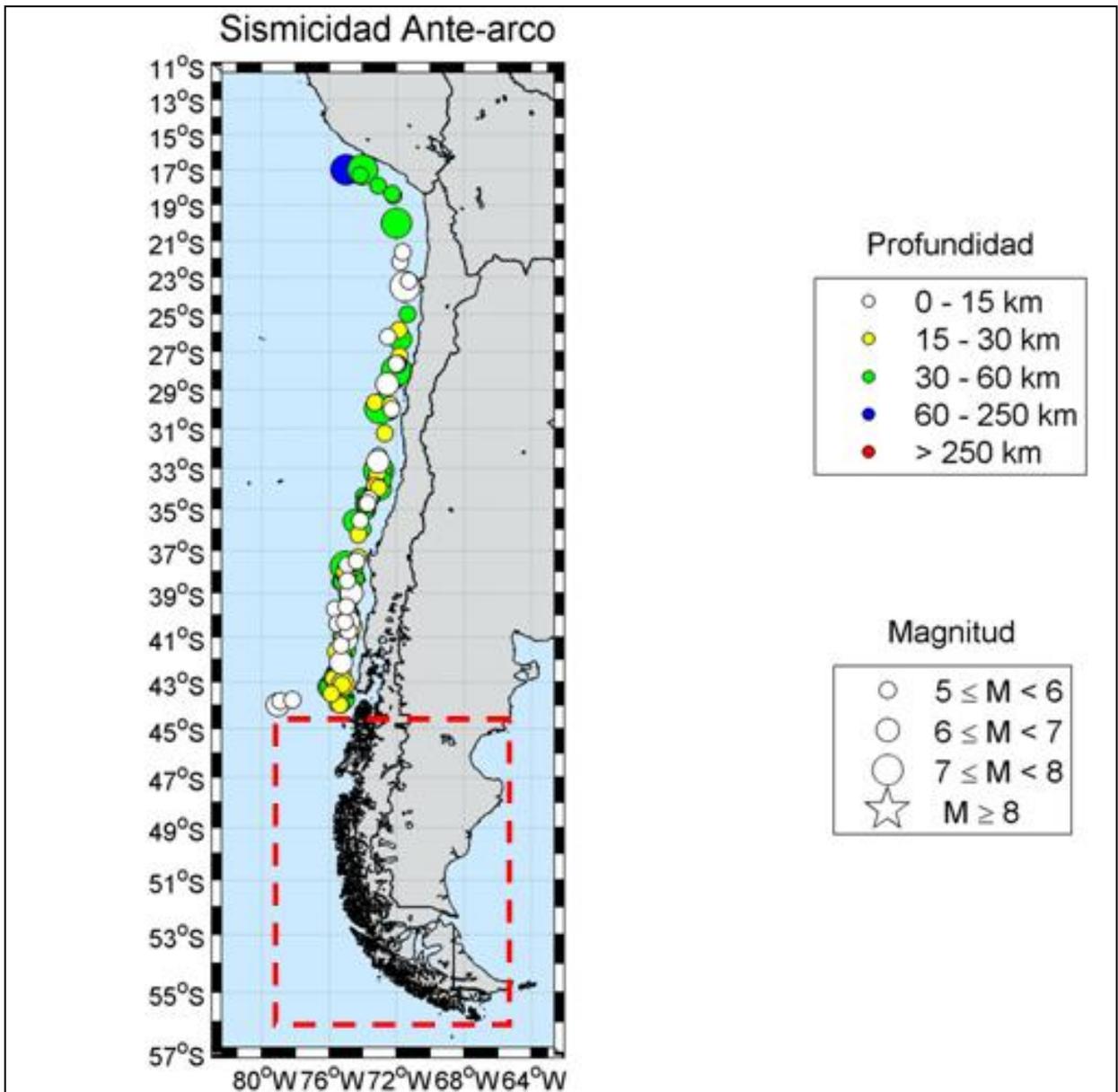


Figura 16: Sismicidad Superficial Ante-Arco (S.P.A.)

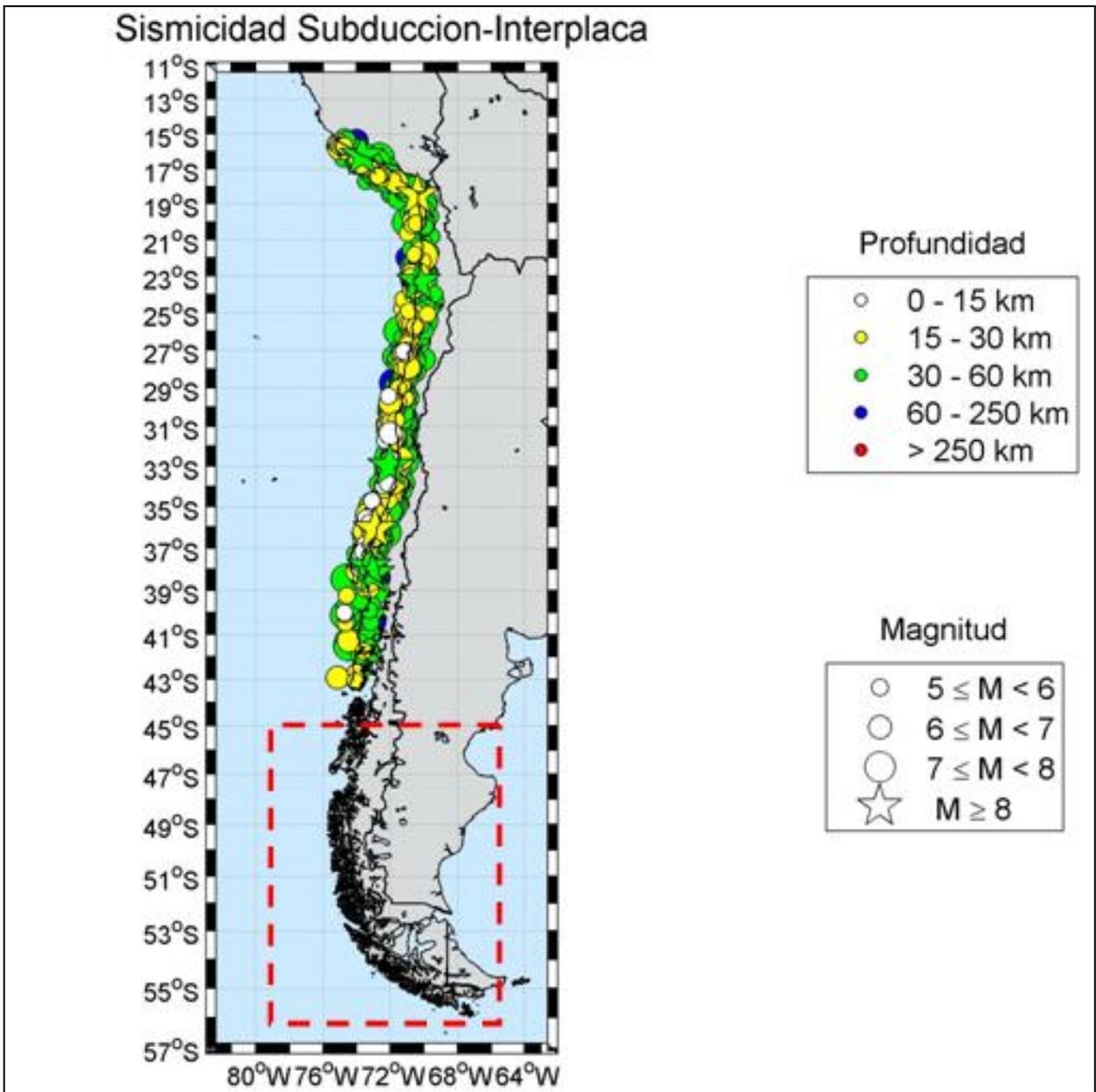


Figura 17: Sismicidad Subducción-Interplaca (S.P.A.)

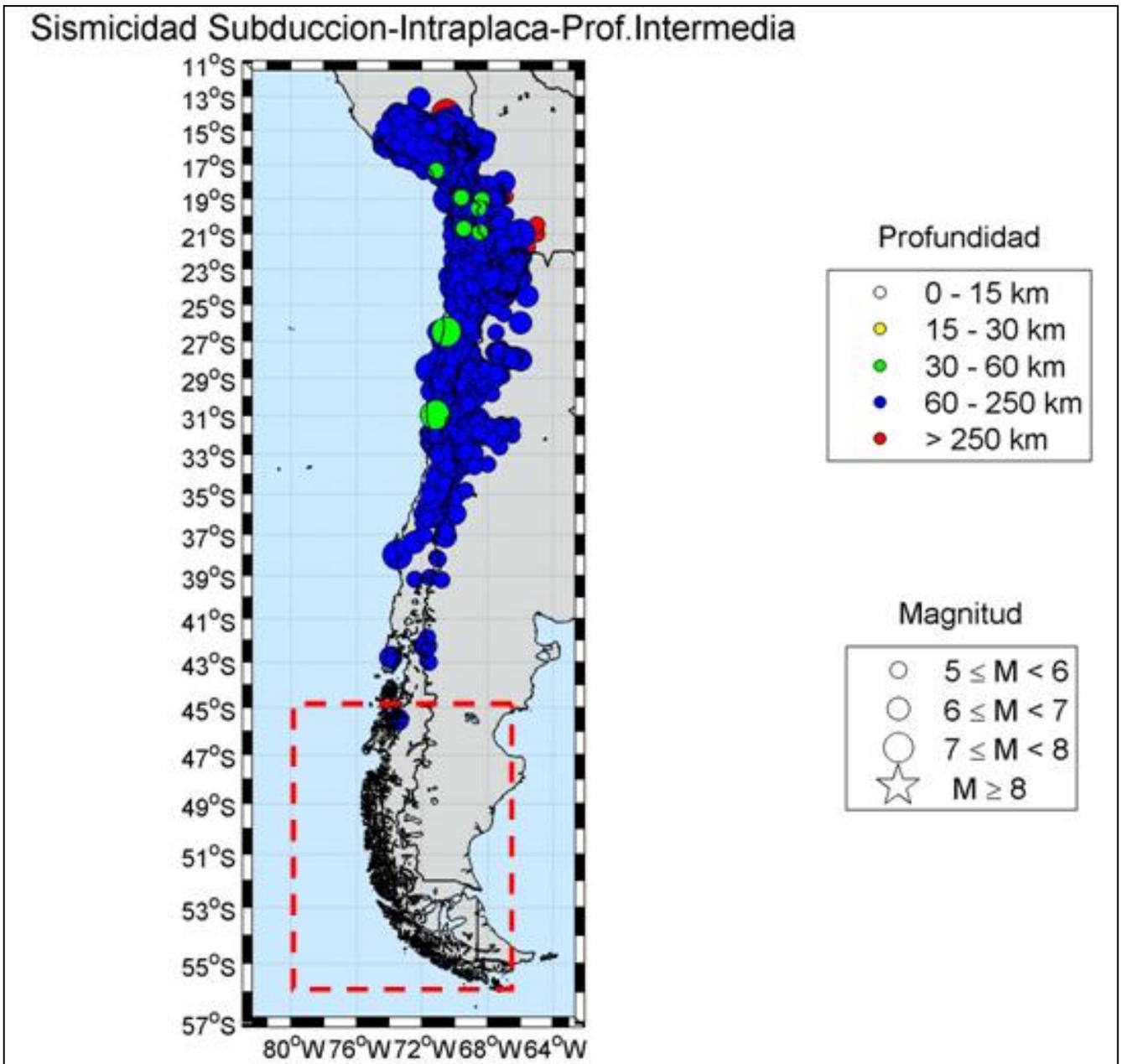


Figura 18: Sismicidad Subducción-Intraplaca-Profundidad Intermedia (S.P.A.)

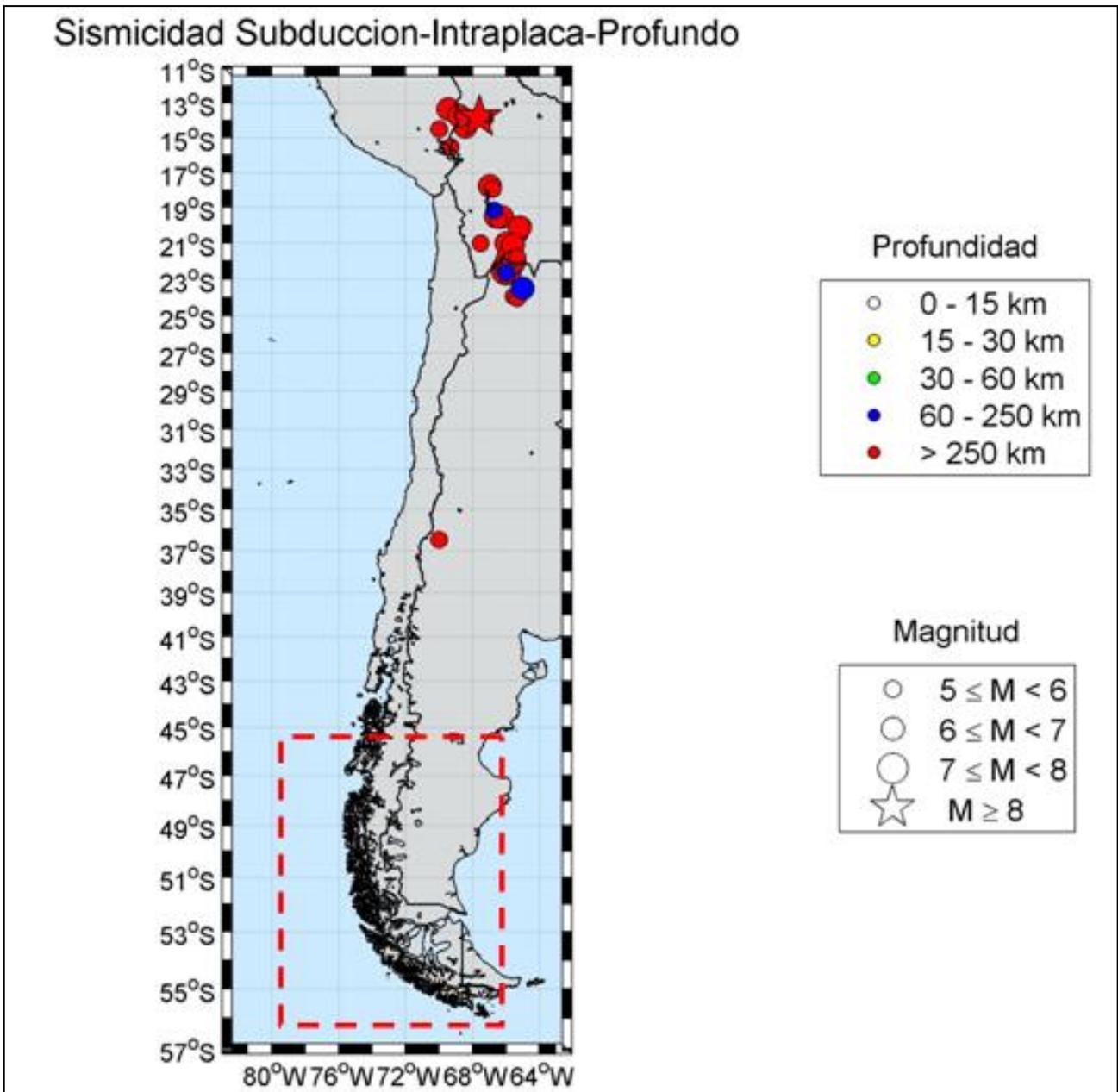


Figura 19: Sismicidad Subducción-Intraplaca-Profundo (S.P.A.)

3.2.4 Completitud del Catálogo.

Uno de los parámetros característicos de la sismicidad de cada zona, necesarios para el cálculo del Peligro Sísmico, es la tasa anual acumulada. Para determinar este parámetro es necesario corregir la falta de completitud del catálogo sísmico debida a la pérdida de información sísmica a medida que nos remontamos en el tiempo. La solución que se adoptó para resolver el problema se basó en establecer los períodos temporales en los que puede admitirse que el registro sísmico, histórico e instrumental, es completo para cada intervalo de magnitud. El análisis de completitud se ha aplicado sobre el catálogo ya depurado y homogeneizado a magnitud momento (M_w).

Para determinar la completitud del catálogo sísmico se ha realizado un análisis visual de la distribución temporal de la sismicidad agrupada en intervalos de magnitud de 5 décimas, en el rango de magnitudes $M_w \geq 5$ (Stepp *et al.* 1973). Asimismo, se ha distinguido entre las fuentes simogénicas en estudio (interplaca e intraplaca profundidad intermedia).

Primero se realiza el análisis para todo Chile sin diferenciar por fuente simogénica. En la **Figura 20** se puede observar la distribución acumulada normalizada de los sismos en el tiempo. El inicio del periodo de completitud viene marcado, idealmente, por una inflexión en el registro de sismos de determinado rango de magnitud. La determinación exacta de esta inflexión, sin embargo, no es siempre evidente. Este hecho es especialmente claro en el caso de los rangos de magnitud mayores ($M_w > 6$). Debe tenerse en cuenta que, dado que la recurrencia de tales sismos puede variar desde centenas a miles de años, sería necesario disponer de una ventana temporal más extensa que la del catálogo para detectar con claridad el inicio del periodo de completitud. Para subsanar este problema se ha adoptado como solución situar el inicio del período de completitud en los mayores rangos de magnitud, cercano o en coincidencia con el inicio del registro histórico de magnitudes del catálogo.

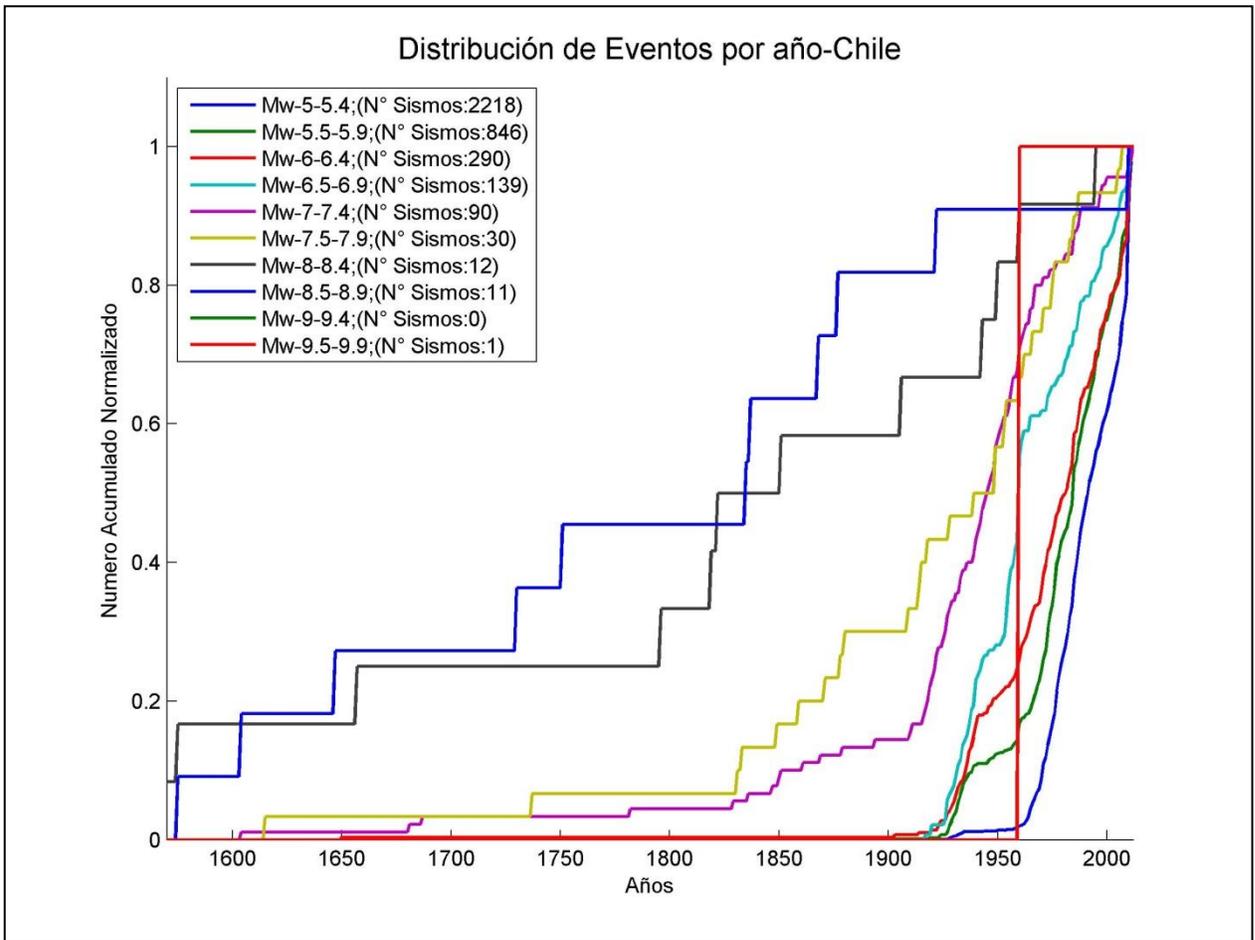


Figura 20: Distribución de Sismos en Chile

Se determinan los siguientes años de completitud.

Intervalos de Magnitud [Mw]	Todo Chile	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	1956	1973
[5.5 ;6 [	615	1973
[6 ;6.5 [	228	1953
[6.5 ;7 [	99	1953
[7 ;7.5 [	76	1911
[7.5 ;8 [	28	1831
[8 ;8.5 [	9	1796
[8.5 ;9 [	11	1570
[9 ;9.5 [	0	1570
[9.5 ;10 [	1	1570

Tabla 15: Años de Completitud del Catálogo para todo Chile

La distribución de los sismos reflejados en un histograma se observa en la **Figura 21**.

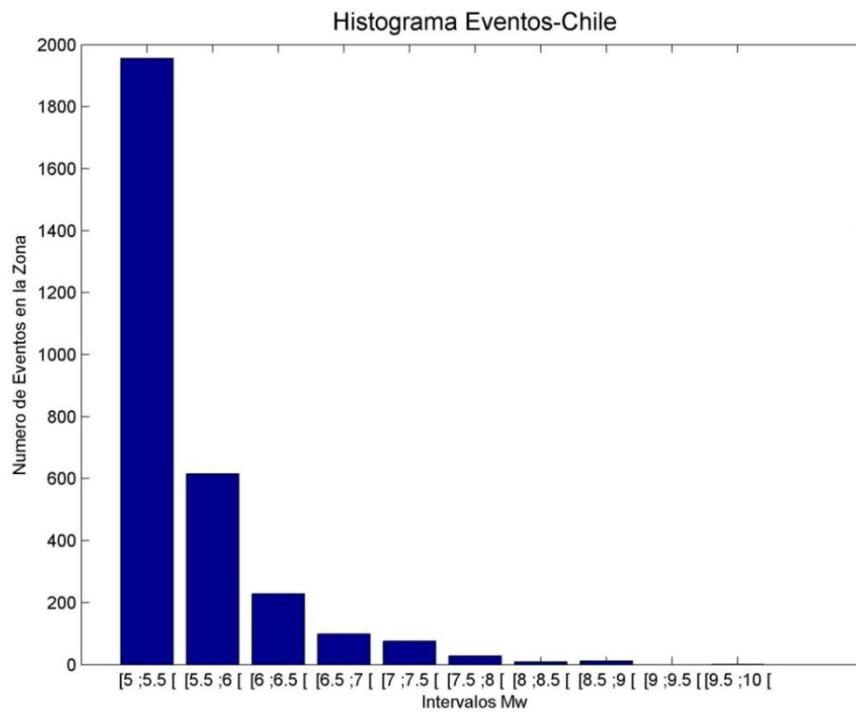


Figura 21: Histograma de Sismos en Chile

En la **Figura 22** se pueden observar los sismos graficados en un mapa a os largo de Chile.

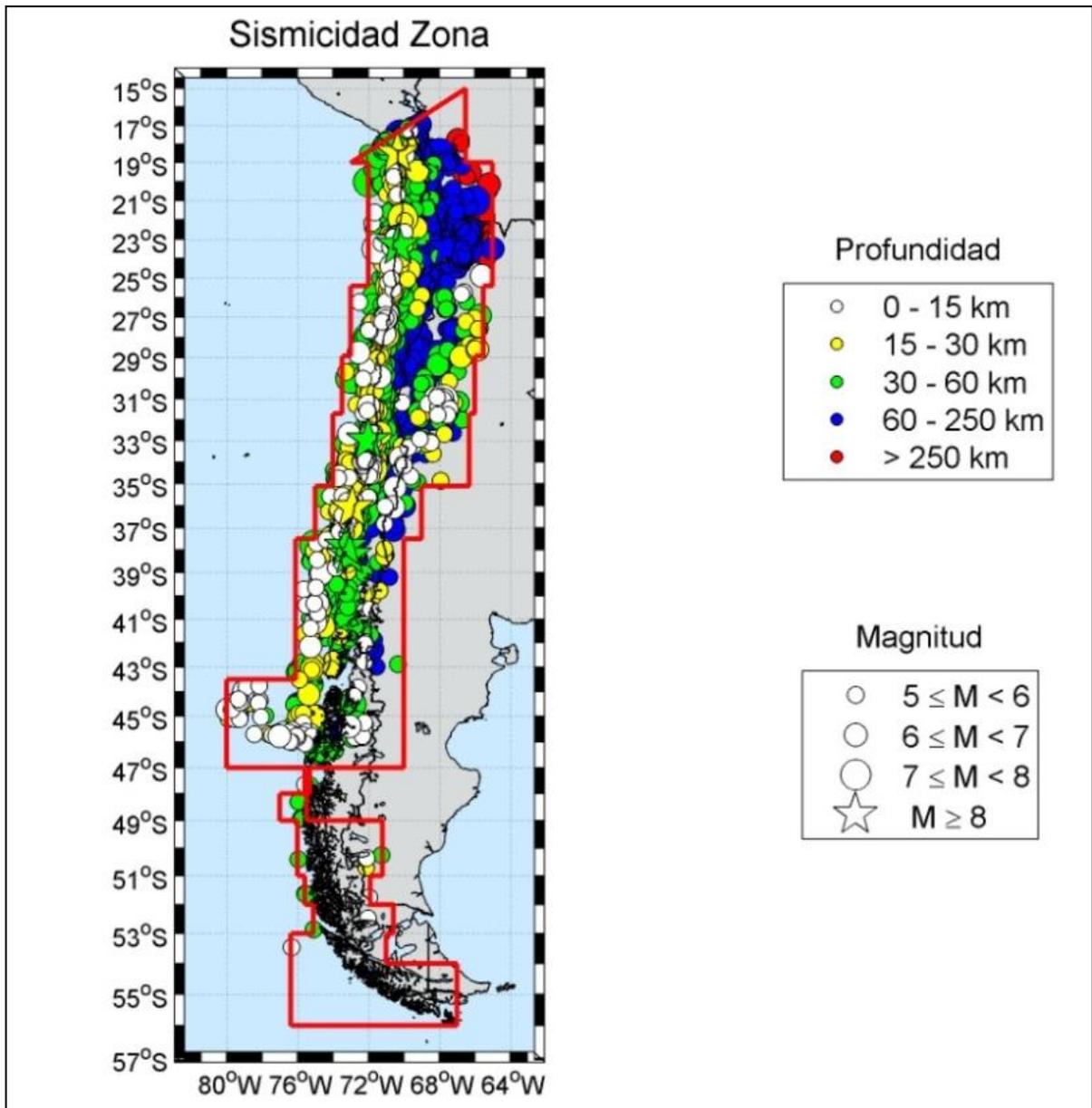


Figura 22: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona: Chile

Este procedimiento se realizó para cada una de las zonas de estudio, las distribuciones temporales, los histogramas y la sismicidad de cada una de ellas se encuentran en el ANEXO B.1.

A continuación se muestran los años de completitud para cada una de las zonas e intervalo de magnitud.

ZONA	Intervalos de Magnitud [Mw]	N° de sismos	Año de completitud
ZONA 1	[5 ;5.5 [	410	1956
	[5.5 ;6 [	127	1956
	[6 ;6.5 [	36	1954
	[6.5 ;7 [	18	1947
	[7 ;7.5 [	16	1913
	[7.5 ;8 [	7	1715
	[8 ;8.5 [	3	1687
	[8.5 ;9 [	3	1604
ZONA 2	[5 ;5.5 [	447	1955
	[5.5 ;6 [	133	1950
	[6 ;6.5 [	37	1948
	[6.5 ;7 [	22	1945
	[7 ;7.5 [	20	1910
	[7.5 ;8 [	5	1871
	[8 ;8.5 [	0	1871
	[8.5 ;9 [	1	1871
ZONA 3	[5 ;5.5 [	332	1966
	[5.5 ;6 [	118	1966
	[6 ;6.5 [	36	1958
	[6.5 ;7 [	13	1958
	[7 ;7.5 [	15	1926
	[7.5 ;8 [	2	1926
	[8 ;8.5 [	2	1926
ZONA 4	[5 ;5.5 [	254	1960
	[5.5 ;6 [	86	1960
	[6 ;6.5 [	24	1946
	[6.5 ;7 [	13	1930
	[7 ;7.5 [	9	1918
	[7.5 ;8 [	5	1859
	[8 ;8.5 [	3	1796
	[8.5 ;9 [	1	1796

Tabla 16: Años de Completitud del Catálogo para las Zonas 1-4

ZONA	Intervalos de Magnitud [Mw]	N° de sismos	Año de completitud
ZONA 5	[5 ;5.5 [	246	1970
	[5.5 ;6 [	86	1970
	[6 ;6.5 [	43	1945
	[6.5 ;7 [	15	1935
	[7 ;7.5 [	7	1894
	[7.5 ;8 [	3	1849
	[8 ;8.5 [	1	1849
ZONA 6	[5 ;5.5 [	406	1965
	[5.5 ;6 [	128	1965
	[6 ;6.5 [	33	1960
	[6.5 ;7 [	16	1930
	[7 ;7.5 [	9	1925
	[7.5 ;8 [	4	1820
	[8 ;8.5 [	3	1575
	[8.5 ;9 [	2	1575
ZONA 7	[5 ;5.5 [	173	1960
	[5.5 ;6 [	40	1960
	[6 ;6.5 [	18	1960
	[6.5 ;7 [	6	1960
	[7 ;7.5 [	1	1960
	[7.5 ;8 [	3	1750
	[8 ;8.5 [	2	1570
	[8.5 ;9 [	3	1570
ZONA 8	[5 ;5.5 [	218	1960
	[5.5 ;6 [	104	1960
	[6 ;6.5 [	32	1960
	[6.5 ;7 [	20	1960
	[7 ;7.5 [	14	1920
	[7.5 ;8 [	4	1737
	[8 ;8.5 [	1	1737
	[8.5 ;9 [	2	1575
	[9 ;9.5 [	0	1575
	[9.5 ;10 [	1	1575
ZONA AUSTRAL	[5 ;5.5 [	15	1972
	[5.5 ;6 [	7	1972
	[6 ;6.5 [	2	1960
	[6.5 ;7 [	0	1960
	[7 ;7.5 [	2	1879
	[7.5 ;8 [	2	1879

Tabla 17: Años de Completitud del Catálogo para las Zona 5 – Zona Austral

Este mismo proceso se realiza ahora diferenciando cada una de las fuentes sísmogénicas en estudio (Subducción Interplaca y Subducción Intraplaca- Profundidad Intermedia). Al igual que para la totalidad de la zona se muestra la distribución temporal, el histograma y la sismicidad para todo Chile, la información para cada una de las zonas se muestra en el ANEXO B.1.

Sismos Subducción Interplaca - Zona: Chile

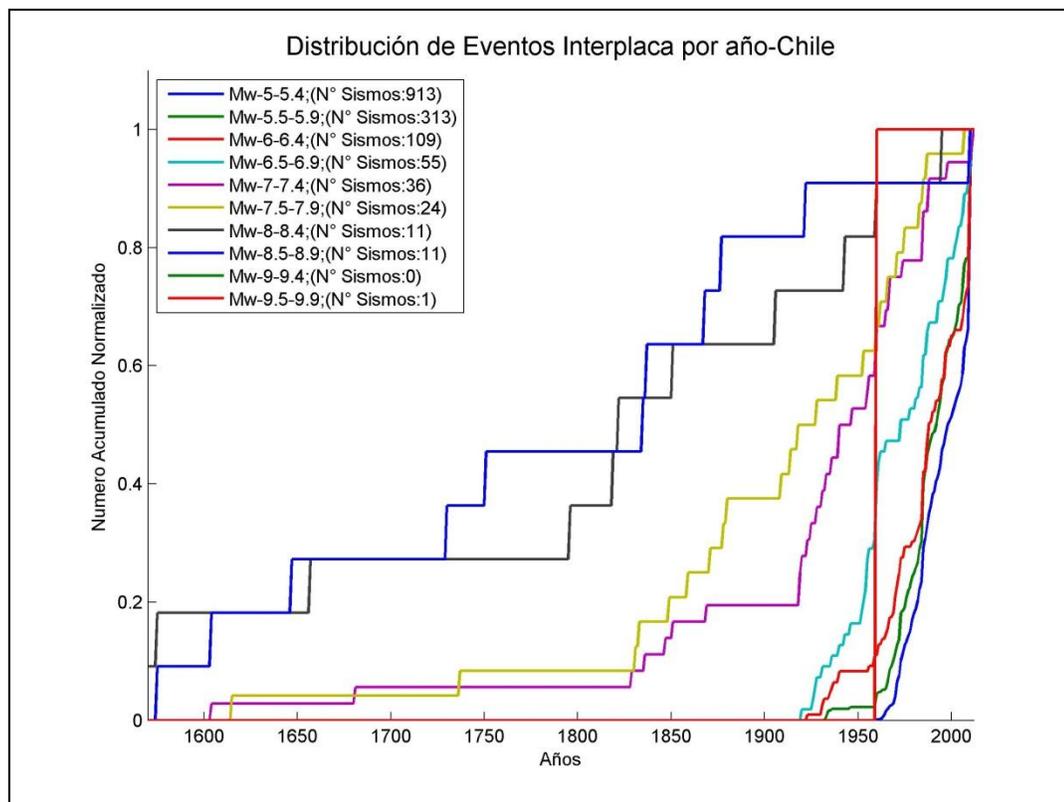


Figura 23: Distribución de Sismos Subducción Interplaca en Chile

Intervalos de Magnitud [Mw]	Todo Chile - Interplaca	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	905	1965
[5.5 ;6 [	306	1960
[6 ;6.5 [	100	1955
[6.5 ;7 [	54	1925
[7 ;7.5 [	29	1918
[7.5 ;8 [	22	1830
[8 ;8.5 [	11	1570
[8.5 ;9 [	11	1570
[9 ;9.5 [	0	1570
[9.5 ;10 [	1	1570

Tabla 18: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca para todo Chile

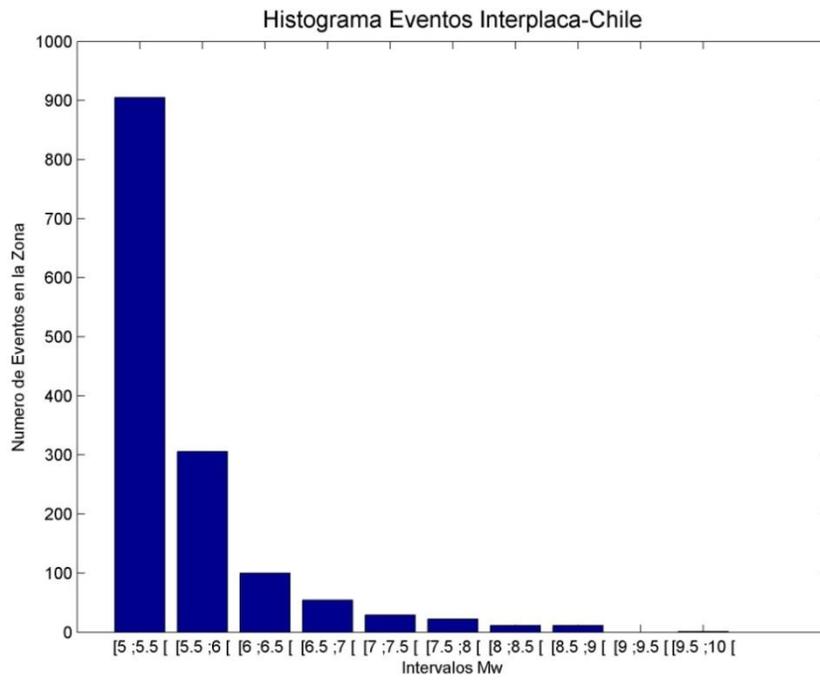


Figura 24: Histograma de Sismos Subducción Interplaca en Chile

Sismicidad Subduccion-Interplaca

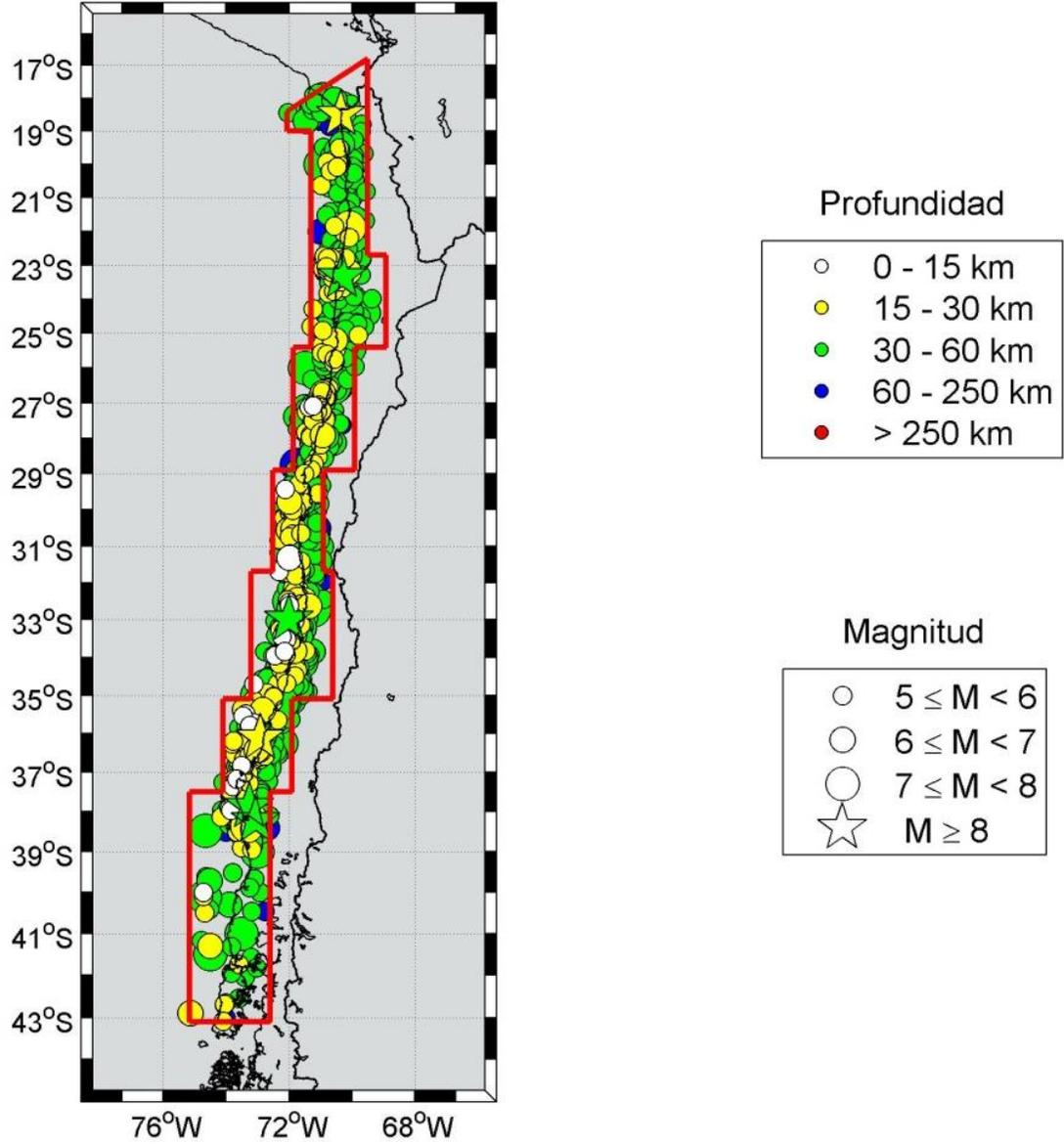


Figura 25: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona: Chile

Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia – Zona: Chile

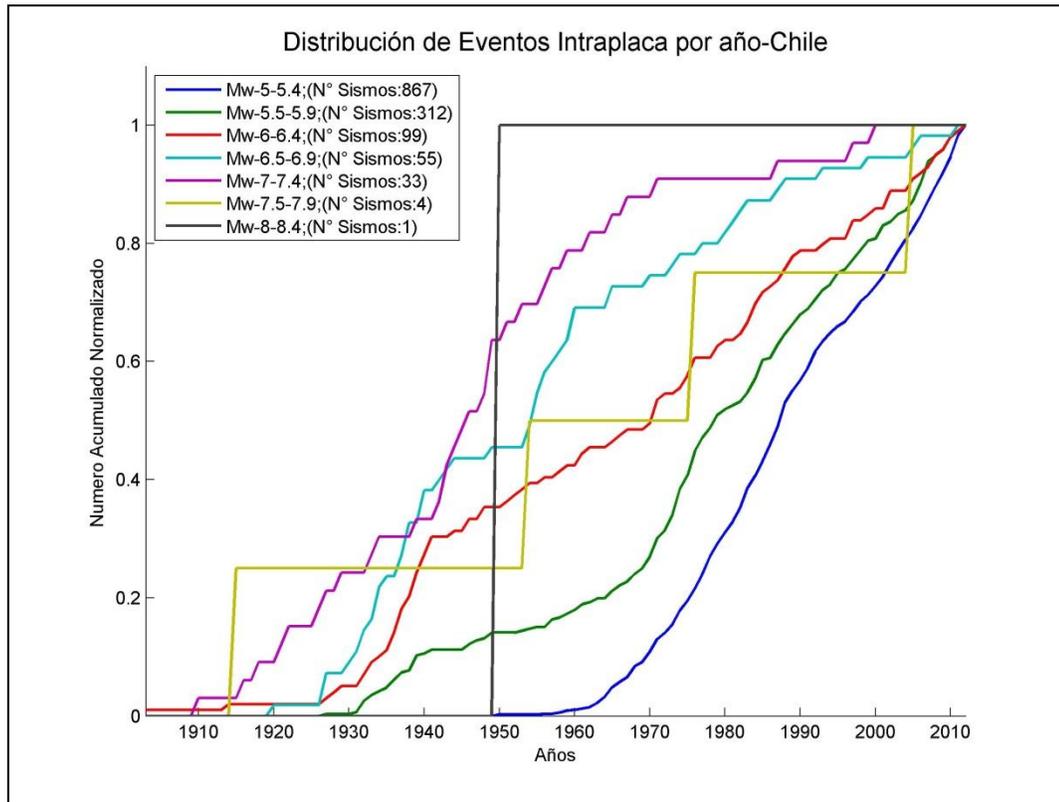


Figura 26: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia en Chile

Intervalos de Magnitud [Mw]	Todo Chile - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	859	1960
[5.5 ;6 [	280	1940
[6 ;6.5 [	94	1930
[6.5 ;7 [	54	1925
[7 ;7.5 [	33	1900
[7.5 ;8 [	4	1900
[8 ;8.5 [	1	1900

Tabla 19: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca–Profundidad Intermedia para todo Chile

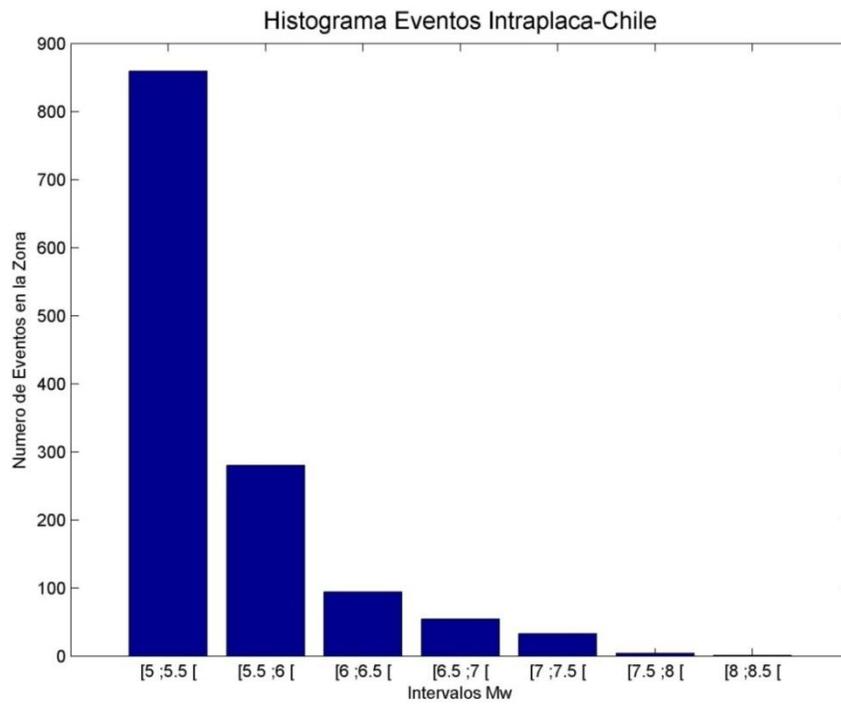


Figura 27: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia en Chile

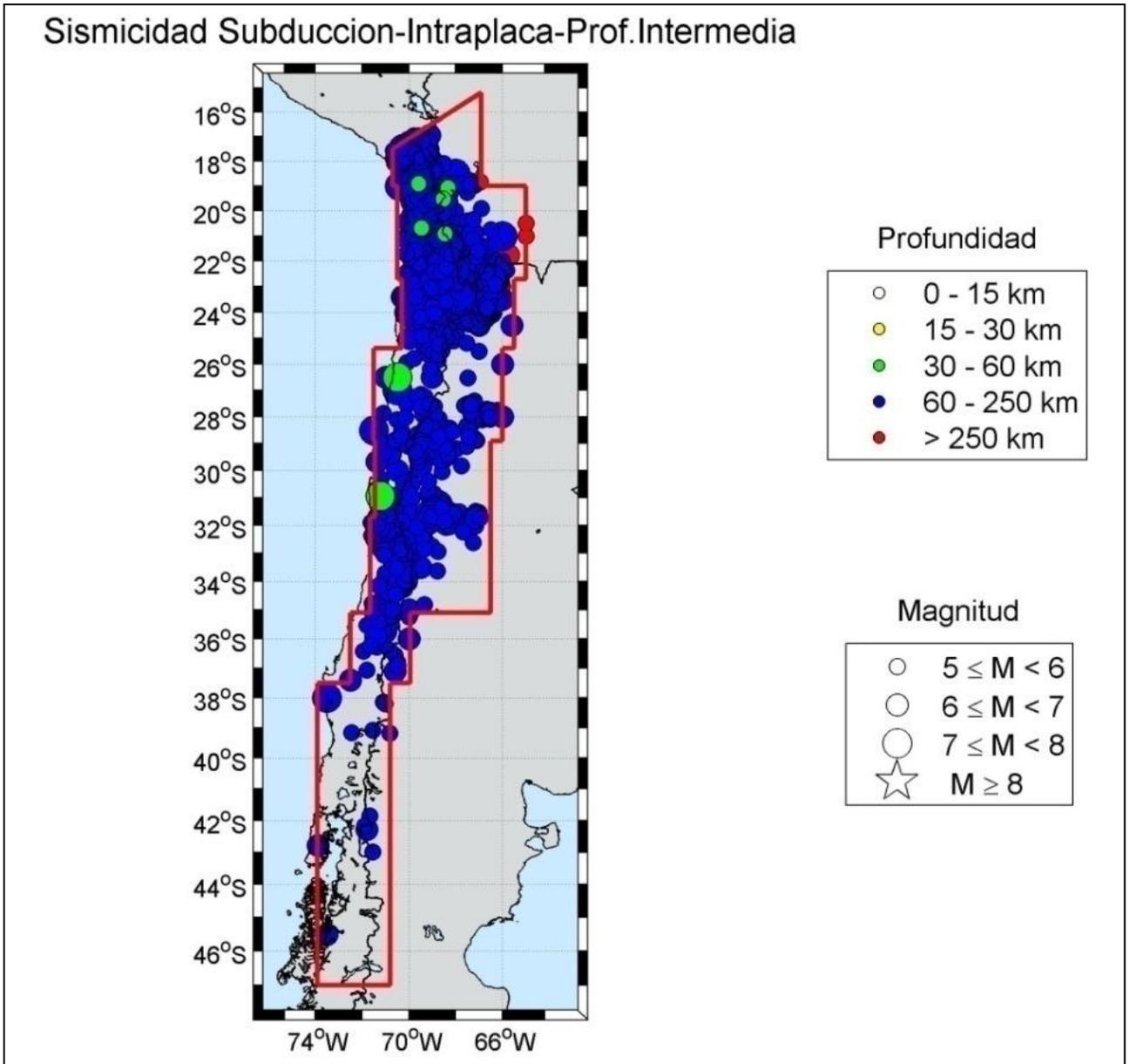


Figura 28: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona:Chile

En la *Tabla 20* y *Tabla 21* se puede observar los años de completitud considerados para cada una de las zonas según su fuente sismogénica e intervalo de magnitud.

ZONA	Intervalos de Magnitud [Mw]	INTERPLACA		INTRAPLACA	
		N° de sismos	Año de completitud	N° de sismos	Año de completitud
ZONA 1	[5 ;5.5 [	126	1980	209	1960
	[5.5 ;6 [	31	1975	66	1960
	[6 ;6.5 [	9	1975	25	1953
	[6.5 ;7 [	4	1975	13	1934
	[7 ;7.5 [	5	1913	10	1921
	[7.5 ;8 [	5	1590	2	1915
	[8 ;8.5 [	2	1552	-	-
	[8.5 ;9 [	3	1552	-	-
ZONA 2	[5 ;5.5 [	64	1965	350	1960
	[5.5 ;6 [	16	1965	97	1950
	[6 ;6.5 [	6	1930	25	1950
	[6.5 ;7 [	7	1930	16	1945
	[7 ;7.5 [	4	1925	13	1910
	[7.5 ;8 [	3	1871	2	1910
	[8 ;8.5 [	0	1615	-	-
	[8.5 ;9 [	1	1615	-	-
ZONA 3	[5 ;5.5 [	91	1970	228	1960
	[5.5 ;6 [	37	1970	68	1960
	[6 ;6.5 [	17	1966	16	1940
	[6.5 ;7 [	7	1935	14	1930
	[7 ;7.5 [	6	1935	8	1926
	[7.5 ;8 [	2	1935	0	1926
	[8 ;8.5 [	1	1935	1	1926
	[8.5 ;9 [	1	1935	1	1926
ZONA 4	[5 ;5.5 [	134	1960	75	1960
	[5.5 ;6 [	52	1960	25	1960
	[6 ;6.5 [	12	1955	3	1945
	[6.5 ;7 [	7	1955	5	1930
	[7 ;7.5 [	4	1920	4	1918
	[7.5 ;8 [	5	1796	-	-
	[8 ;8.5 [	3	1796	-	-
	[8.5 ;9 [	1	1796	-	-

Tabla 20: Años de Completitud del Catálogo por Fuentes: Subducción Interplaca e Intraplaca- Profundidad Intermedia, para las Zonas 1-4

ZONA	Intervalos de Magnitud [Mw]	INTERPLACA		INTRAPLACA	
		N° de sismos	Año de completitud	N° de sismos	Año de completitud
ZONA 5	[5 ;5.5 [	123	1970	57	1970
	[5.5 ;6 [	45	1965	15	1970
	[6 ;6.5 [	21	1955	8	1970
	[6.5 ;7 [	9	1930	3	1935
	[7 ;7.5 [	1	1900	2	1935
	[7.5 ;8 [	2	1849	1	1935
	[8 ;8.5 [	1	1849	-	-
ZONA 6	[5 ;5.5 [	257	1970	61	1965
	[5.5 ;6 [	83	1970	30	1960
	[6 ;6.5 [	27	1965	7	1935
	[6.5 ;7 [	8	1952	4	1930
	[7 ;7.5 [	4	1925	3	1900
	[7.5 ;8 [	4	1820	-	-
	[8 ;8.5 [	3	1575	-	-
	[8.5 ;9 [	2	1575	-	-
ZONA 7 ⁵	[5 ;5.5 [	134	1960	25	1973
	[5.5 ;6 [	30	1960	8	1973
	[6 ;6.5 [	10	1960	5	1955
	[6.5 ;7 [	5	1960	3	1940
	[7 ;7.5 [	1	1960	2	1934
	[7.5 ;8 [	3	1750	-	-
	[8 ;8.5 [	2	1570	-	-
	[8.5 ;9 [	3	1570	-	-
ZONA 8	[5 ;5.5 [	82	1965	-	-
	[5.5 ;6 [	34	1960	-	-
	[6 ;6.5 [	8	1960	-	-
	[6.5 ;7 [	7	1960	-	-
	[7 ;7.5 [	10	1918	-	-
	[7.5 ;8 [	4	1737	-	-
	[8 ;8.5 [	1	1575	-	-
	[8.5 ;9 [	2	1575	-	-
	[9 ;9.5 [	0	1575	-	-
	[9.5 ;10 [	1	1575	-	-

Tabla 21: Años de Completitud del Catálogo por Fuentes: Subducción Interplaca e Intraplaca-Profundidad Intermedia, para las Zonas 1-7

⁵La Zona7 para Sismos Intraplaca Prof. Intermedia corresponde a la unión de las Zonas 7 y 8 de Susa, debido a que la cantidad de sismos asociados a esta fuente para estas zonas son pocos

3.3 GENERACIÓN DE LAS CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.

3.3.1 Cálculo de parámetros asociados a las Curvas de Recurrencia Sísmica.

Estas curvas permiten, establecer el número de sismos por año n con magnitud \geq que m . La distribución exponencial de las magnitudes puede ser expresada por la relación:

$$\log_{10}n(m) = a - b \cdot m \quad (4)$$

Donde:

- n : Es el número de sismos por año con magnitudes \geq que un valor m .
- a : Representa la actividad sísmica. Es el número de sismos con magnitudes mayores que cero durante el tiempo t , que considera el catálogo de registros.
- b : Coeficiente que indica la proporción de sismos pequeños con respecto a la cantidad de sismos grandes. Su valor fluctúa generalmente entre 0.7 y 1.5, en general es cercano a 1.0 cuando los sismos son de origen tectónico. Mientras mayor es el valor de b , mayor es la cantidad de sismos pequeños respecto de los grandes registrados.

Expresada de otra forma:

$$n(m) = 10^{a-bm} \quad (5)$$

$$n(m) = 10^a \exp(\ln(10^{-bm})) \quad (6)$$

$$n(m) = 10^a \exp(-b \cdot \ln(10) \cdot m) \quad (7)$$

$$n(m) = 10^a e^{-\beta m}; \text{ Donde } \beta = b \cdot \ln(10) \quad (8)$$

Se designa $v_0 = 10^a$ al número de sismos con magnitud $m \geq 0$ por unidad de tiempo. Imponiendo un límite inferior de magnitud $m_{min} \leq m < \infty$ con $m_{min} \neq 0$. La ecuación (8) queda.

$$n(m) = v_{m_{min}} e^{-\beta(m-m_{min})} \quad (9)$$

Donde $v_{m_{min}}$ corresponde al número de sismos con magnitud $m \geq m_{min}$ y la función de densidad queda.

$$f_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_{min})} \quad (10)$$

$$\int_{m_{min}}^{\infty} f_M(m) = 1 \quad (11)$$

$$\int_{m_{min}}^{\infty} \beta e^{-\beta(m-m_{min})} dm = \beta e^{\beta(m_{min})} \int_{m_{min}}^{\infty} e^{-\beta(m)} dm \quad (12)$$

$$-\beta e^{\beta(m_{min})} \left[\frac{e^{-\beta(\infty)}}{\beta} - \frac{e^{-\beta(m_{min})}}{\beta} \right] = \beta e^{\beta(m_{min})} \left[0 + \frac{e^{-\beta(m_{min})}}{\beta} \right] = e^{\beta(m_{min}-m_{min})} = e^0 = 1 \quad (13)$$

Ahora imponiendo un límite superior que toma el valor de m_{max} , las magnitudes quedan acotadas por $m_{min} \leq m < m_{max}$, y para incorporar el límite superior se trunca y se renormaliza la función de densidad.

$$f_M(m) = k\beta e^{-\beta(m-m_{min})} \quad m_{min} \leq m < m_{max} \quad (14)$$

Para obtener k , sabemos que la integral de la función de densidad en el intervalo que la define debe ser igual a 1.

Por lo tanto.

$$\int_{m_{min}}^{m_{max}} k\beta e^{-\beta(m-m_{min})} = 1 \quad (15)$$

$$-k\beta e^{\beta(m_{min})} \left[\frac{e^{-\beta(m_{max})}}{\beta} - \frac{e^{-\beta(m_{min})}}{\beta} \right] = 1 \quad (16)$$

$$-ke^{\beta(m_{min})} [e^{-\beta(m_{max})} - e^{-\beta(m_{min})}] = 1 \quad (17)$$

$$k[-e^{-\beta(m_{max}-m_{min})} + 1] = 1 \quad (18)$$

$$k = [1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}]^{-1} \quad (19)$$

Si la ecuación (9) es modificada incorporando el límite superior m_{max} , que queda de la siguiente manera.

$$n(m) = v_{m_{min}} [1 - k + ke^{-\beta(m-m_{min})}] \quad m_{min} \leq m < m_{max} \quad (20)$$

Una aproximación para estimar β y $v_{m_{min}}$ es por máxima verosimilitud, esta se explica en el ANEXO A, otro método es el de mínimos cuadrados. En este trabajo se utilizarán los dos para establecer una comparación entre ambos y ver de qué manera afecta en el cálculo del Peligro Sísmico.

Como los datos se encuentran agrupados en distintos intervalos de magnitud, se utilizará la metodología estudiada por Weichert (1980), que se explica en el ANEXO A, en la sección de Estimación de los parámetros de Gutenberg-Richter por Máxima Verosimilitud para datos agrupados.

En la **Figura 29** se tiene la relación de recurrencia para todo el Catálogo en Chile y en la **Figura 30** y **Figura 31** se tiene para los sismos Subducción- Interplaca e Intraplaca Profundidad Intermedia, respectivamente. La información para cada una de las zonas de estudio se entrega en el ANEXO B.1.

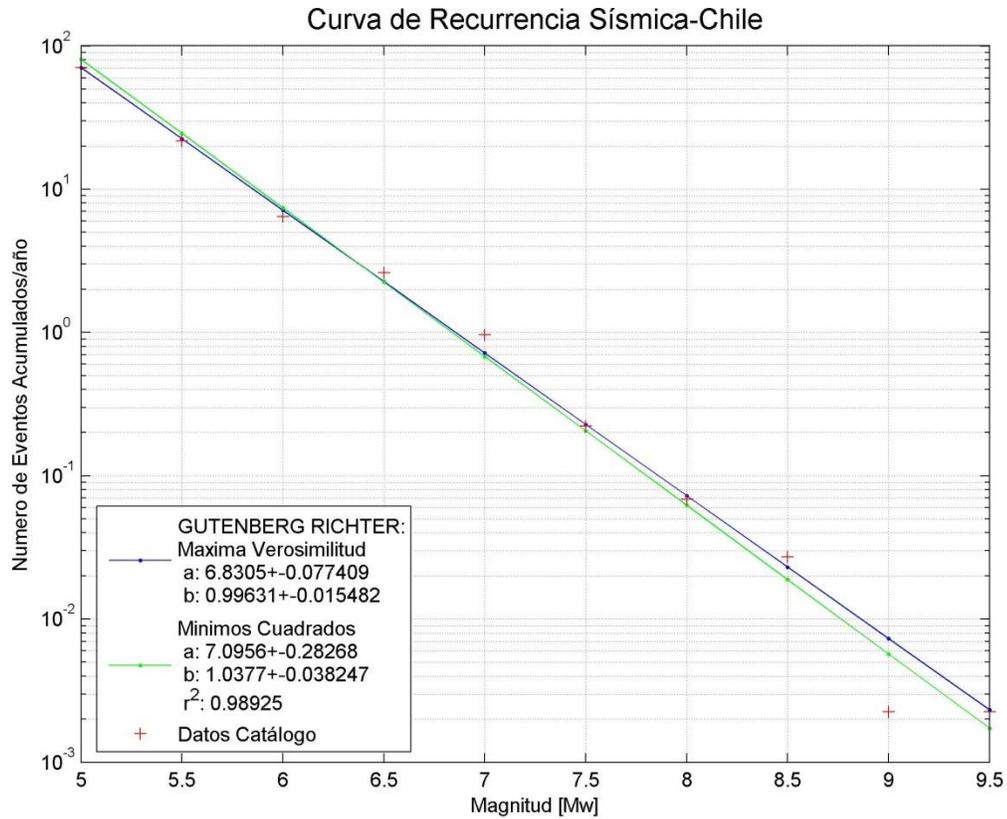


Figura 29: Curva Recurrencia Sísmica –Zona: Chile

Intervalos de Magnitud [Mw]	Todo Chile		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N] – Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N] - Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	70.618	80.732	40
≥ 5.5	22.426	24.445	40
≥ 6	7.122	7.402	60
≥ 6.5	2.262	2.241	60
≥ 7	0.718	0.679	102
≥ 7.5	0.228	0.205	182
≥ 8	0.072	0.062	217
≥ 8.5	0.023	0.019	443
≥ 9	0.007	0.006	443
≥ 9.5	0.002	0.002	443

Tabla 22: Información Gutenberg-Richter – Zona: Chile

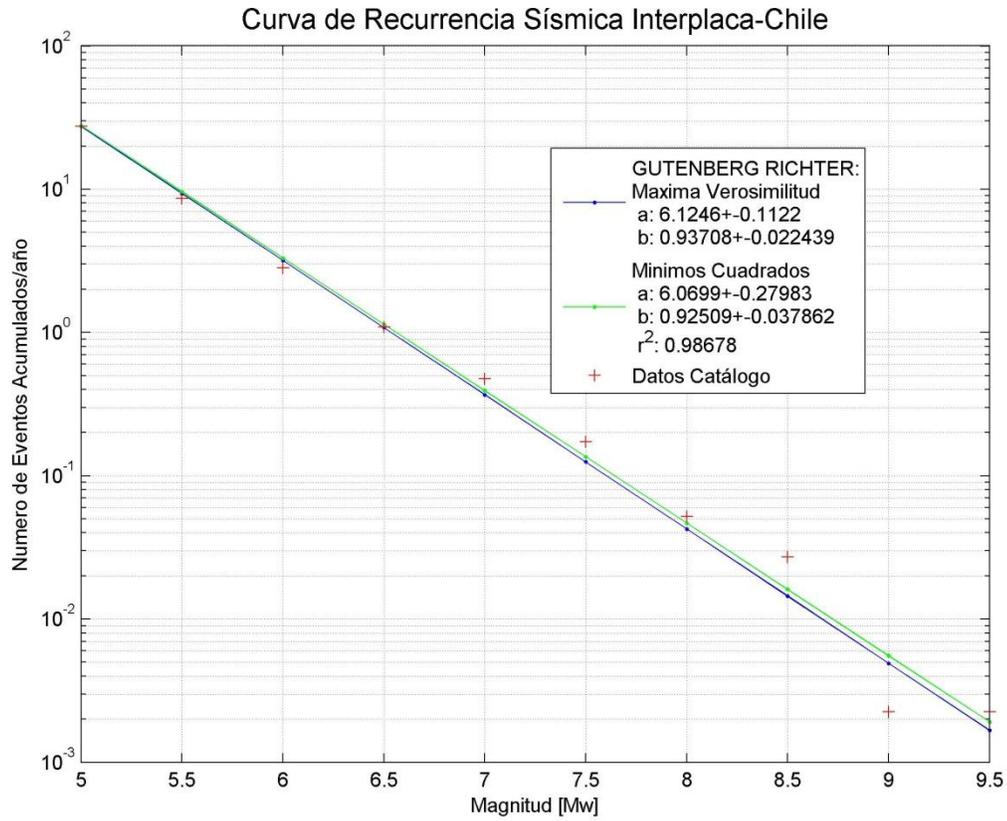


Figura 30: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona: Chile

Subducción-Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	27.491	27.825	48
≥5.5	9.347	9.591	53
≥6	3.178	3.306	58
≥6.5	1.080	1.140	88
≥7	0.367	0.393	95
≥7.5	0.125	0.135	183
≥8	0.042	0.047	443
≥8.5	0.014	0.016	443
≥9	0.005	0.006	443
≥9.5	0.002	0.002	443

Tabla 23: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona: Chile

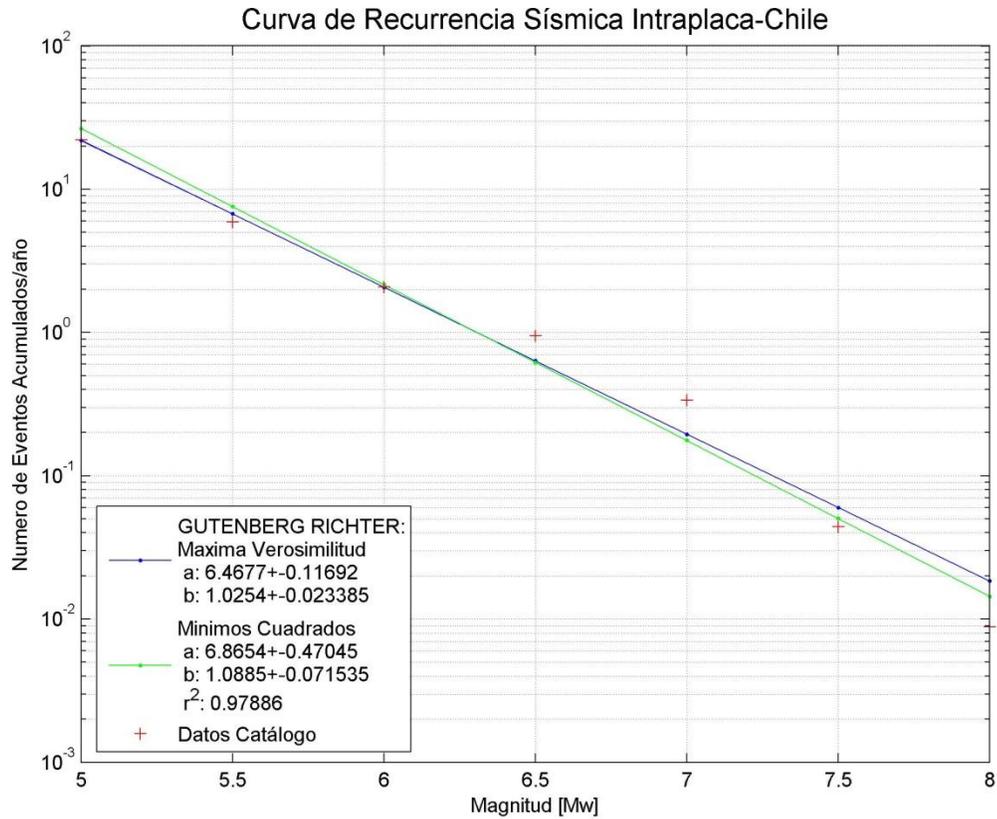


Figura 31: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona: Chile

Subducción – Intraplaca-Profundidad Intermedia			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	21.923	26.490	53
≥ 5.5	6.733	7.566	73
≥ 6	2.068	2.161	83
≥ 6.5	0.635	0.617	88
≥ 7	0.195	0.176	113
≥ 7.5	0.060	0.050	113
≥ 8	0.018	0.014	113

Tabla 24: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona: Chile

3.3.2 Determinación Magnitudes Máximas Esperadas.

Uno de los terremotos interplaca más importante es el de Valdivia ocurrido en el año 1960, con un largo de ruptura entre los 900 y 1000 [km], con un ancho de 60-20 [km] y cuya magnitud es estimada en $M_w = 9,5$ (Cifuentes, 1989).

Los terremotos intraplaca de profundidad intermedia de gran magnitud se han registrado correctamente a partir del siglo XX, teniendo como ejemplos: el de Chillán (1939), con magnitud $M_s = 7.8$; el de Calama (1950) con una magnitud de $M_s = 8.0$ y el terremoto de Tarapacá del año 2005, con una magnitud registrada $M_w = 7.9$.

Para caracterizar la Magnitud Máxima se ha considerado una distribución Gaussiana truncada con una cierta desviación estándar. Esta distribución viene dada por los siguientes parámetros:

- M_1 : Magnitud Máxima Observada, para establecerla se utilizó la sismicidad histórica de cada zona y fuente sismogénica. Corresponde al límite inferior de la distribución.
- M_2 : Límite superior de la distribución. Se escogió el siguiente criterio para determinarla, $M_2 = M_1 + 0.4$.
- $E(M)$: Magnitud Máxima Esperada, que corresponde al valor más probable.
- σ : Desviación estándar de la distribución.

Cabe mencionar que para la Zona Austral no se efectuará el análisis de Peligro Sísmico, debido a que no se pueden clasificar los sismos a alguna de las fuentes que se consideran en este estudio, por lo que solo se menciona el valor de la magnitud máxima observada. Además para la Zona 8 interplaca, se estableció que el valor de $E(M)$ sería el máximo observado ($9.5 M_w$), dejando el límite inferior 9.4 y el límite superior 9.6.

Finalmente una vez calculados los parámetros sísmicos asociados a cada zona y fuente sismogénica, y estimada la magnitud máxima esperada, la información resumida se presenta en la **Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27**.

Todo el Catálogo											
Zona	Máxima Verosimilitud				Mínimos Cuadrados				Magnitud Máxima		
	a	\pm	b	\pm	a	\pm	b	\pm	E(M)	M1	M2
Chile	6.831	0.077	0.996	0.015	7.096	0.283	1.038	0.038	9.5	9.4	9.6
Zona 1	5.753	0.171	0.946	0.034	5.555	0.174	0.911	0.025	8.9	8.7	9.1
Zona 2	5.813	0.165	0.955	0.033	5.859	0.397	0.96	0.058	8.9	8.7	9.1
Zona 3	5.633	0.187	0.921	0.037	5.468	0.202	0.893	0.031	8.2	8	8.4
Zona 4	5.505	0.214	0.931	0.043	5.142	0.183	0.867	0.027	8.7	8.5	8.9
Zona 5	5.821	0.213	0.977	0.043	6.211	0.1	1.046	0.015	8.4	8.2	8.6
Zona 6	6.279	0.174	1.039	0.035	5.941	0.132	0.982	0.019	8.9	8.7	9.1
Zona 7	5.443	0.271	0.957	0.054	4.618	0.32	0.823	0.047	9	8.8	9.2
Zona 8	5.014	0.214	0.832	0.043	5.142	0.341	0.856	0.046	9.5	9.4	9.6
Zona Austral	3.332	0.804	0.709	0.161	2.816	0.532	0.634	0.084	-	7.7	-

Tabla 25: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Todo el Catálogo

Sismos Subducción Interplaca											
Zona	Máxima Verosimilitud				Mínimos Cuadrados				Magnitud Máxima		
	a	\pm	b	\pm	a	\pm	b	\pm	E(M)	M1	M2
Chile	6.125	0.112	0.937	0.022	6.070	0.280	0.925	0.038	9.5	9.4	9.6
Zona 1	5.602	0.313	0.979	0.063	4.664	0.248	0.826	0.036	8.9	8.7	9.1
Zona 2	4.534	0.428	0.854	0.086	4.461	0.452	0.836	0.066	8.9	8.7	9.1
Zona 3	4.484	0.335	0.787	0.067	4.540	0.141	0.797	0.022	8.2	8	8.4
Zona 4	4.853	0.288	0.851	0.058	4.491	0.186	0.792	0.027	8.7	8.5	8.9
Zona 5	5.480	0.299	0.970	0.060	5.470	0.303	0.971	0.046	8.4	8.2	8.6
Zona 6	5.970	0.216	1.006	0.043	5.542	0.177	0.938	0.026	8.9	8.7	9.1
Zona 7	5.226	0.310	0.937	0.062	4.204	0.292	0.771	0.043	9	8.8	9.2
Zona 8	4.338	0.349	0.779	0.070	4.056	0.271	0.732	0.037	9.5	9.4	9.6

Tabla 26: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Sismos Subducción Interplaca

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia											
Zona	Máxima Verosimilitud				Mínimos Cuadrados				Magnitud Máxima		
	a	±	b	±	a	±	b	±	E(M)	M1	M2
	Chile	6.468	0.117	1.025	0.023	6.865	0.470	1.088	0.072	8.2	8	8.4
Zona 1	5.249	0.236	0.895	0.047	5.430	0.380	0.927	0.060	8	7.8	8.2
Zona 2	6.066	0.195	1.028	0.039	5.775	0.470	0.974	0.074	8	7.8	8.2
Zona 3	5.855	0.233	1.015	0.047	5.467	0.468	0.945	0.071	8.2	8	8.4
Zona 4	5.146	0.402	0.968	0.080	4.358	0.554	0.830	0.092	7.6	7.4	7.8
Zona 5	4.865	0.459	0.916	0.092	4.548	0.164	0.859	0.026	7.8	7.6	8
Zona 6	4.994	0.415	0.939	0.083	5.029	0.304	0.949	0.050	7.3	7.1	7.5
Zona 7	3.873	0.649	0.776	0.130	3.868	0.100	0.780	0.017	7.4	7.2	7.6

Tabla 27: Parámetros Sísmicos para cada Zona – Sismos Subducción Intraplaca

CAPÍTULO IV: MODELO DE LAS FUENTES Y SELECCIÓN DE CURVAS DE ATENUACIÓN.

Para el estudio del Peligro Sísmico es importante definir bien la zona donde se pueden localizar los sismos de las distintas fuentes sismogénicas y las áreas de ruptura asociada a cada sismo que pudiese ocurrir en ella. Posteriormente, definir la distancia sitio-fuente a utilizar (distancia focal, epicentral o distancia más cercana al área de ruptura), para finalmente seleccionar las curvas de atenuación que entregan las aceleraciones en la superficie de estudio.

4.1 DEFINICIÓN FUENTES SÍSMOGÉNICAS.

Se entiende como fuente sismogénica o sismogénica aquella línea, área o volumen donde se tienen similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, tales que el potencial sísmico se puede considerar homogéneo en toda la fuente, esto quiere decir que tanto la generación como la recurrencia sísmica se consideran espacial y temporalmente homogéneos. La caracterización de las fuentes sismogénicas, en términos de la magnitud máxima y la relación de recurrencia, fue realizada en el Capítulo 3 de este trabajo.

La definición de las fuentes suele ser un proceso bastante subjetivo, sin embargo, tiene mucha importancia en el cálculo del Peligro Sísmico que se efectúa en base a cada una de ellas. Con la finalidad de disminuir la subjetividad, en este trabajo se ha intentado utilizar aproximaciones razonables de la geometría basadas en toda la evidencia científica con la que se cuenta la fecha. Asimismo, se ha considerado más de una geometría posible.

Se debe tener en cuenta que las fuentes sismogénicas se pueden considerar como volúmenes que tienen un largo, un ancho y una inclinación con respecto a la superficie de la Tierra, la cual por simplificación se considerará plana.

Para definir las coordenadas (Latitud [°], Longitud [°], Profundidad [km]) asociadas a cada una de las fuentes sísmicas se utilizaron perfiles transversales de sismicidad a lo largo de Chile. Es importante utilizar la geometría en planta de la fosa Chileno-Peruana a lo largo del territorio, ya que es incorrecto asumir una orientación norte-sur en los planos donde ocurren los sismos subductivos. Por este motivo, se confeccionaron planos definidos por la fosa, donde el valor del azimut se mantuviera relativamente constante. Luego se sub-dividieron en polígonos de 50 km de ancho que definen los perfiles. En la **Figura 32** se muestra la zona norte de nuestro país, donde se ven los distintos planos utilizados con sus respectivas sub-divisiones.

Cabe mencionar que solo se contemplan en este mapa los sismos clasificados como interplaca e intraplaca-profundidad intermedia. Para tener una densidad de puntos más grande a la hora de trazar la geometría de la placa se agregaron los sismos con magnitudes entre 4 y 5 M_w en la gráfica de los perfiles de sismicidad.

Una vez definidos los distintos planos se generaron los perfiles de sismicidad para poder determinar los límites de cada fuente, además de la inclinación con respecto a la superficie terrestre, que se consideró plana, como se mencionó anteriormente. Esto se puede observar en la **Figura 33** donde se muestra el octavo perfil del primer plano que define la geometría de la Zona 1 de este estudio. El origen de los perfiles de sismicidad se ubica en la línea negra discontinua que representa la fosa que se ve en la **Figura 32** y corresponden a los puntos negros sobre la línea. Para este ejemplo se ha determinado que el ángulo de subducción de la fuente interplaca es de 22.6° y de 27.4° para la intraplaca y los límites quedan definidos por la sismicidad del perfil, donde la división entre estas dos fuentes se ubica en el punto en que la placa alcanza una profundidad de 60 [km].

El cálculo del Peligro Sísmico se realizó a través del software Crisis 2007, diseñado por el instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El software considera las coordenadas (Latitud °, Longitud °, Profundidad [km]) para cada una de la fuentes sísmicas conformando planos inclinados como se puede ver en la **Figura 34**. Este programa tiene límites de capacidad para establecer los vértices de cada fuente, por lo que para facilitar el trabajo se utilizaron los siguientes criterios para agrupar los perfiles y así minimizar los vértices de cada fuente.

- Si los ángulos de subducción estimados para cada perfil tenían variaciones menores de 5° entre ellos para cada fuente, se promediaron y el plano quedó definido por cuatro puntos con un ángulo igual al promedio de estos perfiles.
- A pesar de que se cumpla el criterio mencionado arriba, no se pueden agrupar más de 4 perfiles consecutivos.
- En el caso de tener cambios de ángulos no solo en latitud° sino que en longitud°, como lo es en la zona centro de nuestro país, entre las latitudes 27°S y 33°S , donde el plano de Wadati-Benioff desciende desde los 25° hasta casi los 0° , como se ve en la **Figura 35**, conocido como el segmento sub-horizontal; se subdividió la fuente intraplaca en una subfuente que presenta la misma tasa de sismicidad β pero el número de sismos mayores iguales que $5 M_w$ ($v_{m_{min}}$) se divide proporcionalmente a la razón de áreas entre estas subfuentes.

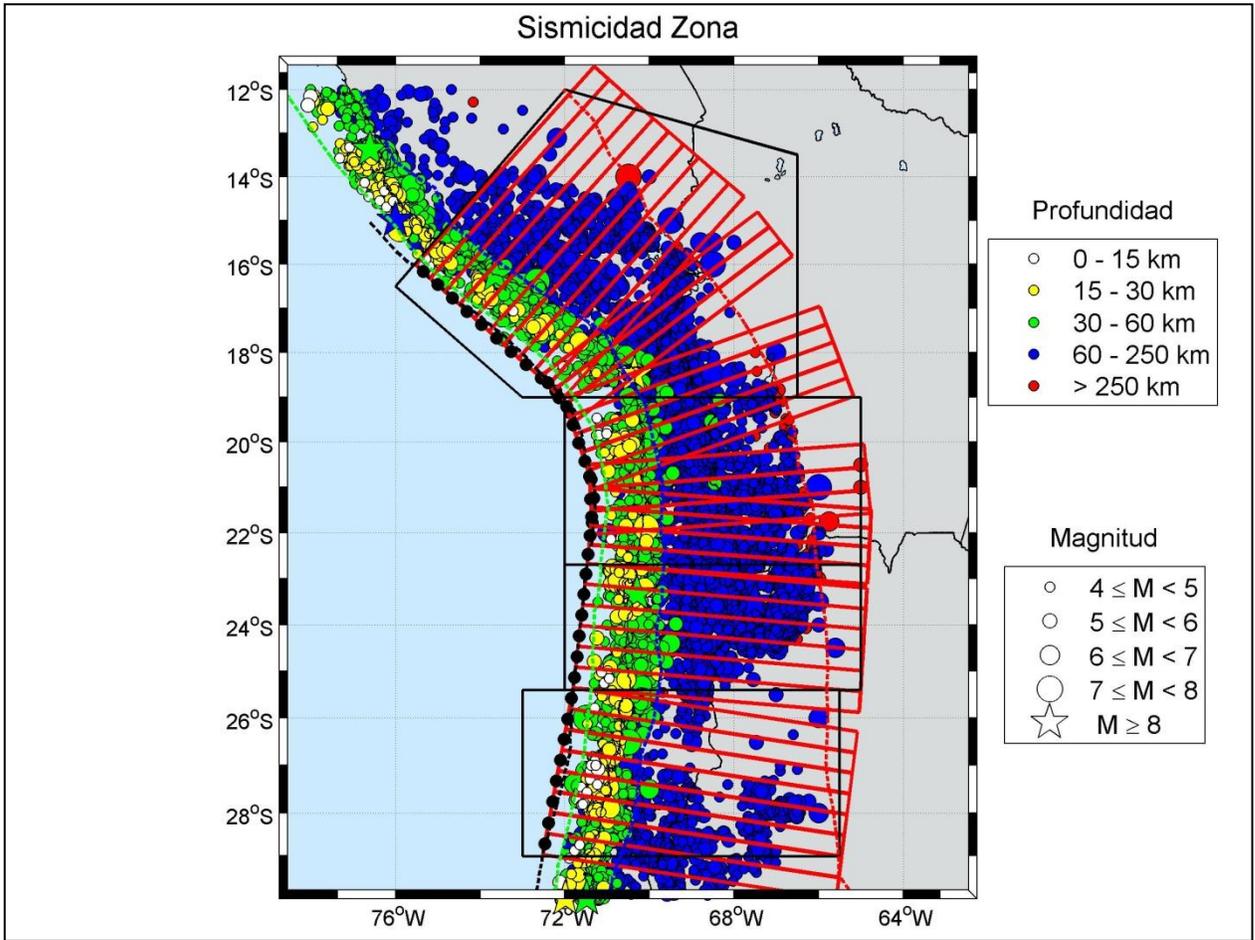


Figura 32: Esquema de los polígonos que definen los perfiles de sismicidad de la Zona Norte

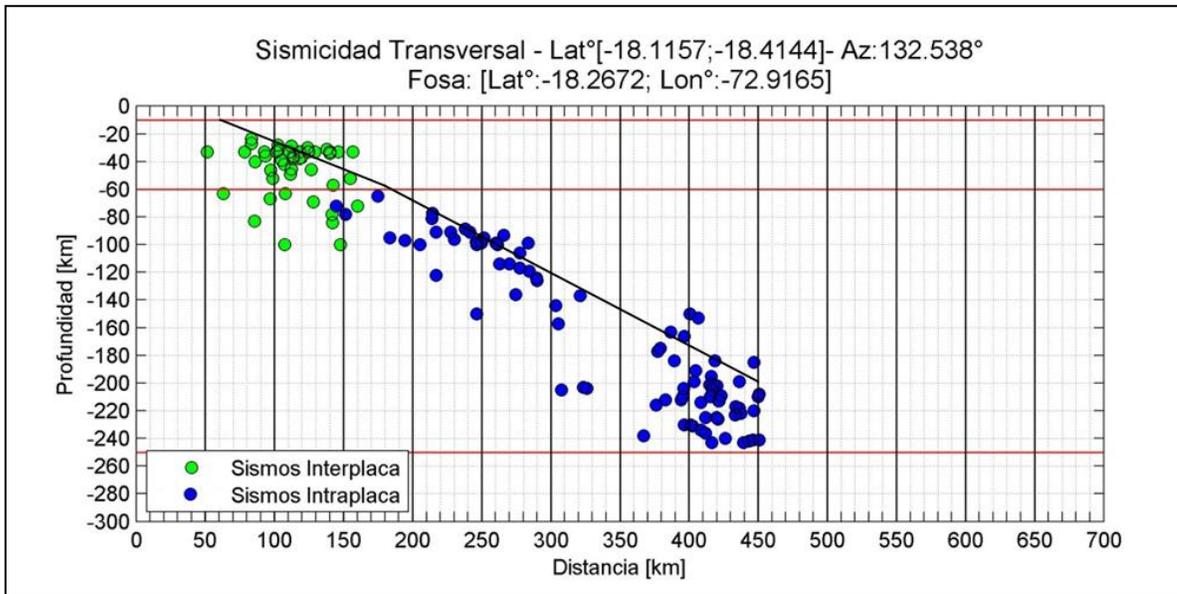


Figura 33: Perfil de sismicidad utilizado para la definición de la Geometría

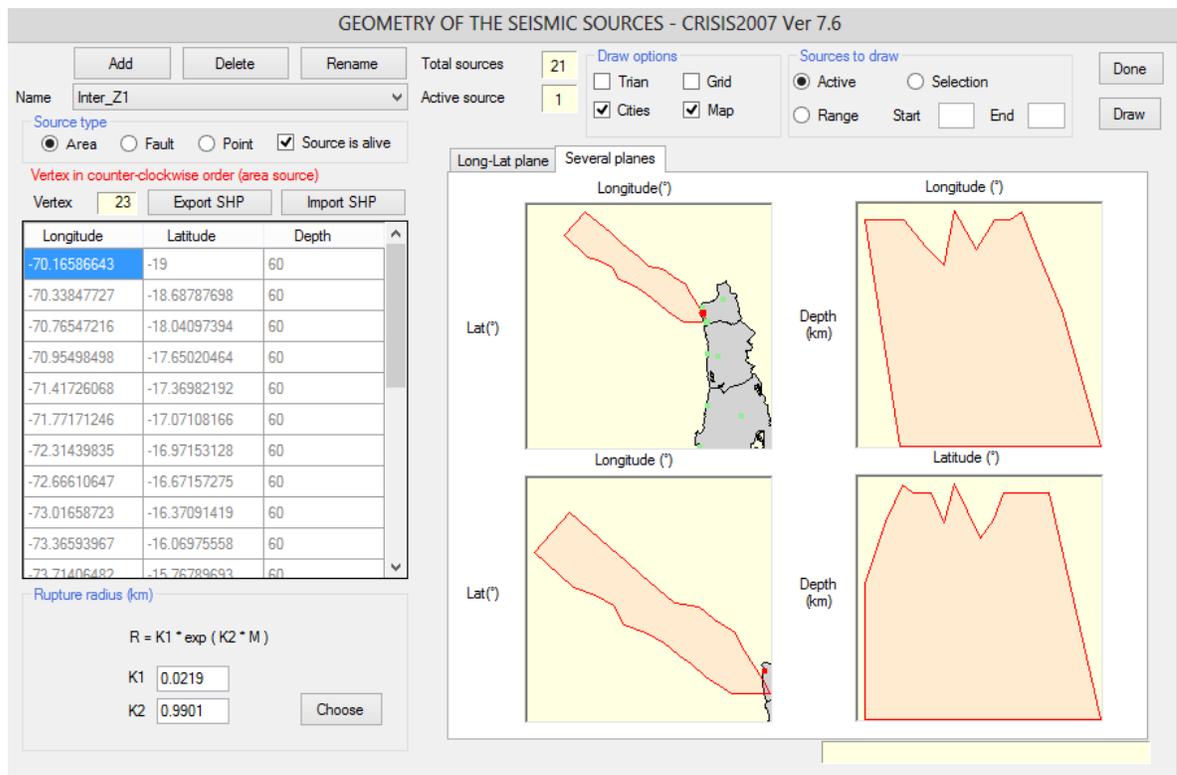


Figura 34: Geometría fuentes sísmicas consideradas en software Crisis 2007

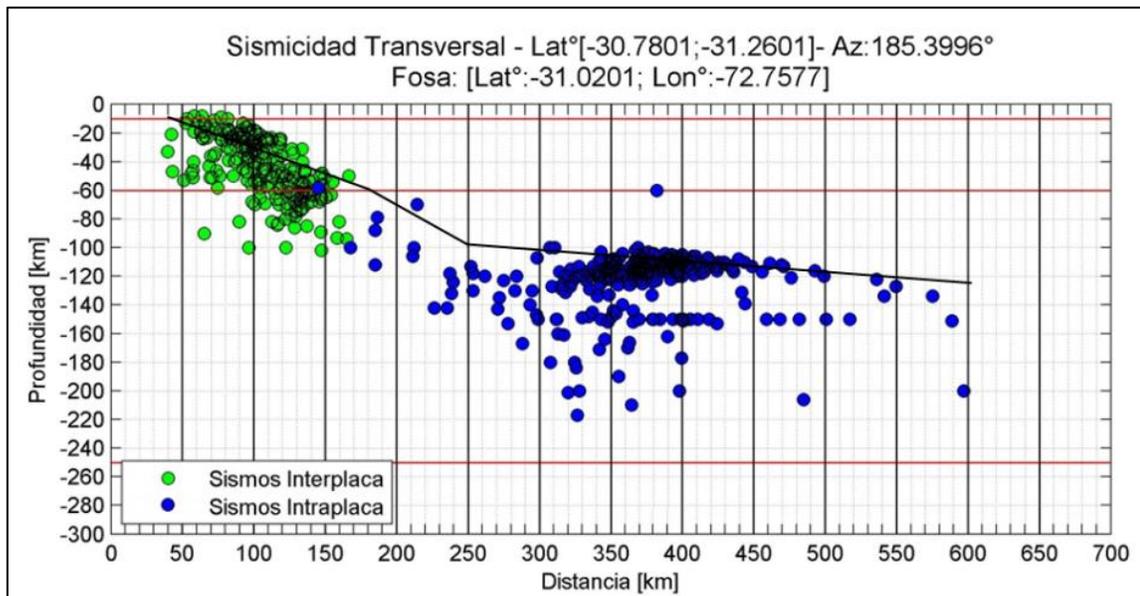


Figura 35: Perfil de sismicidad que muestra el segmento sub-horizontal

Con la ayuda de estos perfiles, se pueden definir los límites de cada fuente con sus coordenadas (Latitud °, Longitud °, Profundidad [km]). En la **Figura 36** se ven en planta las fuentes interplaca e intraplaca de profundidad intermedia, para las distintas zonas de estudio. En la **Figura 37** se muestra una figura 3-D de la geometría final de las distintas fuentes.

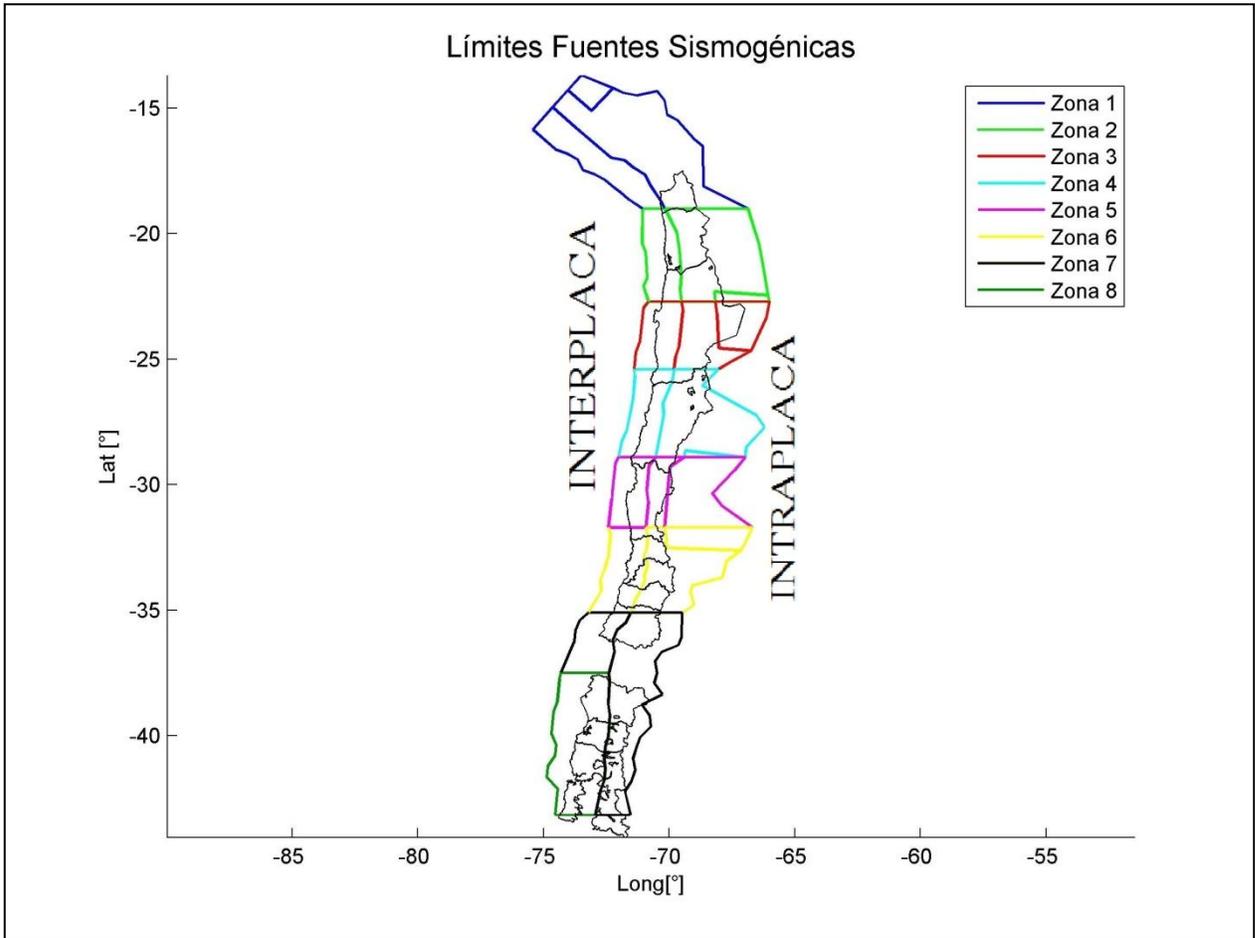


Figura 36: Geometría en Planta de las Fuentes Interplaca e Intraplaca de las distintas Zonas

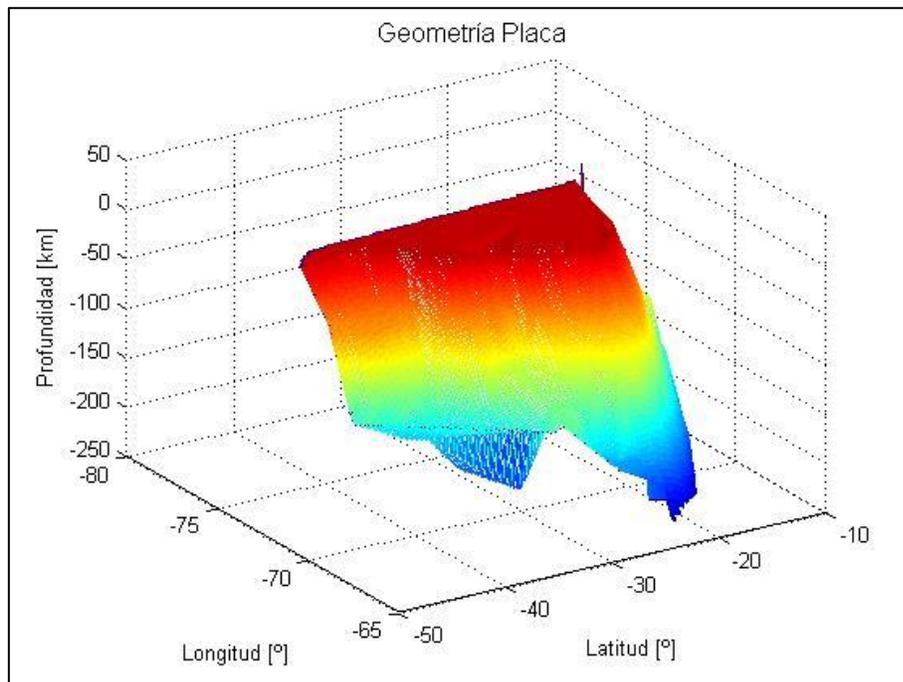


Figura 37: Geometría de la superficie de subducción 3-D generado con los perfiles de sismicidad

Para tener un parámetro de comparación se utilizó la geometría de Tassara et al. (2006). Se desarrollaron perfiles donde se compara la geometría determinada en el trabajo de Tassara et al. (2006) con la que se obtuvo en este trabajo. Cabe mencionar que la geometría utilizada en este estudio es una simplificación de la geometría de Tassara et al. (2006), por lo que se intentó minimizar las diferencias entre ambos modelos.

En el ANEXO B.2 Perfiles de Sismicidad se encuentran los perfiles de sismicidad con los que se determinaron las coordenadas que definen las fuentes sísmicas.

Para incluir la incertidumbre de la geometría de estas fuentes, a través de un árbol lógico, se aplica una variación de -10 km en la profundidad a la fuente interplaca, y de -10 y -30 km a la fuente intraplaca de profundidad intermedia. Un ejemplo de las 3 geometrías utilizadas se muestra en la **Figura 38**, la totalidad de estos perfiles se muestra en ANEXO B.3.

Las ponderaciones que se utilizan en el Árbol Lógico son las siguientes:

- Geometría Superior (Geometría 1): 50%
- Geometría con fuente Interplaca e Intraplaca (-10 km) (Geometría 2): 30%
- Geometría con Fuente Interplaca (-10km) e Intraplaca(-30km) (Geometría 3): 20%

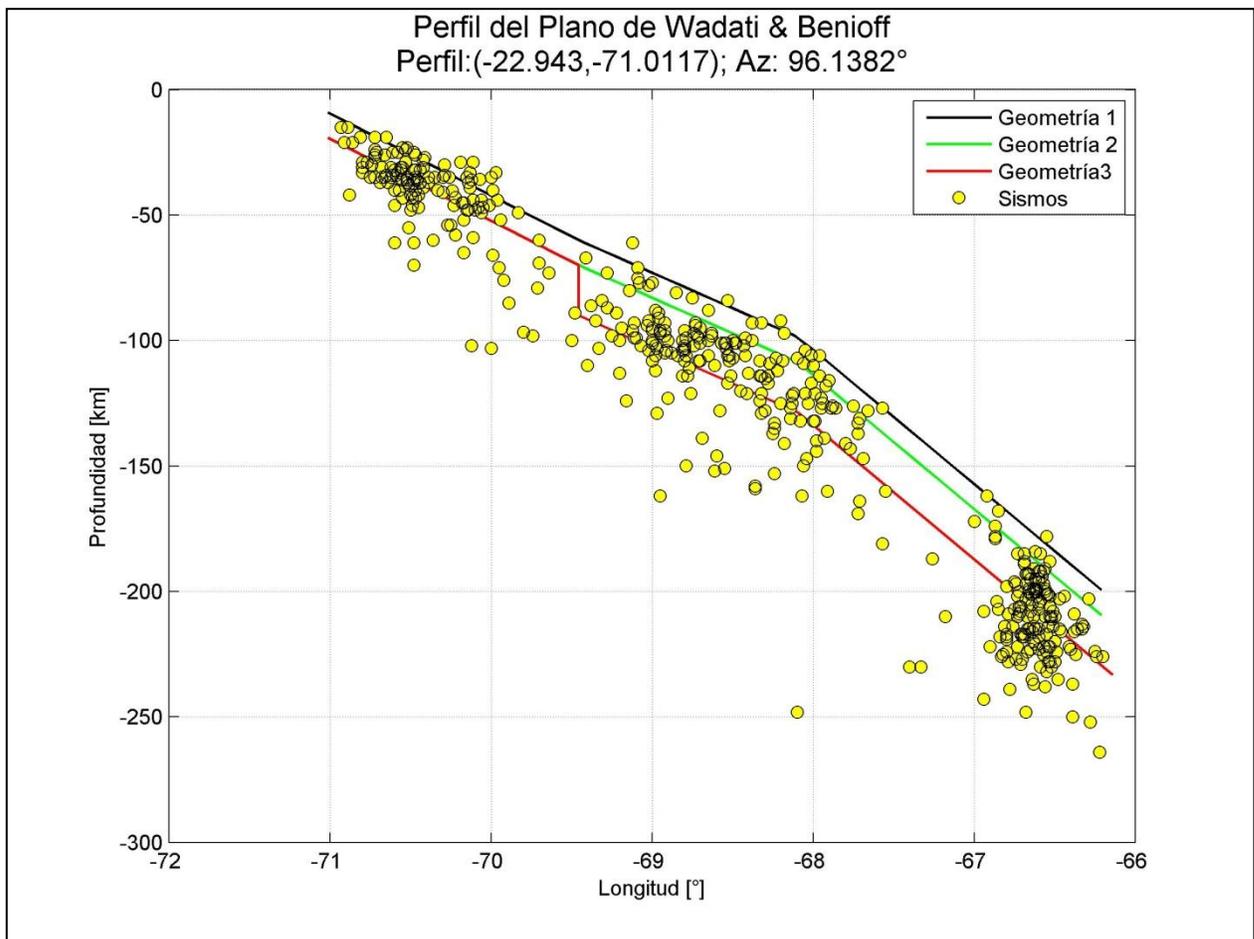


Figura 38: Perfil con las 3 Geometrías Utilizadas

4.1.1 Modelo de Área de Ruptura.

En el cálculo de las aceleraciones a través de las leyes de atenuación es muy importante definir la distancia fuente-sitio que será utilizada. Las que se utilizan comúnmente son las siguientes:

- **Distancia de Joyner-Boore** (R_{JB}): Corresponde a la menor distancia medida desde la posición del sitio hasta la proyección vertical del área de ruptura sobre la superficie terrestre.
- **Distancia mínima al área de ruptura** (R_{RUP}): Corresponde a la menor distancia entre la posición del sitio y el área de ruptura.
- **Distancia Hipocentral** (R_{HIP}): Corresponde a la distancia medida desde la posición del sitio hasta el hipocentro o inicio de la ruptura.
- **Distancia Epicentral** (R_{EPI}): Corresponde a la distancia medida desde la posición del sitio hasta la proyección vertical del hipocentro sobre la superficie terrestre.

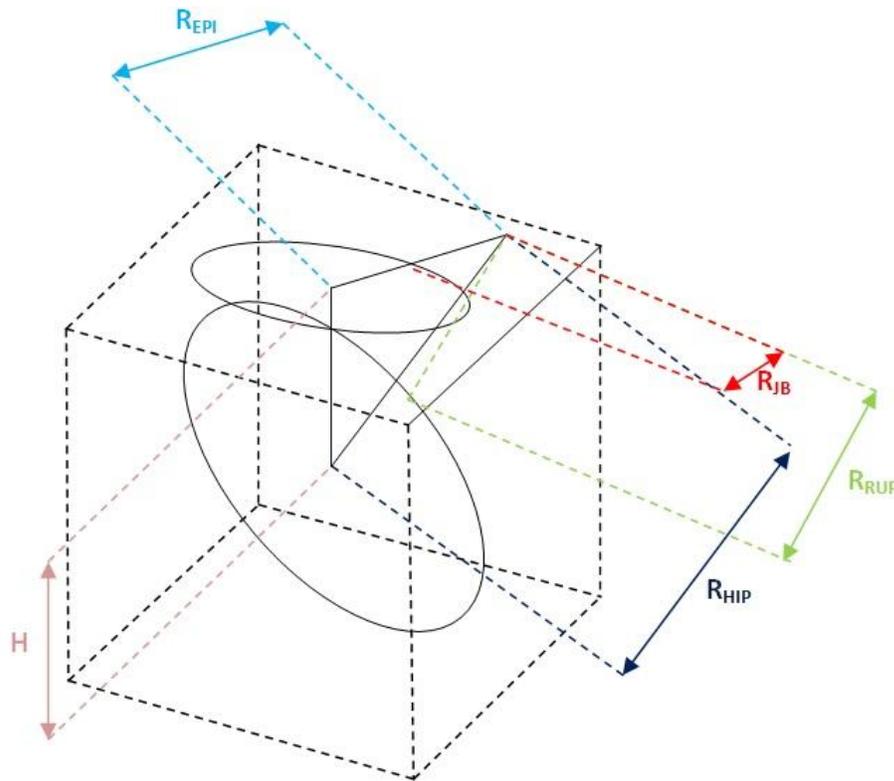


Figura 39: Esquema distancias fuente-sitio

Las primeras dos representan la distancia entre el área de ruptura y el sitio, las últimas dos corresponden a maneras de representar distancias a una fuente puntual. En el caso de las leyes de atenuación que se utilizan en este estudio, éstas utilizan la distancia fuente-sitio como la mínima distancia entre el área de ruptura y el sitio (R_{RUP}). Para magnitudes grandes que tienen asociadas

amplias áreas de ruptura, se prefiere esta distancia por sobre las puntuales. Para áreas de ruptura que tienen una extensión pequeña, los valores de R_{RUP} y R_{HIP} son relativamente parecidos.

Para determinar el área asociada a un sismo en particular, se utilizan la relación de Papazachos et al. (2004). Esta ecuación relaciona el área de ruptura de 61 fallas asociadas a sismos subductivos con la magnitud [M_w]. Esto se muestra en la **Figura 40**.

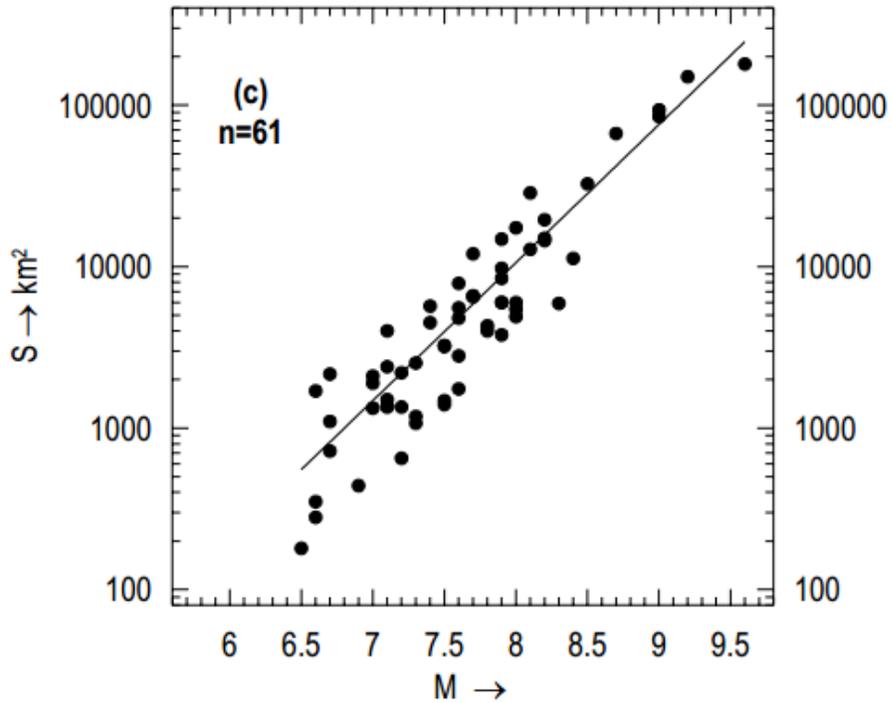


Figura 40: Regresión Papazachos et al(2004)

La regresión es la siguiente.

$$\text{Log (S) [km}^2\text{]} = 0.86 M_w - 2.82 \quad (21)$$

Considerando que la falla tiene geometría circular, debido a que Crisis 2007 utiliza esta configuración, la Ecuación (21) queda.

$$\text{Log } (\pi R^2) \text{ [km}^2\text{]} = 0.86 M_w - 2.82 \quad (22)$$

Despejando R queda

$$R = K1 * \exp(K2 * M_w) \quad (23)$$

Donde $K1=0.0219$ y $K2=0.9901$

Estos parámetros calculados son ingresados a Crisis 2007, en las propiedades geométricas que definen a la fuente.

4.2 LEYES DE ATENUACIÓN.

Un componente esencial en cualquier estudio de Peligro Sísmico, es un modelo que permita predecir la distribución de los parámetros asociados al movimiento del suelo debido a un posible terremoto. Esta predicción es realizada a través de leyes de atenuación, que son expresiones matemáticas que relacionan el valor máximo de algún parámetro sísmico, con la magnitud del sismo y la distancia a la fuente.

Las leyes de atenuación permiten estimar de qué forma disminuye la energía liberada a través del interior y por la superficie de la tierra.

El carácter limitado del conjunto de datos de los que se derivan estas relaciones, da lugar a una incertidumbre en la estimación de estas. Para incorporar esta incertidumbre en el estudio, se debe utilizar más de un modelo que permita predecir este parámetro en estudio (PGA o SA) y la herramienta que permite combinar estos múltiples modelos es el árbol lógico.

Un elemento clave es la selección de estas ecuaciones, que reflejen de forma realista el nivel de aceleraciones y la atenuación de Chile, acorde con las observaciones, ya que tiene una notable importancia en la evaluación del peligro. Cotton et al. (2006) y Boomer et al. (2011) proponen siete criterios que permiten desechar posible candidatos, con el fin de obtener el menor número de ecuaciones.

Los criterios de exclusión de Cotton et al. (2006) son los siguientes:

1. El modelo corresponde a un régimen tectónico que no está presente en el estudio.
2. El modelo no ha sido publicado en una revista internacional, que permita la revisión de los pares.
3. La documentación del modelo y el conjunto de datos fundamentales son insuficientes.
4. El modelo ha sido reemplazado por publicaciones más recientes.
5. El rango de frecuencias del modelo no es la apropiada para aplicaciones ingenieriles.
6. La forma de la curva del modelo es inapropiada.
7. El método de regresión o los coeficientes calculados son inapropiados.

El criterio 1 queda bastante claro, no es correcto utilizar una ley de atenuación derivada de una zona de subducción en el análisis de Peligro Sísmico de una región de sismicidad cortical, y viceversa.

La revisión de los pares, que se especifica en el criterio 2, es necesaria debido a que el proceso de revisión por lo general asegura que los modelos están bien descritos. Esta revisión asegura también que se han realizado pruebas básicas, como el análisis de residuos y la comparación con estudios anteriores, y también permite la detección de errores. Es por esto que los modelos que han sido ampliamente utilizados y probados corren con ventaja.

El conjunto de datos utilizados en el estudio, que se especifican como criterio 3, debe ser presentado en la publicación o en alguna referencia accesible, para transparentar el proceso con el fin de convencer a quienes toman las decisiones. Por otra parte, se debe tener la posibilidad de comprobar la calidad de los datos, por lo que el procesamiento de estos debe ser bien descritos y los parámetros utilizados en las regresiones deben estar tabulados.

El criterio 4 está relacionado con el año de publicación. Estudios antiguos son reemplazados por estudios más recientes, los cuales utilizan la misma información actualizada. Si los autores de un modelo en particular han actualizado sus ecuaciones, implica que el analista debe utilizar el modelo disponible más reciente.

El criterio 5 tiene que ver con la gama de frecuencias de los acelerogramas que pueden ser utilizadas, en particular las de los instrumentos analógicos, es limitada (Boore y Boomer, 2005). Para las aplicaciones de ingeniería donde las frecuencias altas ($>10\text{Hz}$) o las frecuencias bajas ($<0.3\text{ Hz}$) son relevantes, los modelos derivados de acelerogramas analógicos pueden no proporcionar estimaciones confiables. Una de las razones principales es el simple hecho de que con el fin de poder utilizar un registro de aceleraciones en cualquier análisis de ingeniería, es necesario digitalizar los trazos, un proceso que demanda mucho trabajo y es la principal fuente de ruido.

Con esto los modelos seleccionados para sismos subductivos, bajo los criterios mencionados anteriormente, son los que se muestran en la **Tabla 28**, donde se referencia el autor, el año de publicación, la intensidad medida, el tipo de magnitud utilizada, el tipo de fuente sismogénica, el rango de Magnitudes considerado en este estudio para cada fuente y el rango de ordenadas espectrales

Autor (es)	Año de Publicación	Parámetro	Tipo de Magnitud	Tipo de Clasificación del Suelo	Tipo Fuentes	Rango Mw	Rango de ordenadas
Youngs et al	1997	Aceleración	M_w	Otros	Interplaca	5.0-8.5	0-4 seg
					Intraplaca	5.0-8.0	
Atkinson & Boore	2003	Aceleración	M_w	NEHRP	Interplaca	5.0-8.5	0-3 seg
					Intraplaca	5.0-8.0	
Zhao et. al	2006	Aceleración	M_w	Otros	Interplaca	5.0-8.5	0-5 seg
					Intraplaca	5.0-8.0	
Contreras & Boroschek	2009, 2012	Aceleración	M_w	NCh433, DS61	Interplaca	5.0-8.8	0-3 seg
					Intraplaca	5.0-8.0	
Abrahamson et al. (BCHydro)	2012	Aceleración	M_w	Vs30	Interplaca	5.0-9.0	0-10 seg
					Intraplaca	5.0-8.0	

Tabla 28: Relaciones de Atenuación utilizadas en este estudio

El modelo de Youngs et al. (1997) utiliza una base de datos que incluye registros de aceleraciones de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú e islas Solomon para el cálculo de las aceleraciones. La distancia fuente-sitio es caracterizada en términos de la distancia más cercana al área de ruptura (R_{RUP}), si el área de ruptura no está definida para un sismo, utilizó la distancia hipocentral para el cálculo de las aceleraciones. La información utilizada en la clasificación del suelo de las estaciones de registro permite separar los registros en tres grupos: Roca (Sitio Clase B NEHRP (Boore et al., 1993)), Suelo duro poco profundo y Suelo Profundo (Sitio Clase C NEHRP (Boore et al., 1993)). Para este estudio se utilizaron las aceleraciones calculadas para Roca.

Atkinson & Boore (2003) también generaron fórmulas de atenuación para la zona de Cascadia y otras zonas de subducción incluyendo en su base de datos registros de Alaska, Chile, Cascadia, El Salvador, Japón, México y Perú. La distancia fuente-sitio que utiliza es la distancia más cercana al área de ruptura, pero agrega un término asociado a la saturación de las fuentes cercanas, término que depende de la magnitud del sismo. La clasificación del suelo que utiliza es la del NEHRP. Para este estudio se utilizaron las aceleraciones calculadas para sitios clase B (NEHRP).

Zhao et al. (2006) utilizan una base de datos de Japón, que considera sismos de carácter subductivo y superficiales. La distancia fuente-sitio es caracterizada en términos de la distancia más cercana al área de ruptura (R_{RUP}). La clasificación del suelo utilizada en el estudio, permite clasificar el suelo de las estaciones de registro en 5 grupos: Roca Dura (Hard Rock (H.R)) corresponde a suelos con velocidad de onda de corte sobre los 30[m] ($Vs30 > 1100$ [m/s] o sitios clase A según NEHRP. El segundo grupo son los Sitio Clase I, donde el $Vs30 > 600$ [m/s] o sitios clase A+B según NEHRP. El tercer grupo corresponde a los Sitio Clase II con velocidades entre 600 [m/s] $\geq Vs30 > 300$ [m/s] o sitios clase C según NEHRP. El cuarto son los Sitio Clase III con velocidades entre 300 [m/s] $\geq Vs30 > 200$ [m/s] o sitios clase D según NEHRP. El último grupo son los Sitio Clase IV con velocidades $Vs30 \geq 200$ [m/s] o sitios clase E+F según NEHRP.

En este estudio se ha decidido combinar las aceleraciones para sitios de Roca Dura (HR) y Sitios Clase I, donde se obtienen velocidades de onda de corte cercanas a los sitios clase A especificados en el Decreto Supremo N°61 (DS61).

Las leyes de atenuación desarrolladas por Contreras & Boroschek (2009, 2012) que utiliza registros de acelerogramas de Chile e incluyen los datos del terremoto del Maule 2010 $M_w=8.8$. La distancia fuente-sitio es caracterizada en términos de la distancia más cercana al área de ruptura (R_{RUP}). Debido al limitado número de acelerogramas decidieron clasificar el suelo de las estaciones de registro en 2 grupos: Roca y Suelo. El primero cumple con $V_{s30} \geq 900$ [m/s], de acuerdo a los establecido en DS61, en cualquier otro caso será considerado como Suelo. Para este estudio se utilizaron las aceleraciones calculadas para Roca.

Las leyes de atenuación de Abrahamson et al. (2012) (BCHydro) utilizan una base de datos mundial que incluye un factor de corrección para grandes terremotos (Maule 2010, $M_w=8.8$ y Tohoku, $M_w=9.0$), ya que los cálculos del análisis fueron completados antes de que ocurrieran ambos terremotos. La distancia fuente-sitio es caracterizada en términos de la distancia más cercana al área de ruptura (R_{RUP}) para el caso de sismos interplaca y la distancia hipocentral (R_{HIP}) para el caso de sismos intraplaca. Para clasificar el suelo de las estaciones de registro utiliza velocidad de onda de corte sobre los 30[m] (V_{s30}). Para este estudio se utilizaron las aceleraciones calculadas para $V_{s30}= 900$ [m/s], que cumple con la clasificación del suelo tipo A en el Decreto Supremo N°61 (DS61).

En las **Figura 41** y **Figura 42**, se ilustran las relaciones utilizadas en este estudio para diferentes magnitudes y para las distintas fuentes sismogénicas, en roca.

Fuente Interplaca

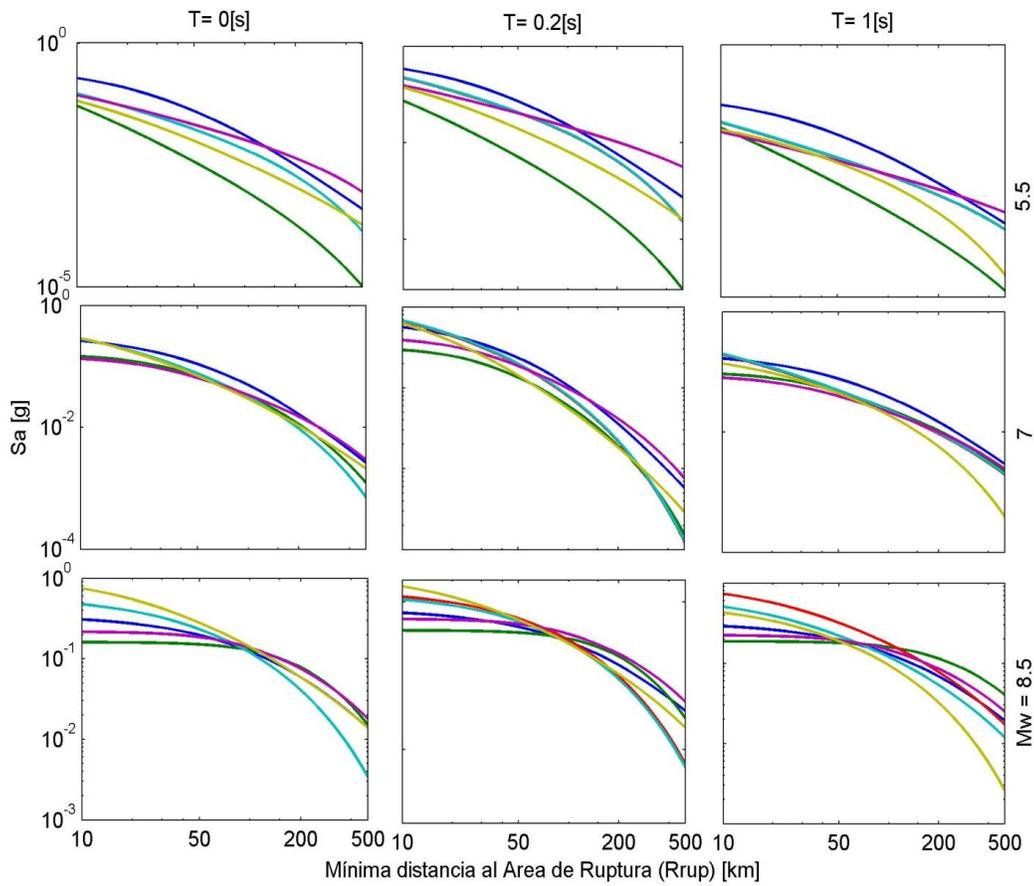


Figura 41: Atenuación para Sismos Interplaca, $H=30$ [km].

Fuente Intraplaca

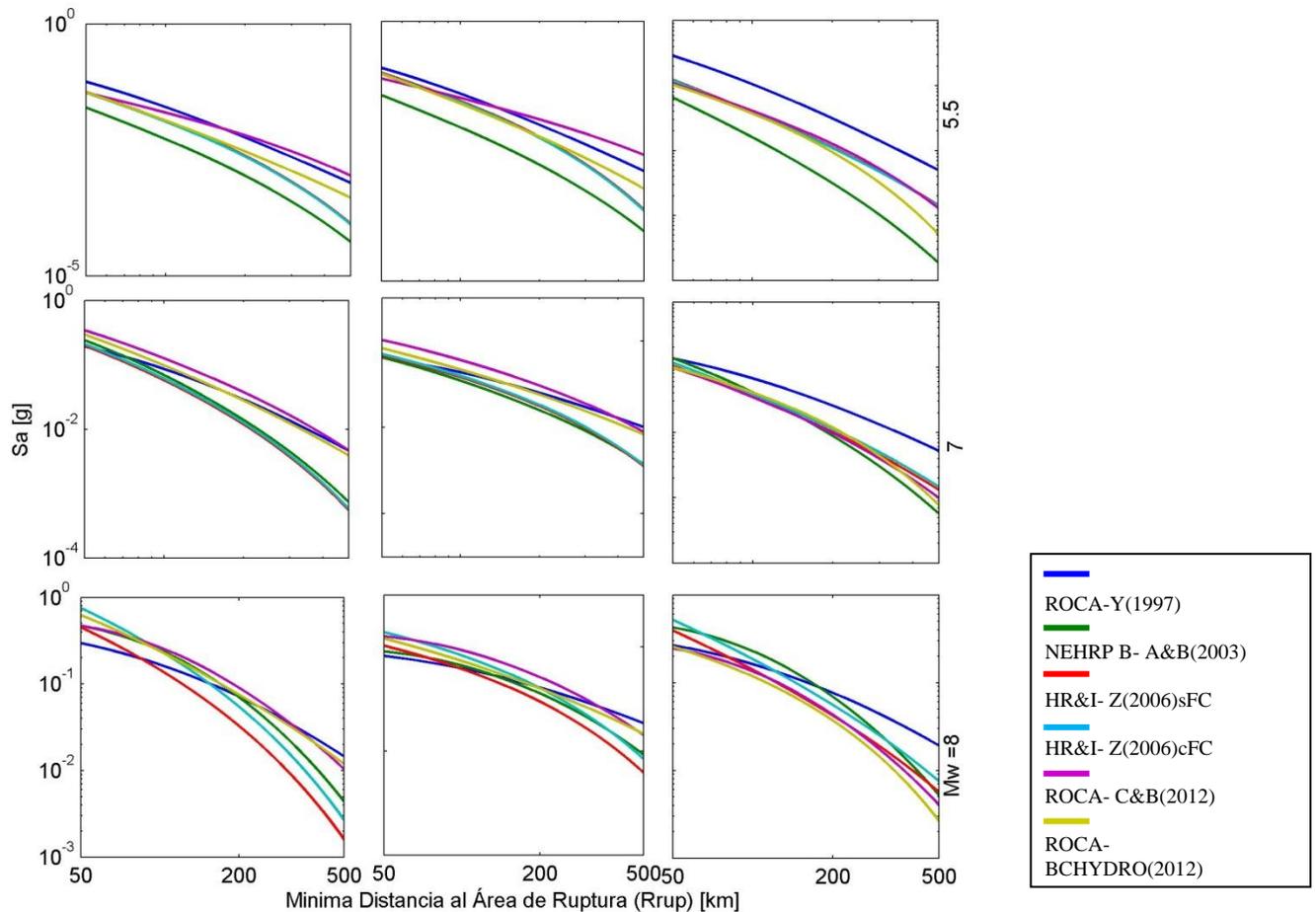


Figura 42: Atenuación para Sismo Intraplaca, $H=60$ [km].

Desde la **Figura 43** a la **Figura 48**, se pueden observar los distintos espectros de aceleración para las leyes de atenuación utilizadas en este estudio, para un terremoto de 8 Mw y distintas distancias al área de ruptura, para las fuentes sismogénicas estudiadas.

Las ponderaciones que se utilizaron en el árbol lógico están directamente relacionadas con el año de publicación del estudio y el reconocimiento de los expertos. También se le dio importancia a las leyes de atenuación calculadas con datos locales (Contreras & Boroschek 2009, 2012). Las ponderaciones son las siguientes:

- Youngs et al.(1997): 10%
- Atkinson & Boore 2003: 15%
- Zhao et al.(2006): 25%
- Contreras & Boroschek 2012: 20%
- Abrahamson et al.2012 (BCHydro): 30%

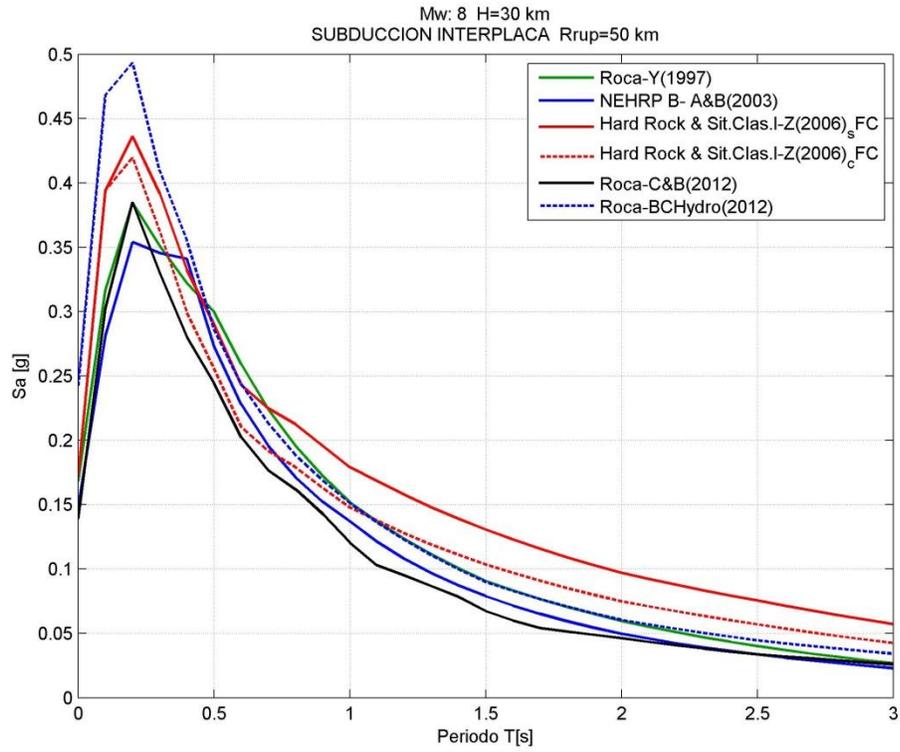


Figura 43: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca $M_w=8; H=30$ [km]; $R_{rup}=35$ [km]

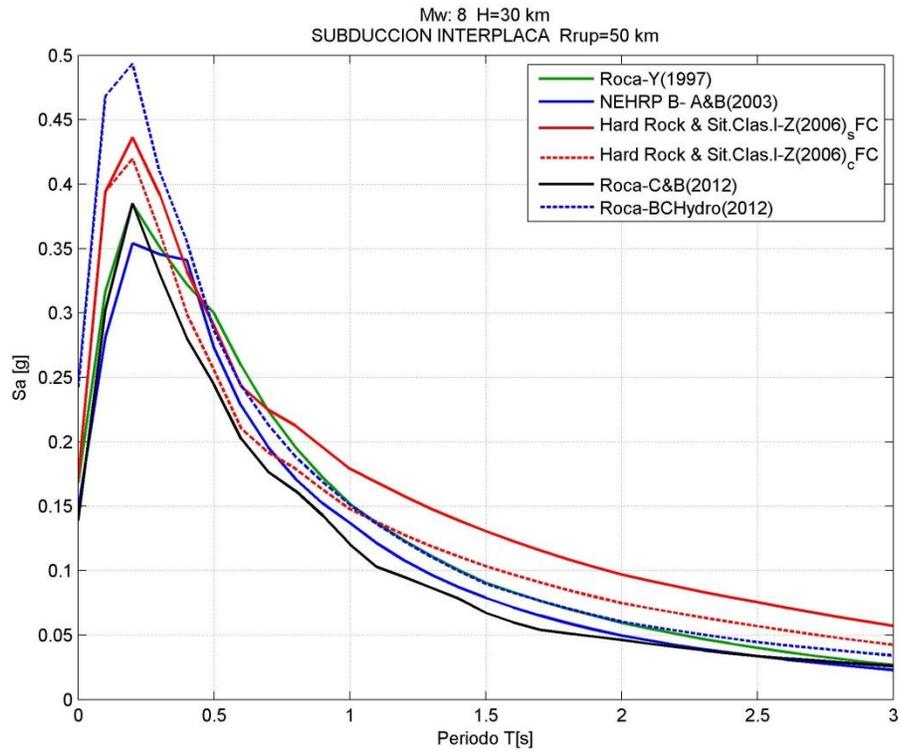


Figura 44: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca $M_w=8; H=30$ [km]; $R_{rup}=50$ [km]

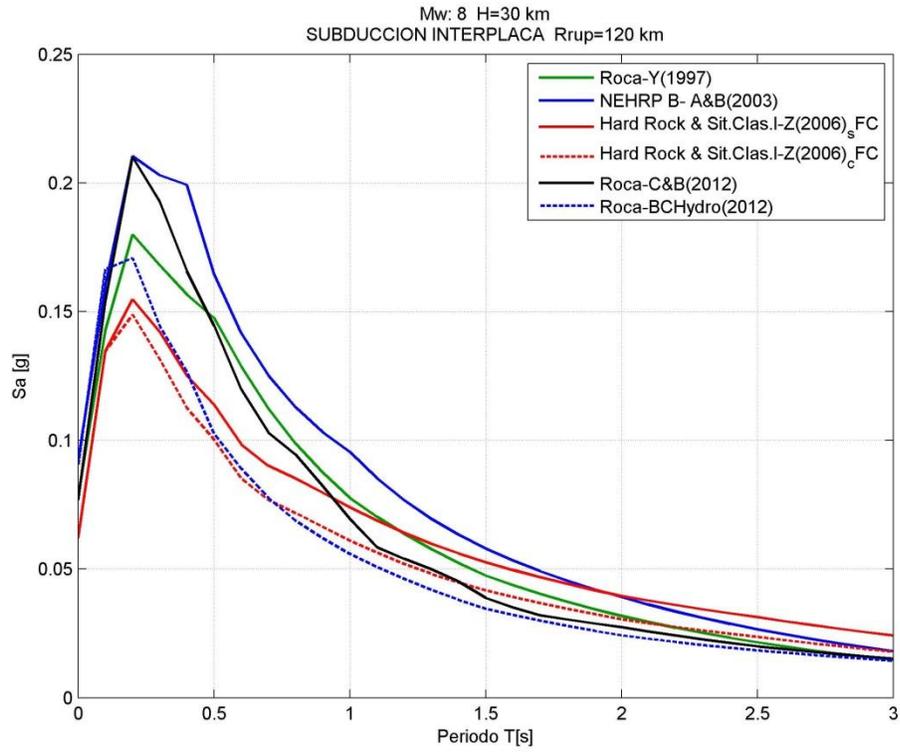


Figura 45: Espectro de Aceleración Sismo Interplaca $M_w=8; H=30$ [km]; $R_{rup}=120$ [km]

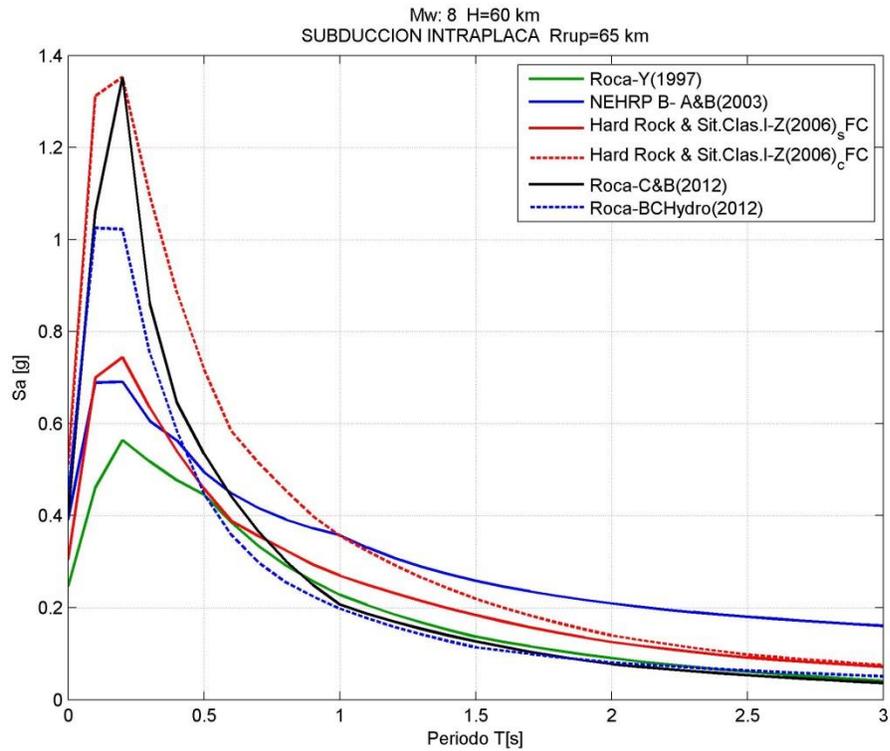


Figura 46: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca $M_w=8; H=60$ [km]; $R_{rup}=65$ [km]

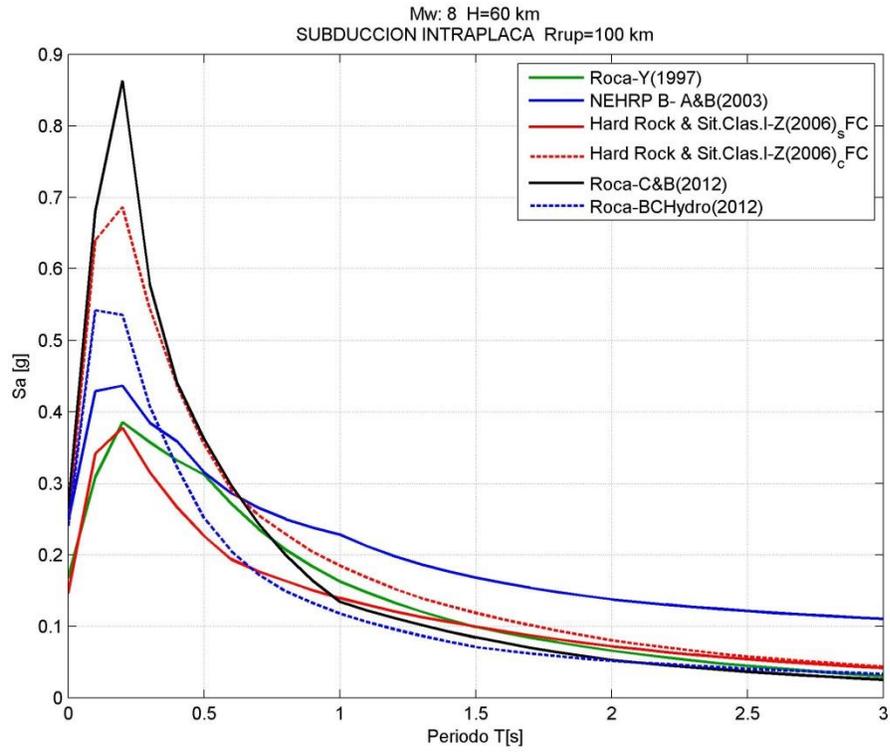


Figura 47: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca $M_w=8; H=60$ [km]; $R_{rup}=100$ [km]

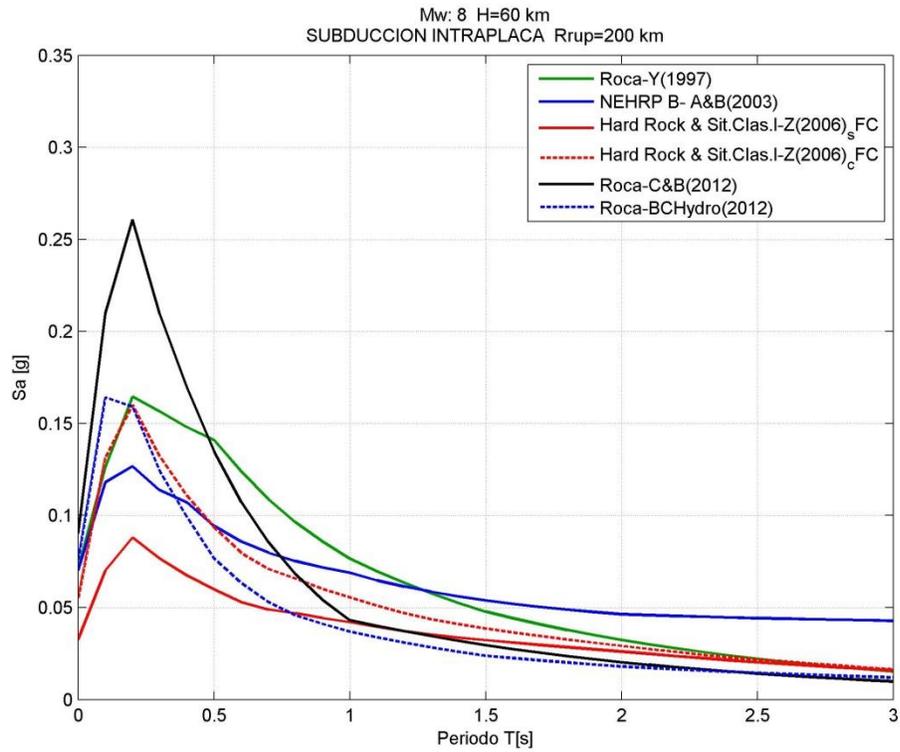


Figura 48: Espectro de Aceleración Sismo Intraplaca $M_w=8; H=60$ [km]; $R_{rup}=200$ [km]

CAPÍTULO V: MÉTODO DE CORNELL-ESTEVA Y GENERACIÓN MAPA DE PELIGRO SÍSMICO.

Una vez determinado el modelo de recurrencia de los sismos, las zonas sismogénicas en que estos ocurren y los modelos de predicción de los movimientos del suelo en la superficie (o leyes de atenuación), se tienen todos los ingredientes necesarios para resolver la integral de Peligro Sísmico, según la metodología probabilística de Cornell (1968) y Esteva (1970). El Peligro Sísmico se evalúa como la probabilidad de superar un valor específico del parámetro del movimiento en la superficie, debido a la actividad de todas las fuentes sismogénicas que la rodean y que pueden contribuir al movimiento esperado.

Para la ocurrencia de un terremoto dado, la probabilidad de que un parámetro del movimiento del suelo y exceda un valor particular Y , puede ser calculado por el teorema de la probabilidad total que es.

$$P[y > Y] = P[y > Y | X] = \int P[y > Y | X] f_x(X) dx \quad (24)$$

Donde X es un vector de variable aleatorias que influye en Y . En la mayoría de los casos los valores de X están limitados a la Magnitud M , y a la distancia R . Asumiendo que M y R son independientes, la probabilidad de excedencia puede ser escrita como.

$$P[y > Y] = \int \int P[y > Y | m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (25)$$

Si el sitio de interés es una región con N_S fuentes sismogénicas potencialmente activas, y cada una está caracterizada por una tasa anual de excedencia de la magnitud mínima, en este caso corresponde a $v_{m_{min}}$, que es el número de sismos por año \geq que $5 Mw$; la tasa anual de excedencia total para la región está dada por:

$$\lambda_Y = \sum_{i=1}^{N_S} (v_{m_{min}})_i \int \int P[Y > y | m r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad (26)$$

donde la doble integral está limitada por las magnitudes y distancias mínimas y máximas de la fuente. El valor de λ_Y representa la tasa anual de excedencia del nivel del movimiento Y , debido a la ocurrencia de terremotos en las N_S fuentes.

El término $P[y > Y | m, r]$ entrega la probabilidad de excedencia de Y condicionada a las variables m y r, y las funciones $f_{M_i}(m)$ y $f_{R_i}(r)$ son las funciones de densidad de probabilidad de la magnitud y la distancia respectivamente.

A continuación se muestra como se calcula cada término de la integral.

Función de densidad de probabilidad de la magnitud, $f_M(m)$

La función de densidad de probabilidad de la magnitud para la fuente i, $f_{M_i}(m)$, se calculo previamente a partir de la ley de Recurrencia Sísmica de Gutenberg Richter, en el capítulo 3 de este trabajo.

La función de densidad doblemente truncada corresponde a la Ecuación (14), que escrita de otra forma queda:

$$f_{M_i}(m) = \frac{\beta_i e^{-\beta_i [m-(m_{min})_i]} }{1 - e^{-\beta_i [(m_{max})_i-(m_{min})_i]}} \quad m_{min} \leq m < m_{max} \quad (27)$$

Donde $(m_{max})_i$ y $(m_{min})_i$ son las magnitudes máxima y mínima asignadas a la fuente i, en este estudio en particular $(m_{min})_i = m_{min} = 5 Mw$. Y los valores de $(v_{m_{min}})_i$ y β_i vienen dados para cada fuente calculados en este trabajo en la sección 3.3 de este trabajo

Función de densidad de probabilidad de la distancia, $f_R(r)$

La amplitud del movimiento del suelo en la superficie depende de la distancia donde se origina el sismo hasta el sitio en cuestión. En general, no se conoce el lugar en concreto dentro de la fuente sismogénica en el que ocurrirá un sismo, por lo que la estimación de la distancia fuente-sitio debe realizarse recurriendo a planteamientos probabilísticos. Esto se realiza a través de la función de densidad de probabilidades en distancias. Para determinarla a cada distancia r se le determina la fracción de área de la fuente Δr que se encuentra a esa distancia del sitio con respecto al área total de la fuente.

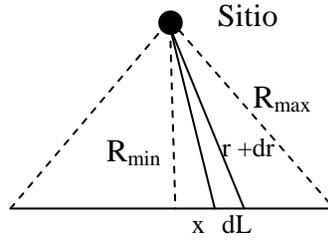
Por lo general, $f_R(r)$ no tiene una expresión analítica y debe ser calculada numéricamente. A continuación se presentan tres casos para los que se conocen dichas expresiones.

Caso 1: Fuente Puntual.

En este caso la distribución es única e igual a 1. Es decir.

$$f_R(r) = 1 ; \forall r$$

Caso 2: Fuente lineal de longitud L , cuyos extremos se encuentran equidistantes del sitio donde se calcula el peligro, siendo R_{\min} y R_{\max} las distancias fuente-sitio mínima y máxima respectivamente.



$$f_R(r)dr = \frac{dL}{L/2}$$

$$r + dr = \sqrt{(x + dL)^2 + R_{\min}^2}$$

$$r + dr = \sqrt{(\sqrt{r^2 - R_{\min}^2} + dL)^2 + R_{\min}^2}$$

$$(r + dr)^2 = (\sqrt{r^2 - R_{\min}^2} + dL)^2 + R_{\min}^2$$

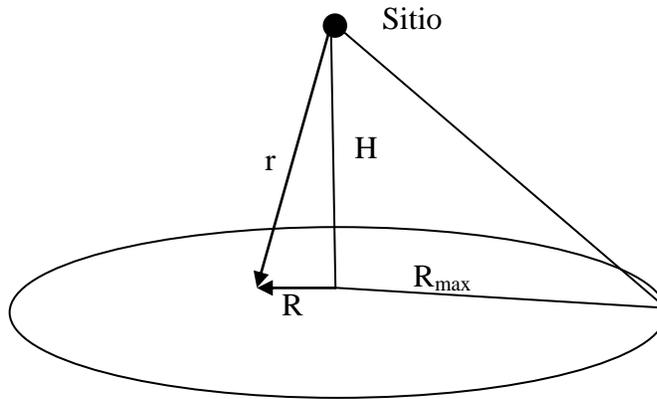
$$r^2 + 2r dr + 0_{dr^2 \rightarrow 0} = r^2 - R_{\min}^2 + 2 * \sqrt{r^2 - R_{\min}^2} * dL + 0_{dL^2 \rightarrow 0} + R_{\min}^2$$

$$r dr = \sqrt{r^2 - R_{\min}^2} * dL$$

$$dL = \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R_{\min}^2}}$$

$$\therefore f_R(r) = \frac{2r}{L\sqrt{r^2 - R_{\min}^2}} ; R_{\min} \leq r \leq \sqrt{R_{\min}^2 + \frac{L^2}{4}}$$

Caso 3: Fuente circular de radio R_{max} con el sitio donde se calcula el peligro ubicado sobre el centro de esta.



$$f_R(r)dr = \frac{dAr}{\pi R_{max}^2}$$

$$dAr = 2\pi R dR$$

$$r = \sqrt{R^2 + H^2}$$

$$dr = \frac{1 \cdot 2R \cdot dR}{2\sqrt{R^2 + H^2}}$$

$$dr = \frac{R \cdot dR}{r}$$

$$r \cdot dr = R \cdot dR$$

$$\therefore f_R(r) = 2r/R_{max}^2$$

Probabilidad de excedencia condicionada, $P[Y > y | m r]$

En el cálculo del Peligro Sísmico, se considera que el término de probabilidad de excedencia del parámetro en estudio del movimiento del suelo, sigue una distribución log-normal, de media $\overline{\log y}$ y desviación estandar $\sigma_{\log y}$, es decir:

$$P[Y > y | M, R] = \frac{1}{\sigma_{\log y} \sqrt{2\pi}} \int_{\log y}^{+\infty} \exp \left[-\frac{(\log y - \overline{\log y})^2}{2\sigma_{\log y}^2} \right] d(\log y) \quad (28)$$

Visto gráficamente.

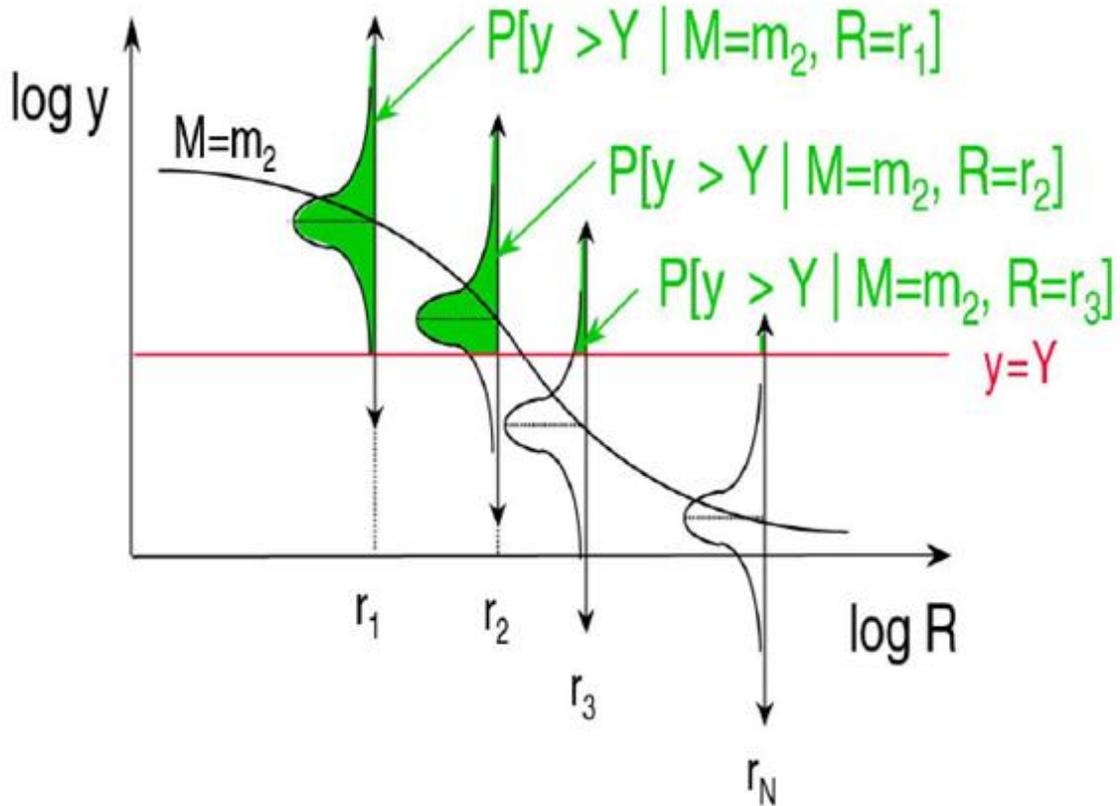


Figura 49: Curva de atenuación del movimiento ($\log y$) para $M=m_2$ a diferentes distancia r (r_1, r_2, r_3, r_N) (Camacho & Benito-RESIS II, 2008)

En la **Figura 49** se ve la curva de atenuación del movimiento ($\log y$) para una Magnitud $M=m_2$ a diferentes distancia r (r_1, r_2, r_3, r_N) para las que se muestra la probabilidad de excedencia del movimiento Y (indicado con una línea roja). Las áreas verdes representan esta probabilidad sin truncar el valor de la integral.

Últimamente se ha considerado la importancia del límite superior con que se trunca la integral en los resultados de la predicción del Peligro Sísmico. Esto se observa en períodos de retorno muy largos, donde valores altos del truncamiento resultan en aceleraciones esperadas muy poco probables (Boommer, 2004). Por lo que se ha determinado utilizar un valor de truncamiento de 2.5 veces el valor de la desviación estándar.

5.1 CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO.

Ordaz (2004) propone una simplificación de la Ecuación (26), considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sismogénicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se está midiendo. Como se dijo anteriormente las fuentes pueden ser líneas, áreas o volúmenes. Se asume que la ocurrencia de un terremoto es igualmente probable en todos los puntos de la fuente. En el caso de la fuente i -ésima la expresión queda.

$$\lambda_i(y) = \sum_j \int_{m_{min_i}}^{m_{max_i}} \frac{(v_{m_{min}})_i \beta_i e^{-\beta_i m}}{1 - e^{-\beta_i [(m_{max})_i - (m_{min})_i]}} P[Y > y | M, R_{ij}] dm$$

donde m_{min_i} y m_{max_i} las magnitud máxima y mínima de la fuente i -ésima respectivamente, $P[Y > y | M, R_{ij}]$ es la probabilidad de excedencia del valor y en el sitio, dada que a una distancia R_{ij} se origina un terremoto de magnitud M . R_{ij} son las distancias mínimas entre el sitio y cada subelemento en que se ha subdivido la fuente i . Las fuentes sísmicas fueron subdivididas en triángulos equiláteros, en cuyo centro de gravedad se encuentra el foco del sismo. Como se describió anteriormente el área de ruptura fue modelada según la relación de Papazachos et. al (2004), por lo que el área queda definida según el plano del triángulo de la subdivisión, por lo que R_{ij} corresponde a la mínima distancia entre la circunferencia formada con centro ubicado en el centro de gravedad del triángulo j -ésimo. La subdivisión del triángulo se realiza recursivamente hasta garantizar la precisión en la integración de la ecuación.

En el ANEXO A se realiza la resolución de la integral de Peligro Sísmico para una fuente puntual.

5.2 PROGRAMA CRISIS 2007 V7.6.

Crisis 2007 V7.6 pertenece a la serie de programas Crisis que han sido aceptados a nivel mundial como una de la herramientas más idóneas para la evaluación del Peligro Sísmico. El programa permite crear fuentes de tipo línea y de área. Dentro de cada fuente el programa asume que la sismicidad se encuentra distribuida de manera uniforme, ya sea en la línea o en el área. Es por esto que se hace necesario la discretización de estas superficies lo que permite convertir la integración en una suma aritmética. La manera en que el programa realiza esta división es a través de la formación de triángulos equiláteros, tal como se explicó en la sección anterior, cuya relación del tamaño con la distancia mínima al punto de estudio se define con valores ingresados por el usuario.

Los modelos de sismicidad que permite utilizar el programa son lo de Gutenberg-Richter doblemente truncado, y el del modelo del sismo característico. En este trabajo se utilizó el primero y los parámetros que se ingresan fueron determinados en el capítulo 3 de este trabajo.

Este programa evalúa el Peligro Sísmico para diferentes períodos de retorno y para distintos períodos estructurales. Para el cálculo del Peligro Sísmico es necesario contar con la información de atenuación de la energía para diferentes ordenadas espectrales y con ello generar todos los datos de entrada necesarios para la evaluación del Peligro Sísmico.

Para el cálculo realizado en este programa se dividió el territorio nacional en 4 grandes zonas: Norte Grande, Norte Chico, Zona Central y Zona Sur. En cada una de estas zonas se utilizó una grilla de cálculo equiespaciada cada 0.2° tanto en latitud como en longitud, tal como se ve en la **Figura 50**. Antes de realizar la totalidad de los cálculos se realizó una inspección para ver de qué forma afectaba la densidad de la grilla en los cálculos del Peligro Sísmico. Una vez realizados ambos procesos no se encontraron grandes diferencias, por lo que se concluye que la grilla de 0.2° es una grilla representativa que además optimiza los tiempos de cálculo de gran manera.

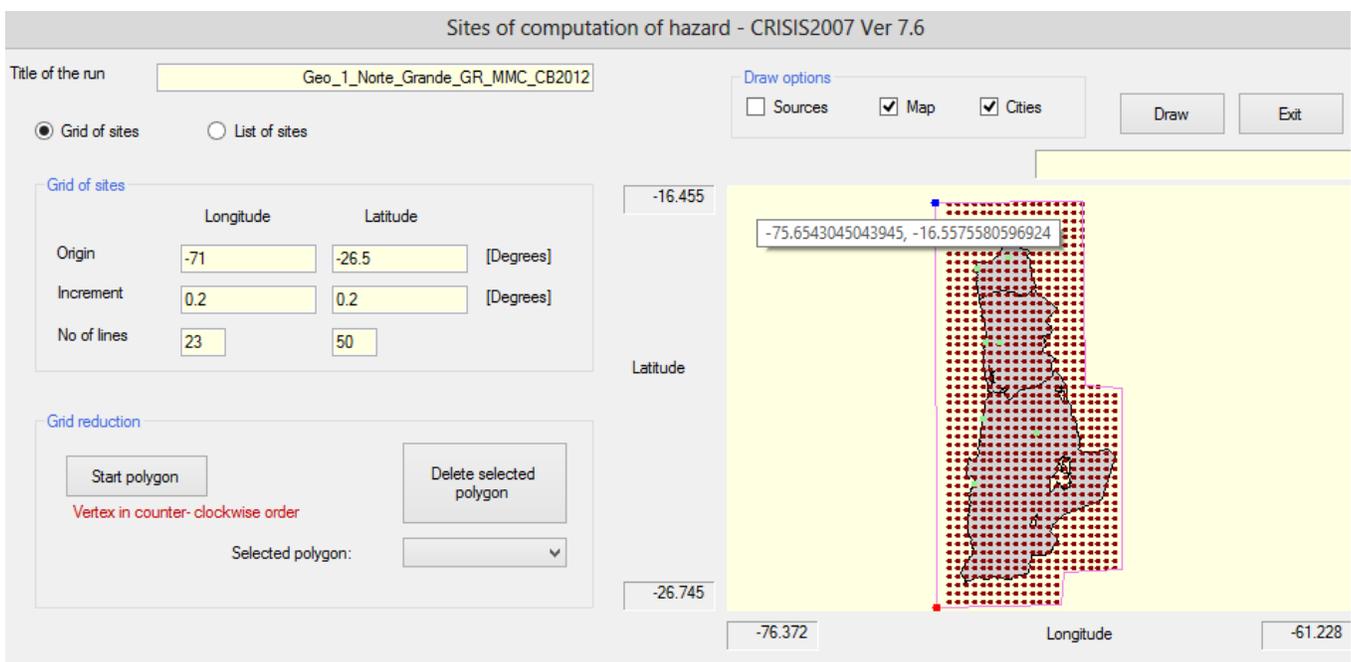


Figura 50: Grilla de Sitios equiespaciadas 0.2° ; Norte Grande

El cálculo del Peligro Sísmico se realizó para dos distintos métodos de cálculo de los parámetros asociados a la Recurrencia Sísmica, el método de Mínimos Cuadrados (MMC) y el método de Máxima Verosimilitud (MV). Para las ordenadas espectrales se utilizaron un total de 31 cubriendo períodos estructurales entre 0 y 3 s.

En total se ingresaron 3 geometrías que definen las coordenadas de las fuentes sismogénicas. Además se ingresaron en los modelos de estas geometrías 5 distintas leyes de atenuación mencionadas anteriormente. Finalmente, para tratar las fuentes de incertidumbre se utiliza un árbol lógico de decisiones.

5.3 ÁRBOL LÓGICO DE DECISIONES.

En el estudio probabilístico del Peligro Sísmico se utiliza la técnica del árbol lógico de decisiones, descrito en el Capítulo II de este trabajo. En este análisis se le asigna una probabilidad de ser correcta a cada decisión. El árbol final que se utilizó se puede observar en la **Figura 51**.

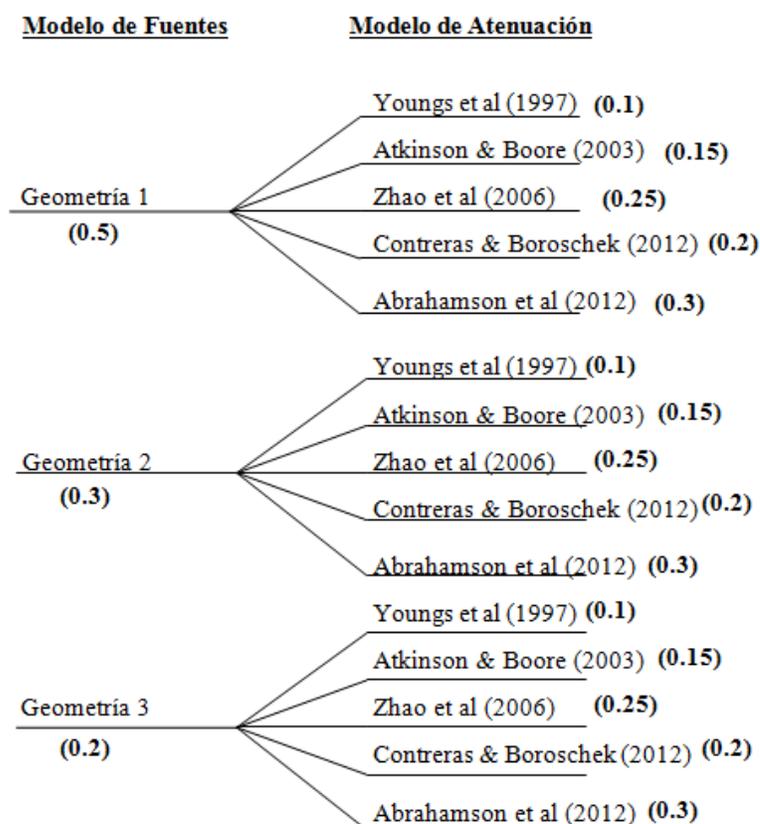


Figura 51: Árbol lógico de decisiones utilizado en este estudio

En este se puede observar que cada una de las ramas tienen asociado un peso que fue establecido bajo criterios que difieren entre el modelo de fuentes y del modelo de atenuación.

En el caso del modelo de fuentes, se le dio mayor importancia a Geometría 1, debido a que corresponde a la geometría superior, por lo que se prefiere el lado conservador.

En el caso de las leyes de atenuación tal como se dijo anteriormente el criterio primordial fue el año de publicación del estudio y la evaluación de los expertos.

El modificar estos valores tiene directa implicancia en los resultados finales del estudio de Peligro Sísmico.

5.4 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO.

Se presentan a continuación los resultados finales del estudio de Peligro Sísmico desarrollados para la zona que abarca desde Arica hasta el Punto Triple, que se plasman en mapas de Peligro Sísmico para todo el país, en términos de PGA y aceleraciones espectrales $S_a(T)$ para $T= 0.2$ y 1 [s]; todos ellos para períodos de retorno de 475 y 2475 años, estos períodos de retorno son los más utilizados a nivel mundial para evaluar el Peligro Sísmico.

El primero corresponde a niveles de aceleraciones que tienen una probabilidad del 10% de ser excedidas en 50 años de vida útil, considerando una distribución de Poisson en la ocurrencia de sismos. Estos niveles de aceleración se utilizan en el análisis de la mayoría de las construcciones.

El segundo corresponde a niveles de aceleraciones que tienen una probabilidad del 2% de ser excedidas en 50 años de vida útil. Se utilizan para el análisis de construcciones que requieren un nivel de aceleraciones mayores, como lo son las centrales termonucleares. O simplemente porque el mandante solicita un análisis con este nivel de aceleraciones, como por ejemplo en tranques de relaves de mineras.

Estos resultados se complementan con espectros de amenaza uniforme para las capitales provinciales del país, estimando las aceleraciones en Roca o Suelo tipo A según la clasificación del DS61. Las aceleraciones espectrales estimadas se calculan considerando un 5% de razón de amortiguamiento crítico.

5.4.1 Mapas.

Se han generado mapas para Períodos de Retorno (PR) de 475 y 2475 años, para la aceleración máxima (PGA) y para ordenadas espectrales $S_A(0.2\text{ s})$ y $S_A(1\text{ s})$, para los métodos de cálculo de Recurrencia Sísmica de Máxima Verosimilitud (MV) y Mínimos Cuadrados (MMC), para las Zonas Geográficas del Norte Grande, Norte Chico, Zona Centro y Zona Sur del país. Resultan así un conjunto de 48 mapas, de los cuales se muestran 16 para PGA, desde la **Figura 52** hasta la **Figura 59** para PR= 475 años y desde la **Figura 60** hasta la **Figura 67** para PR= 2475 años. Un primer análisis de estos mapas resultantes permite enfatizar los siguientes resultados:

Para todos los períodos de retorno las mayores PGA se predicen en la zona costera del país, donde se tiene la influencia de la actividad de la Zona de Subducción Interplaca.

Para período de retorno de 475 años se alcanzan valores máximos de PGA en torno a 0.4g para la zona costera (Zona Interplaca). Fuera de estas zonas situadas en una línea paralela a la fosa, la PGA decae hacia el interior, alcanzando valores menores de 0.2 [g].

La morfología de los mapas de PGA para períodos de retorno de 2475 años es muy similar, si bien en estos se alcanzan valores mayores que llegan a ser del orden de entre 0.6g y 0.7g, en las zonas con valores máximos.

Los mapas de SA (0.2 s) muestran una forma bastante similar a los de PGA, llegando a valores del orden de 1 y 1.6 g, para períodos de retorno de 475 y 2475 años, respectivamente.

Los mapas para ordenadas espectrales de SA(0.2s) y SA(1s) se encuentran en el ANEXO B.7 de este trabajo.

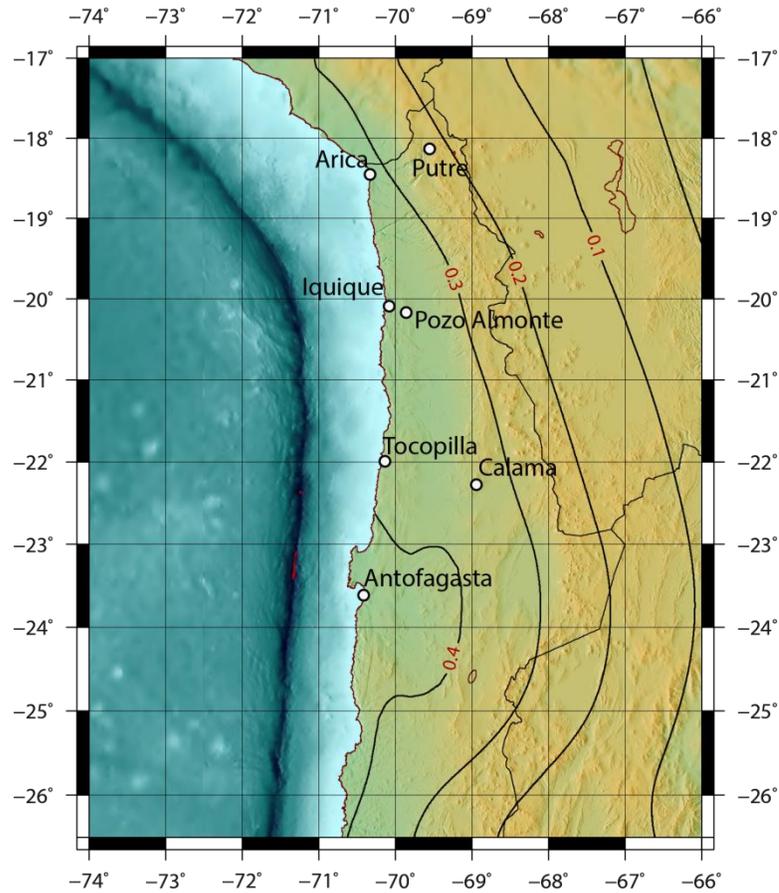


Figura 52: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=475 años; GR: MMC

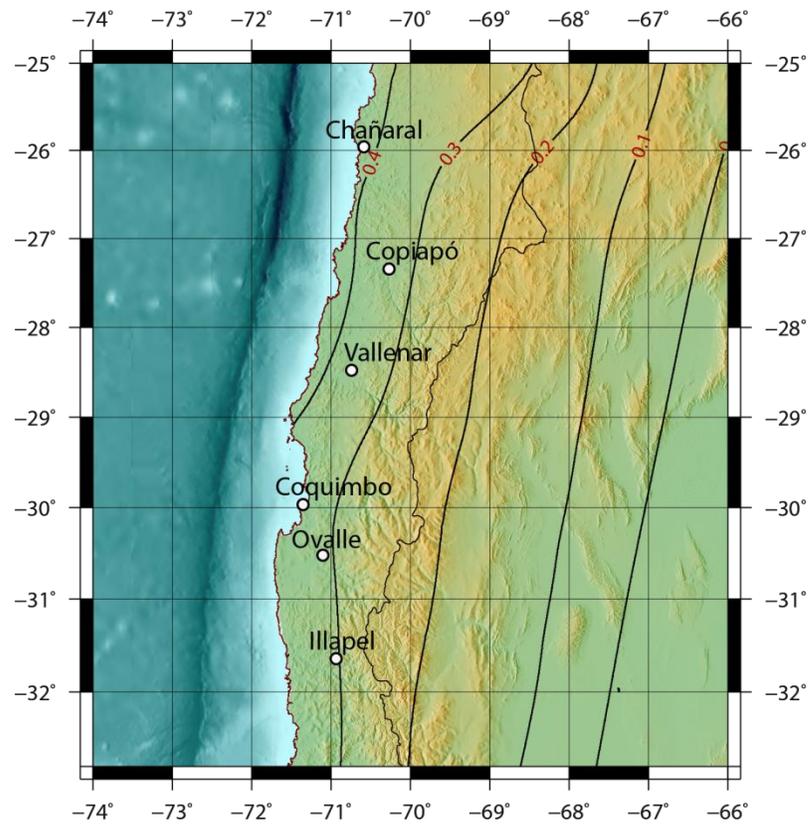


Figura 53: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=475 años; GR: MMC

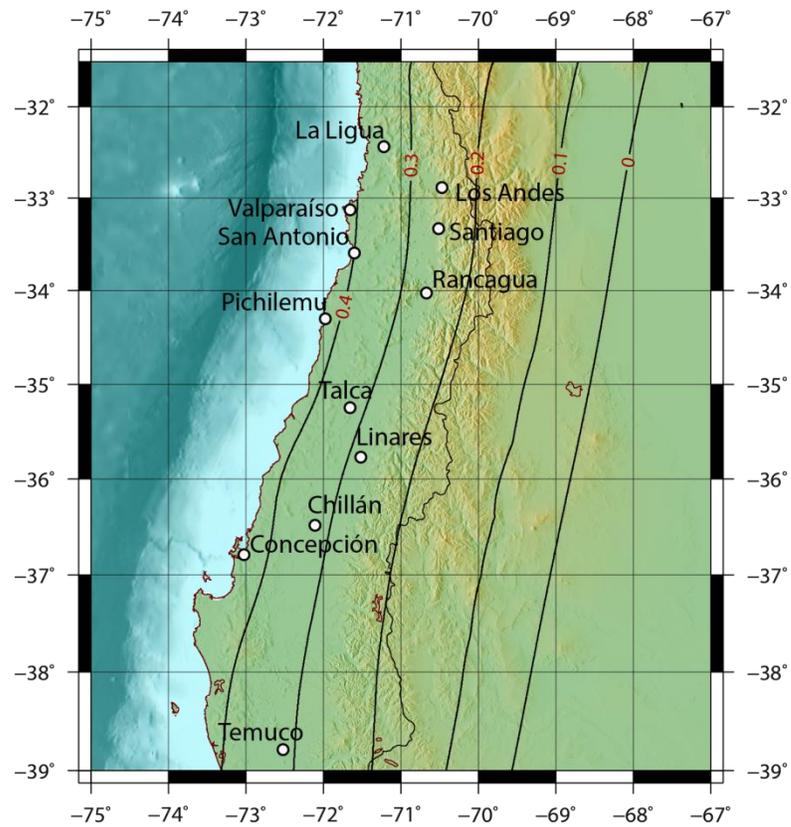


Figura 54: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=475 años; GR: MMC

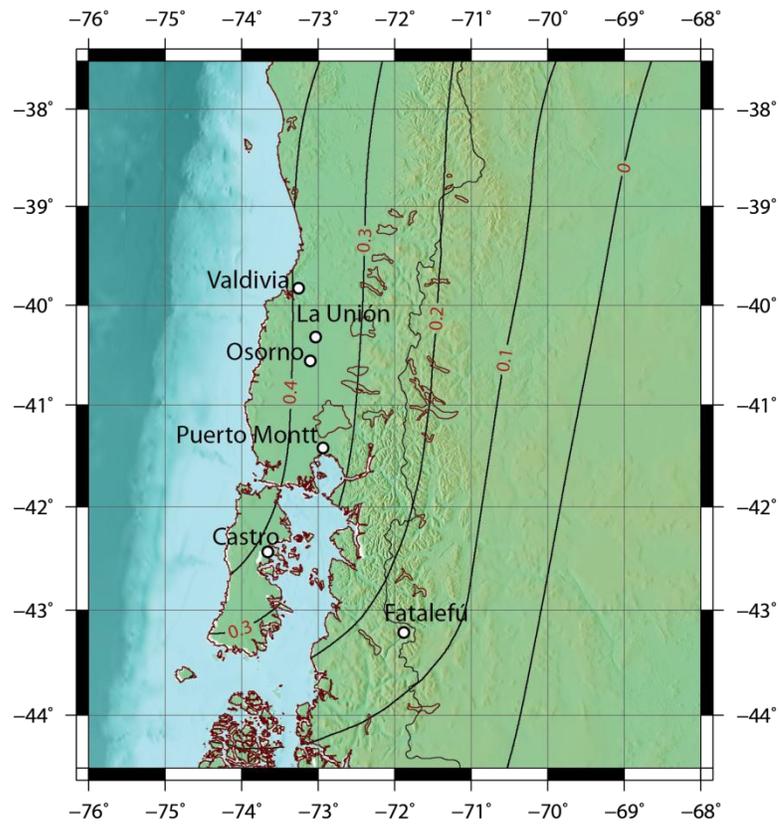


Figura 55: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Sur para PR=475 años; GR: MMC

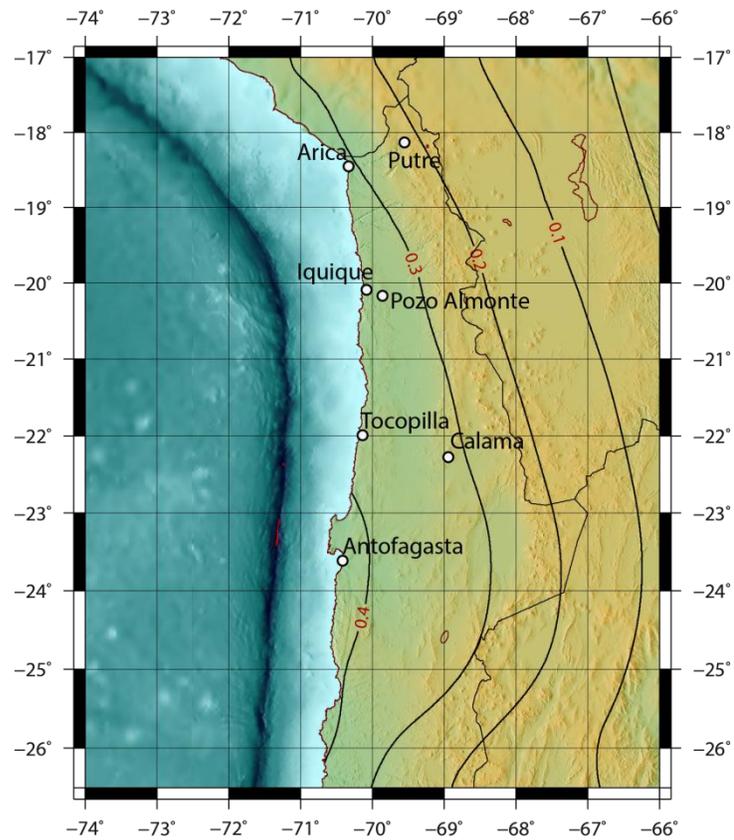


Figura 56: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=475 años; GR: MV

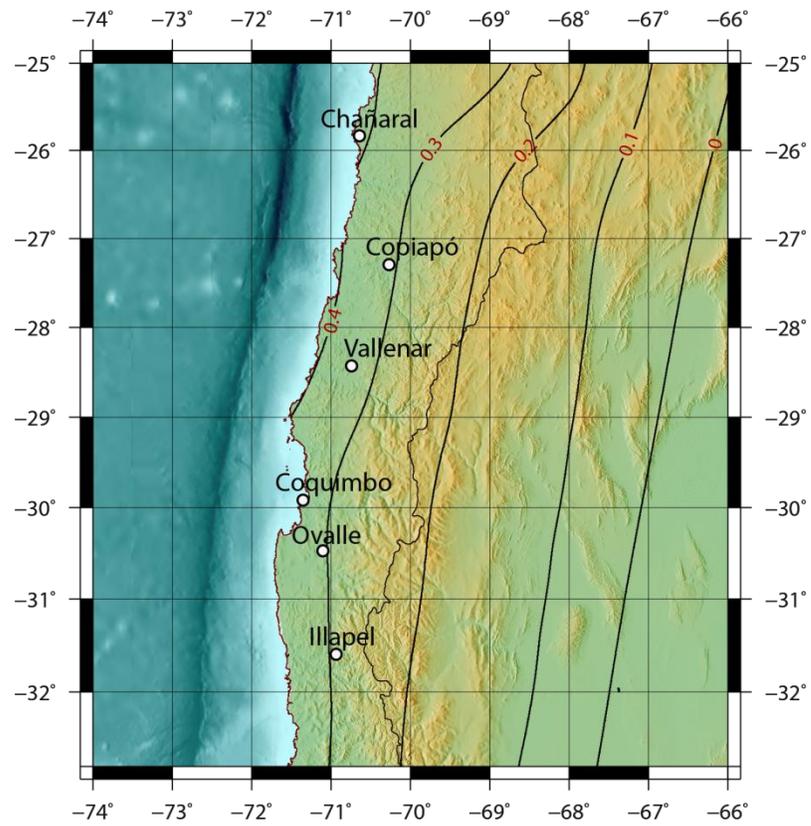


Figura 57: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=475 años; GR: MV

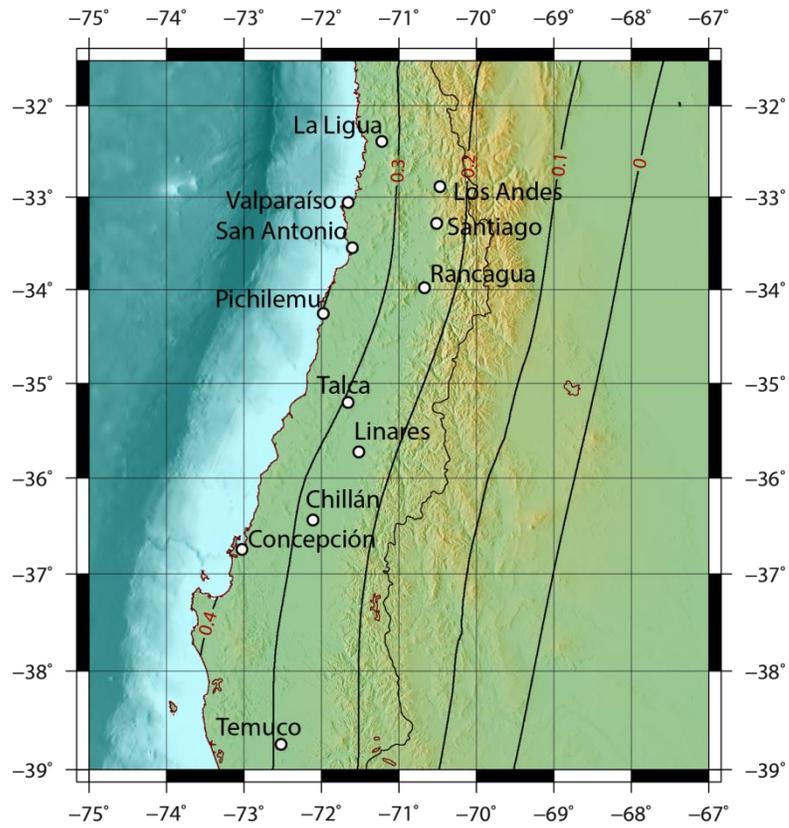


Figura 58: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=475 años; GR: MV

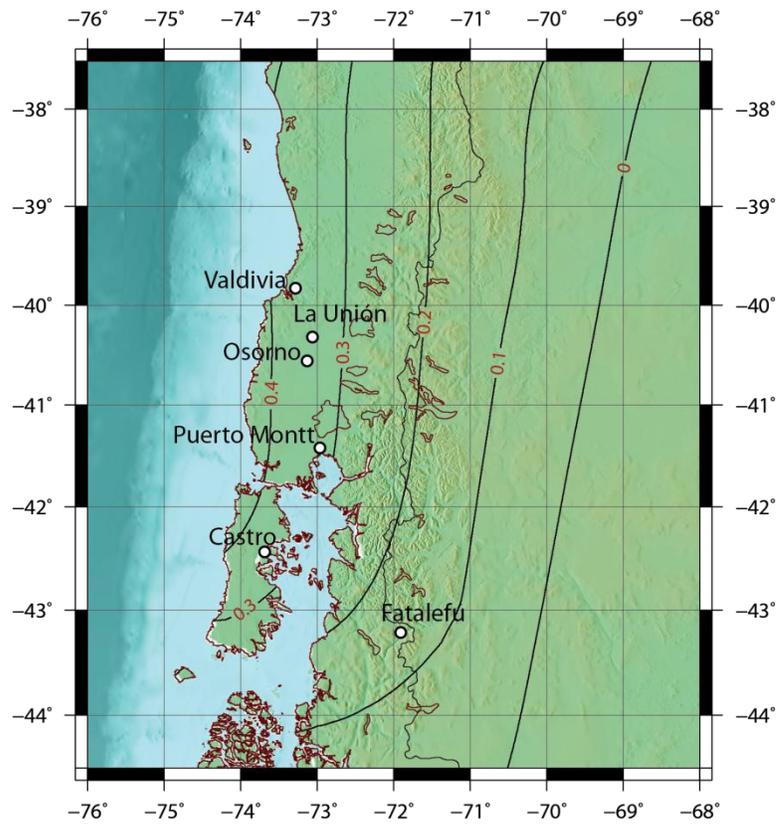


Figura 59: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Sur para PR=475 años; GR: MV

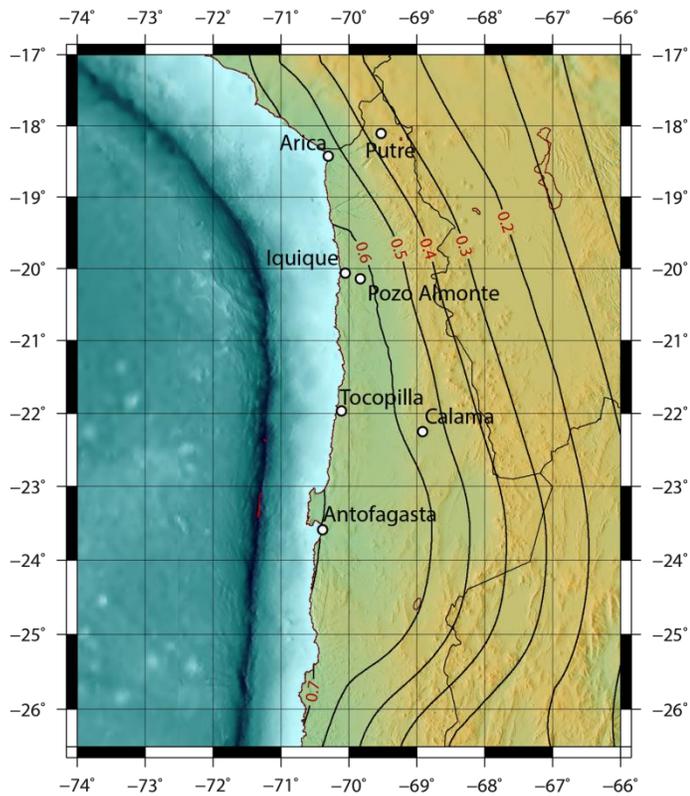


Figura 60: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=2475 años; GR: MMC

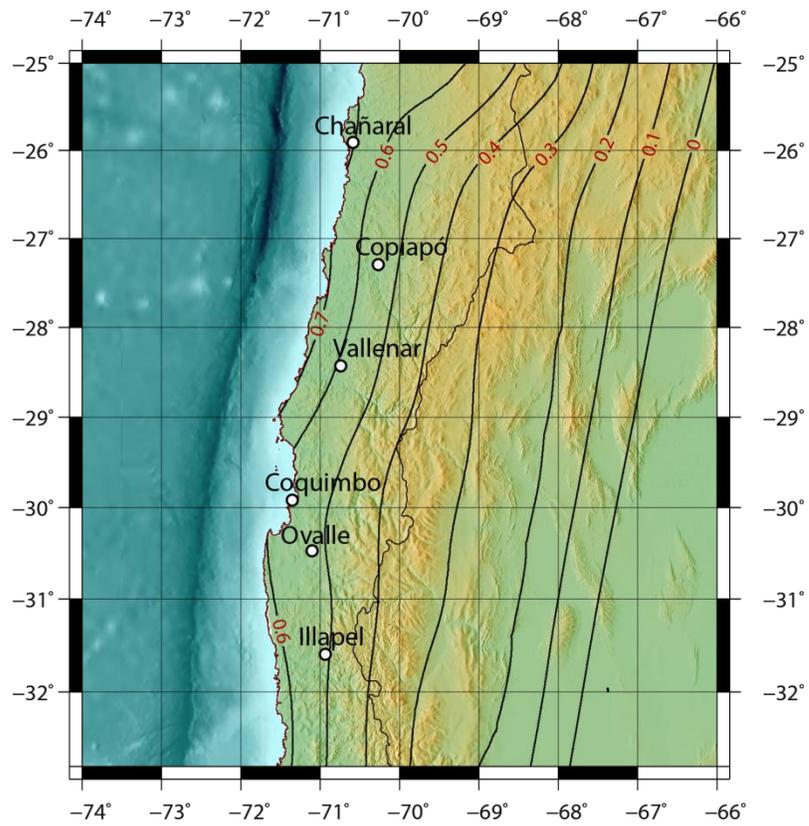


Figura 61: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=2475 años; GR: MMC

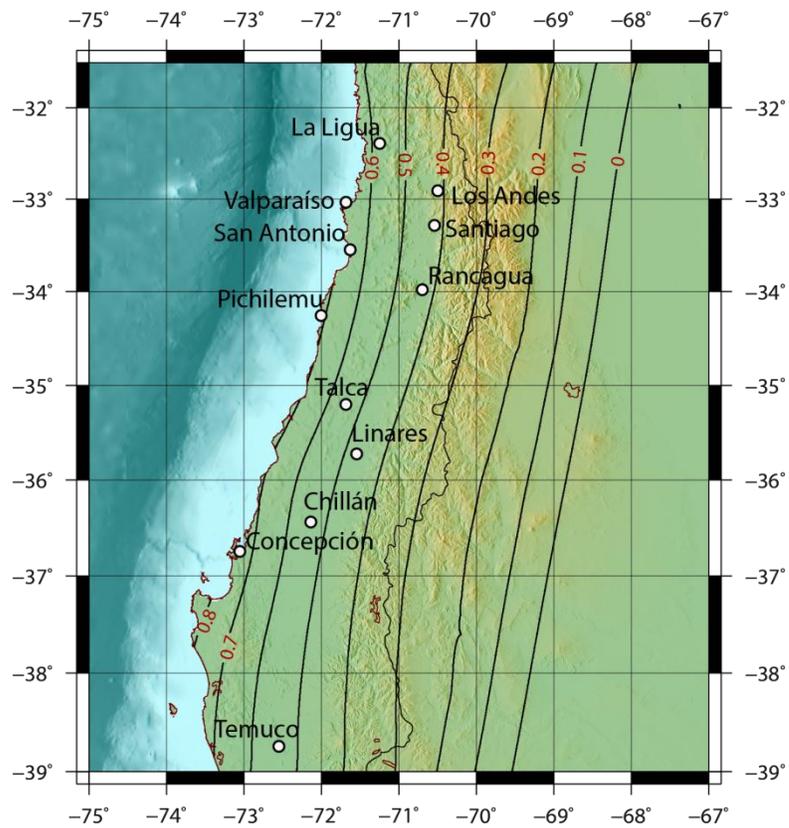


Figura 62: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MMC

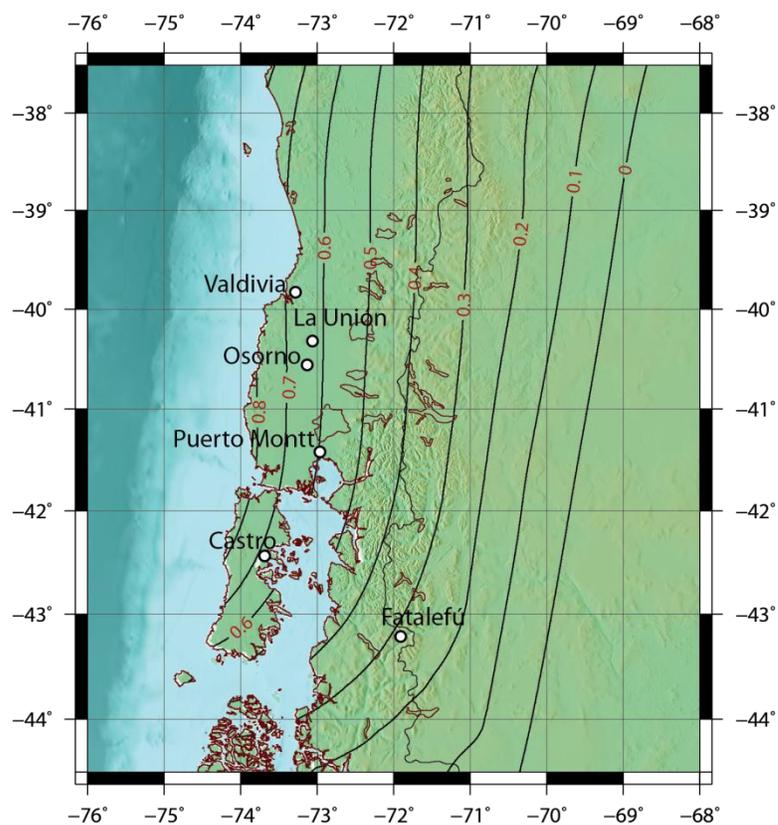


Figura 63: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MMC

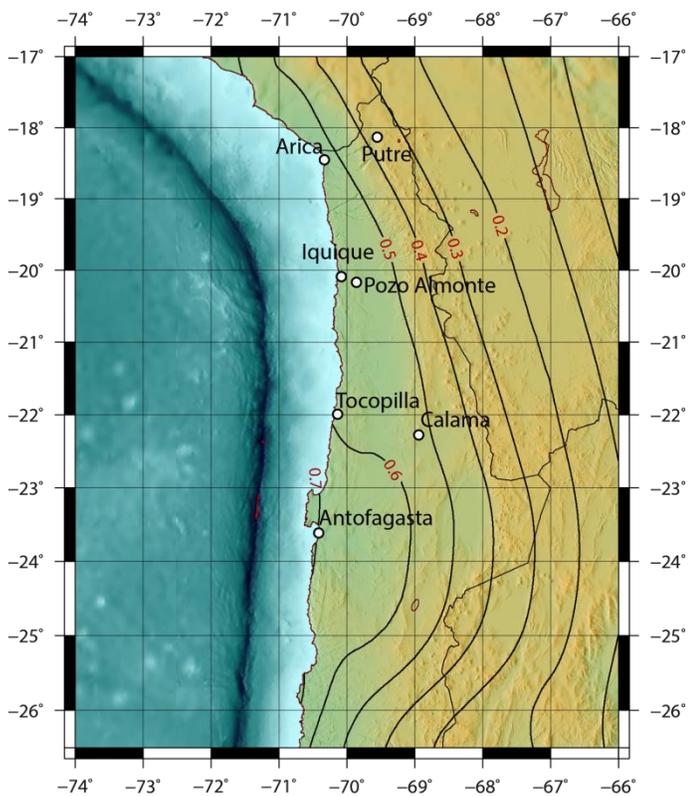


Figura 64: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Grande para PR=2475 años; GR: MV

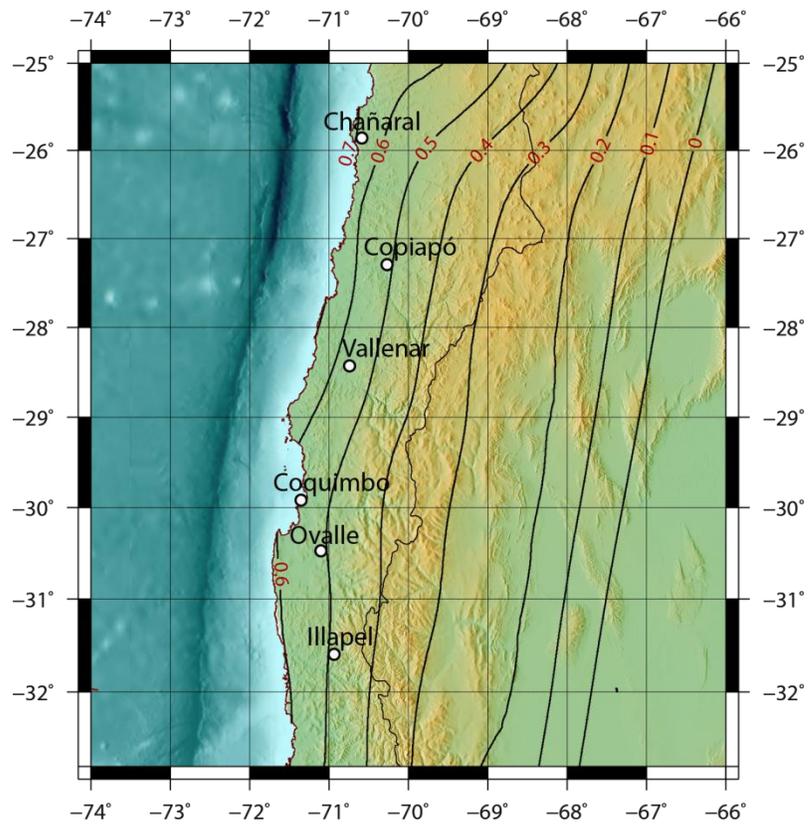


Figura 65: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Norte Chico para PR=2475 años; GR: MV

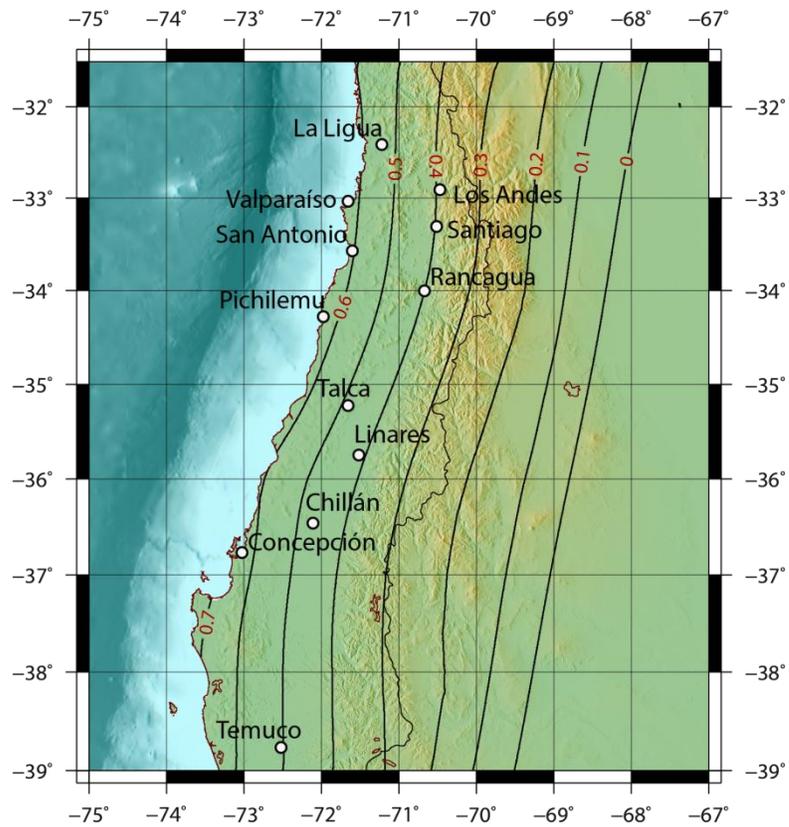


Figura 66: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MV

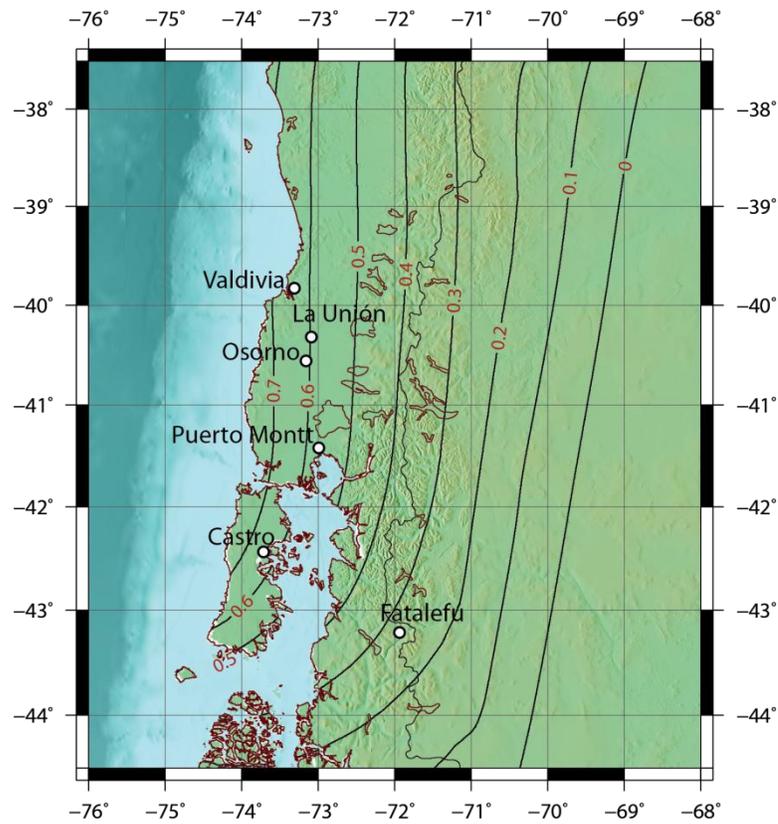


Figura 67: Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para PR=2475 años; GR: MV

5.4.2 Espectros de Peligro Uniforme.

A continuación se presentan los espectros de aceleración para Iquique, Valparaíso, Santiago, Concepción y Chillán, para períodos de retorno de 475 y 2475 años. En estas figuras se grafican los espectros para los dos métodos utilizados en el cálculo de Recurrencia Sísmica (Máxima Verosimilitud (MV) y Mínimos Cuadrados (MMC)).

Período de Retorno 475 años

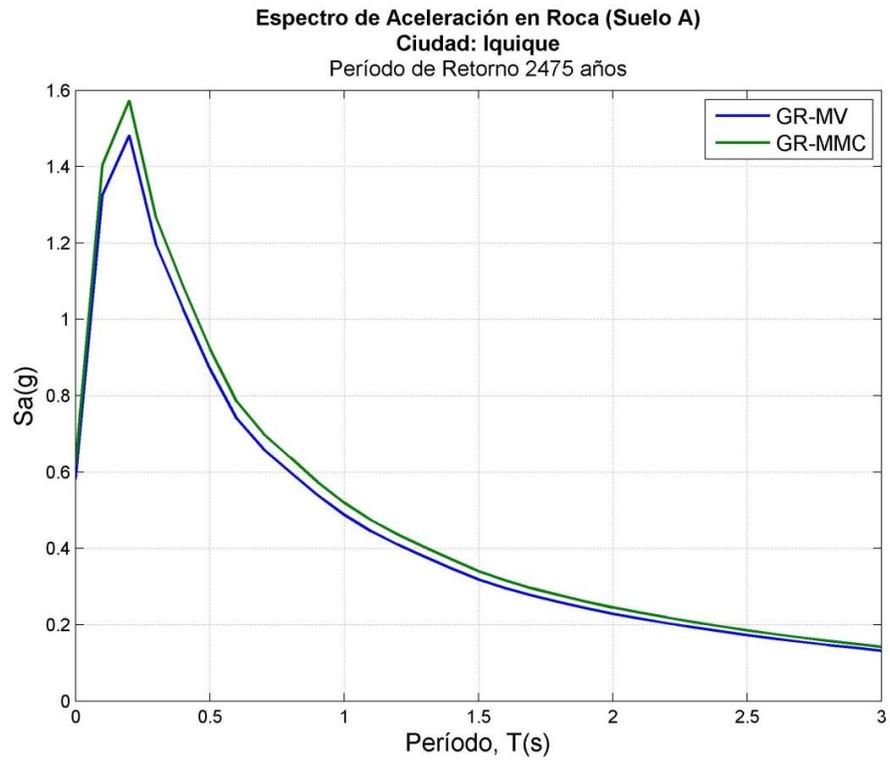


Figura 68: Espectro de Aceleración de Iquique; Período de Retorno 475 años.

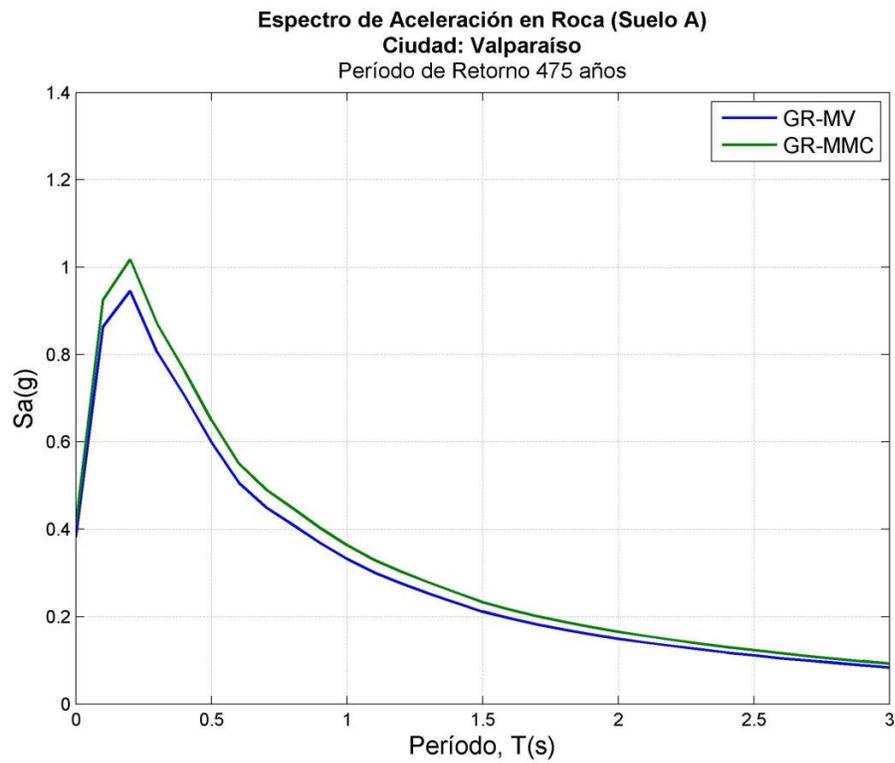


Figura 69: Espectro de Aceleración de Valparaíso; Período de Retorno 475 años.

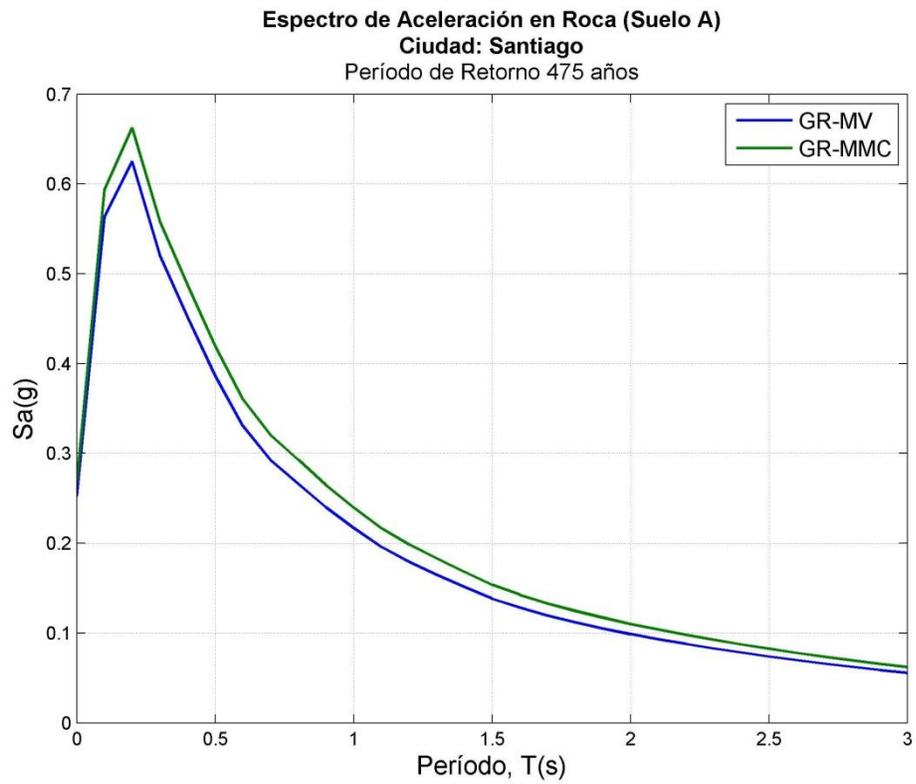


Figura 70: Espectro de Aceleración de Santiago; Período de Retorno 475 años.

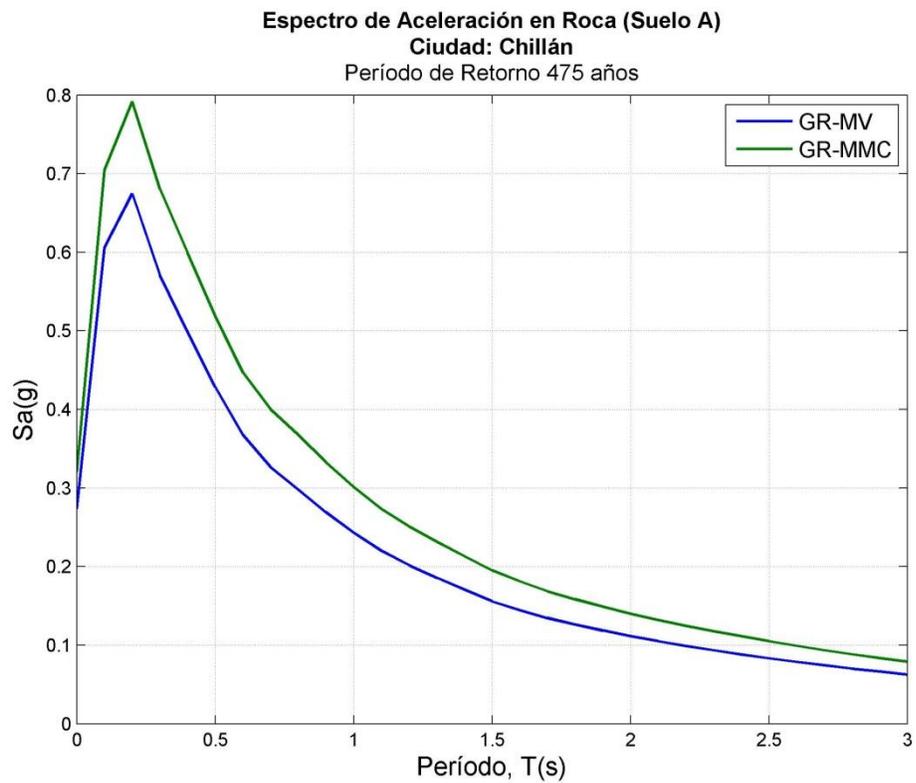


Figura 71: Espectro de Aceleración de Chillán; Período de Retorno 475 años.

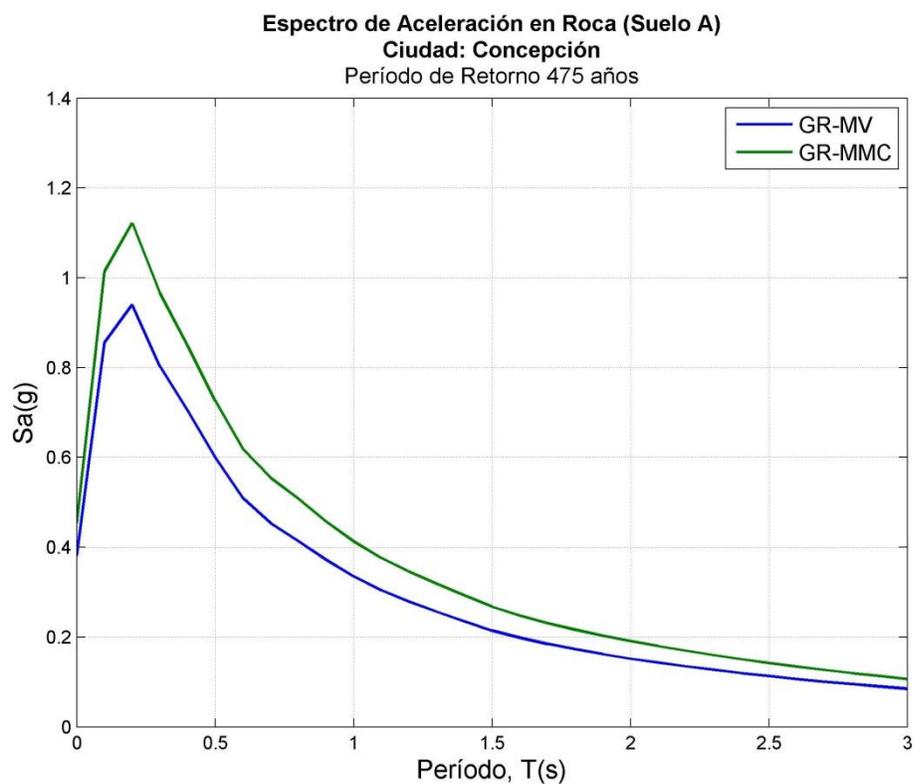


Figura 72 Espectro de Aceleración de Concepción; Período de Retorno 475 años.

En la **Tabla 29** se ven valores numéricos de los espectros mostrados anteriormente. En el ANEXO B se incluyen los espectros para las demás ciudades.

REGIÓN	CIUDAD	ACELERACIONES SISMO 475 AÑOS (g)									
		CASO MÁXIMA VEROSIMILITUD					CASO MÍNIMOS CUADRADOS				
		PGA	Peak Sa	Sa (T=1s)	Sa (T=2s)	Sa (T=3s)	PGA	Peak Sa	Sa (T=1s)	Sa (T=2s)	Sa (T=3s)
I Región de Tarapacá	Iquique	0.328	0.824	0.259	0.116	0.066	0.353	0.887	0.282	0.127	0.073
V Región de Valparaíso	Valparaíso	0.382	0.946	0.332	0.149	0.083	0.411	1.018	0.364	0.165	0.092
RM de Santiago	Santiago	0.328	0.824	0.259	0.116	0.066	0.353	0.887	0.282	0.127	0.073
VIII Región del Biobío	Chillán	0.273	0.675	0.243	0.111	0.063	0.320	0.792	0.302	0.140	0.079
	Concepción	0.381	0.941	0.335	0.152	0.085	0.454	1.122	0.413	0.191	0.107

Tabla 29: Parámetros resultantes para los espectros de Peligro Sísmico; 475 años Período de Retorno

Período de Retorno 2475 años

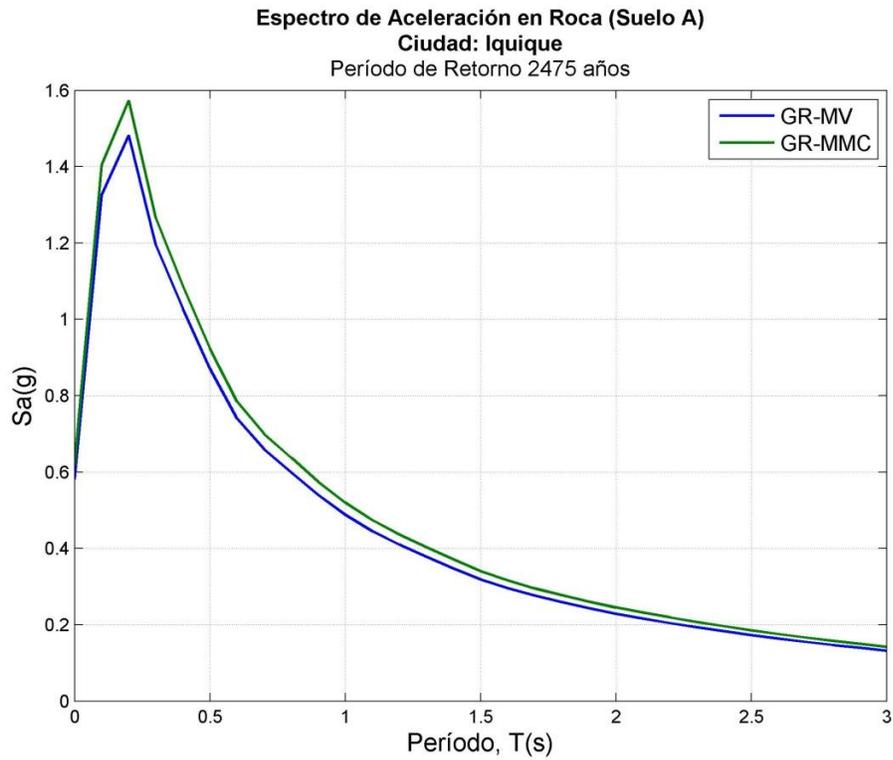


Figura 73: Espectro de Aceleración de Iquique; Período de Retorno 2475 años.

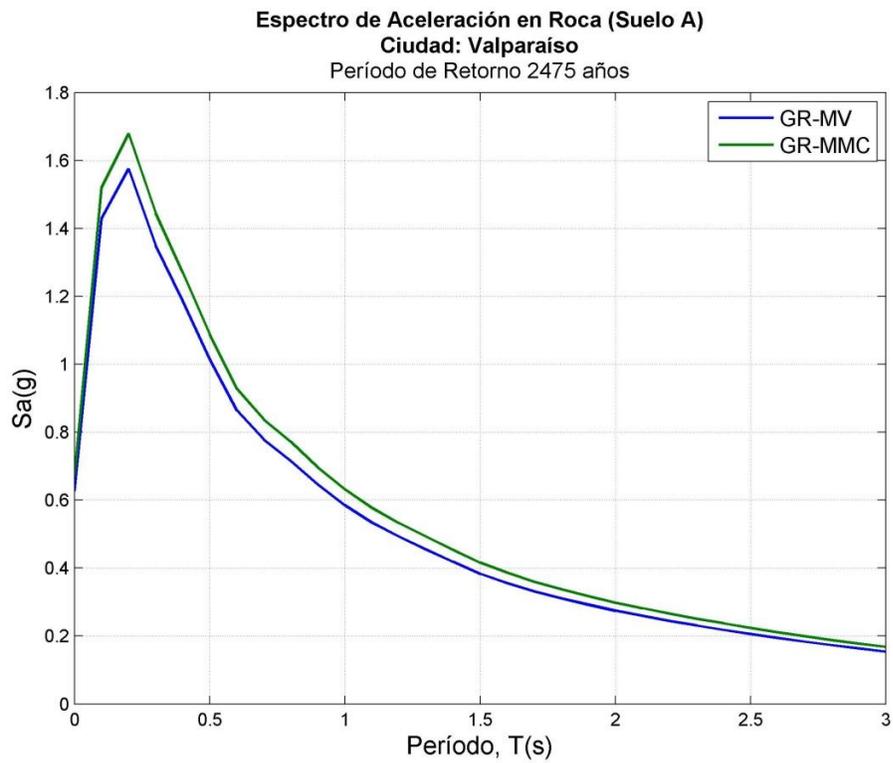


Figura 74: Espectro de Aceleración de Valparaíso; Período de Retorno 2475 años.

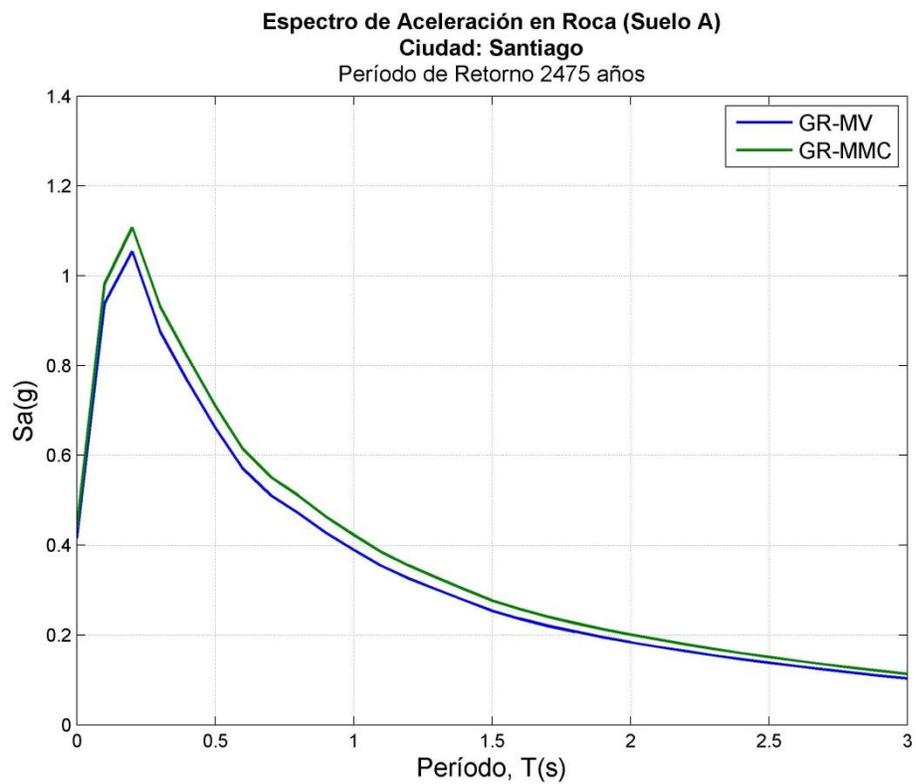


Figura 75: Espectro de Aceleración de Santiago; Período de Retorno 2475 años.

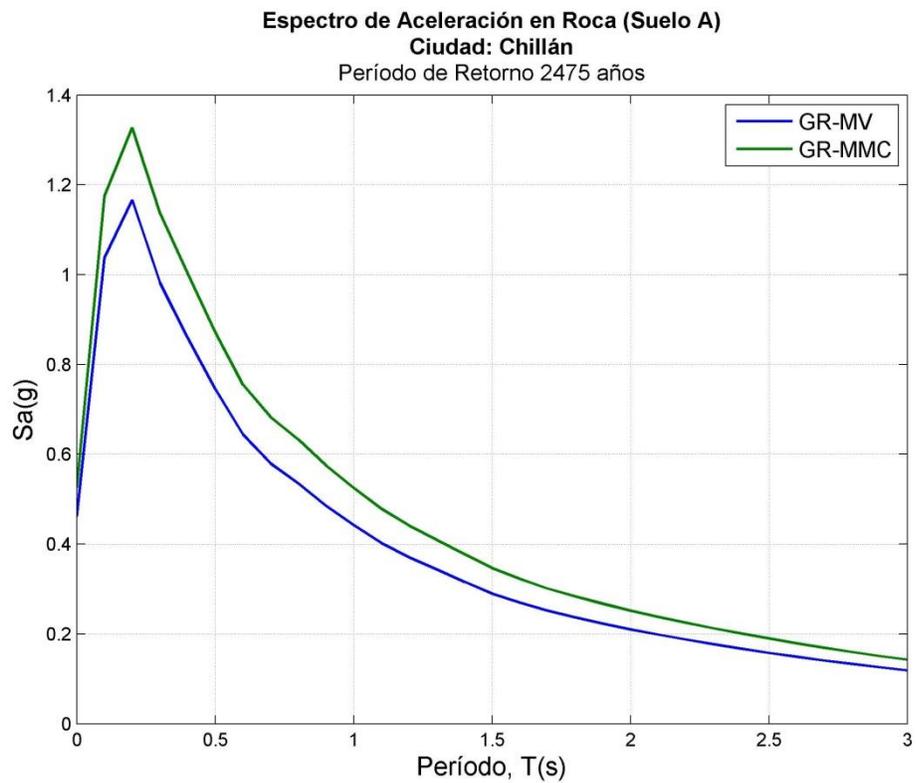


Figura 76: Espectro de Aceleración de Chillán; Período de Retorno 475 años.

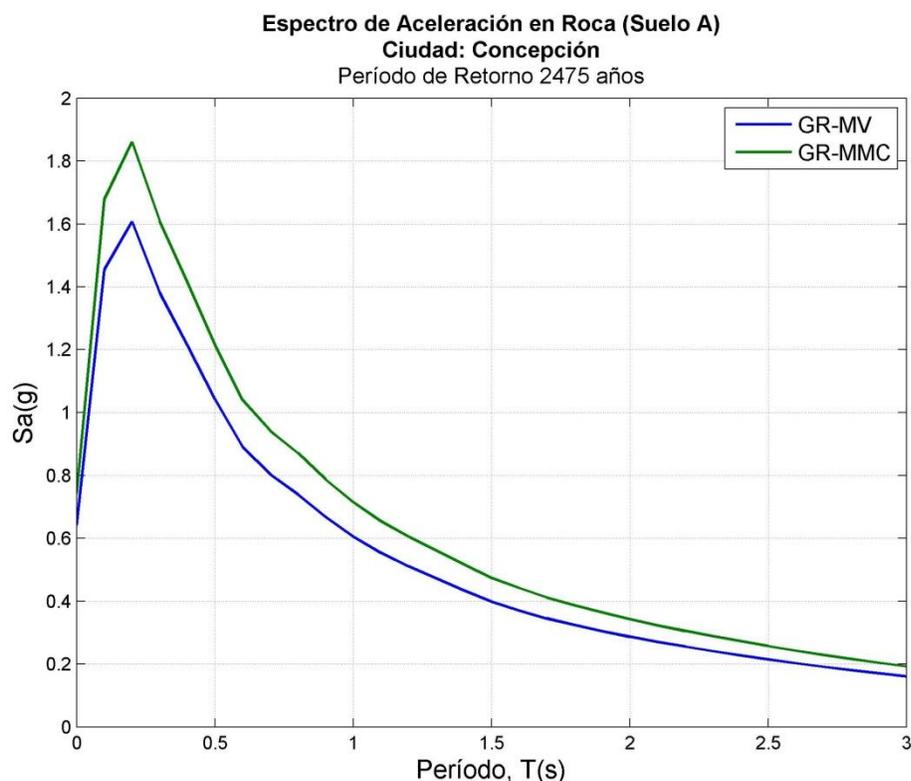


Figura 77 Espectro de Aceleración de Concepción; Período de Retorno 475 años.

REGIÓN	CIUDAD	ACELERACIONES SISMO 2475 AÑOS (g)									
		CASO MÁXIMA VEROSIMILITUD					CASO MÍNIMOS CUADRADOS				
		PGA	Peak Sa	Sa (T=1s)	Sa (T=2s)	Sa (T=3s)	PGA	Peak Sa	Sa (T=1s)	Sa (T=2s)	Sa (T=3s)
I Región de Tarapacá	Iquique	0.581	1.483	0.488	0.229	0.133	0.616	1.574	0.520	0.245	0.142
V Región de Valparaíso	Valparaíso	0.627	1.575	0.585	0.275	0.154	0.669	1.679	0.632	0.299	0.168
RM de Santiago	Santiago	0.416	1.054	0.390	0.184	0.104	0.437	1.108	0.423	0.201	0.113
VIII Región del Bío-Bío	Chillán	0.462	1.166	0.443	0.210	0.119	0.525	1.327	0.526	0.252	0.143
	Concepción	0.642	1.607	0.605	0.286	0.161	0.742	1.861	0.715	0.343	0.193

Tabla 30: Parámetros resultantes para los espectros de Peligro Sísmico; 2475 años Período de Retorno

5.4.3 Espectros Decreto Supremo 61 y NCH 2745.

El sismo de diseño (SDI) se encuentra establecido para que el nivel de amenaza tenga una probabilidad de excedencia del 10% en una vida útil de la estructura de 50 años Norma de Aislación Sísmica, Nch 2745). El sismo máximo posible (SMP), definido en la misma norma, se puede considerar como aquel que produce niveles de intensidad que tienen un 10% de probabilidad de ser excedido en 100 años (Norma de Aislación Sísmica, Nch 2745).

Si se asume una distribución de Poisson en la ocurrencia de sismos, se sabe que la Probabilidad de que ocurra al menos un sismo en un periodo de tiempo t es la siguiente:

$$P=1-\exp(-t*\lambda)$$

Donde λ es la tasa anual de excedencia de una intensidad y cualquiera. La tasa anual de excedencia se puede asociar al período de retorno a través de la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{\lambda}$$

T es el periodo de retorno, o tiempo medio de recurrencia en años de un sismos que alcance o exceda el valor de y . Se sabe que el SDI la probabilidad $P=0.1$ y $t=50$ años, lo que conduce a un período de retorno de 475 años, por lo que se utilizaran estos espectros para realizar el análisis comparativo.

El Decreto Supremo 61 define el espectro de diseño mediante la siguiente relación:

$$S_a = \frac{S A_0 \cdot \alpha}{(R^*/I)} \quad (29)$$

Donde α , factor de amplificación, se determina para cada modo de vibrar n , por medio de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 * \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (30)$$

Donde :

T_n = Período de vibrar del modo n

T_0, p = Parámetros asociados al tipo de suelo de fundación

Para el caso de roca (Suelo Tipo A) T_0 toma el valor de 0.15 y $p= 2$. Se considerara que el factor de Reducción $R^*=1$ y el factor de importancia $I=1$.

La norma de Aislación Sísmica Nch2745 define el espectro de diseño propuesto por Newmark & Hall (1982).que se muestra en la **Figura 78**.

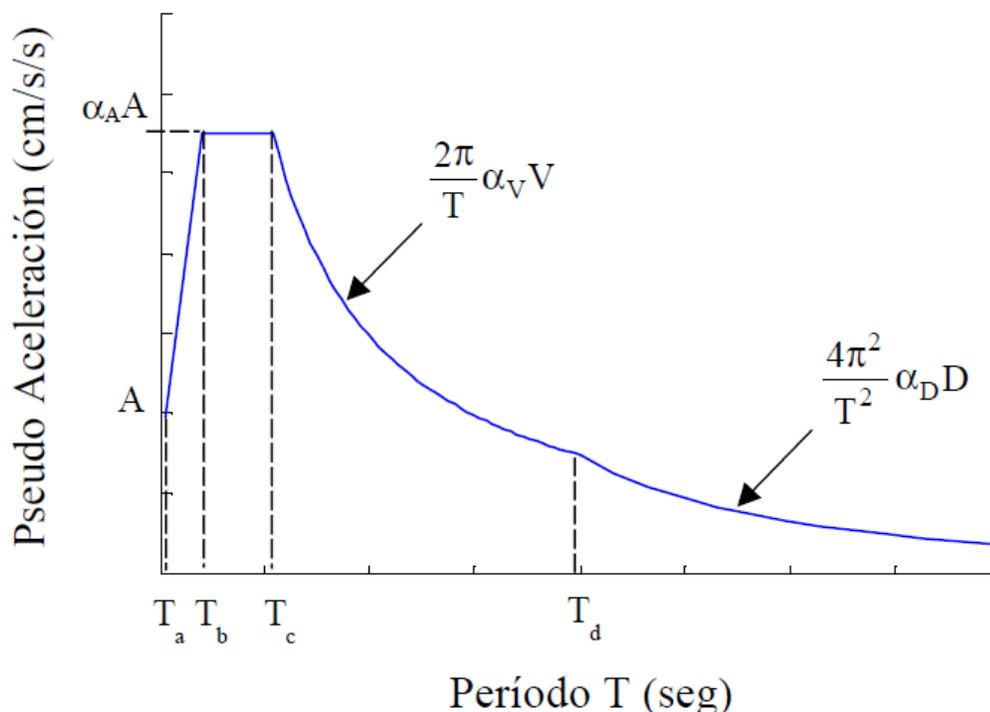


Figura 78: Definición Espectro de Aceleración Nch 2745

Para Roca (Suelo Tipo I) los factores que influyen en el espectro base son:

Suelo	T _a [s]	T _b [s]	T _c [s]	T _d [s]	$\alpha_A A$ [cm/s ²]	$\alpha_V V$ [cm/s]	$\alpha_D D$ [cm]
I	0.03	0.11	0.29	2.51	1085	50	20

Tabla 31: Definición Espectro de Diseño (SDI)

El espectro base va amplificado por un factor Z que depende de la Zona sísmica en que se encuentra el sitio de evaluación. Los factores se muestran en la **Tabla 32**.

Zona	Z
1	3/4
2	1
3	5/4

Tabla 32: Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433

Este espectro va reducido por un factor BD por amortiguamiento, que en el caso de este estudio se toma igual a 1, debido a que se considera un amortiguamiento del 5%. El factor de Reducción R al igual que para el espectro del DS61 se considera igual a 1.

Definidos ambos espectros, se muestran a continuación la comparación de los resultados de este estudio para 475 años de período de retorno, para Iquique, Valparaíso, Santiago, Concepción y Chillán, con los de ambas normas.

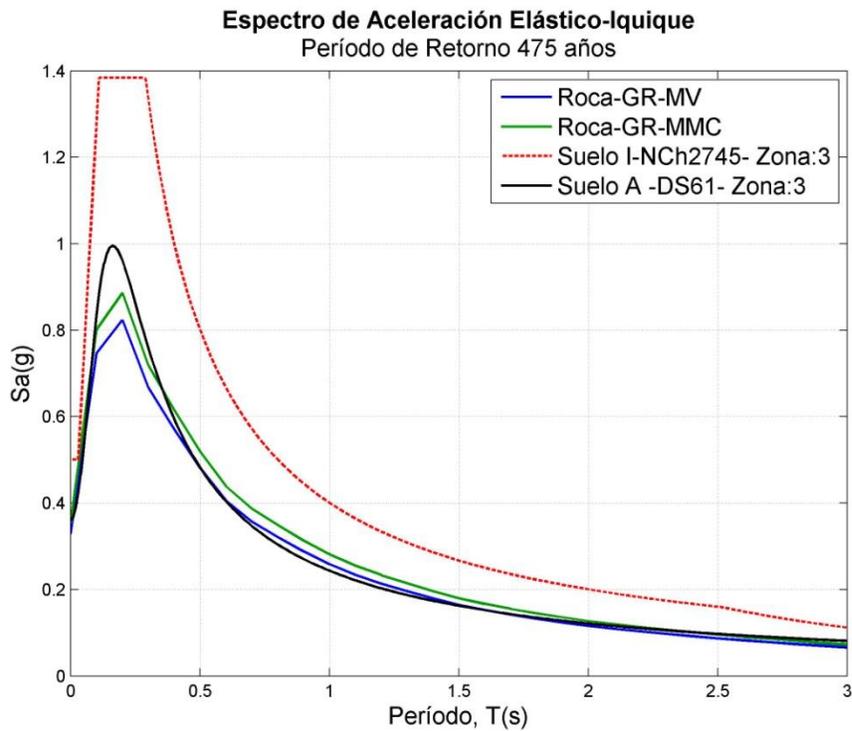


Figura 79: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Iquique generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

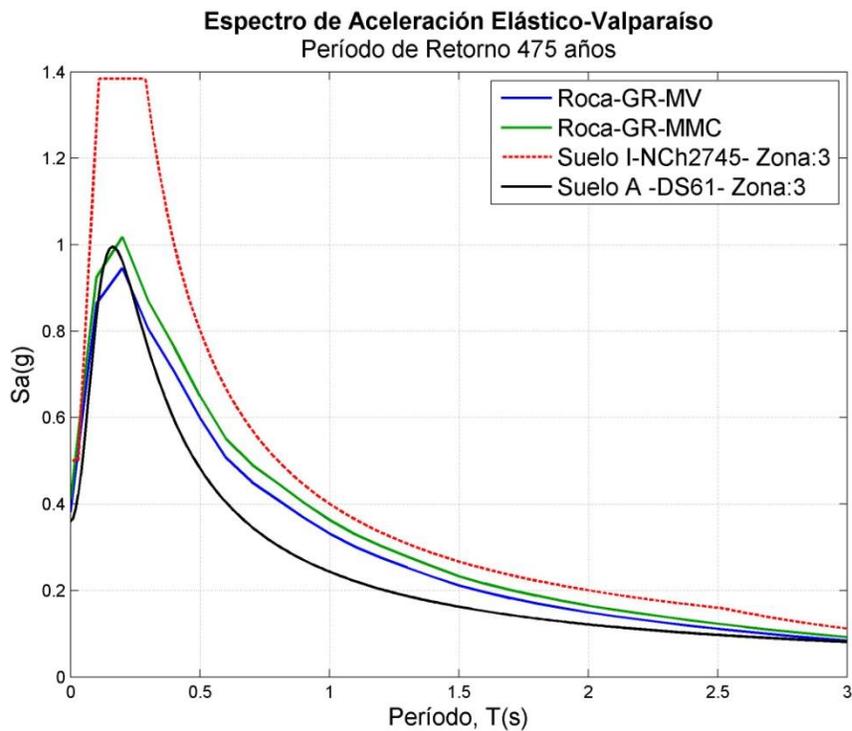


Figura 80: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Valparaíso generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

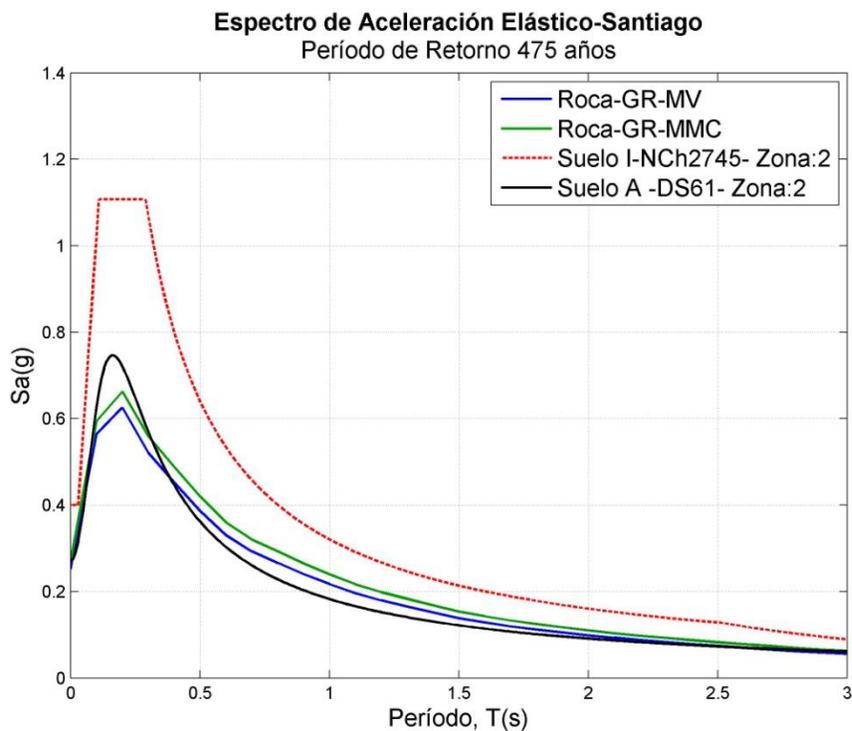


Figura 81: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Santiago generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

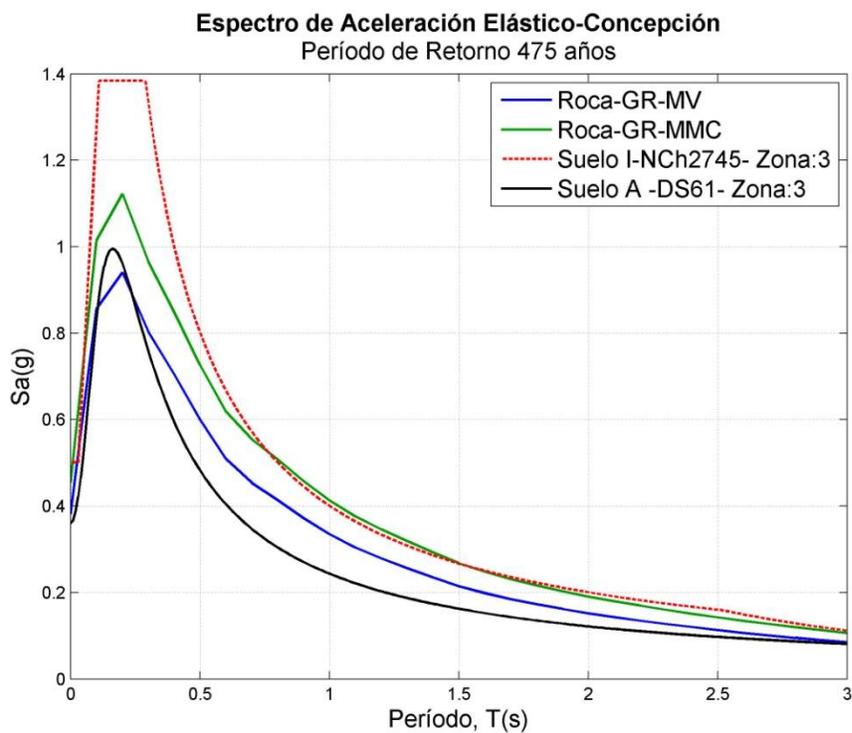


Figura 82: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Concepción generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

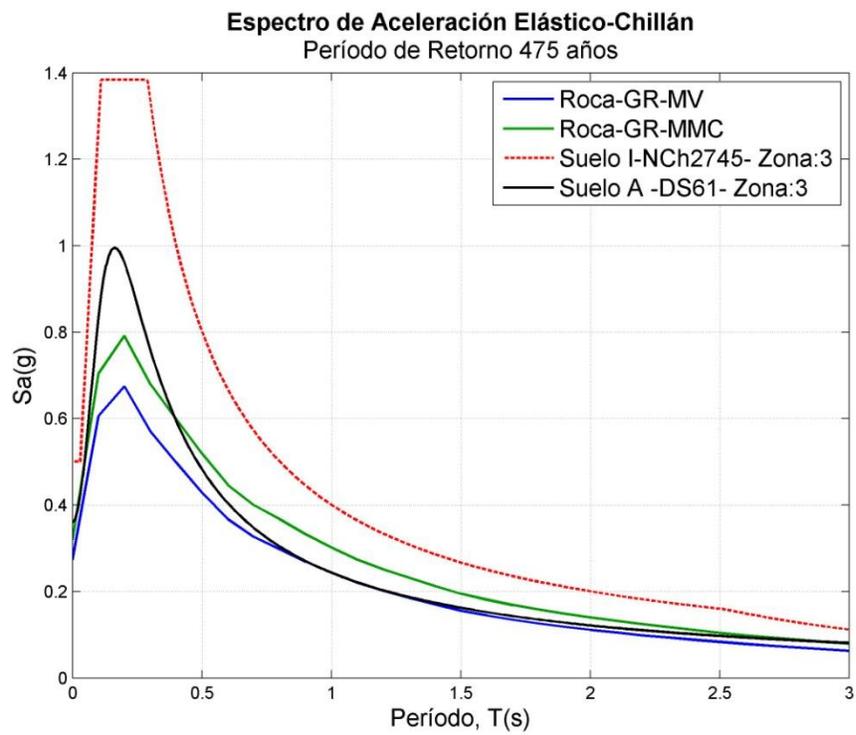


Figura 83: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Chillán generado en este trabajo para período de Retorno de 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Se han utilizado dos metodologías de cálculo de los parámetros de Gutenberg-Richter en cada zona estudiada para establecer una comparación en los resultados obtenidos por ambos métodos. Los parámetros resultantes son consistentes con los de otros estudios realizados (Martin, 1990; Neira, 2005). Los rangos de variación encontrados para los valores de b en las zonas sismogénicas son los siguientes:

En las Zonas Subducción-Interplaca

	b		
	Máxima Verosimilitud	Mínimos Cuadrados	Dif. %
Zona 1	0.979	0.826	18.523
Zona 2	0.854	0.836	2.153
Zona 3	0.787	0.797	1.271
Zona 4	0.851	0.792	7.449
Zona 5	0.97	0.971	0.103
Zona 6	1.006	0.938	7.249
Zona 7	0.937	0.771	21.530
Zona 8	0.779	0.732	6.421

Tabla 33: Rango de variación del parámetro b de Gutenberg-Richter para Zonas Subducción Interplaca

En las Zonas Subducción-Intraplaca de Profundidad Intermedia

	b		
	Máxima Verosimilitud	Mínimos Cuadrados	Dif. %
Zona 1	0.895	0.927	3.575
Zona 2	1.028	0.974	5.544
Zona 3	1.015	0.945	7.407
Zona 4	0.968	0.83	16.627
Zona 5	0.916	0.859	6.636
Zona 6	0.939	0.949	1.065
Zona 7	0.776	0.78	0.515

Tabla 34: Rango de variación del parámetro b de Gutenberg-Richter para Zonas Subducción Intraplaca

Se puede observar que para la gran mayoría de las zonas interplaca e intraplaca de profundidad intermedia el parámetro de b calculado por mínimos cuadrados es menor que el de máxima verosimilitud, esto significa que, para estas zonas la proporción que existe entre sismos grandes y sismos pequeños, es mayor para mínimos cuadrados que para máxima verosimilitud. Esto se traduce en un mayor número de sismos grandes por año para la estimación realizada a través de mínimos cuadrados.

En este trabajo se tuvieron que tomar muchas decisiones, por lo que se realizaron análisis de sensibilidad para ver de qué forma afectan en los resultados finales.

Una de las primeras decisiones que se tuvo que realizar fue la dirección del límite inferior de la Zona 1. En este caso se asumió que el límite tiene una dirección horizontal tal como se ve en el recuadro azul de la **Figura 84**.

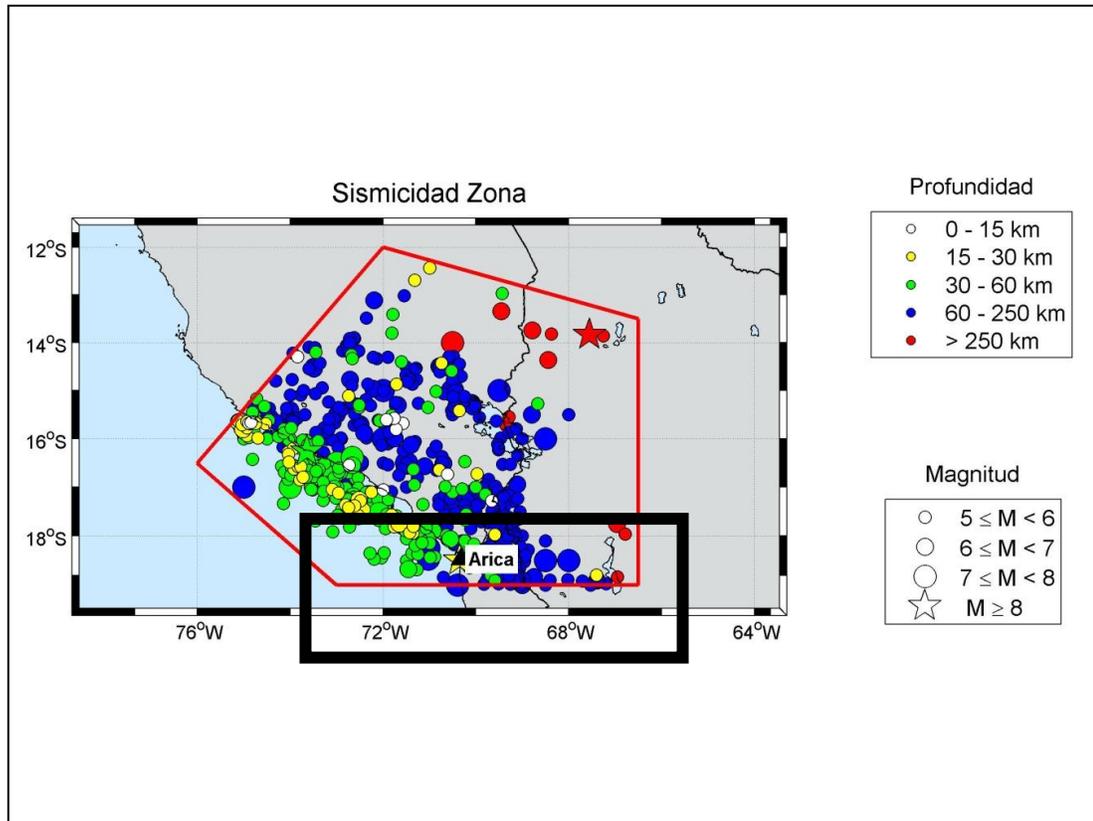


Figura 84: Límite Inferior horizontal de la Zona 1

Para ver de qué manera afecta esta decisión, se trazó una diagonal que parte desde el esquina inferior izquierda (-73°O ; -19°S) y a la esquina superior derecha (-66.5°O ; -13.5°S) del polígono, tal como se muestra en la **Figura 85**.

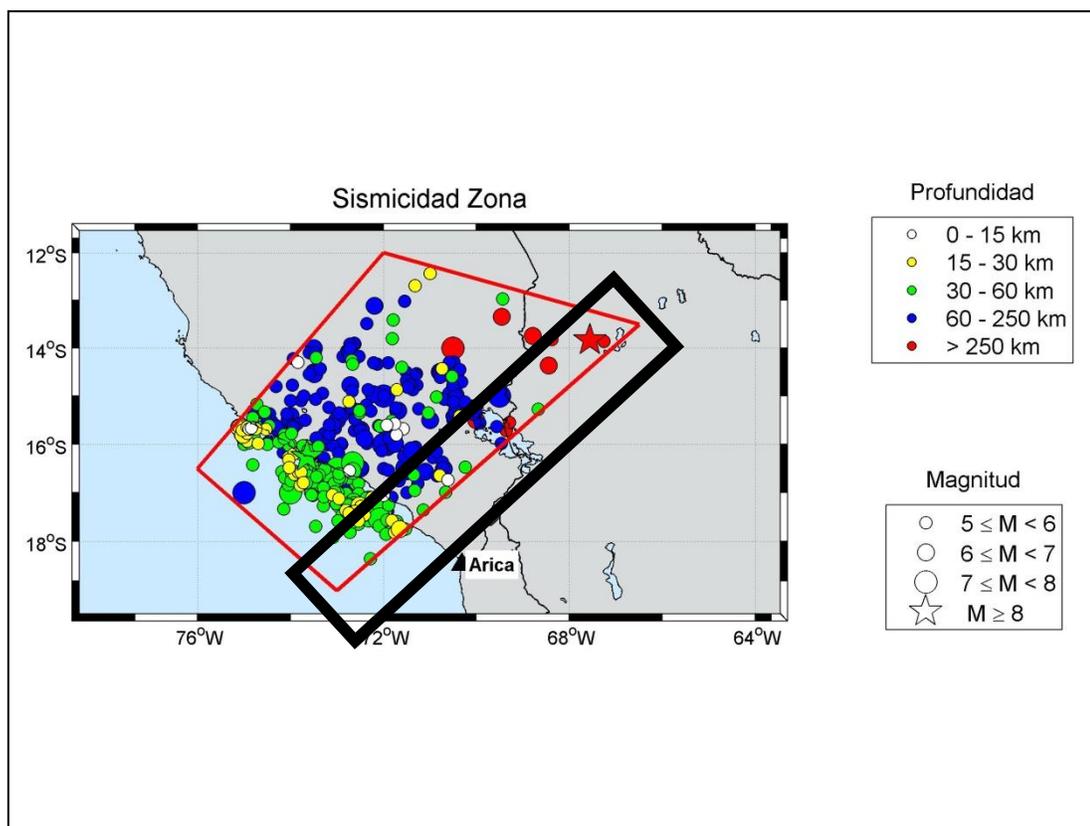


Figura 85: Límite Inferior diagonal Zona 1

Al realizar este análisis, y si llamamos al polígono original Polígono 1 y la variación diagonal Polígono 2, no se ven grandes diferencias en los parámetros de Gutenberg-Richter, como se ve en la **Tabla 35**. Por lo tanto se puede concluir que la decisión de tomar el límite horizontal es indiferente para los resultados obtenidos.

Fuente Sismogénica	Polígono 1		Polígono 2		Dif. % a	Dif% b
	a	b	a	b		
Zona Completa	5.753	0.946	5.802	0.993	0.852	4.968
Interplaca	5.601	0.979	5.245	0.963	6.787	1.661
Intraplaca-Profundidad Intermedia	5.249	0.895	5.136	0.916	2.2	2.346

Tabla 35: Diferencias entre límites de la Zona 1

Otra decisión que puede tener influencia en el cálculo del Peligro Sísmico es la determinación de la Magnitud Máxima (M_u). Para caracterizar esta influencia se realizó un análisis de sensibilidad en el cálculo del PGA, evaluando por separado el caso de las fuentes sismogénicas interplaca e intraplaca profundidad intermedia de la Zona 2 de este estudio, para una ciudad costera (Iquique) y un sitio hacia el interior de esta zona. Para el cálculo de las aceleraciones se utilizó la ley de atenuación de Youngs et al. (1997).

Los resultados para la fuente interplaca de este análisis se muestran en la **Tabla 36** y en la **Tabla 37**. Se puede observar que al no incluir incertidumbre en la distribución Gaussiana de la

Magnitud Máxima, es decir $M1=M2=E(M)=\mu$, se observan diferencias que disminuyen si se asume que tiene una distribución Gaussiana truncada con límite inferior $M1$, límite superior $M2$ y un valor esperado $E(M)$. Además al aumentar la desviación (σ) aumenta el valor del PGA, pero no se producen aumentos significativos. Se puede concluir que al asumir una distribución Gaussiana truncada se considera explícitamente la incertidumbre que tiene el valor de la Magnitud Máxima en el cálculo del Peligro Sísmico, y con esto se evita ser excesivamente conservador al usar por ejemplo los valores del límite máximo $M2$. Hay que notar en este análisis, que si bien se consideran para algunas fuentes magnitudes $M_w > 8.5$, las distintas leyes de atenuación se encuentran truncadas según la **Tabla 28**; por lo que este análisis considera exclusivamente el hecho de que puedan ocurrir una cantidad de sismos con magnitudes altas, y no el cambio de aceleraciones estimadas por las leyes de atenuación producto de una magnitud mayor.

PGA (g) Iquique				PGA (g) Sitio 2 (-20.22°, -69°)			
Periodo retorno (años)	Caso 1 Mu=8.7	Caso 2 Mu=9.0	Caso 3 Mu=10.0	Periodo retorno (años)	Caso 1 Mu=8.7	Caso 2 Mu=9.0	Caso 3 Mu=10.0
72	0.17	0.17	0.17	72	0.07	0.07	0.07
224	0.26	0.26	0.26	224	0.11	0.11	0.12
475	0.33	0.33	0.34	475	0.15	0.16	0.16
2475	0.50	0.51	0.53	2475	0.26	0.27	0.29
4975	0.58	0.60	0.62	4975	0.31	0.33	0.36

Tabla 36: Análisis de Sensibilidad de Magnitud Máxima; Caso $M1=M2=E(M)$

PGA (g) Iquique						
Periodo retorno (años)	Caso 1 M1=8.5, EM=8.7, M2=9.0			Caso 2 M1=8.5, EM=8.7, M2=10.0		
	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.5$	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.5$
72	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
224	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
475	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33
2475	0.50	0.50	0.51	0.50	0.50	0.52
4975	0.59	0.58	0.60	0.59	0.59	0.60
PGA (g) Sitio 2: (-20.22°, -69°)						
Periodo retorno (años)	Caso 1 M1=8.5, EM=8.7, M2=9.0			Caso 2 M1=8.5, EM=8.7, M2=10.0		
	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.5$	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.5$
72	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
224	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
475	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
2475	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.28
4975	0.32	0.31	0.33	0.32	0.32	0.34

Tabla 37: Análisis de Sensibilidad de Magnitud Máxima; Caso Distribución Gaussiana truncada

Una decisión importante en este estudio, fue el peso que se le asignó a cada una de las leyes de atenuación en el árbol lógico de decisiones. Para esto se consideró el año de publicación, el catálogo utilizado para los cálculos y el reconocimiento internacional de cada una de las leyes.

Una vez realizado el cálculo del Peligro Sísmico para cada ley por separado, se graficaron los espectros asociados a cada una de ellas y se realizó un análisis visual del comportamiento de estas con respecto al espectro resultante. En particular se muestran, en la **Figura 86** a la **Figura 90**, los espectros para 475 años de período de retorno para las ciudades de Iquique, Valparaíso, Santiago, Chillán y Concepción.

Al comparar los resultados de las curvas de atenuación locales (Contreras y Boroschek, 2009, 2012) con las globales (Youngs et al., 1997; Atkinson & Boore, 2003; Zhao, 2006; Abrahamson et al., 2012 (BCHydro)), se observa en general que para ciudades costeras (Valparaíso y Concepción) las curvas locales entregan valores más bajos que el promedio para periodos cortos, y valores muy bajos para periodos largos.

Para ciudades interiores (Santiago y Chillán) el efecto de los sismos intraplaca hace que los resultados de las curvas locales sean más altos o similares al promedio para periodos cortos, pero igualmente bajos para periodos largos. En el caso de la ciudad de Iquique que es costera, donde las curvas locales presentan valores altos para períodos cortos, se debe a que se encuentra ubicada en el límite de la zona interplaca y la zona intraplaca profundidad intermedia, por lo que la influencia de los sismos asociados a esta última fuente sismogénica hace que los valores locales estén por encima del espectro resultante.

Cabe mencionar que estas diferencias se deben probablemente a que la dispersión de las curvas globales es mayor que la dispersión de las curvas locales, las cuales fueron obtenidas con pocos registros de aceleraciones en roca, en comparación con las leyes globales. También es importante destacar que las leyes de Zhao et al. 2006, fueron ajustadas con sismos superficiales, que podrían presentar valores más altos de aceleraciones para distancias cortas.

Es importante destacar que las ponderaciones que se le asignan a las leyes de atenuación en el árbol lógico de decisiones tienen directa implicancia en el espectro resultante. En este estudio se decidió darle un poco menos de importancia relativa (20%) a las curvas locales (Contreras y Boroschek, 2009, 2012), con respecto a las curvas globales más recientes de Zhao et. al., 2006 (25%) y Abrahamson et al., 2012 (BCHydro) (30%) debido al fuerte efecto que tienen las curvas locales en los sitios donde predomina la fuente intraplaca de profundidad intermedia en el cálculo del Peligro Sísmico.

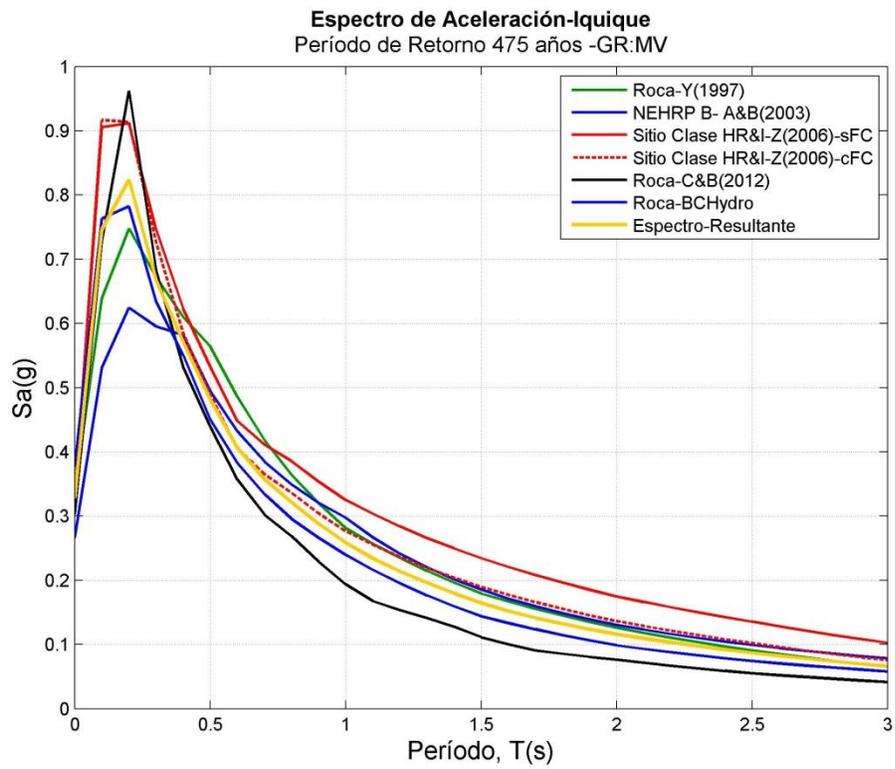


Figura 86: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Iquique

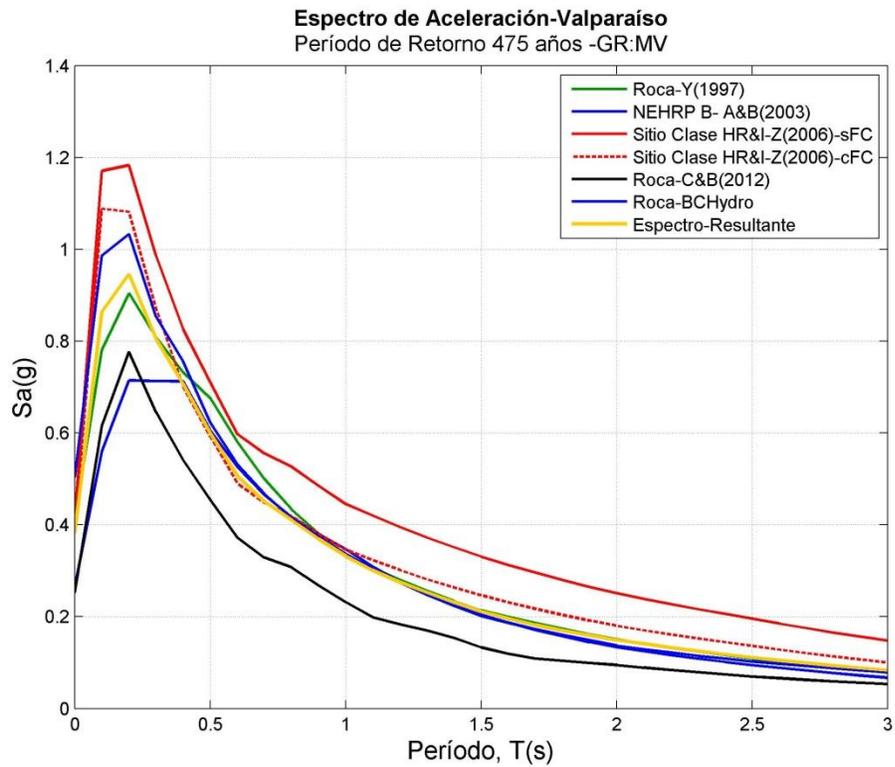


Figura 87: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Valparaíso

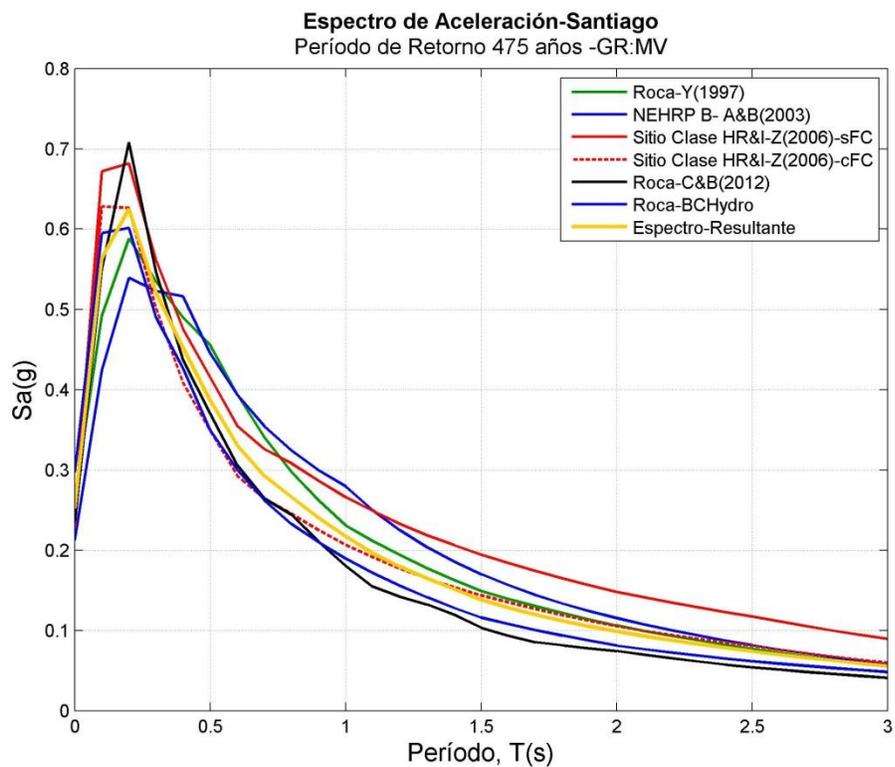


Figura 88: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Santiago

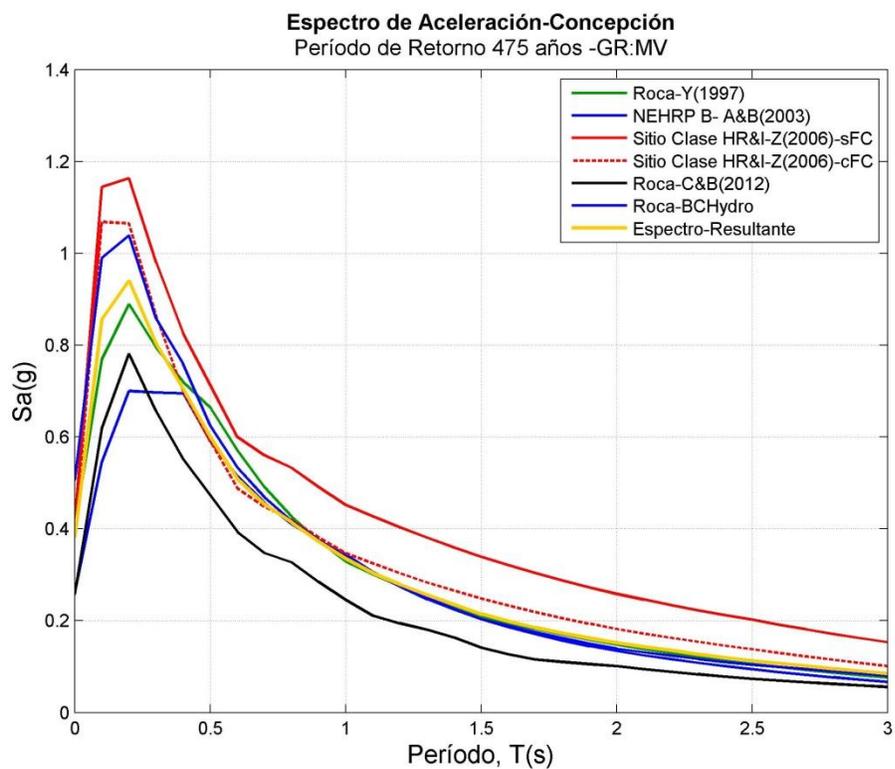


Figura 89: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Concepción

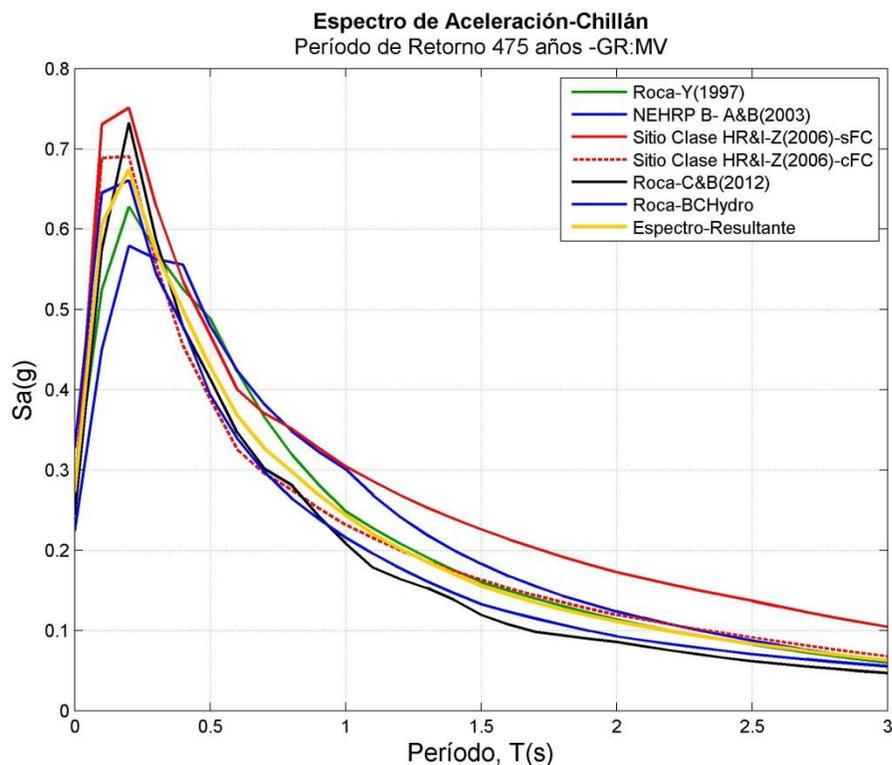


Figura 90: Comparación Espectro Resultante con Espectros distintas Leyes de Atenuación; Chillán

Una vez definidos los pesos que se asignan a cada una de las leyes de atenuación, se suman las ramas del árbol lógico para obtener los mapas como resultado final. Las conclusiones más destacables de los mapas obtenidos son:

1. Para todos los períodos de retorno las mayores PGA aparecen en la zona costera del país. La aceleración máxima del suelo tiene valores entre 0.3 y 0.4 [g] para 475 años de período de retorno, y entre 0.6 y 0.7 [g] para 2475 años.
2. Los mapas de SA(0.2s) muestran una forma bastante similar a los de PGA con valores máximos, al igual que para PGA, en la zona costera. Los valores máximos están entre 0.8 y 1 [g] para 475 años de período de retorno, y entre 1.6 y 1.8 [g] para 2475 años.
3. En los mapas de SA(1s) el mayor peligro se presenta en la Zona Costera (Zona Interplaca). Los valores máximos están entre 0.3 y 0.4 [g] para 475 años de período de retorno, y entre 0.5 y 0.6 [g] para 2475 años.
4. Las diferencias en los Mapas de Peligro Sísmico para mínimos cuadrados y para máxima verosimilitud, se manifiestan en zonas donde se presentan variaciones porcentuales mayores entre los valores de b. En la **Figura 91**, se muestra una comparación de los mapas de isoaceleraciones del Norte Grande para 475 años de período de retorno. A la izquierda se encuentra el mapa para mínimos cuadrados y a la derecha el de máxima verosimilitud. Esto se aprecia en la línea de isoaceleraciones de 0.4 [g], que se encuentra más hacia el interior del continente para mínimos cuadrados que para máxima verosimilitud. En esta zona la fuente

sismogénica intraplaca de la Zona 4 tiene mayor influencia en el Peligro Sísmico y la variación entre ambos valores de b para este caso es de un 16.63%. La influencia de tener un valor menor de b para mínimos cuadrados, hace que el número de sismos por año para magnitudes grandes sea mayor. Esto causa que aumenten las aceleraciones, es decir, el Peligro Sísmico de la zona, especialmente cerca de la costa.

- Una de las posibles causas de la singularidad que se observa en la **Figura 91**, es la variación en el ángulo de subducción que se produce en esta zona. La fuente intraplaca de profundidad intermedia que caracteriza a esta zona se aleja de la costa a partir la latitud 22°S , como se ve en la **Figura 36**, esto sumado al cambio de pendiente que se produce en la zona de subducción intraplaca profundidad intermedia puede producir esta singularidad en los resultados.

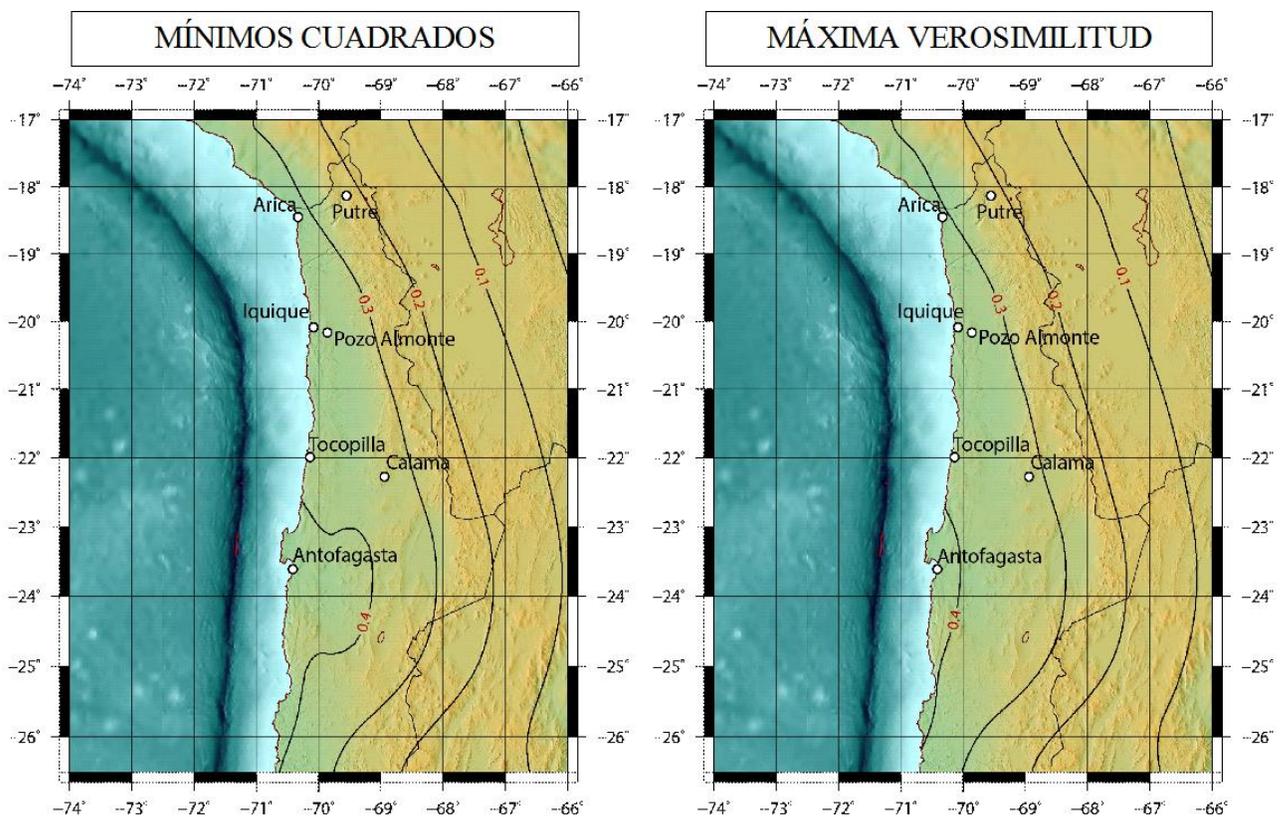


Figura 91: Comparación Mapa Isoaceleraciones en términos de PGA para PR=475 años

Además de los mapas, se han obtenido espectros de Peligro Sísmico para las capitales provinciales de la zona de estudio. Se tienen espectros de aceleración para 475 y 2475 años de período de retorno. Se han realizado gráficas comparativas entre ambos métodos de cálculo de recurrencia. En gran parte de estos espectros se puede ver que para mínimos cuadrados los espectros se encuentran por sobre los de máxima verosimilitud. Estas diferencias son aún más

notorias, al igual que en los mapas, en zonas donde se presentan variaciones porcentuales mayores entre los valores de b. Esto es claro en Concepción, que se encuentra dentro de la Zona 7 Interplaca, la cercanía de la fuente con los sitios hace que los sismos asociados a esta fuente tengan mayor influencia en cálculo del Peligro Sísmico para esta zona. En la **Tabla 38**, se puede observar que las diferencias son mayores para períodos largos, este comportamiento se debe a que la incertidumbre (desviación estándar) de las leyes de atenuación aumenta con el período. Comparando los valores presentados en la **Tabla 38** con la diferencia porcentual de los valores de b para esta zona (21.5%) se concluye que la influencia de ésta es una de las causas de que el espectro de mínimos cuadrados esté sobre el de máxima verosimilitud.

Concepción PR= 475 Años					
	PGA [g]	Peak Sa [g]	Sa (T=1s) [g]	Sa (T=2s) [g]	Sa (T=3s) [g]
Mínimos Cuadrados	0.381	0.941	0.335	0.152	0.085
Máxima Verosimilitud	0.454	1.122	0.413	0.191	0.107
Dif. %	19.094	19.333	23.314	25.559	25.833

Tabla 38: Diferencias% entre SA de Máxima Verosimilitud y Mínimos Cuadrado para Concepción; PR=475 años

Para tener un parámetro de comparación entre las aceleraciones para 475 años y 2475 años, se determinó la razón entre ambas aceleraciones para las capitales provinciales del país, para los distintos períodos estructurales. En la **Figura 92** se puede observar los datos con los que se determinó un valor medio para esta razón, considerando cada uno de los períodos estructurales. Se puede observar que los valores medios de este parámetro son 1.68 y 1.88, para 0 y 3 segundos respectivamente, este comportamiento creciente también tiene que ver con que la incertidumbre de las leyes de atenuación aumenta con el período.

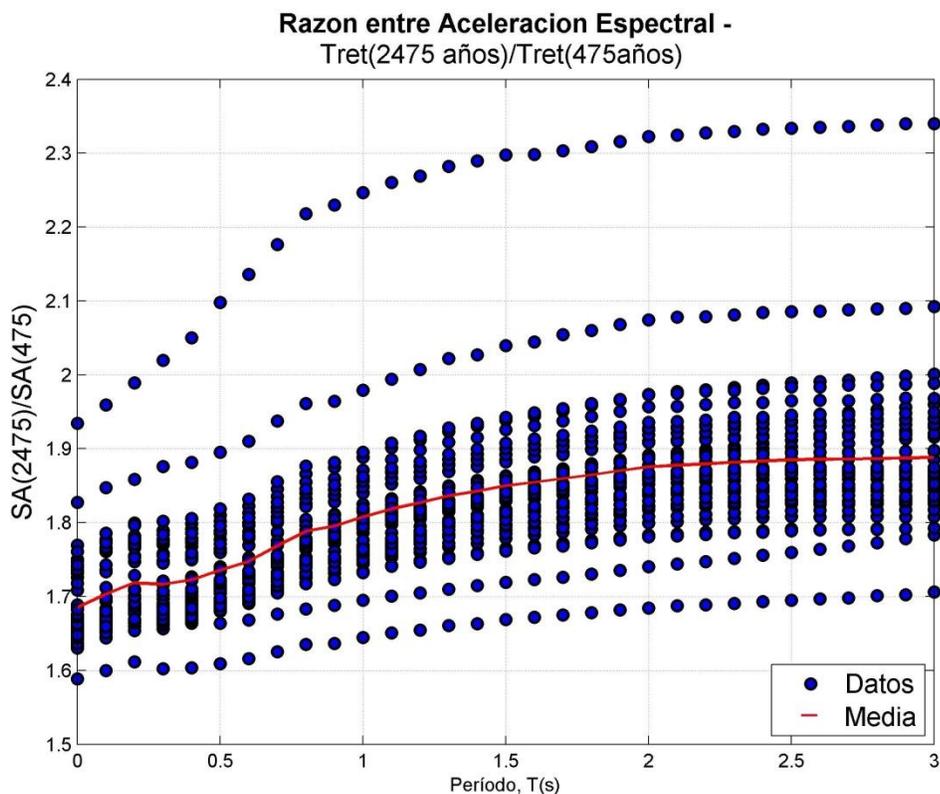


Figura 92: Relación entre Aceleraciones para 475 años y 2475 años de período de retorno

Además se realizó una comparación de los espectros de Peligro Sísmicos para 475 años de período de retorno, con los espectros del Decreto Supremo 61 y los de Norma Chilena de Aislación Sísmica. Para la gran mayoría de las ciudades costeras, consideradas Zona 3 según el decreto, el espectro del DS61 predice aceleraciones mayores para períodos estructurales entre 0.1 y 0.4s (aproximadamente) siendo superado por los espectros de este estudio para períodos mayores que 0.4 s. Para la gran mayoría de las ciudades ubicadas al interior, que son consideradas Zona 2 y 1 según el DS61, el espectro de este estudio es mayor en la totalidad de los períodos estructurales. El espectro de la norma de aislación supera a todos los demás, este comportamiento está dentro de lo esperado, ya que la construcción de este espectro se realizó con la envolvente de los registros sísmicos conocidos a la fecha de su desarrollo.

En la **Figura 93** se pueden observar los espectros para tres ciudades distintas ubicadas en las distintas zonas definidas en la Nch 433. Of. 1996, mod.2009. Se puede observar que para las ciudades de Santiago (Zona 2) y de Futaleufú (Zona1) se cumple lo que se describió en el párrafo anterior. En la ciudad de Valparaíso (Zona 3) el espectro de mínimos cuadrados supera el espectro predicho por el DS61, esto se debe a que la diferencia entre ambos métodos en la Zona 7 interplaca es de 21.53%. A pesar de esto se puede ver el comportamiento del espectro del decreto supremo describe de buena forma la respuesta de las estructuras. Siendo más conservador para períodos entre 0.1 y 0.4s (aproximadamente) y menos conservador para períodos mayores que 0.4s para las ciudades costeras (Zona 3) y menos conservador en la totalidad de los períodos estructurales para la gran mayoría de las ciudades ubicadas al interior (Zona 2 y 1).

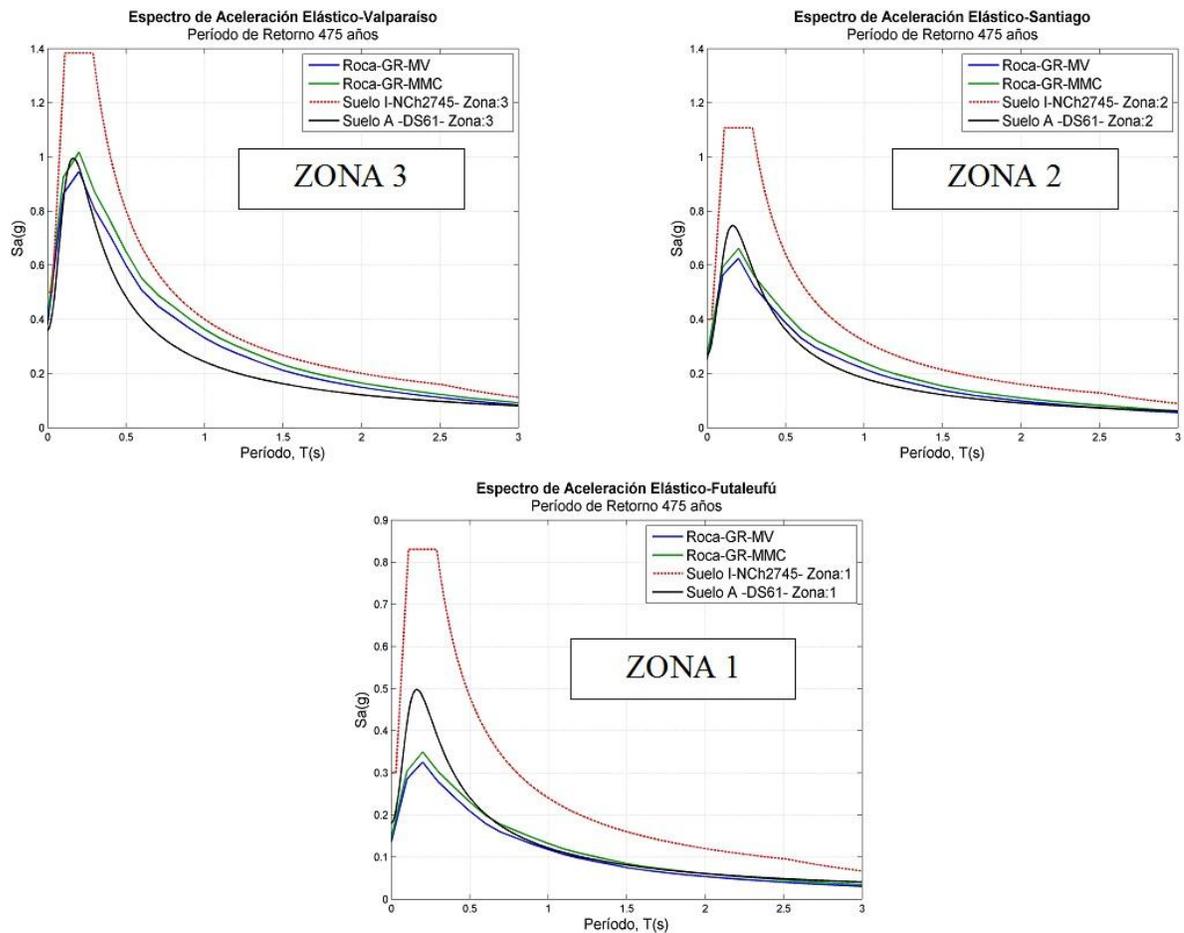


Figura 93: Espectros para las distintas Zonas de la Norma Nch 433. Of.1996, mod.2009

En base a los resultados obtenidos en este estudio y al análisis realizado anteriormente se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- Por primera vez en Chile, se ha desarrollado un Estudio de Peligro Sísmico utilizando leyes de atenuación en términos de aceleraciones espectrales. Esto caracteriza de mejor forma el comportamiento de los sismos chilenos y las cualidades de estos mismos.
- Los resultados obtenidos, debidamente utilizados y validados, son el insumo básico para elaboración de los diferentes mapas de Peligro Sísmico y permiten realizar una evaluación a la zonificación sísmica de la Norma Nch433. Of. 1996, mod. 2009.
- Se observa que los resultados obtenidos por Mínimos Cuadrados y por Máxima Verosimilitud presentan diferencias notorias en el valor de **b** en algunas zonas, y éstas se manifiestan en el mismo grado en los cálculos finales del Peligro Sísmico. Por esto es importante decidir que método se utilizará, debido a que cálculo es bastante sensible a esta variable.
- La metodología utilizada entrega como resultados espectros de Peligro Sísmico, los que una vez validados, pueden presentar grandes beneficios si se les integra de una manera adecuada a los procesos involucrados en el diseño estructural. Estos espectros tienen la

ventaja de que están asociados a un nivel de Peligro Sísmico único, es decir, son espectros de Peligro Sísmico uniforme.

- Es importante destacar la relevancia de las decisiones que se toman en el uso del árbol lógico, debido a que éstas tienen directa implicancia en los resultados finales. Es imprescindible utilizar criterios racionales para seleccionar leyes de atenuación, definir geometrías, entre otros aspectos, para establecer adecuadamente los escenarios posibles al considerar todas las variables en cuestión. Con estas decisiones se buscó no utilizar simplemente el peor los escenarios, y con esto ser excesivamente conservador, si no que se pretende establecer un nivel de Peligro Sísmico que considere varios escenarios posibles y de alguna forma lógica la probabilidad de que éstos ocurran.
- Los valores de aceleración encontrados en este estudio, que son a nivel de roca, sirven como datos de entrada para otro tipo de estudios, ya sean de microzonificación sísmica o estudios de que incluyan el efecto de sitio, en el caso donde las edificaciones requieran un análisis más detallado de la demanda sísmica.

Para poder continuar y perfeccionar los resultados de este estudio, se entregan las siguientes recomendaciones para estudios futuros:

- Buscar formas prácticas para que, una vez validados los resultados, integrar los espectros de Peligro Sísmico en el proceso del diseño estructural dado que estos contienen información consistente que permite una descripción del problema sísmico.
- Incluir en el estudio, las fuentes sismogénicas corticales, que permitirán detallar el Peligro Sísmico en zonas donde este tipo de fuente no es despreciable.
- Desarrollar el estudio de Peligro Sísmico considerando como base otro tipo de suelo en vez de roca. Por ejemplo, considerando las clasificación sísmica de suelos establecida en la normativa nacional.
- Incluir la información, ya sea de microzonificación o la de amplificación por los efectos de sitio, de manera de mejorar los resultados obtenidos en este estudio.
- Es poco aún lo que a nivel local se sabe acerca de la atenuación de la energía sísmica, por lo que se deben llevar a cabo nuevos estudios detallados acerca de dichas relaciones y así poder incorporarlas en futuras investigaciones.
- Deben realizarse esfuerzos integrados entre profesionales de diferentes disciplinas de las ciencias de la tierra y la ingeniería para mejorar en gran manera la información disponible, necesaria para perfeccionar los estudios hasta ahora realizados.

REFERENCIAS.

1. ABRAHAMSON, N.; GREGOR, N.; KOFI, A.; 2012. BCHydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes
2. ALGERMISSEN, S.T.; PERKINS, D.M. 1976. Aprobabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 76-416.
3. ÁLVAREZ, M.; FISCHER, T.; DE LA LLERA, J.C.; RIDELL, R. 2002. Un modelo integrado para el análisis del riesgo sísmico en edificios. *In Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica.*
4. ASTROZA, M.; MOYA, A.; SANHUEZA, S. 2002. Estudio comparativo de los efectos de los terremotos de Chillan de 1939 y de Talca de 1928. *In Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica.*
5. ASTROZA, M.; SANDOVAL, M.; KAUSEL, E. 2005. Estudio comparativo de los efectos de los sismos chilenos de subducción del tipo intraplaca de profundidad intermedia. *In Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica.*
6. ATKINSON, G.M.; & BOORE, D.M. 2003. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, 1703-1729.
7. BARRIENTOS, S. 1980. Regionalización sísmica de Chile. Tesis de Magíster en Ciencias (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geofísica.
8. BOROSCHEK, R.; & CONTRERAS, V. 2012. Strong ground motion from the 2010 Mw 8.8 Maule Chile earthquake and attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan.*
9. CAMACHO, E., BENITO, B. 2008. Evaluación de la Amenaza Sísmica en Panamá. Proyecto regional RESIS II.
10. CAMPOS, J., RUIZ, S., PÉREZ, A., RUIZ, J., KAUSEL, E., THIELE, R., SARAGONI, R. Y SEPÚLVEDA, S. 2005. Terremotos Corticales de las Melosas 1958, Chusmiza 2001 y Curicó 2004: Un Análisis comparativo de los Terremoto de Northridge 1994 y Kobe 1995. Nuevos Antecedente para el Peligo Sísmico en Chile. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción-Chile.
11. CERESIS. 1985. Volumen 5. “Catálogo de Terremotos para América del Sur”. Proyecto SISRA, Sismicidad para la Región Andina.
12. CIFUENTES, I.L., 1989. The 1960 Chilean earthquake. *J. Geophys. Res.* 94, 665–680.
13. CONTRERAS-REYES, E.; GREVEMEYER, I.; FLUEH, E.R.; SCHERWATH, M.; HESEMANN, M. 2007. Alteration of the subducting oceanic lithosphere at the southern central Chile trench outer rise. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* 8.
14. CONTRERAS, V. 2009. Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
15. CONTRERAS, V.; & BOROSCHEK, R. 2012. Strong Ground Motion Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquakes, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24 to 28 September 2012, Lisboa, Portugal, oral presentation and publication.
16. CORNELL, C.A. 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58.
17. DEMETS, C., R G. GORDON, D.F. ARGUS, AND STEIN. 1990. Current Plate Motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
18. DORBATH, L.; CISTERNAS, A.; DORBATH, C. 1990. Assessment if the size of large and great historical earthquake in Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
19. ESTEVA, L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. Institute of Engineering Series-246, UNAM, Mexico
20. GAJARDO, E.; LOMNITZ, C. 1960. Seismic provinces of Chile. *In Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering* 3.

21. GREVE, F. 1948. Determinación del coeficiente de seguridad antisísmico para diferentes zonas de Chile. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* 5, Universidad de Chile.
22. KANAMORI, H. 1977. The energy release in great earthquakes. *Journal Geophysical Research* 84, 2981-2987.
23. KANAMORI, H.; & MCNALLY, K.C. 1982. Variable rupture mode on the subduction zone along the Ecuador, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 1241-1253.
24. KELLEHER J. 1972. Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *Journal Geophysical Research* 77, 2087-2013.
25. KENDRICK, E., M. BEVIS, R. SMALLEY JR., B. BROOKS, R. B. VARGAS, E. LAURÍA, AND L. P. S. FORTES. 2003. The Nazca- South America Euler Vector and its Rate of Change. *Journal of South American Earth Sciences* 16, pp. 125-131
26. LABBE, J.C; SARAGONI, GR. 1976. Sismicidad de Chile. Publicación SES I 7/76, Sección Estructuras, Depto. Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
27. LEYTON, R; RUIZ, J.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E. 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 75.
28. LEYTON, R; RUIZ, J.; SEPULVEDA, S.A. 2010. Reevaluación del Peligro Sísmico probabilístico en Chile Central.
29. LOMNITZ, C. 1969. An earthquake risk map of Chile. *In Proceedings of the fourth World Conference on Earthquake Engineering.*
30. MARTIN, A. 1990. Hacia una nueva regionalización y cálculo del Peligro Sísmico en Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
31. MC GUIRE, R. 2004. Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute
32. MOSCOSO, E.; CONTRERAS-REYES, E. 2012. Outer rise seismicity related to the Maule, Chile 2010 megathrust earthquake and hydration of incoming oceanic lithosphere.
33. NEIRA, F. 2005. Estimación del Peligro Sísmico Asociados a Sismos Intraplaca en Chile: Primera Aproximación. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
34. NEWMARK & HALL. 1973. Procedures and Criteria for Earthquakes Resistant design, *Built. Res. Series.* 46, Nat. Bureaus of Standard, U.S. Dept. of Commerce, Washington D.C., 209-236.
35. NEWMARK, N. M. & HALL, W. J., 1982. Earthquake Spectra and Design. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
36. NISHENKO, S.P. 1985. Seismic potential for large and great interpolate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal. *Journal Geophysical Research* 90, 3589-3615.
37. ORDAZ, M.2004. Some Integrals Useful in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 4, pp. 1510–1516.
38. POBLETE, J. 2008. Determinación Experimental de la Intensidad de Mercalli Modificada para Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Civil.
39. RUIZ, S.; SARAGONI, G.R. 2004. Características de los acelerogramas y terremotos Sudamericanos. *In Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, No. 31
40. SARAGONI, GR.; ASTROZA, M.; RUIZ, S. 2004. Comparative study of subduction earthquake ground motion of north, central and south America. *In Proceedings of the thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Paper 104.
41. SILVA, N. 2008. Caracterización y Determinación del Peligro Sísmico en la Región Metropolitana. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Civil.
42. SUÁREZ, G.; COMTE, D. 1993. Comment on 'Seismic coupling along the Chilean subduction zone' by B.W. Tichelaar and L.R. Ruff. *Journal of Geophysical Research* 98: 15825-15828
43. SUSA, D. 2004. Estimación del Peligro Sísmico Asociado a sismos del tipo interplaca en Chile y Sur del Perú utilizando distribución bi-paramétrica de Weibull. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Civil.

44. TASSARA, A.; GÖTZE, H.J.; SCHMIDT, S.; HACKNEY, R. 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111.
45. TILMANN, F.J.; GREVEMEYER, I.; FLUEH, E.R.; DAHM, T.; GOSSLER, J. 2008. Seismicity in the outer rise offshore southern Chile: indication of fluid effects in crust and mantle. *Earth Planetary Science Letters* 269 (1-2): 41-55.
46. USGS. 2010. "M 8.8 Maule, Chile, Earthquake of 27 February 2010".
47. VIGNY, C., RUDLOFF, A., RUEGG, J.-C., MADARIAGA, R., CAMPOS, J., ALVAREZ, M. 2009. Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *PEPI* 175, pp. 86-95
48. VILLABLANCA, R.; RIDDELL, R. 1985. Evaluación del riesgo sísmico en Chile. Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile.
49. WEICHERT, D.H. 1980. Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 1337-1346.
50. WELKNER, P. 1964. Estudio de la sismicidad en Chile y su aplicación al cálculo antisísmico. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
51. YOUNG, R.R.; CHIOU, S.J.; HUMPHREY, J.R. 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes, *Seism. Res. Lett.* 68, 58-73.
52. ZHAO, J.; ZHANG, X.; ASANO, A.; OHNO, Y.; OUCHI, T.; TAKAHASHI, T.; OGAWA, H.; IRIKURA, K.; THIO, H.K.; SOMMERVILLE, P.G.; 2006. Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 898-913.

ANEXO A: TEORÍA DE LAS PROBABILIDADES UTILIZADAS.

A.1 Estimación de Parámetros asociados a Gutenberg-Richter.

Uno de los principales problemas en la estadística es la correcta estimación de los parámetros en los cuales se basa una distribución y que sirven para lograr hacer una inferencia estadística. En este trabajo se utilizarán dos métodos para estimar los parámetros de la curva de Gutenberg-Richter: Máxima Verosimilitud y Mínimos Cuadrados.

A.1.1 Máxima Verosimilitud.

Esta nos dice lo siguiente.

Supóngase que se tiene una muestra m_1, m_2, \dots, m_z de z sismos independientes extraídas de una función de distribución desconocida con función de densidad (o función de probabilidad) $f_0(\cdot)$. Se sabe, sin embargo, que f_0 pertenece a una familia de distribuciones $\{f(\cdot|\theta), \theta \in \Theta\}$, llamada modelo paramétrico, de manera que f_0 corresponde a $\theta = \theta_0$, que es el verdadero valor del parámetro. Se desea encontrar el valor $\hat{\theta}$ (o estimador) que esté lo más próximo posible al verdadero valor θ_0 .

Asumiendo independencia.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta) = f(x_1|\theta) \cdot f(x_2|\theta) \cdots f(x_n|\theta) \quad (31)$$

Por lo tanto.

$$L(\beta) = f_M(m_1|\beta) \cdot f_M(m_2|\beta) \cdots f_M(m_z|\beta) \quad (32)$$

Asumiendo solo límite inferior es decir $m_1, m_2, \dots, m_z \geq m_{min}$

Bajo el supuesto de que los sismos sucesivos y sus magnitudes son independientes y dando como conocida la función de densidad. Queda de la siguiente manera.

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^z f_M(m_i|\beta) \quad (33)$$

A.1.1.1 Estimación para datos - No Agrupados .

Reemplazando $f_M(m_i|\beta)$

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^z \beta e^{-\beta(m_i - m_{min})} \quad (34)$$

O de otra forma.

$$L(\beta) = \beta^z \exp \left[-\beta \sum_{i=1}^z (m_i - m_{min}) \right] \quad (35)$$

Para encontrar el máximo valor de β derivamos la máxima verosimilitud y la igualamos a 0.

Es decir.

$$\frac{dL(\beta)}{d\beta} = 0 \quad (36)$$

Haciendo regla de la cadena.

$$\beta^{z-1} \exp \left[-\beta \sum_{i=1}^z (m_i - m_{min}) \right] + \beta^z \exp \left[-\beta \sum_{i=1}^z (m_i - m_{min}) \right] \left(-\sum_{i=1}^z (m_i - m_{min}) \right) = 0 \quad (37)$$

$$z\beta^{-1} - \left(\sum_{i=1}^z (m_i - m_{min}) \right) = 0 \quad (38)$$

$$z\beta^{-1} - \left(\sum_{i=1}^z (m_i) \right) + zm_{min} = 0 \quad (39)$$

$$z\beta^{-1} = \left(\sum_{i=1}^z (m_i) \right) - zm_{min} = 0 \quad (40)$$

$$\beta^{-1} = \frac{(\sum_{i=1}^z (m_i))}{z} - m_{min} ; \text{Donde } \frac{(\sum_{i=1}^z (m_i))}{z} = \bar{m} \quad (41)$$

$$\beta = (\bar{m} - m_{min})^{-1} \quad (42)$$

Por lo que b queda:

$$b = \frac{\log(e)}{(\bar{m} - m_{min})} \quad (43)$$

A.1.1.2 Estimación para datos - Agrupados.

Una complicación que se presenta en la práctica es que los períodos de completitud se consideran diferentes para los distintos intervalos de magnitud. Esto se debe a que para los sismos históricos de gran magnitud, se tiene información desde centenas de años atrás, debido a que afectaron áreas muy grandes, por lo que fueron registrados como un fenómeno extraordinario incluso durante este período de tiempo. En cambio para terremotos pequeños la información se considera completa desde unas cuantas décadas de años atrás, debido que podrían haber afectado una baja una baja densidad de población y podrían no haber sido registrado en reportes locales, o pueden haber sido perdidos o pasado por altos en una búsqueda histórica de datos.

Para esto Weichert (1980) propuso la siguiente solución. Se parte del supuesto que la información se encuentra agrupada en intervalos discretos de magnitud, con el i -ésimo intervalo representado por su magnitud central m_i , con un intervalo de magnitud Δ , conteniendo n_i sismos en un período de completitud t_i en años.

Se sabe que la probabilidad de que un terremoto tenga su magnitud entre m y $m+dm$ queda definida por la Ecuación (10).

Por lo que la función de probabilidades conjuntas queda definida por una distribución Multinomial.

$$P[n_i, m_i, t_i | \beta] = L(\beta | n_i, m_i, t_i) = \frac{N!}{\prod_i n_i!} \prod_i p_i^{n_i} \quad (44)$$

Donde p_i corresponde a la probabilidad que, dado todos intervalos de magnitud y sus períodos de completitud, un terremoto seleccionado al azar caiga en el i -ésimo intervalo de magnitud y ventana temporal. Y además N es el número total de sismos, es decir $N = \sum_i n_i$.

Lo que nos dice esta distribución es que teniendo k intervalos de magnitud distintos, se extrae un sismo de toda la muestra de sismos y se quiere ver en que intervalo queda definido. La forma viene dada en dos partes, la parte de probabilidades y la del coeficiente que lo acompaña.

Primero la parte de probabilidades es darse cuenta que la probabilidad de obtener n_1 sismos en el primer intervalo definido por la magnitud m_1 es $p_1 \cdot p_1 \cdot p_1 \dots \cdot p_1$, n_1 veces, es decir $p_1^{n_1}$. Así para los distintos intervalos la probabilidad de tener n_1 sismos en el intervalo definido por m_1 y n_2 sismos en el intervalo definido por $m_2 \dots$ y n_k sismos en el intervalo definido por m_k , y si no importa el orden en que salen, queda definido por $p_1^{n_1} \cdot p_2^{n_2} \cdot \dots \cdot p_k^{n_k}$.

La segunda parte queda definida por la cantidad de configuraciones anteriores posibles.

Se define:

$\alpha_1 = \{\text{n}^\circ \text{ de formas de elegir } n_1 \text{ ev. en el intervalo de } m_1 \text{ entre los } N \text{ eventos dispobibles}\}$

$$= \binom{N}{n_1} = \frac{N!}{(N - n_1)! n_1!}$$

$\alpha_2 = \{\text{n}^\circ \text{ de formas de elegir } n_2 \text{ ev. en el intervalo de } m_2 \text{ entre los } N - n_1 \text{ eventos dispobibles}\}$

$$= \binom{N - n_1}{n_2} = \frac{(N - n_1)!}{(N - n_1 - n_2)! n_2!}$$

$\alpha_k = \{\text{n}^\circ \text{ de formas de elegir } n_k \text{ ev. en el intervalo de } m_k \text{ entre los } N - n_1 - \dots - n_{k-1} = n_k \text{ eventos dispobibles}\}$

$$= \binom{N - n_1 - \dots - n_{k-1} = n_k}{n_k} = \frac{(N - n_1 - \dots - n_{k-1})!}{(N - n_1 - \dots - n_{k-1} - n_k)! n_k!} = 1$$

Es fácil darse cuenta que $\alpha_{(n_1, \dots, n_k)} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_k$ que trabajándola un poco se llega a la expresión que acompaña a la función de Máxima Verosimilitud.

Como logaritmo es una función monótona creciente, el máximo de $L(\beta)$ es el mismo que $\ln(L(\beta))$.

$$\ln(L(\beta)) = \ln\left(\frac{N!}{\prod_i n_i!}\right) + \ln\left(\prod_i p_i^{n_i}\right) \quad (45)$$

$$\ln(L(\beta)) = \ln\left(\frac{N!}{\prod_i n_i!}\right) + \sum_i \ln(p_i) n_i \quad (46)$$

$$\frac{\partial \ln(L(\beta))}{\partial \beta} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial \ln(L(\beta))}{\partial \beta} = 0 + \sum_i \frac{n_i}{p_i} \frac{\partial p_i}{\partial \beta} = 0 \quad (48)$$

Se sabe que la probabilidad de que un sismo caiga en un intervalo definido por m_i queda determinado por:

$$q_i = \frac{e^{-\beta m_i}}{\sum_j e^{-\beta m_j}} \quad (49)$$

Considerando los intervalos de completitud, p_i queda.

$$p_i = \frac{t_i e^{-\beta m_i}}{\sum_j t_j e^{-\beta m_j}} \quad (50)$$

Siguiendo la derivación.

$$\frac{\partial \ln(L(\beta))}{\partial \beta} = \sum_i \frac{n_i \sum_j t_j e^{-\beta m_j}}{t_i e^{-\beta m_i}} \left(\frac{-t_i m_i e^{-\beta m_i} \sum_j t_j e^{-\beta m_j} - t_i e^{-\beta m_i} \sum_j -t_j m_j e^{-\beta m_j}}{(\sum_j t_j e^{-\beta m_j})^2} \right) = 0 \quad (51)$$

$$\sum_i \frac{n_i}{t_i e^{-\beta m_i}} (-t_i m_i e^{-\beta m_i} \sum_j t_j e^{-\beta m_j} - t_i e^{-\beta m_i} \sum_j -t_j m_j e^{-\beta m_j}) = 0 \quad (52)$$

$$\sum_i (-n_i m_i \sum_j t_j e^{-\beta m_j} + n_i \sum_j t_j m_j e^{-\beta m_j}) = 0 \quad (53)$$

$$\sum_i \left(n_i m_i \sum_j t_j e^{-\beta m_j} \right) = \sum_i \left(n_i \sum_j t_j m_j e^{-\beta m_j} \right) \quad (54)$$

$$\sum_j t_j e^{-\beta m_j} \sum_i (n_i m_i) = \sum_j t_j m_j e^{-\beta m_j} \sum_i (n_i) \quad (55)$$

$$\frac{\sum_j t_j m_j e^{-\beta m_j}}{\sum_j t_j e^{-\beta m_j}} = \frac{\sum_i n_i m_i}{\sum_i (n_i)} = \frac{\sum_i n_i m_i}{N} = \bar{m} \quad (56)$$

Finalmente se llega a la siguiente ecuación.

$$\frac{\sum_j t_j m_j e^{-\beta m_j}}{\sum_j t_j e^{-\beta m_j}} = \bar{m} \quad (57)$$

Donde \bar{m} es la magnitud promedio de la información representada en intervalos de magnitud. Esta ecuación es fácilmente resuelta recursivamente a través de Matlab.

La función de máxima verosimilitud para $v_{m_{min}}$ puede ser determinada de manera similar a la de β .

$$L(v_{m_{min}}) = P[n_1 \text{ eventos de } m_1 \text{ durante } t_{1, \dots} | v_{m_{min}}] \quad (58)$$

La solución se ilustra bajo la suposición que los sismos que ocurren en el intervalo m_i como un proceso de Poisson con la siguiente tasa.

$$v_i = v_{m_{min}} q_i = v_{m_{min}} \frac{e^{-\beta m_i}}{\sum_j e^{-\beta m_j}} \quad (59)$$

Por lo que la función de máxima verosimilitud queda definida.

$$L(v_{m_{min}}) = \prod_i \frac{(v_i t_i)^{n_i} e^{-v_i t_i}}{n_i!} \quad (60)$$

Donde $v_i t_i$ es un parámetro positivo que representa el número de veces que se espera que ocurra el sismo durante el intervalo t_i , y n_i es el número de ocurrencia del sismo.

Resolviendo la ecuación de la misma manera que para β , se llega al siguiente resultado

$$v_{m_{min}} = N \frac{\sum_i e^{-\beta m_i}}{\sum_i t_i e^{-\beta m_i}} \quad (61)$$

A.1.1.3 Error Asociado al Cálculo de β .

Para determinar el error de asociado al cálculo de β se basó en el procedimiento de Aki (1965) este dice lo siguiente:

Se conoce la función de densidad:

$$f_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_{min})} \quad (62)$$

Se supone que se tienen z sismos con magnitud m_1, m_2, \dots, m_z . Luego se define:

$$y_i = \frac{\partial \ln(f_M(m_i|\beta))}{\partial \beta} \quad (63)$$

El logaritmo es una función monótona creciente, así que, el máximo del $\ln(f_M(m_i|\beta))$ y $\ln(l(\beta))$ se alcanzan en el mismo punto.

Además se define:

$$Y = \sum_{i=1}^z y_i \quad (64)$$

Del teorema del límite central, la función de distribución de Y será Normal o Gaussiana si z es suficientemente grande y si y_i tiene varianza y media finitos. La media de y_i es cero porque:

$$y_i = \frac{\partial \ln(f_M(m_i|\beta))}{\partial \beta} = \frac{\exp[-\beta(m_i - m_{min})] + \beta \exp[-\beta(m_i - m_{min})](-m_i - m_{min})}{\beta \exp[-\beta(m_i - m_{min})]} \quad (65)$$

$$y_i = \frac{\exp[-\beta(m_i - m_{min})] \langle \beta - (m_i - m_{min}) \rangle}{\beta \exp[-\beta(m_i - m_{min})]} \quad (66)$$

$$y = \frac{1}{\beta} - (m - m_{min}) \quad (67)$$

$$E(y) = \int_{m_{min}}^{\infty} y \cdot f_M(m|\beta) = \int_{m_{min}}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta} - (m - m_{min}) \right] \cdot \beta e^{-\beta(m - m_{min})} dm \quad (68)$$

$$E(y) = \beta \int_{m_{min}}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta} - (m - m_{min}) \right] \cdot e^{-\beta(m - m_{min})} dm \quad (69)$$

$$E(y) = \beta \left\{ \int_{m_{min}}^{\infty} \frac{e^{-\beta(m - m_{min})}}{\beta} dm - \int_{m_{min}}^{\infty} (m - m_{min}) \cdot e^{-\beta(m - m_{min})} dm \right\} \quad (70)$$

$$E(y) = \beta \left\{ \left\langle \frac{-1}{\beta^2} (e^{-\beta(m - m_{min})}) \Big|_{m_{min}}^{\infty} \right\rangle - \left\langle \frac{(m - m_{min})}{\beta} (e^{-\beta(m - m_{min})}) \Big|_{m_{min}}^{\infty} \right\rangle - \int_{m_{min}}^{\infty} \frac{-e^{-\beta(m - m_{min})}}{\beta} dm \right\} \quad (71)$$

$$E(y) = \beta \left\{ \left\langle \frac{-1}{\beta^2} (0 - 1) \right\rangle - \left\langle 0 + \frac{-1}{\beta^2} (e^{-\beta(m - m_{min})}) \Big|_{m_{min}}^{\infty} \right\rangle \right\} \quad (72)$$

$$E(y) = \beta \left\{ \left\langle \frac{-1}{\beta^2} (0 - 1) \right\rangle - \left\langle 0 + \frac{-1}{\beta^2} (0 - 1) \right\rangle \right\} \quad (73)$$

$$E(y) = \beta \left\{ \frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \quad (74)$$

$$E(y) = 0 \quad (75)$$

La varianza se puede obtener de:

$$E(y^2) = \int_{m_{min}}^{\infty} y^2 \cdot f_M(m|\beta) = \int_{m_{min}}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta} - (m - m_{min}) \right]^2 \beta e^{-\beta(m-m_{min})} dm \quad (76)$$

Resolviendo de forma parecida a la integral anterior se llega a:

$$E(y^2) = \frac{1}{\beta^2} \quad (77)$$

Por lo tanto, la media de Y será cero y su varianza será $\frac{z}{\beta^2}$.

Como se dijo Y sigue una distribución Gaussiana es decir:

$$Y \sim N(\mu, \sigma^2)$$

Con $\mu=0$ y $\sigma^2 = \frac{z}{\beta^2}$

Estandarizando:

$$X = \frac{Y - \mu}{\sigma} \rightarrow X = \frac{\beta}{\sqrt{z}} Y$$

$$X \sim N(0,1)$$

Se deduce que la probabilidad ε que X caiga en el intervalo entre $-d_\varepsilon$ y $+d_\varepsilon$, queda dado por $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-d_\varepsilon}^{+d_\varepsilon} e^{-x^2/2} dx$. Para un valor de 95% de confianza los intervalos quedan definidos por:

$$-1.96 < X = \frac{\beta}{\sqrt{z}} Y < 1.96$$

O de otra forma:

$$-1.96 \leq \frac{\beta}{\sqrt{z}} \sum_{i=1}^z \frac{1}{\beta} + (m_{min} - m_i) \leq 1.96$$

Y reescrito en términos de β :

$$-1.96\sqrt{z} \leq \beta \left(\frac{z}{\beta} + z \cdot m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i \right) \leq 1.96\sqrt{z}$$

$$-1.96\sqrt{z} \leq z + \beta \left(z \cdot m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i \right) \leq 1.96\sqrt{z}$$

$$\begin{aligned}
-1.96\sqrt{z} - z &\leq \beta(z \cdot m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i) \leq 1.96\sqrt{z} - z \\
\frac{-1.96\sqrt{z} - z}{(z \cdot m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i)} &\leq \beta \leq \frac{1.96\sqrt{z} - z}{(z \cdot m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i)} \\
\frac{-1.96/\sqrt{z} - 1}{(m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i / z)} &\leq \beta \leq \frac{1.96/\sqrt{z} - 1}{(m_{min} - \sum_{i=1}^z m_i / z)} \\
\frac{1 - 1.96/\sqrt{z}}{(\bar{m} - m_{min})} &\leq \beta \leq \frac{1 + 1.96/\sqrt{z}}{(\bar{m} - m_{min})} \\
\frac{(1/\ln(10) - 1.96/(\ln(10)\sqrt{z}))}{(\bar{m} - m_{min})} &\leq b \leq \frac{(1/\ln(10) + 1.96/(\ln(10)\sqrt{z}))}{(\bar{m} - m_{min})}
\end{aligned}$$

El valor central de β y de b es $\frac{1}{(\bar{m} - m_{min})}$ y $\frac{1}{\ln(10)(\bar{m} - m_{min})}$ respectivamente, en el rango anterior es la solución a $Y=0$.

A.2 CÁLCULO DE LA INTEGRAL DE PELIGRO SÍSMICO: FUENTE PUNTUAL.

Para comenzar con el cálculo se deben utilizar algunas relaciones que están involucradas en el cálculo de la integral del Peligro Sísmico.

Función de densidad de probabilidad de la magnitud:

$$f_M(M) = \frac{\beta e^{-\beta M}}{e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}}} \quad (78)$$

La ley de Atenuación del parámetro del movimiento del suelo (y) ,sigue una distribución log-normal con desviación estándar del logaritmo natural σ . El valor esperado esta definido por la siguiente relación.

$$\lambda_Y \overline{\ln y} = a_1 + a_2 M + a_3 \ln R + a_4 R \quad (79)$$

Donde M es la Magnitud y R es la distancia fuente-sitio.

El número de sismos anuales por unidad de tiempo que exceden el valor del parámetro y , para una única fuente de área queda.

$$\lambda(y) = \frac{1}{A_r} \int_{A_r} \int_{M_{min}}^{M_{max}} v_{m_{min}} f_M(M) P(Y > y|M, R) dM dA_r \quad (80)$$

Donde $v_{m_{min}}$ es la tasa anual de sismos que exceden $M = m_{min}$.

Para el caso de una fuente puntual no existe integración espacial por lo que $\lambda(y)$ queda.

$$\lambda(y) = \int_{M_{min}}^{M_{max}} v_{m_{min}} f_M(M) P(Y > y|M, R) dM \quad (81)$$

Se sabe que y sigue una distribución log-normal, por asunción, por lo que el término $P(Y > y|M, R)$ queda definido como:

$$P(Y > y|M, R) = \Phi\left[\frac{(\overline{\ln y} - \ln y)}{\sigma}\right] \quad (82)$$

$$\text{Con } \Phi[u] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) dx$$

Resolviendo la integral.

$$\lambda(y) = \int_{M_{min}}^{M_{max}} v_{m_{min}} \frac{\beta e^{-\beta M}}{e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}}} \Phi\left[\frac{(\overline{\ln y} - \ln y)}{\sigma}\right] dM \quad (83)$$

Esta integral es de la forma

$$I = \int \exp(-\beta x) \Phi[x] dx \quad (84)$$

Resolviendo I por partes con $u = \Phi[x]$ y $dv = \exp(-\beta x)$

$$I = \frac{1}{\beta} \left\{ \left(\Phi[x + \beta] - \frac{1}{2} \right) e^{-\beta^2/2} - \Phi[x] e^{-\beta x} \right\} \quad (85)$$

Para escribir la Ecuación (85) de la forma de (84), se hace el siguiente cambio de variable.

$$x = \frac{(\overline{\ln y} - \ln y)}{\sigma} \quad (86)$$

$$x = \frac{(a_1 + a_2 M + a_3 \ln R + a_4 R - \ln y)}{\sigma} \quad (87)$$

$$M = \frac{(\sigma x + \ln y - a_1 - a_3 \ln R - a_4 R)}{a_2} \quad (88)$$

$$dx = \frac{a_2}{\sigma} M \quad (89)$$

Sea $Y(M_{min}, R) = \exp(a_1 + a_2 M_{min} + a_3 \ln R + a_4 R)$ y $Y(M_{max}, R) = \exp(a_1 + a_2 M_{max} + a_3 \ln R + a_4 R)$

Reescribiendo la Ecuación (83).

$$\lambda(y) = \frac{v_{mmin} \beta}{e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}}} \int_{\frac{\ln Y(M_{min}, R) - \ln y}{\sigma}}^{\frac{\ln Y(M_{max}, R) - \ln y}{\sigma}} e^{-\beta \frac{(\sigma x + \ln y - a_1 - a_3 \ln R - a_4 R)}{a_2}} \Phi[x] \frac{\sigma}{a_2} dx \quad (90)$$

$$\lambda(y) = \frac{v_{mmin} \cdot \beta \cdot \sigma}{a_2 (e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})} e^{\beta \frac{(a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln y)}{a_2}} \int_{\frac{\ln Y(M_{min}, R) - \ln y}{\sigma}}^{\frac{\ln Y(M_{max}, R) - \ln y}{\sigma}} e^{-\beta \frac{\sigma x}{a_2}} \Phi[x] dx \quad (91)$$

Sea $Z(M, R) = \frac{\ln Y(M, R) - \ln(y)}{\sigma}$ y $\eta = \frac{\beta \sigma}{a_2}$

$$\lambda(y) = \frac{v_{mmin} \cdot \eta}{(e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})} e^{\eta \frac{(a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln y)}{\sigma}} \int_{Z(M_{min}, R)}^{Z(M_{max}, R)} e^{-\eta x} \Phi[x] dx \quad (92)$$

Utilizando la Ecuación (85).

$$I = \int_{Z(M_{min}, R)}^{Z(M_{max}, R)} e^{-\eta x} \Phi[x] dx \quad (93)$$

$$I = \frac{1}{\eta} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2}} - \left[\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{\ln Y(M_{max}, R) - \ln(y)}{\sigma}} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{\ln Y(M_{min}, R) - \ln(y)}{\sigma}} \right] \right\} \quad (94)$$

$$I = \frac{1}{\eta} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2}} - \left[\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{a_1 + a_2 M_{max} + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{a_1 + a_2 M_{min} + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} \right] \right\} \quad (95)$$

$$I = \frac{e^{-\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}}}{\eta} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2}} - \left[\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{a_2 M_{max}}{\sigma}} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta) e^{-\eta \frac{a_2 M_{min}}{\sigma}} \right] \right\} \quad (96)$$

$$I = \frac{e^{-\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}}}{\eta} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2}} e^{\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} - \left[\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\beta M_{max}} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta) e^{-\beta M_{min}} \right] \right\} \quad (97)$$

$$\Delta = M_{max} - M_{min} \quad (98)$$

Se factoriza la Ecuación (97) por $e^{-\beta M_{min}}$

$$I = \frac{e^{-\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}}}{\eta} e^{-\beta M_{min}} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2}} e^{\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} e^{\beta M_{min}} - \left[\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\beta M_{max}} e^{\beta M_{min}} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta) \right] \right\} \quad (99)$$

Analizando el termino $e^{\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} e^{\beta M_{min}}$

$$e^{\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} e^{\beta M_{min}} = e^{\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} e^{\frac{\eta a_2 M_{min}}{\sigma}} = e^{\eta \frac{a_1 + a_2 M_{min} + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} \quad (100)$$

$$e^{\eta \frac{a_1 + a_2 M_{min} + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}} = (e^{a_1 + a_2 M_{min} + a_3 \ln R + a_4 R} e^{-\ln(y)})^{\frac{\eta}{\sigma}} = \left[\frac{Y(M_{min}, R)}{y} \right]^{\frac{\eta}{\sigma}} \quad (101)$$

Por lo tanto la Ecuación (99) queda

$$I = \frac{e^{-\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}}}{\eta} e^{-\beta M_{min}} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2} \left[\frac{Y(M_{min}, R)}{y} \right]^{\frac{\eta}{\sigma}}} - [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\Delta} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] \right\} \quad (102)$$

Reemplazando (102) en (92).

$$\lambda(y) = \frac{v_{m_{min}} \cdot \eta}{(e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})} e^{\eta \frac{(a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln y)}{\sigma}} \frac{e^{-\eta \frac{a_1 + a_3 \ln R + a_4 R - \ln(y)}{\sigma}}}{\eta} e^{-\beta M_{min}} \left\{ [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] e^{-\frac{\eta^2}{2} \left[\frac{Y(M_{min}, R)}{y} \right]^{\frac{\eta}{\sigma}}} - [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\Delta} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] \right\} \quad (103)$$

Simplificando

$$\lambda(y) = \frac{v_{m_{min}} e^{-\beta M_{min}}}{(e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})} \left\{ e^{-\frac{\eta^2}{2} \left[\frac{Y(M_{min}, R)}{y} \right]^{\frac{\eta}{\sigma}}} [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] - [\Phi(Z(M_{max}, R) + \eta) e^{-\Delta} - \Phi(Z(M_{min}, R) + \eta)] \right\} \quad (104)$$

Llegando a la expresión encontrada por Ordaz (2004)

ANEXO B: FIGURAS Y TABLAS.

B.1 ZONIFICACIÓN Y CURVAS DE GUTENBERG-RICHTER.

B.1.1 ZONA 1.

Todo el Catálogo

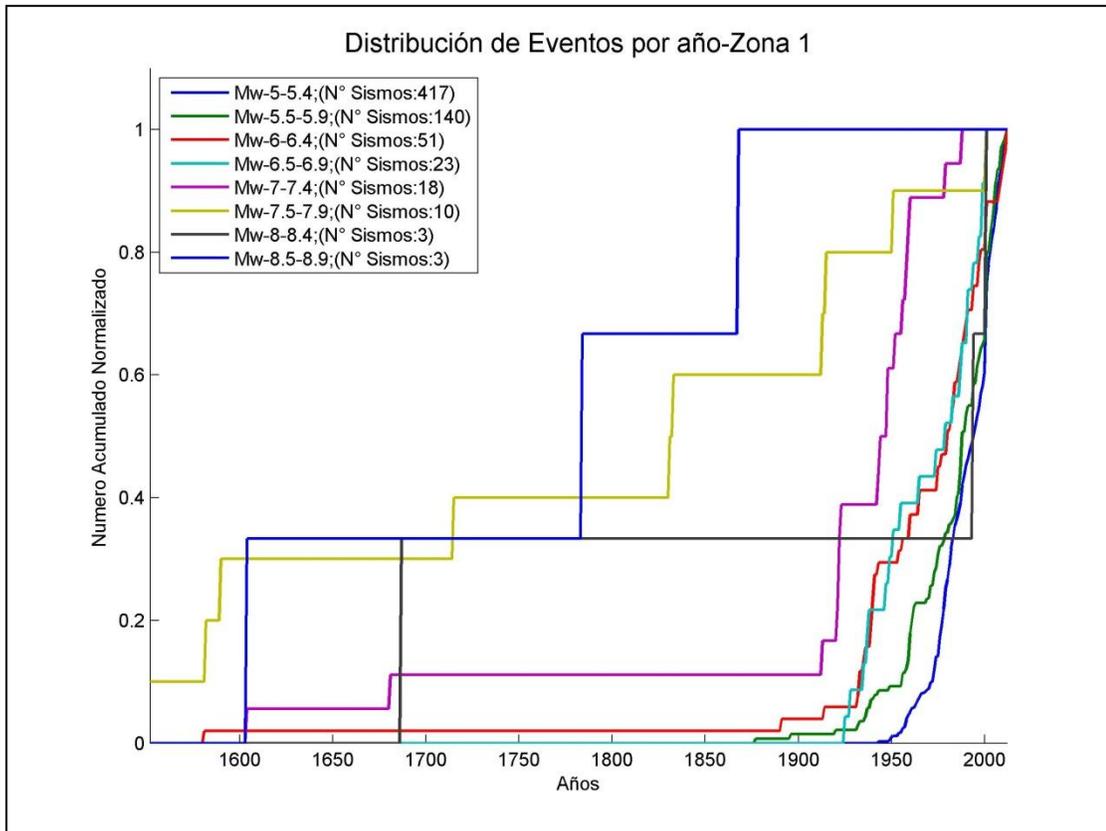


Figura B 1: Distribución de Sismos Zona 1

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 1	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	410	1956
[5.5 ;6 [	127	1956
[6 ;6.5 [	36	1954
[6.5 ;7 [	18	1947
[7 ;7.5 [	16	1913
[7.5 ;8 [	7	1715
[8 ;8.5 [	3	1687
[8.5 ;9 [	3	1604

Tabla B 1: Años de Completitud del Catálogo para Zona 1

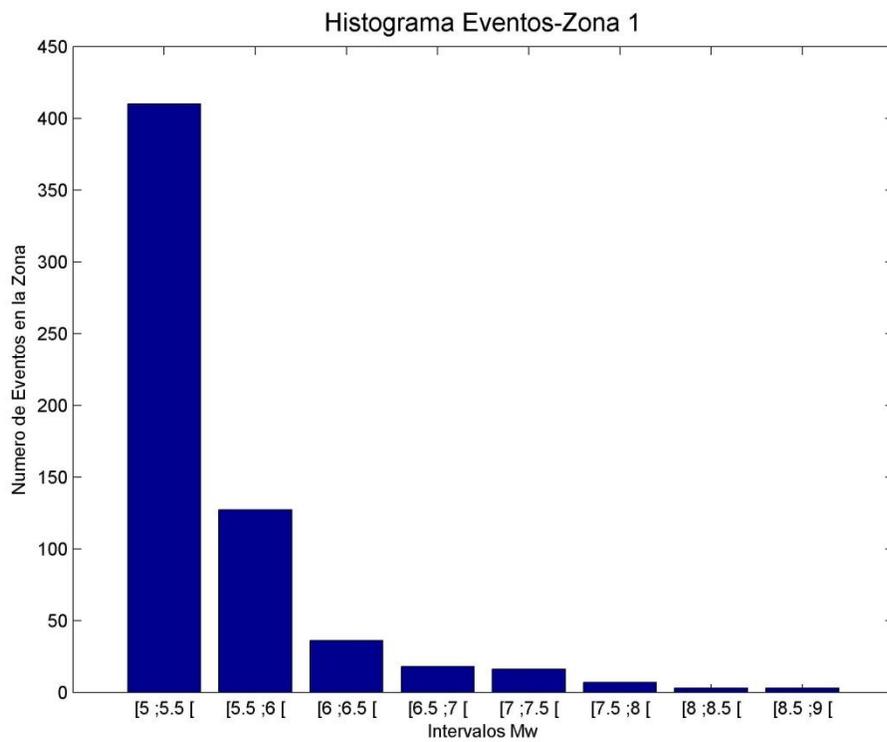


Figura B 2: Histograma de Sismos Zona 1

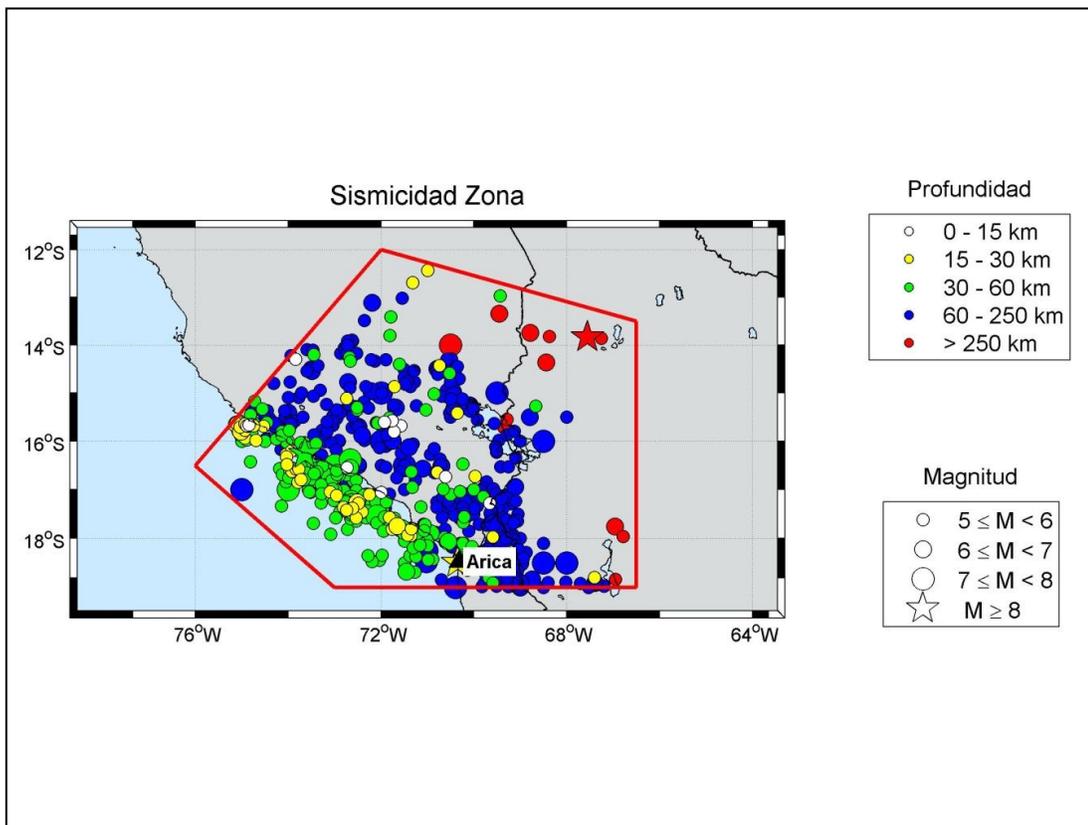


Figura B 3: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 1

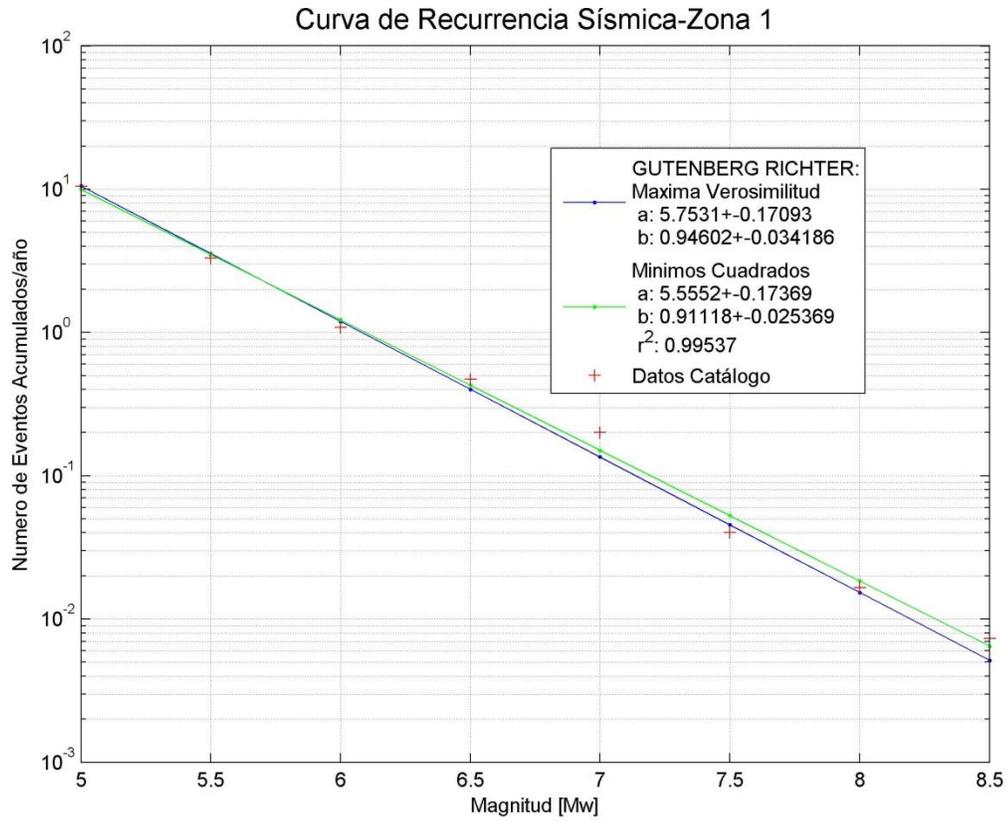


Figura B 4: Curva Recurrencia Sísmica – Zona 1

Zona 1			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	10.543	9.984	57
≥ 5.5	3.548	3.497	57
≥ 6	1.194	1.225	59
≥ 6.5	0.402	0.429	66
≥ 7	0.135	0.150	100
≥ 7.5	0.045	0.053	298
≥ 8	0.015	0.018	326
≥ 8.5	0.005	0.006	409

Tabla B 2: Información Gutenberg-Richter – Zona 1

Sismos Subducción Interplaca

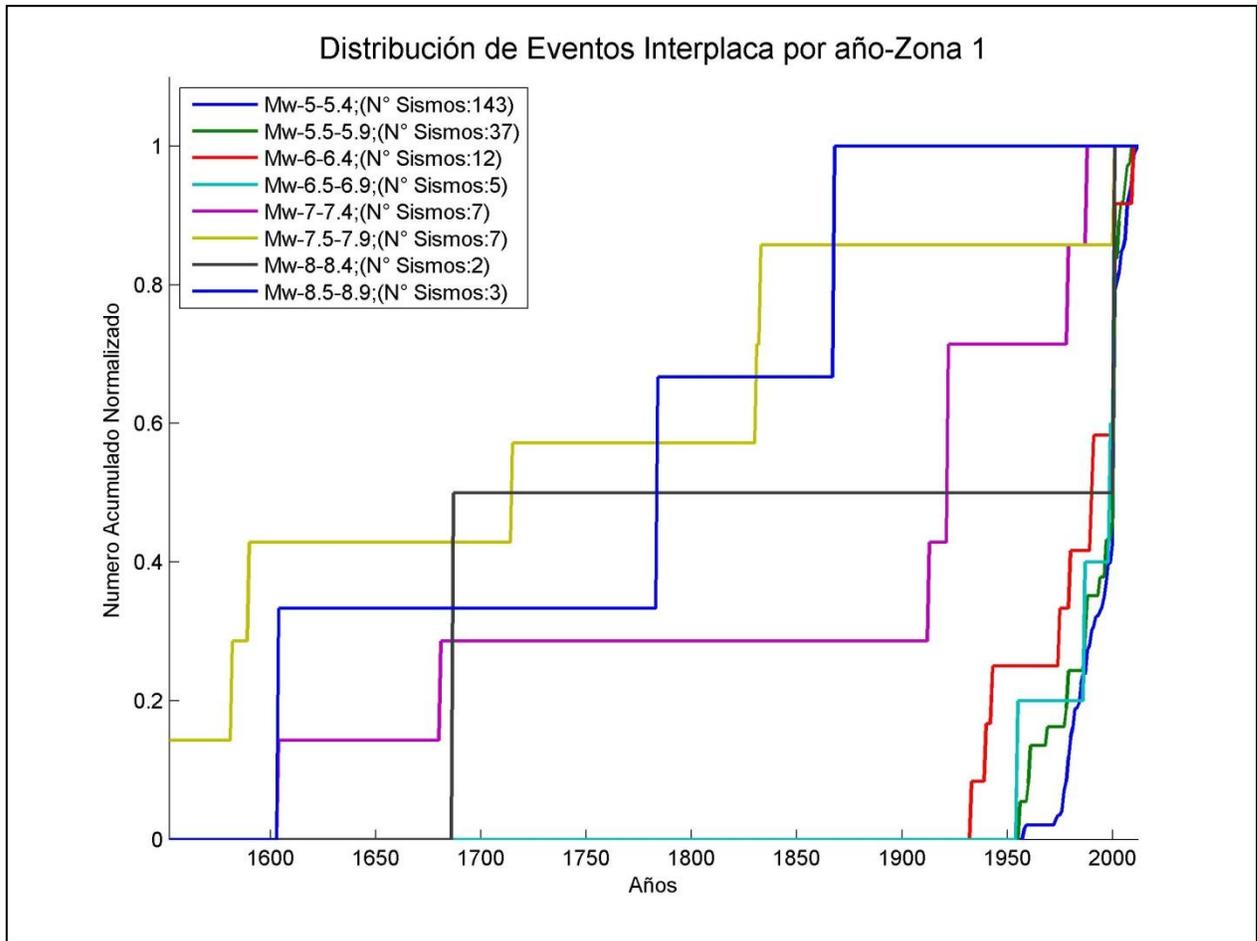


Figura B 5: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 1

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 1 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	126	1980
[5.5 ;6 [	31	1975
[6 ;6.5 [	9	1975
[6.5 ;7 [	4	1975
[7 ;7.5 [	5	1913
[7.5 ;8 [	5	1590
[8 ;8.5 [	2	1552
[8.5 ;9 [	3	1552

Tabla B 3: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 1

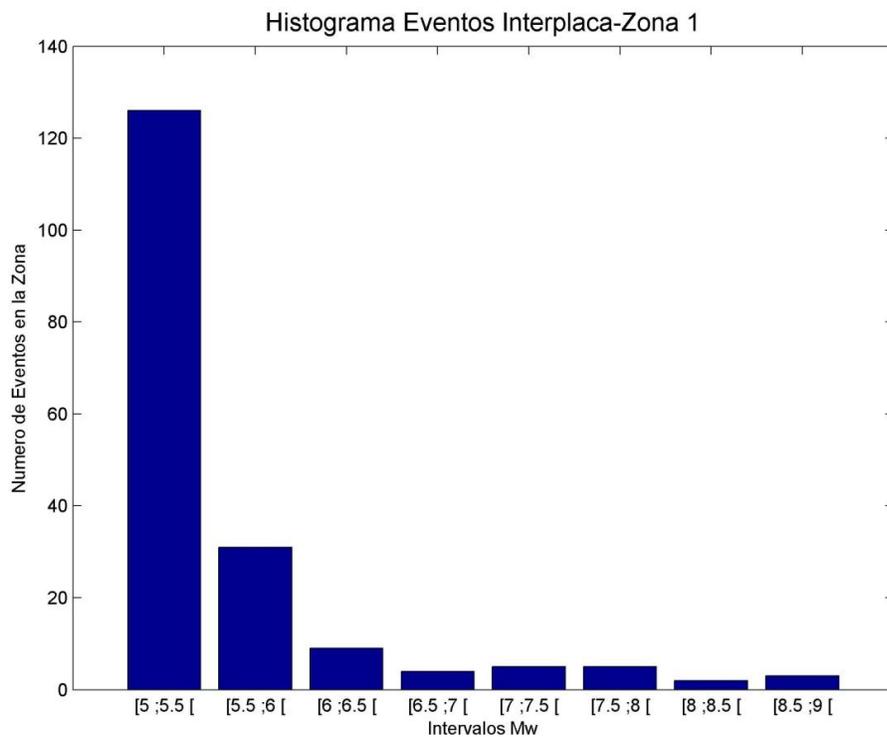


Figura B 6: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 1

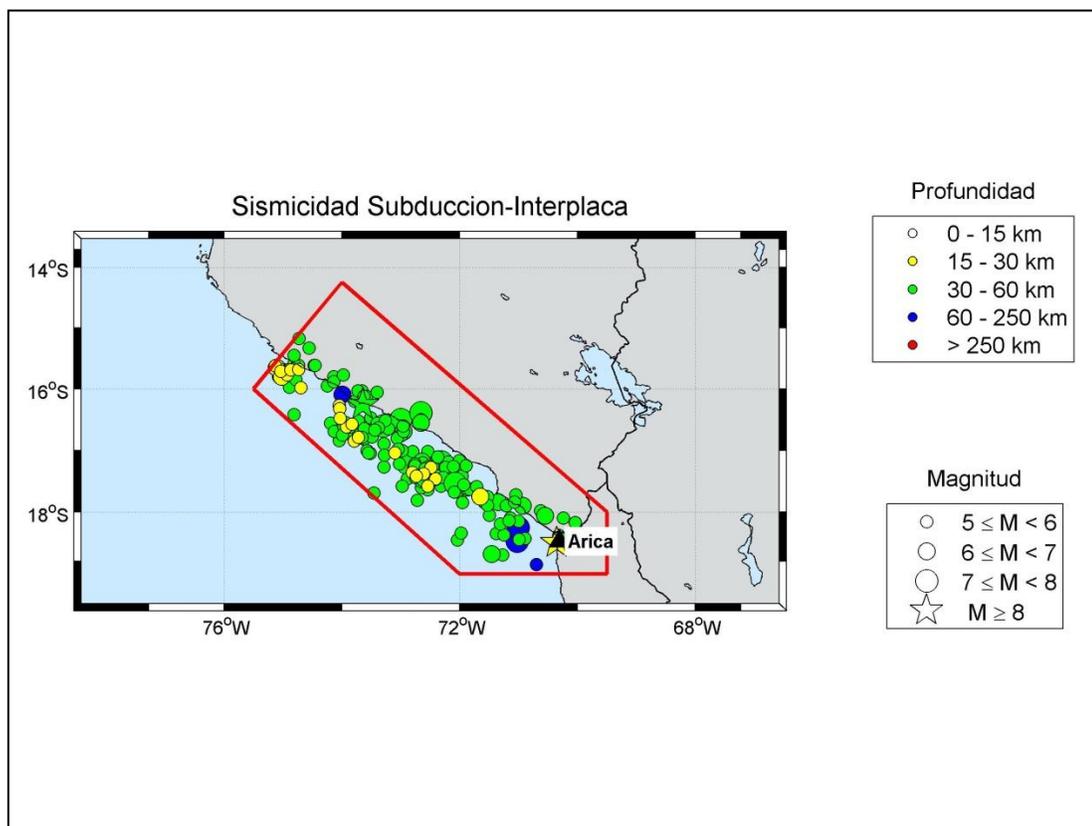


Figura B 7: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 1

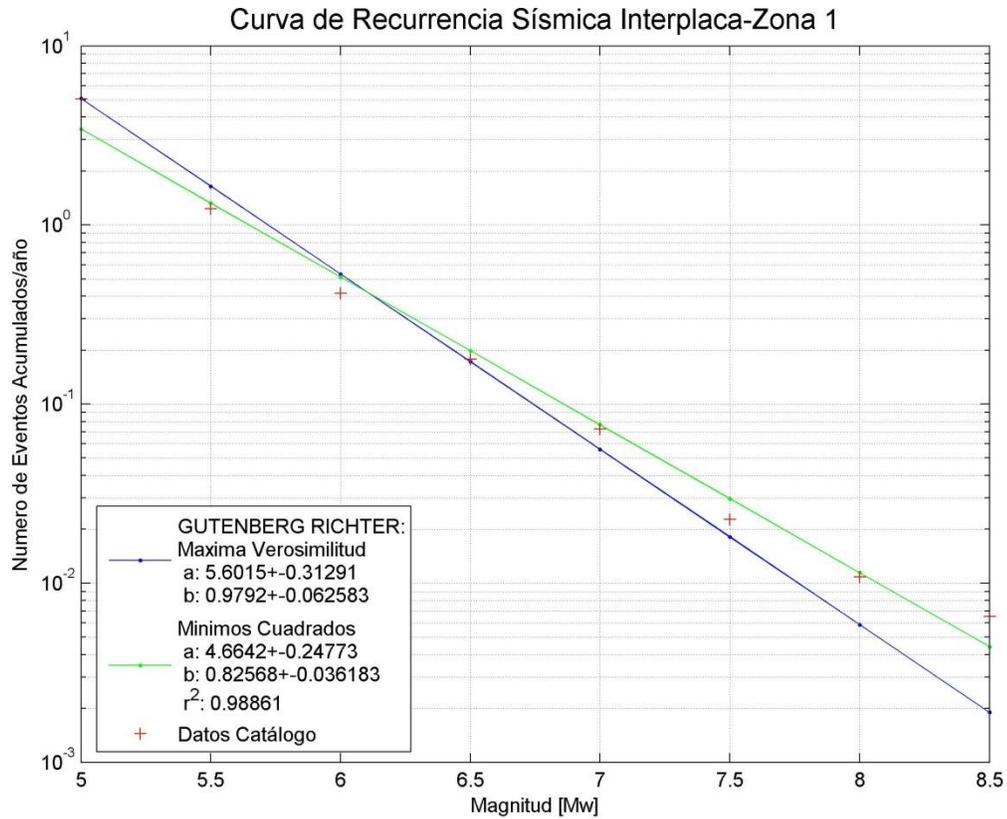


Figura B 8: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 1

Zona 1 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	5.076	3.434	33
≥5.5	1.644	1.327	38
≥6	0.533	0.513	38
≥6.5	0.172	0.198	38
≥7	0.056	0.077	100
≥7.5	0.018	0.030	423
≥8	0.006	0.011	461
≥8.5	0.002	0.004	461

Tabla B 4: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 1

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

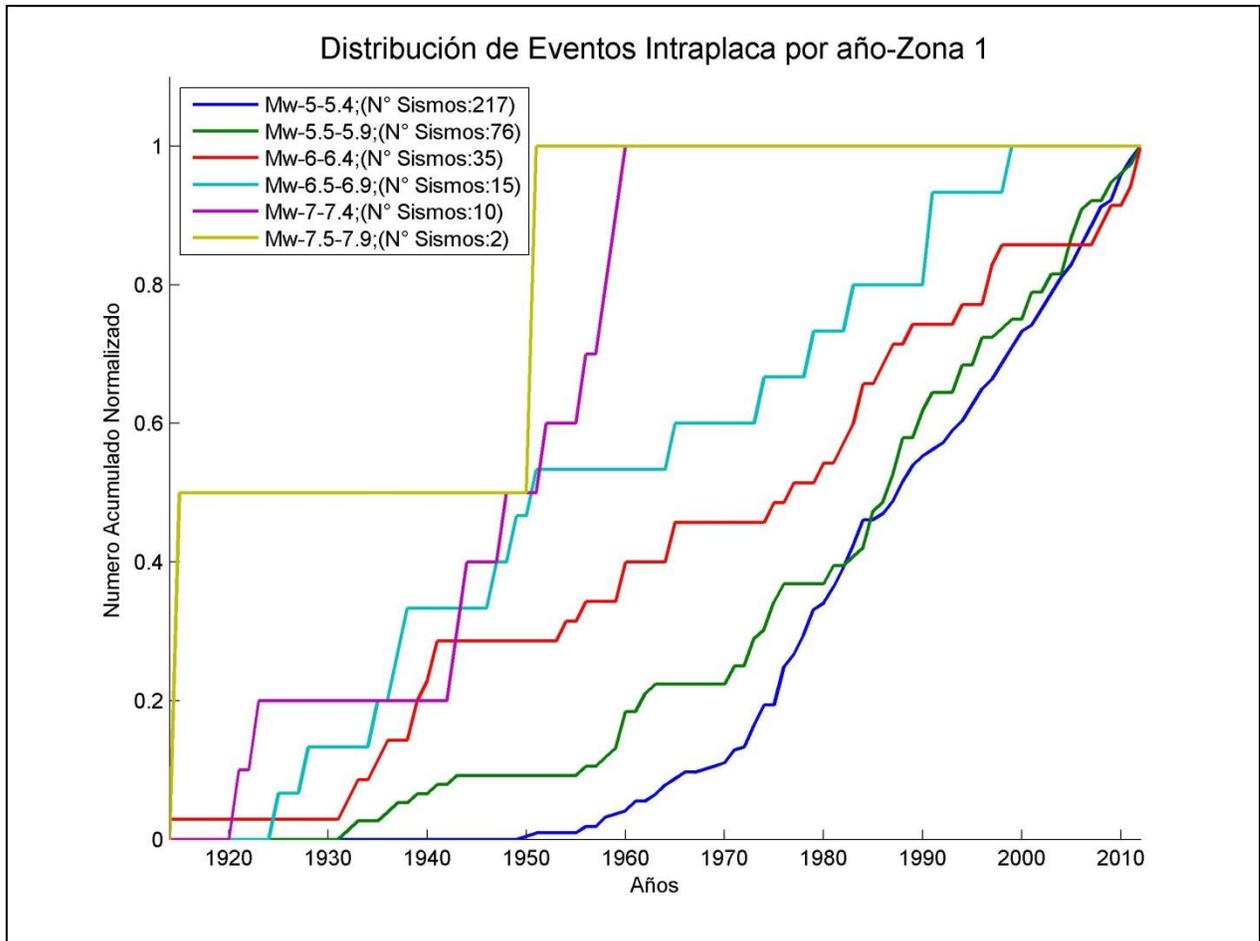


Figura B 9: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 1

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 1 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	209	1960
[5.5 ;6 [	66	1960
[6 ;6.5 [	25	1953
[6.5 ;7 [	13	1934
[7 ;7.5 [	10	1921
[7.5 ;8 [	2	1915

Tabla B 5: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 1

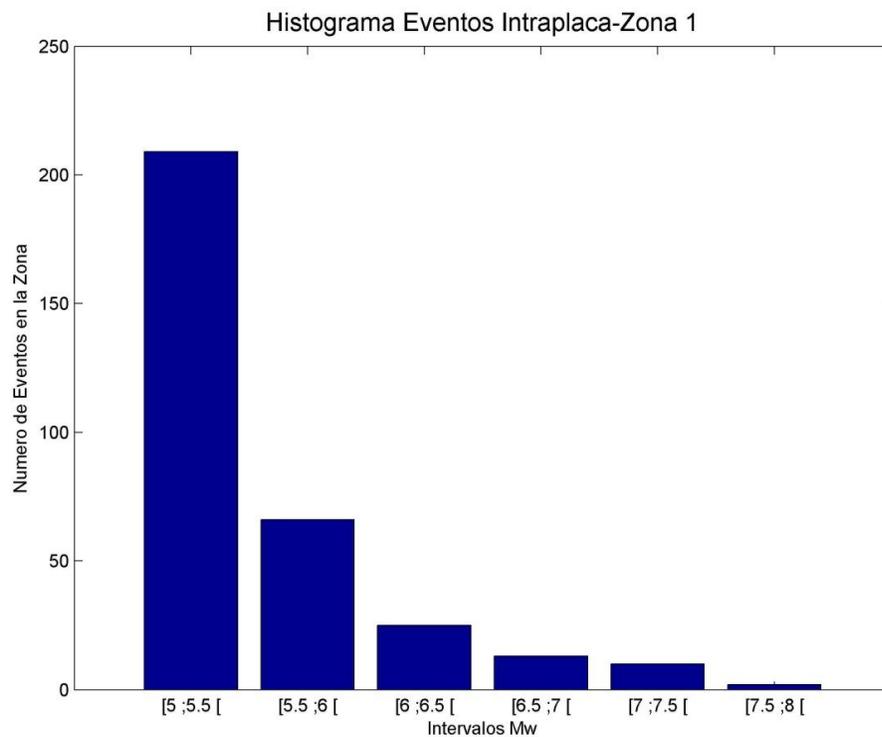


Figura B 10: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 1

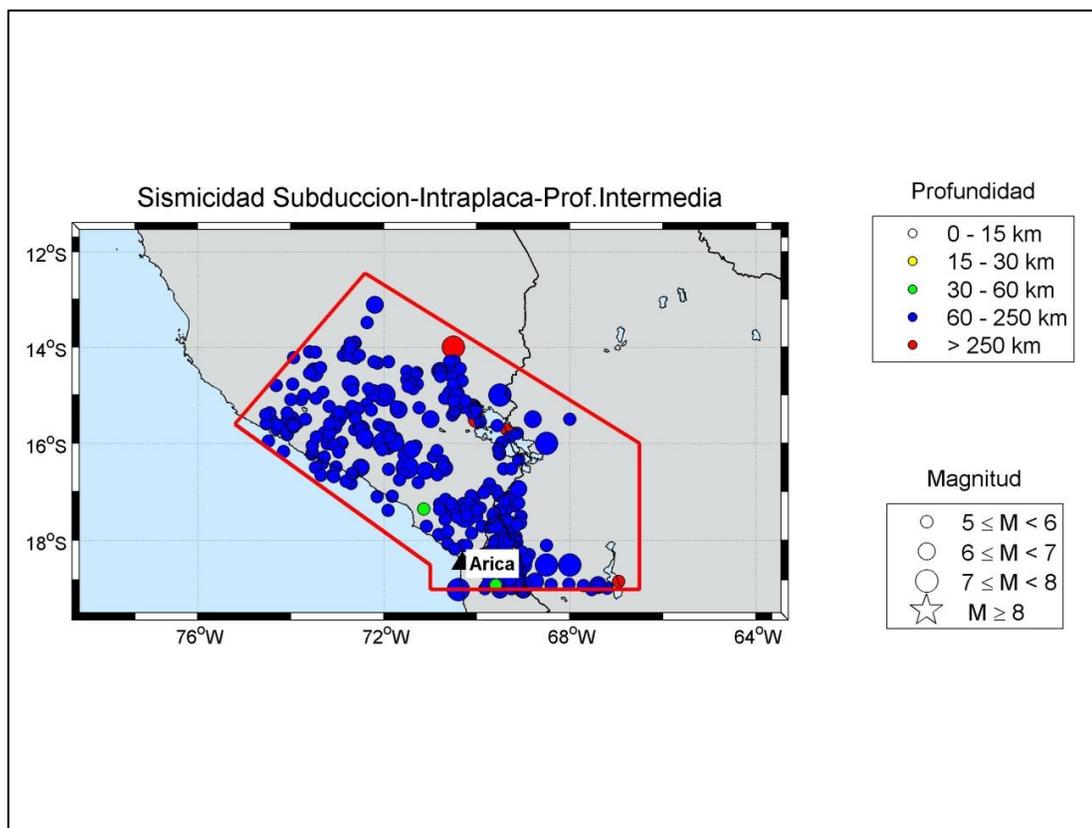


Figura B 11: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 1

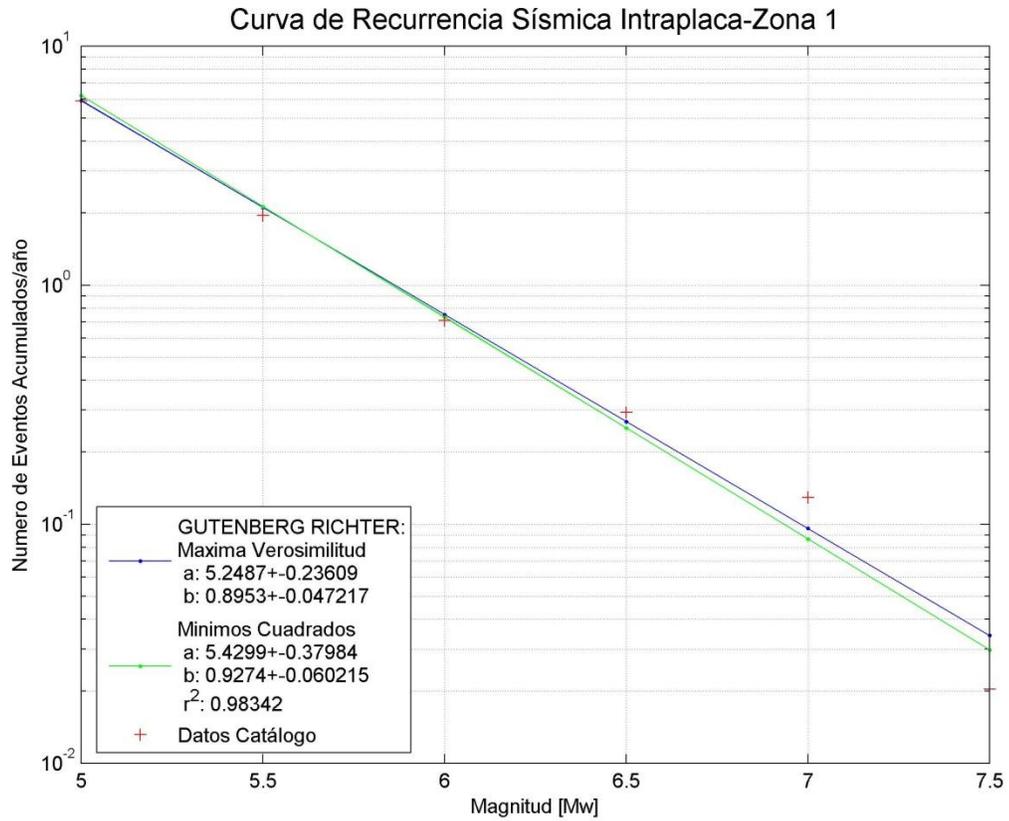


Figura B 12: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 1

Zona 1 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	5.919	6.208	53
≥ 5.5	2.111	2.134	53
≥ 6	0.753	0.734	60
≥ 6.5	0.269	0.252	79
≥ 7	0.096	0.087	92
≥ 7.5	0.034	0.030	98

Tabla B 6: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 1

B.1.2 ZONA 2.

Todo el Catálogo

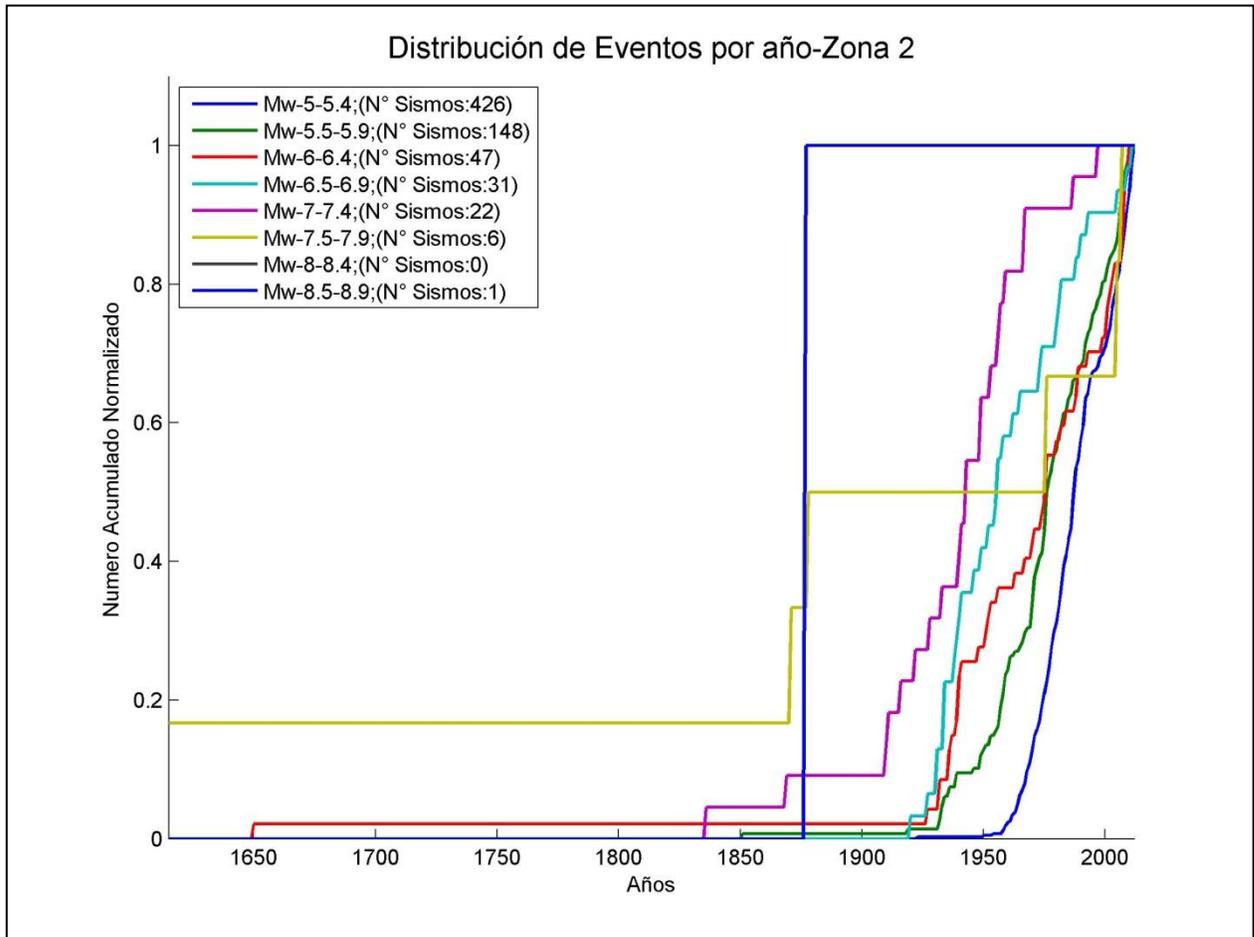


Figura B 13: Distribución de Sismos Zona 2

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 2	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	447	1955
[5.5 ;6 [	133	1950
[6 ;6.5 [	37	1948
[6.5 ;7 [	22	1945
[7 ;7.5 [	20	1910
[7.5 ;8 [	5	1871
[8 ;8.5 [	0	1871
[8.5 ;9 [	1	1871

Tabla B 7: Años de Completitud del Catálogo para Zona 2

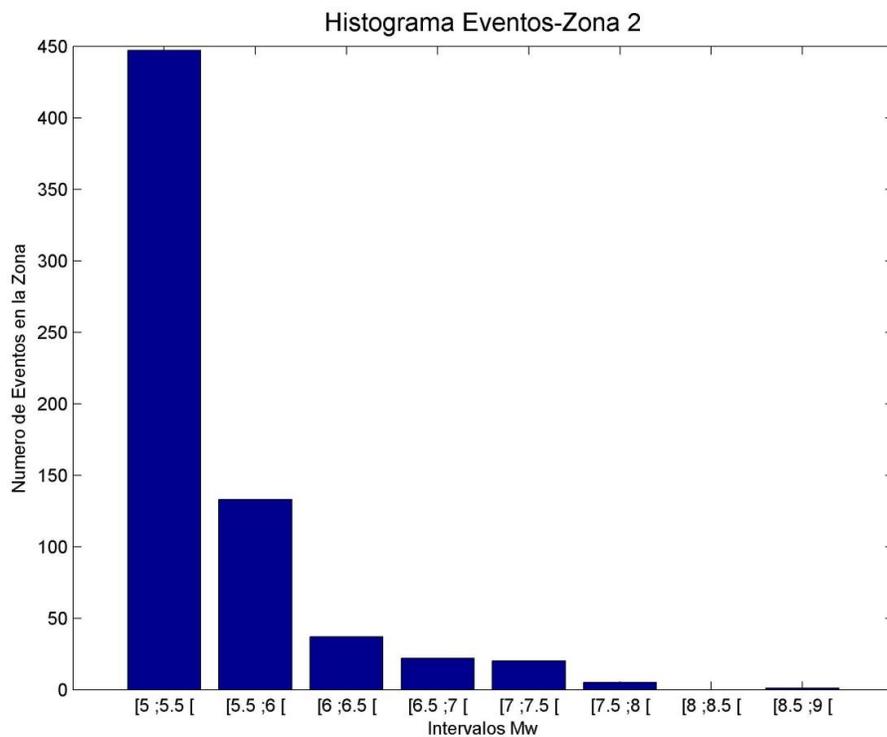


Figura B 14: Histograma de Sismos Zona 2

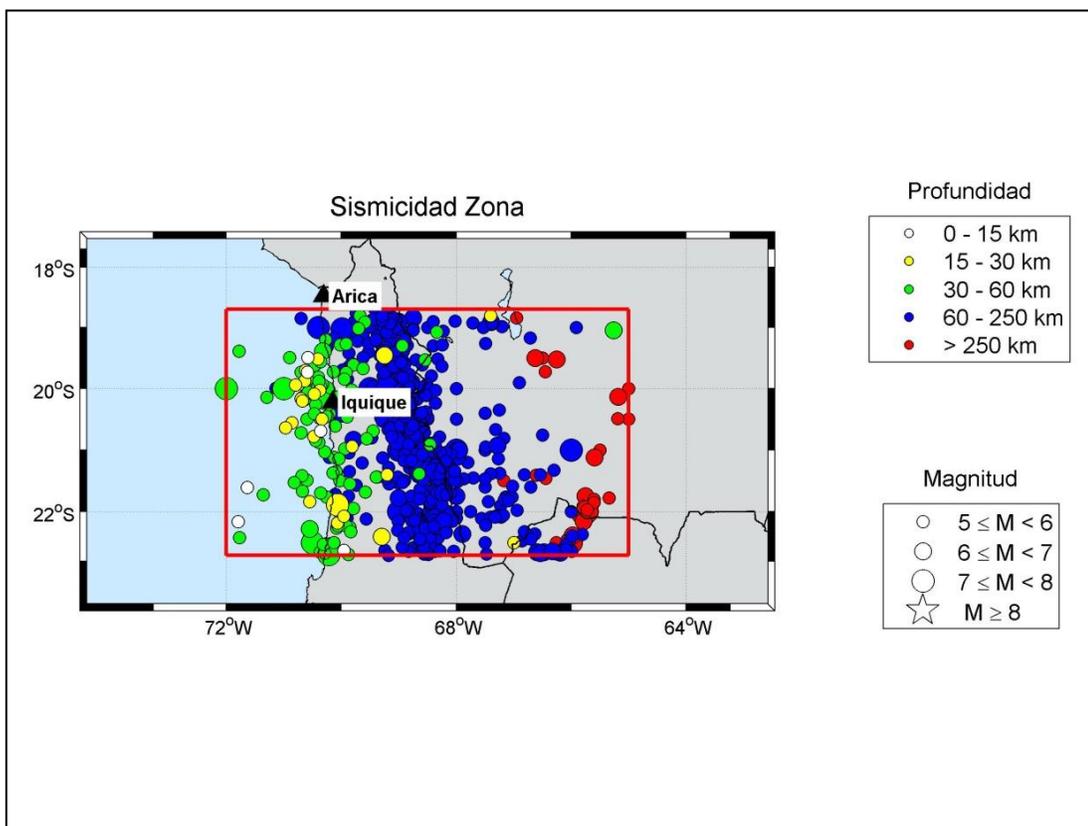


Figura B 15: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 2

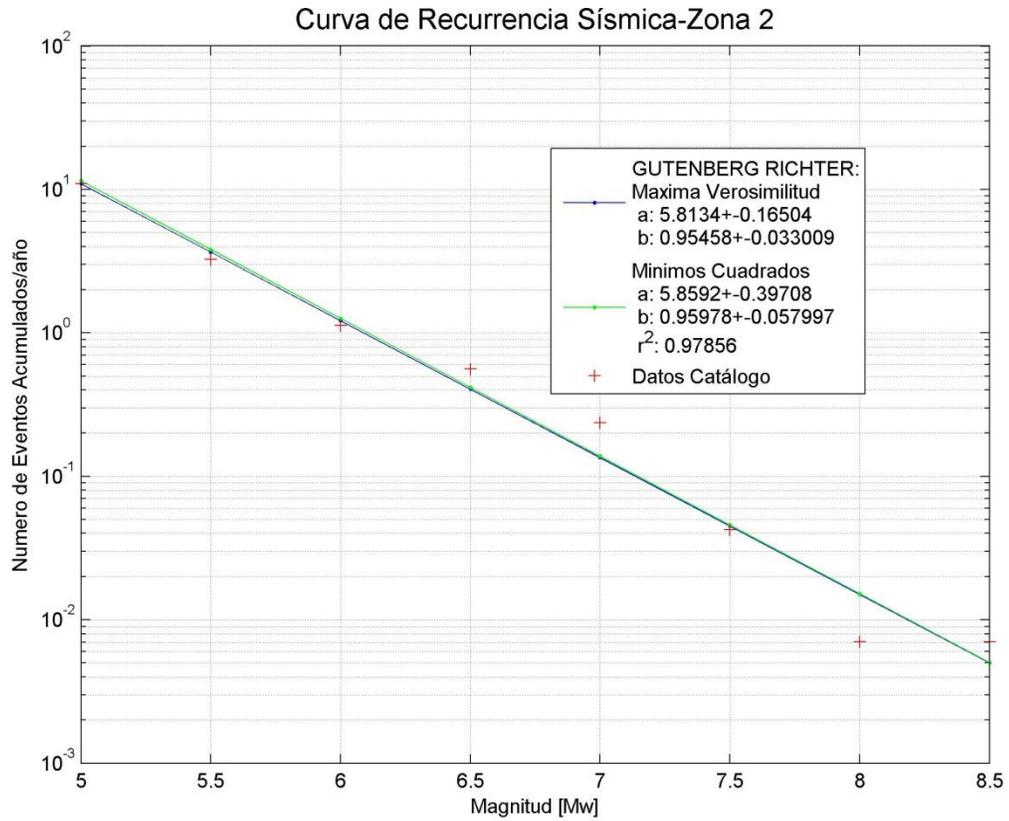


Figura B 16: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 2

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 2		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	10.978	11.490	58
≥ 5.5	3.658	3.806	63
≥ 6	1.219	1.261	65
≥ 6.5	0.406	0.418	68
≥ 7	0.135	0.138	103
≥ 7.5	0.045	0.046	142
≥ 8	0.015	0.015	142
≥ 8.5	0.005	0.005	142

Tabla B 8: Información Gutenberg-Richter – Zona 2

Sismos Subducción Interplaca

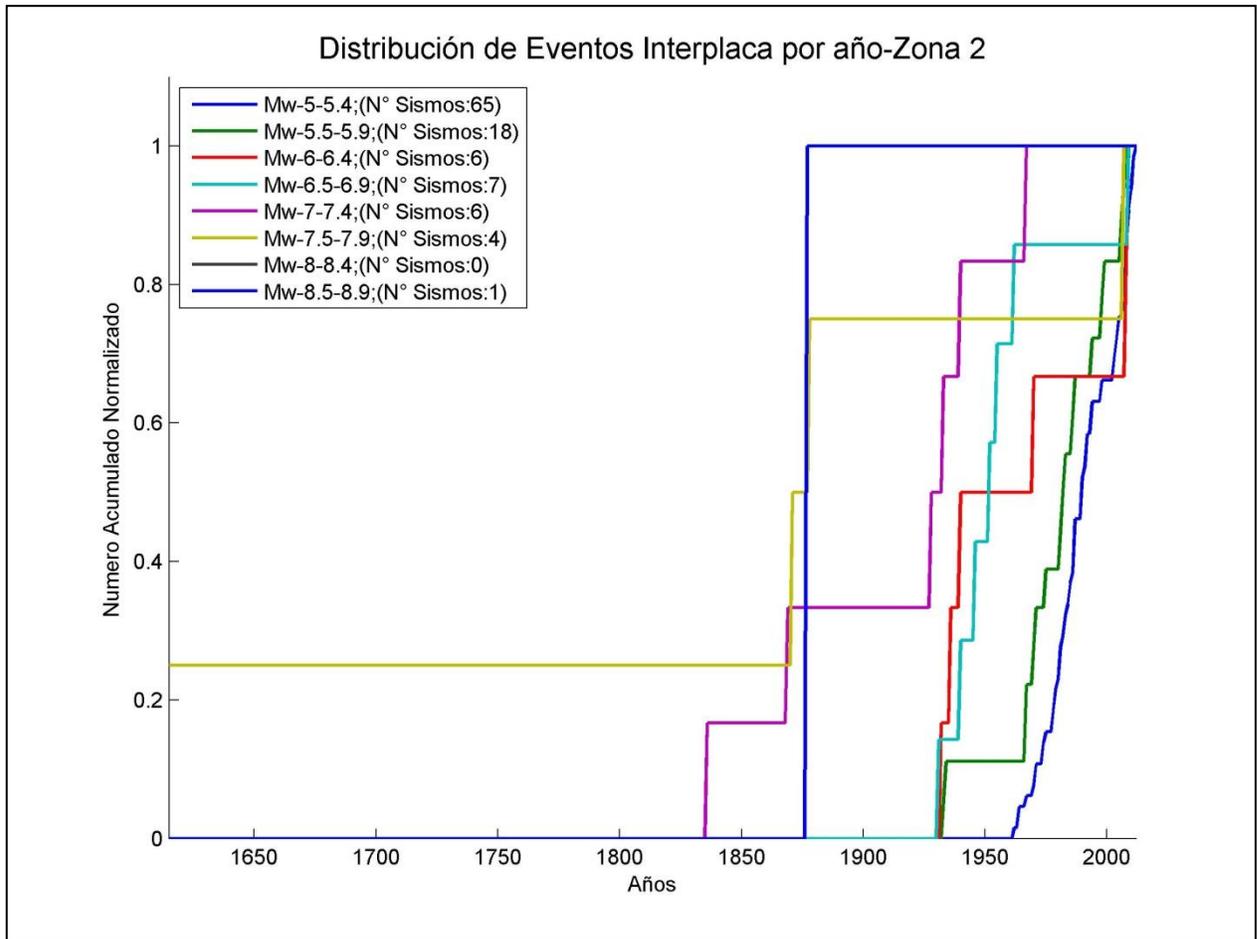


Figura B 17: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 2

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 2 - Interplaca	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	64	1965
[5.5 ;6 [	16	1965
[6 ;6.5 [	6	1930
[6.5 ;7 [	7	1930
[7 ;7.5 [	4	1925
[7.5 ;8 [	3	1871
[8 ;8.5 [	0	1615
[8.5 ;9 [	1	1615

Tabla B 9: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 2

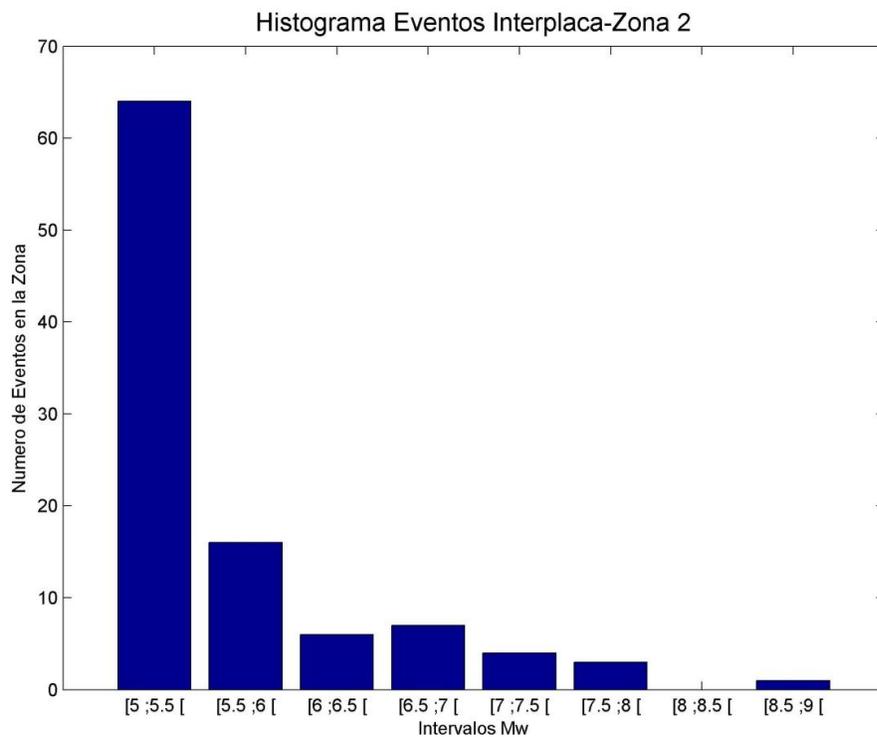


Figura B 18: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 2

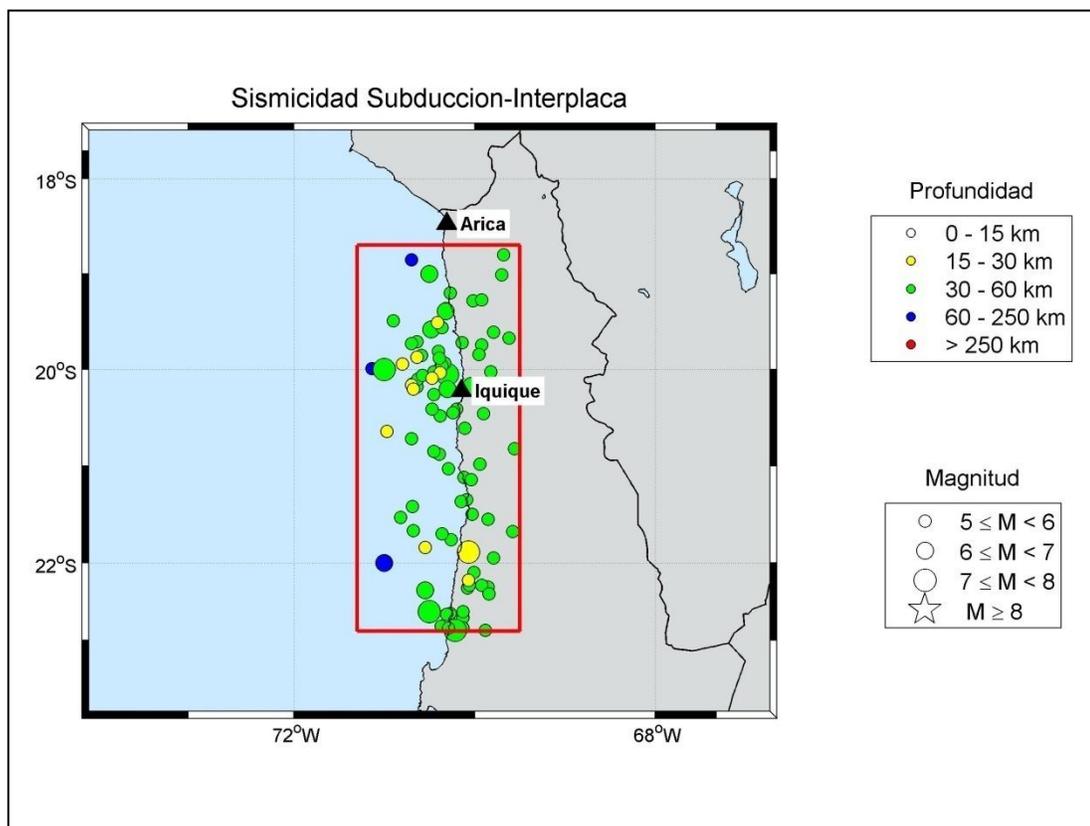


Figura B 19 Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 2

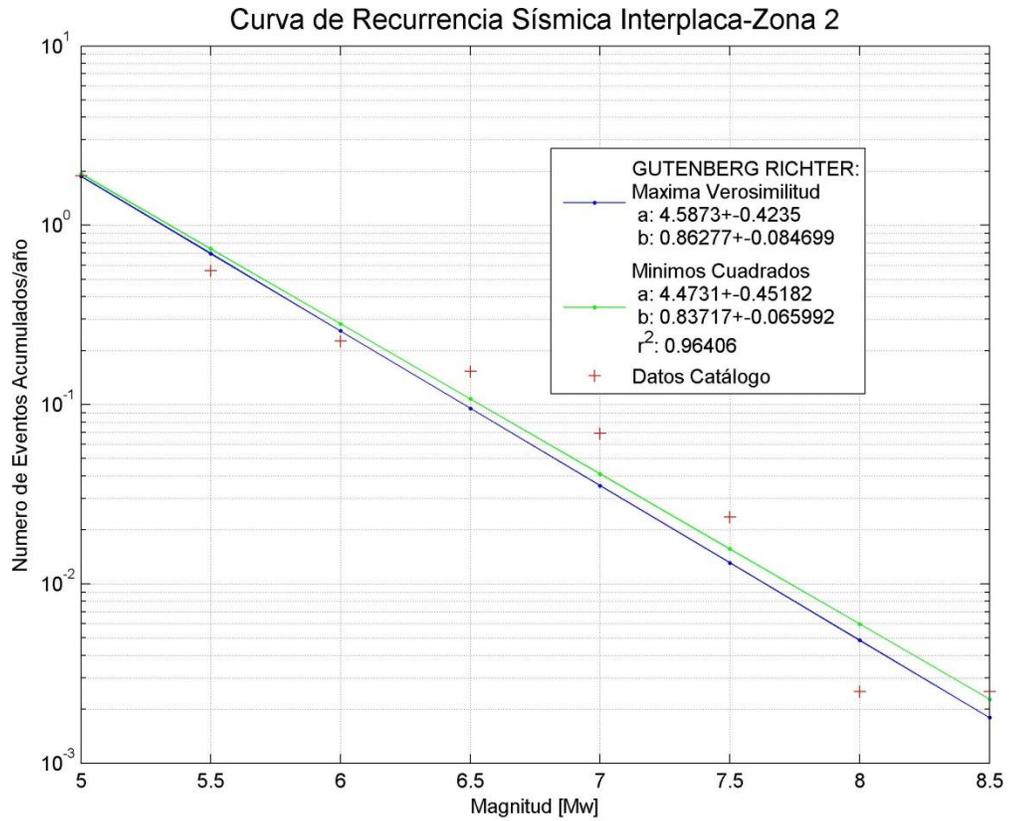


Figura B 20: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 2

Zona 2 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	1.877	1.937	48
≥ 5.5	0.695	0.739	48
≥ 6	0.257	0.282	83
≥ 6.5	0.095	0.108	83
≥ 7	0.035	0.041	88
≥ 7.5	0.013	0.016	142
≥ 8	0.005	0.006	398
≥ 8.5	0.002	0.002	398

Tabla B 10: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 2

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

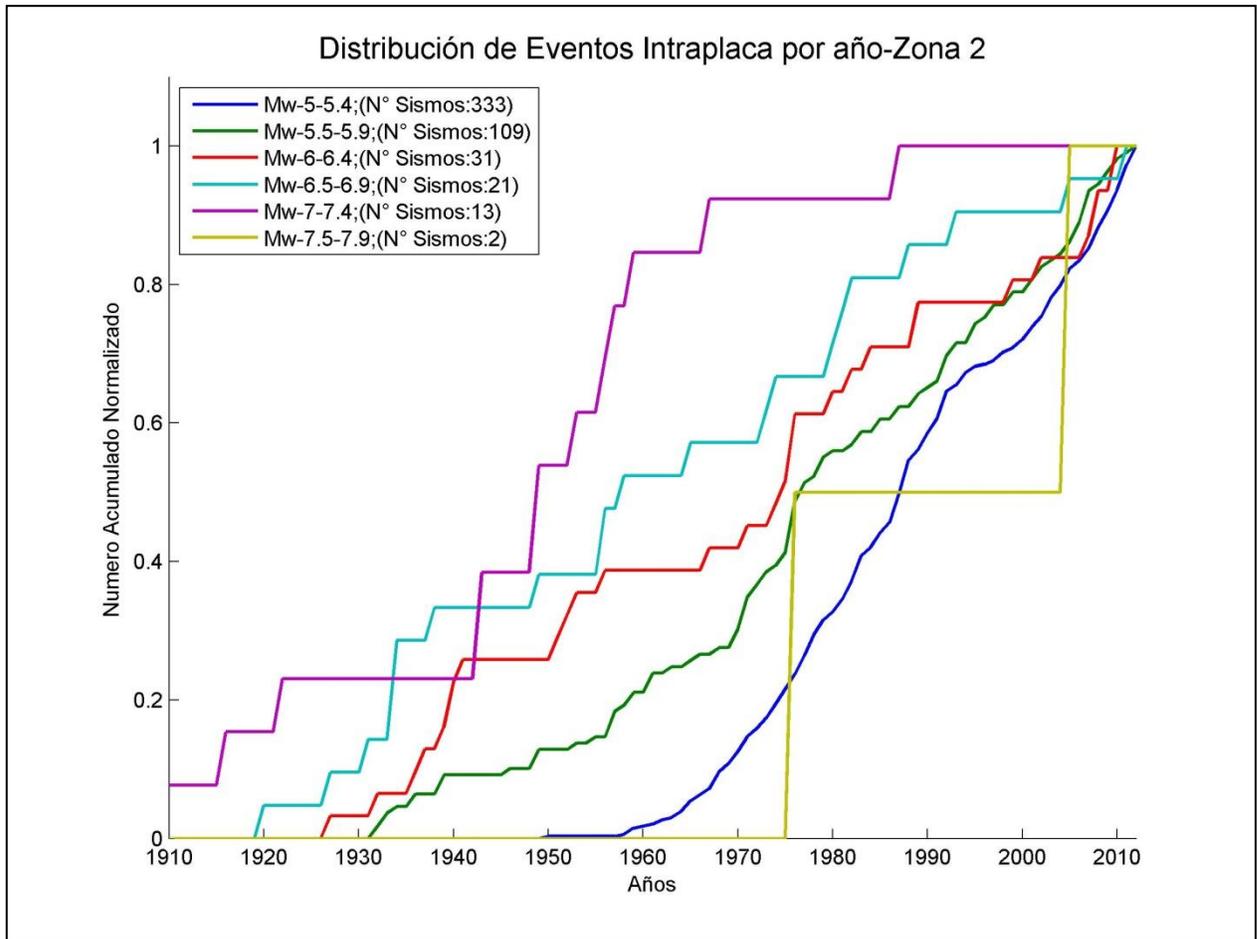


Figura B 21: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 2

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 2 - Intraplaca	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	350	1960
[5.5 ;6 [	97	1950
[6 ;6.5 [	25	1950
[6.5 ;7 [	16	1945
[7 ;7.5 [	13	1910
[7.5 ;8 [	2	1910

Tabla B 11: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 2

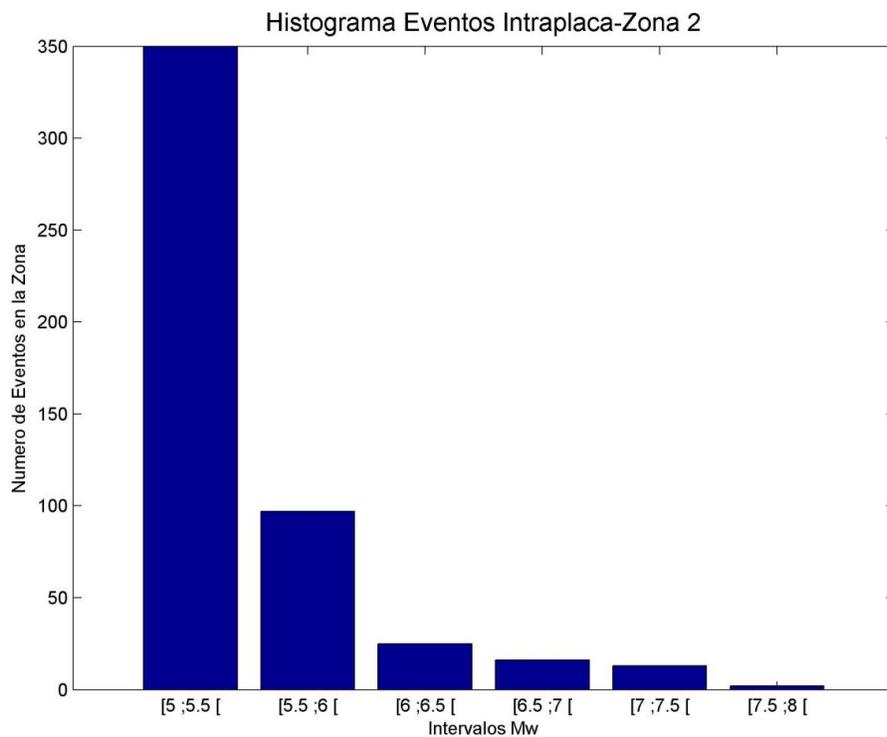


Figura B 22: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 2

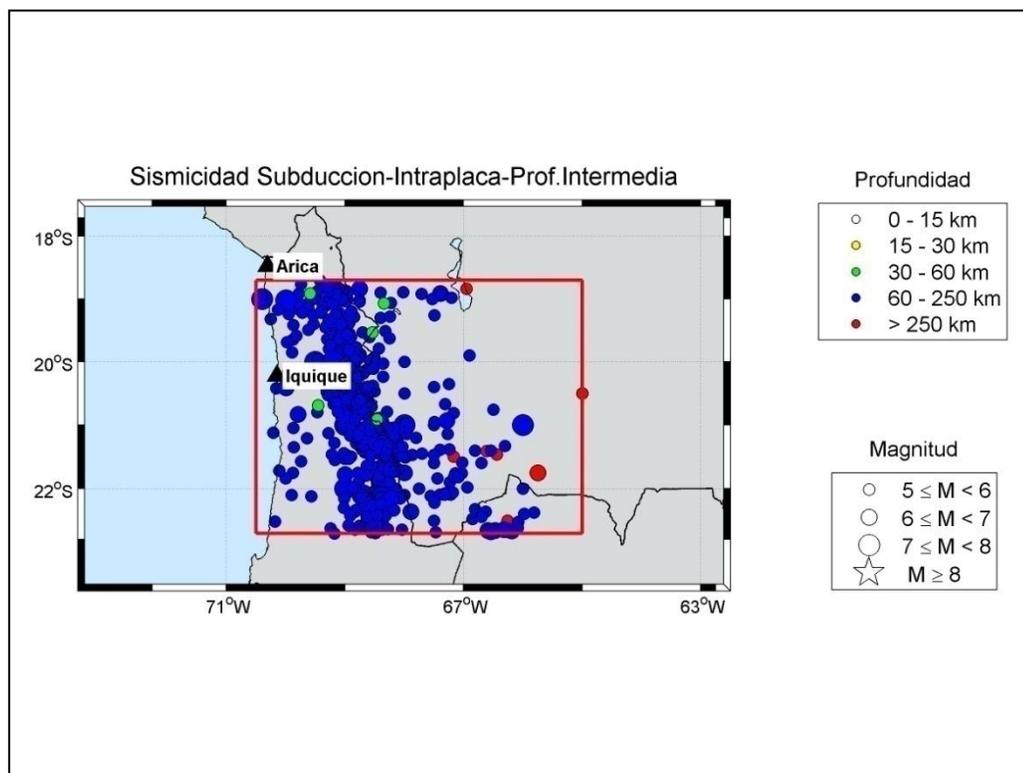


Figura B 23: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 2

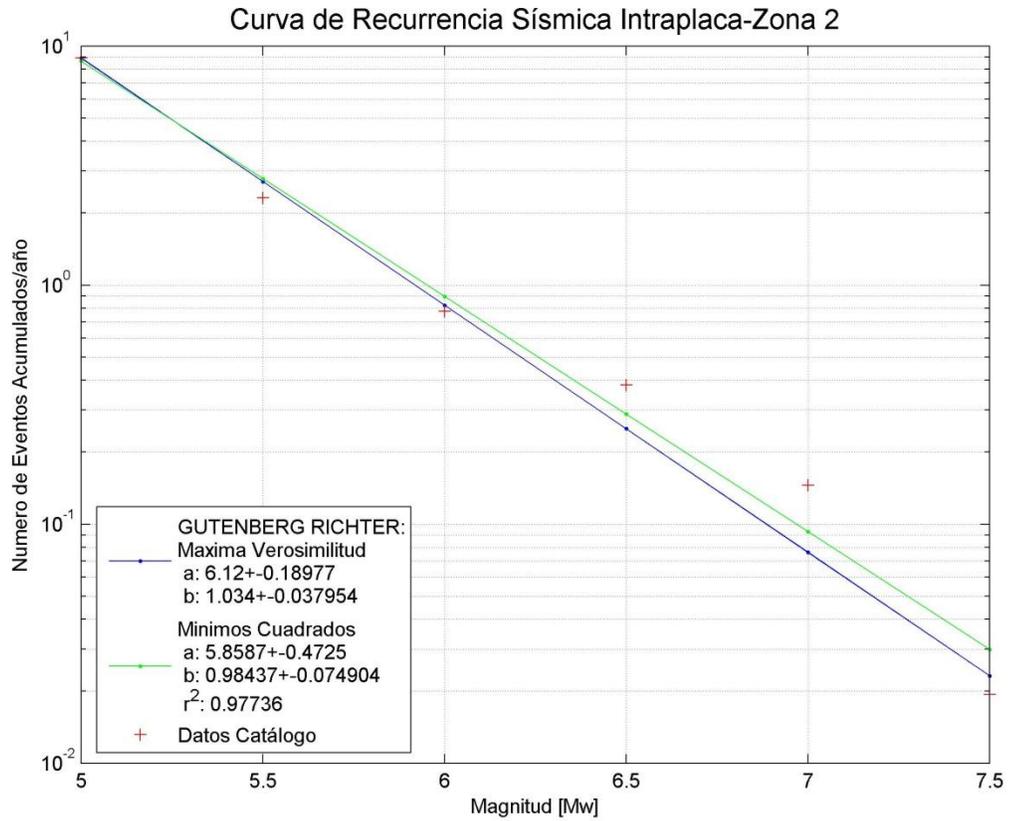


Figura B 24: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 2

Zona 2 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	8.912	8.647	53
≥ 5.5	2.710	2.784	63
≥ 6	0.824	0.896	63
≥ 6.5	0.251	0.289	68
≥ 7	0.076	0.093	103
≥ 7.5	0.023	0.030	103

Tabla B 12: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 2

B.1.3 ZONA 3.

Todo el Catálogo

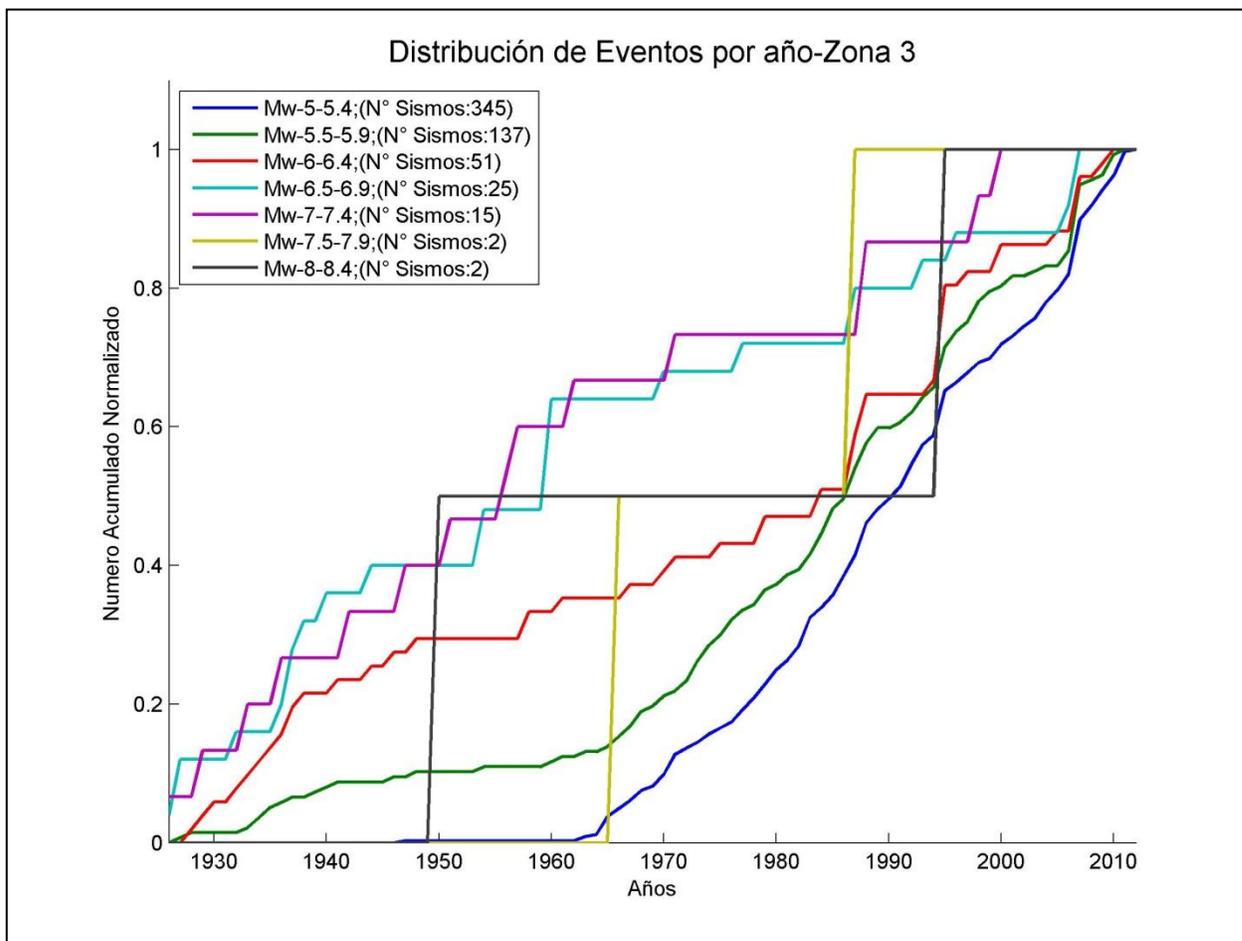


Figura B 25: Distribución de Sismos Zona 3

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 3	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	332	1966
[5.5 ;6 [	118	1966
[6 ;6.5 [	36	1958
[6.5 ;7 [	13	1958
[7 ;7.5 [	15	1926
[7.5 ;8 [	2	1926
[8 ;8.5 [	2	1926

Tabla B 13: Años de Completitud del Catálogo para Zona 3

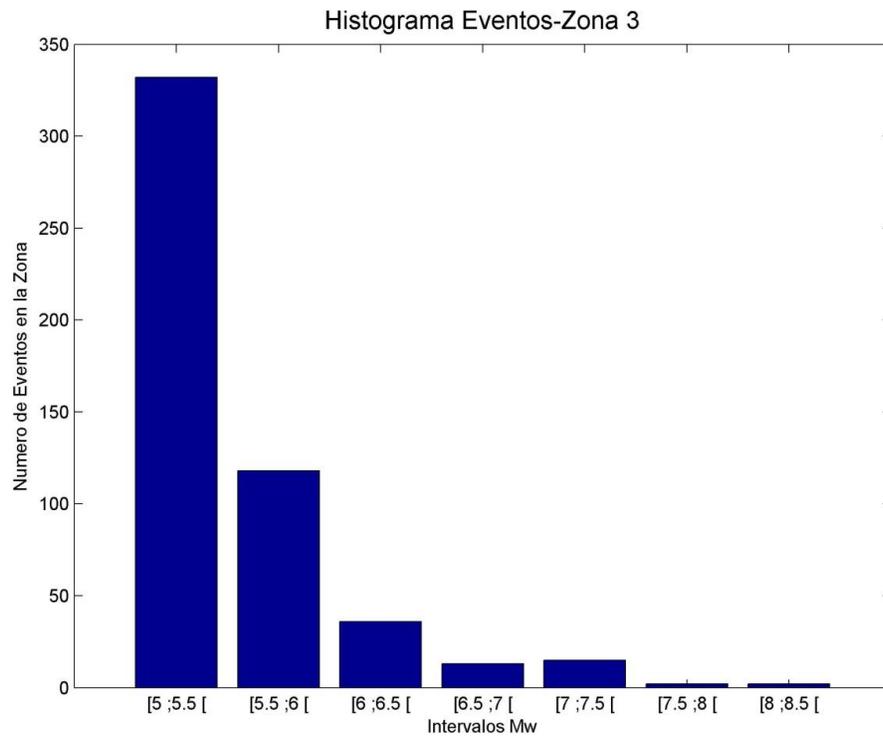


Figura B 26: Histograma de Sismos Zona 3

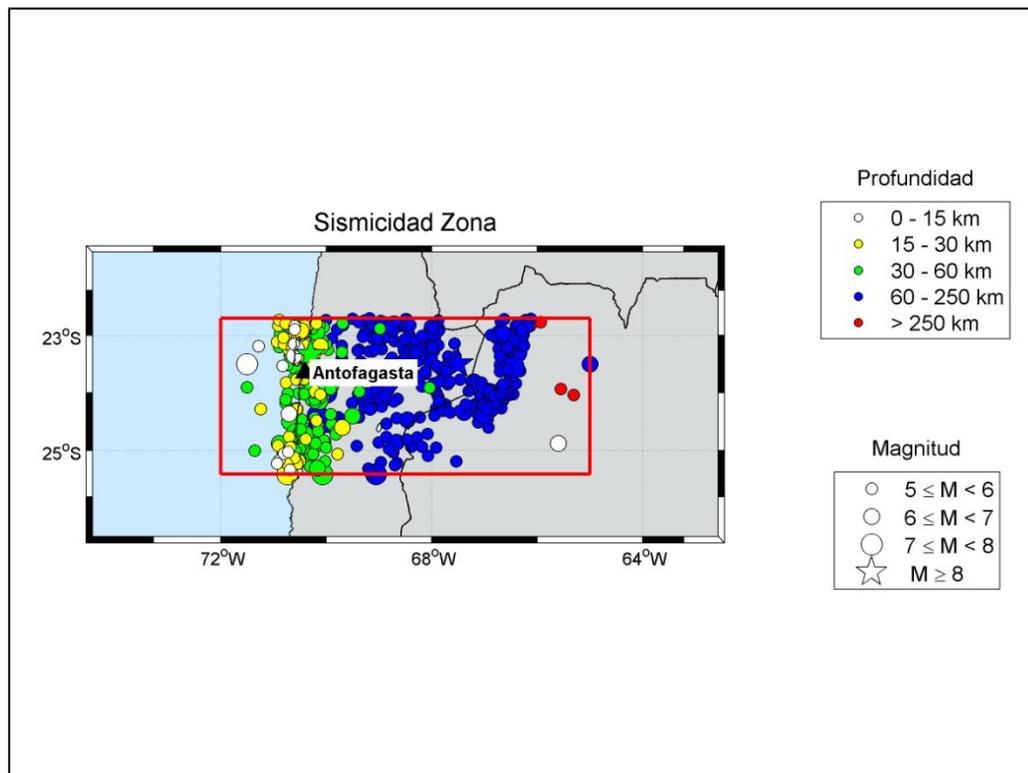


Figura B 27: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 3

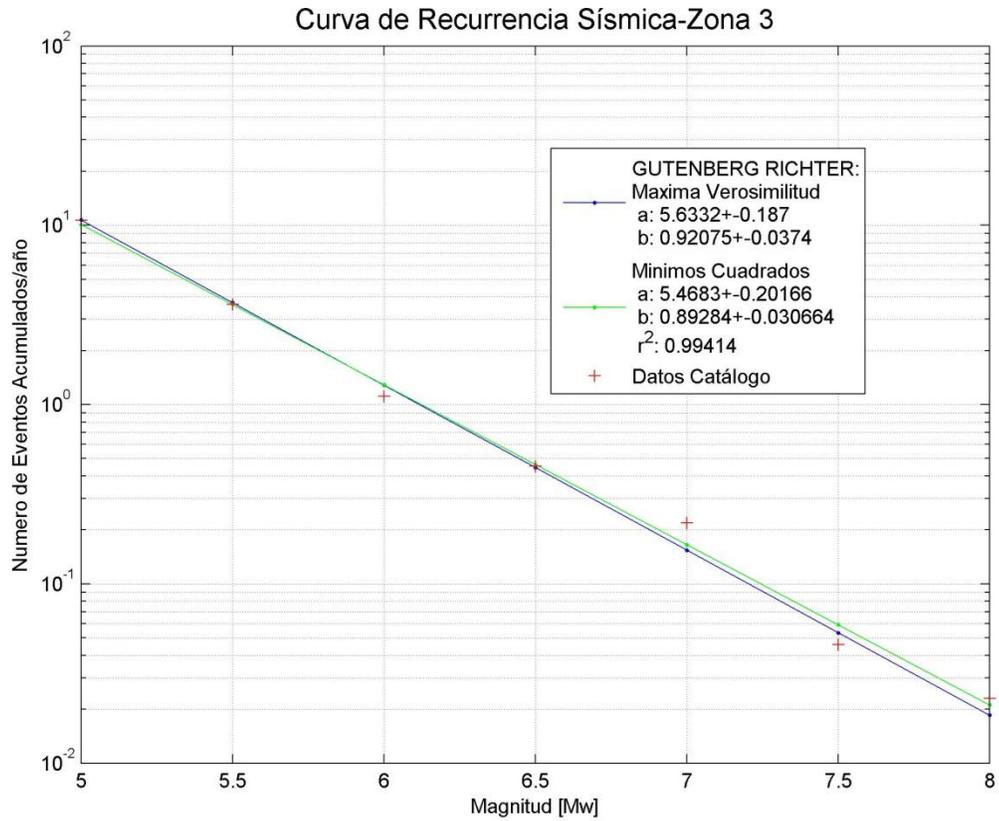


Figura B 28: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 3

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 3		Tiempo considerado
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	
≥ 5	10.703	10.094	47
≥ 5.5	3.708	3.611	47
≥ 6	1.285	1.292	55
≥ 6.5	0.445	0.462	55
≥ 7	0.154	0.165	87
≥ 7.5	0.053	0.059	87
≥ 8	0.019	0.021	87

Tabla B 14: Información Gutenberg-Richter – Zona 3

Sismos Subducción Interplaca

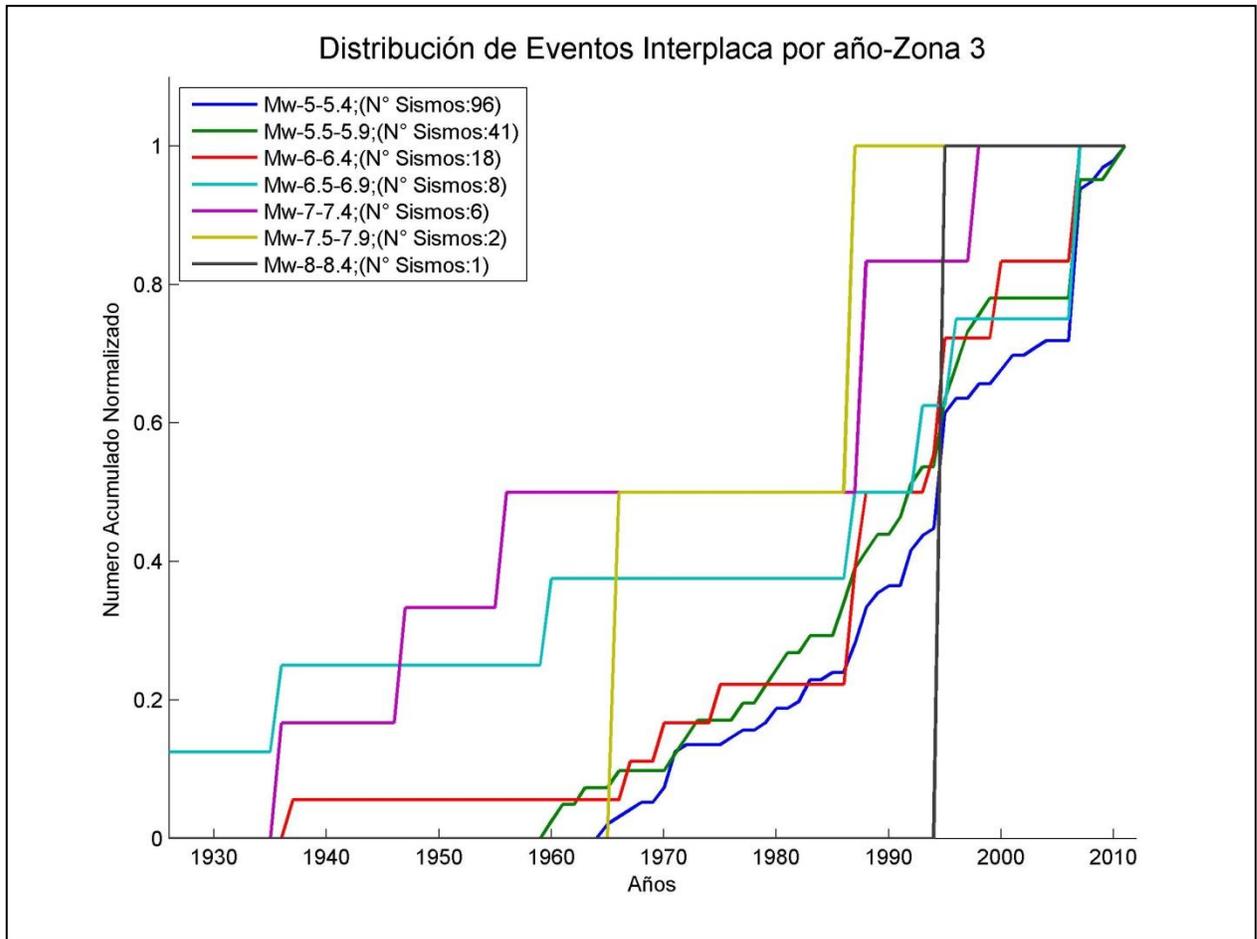


Figura B 29: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona3

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 3 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	91	1970
[5.5 ;6 [	37	1970
[6 ;6.5 [	17	1966
[6.5 ;7 [	7	1935
[7 ;7.5 [	6	1935
[7.5 ;8 [	2	1935
[8 ;8.5 [	1	1935

Tabla B 15: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 3

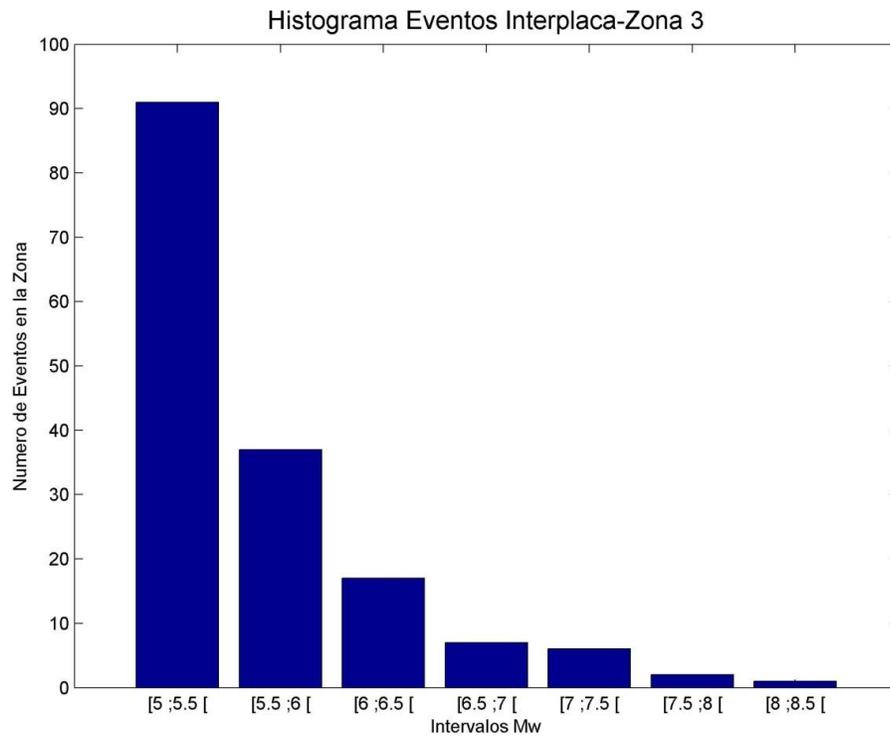


Figura B 30: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 3

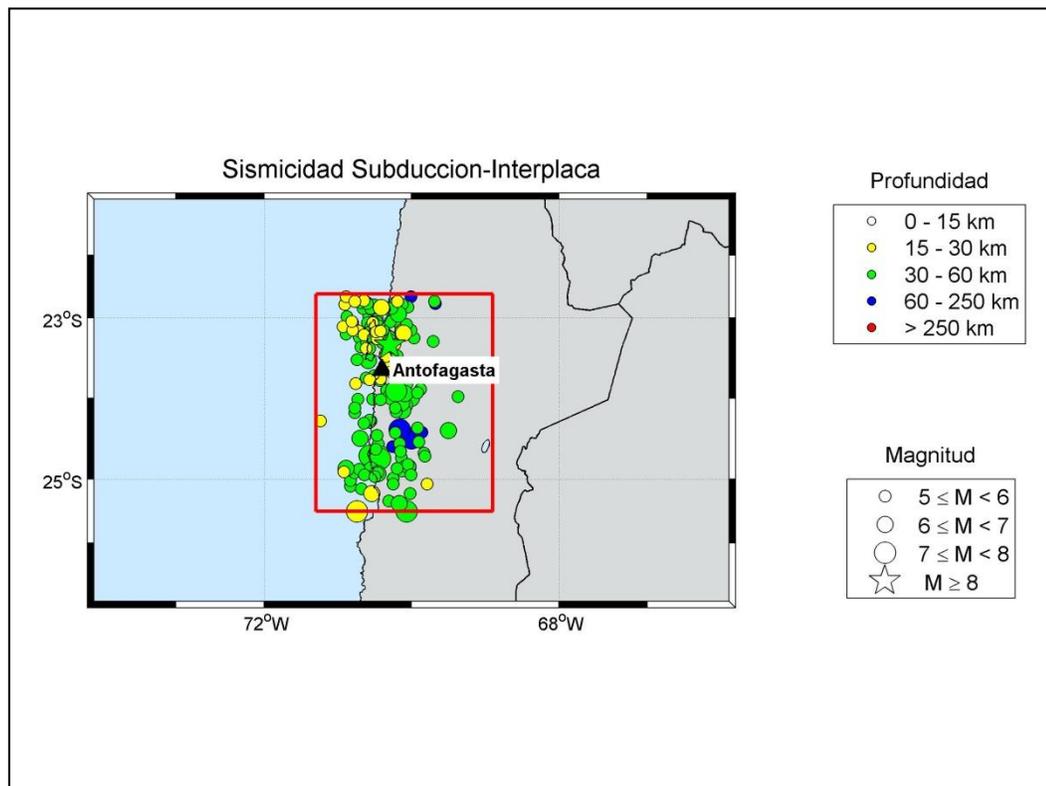


Figura B 31: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 3

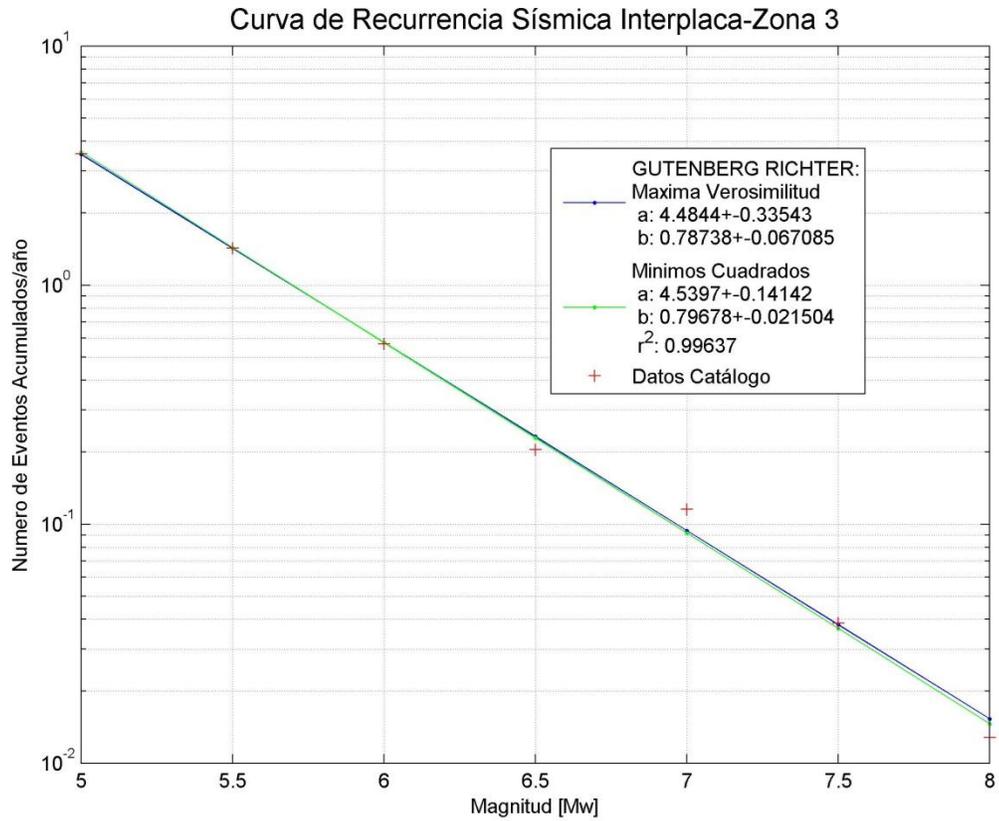


Figura B 32: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 3

Zona 3 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	3.528	3.596	43
≥ 5.5	1.425	1.437	43
≥ 6	0.576	0.574	47
≥ 6.5	0.233	0.229	78
≥ 7	0.094	0.092	78
≥ 7.5	0.038	0.037	78
≥ 8	0.015	0.015	78

Tabla B 16.: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 3

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

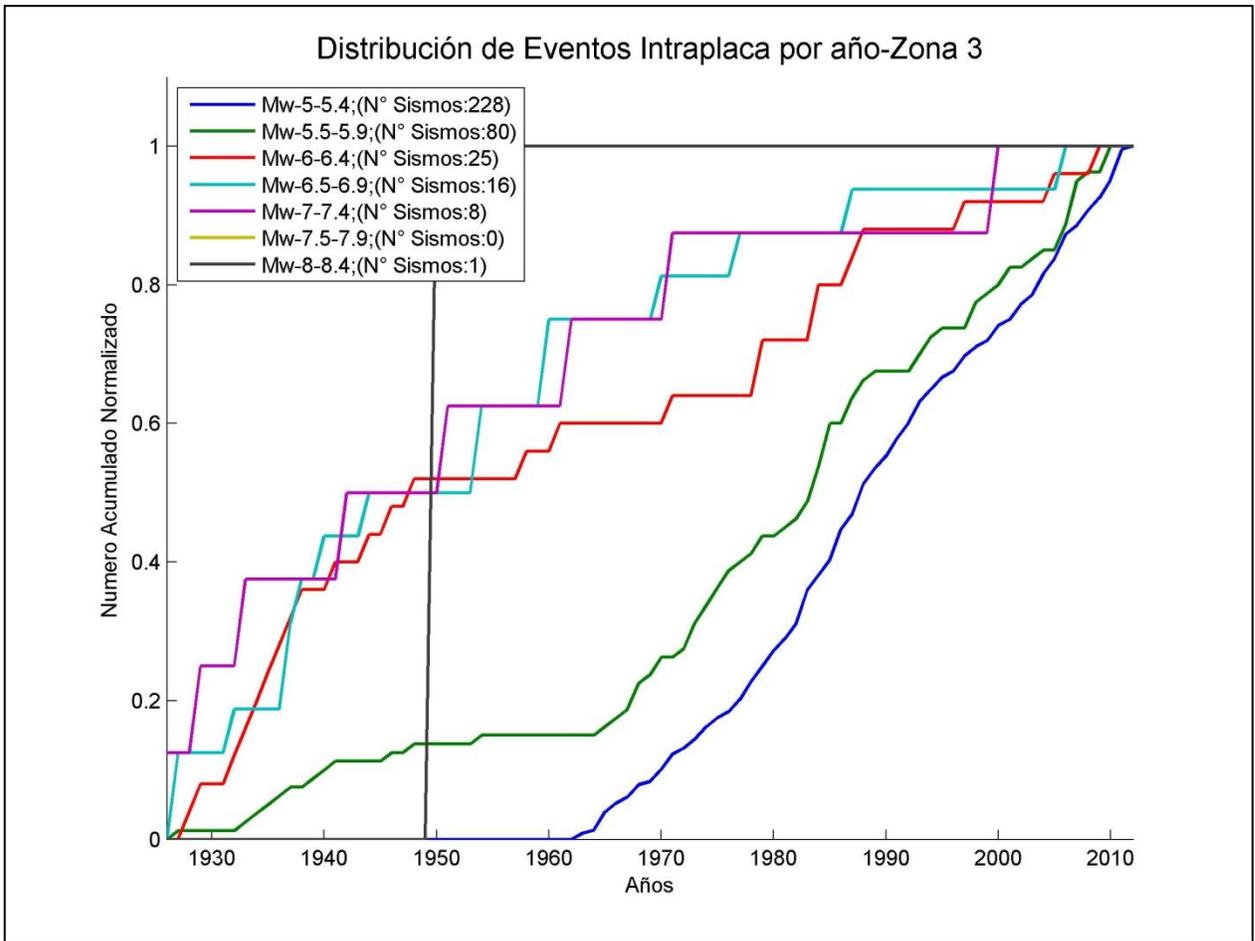


Figura B 33: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 3

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 3 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	228	1960
[5.5 ;6 [	68	1960
[6 ;6.5 [	16	1940
[6.5 ;7 [	14	1930
[7 ;7.5 [	8	1926
[7.5 ;8 [	0	1926
[8 ;8.5 [	1	1926

Tabla B 17: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 3

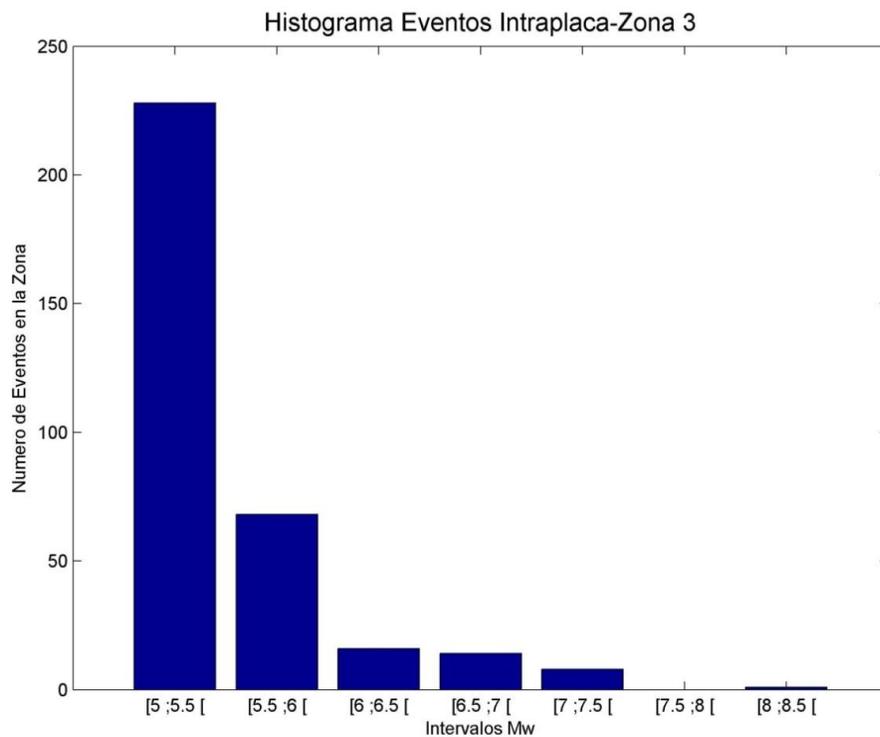


Figura B 34: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 3

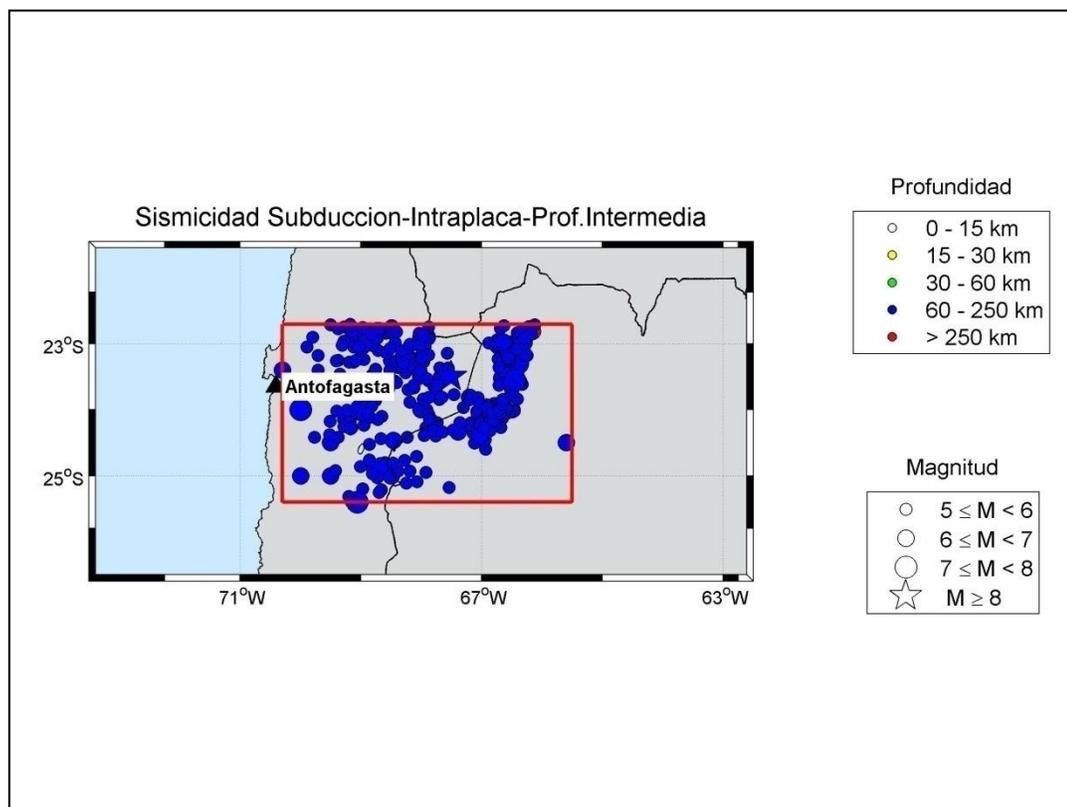


Figura B 35: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 3

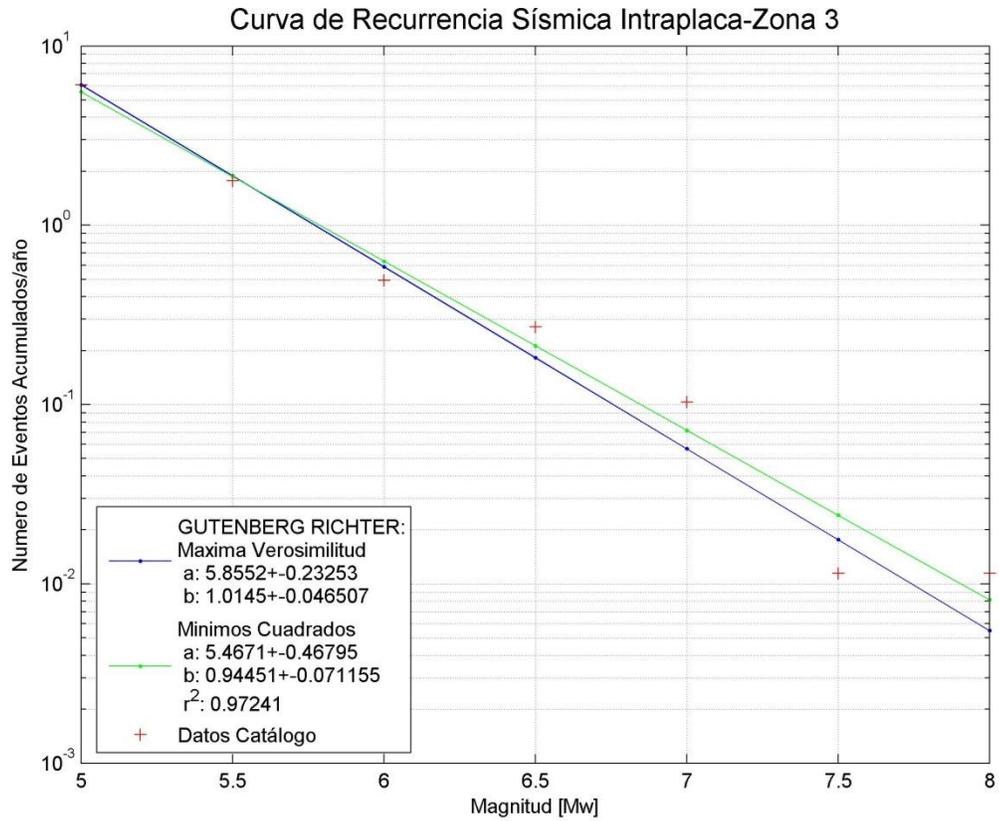


Figura B 36: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 3

Zona 3 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	6.062	5.553	53
≥5.5	1.885	1.872	53
≥6	0.586	0.631	73
≥6.5	0.182	0.213	83
≥7	0.057	0.072	87
≥7.5	0.018	0.024	87
≥8	0.005	0.008	87

Tabla B 18: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 3

B.1.4 ZONA 4.

Todo el Catálogo

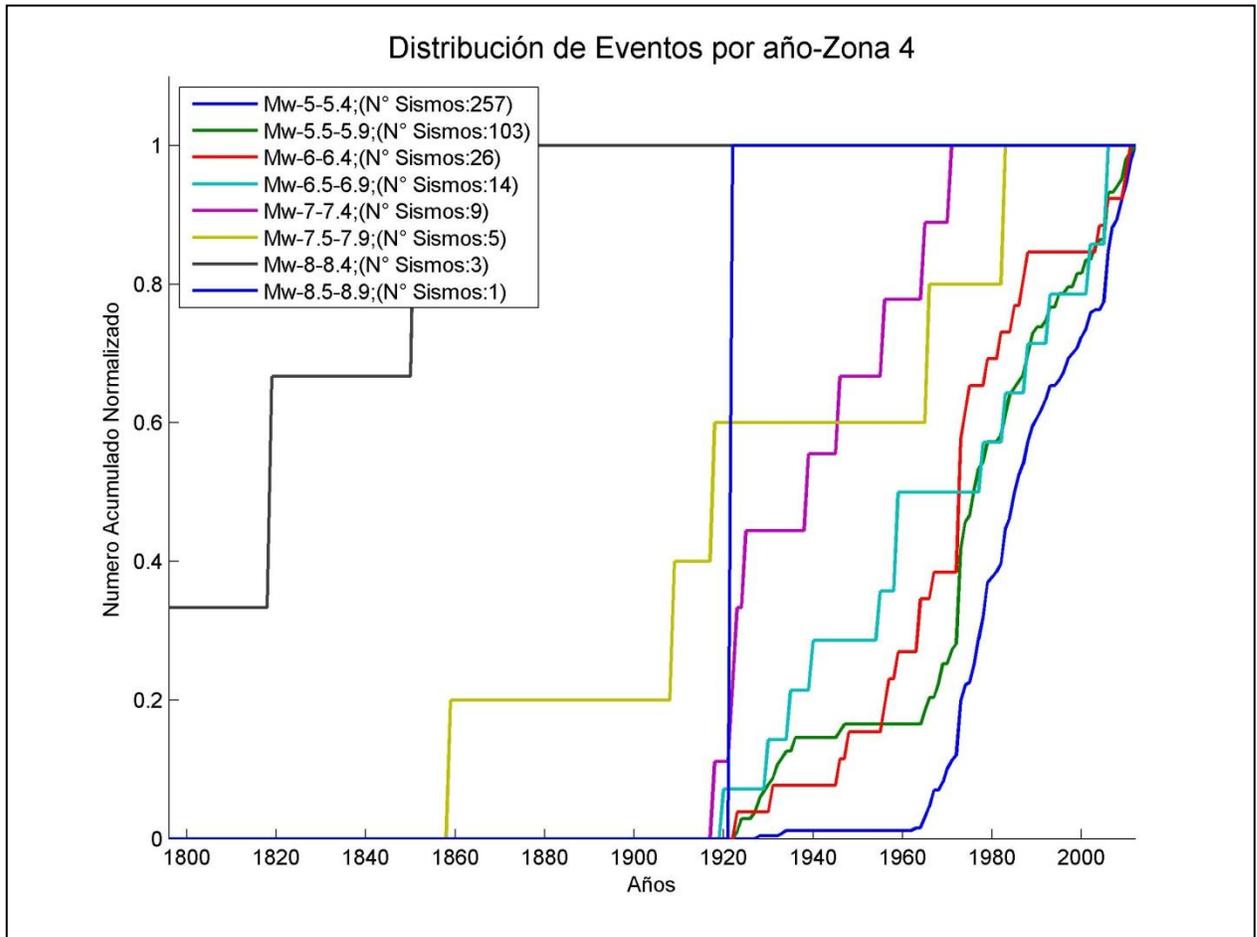


Figura B 37: Distribución de Sismos Zona 4

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 4	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	254	1960
[5.5 ;6 [	86	1960
[6 ;6.5 [	24	1946
[6.5 ;7 [	13	1930
[7 ;7.5 [	9	1918
[7.5 ;8 [	5	1859
[8 ;8.5 [	3	1796
[8.5 ;9 [	1	1796

Tabla B 19: Años de Completitud del Catálogo para Zona 4

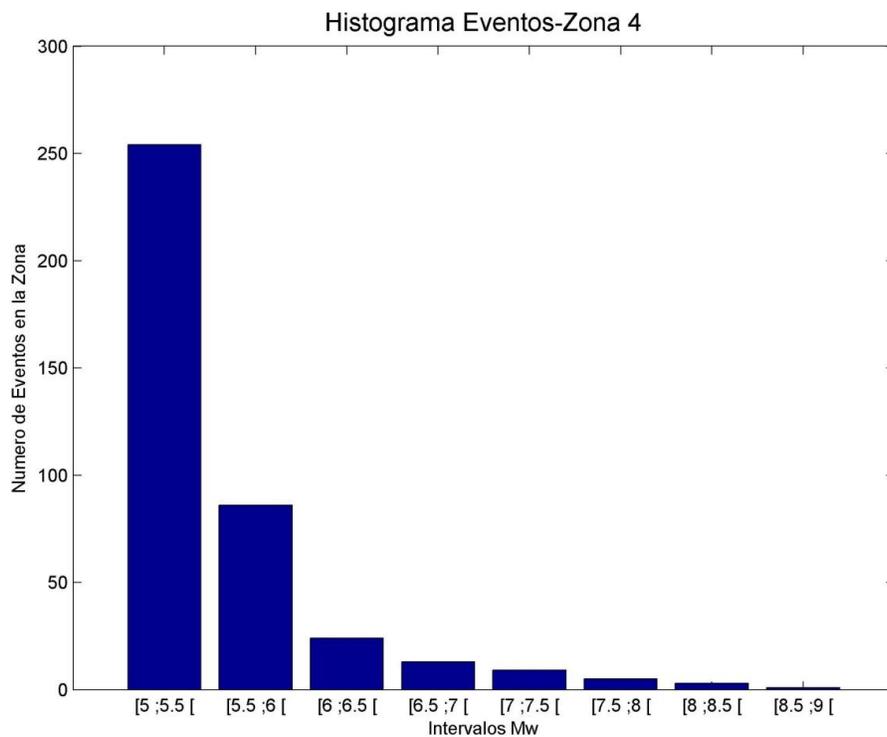


Figura B 38: Histograma de Sismos Zona 4

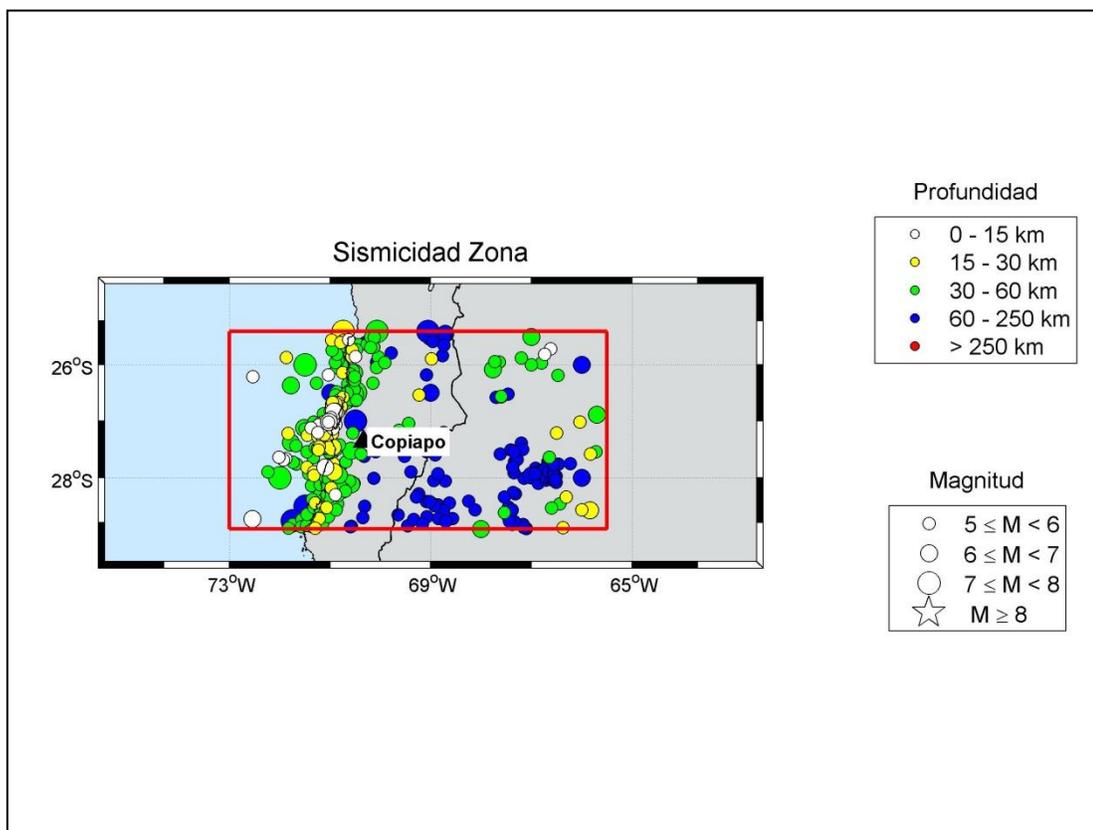


Figura B 39: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 4

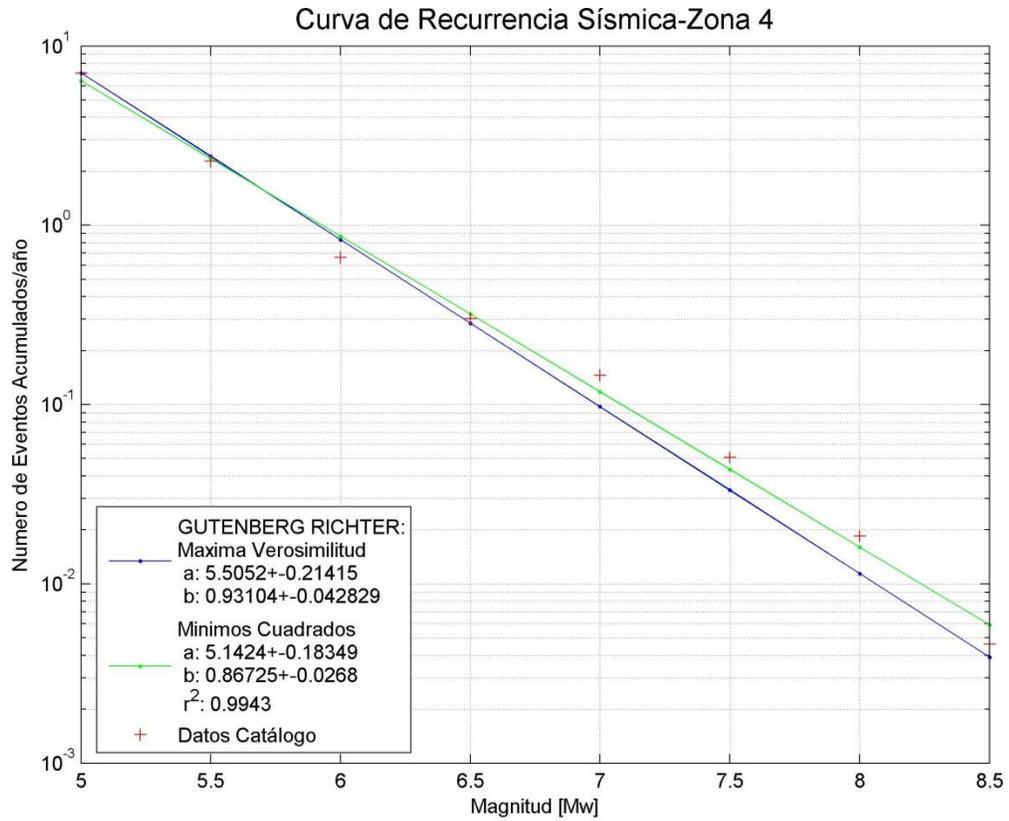


Figura B 40: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 4

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 4		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	7.079	6.400	53
≥ 5.5	2.424	2.358	53
≥ 6	0.830	0.869	67
≥ 6.5	0.284	0.320	83
≥ 7	0.097	0.118	95
≥ 7.5	0.033	0.043	154
≥ 8	0.011	0.016	217
≥ 8.5	0.004	0.006	217

Tabla B 20: Información Gutenberg-Richter – Zona 4

Sismos Subducción Interplaca

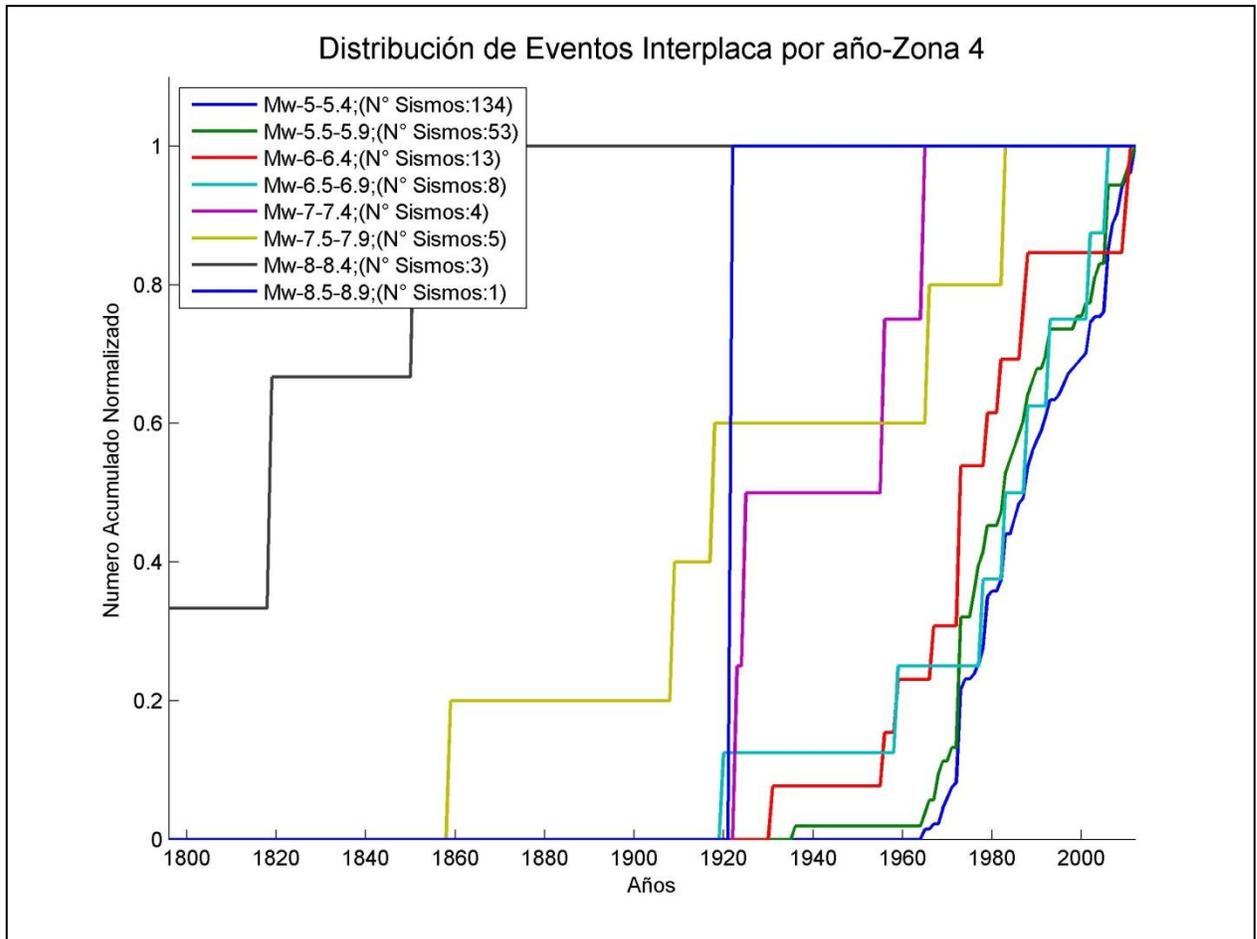


Figura B 41: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 4

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 4 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	134	1960
[5.5 ;6 [	52	1960
[6 ;6.5 [	12	1955
[6.5 ;7 [	7	1955
[7 ;7.5 [	4	1920
[7.5 ;8 [	5	1796
[8 ;8.5 [	3	1796
[8.5 ;9 [	1	1796

Tabla B 21: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 4

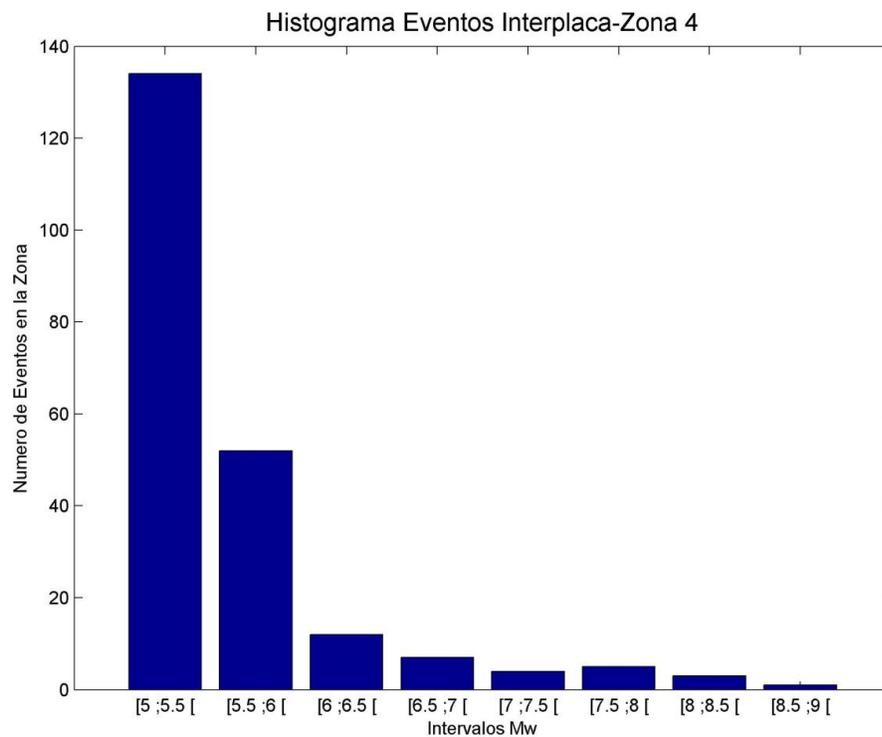


Figura B 42: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 4

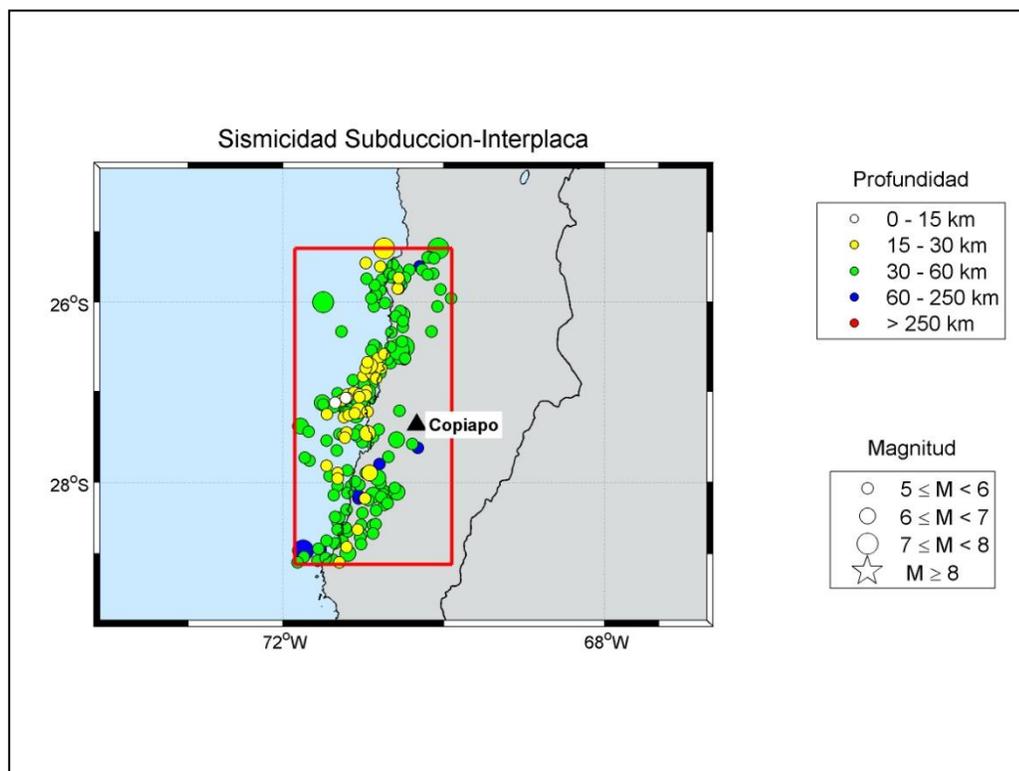


Figura B 43: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 4

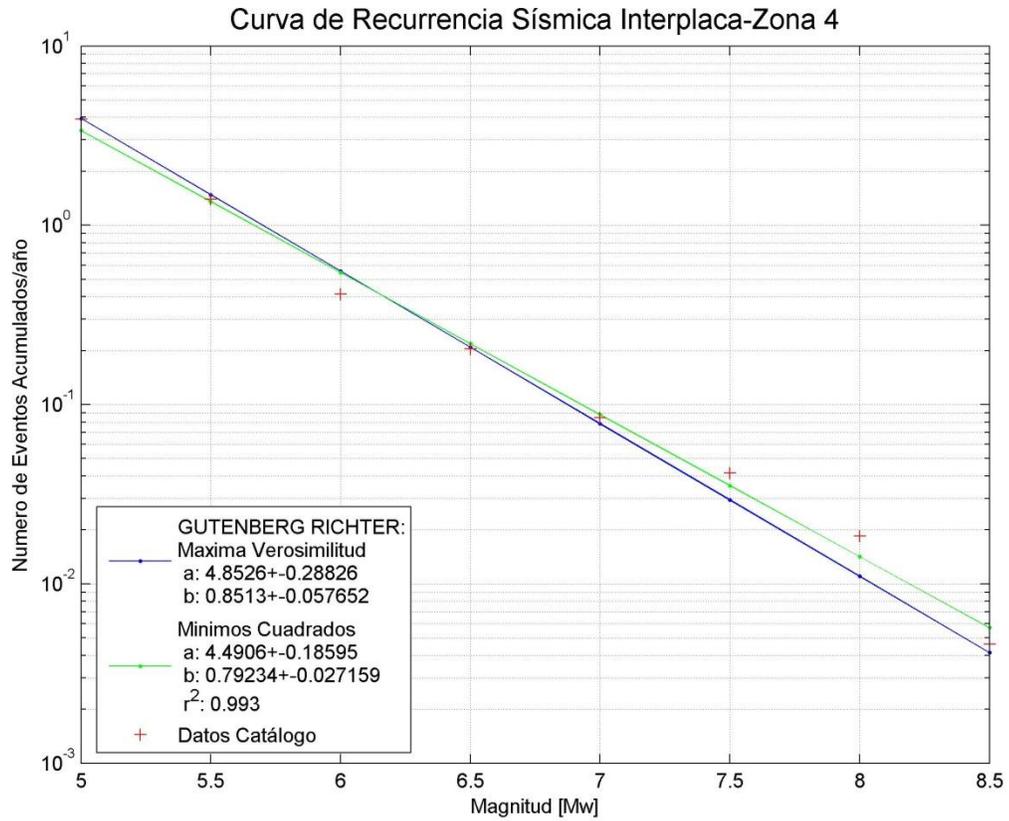


Figura B 44: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 4

Zona 4 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	3.945	3.380	53
≥5.5	1.481	1.357	53
≥6	0.556	0.545	58
≥6.5	0.209	0.219	58
≥7	0.078	0.088	93
≥7.5	0.029	0.035	217
≥8	0.011	0.014	217
≥8.5	0.004	0.006	217

Tabla B 22: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 4

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

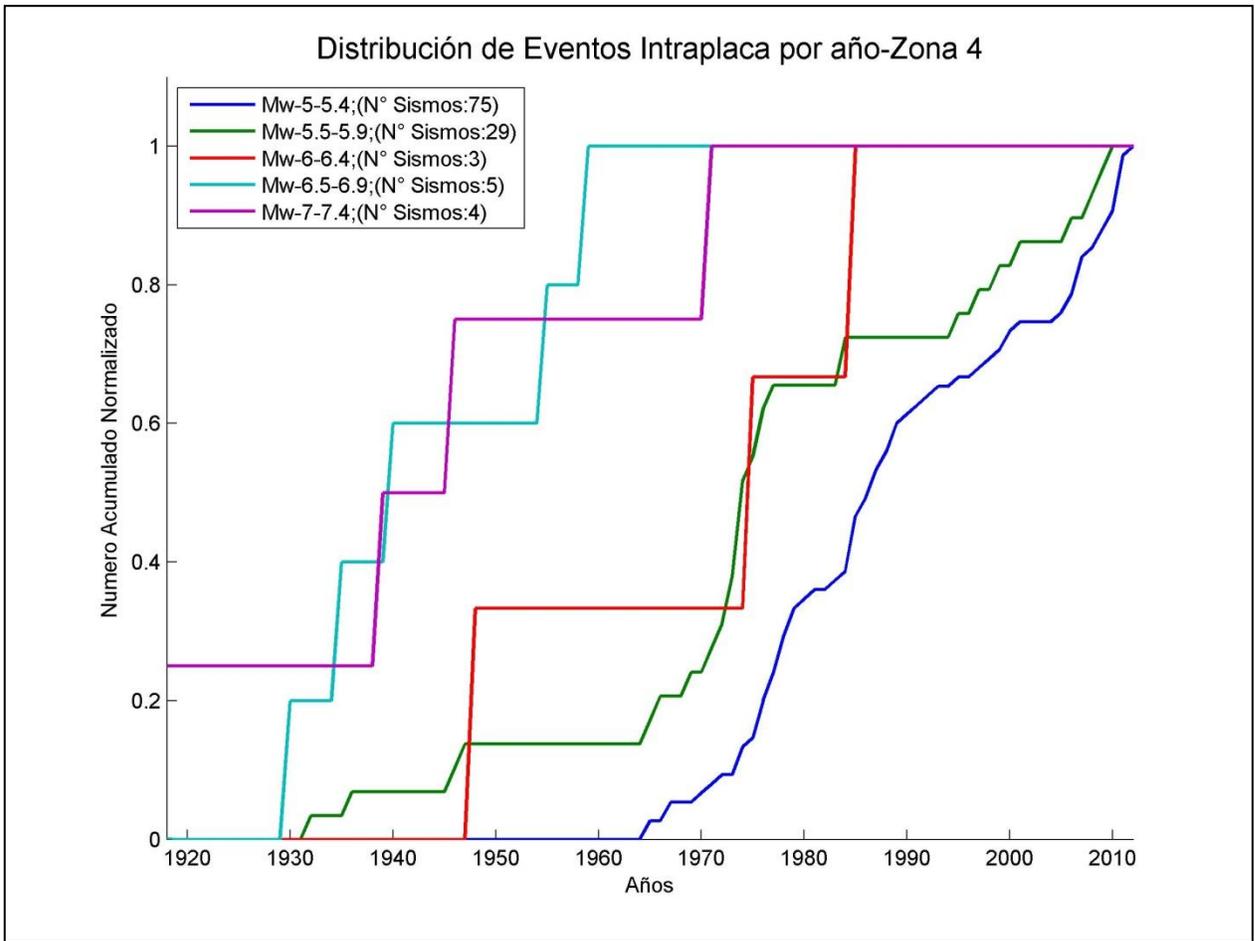


Figura B 45: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 4

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 4 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	75	1960
[5.5 ;6 [	25	1960
[6 ;6.5 [	3	1945
[6.5 ;7 [	5	1930
[7 ;7.5 [	4	1918

Tabla B 23: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 4

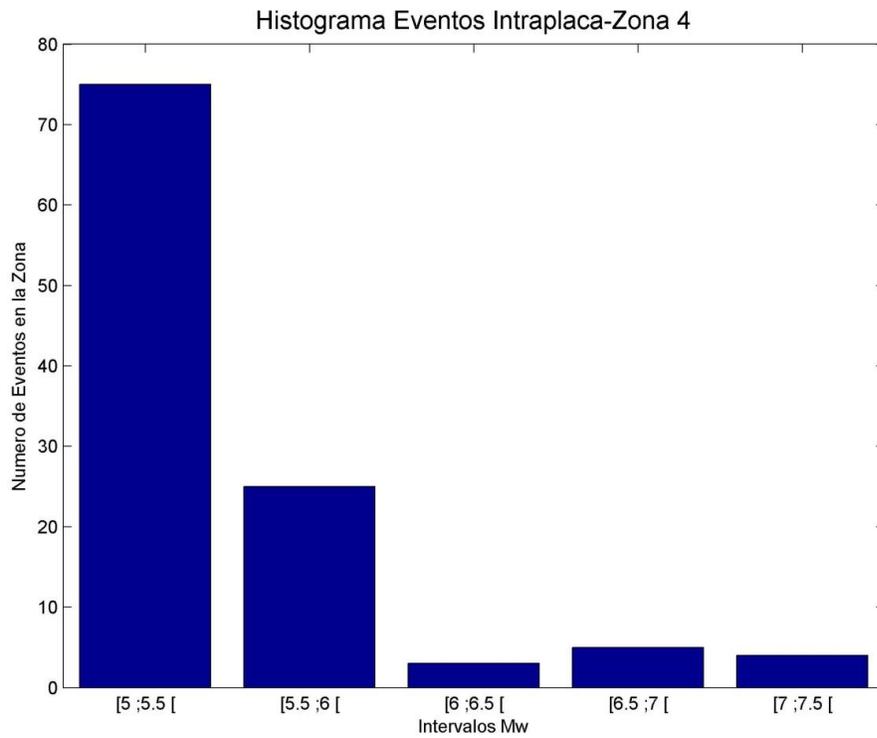


Figura B 46: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 4

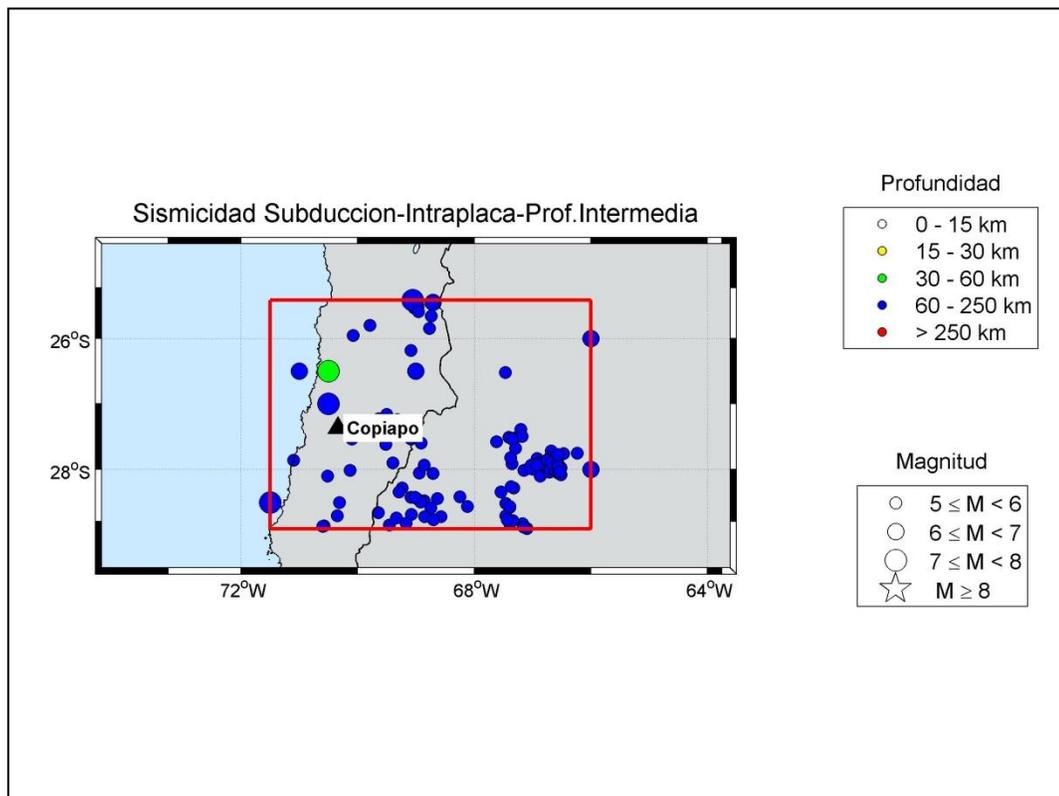


Figura B 47: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 4

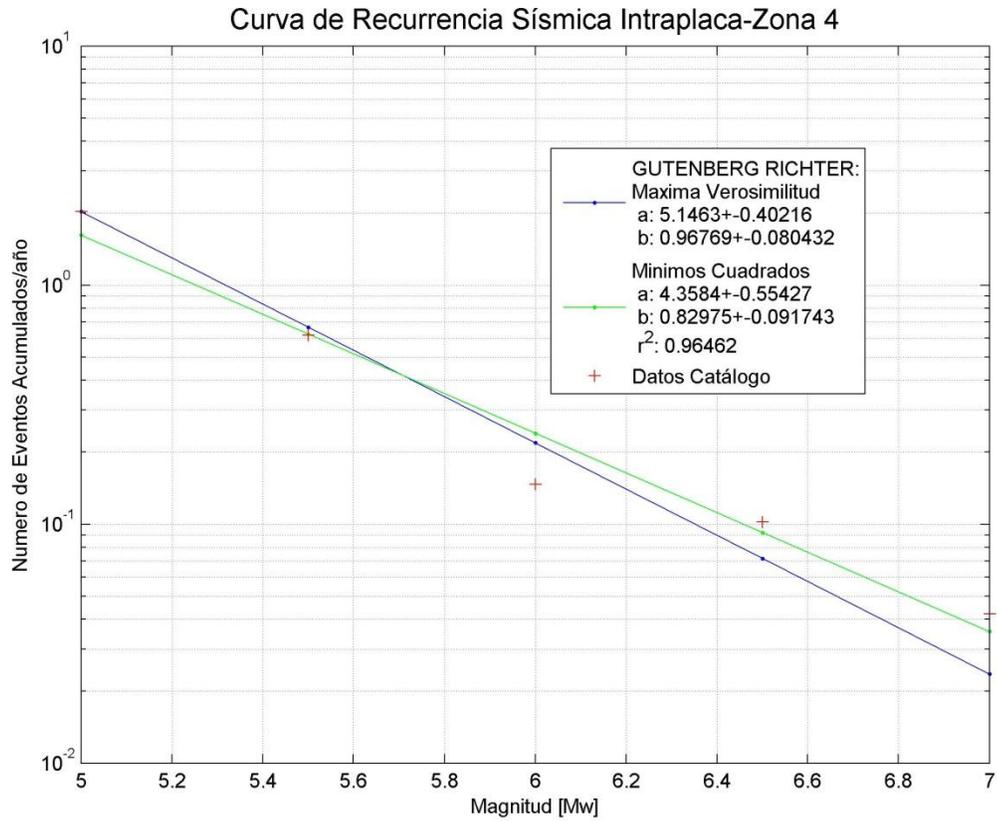


Figura B 48: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 4

Zona 4 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	2.031	1.620	53
≥ 5.5	0.667	0.623	53
≥ 6	0.219	0.240	68
≥ 6.5	0.072	0.092	83
≥ 7	0.024	0.035	95

Tabla B 24: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona

B.1.5 ZONA 5.

Todo el Catálogo

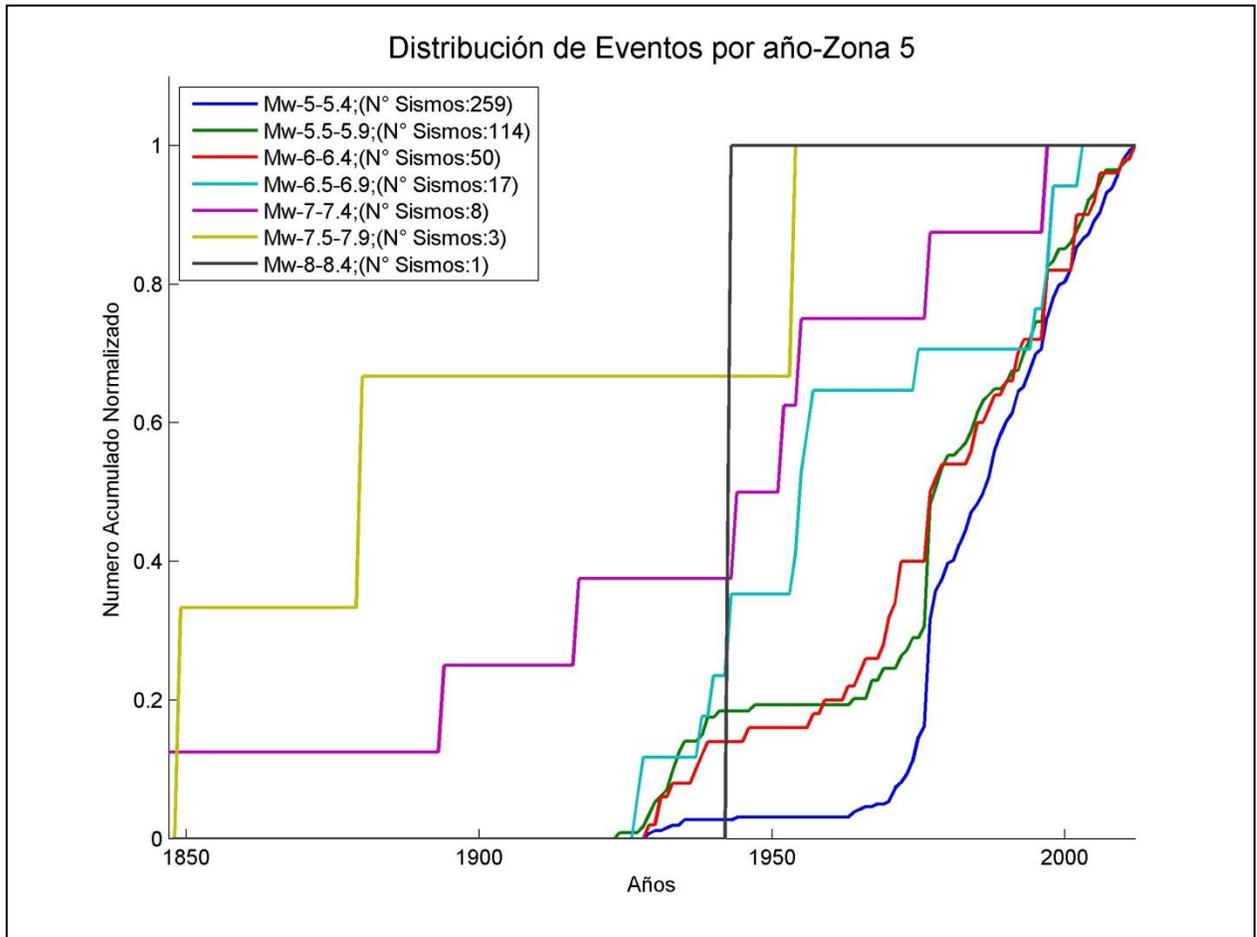


Figura B 49: Distribución de Sismos Zona 5

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 5	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	246	1970
[5.5 ;6 [	86	1970
[6 ;6.5 [	43	1945
[6.5 ;7 [	15	1935
[7 ;7.5 [	7	1894
[7.5 ;8 [	3	1849
[8 ;8.5 [	1	1849

Tabla B 25: Años de Completitud del Catálogo para Zona 5

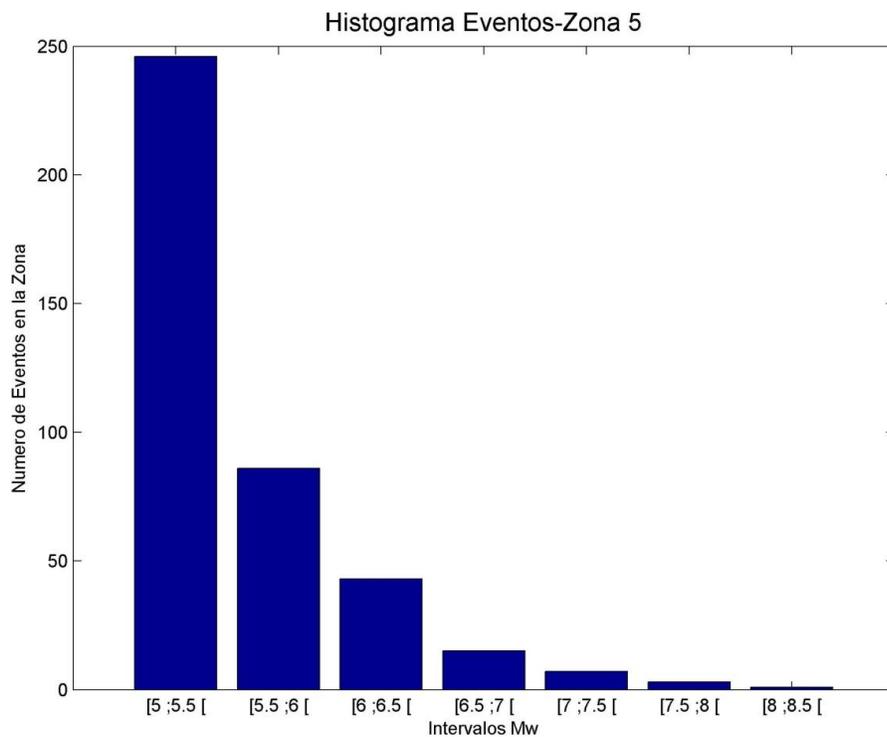


Figura B 50: Histograma de Sismos Zona 5

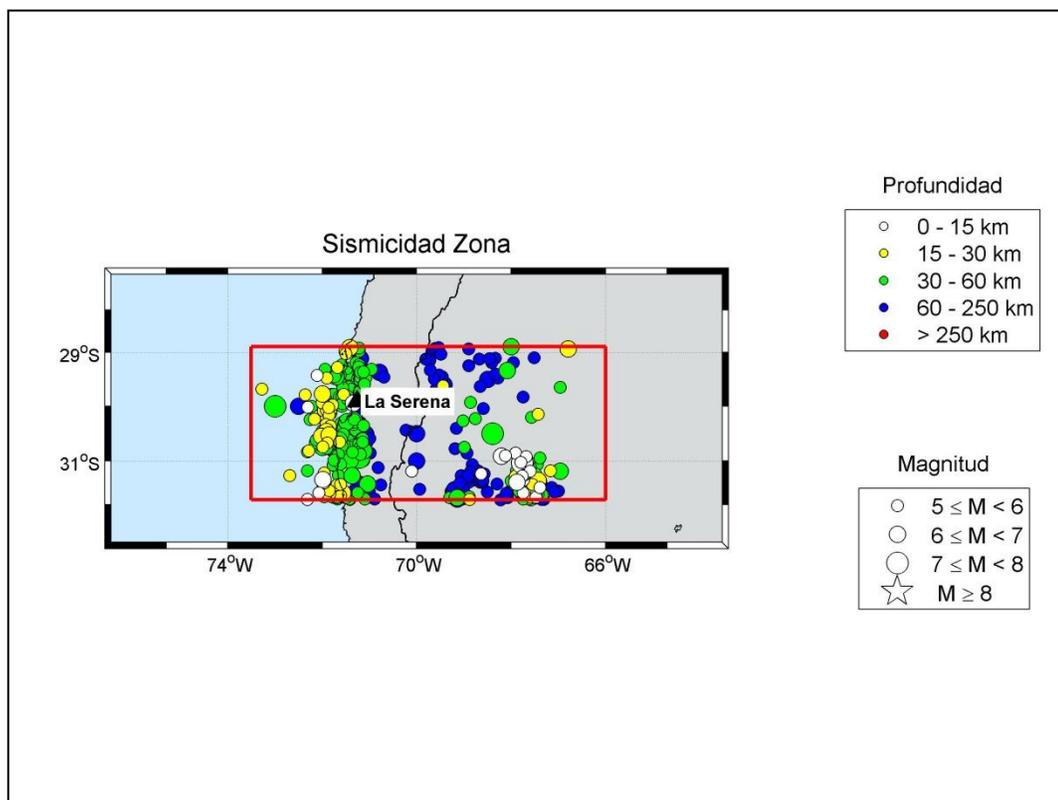


Figura B 51: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 5

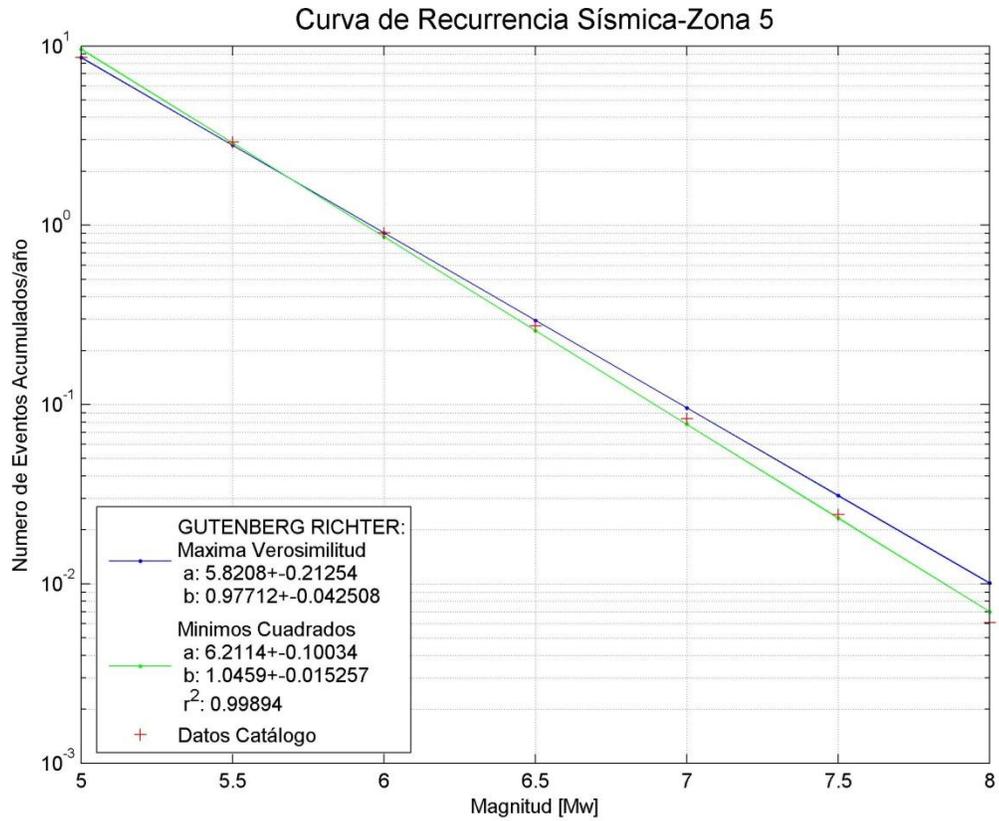


Figura B 52: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 5

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 5		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	8.614	9.589	43
≥ 5.5	2.797	2.876	43
≥ 6	0.908	0.863	68
≥ 6.5	0.295	0.259	78
≥ 7	0.096	0.078	119
≥ 7.5	0.031	0.023	164
≥ 8	0.010	0.007	164

Tabla B 26: Información Gutenberg-Richter – Zona 5

Sismos Subducción Interplaca

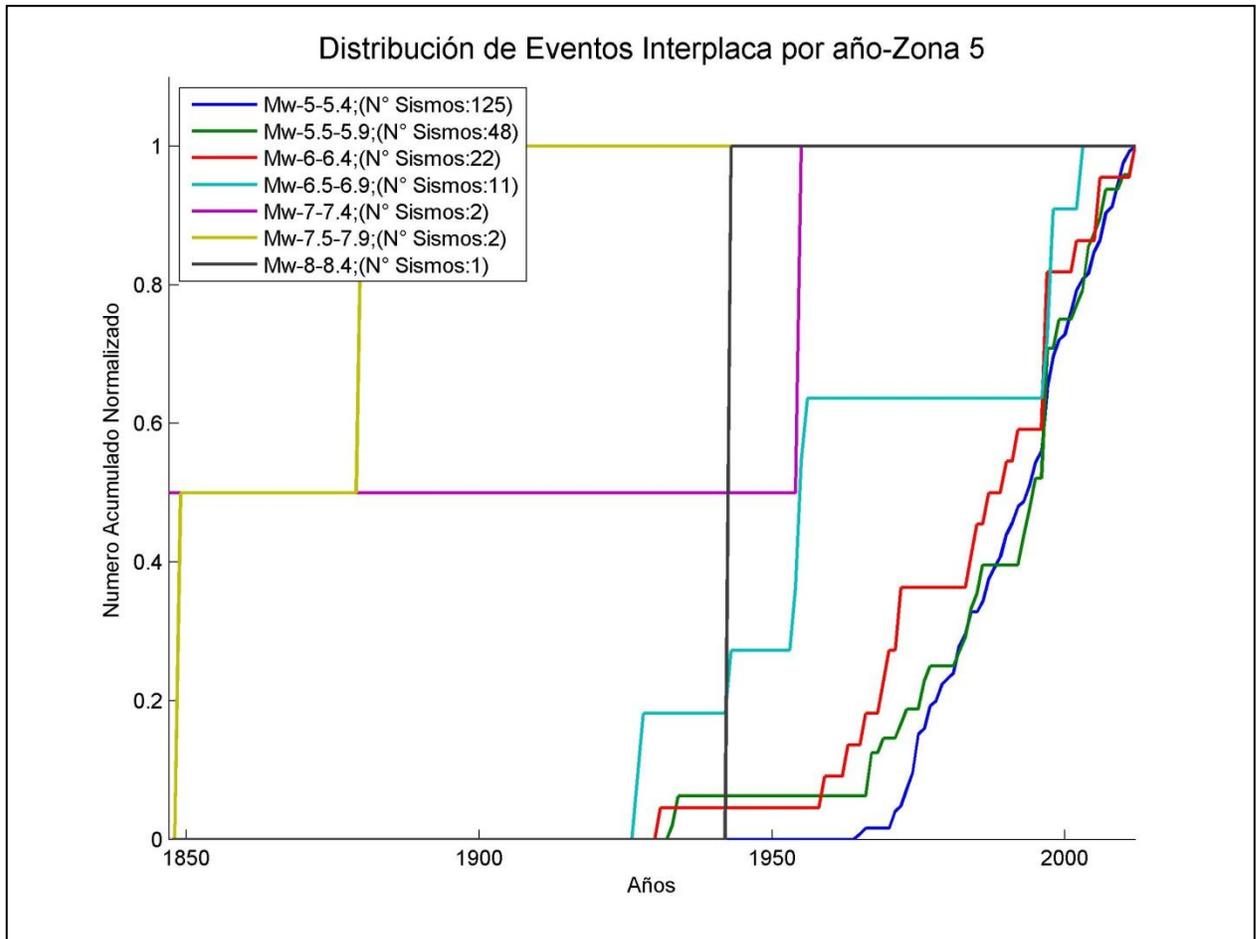


Figura B 53: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 5

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 5 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	123	1970
[5.5 ;6 [	45	1965
[6 ;6.5 [	21	1955
[6.5 ;7 [	9	1930
[7 ;7.5 [	1	1900
[7.5 ;8 [	2	1849
[8 ;8.5 [	1	1849

Tabla B 27: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 5

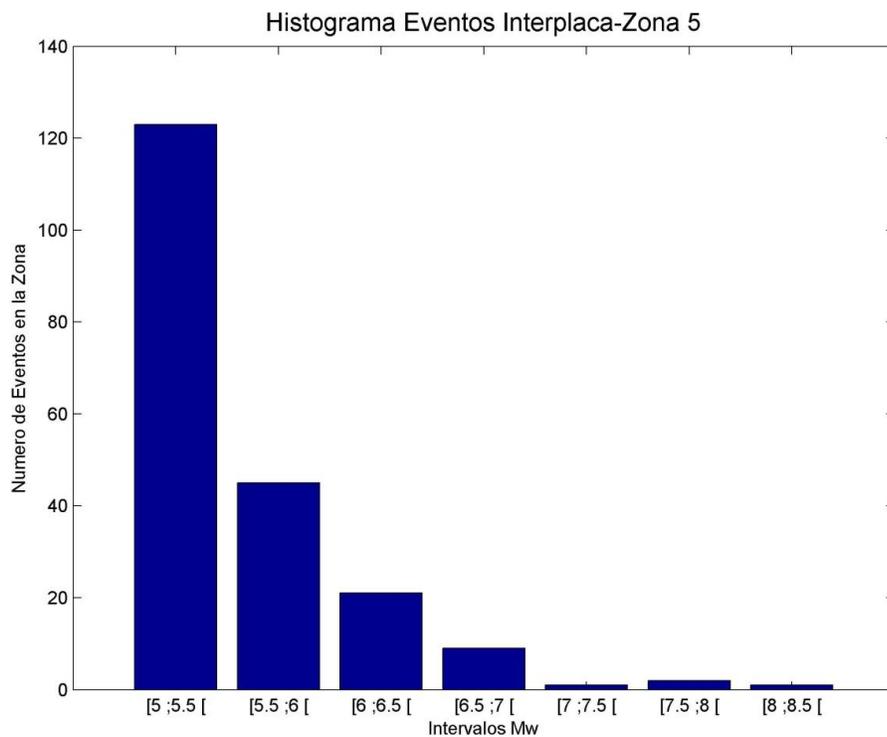


Figura B 54: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 5

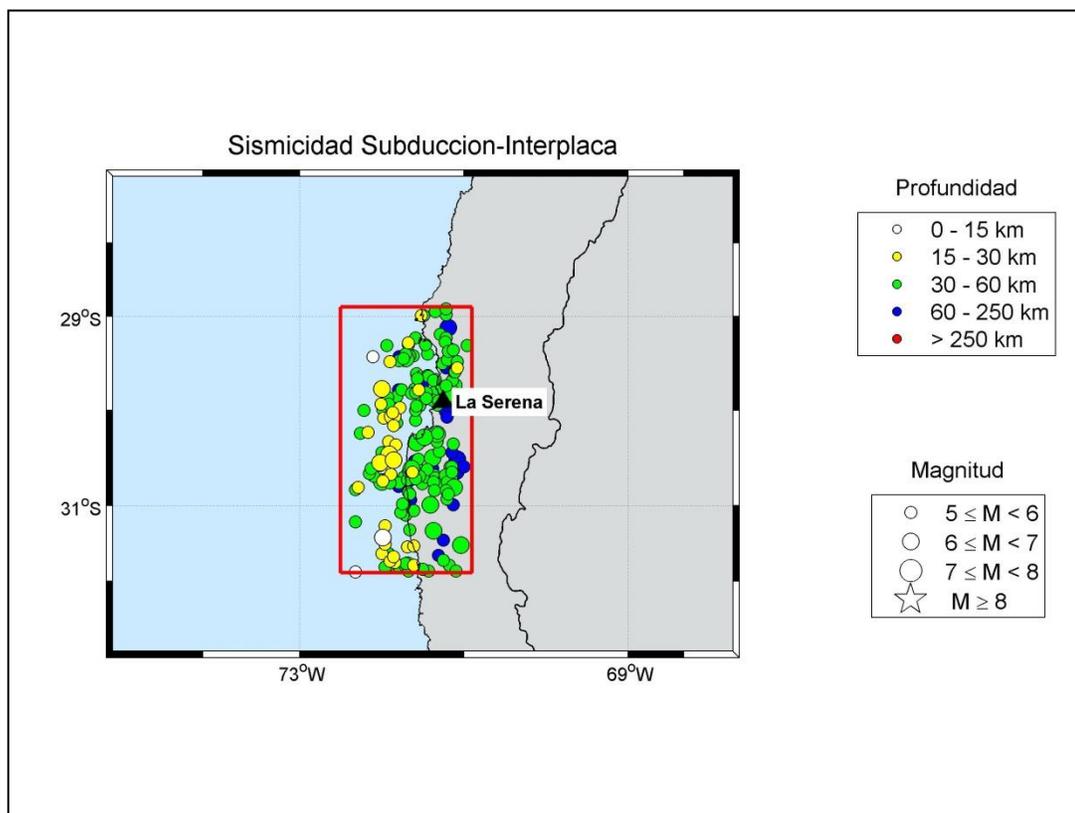


Figura B 55: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 5

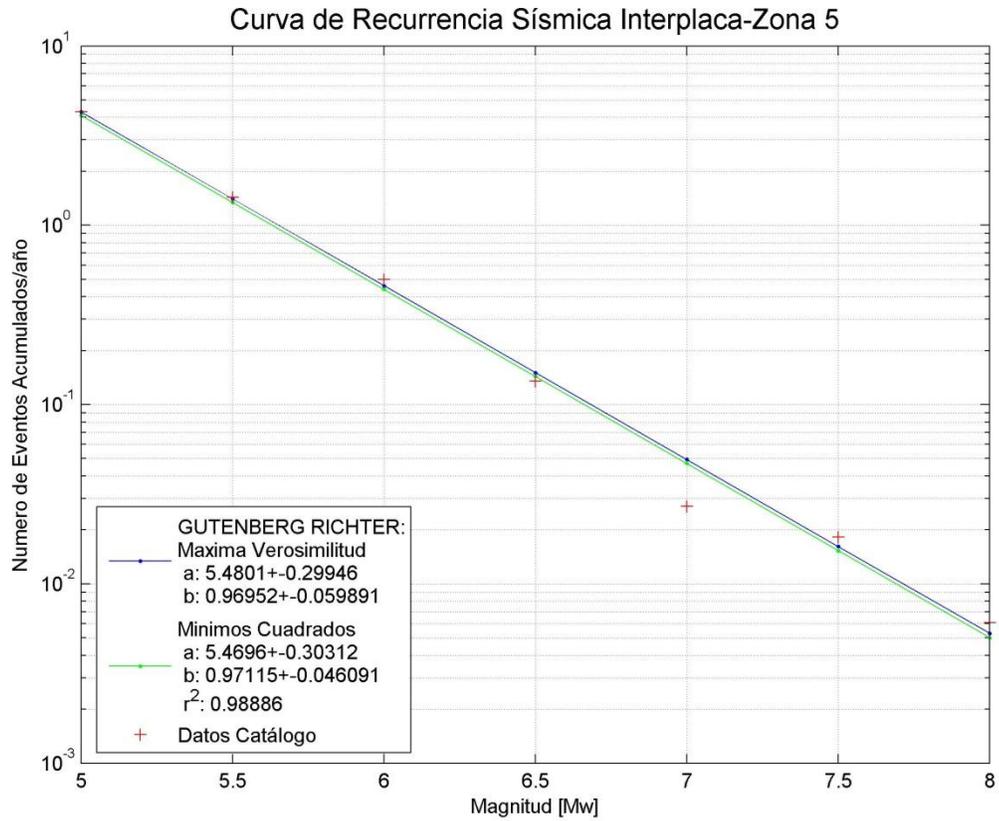


Figura B 56: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 5

Zona 5 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	4.291	4.110	43
≥ 5.5	1.405	1.344	48
≥ 6	0.460	0.439	58
≥ 6.5	0.151	0.144	83
≥ 7	0.049	0.047	113
≥ 7.5	0.016	0.015	164
≥ 8	0.005	0.005	164

Tabla B 28: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 5

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

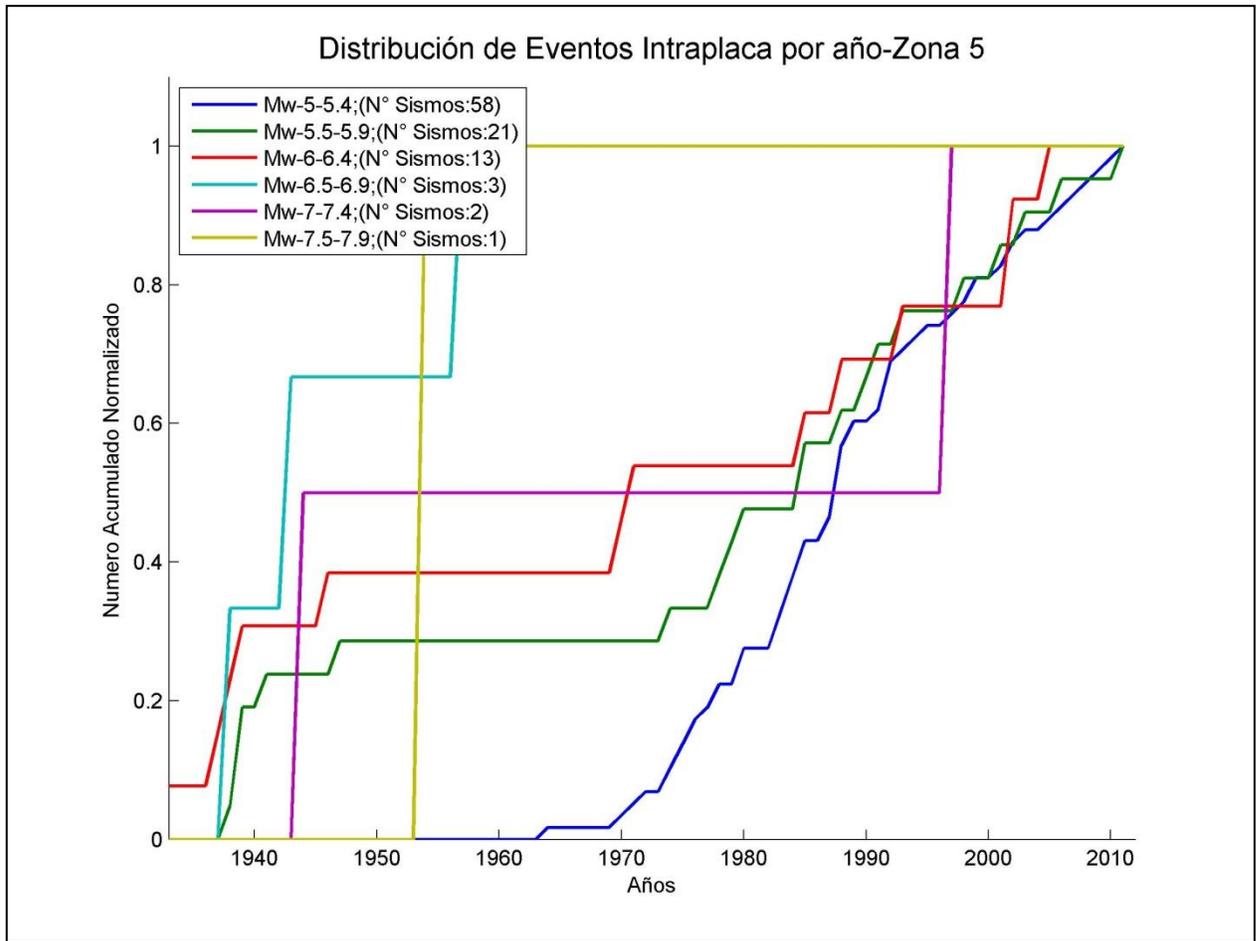


Figura B 57: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 5

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 5 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	57	1970
[5.5 ;6 [	15	1970
[6 ;6.5 [	8	1970
[6.5 ;7 [	3	1935
[7 ;7.5 [	2	1935
[7.5 ;8 [	1	1935

Tabla B 29: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 5

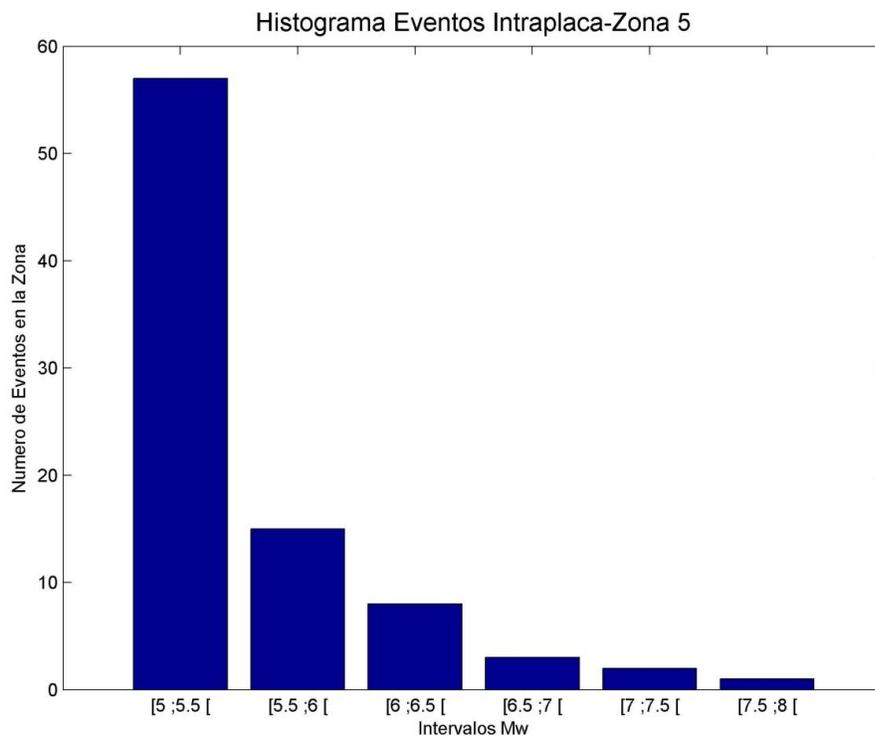


Figura B 58: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 5

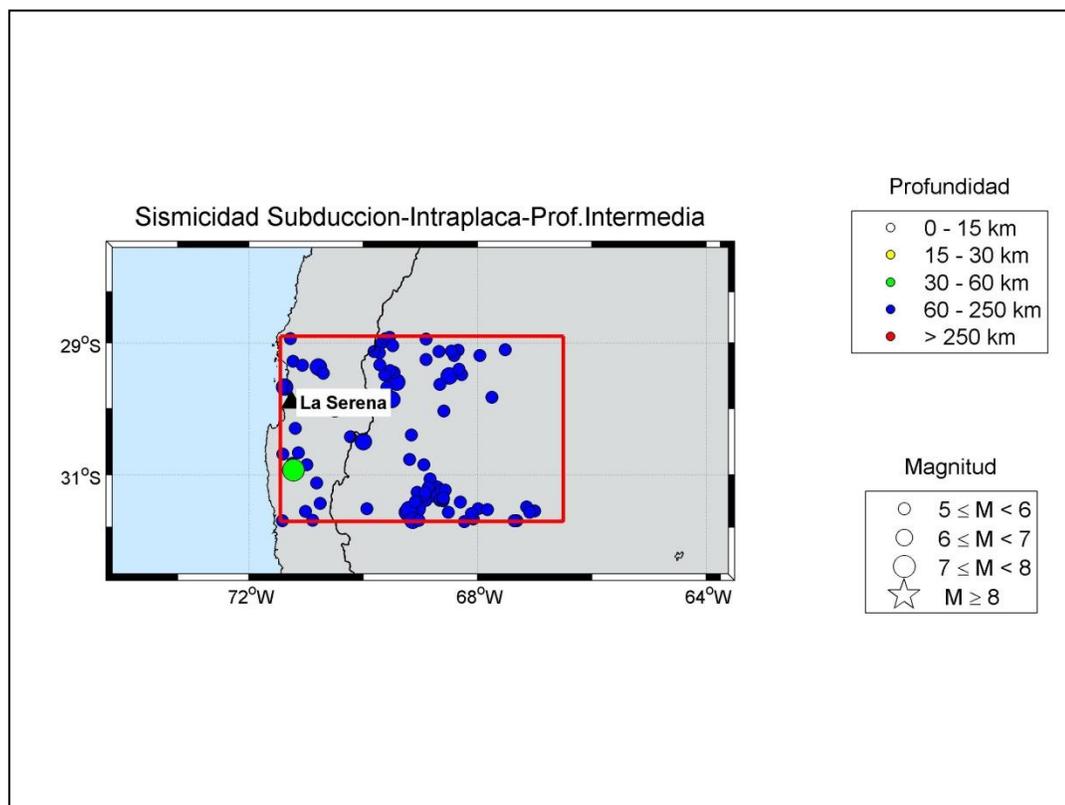


Figura B 59: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 5

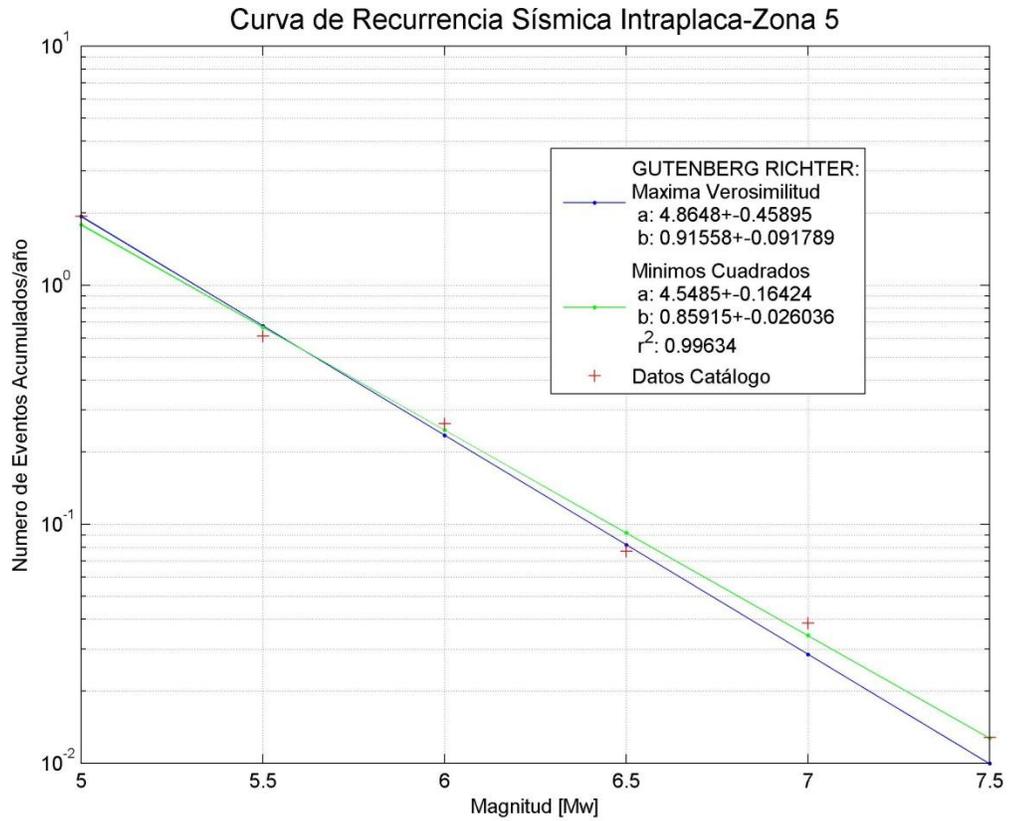


Figura B 60: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 5

Zona 5 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	1.936	1.789	43
≥5.5	0.675	0.666	43
≥6	0.235	0.248	43
≥6.5	0.082	0.092	78
≥7	0.029	0.034	78
≥7.5	0.010	0.013	78

Tabla B 30: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 5

B.1.6 ZONA 6.

Todo el Catálogo

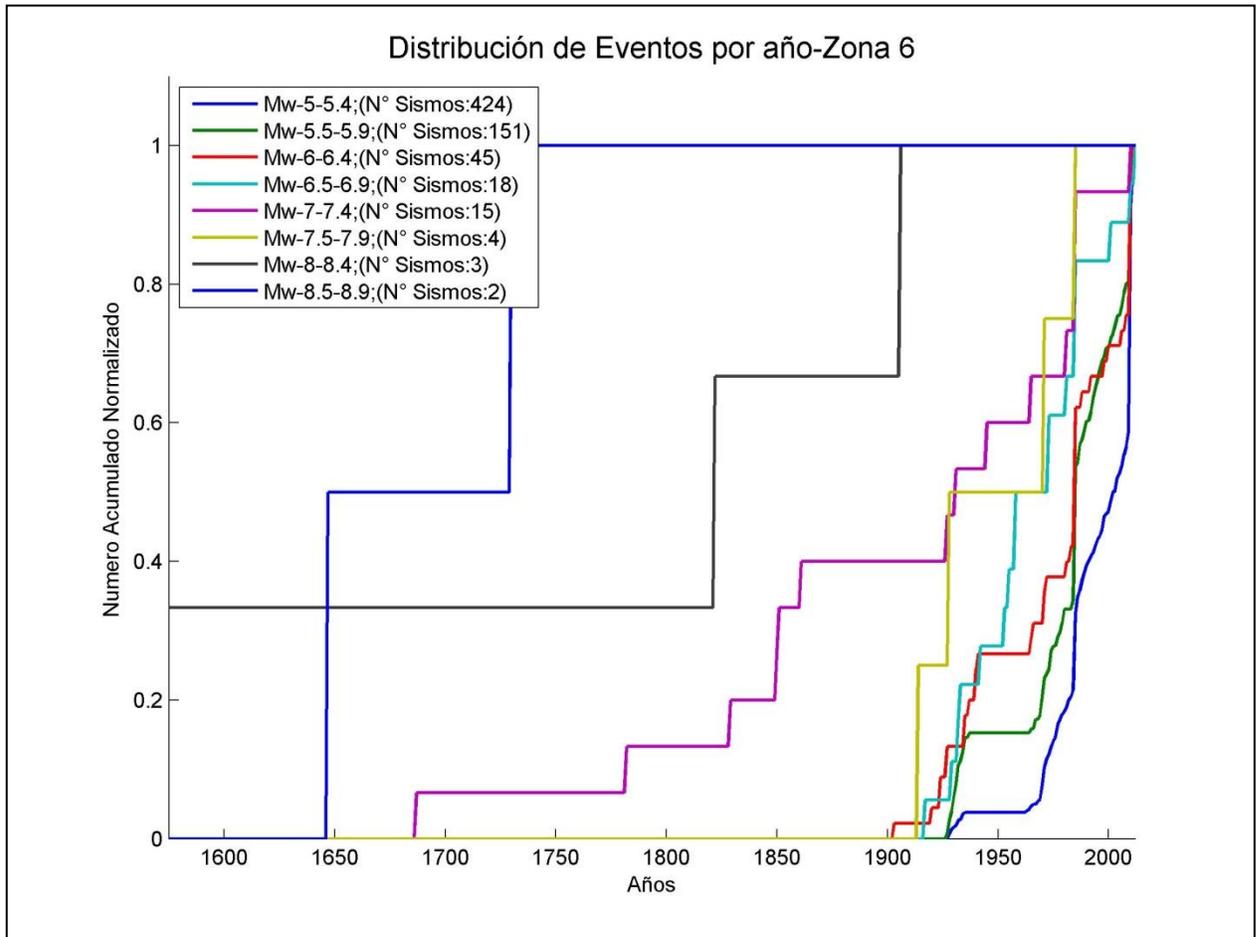


Figura B 61: Distribución de Sismos Zona 6

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 6	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	406	1965
[5.5 ;6 [	128	1965
[6 ;6.5 [	33	1960
[6.5 ;7 [	16	1930
[7 ;7.5 [	9	1925
[7.5 ;8 [	4	1820
[8 ;8.5 [	3	1575
[8.5 ;9 [	2	1575

Tabla B 31: Años de Completitud del Catálogo para Zona 6

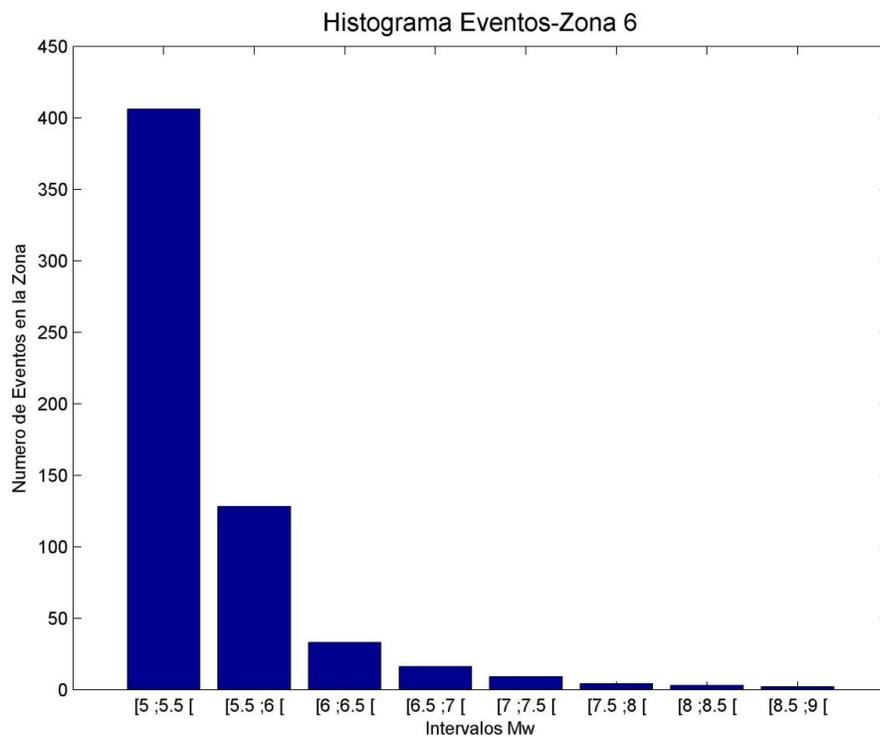


Figura B 62: Histograma de Sismos Zona 6

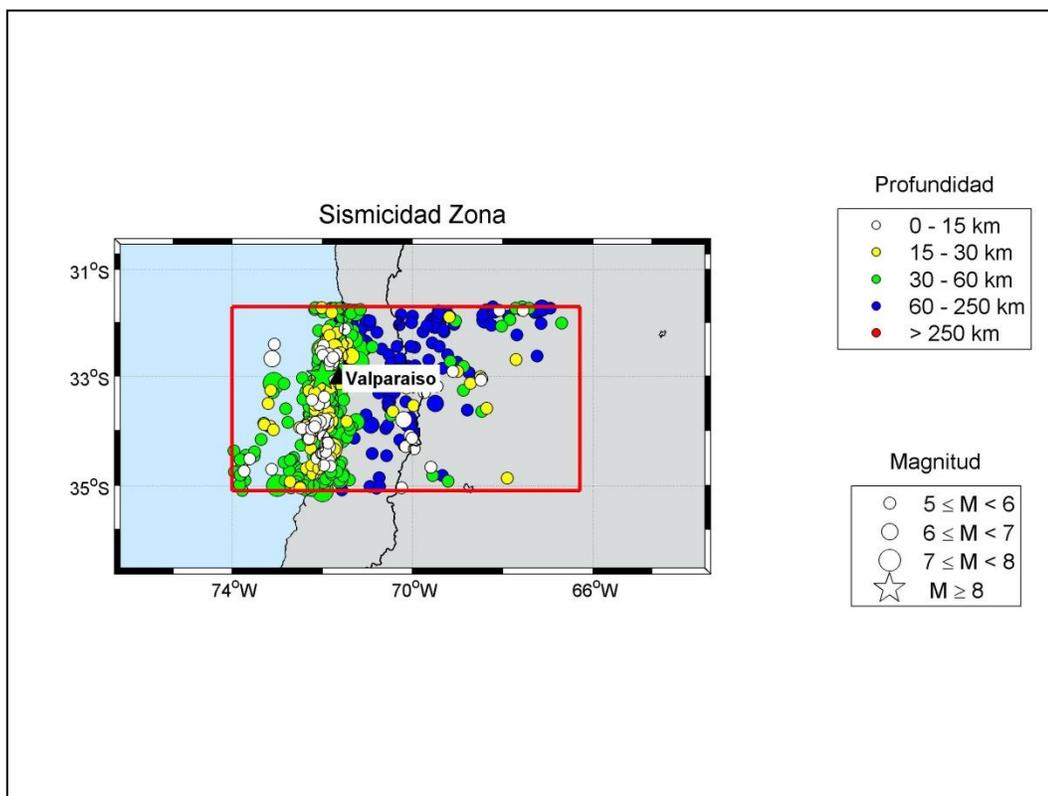


Figura B 63: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 6

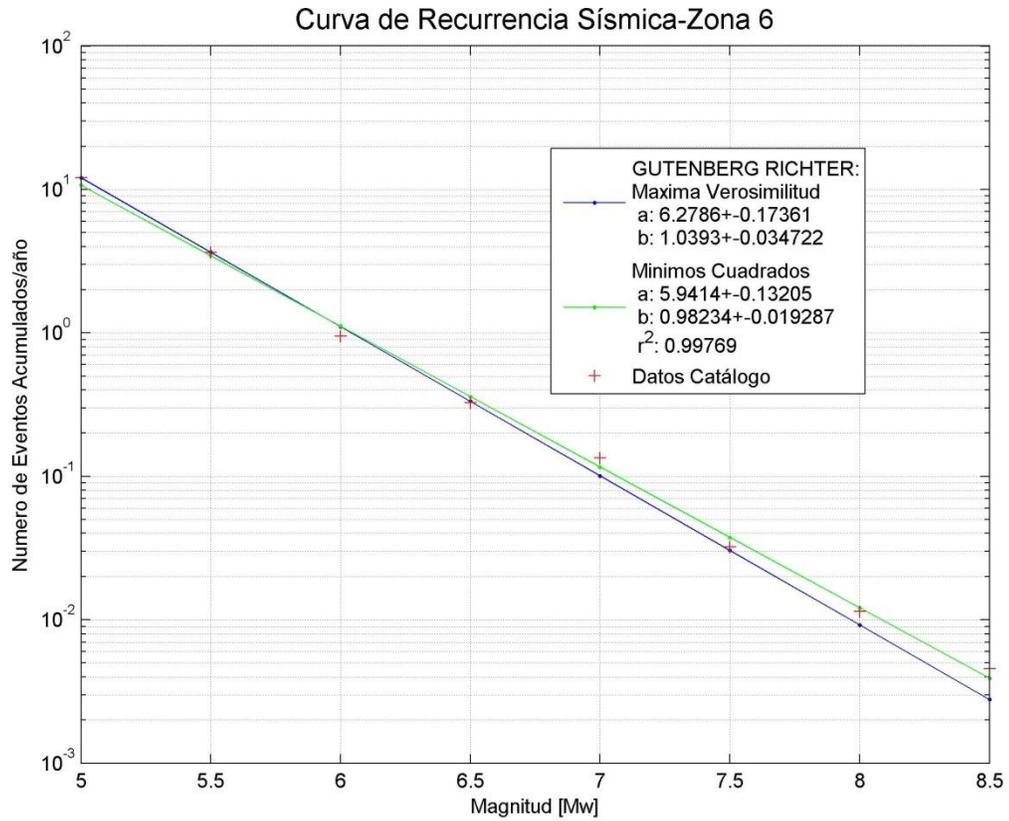


Figura B 64: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 6

Zona 6			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	12.080	10.709	48
≥ 5.5	3.651	3.456	48
≥ 6	1.103	1.115	53
≥ 6.5	0.334	0.360	83
≥ 7	0.101	0.116	88
≥ 7.5	0.030	0.037	193
≥ 8	0.009	0.012	438
≥ 8.5	0.003	0.004	438

Tabla B 32: Información Gutenberg-Richter – Zona 6

Sismos Subducción Interplaca

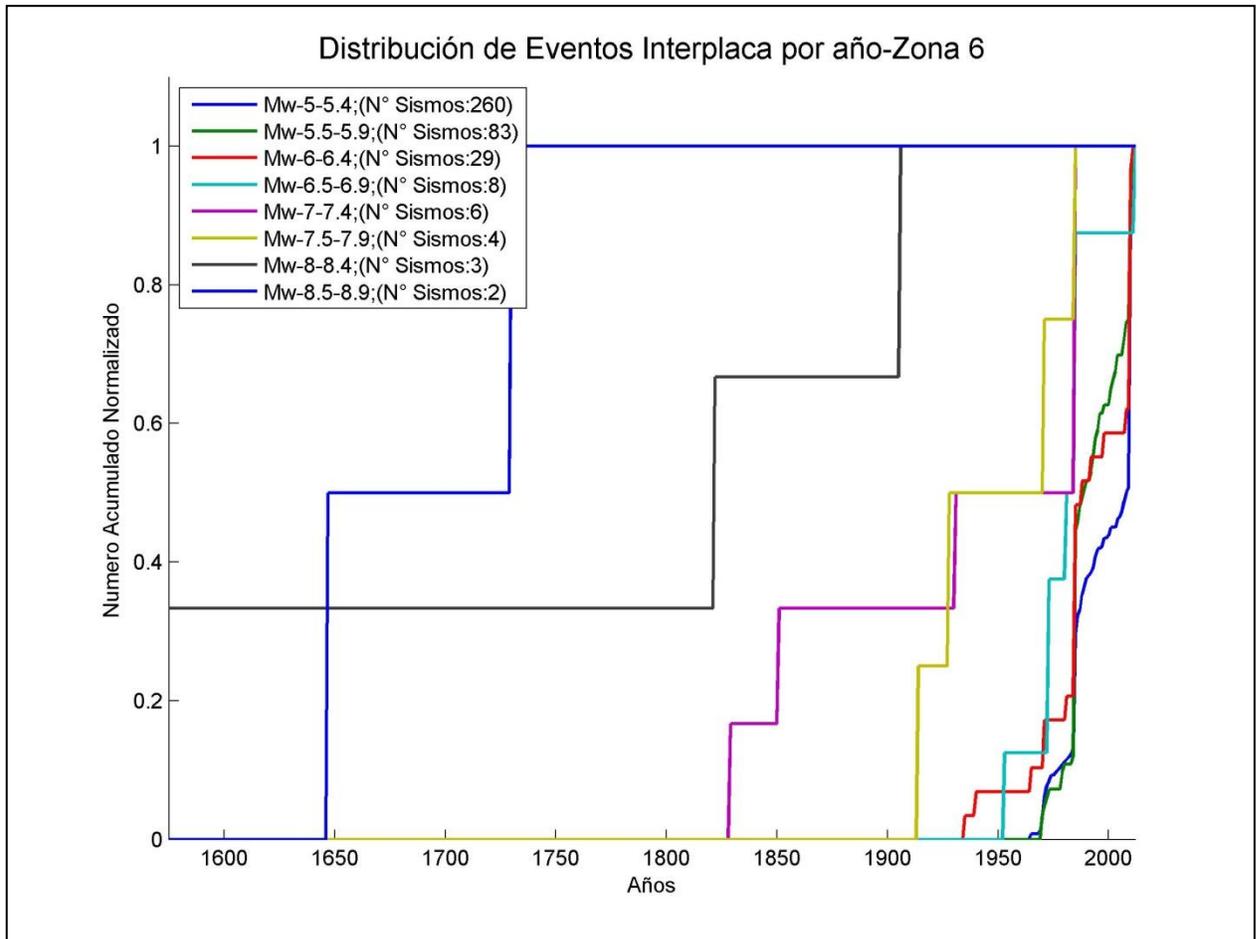


Figura B 65: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 6

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 6 - Interplaca	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	257	1970
[5.5 ;6 [	83	1970
[6 ;6.5 [	27	1965
[6.5 ;7 [	8	1952
[7 ;7.5 [	4	1925
[7.5 ;8 [	4	1820
[8 ;8.5 [	3	1575
[8.5 ;9 [	2	1575

Tabla B 33: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 6

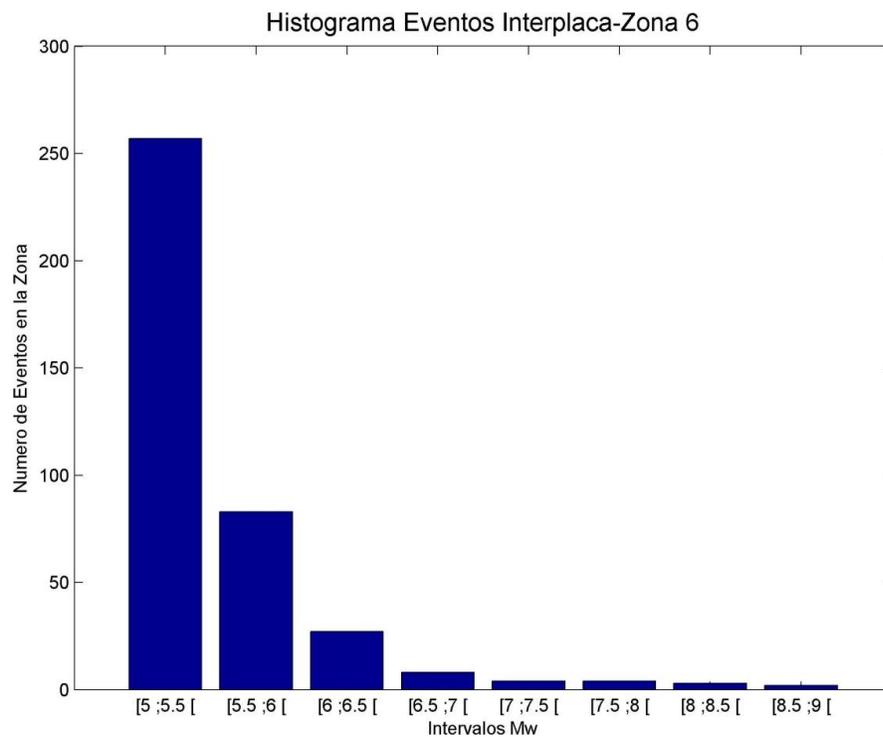


Figura B 66: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 6

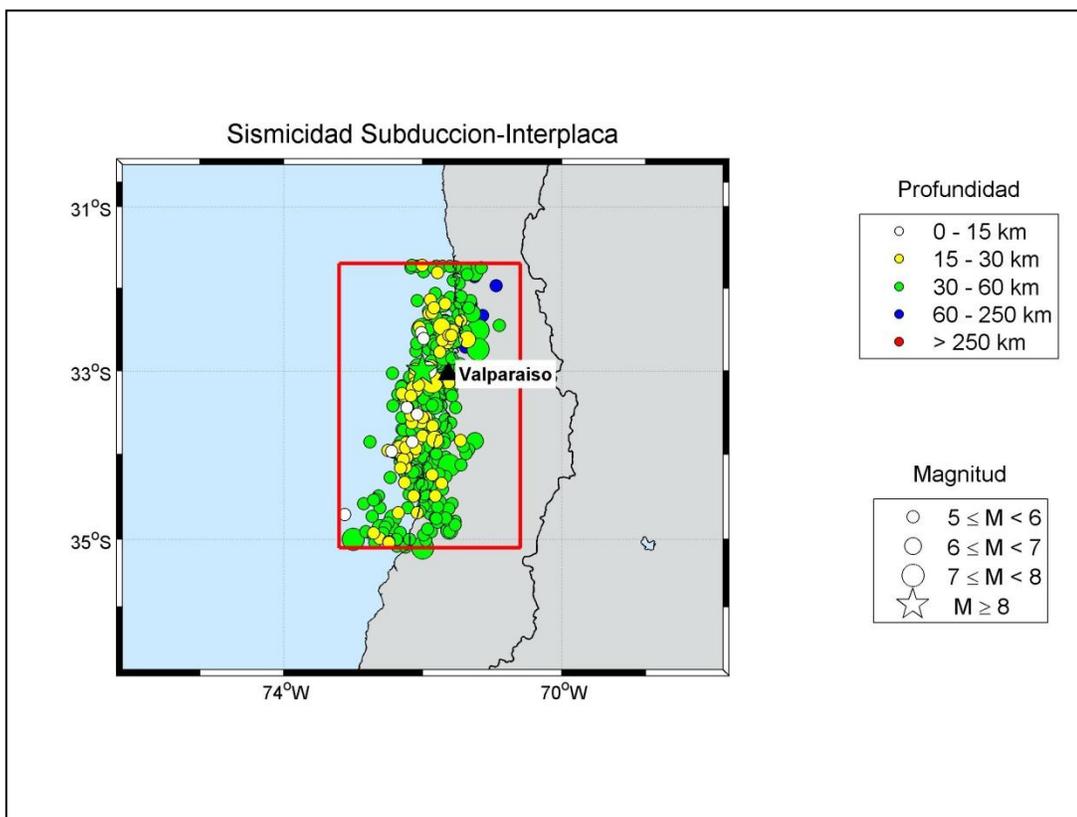


Figura B 67: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 6

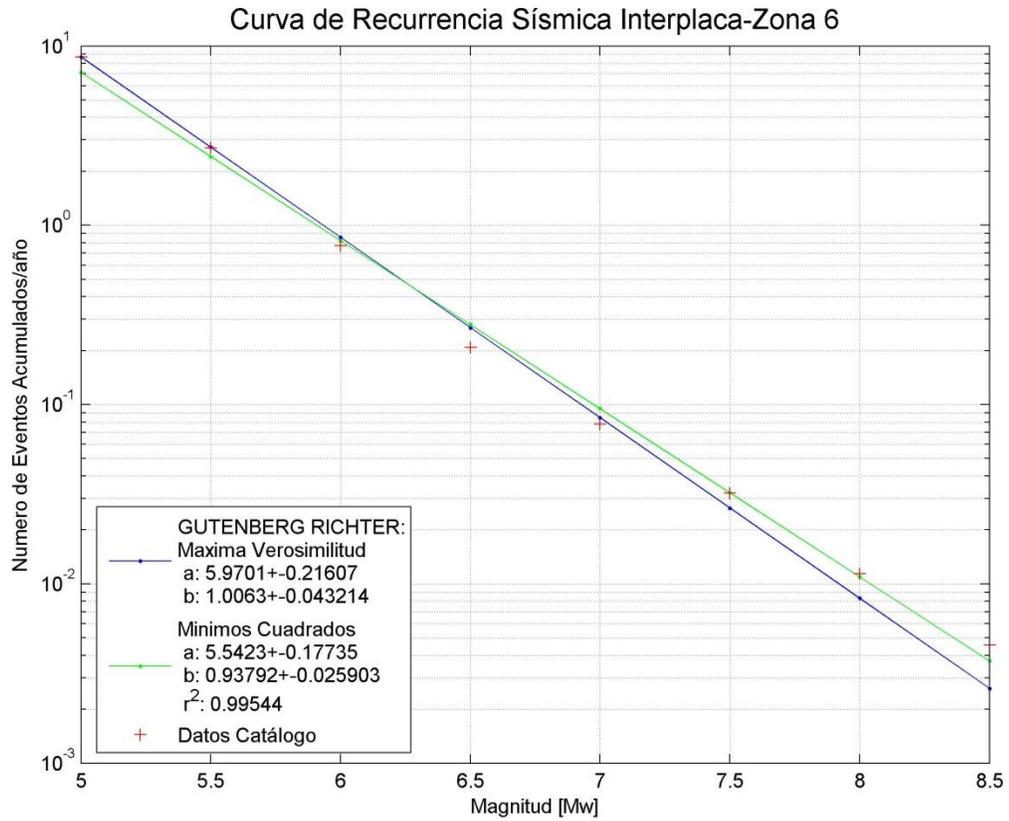


Figura B 68: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 6

Zona 6 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	8.685	7.124	43
≥ 5.5	2.727	2.420	43
≥ 6	0.856	0.822	48
≥ 6.5	0.269	0.279	61
≥ 7	0.084	0.095	88
≥ 7.5	0.026	0.032	193
≥ 8	0.008	0.011	438
≥ 8.5	0.003	0.004	438

Tabla B 34: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 6

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

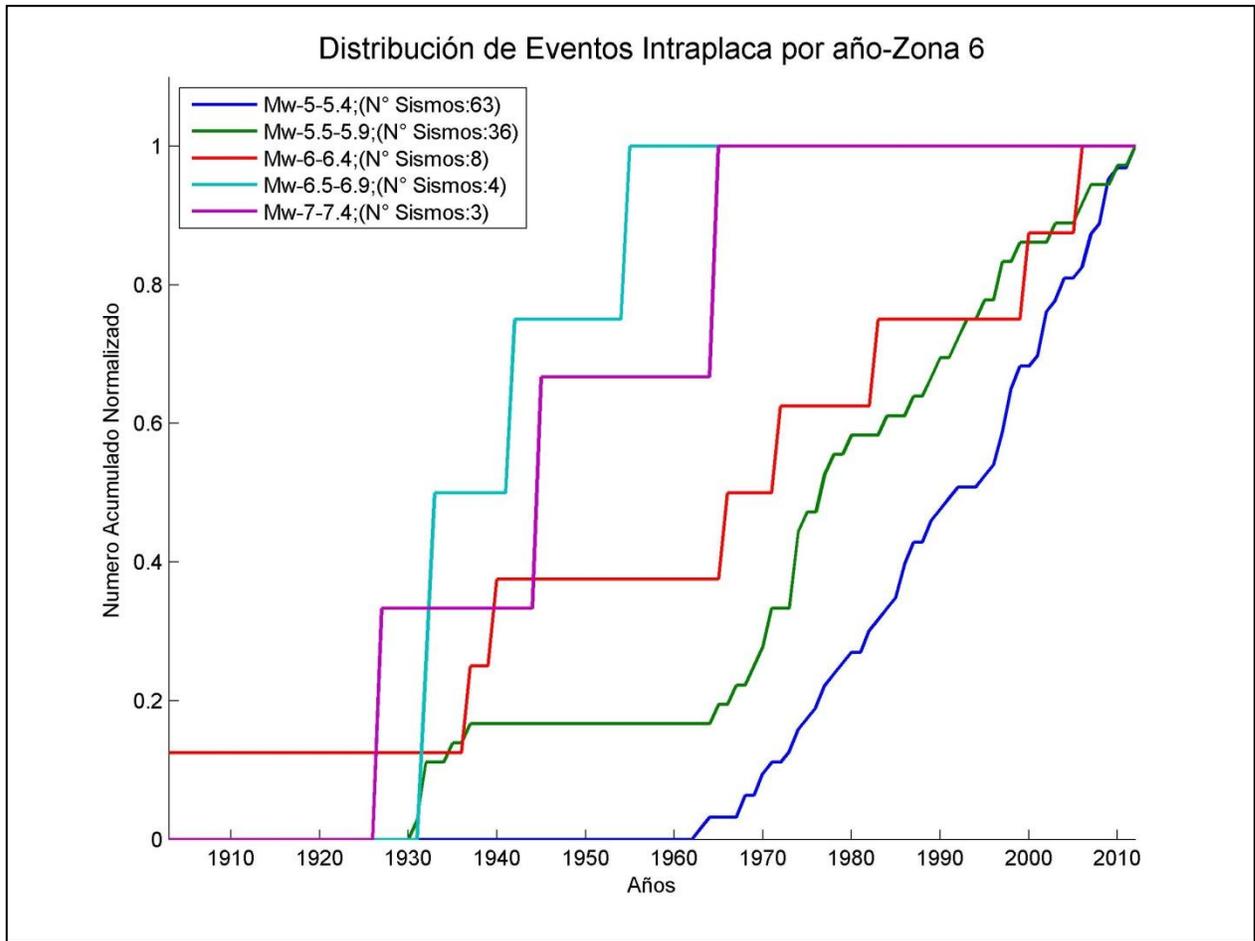


Figura B 69: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 6

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 6 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	61	1965
[5.5 ;6 [	30	1960
[6 ;6.5 [	7	1935
[6.5 ;7 [	4	1930
[7 ;7.5 [	3	1900

Tabla B 35: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 6

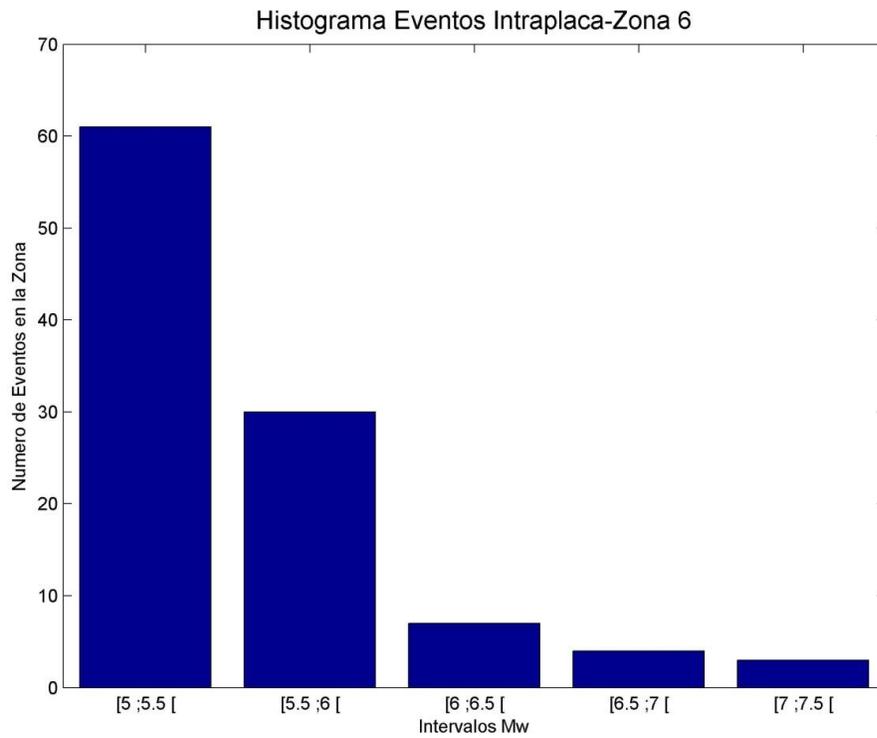


Figura B 70: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 6

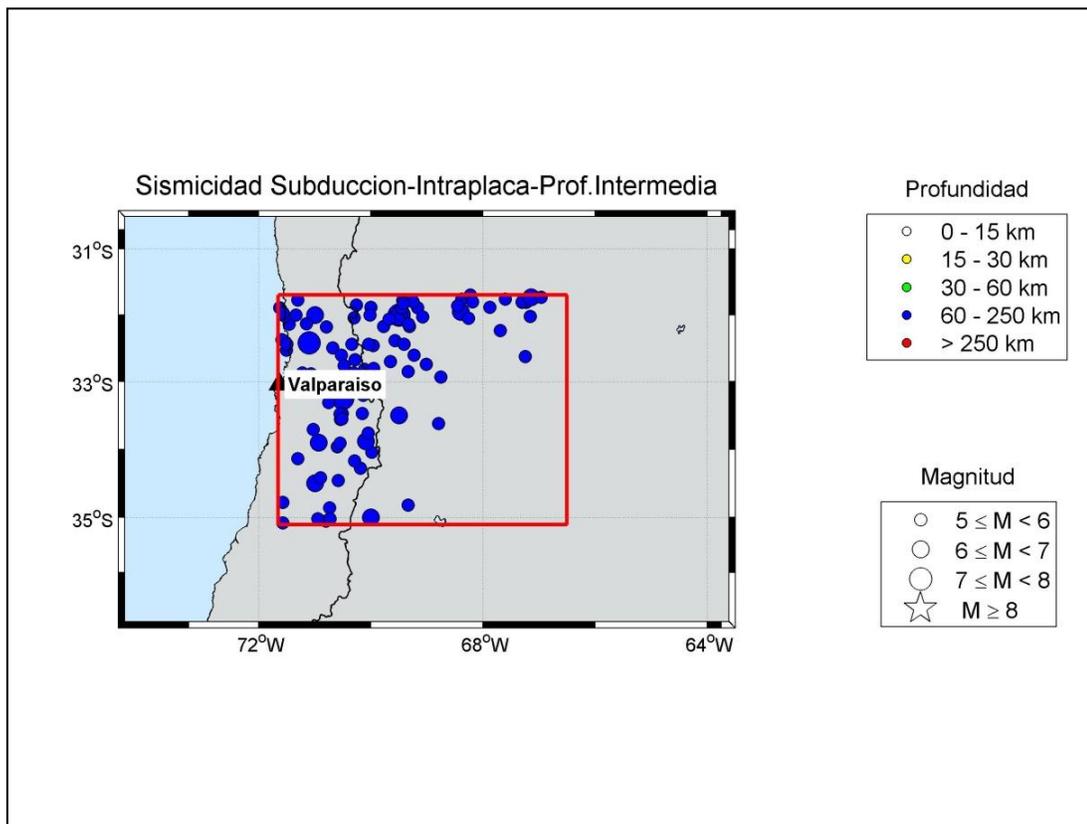


Figura B 71: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 6

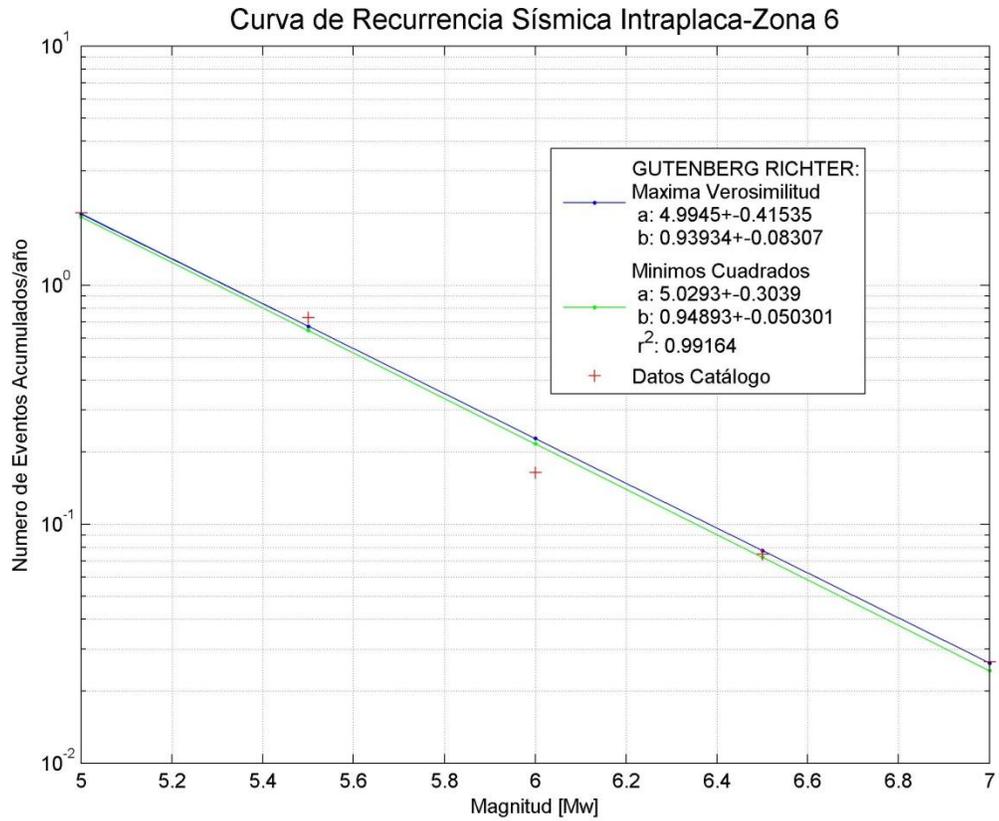


Figura B 72: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 6

Zona 6 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	1.985	1.926	48
≥ 5.5	0.673	0.646	53
≥ 6	0.228	0.217	78
≥ 6.5	0.077	0.073	83
≥ 7	0.026	0.024	113

Tabla B 36: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 6

B.1.7 ZONA 7.

Todo el Catálogo

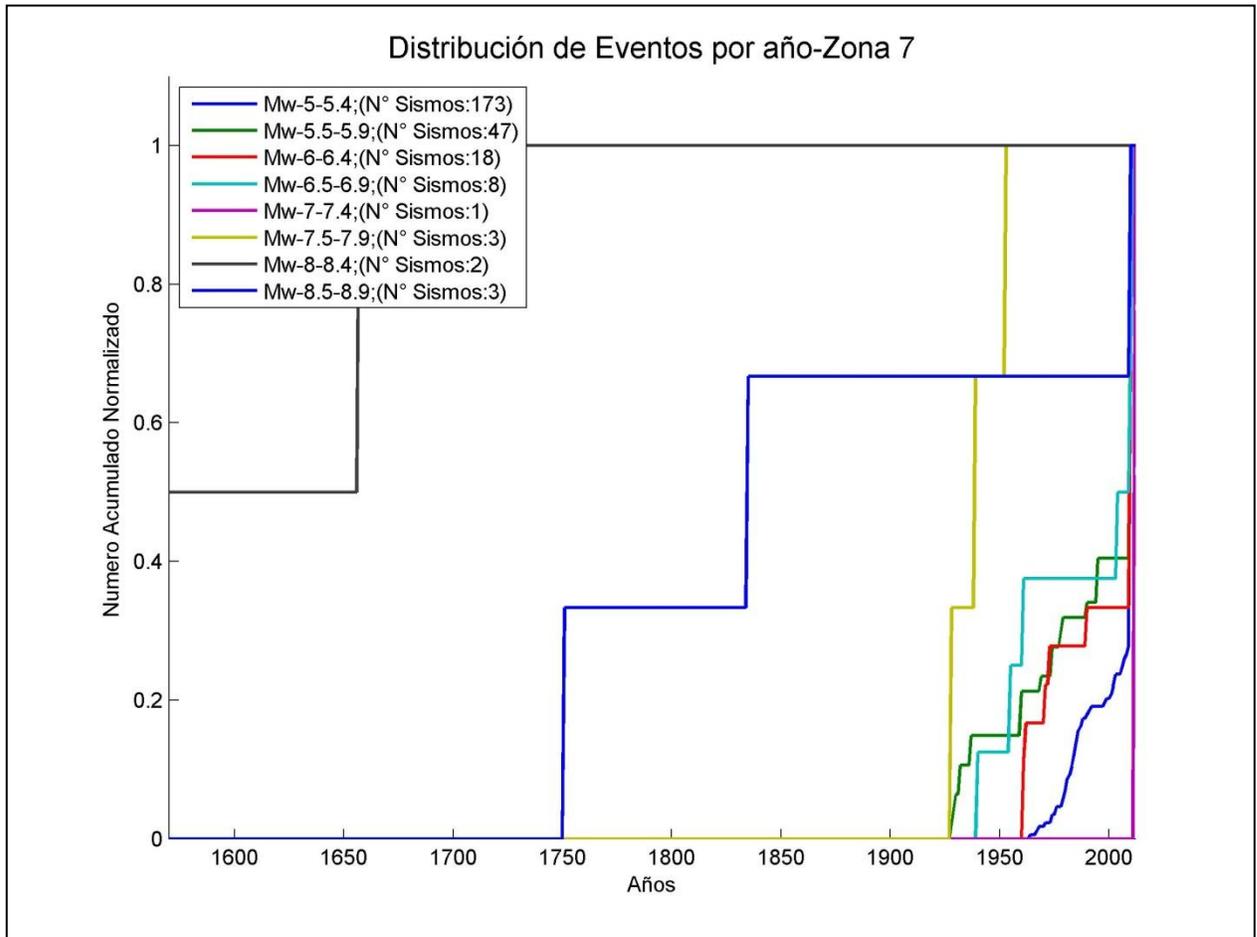


Figura B 73: Distribución de Sismos Zona 7

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 7	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	173	1960
[5.5 ;6 [	40	1960
[6 ;6.5 [	18	1960
[6.5 ;7 [	6	1960
[7 ;7.5 [	1	1960
[7.5 ;8 [	3	1750
[8 ;8.5 [	2	1570
[8.5 ;9 [	3	1570

Tabla B 37: Años de Completitud del Catálogo para Zona 7

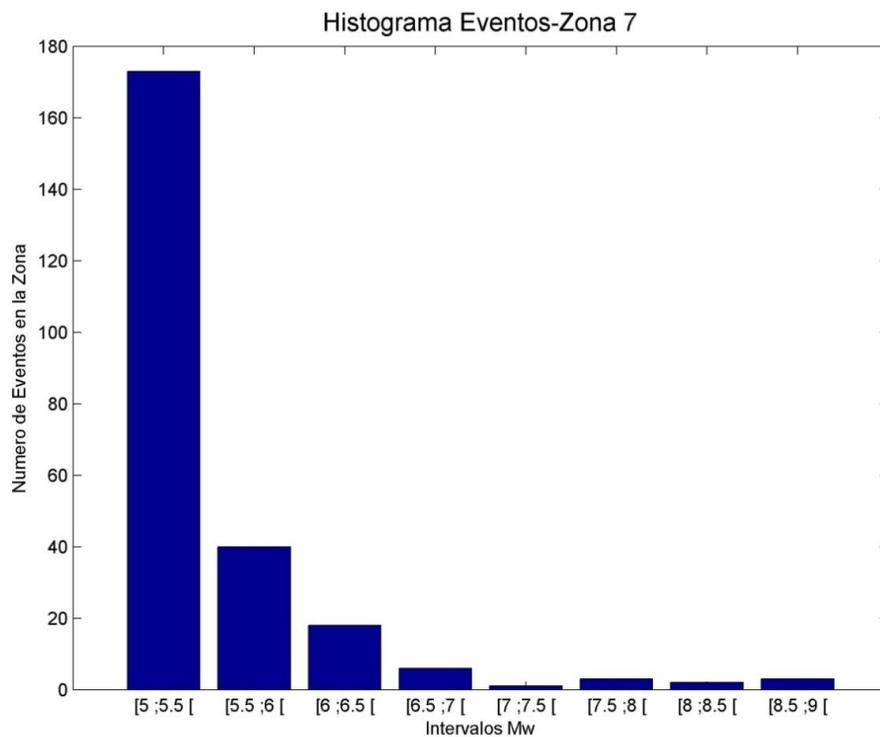


Figura B 74: Histograma de Sismos Zona 7

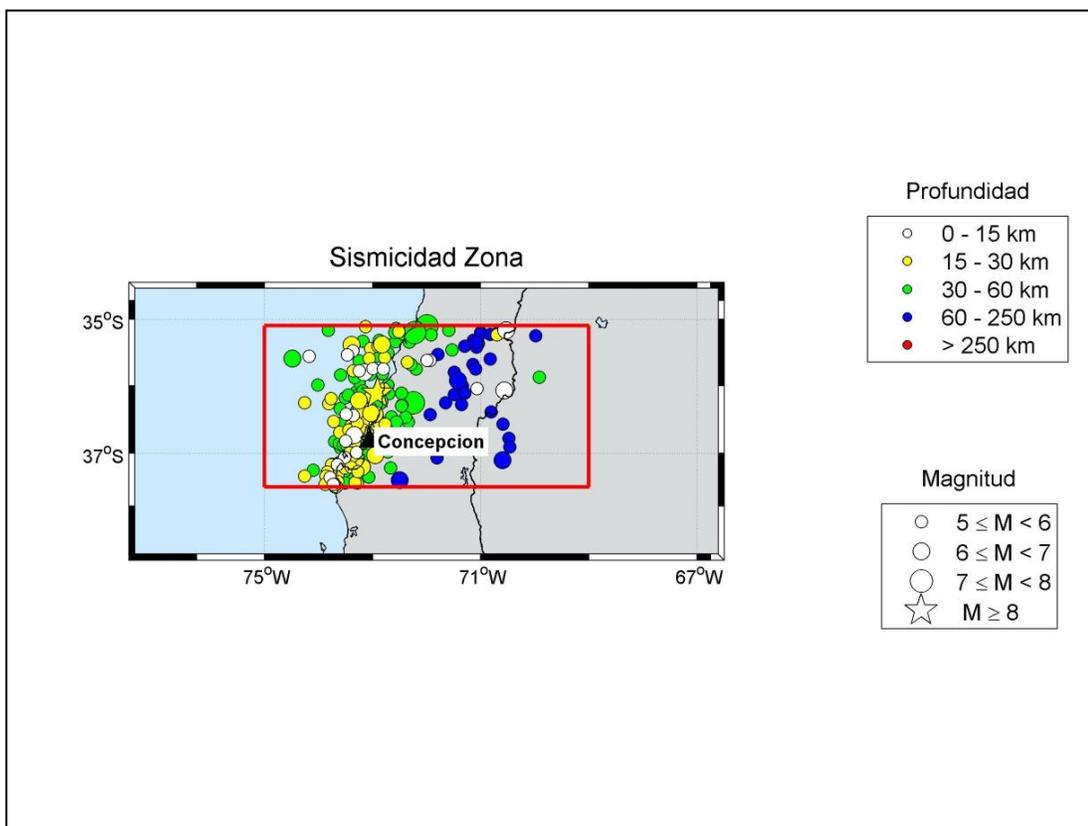


Figura B 75: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 7

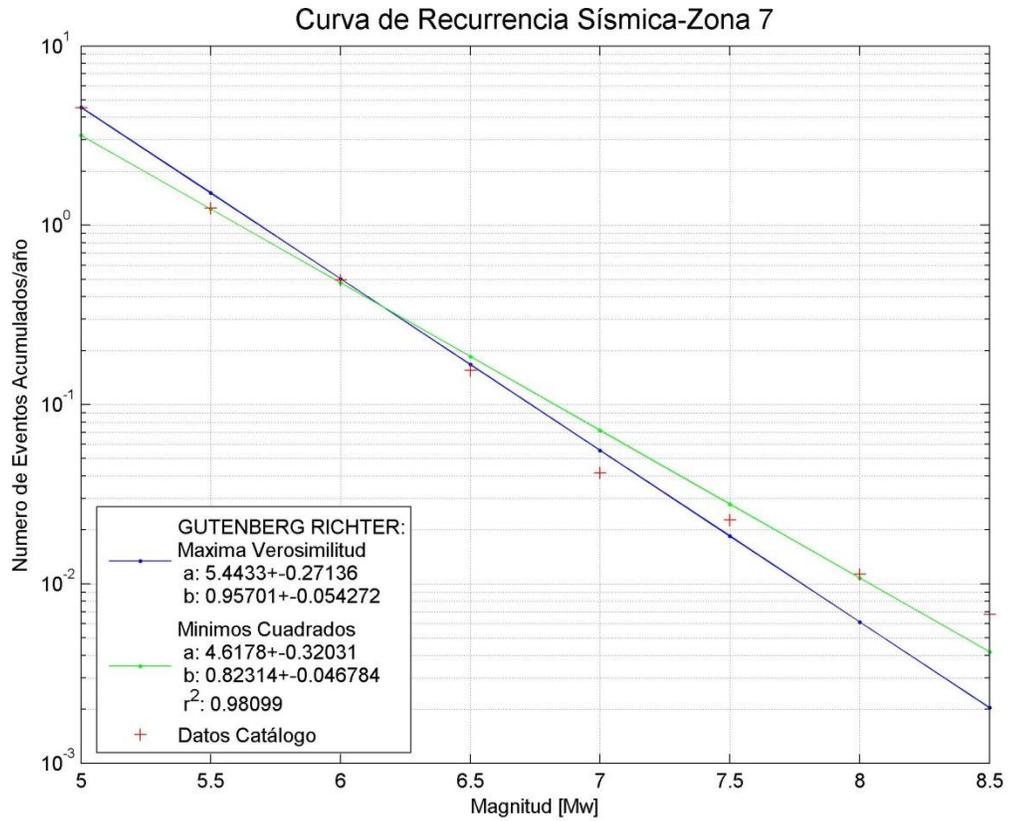


Figura B 76: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 7

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 7		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	4.553	3.178	53
≥5.5	1.513	1.232	53
≥6	0.503	0.477	53
≥6.5	0.167	0.185	53
≥7	0.055	0.072	53
≥7.5	0.018	0.028	263
≥8	0.006	0.011	443
≥8.5	0.002	0.004	443

Tabla B 38: Información Gutenberg-Richter – Zona 7

Sismos Subducción Interplaca

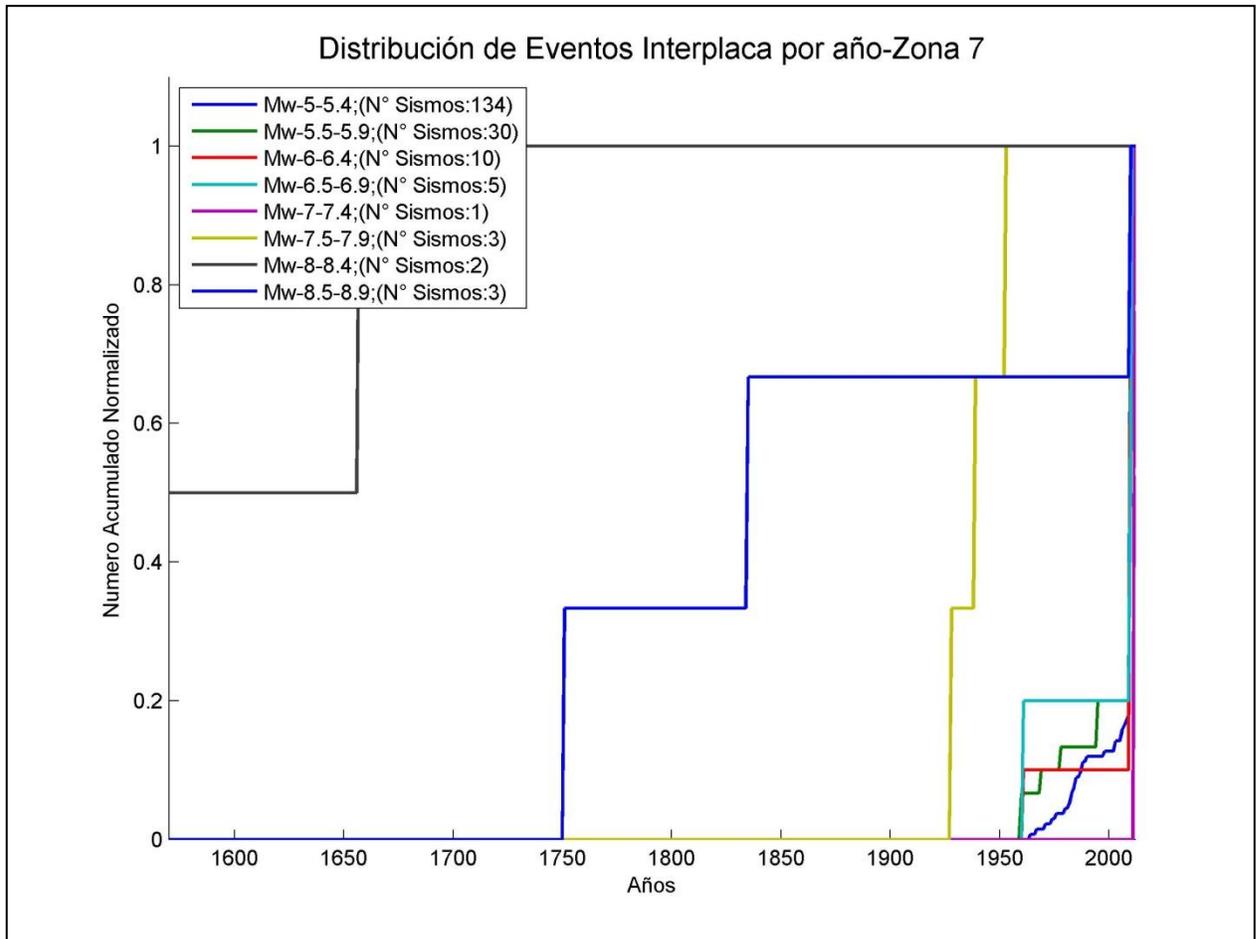


Figura B 77: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 7

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 7 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	134	1960
[5.5 ;6 [	30	1960
[6 ;6.5 [	10	1960
[6.5 ;7 [	5	1960
[7 ;7.5 [	1	1960
[7.5 ;8 [	3	1750
[8 ;8.5 [	2	1570
[8.5 ;9 [	3	1570

Tabla B 39: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 7

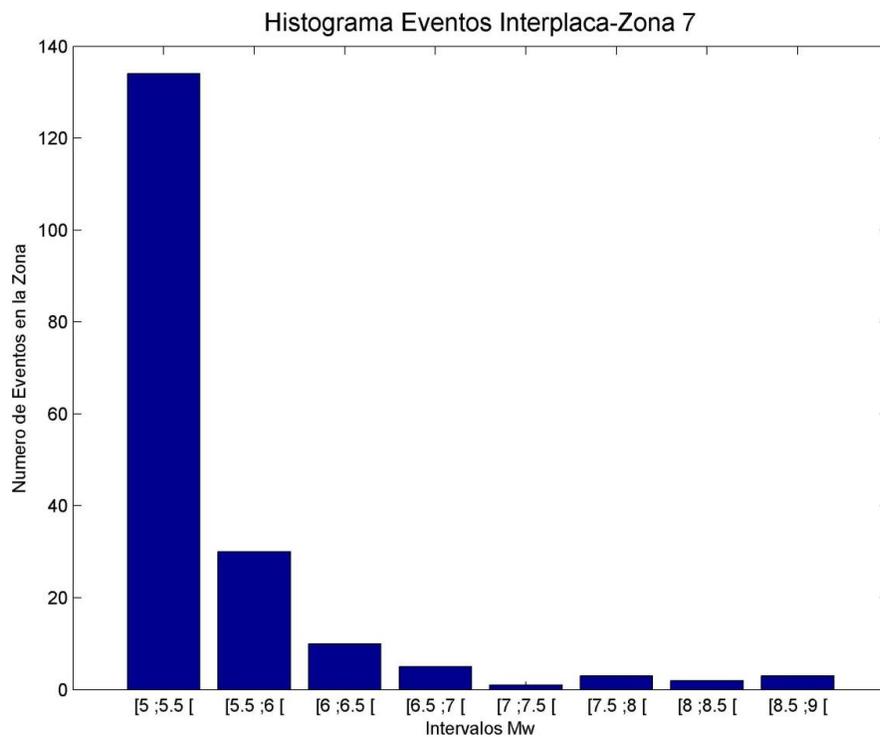


Figura B 78: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 7

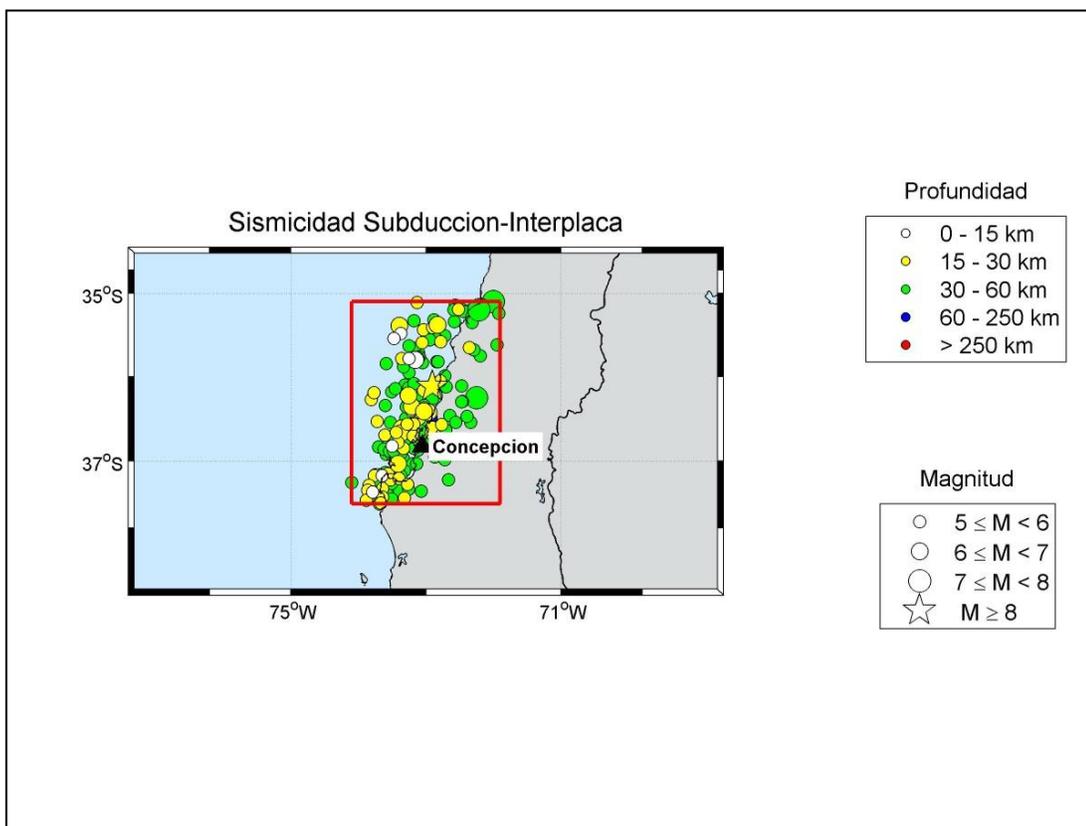


Figura B 79: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 7

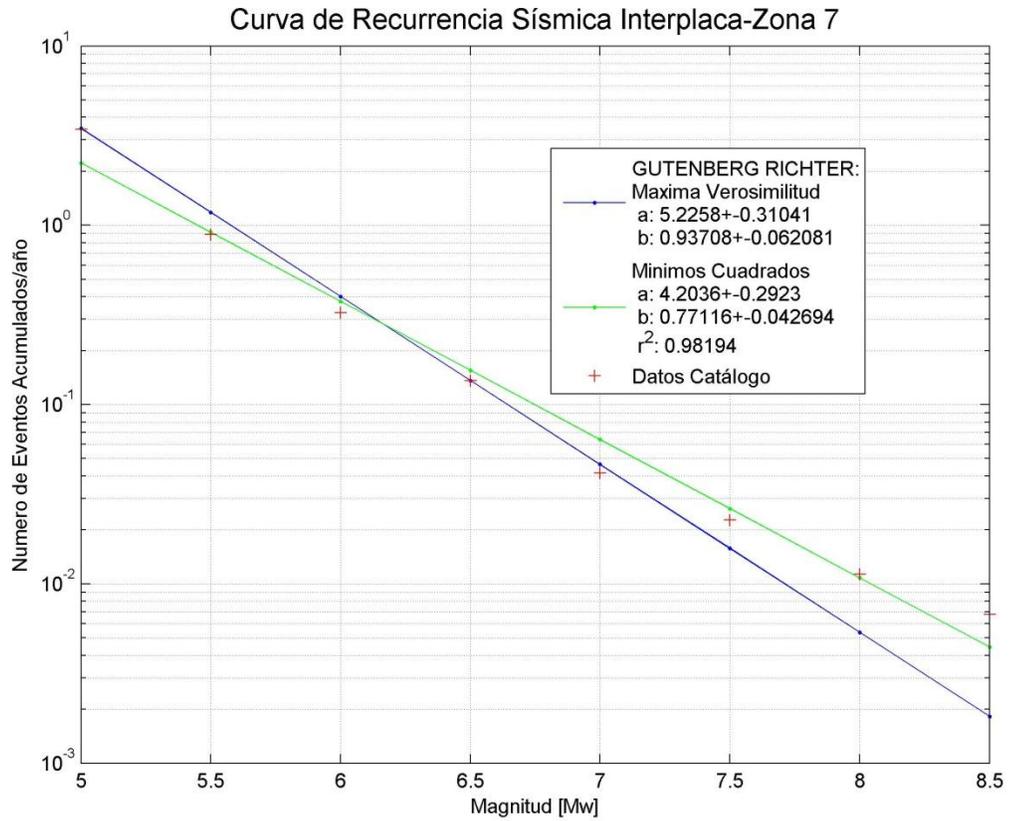


Figura B 80: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 7

Zona 7 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	3.471	2.227	53
≥5.5	1.180	0.917	53
≥6	0.401	0.377	53
≥6.5	0.136	0.155	53
≥7	0.046	0.064	53
≥7.5	0.016	0.026	263
≥8	0.005	0.011	443
≥8.5	0.002	0.004	443

Tabla B 40: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 7

Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia

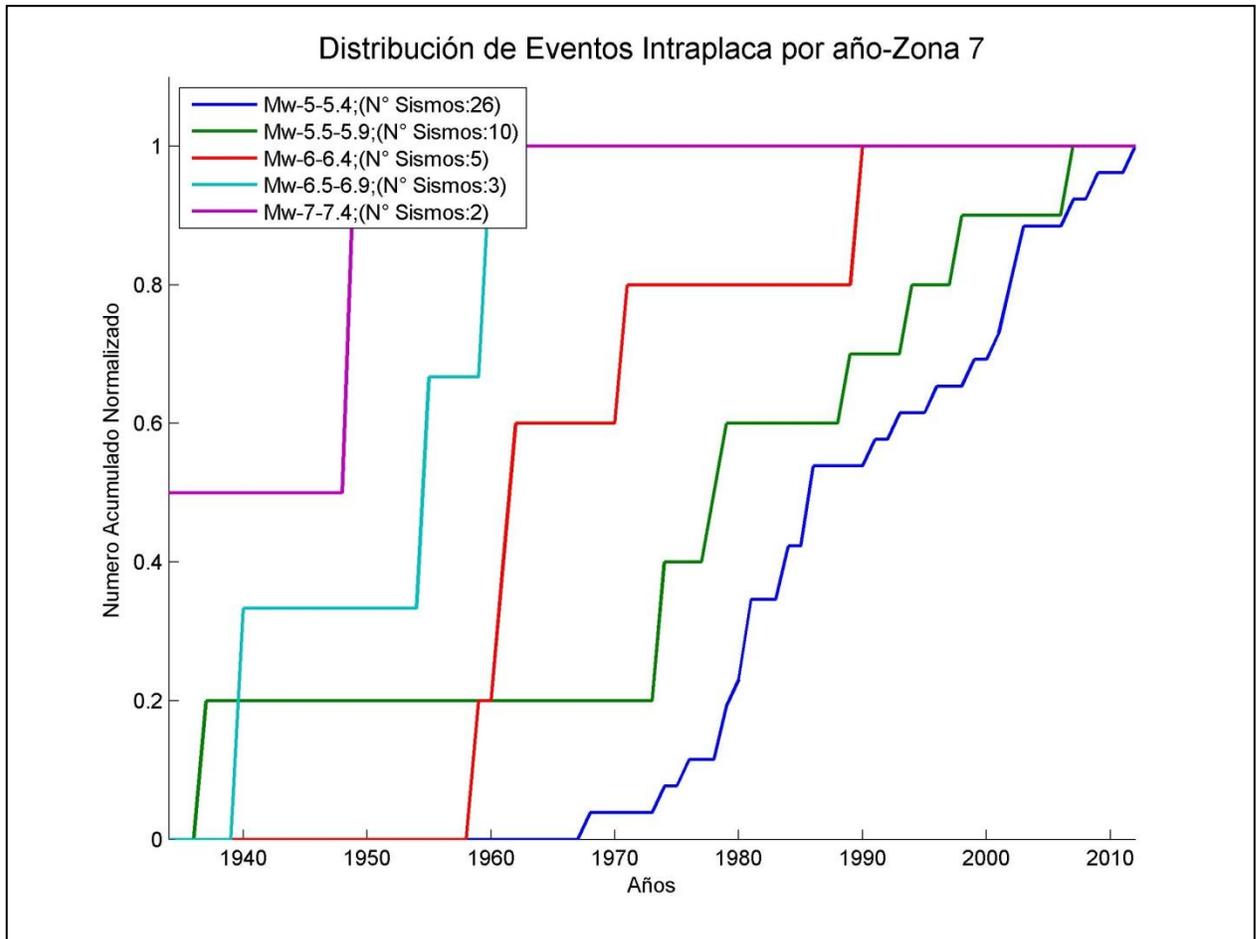


Figura B 81: Distribución de Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 7

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 7 - Intraplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	25	1973
[5.5 ;6 [	8	1973
[6 ;6.5 [	5	1955
[6.5 ;7 [	3	1940
[7 ;7.5 [	2	1934

Tabla B 41: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia Zona 7

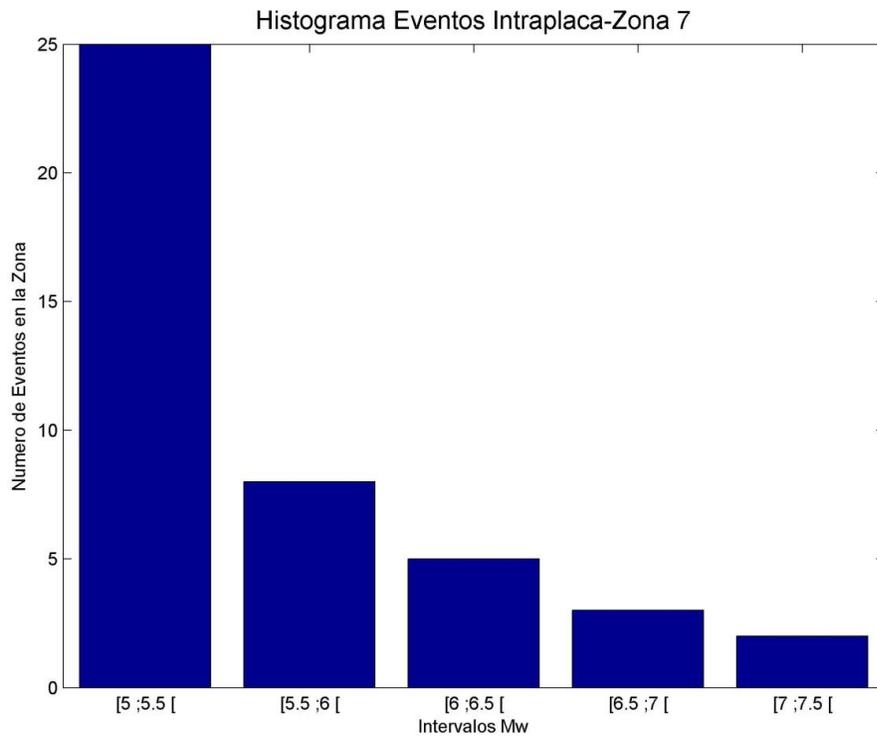


Figura B 82: Histograma de Sismos Subducción Intraplaca – Profundidad Intermedia Zona 7

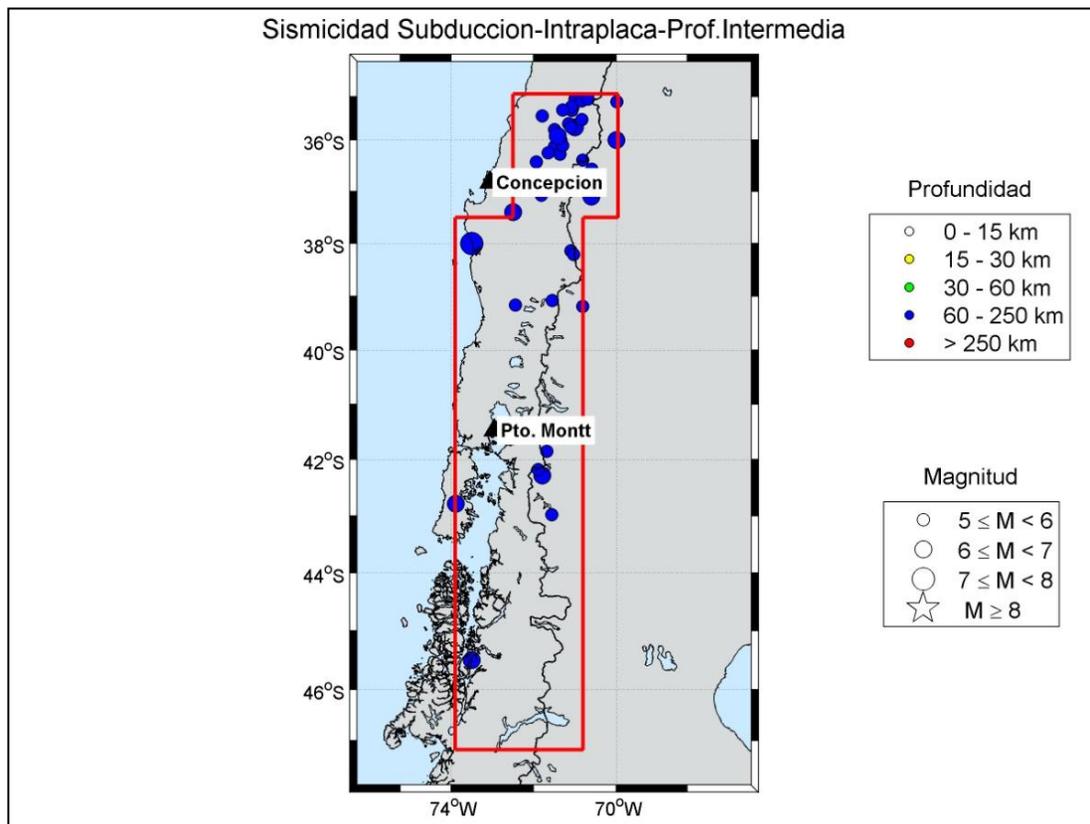


Figura B 83: Mapa de Sismicidad Sismos Subducción Intraplaca-Profundidad Intermedia – Zona 7

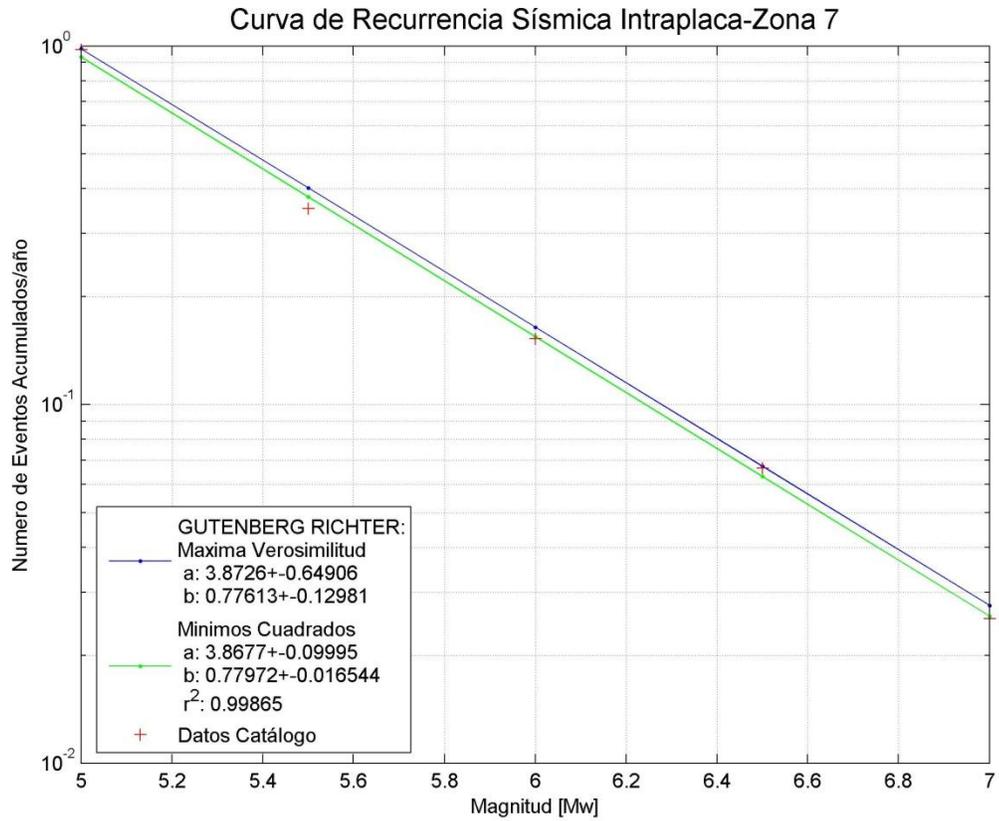


Figura B 84: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción Intraplaca – Zona 7

Zona 7 - Intraplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	0.982	0.931	40
≥5.5	0.402	0.379	40
≥6	0.164	0.155	58
≥6.5	0.067	0.063	73
≥7	0.028	0.026	79

Tabla B 42: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Intraplaca – Zona 7

B.1.8 ZONA 8.

Todo el Catálogo

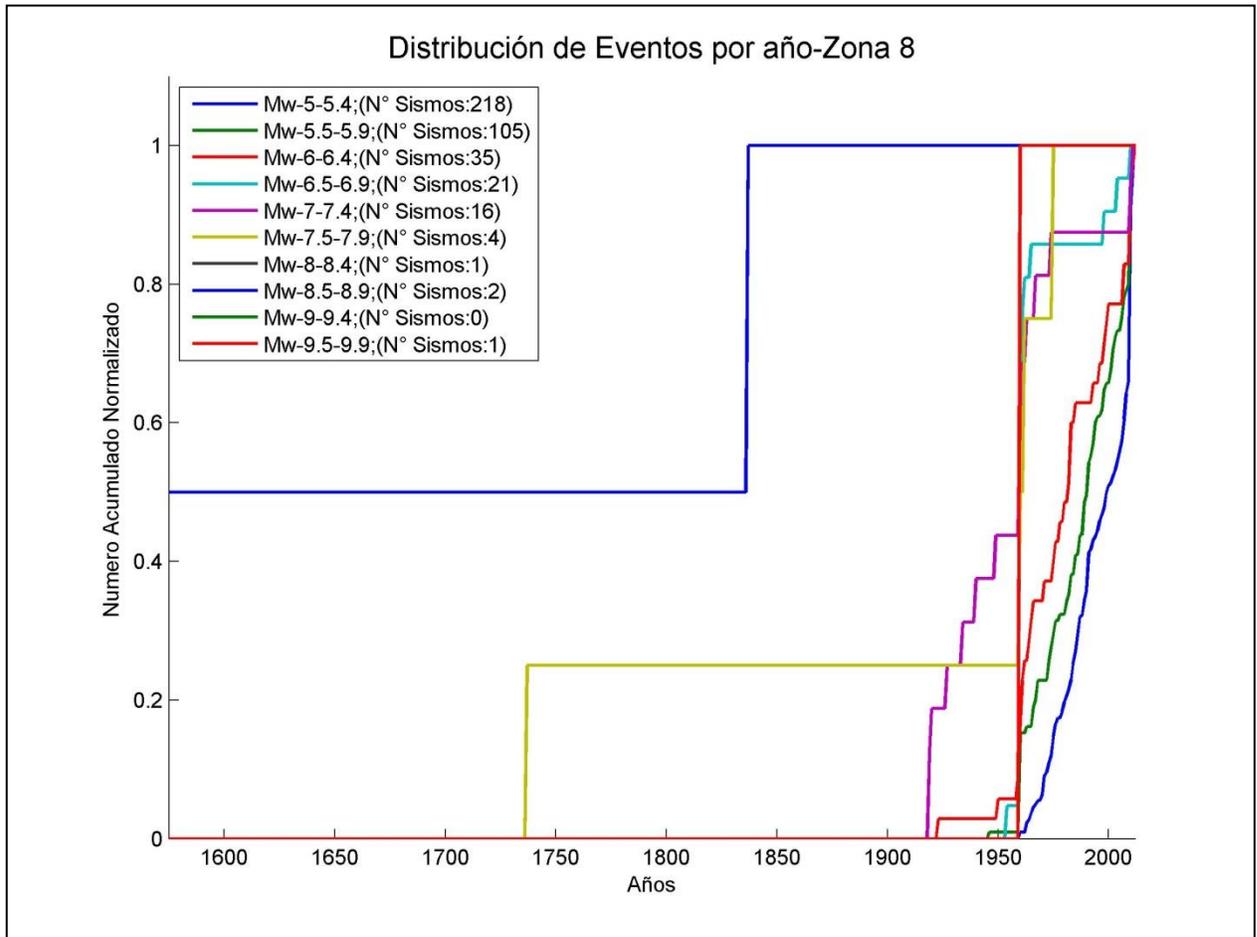


Figura B 85: Distribución de Sismos Zona 8

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 8	
	Nº de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	218	1960
[5.5 ;6 [	104	1960
[6 ;6.5 [	32	1960
[6.5 ;7 [	20	1960
[7 ;7.5 [	14	1920
[7.5 ;8 [	4	1737
[8 ;8.5 [	1	1737
[8.5 ;9 [	2	1575
[9 ;9.5 [	0	1575
[9.5 ;10 [	1	1575

Tabla B 43: Años de Completitud del Catálogo para Zona 8

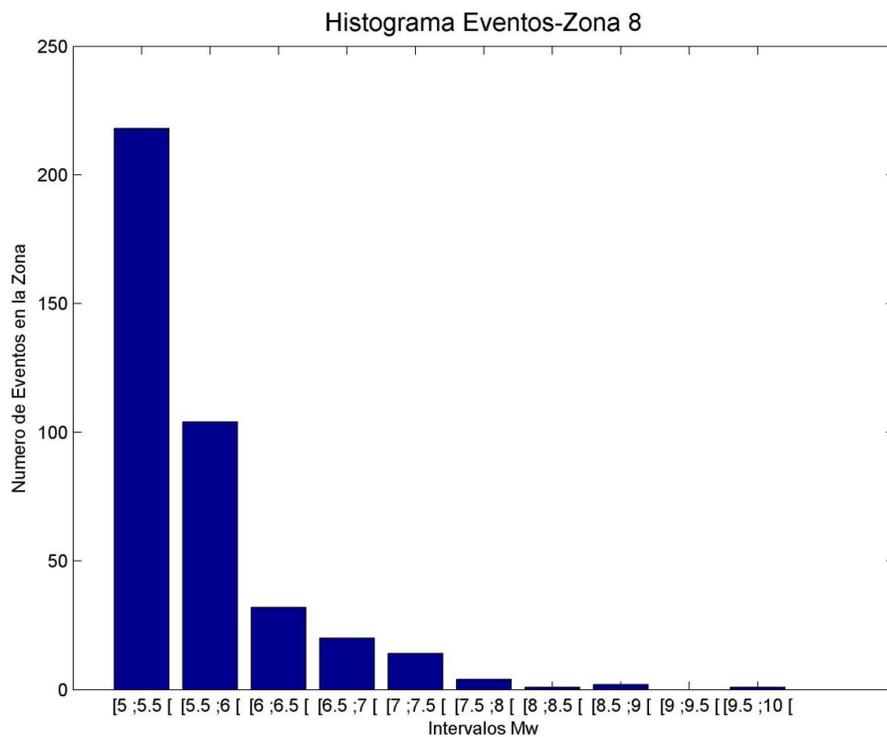


Figura B 86: Histograma de Sismos Zona 8

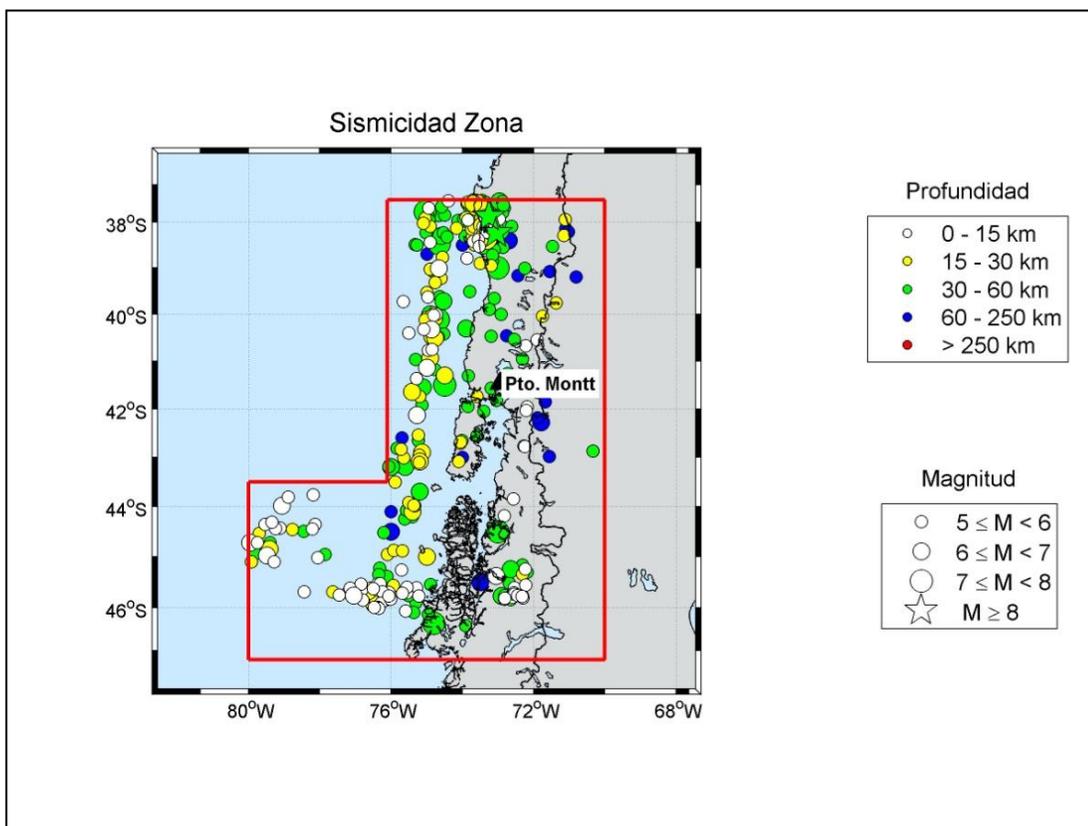


Figura B 87: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona 8

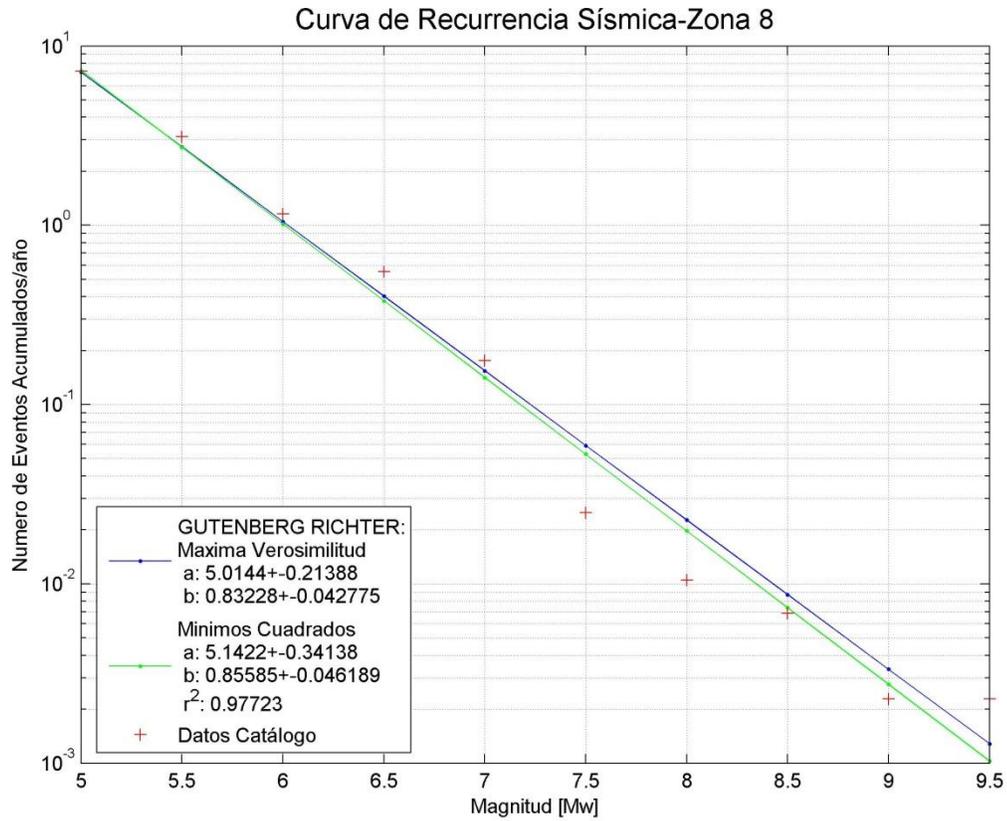


Figura B 88: Curva Recurrencia Sísmica –Zona 8

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 8		
	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	7.128	7.295	53
≥5.5	2.734	2.723	53
≥6	1.049	1.017	53
≥6.5	0.402	0.380	53
≥7	0.154	0.142	93
≥7.5	0.059	0.053	276
≥8	0.023	0.020	276
≥8.5	0.009	0.007	438
≥9	0.003	0.003	438
≥9.5	0.001	0.001	438

Tabla B 44: Información Gutenberg-Richter – Zona 8

Sismos Subducción Interplaca

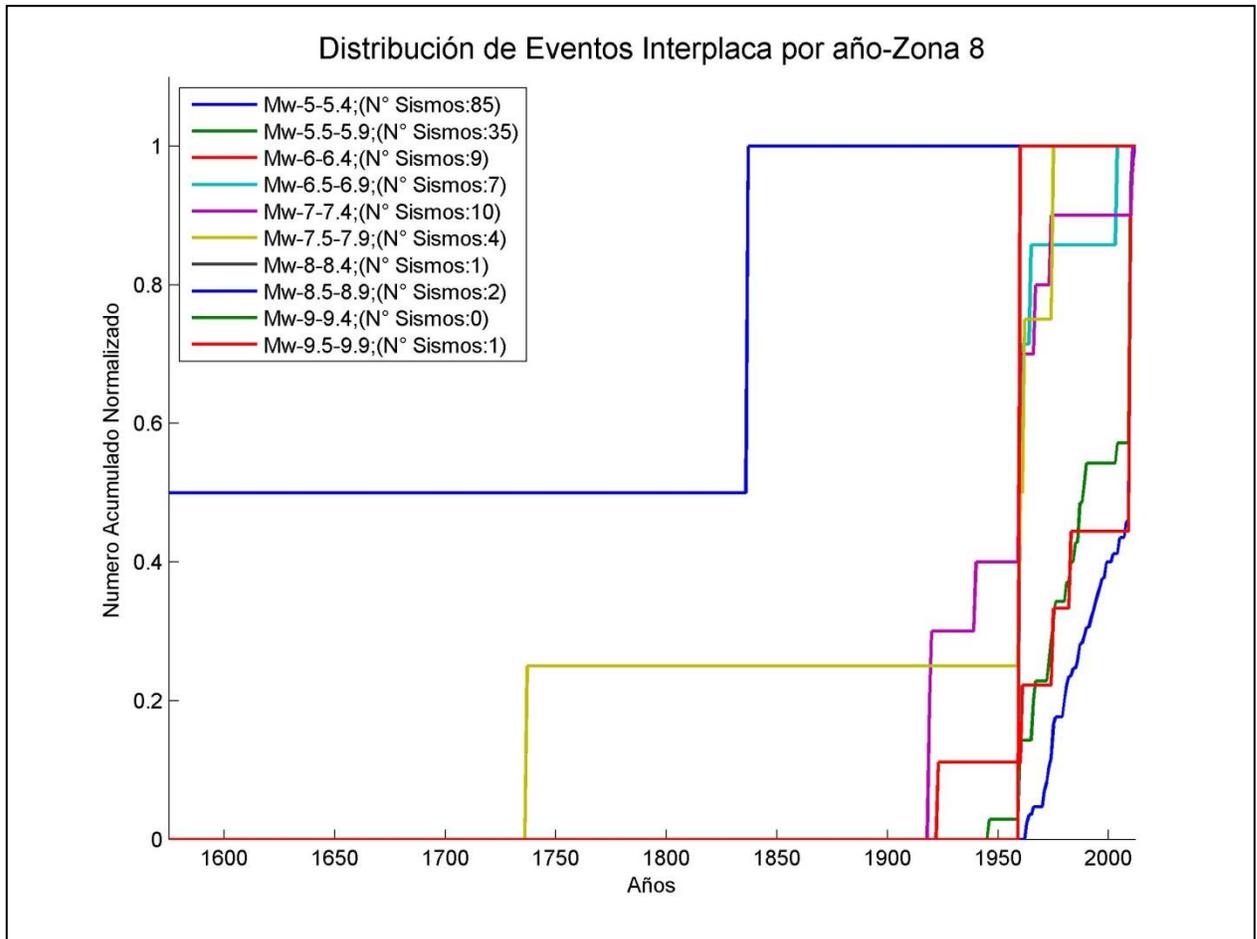


Figura B 89: Distribución de Sismos Subducción Interplaca Zona 8

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona 8 - Interplaca	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	82	1965
[5.5 ;6 [	34	1960
[6 ;6.5 [	8	1960
[6.5 ;7 [	7	1960
[7 ;7.5 [	10	1918
[7.5 ;8 [	4	1737
[8 ;8.5 [	1	1575
[8.5 ;9 [	2	1575
[9 ;9.5 [	0	1575
[9.5 ;10 [	1	1575

Tabla B 45: Años de Completitud del Catálogo, Sismos Subducción Interplaca Zona 8

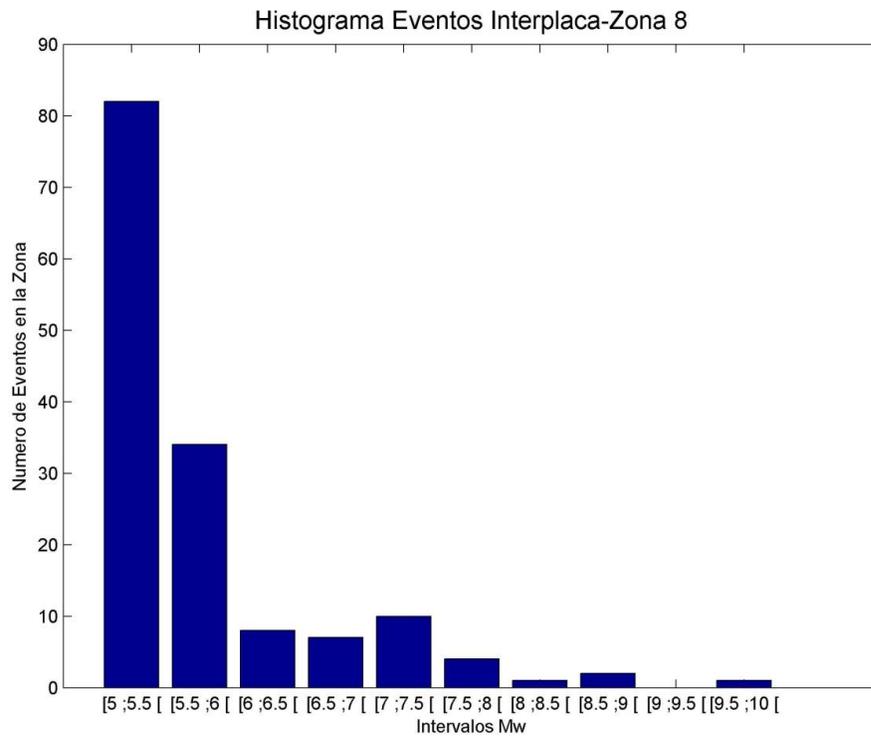


Figura B 90: Histograma de Sismos Subducción Interplaca Zona 8

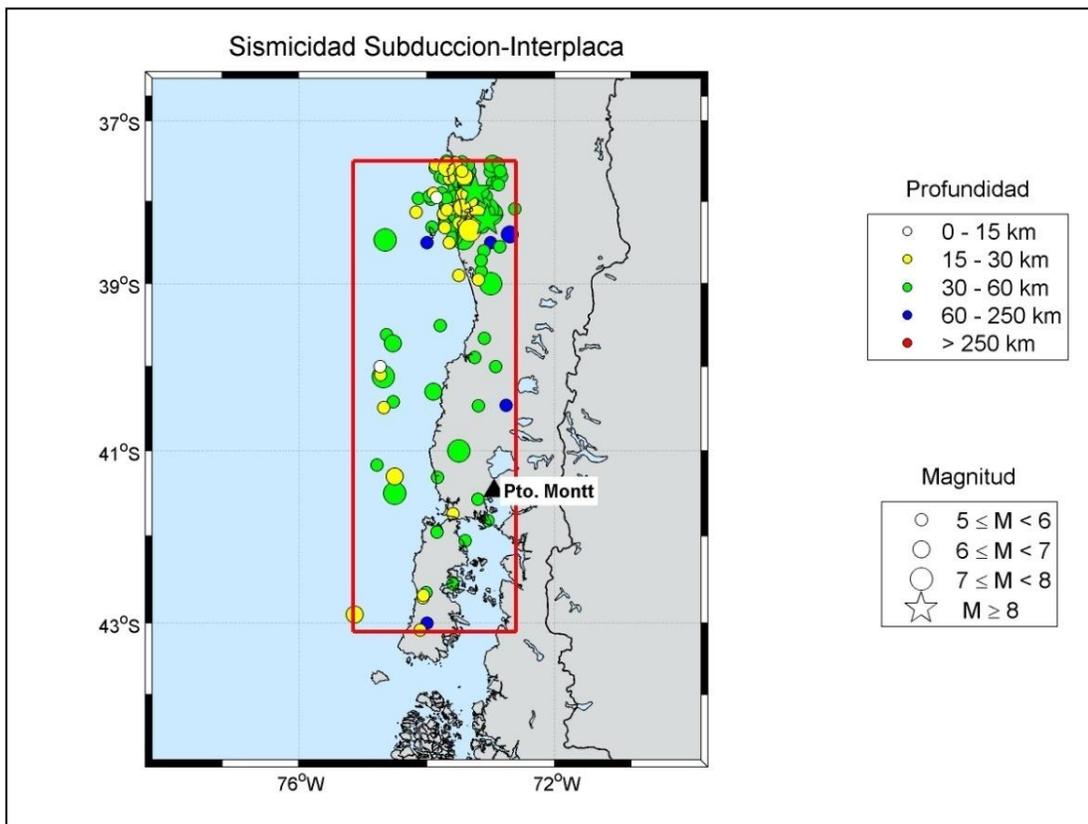


Figura B 91: Mapa de Sismicidad de Sismos Subducción Interplaca- Zona 8

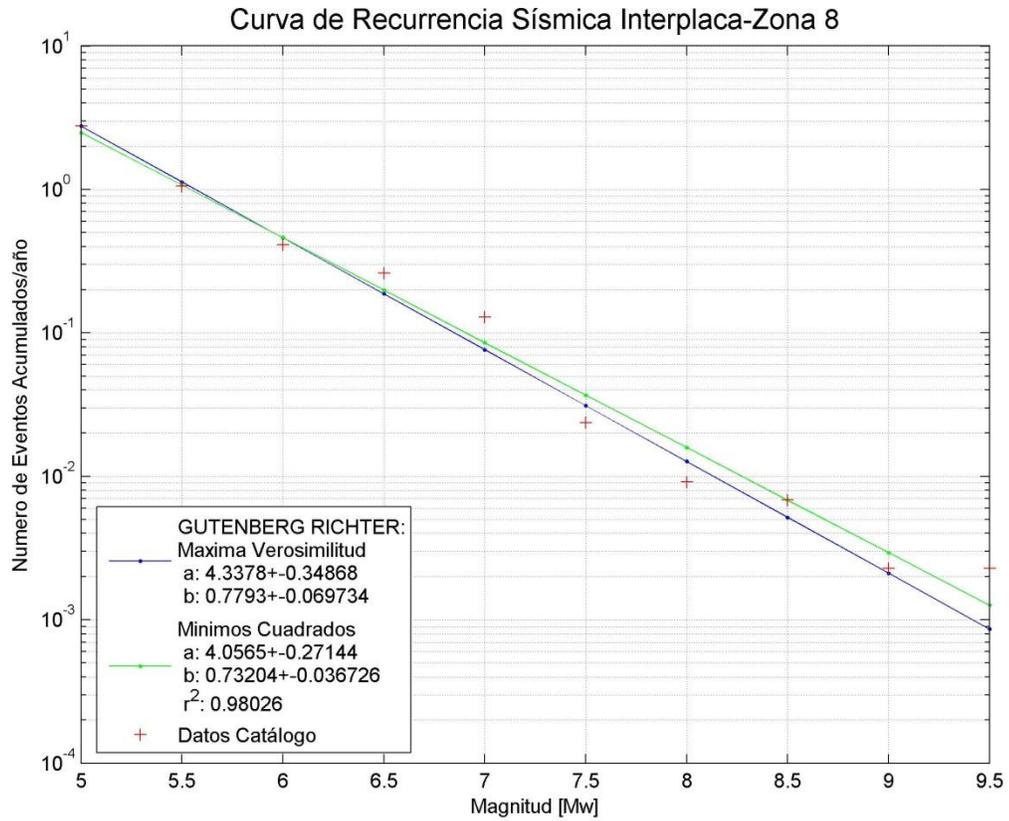


Figura B 92: Curva de Recurrencia Sísmica Sismos Subducción-Interplaca – Zona 8

Zona 8 - Interplaca			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥5	2.763	2.490	48
≥5.5	1.126	1.072	53
≥6	0.459	0.462	53
≥6.5	0.187	0.199	53
≥7	0.076	0.086	95
≥7.5	0.031	0.037	276
≥8	0.013	0.016	438
≥8.5	0.005	0.007	438
≥9	0.002	0.003	438
≥9.5	0.001	0.001	438

Tabla B 46: Información Gutenberg-Richter Sismos Subducción Interplaca – Zona 8

B.1.9 ZONA AUSTRAL.

Todo el Catálogo

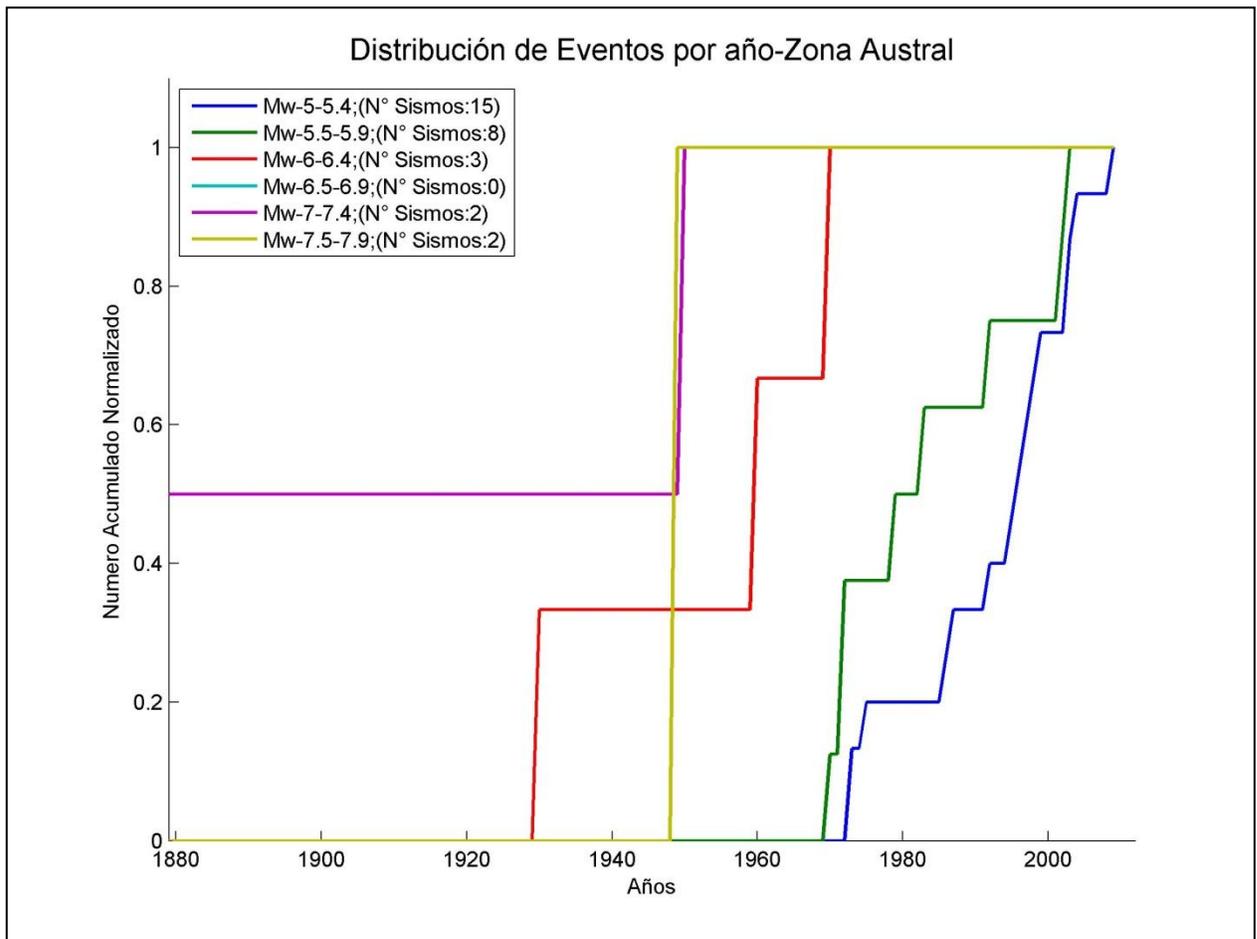


Figura B 93: Distribución de Sismos Zona Austral

Intervalos de Magnitud [Mw]	Zona Austral	
	N° de sismos	Año de completitud
[5 ;5.5 [	15	1972
[5.5 ;6 [	7	1972
[6 ;6.5 [	2	1960
[6.5 ;7 [	0	1960
[7 ;7.5 [	2	1879
[7.5 ;8 [	2	1879

Tabla B 47: Años de Completitud del Catálogo para Zona Austral

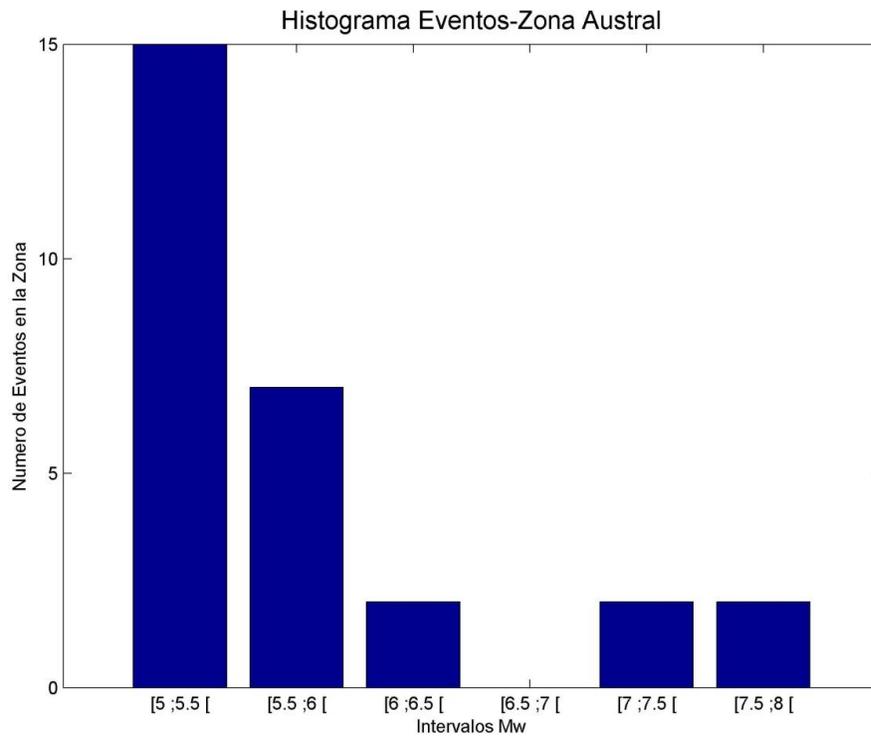


Figura B 94: Histograma de Sismos Zona Austral

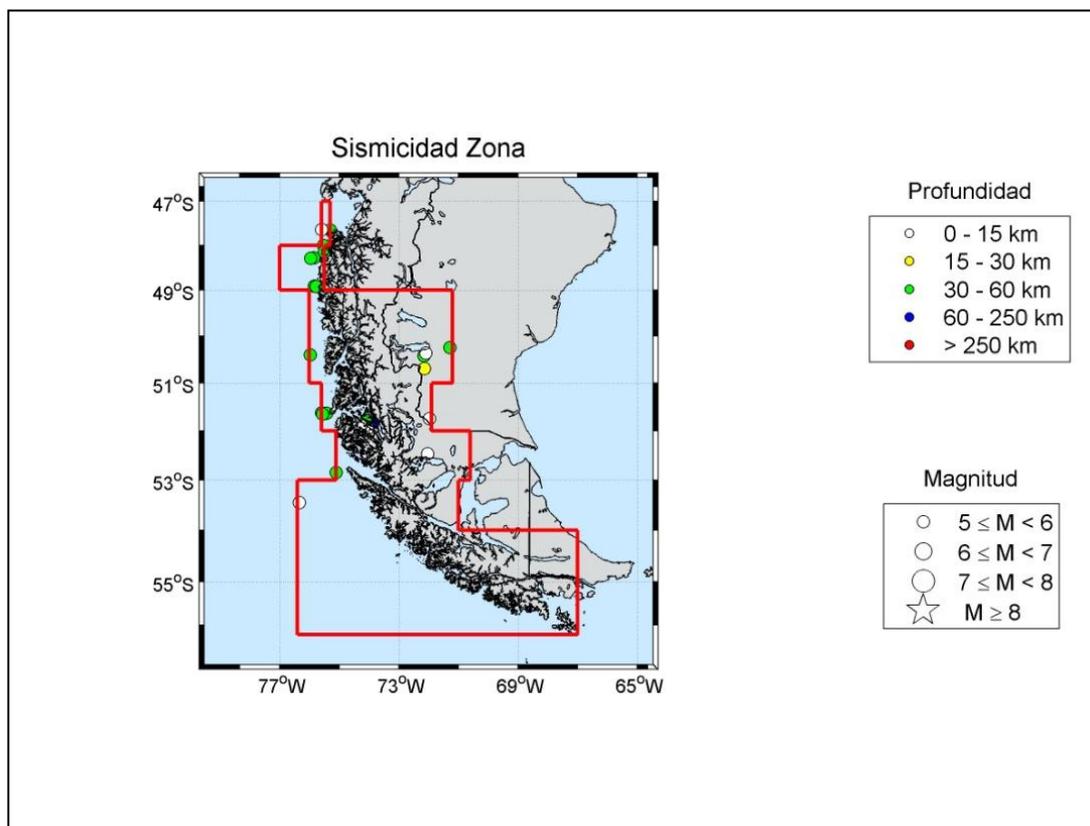


Figura B 95: Mapa de Sismicidad de Sismos – Zona Austral

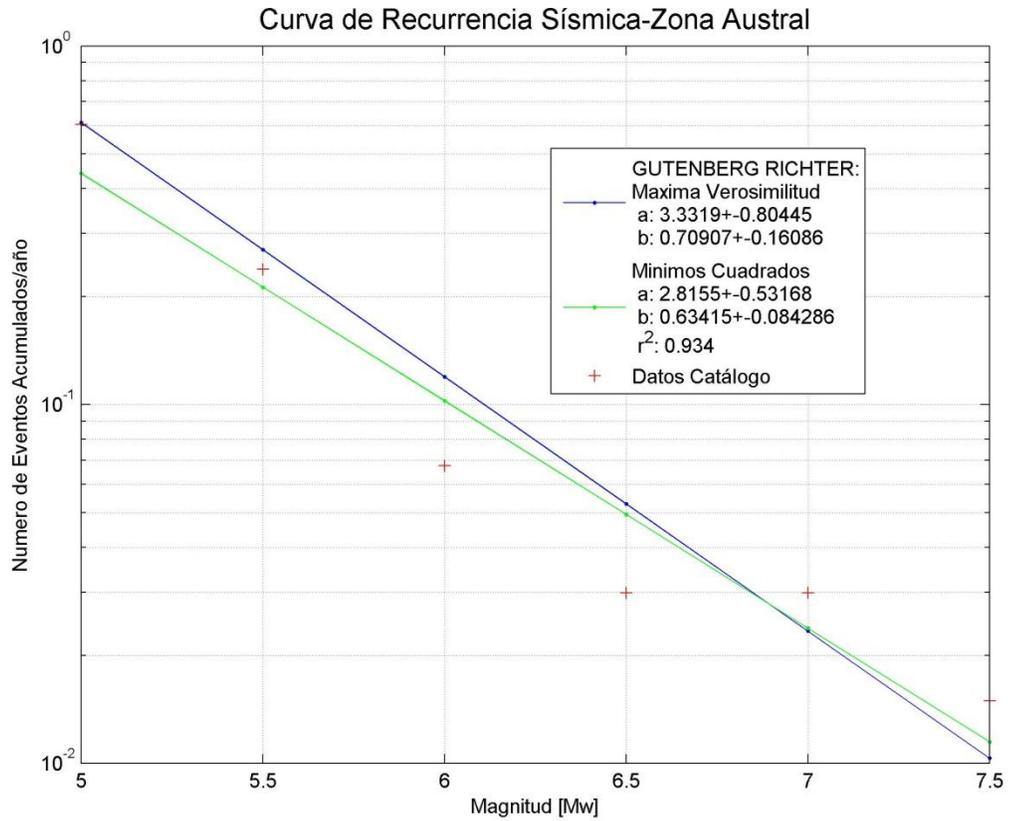


Figura B 96: Curva Recurrencia Sísmica –Zona Austral

Zona Austral			
Intervalos de Magnitud [Mw]	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Máxima Verosimilitud	Frecuencia anual de ocurrencia [N]- Mínimos Cuadrados	Tiempo considerado
≥ 5	0.612	0.441	41
≥ 5.5	0.270	0.213	41
≥ 6	0.120	0.102	53
≥ 6.5	0.053	0.049	53
≥ 7	0.023	0.024	134
≥ 7.5	0.010	0.011	134

Tabla B 48: Información Gutenberg-Richter – Zona Austral

B.2 PERFILES DE SISMICIDAD.

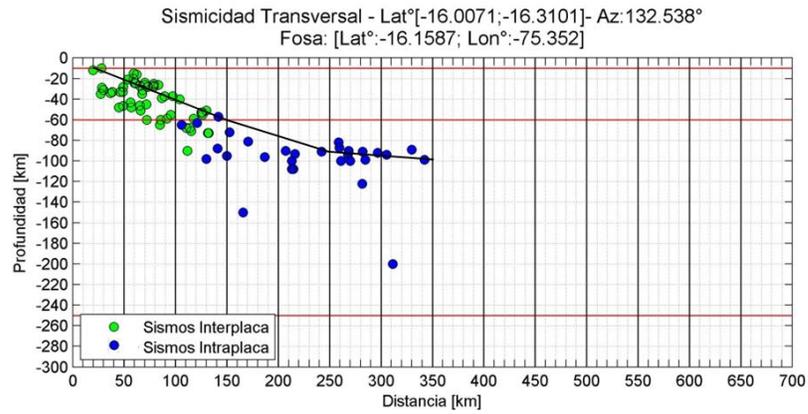


Figura B 97: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.01;-16.31]

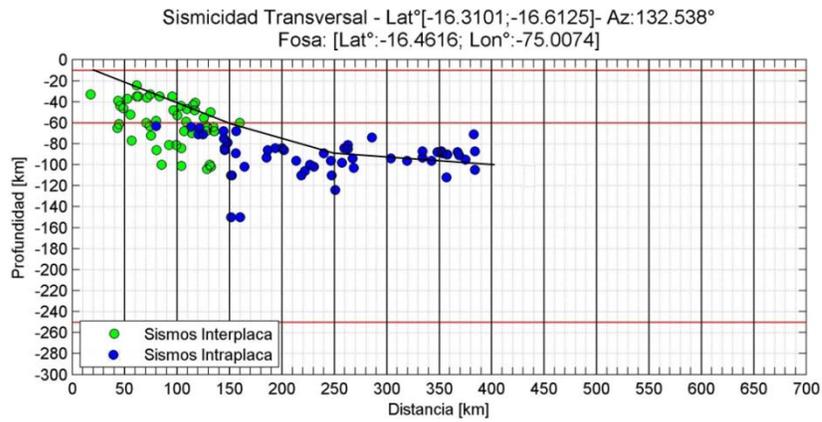


Figura B 98: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.31;-16.61]

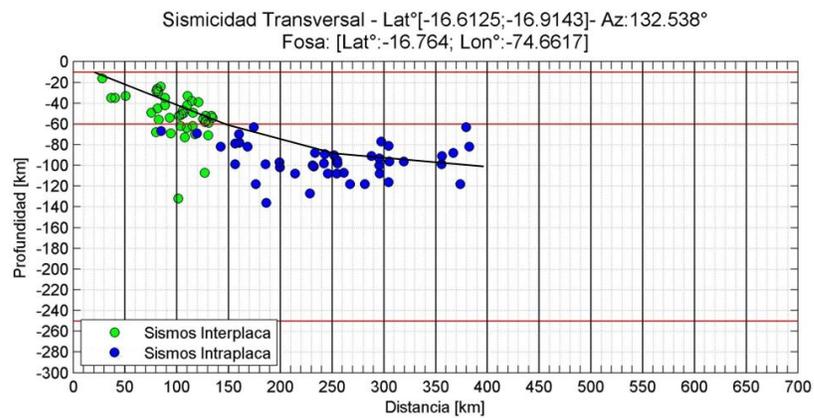


Figura B 99: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.61;-16.91]

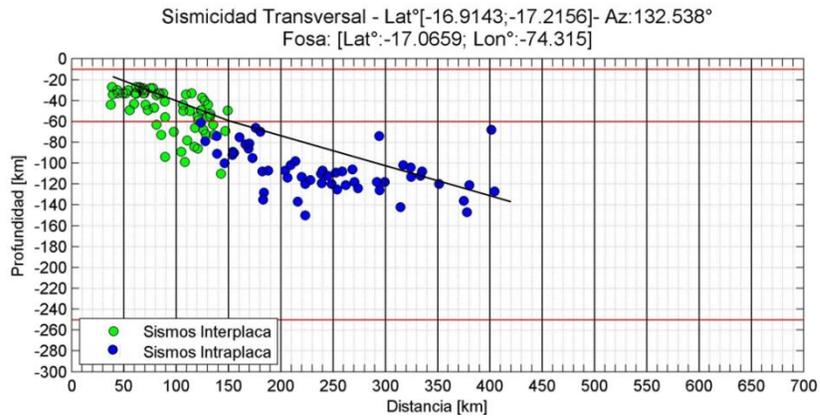


Figura B 100: Perfil de Sismicidad Latitud°[-16.91;-17.21]

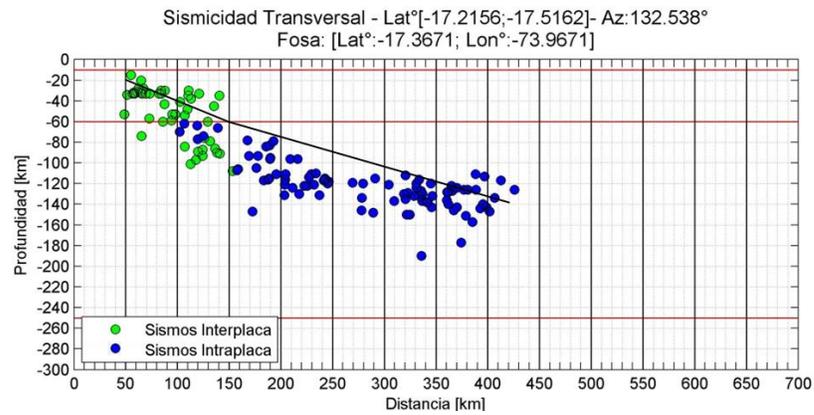


Figura B 101: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.21;-17.51]

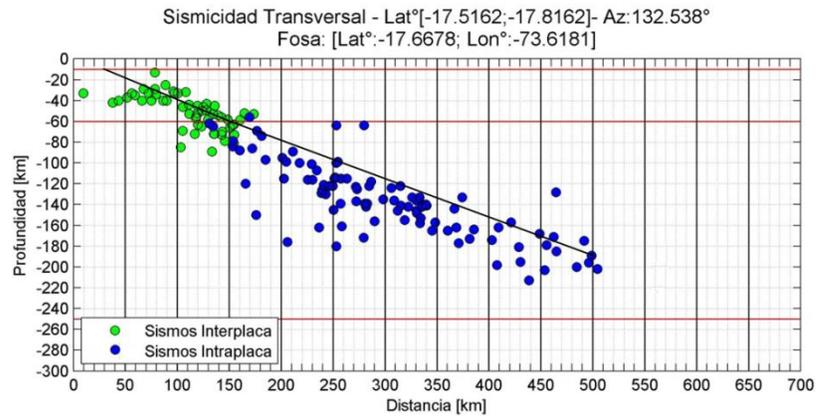


Figura B 102: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.15;-17.81]

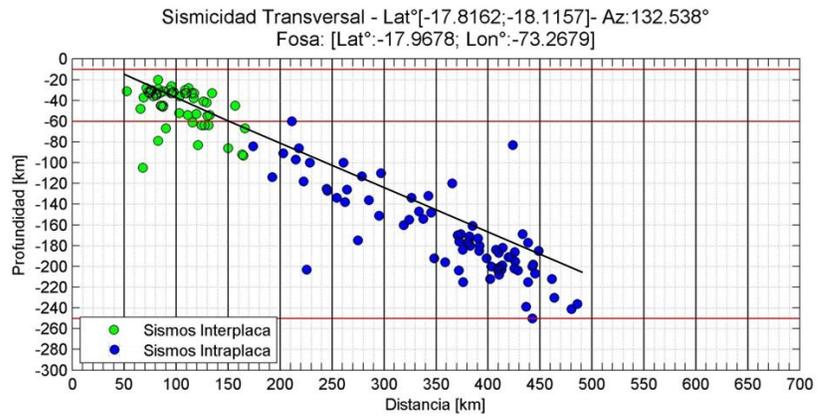


Figura B 103: Perfil de Sismicidad Latitud°[-17.81;-18.11]

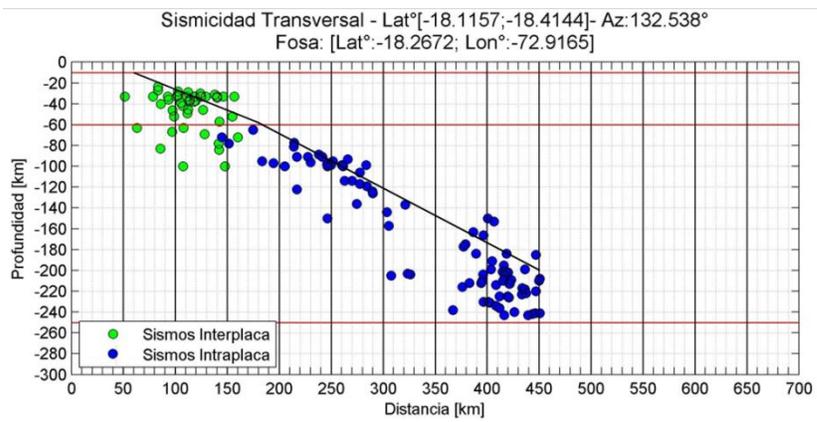


Figura B 104: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.11;-18.41]

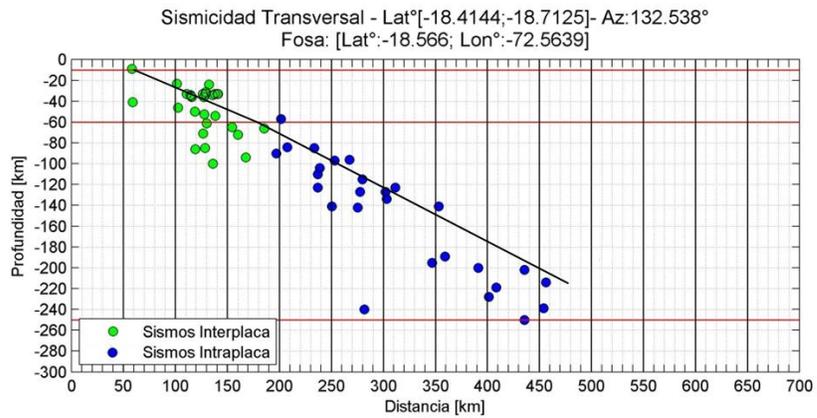


Figura B 105: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.41;-18.71]

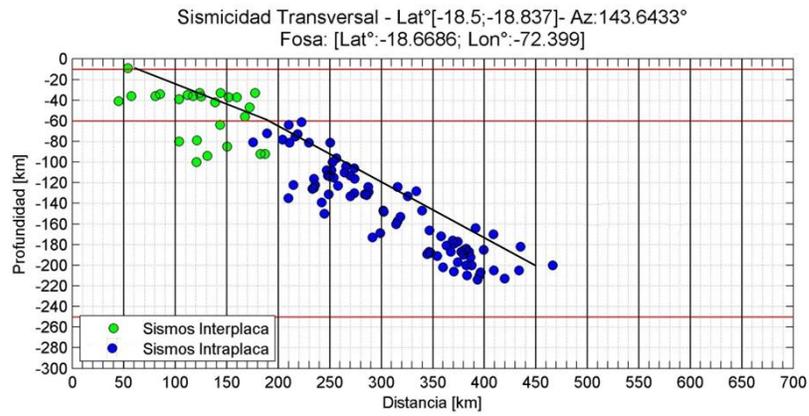


Figura B 106: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.5;-18.83]

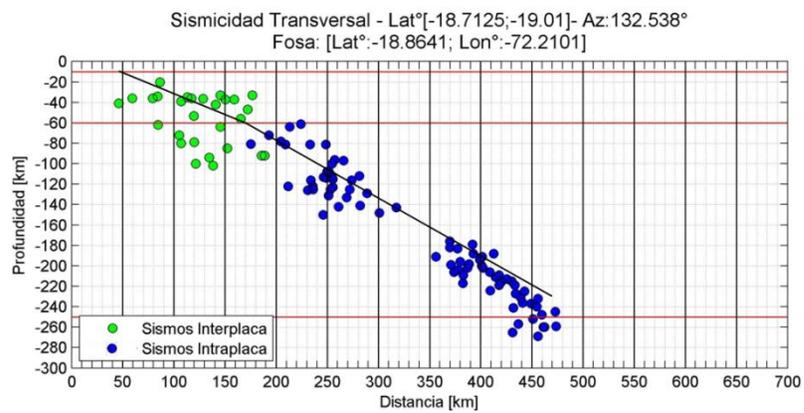


Figura B 107: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.71;-19.01]

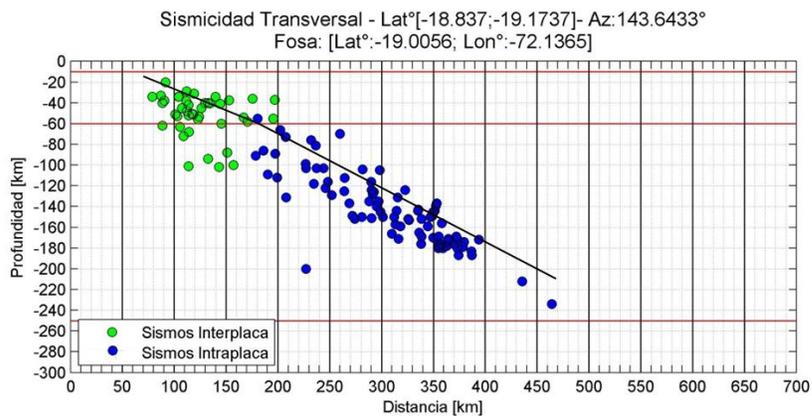


Figura B 108: Perfil de Sismicidad Latitud°[-18.83;-19.17]

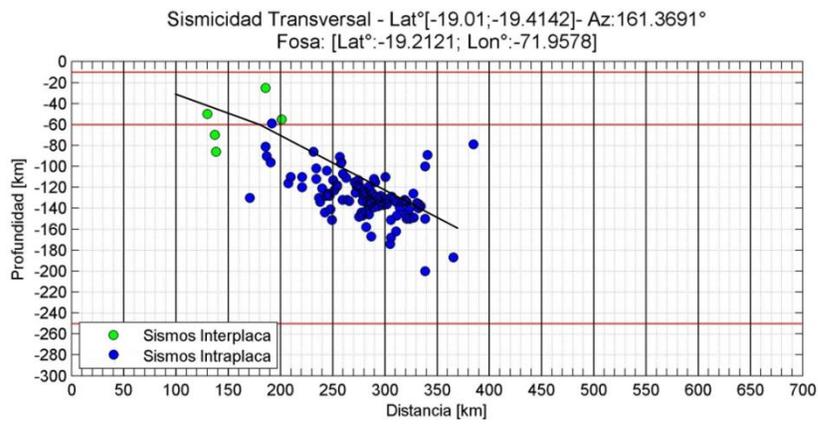


Figura B 109: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.01;-19.41]

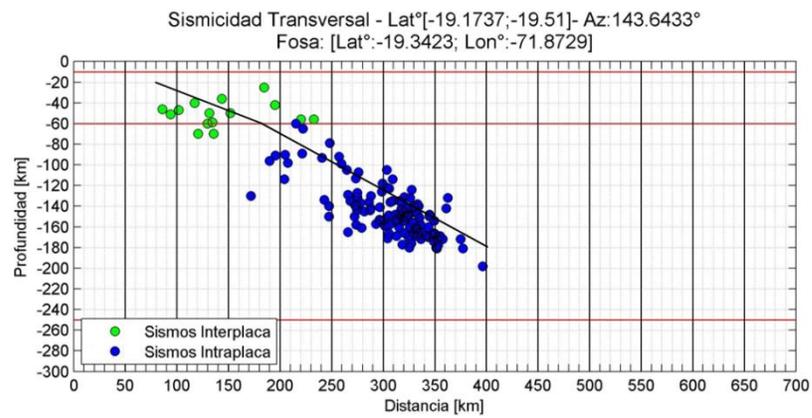


Figura B 110: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.17;-19.51]

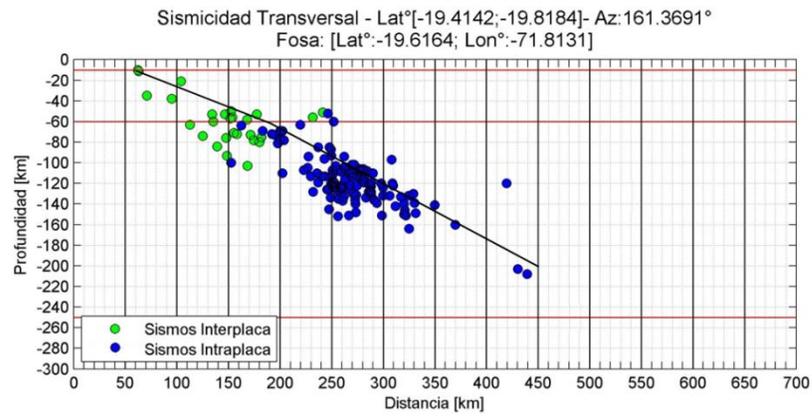


Figura B 111: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.41;-19.81]

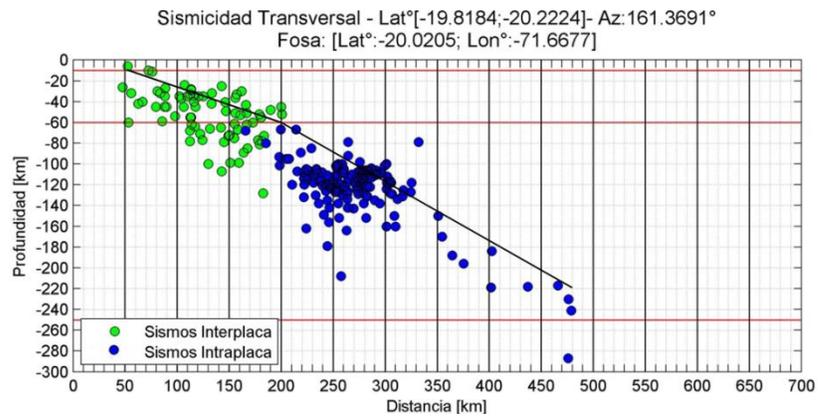


Figura B 112: Perfil de Sismicidad Latitud°[-19.81;-20.22]

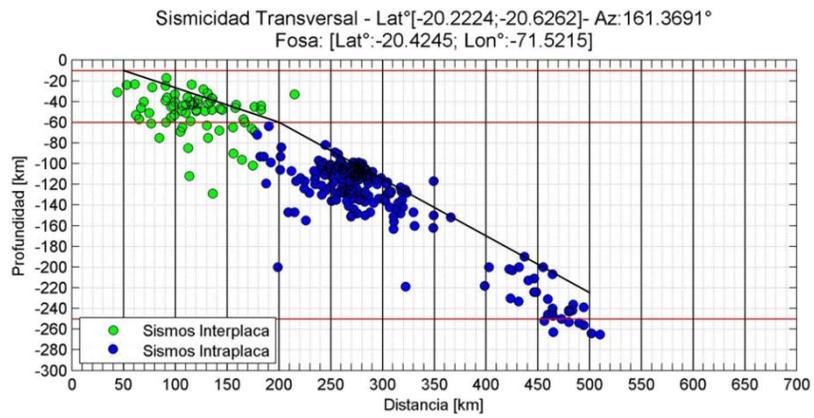


Figura B 113: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.22;-20.62]

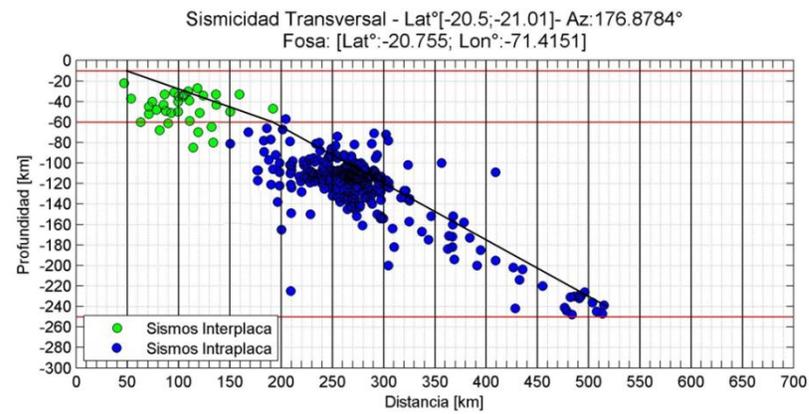


Figura B 114: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.5;-21.01]

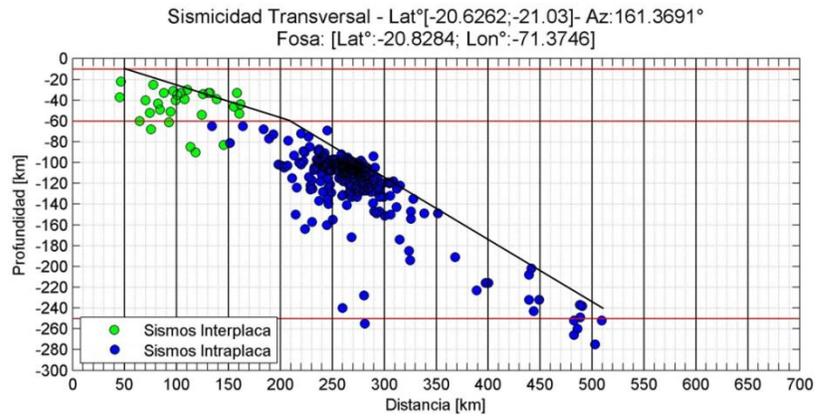


Figura B 115: Perfil de Sismicidad Latitud°[-20.62;-21.03]

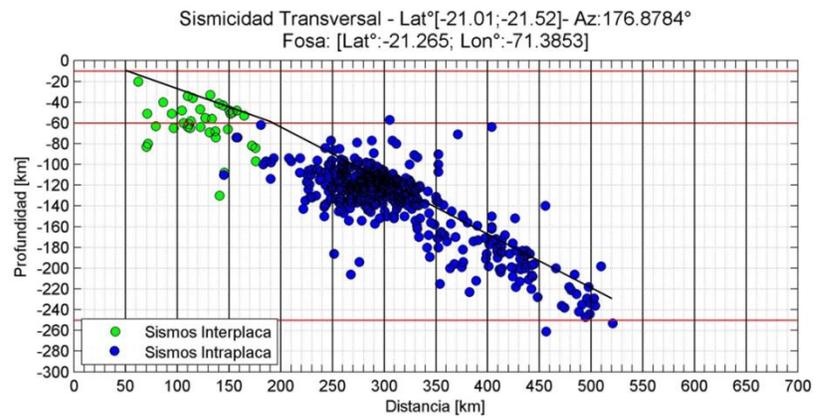


Figura B 116: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.01;-21.52]

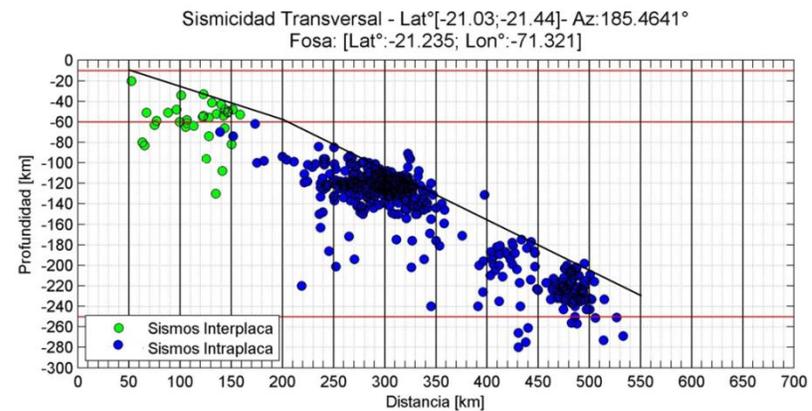


Figura B 117: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.03;-21.44]

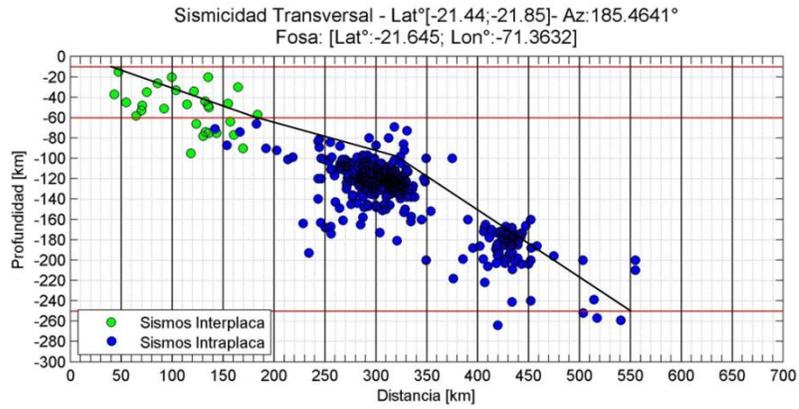


Figura B 118: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.44;-21.85]

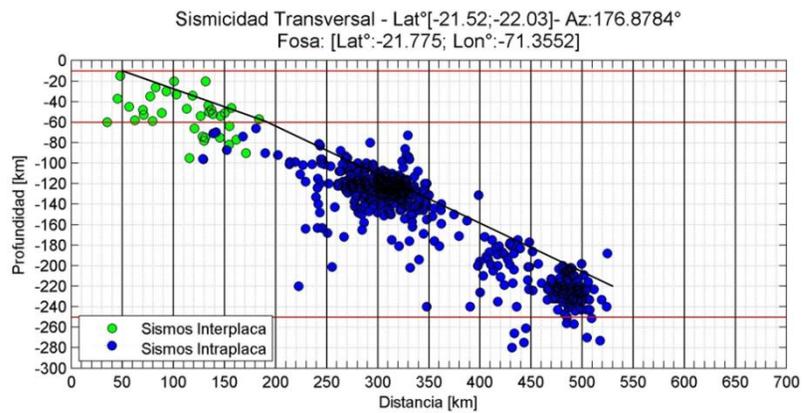


Figura B 119: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.52;-22.03]

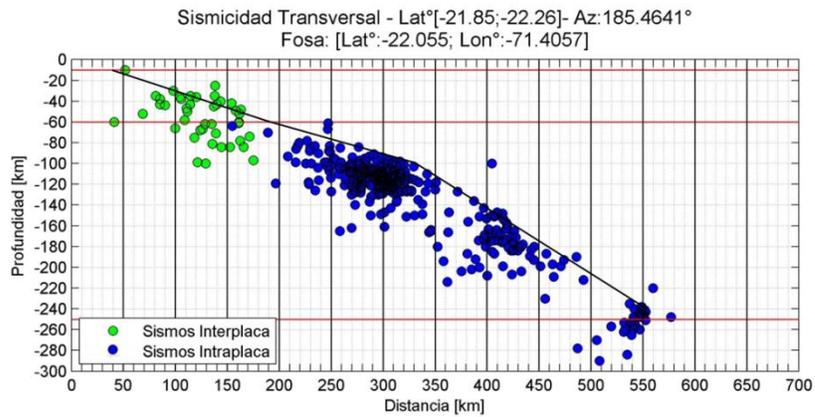


Figura B 120: Perfil de Sismicidad Latitud°[-21.85;-22.26]

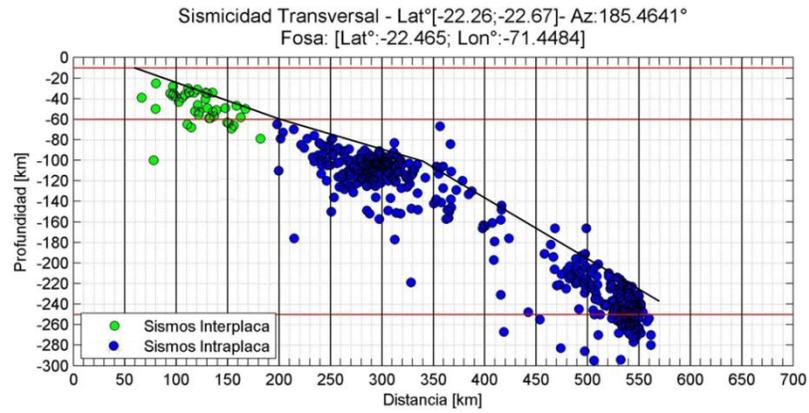


Figura B 121: Perfil de Sismicidad Latitud°[-22.26;-22.67]

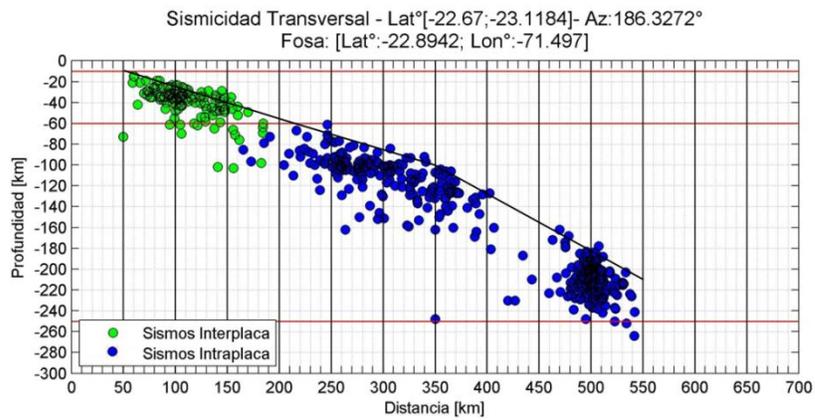


Figura B 122: Perfil de Sismicidad Latitud°[-22.67;-23.12]

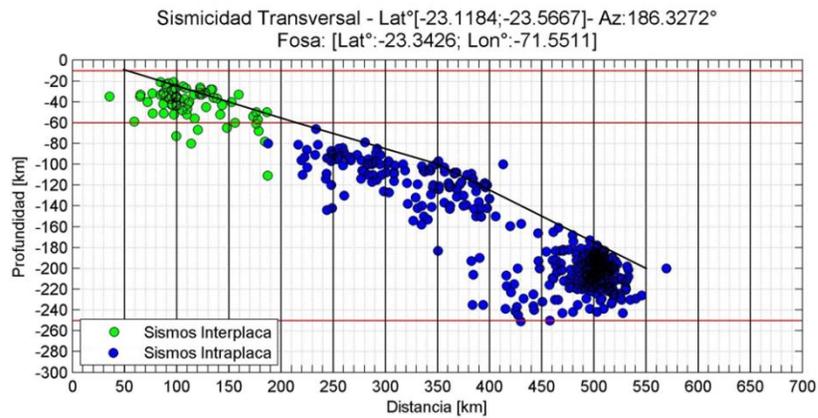


Figura B 123: Perfil de Sismicidad Latitud°[-23.12;-23.57]

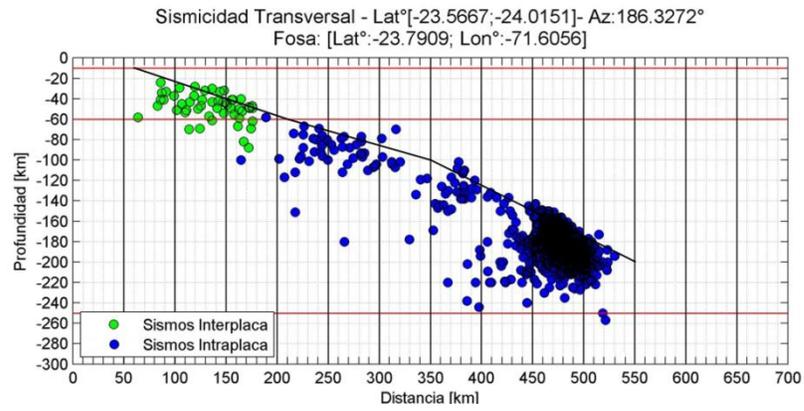


Figura B 124: Perfil de Sismicidad Latitud°[-23.57;-24.02]

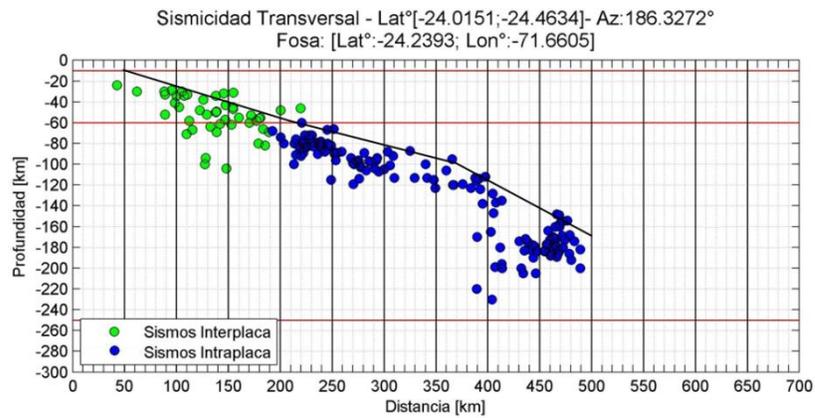


Figura B 125: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.02;-24.46]

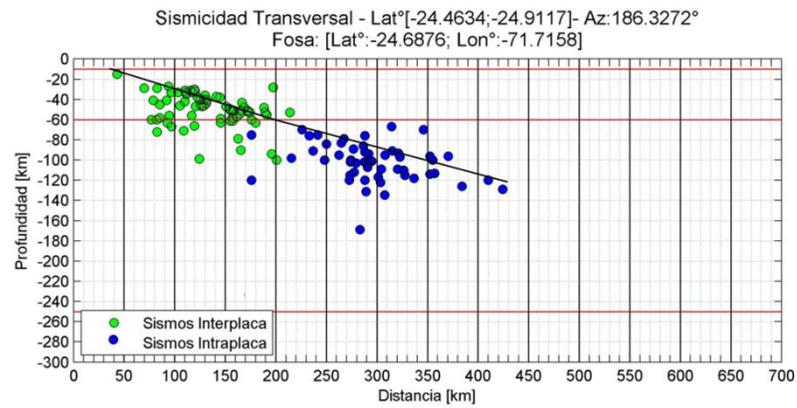


Figura B 126: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.46;-24.91]

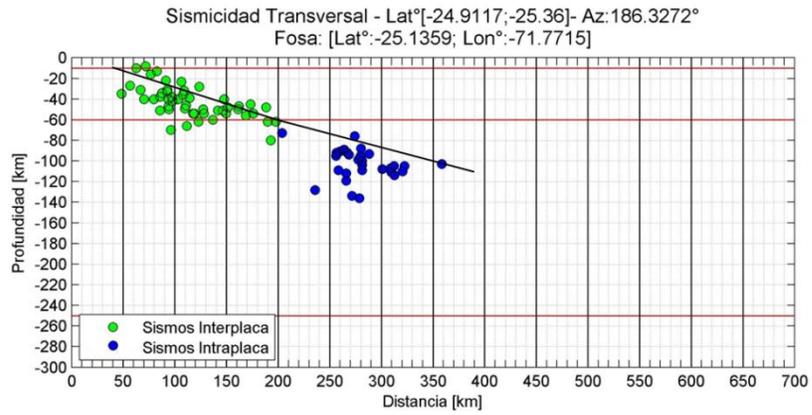


Figura B 127: Perfil de Sismicidad Latitud°[-24.91;-25.36]

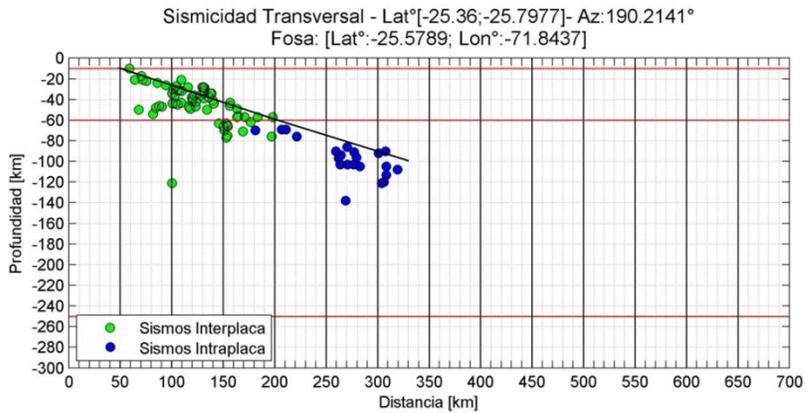


Figura B 128: Perfil de Sismicidad Latitud°[-25.36;-25.79]

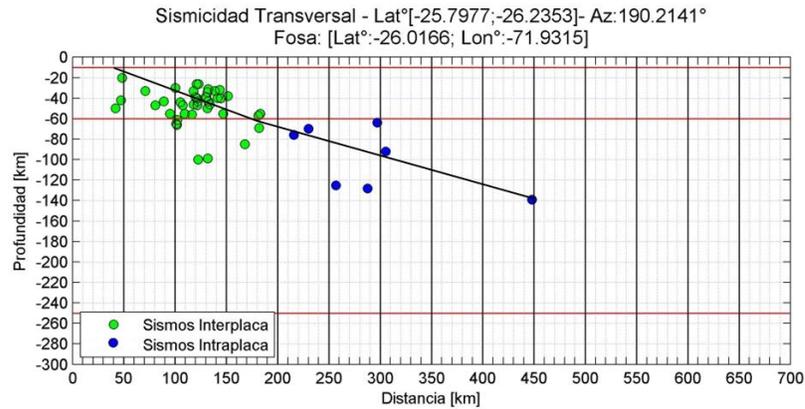


Figura B 129: Perfil de Sismicidad Latitud°[-25.79;-26.23]

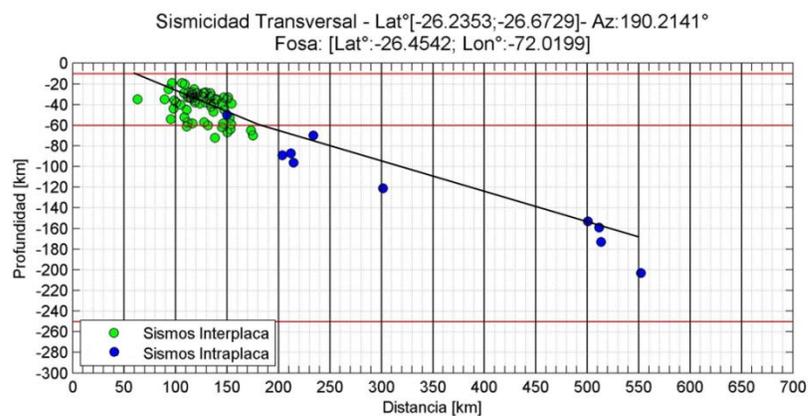


Figura B 130: Perfil de Sismicidad Latitud°[-26.23;-26.67]

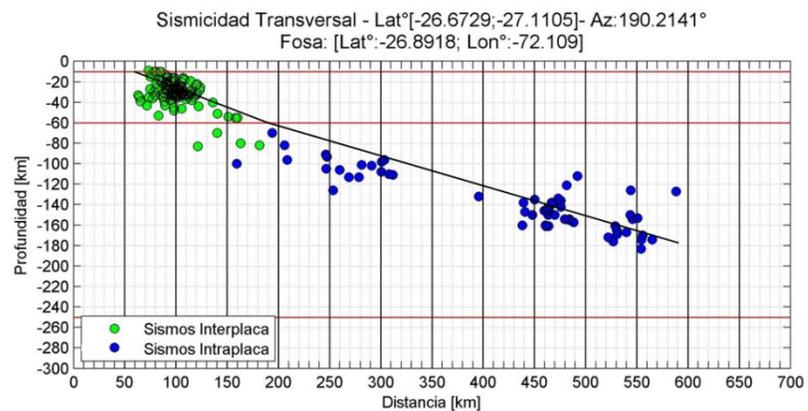


Figura B 131: Perfil de Sismicidad Latitud°[-26.67;-27.11]

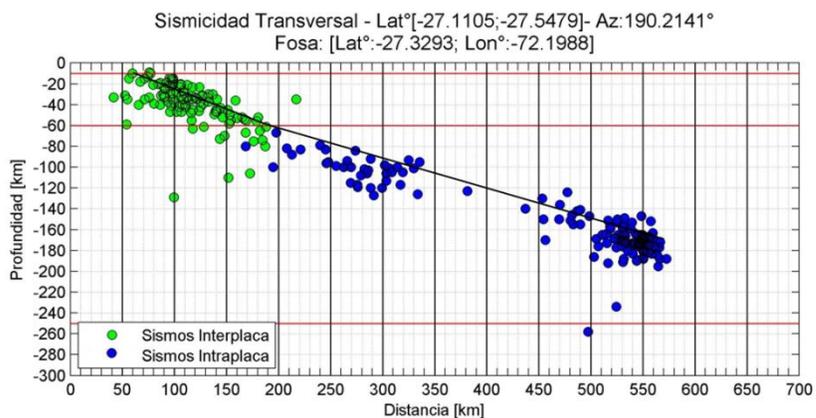


Figura B 132: Perfil de Sismicidad Latitud°[-27.11;-27.54]

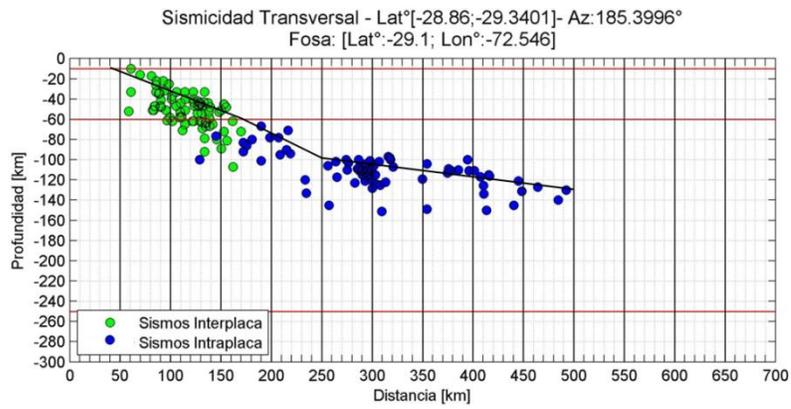


Figura B 133: Perfil de Sismicidad Latitud°[-28.86;-29.34]

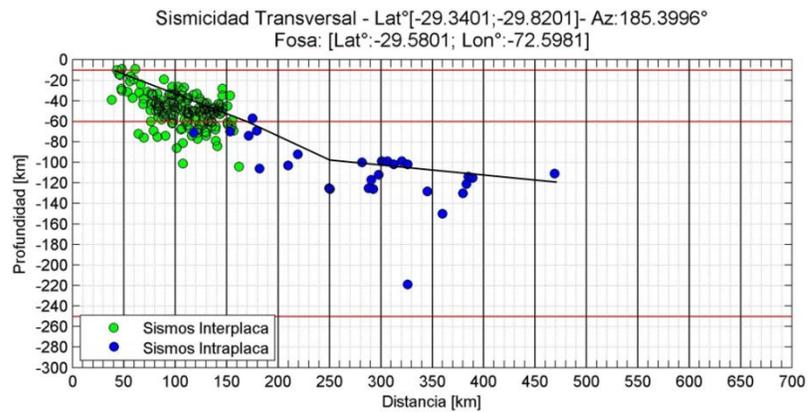


Figura B 134: Perfil de Sismicidad Latitud°[-29.34;-29.82]

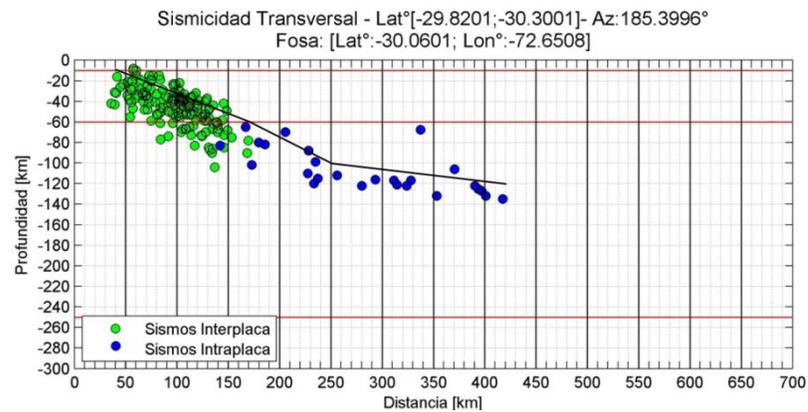


Figura B 135: Perfil de Sismicidad Latitud°[-29.82;-30.3]

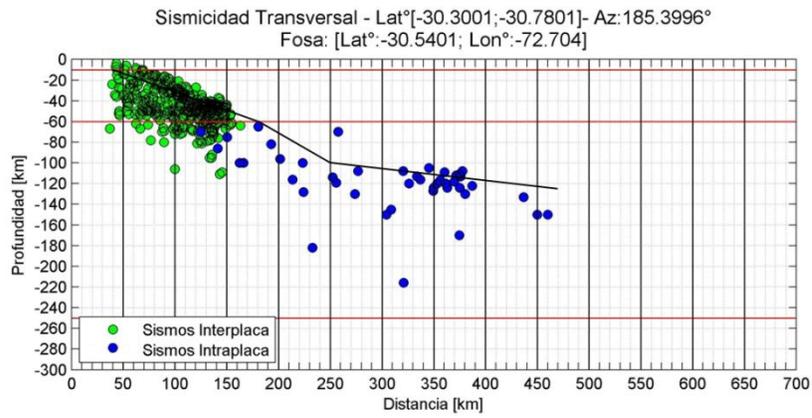


Figura B 136: Perfil de Sismicidad Latitud°[-30.3;-30.78]

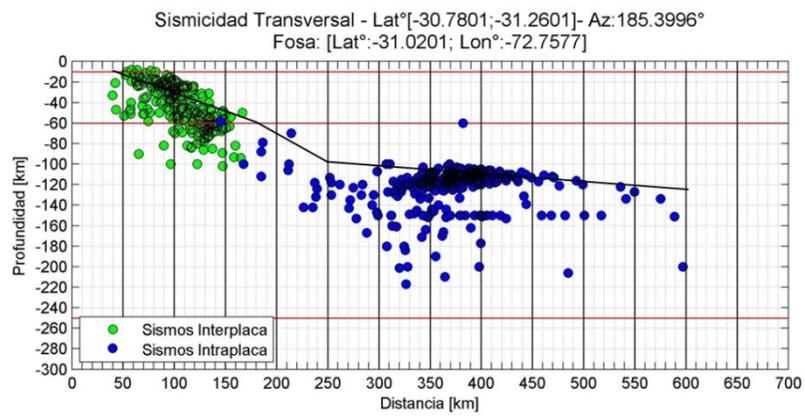


Figura B 137: Perfil de Sismicidad Latitud°[-30.78;-31.26]

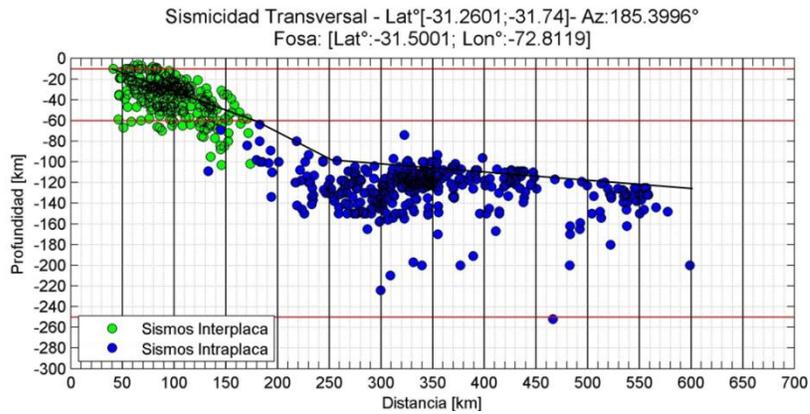


Figura B 138: Perfil de Sismicidad Latitud°[-31.5;-31.74]

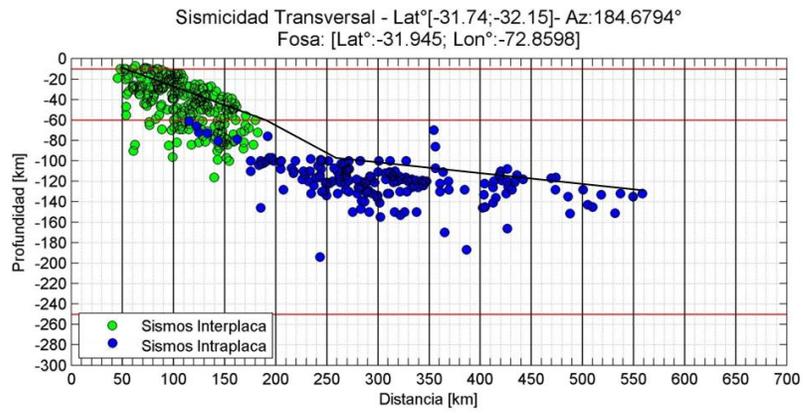


Figura B 139: Perfil de Sismicidad Latitud°[-31.74;-32.15]

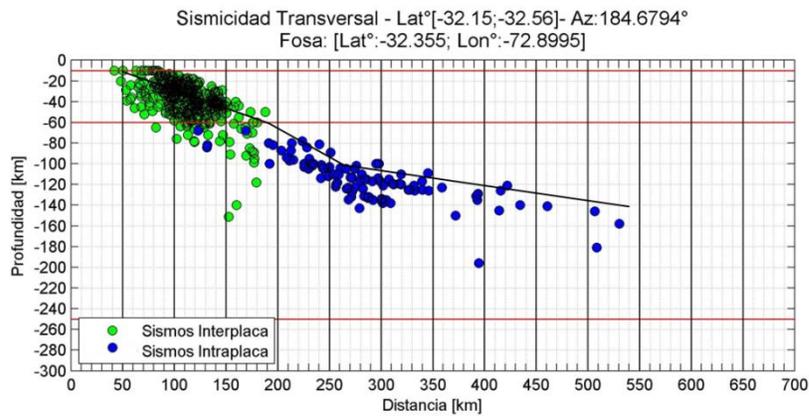


Figura B 140: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.15;-32.56]

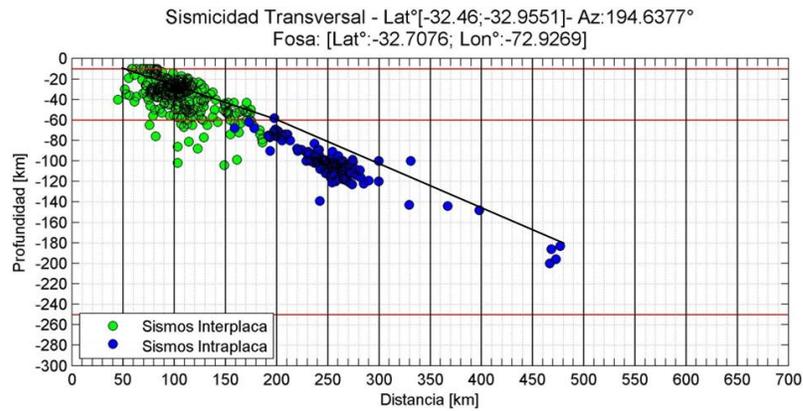


Figura B 141: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.46;-32.96]

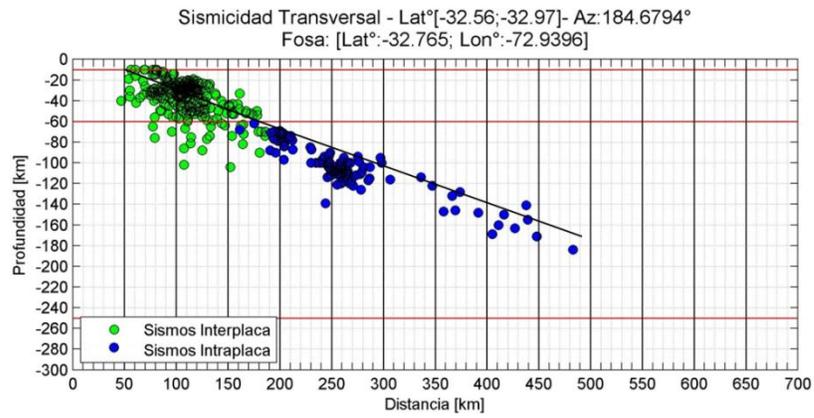


Figura B 142: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.56;-32.97]

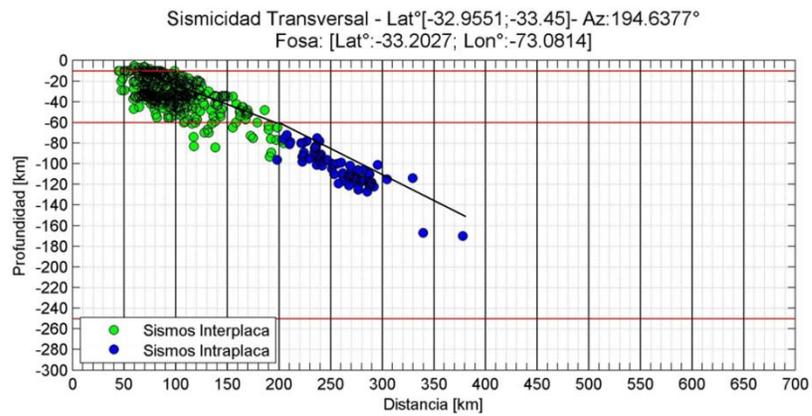


Figura B 143: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.96;-33.45]

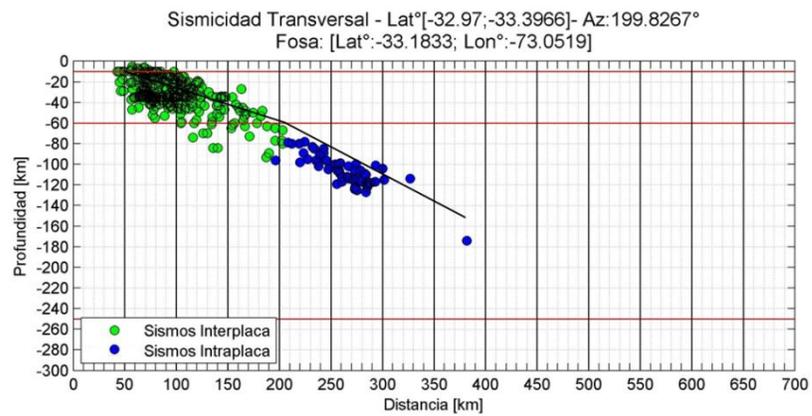


Figura B 144: Perfil de Sismicidad Latitud°[-32.97;-33.39]

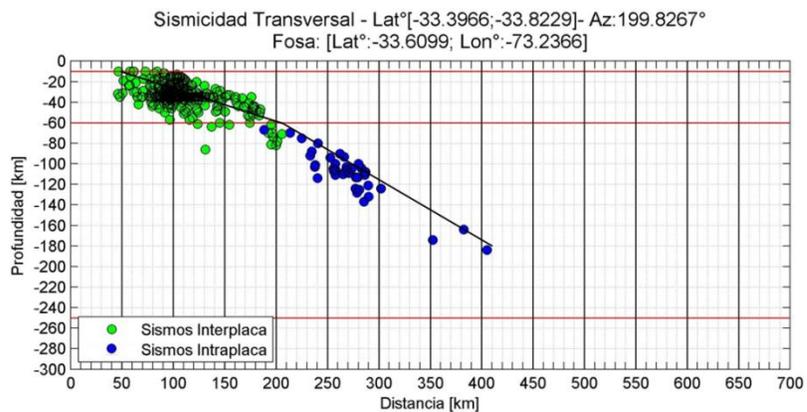


Figura B 145: Perfil de Sismicidad Latitud°[-33.39;-33.82]

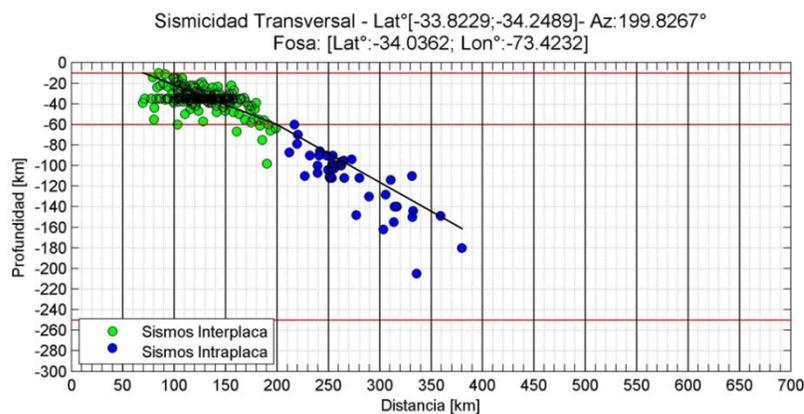


Figura B 146: Perfil de Sismicidad Latitud°[-33.82;-34.24]

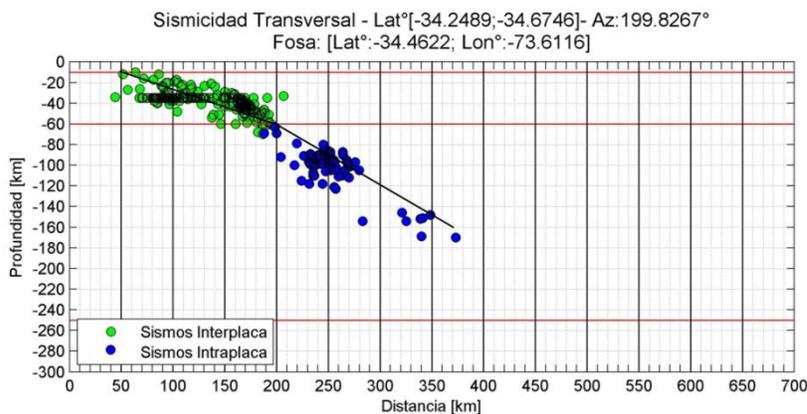


Figura B 147: Perfil de Sismicidad Latitud°[-34.24;-34.67]

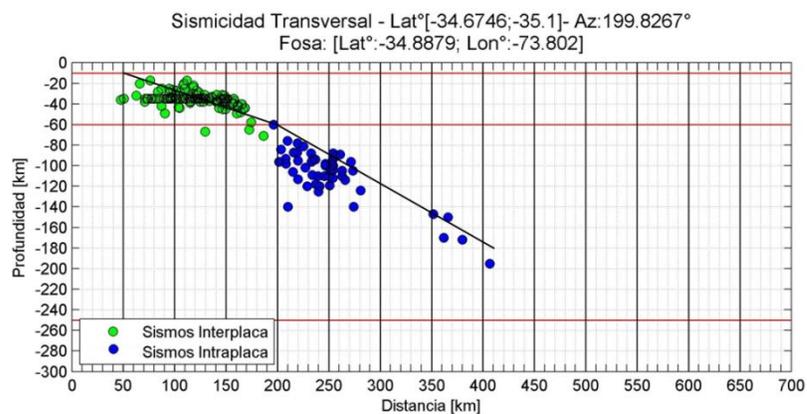


Figura B 148: Perfil de Sismicidad Latitud°[-34.67;-35.1]

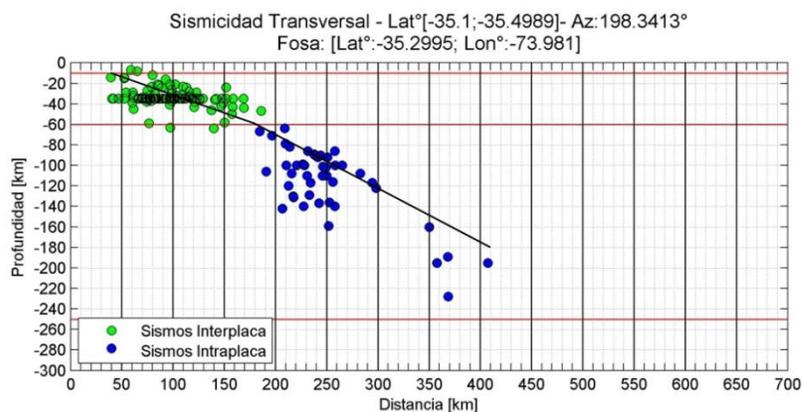


Figura B 149: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.1;-35.49]

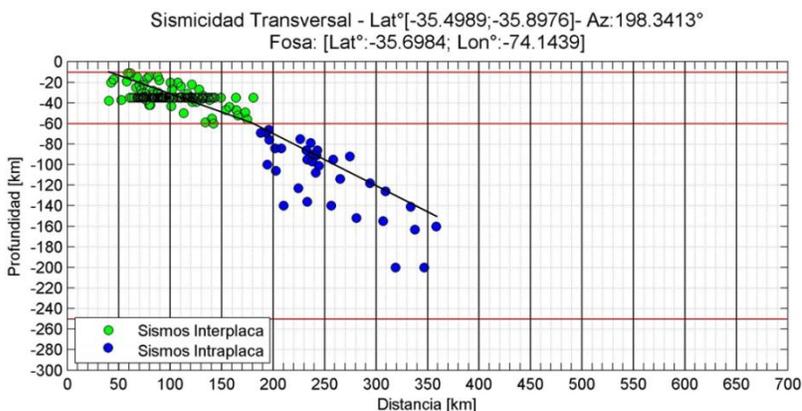


Figura B 150: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.49;-35.89]

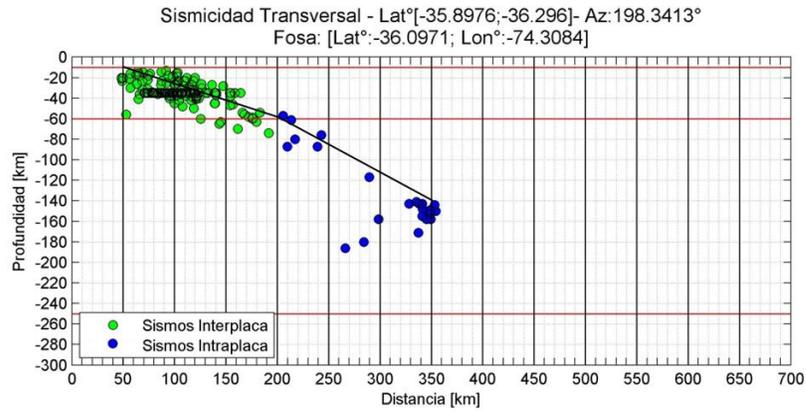


Figura B 151: Perfil de Sismicidad Latitud°[-35.89;-36.29]

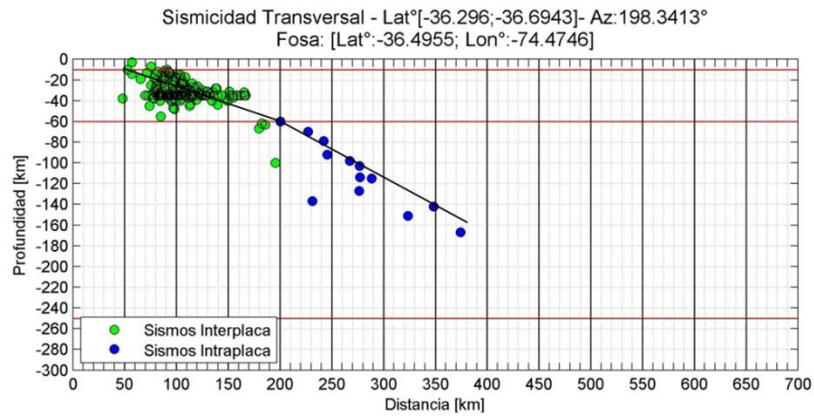


Figura B 152: Perfil de Sismicidad Latitud°[-36.29;-36.69]

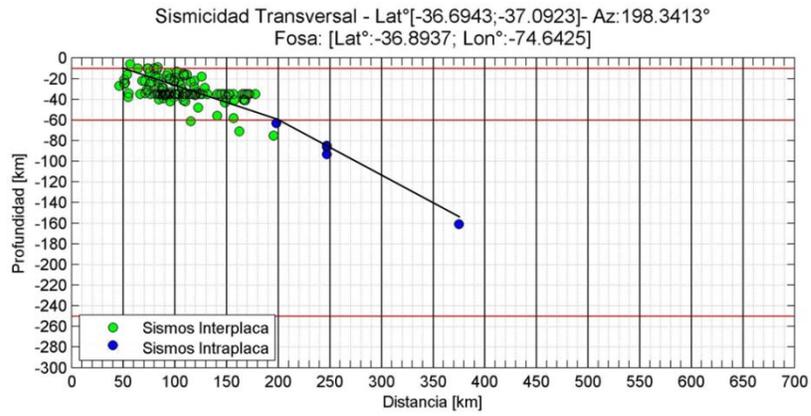


Figura B 153: Perfil de Sismicidad Latitud°[-36.69;-37.09]

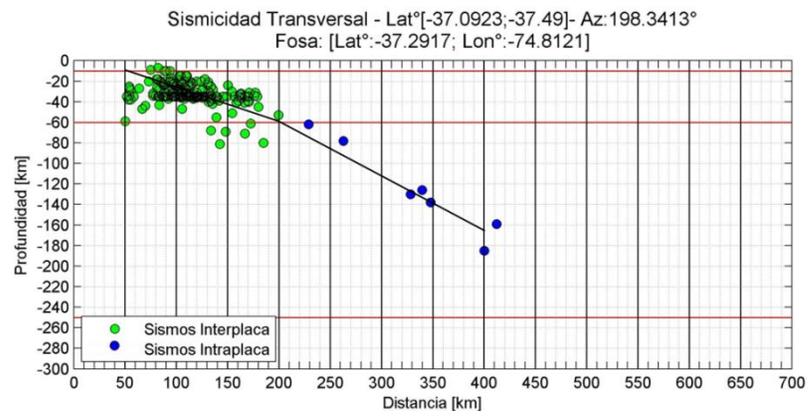


Figura B 154: Perfil de Sismicidad Latitud°[-37.09;-37.49]

B.3 GEOMETRÍAS DEL PLANO DE SUBDUCCIÓN UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.

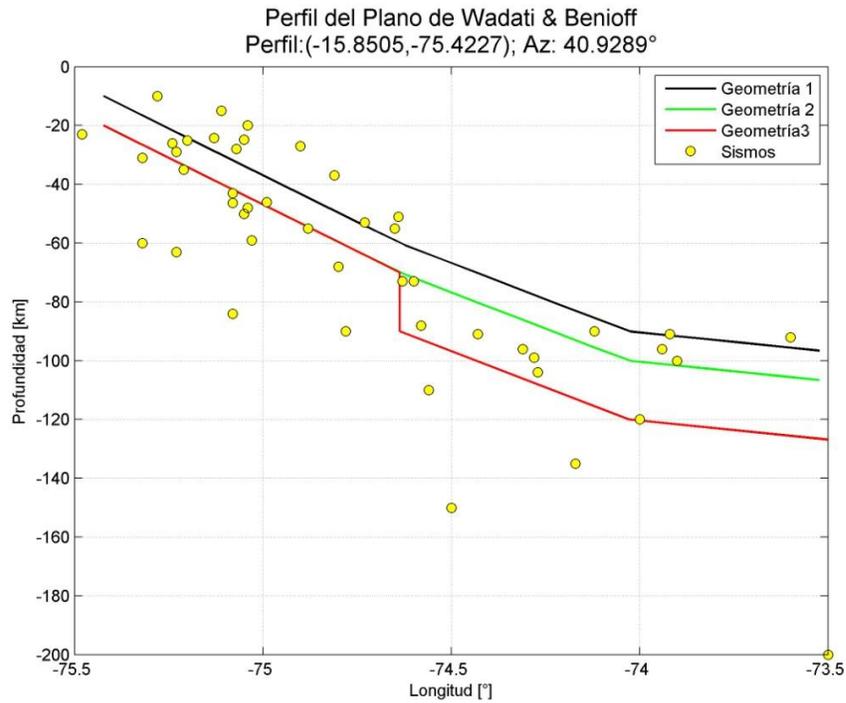


Figura B 155: Perfil Latitud: -15.85° ; Geometrías utilizadas en el estudio

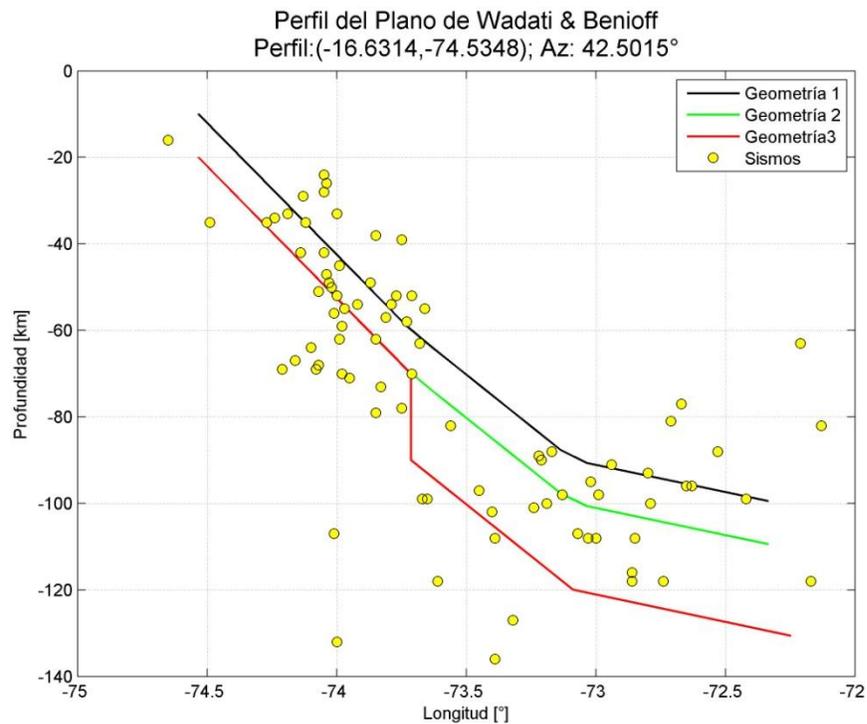


Figura B 156: Perfil Latitud: -16.63° ; Geometrías utilizadas en el estudio

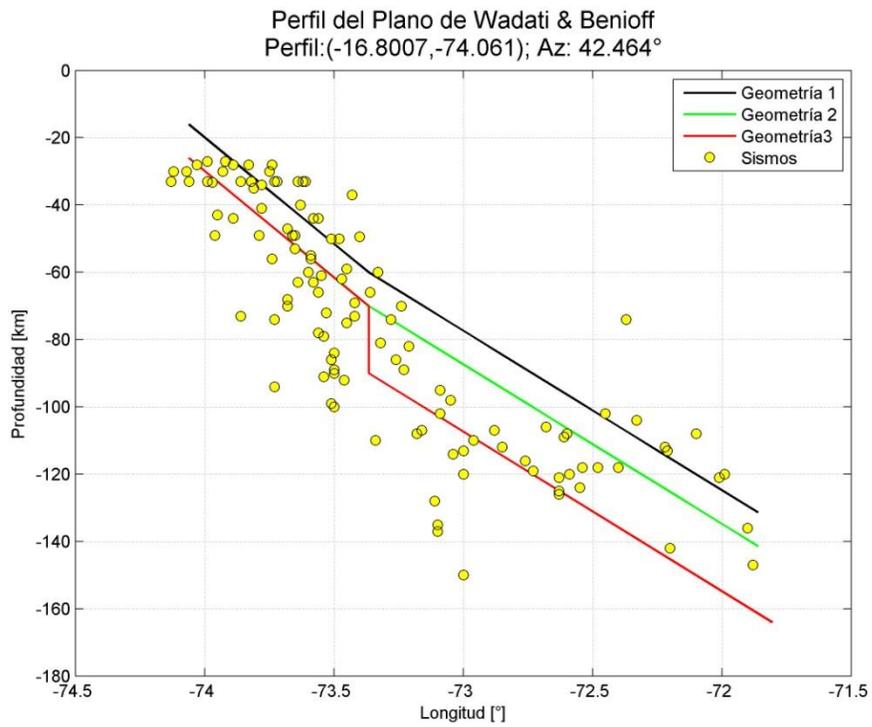


Figura B 157: Perfil Latitud: -16.80° ; Geometrías utilizadas en el estudio

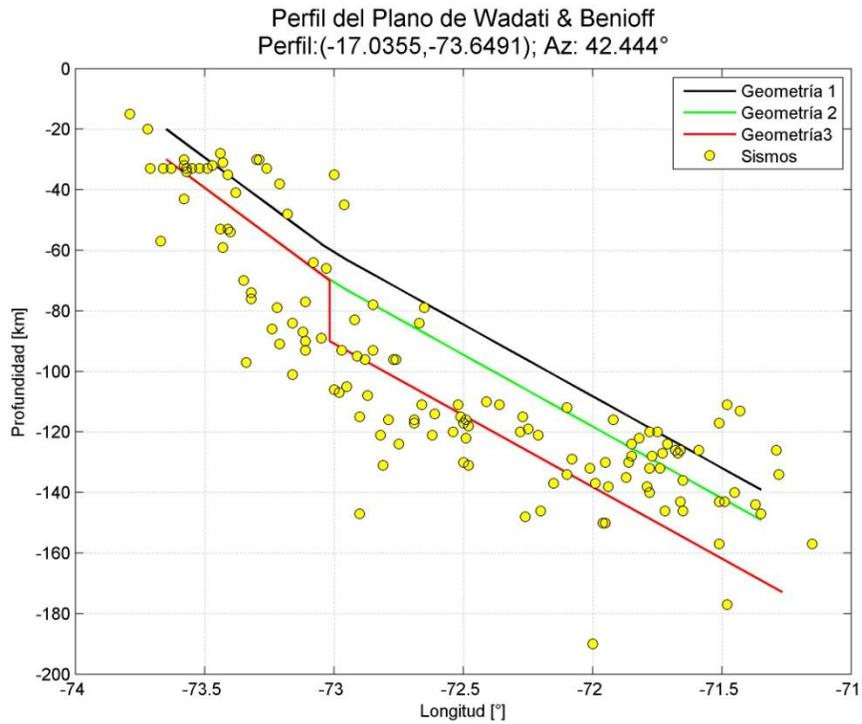


Figura B 158: Perfil Latitud: -17.04° ; Geometrías utilizadas en el estudio

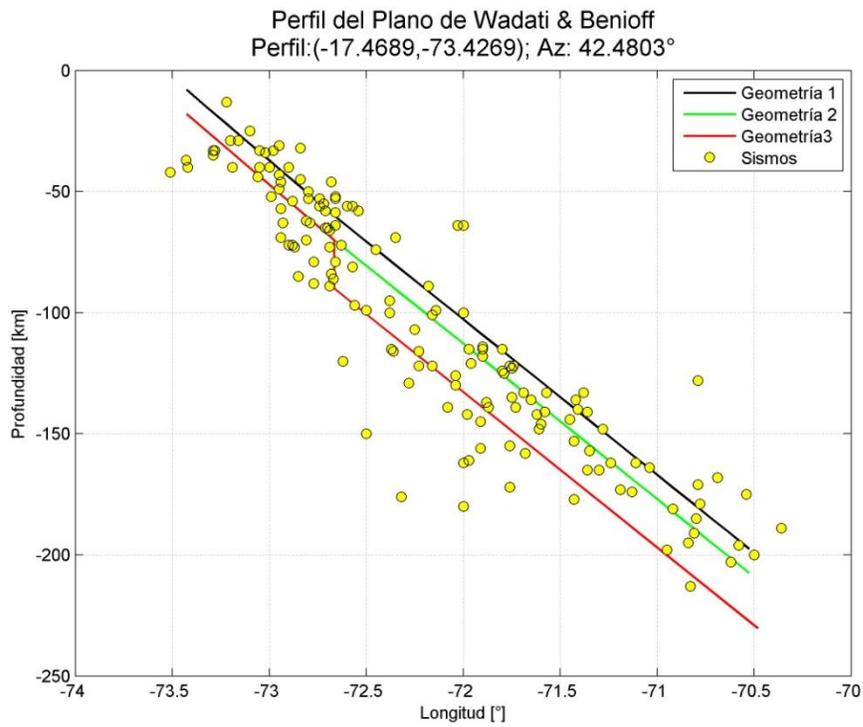


Figura B 159: Perfil Latitud: -17.47° ; Geometrías utilizadas en el estudio

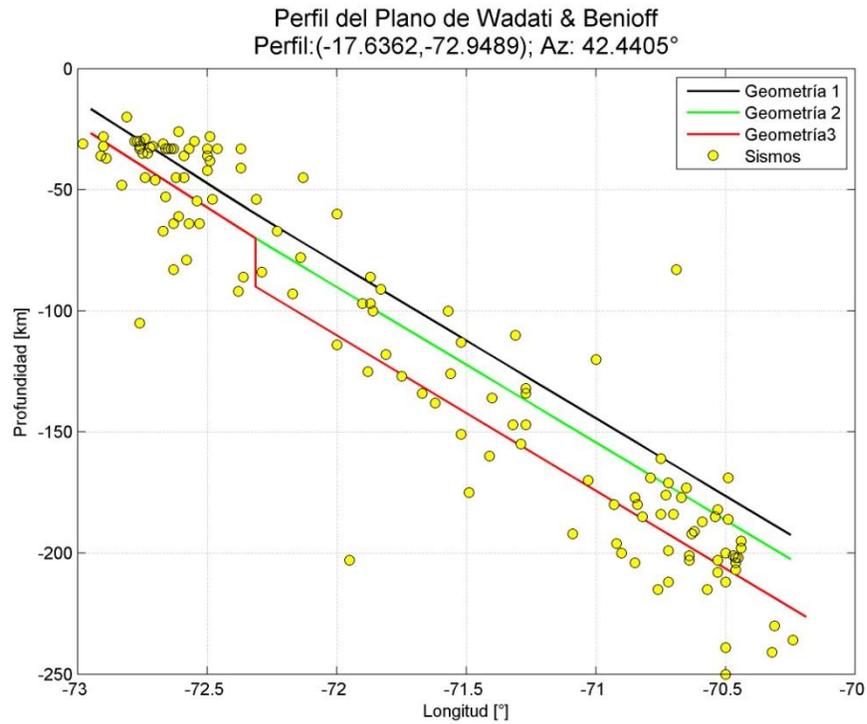


Figura B 160: Perfil Latitud: -17.64° ; Geometrías utilizadas en el estudio

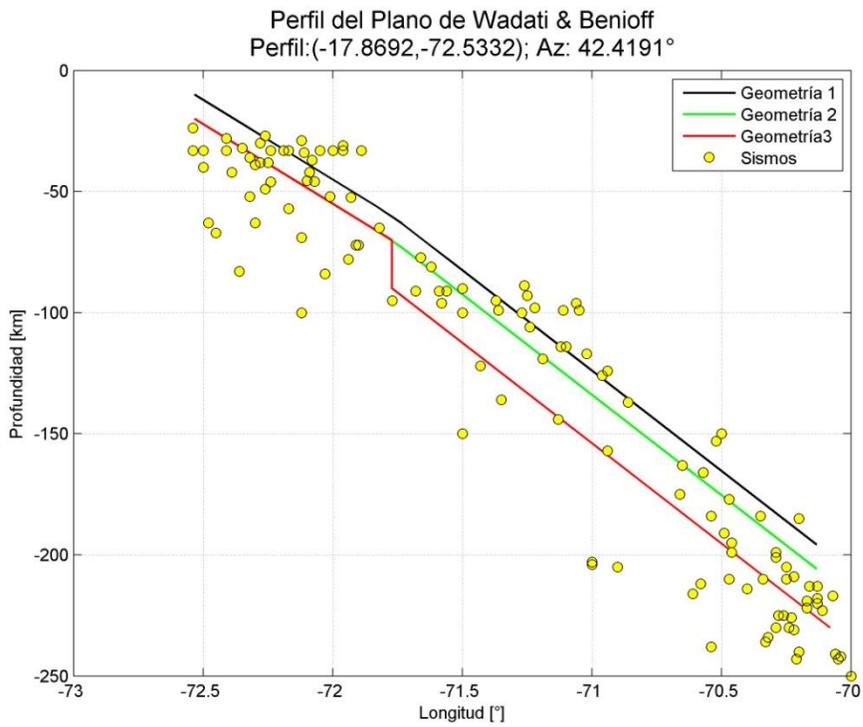


Figura B 161: Perfil Latitud: -17.87° ; Geometrías utilizadas en el estudio

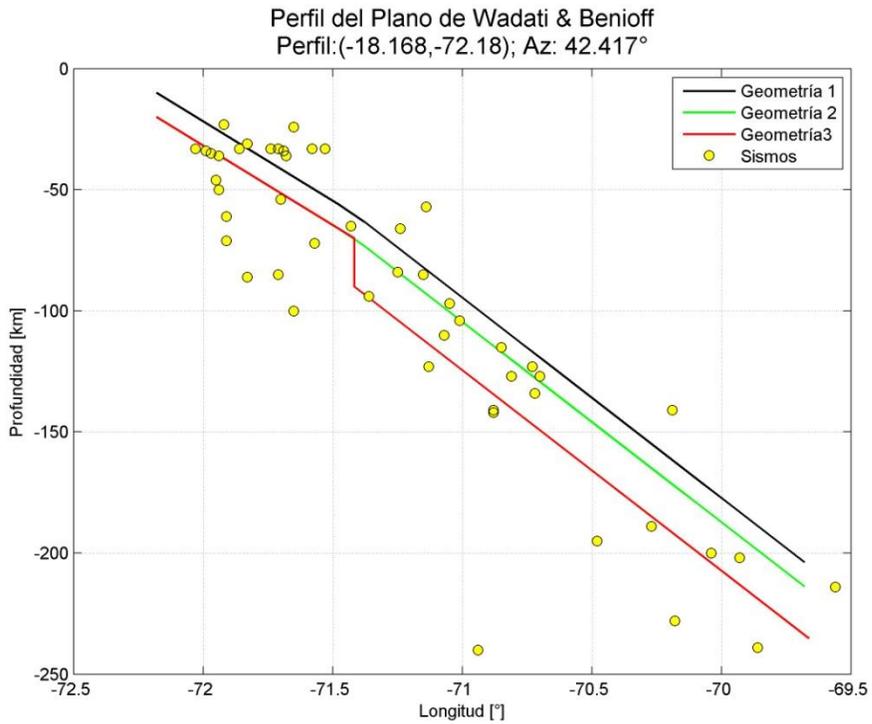


Figura B 162: Perfil Latitud: -18.17° ; Geometrías utilizadas en el estudio

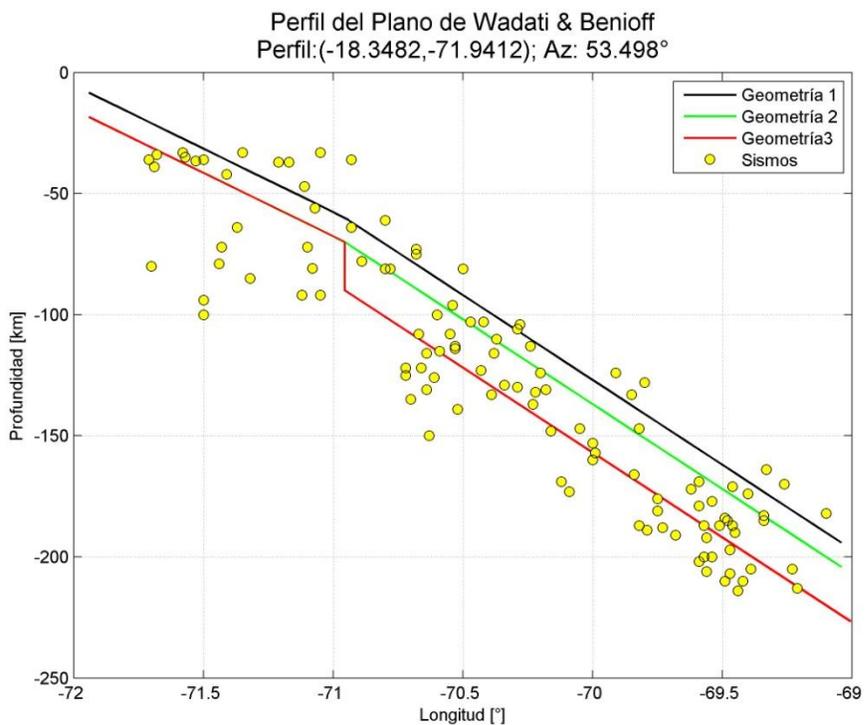


Figura B 163: Perfil Latitud: -18.35° ; Geometrías utilizadas en el estudio

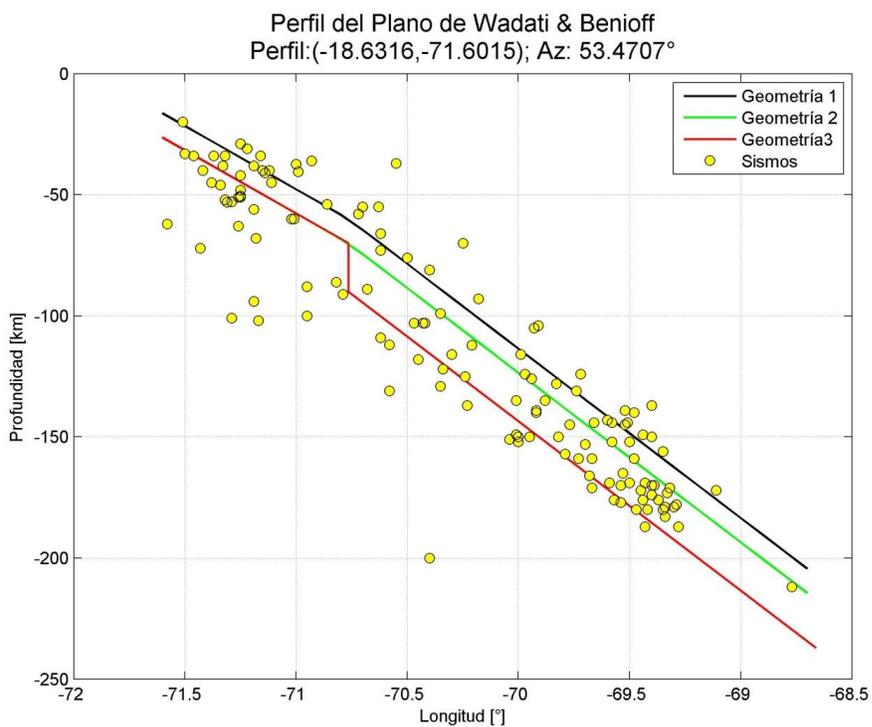


Figura B 164: Perfil Latitud: -18.63° ; Geometrías utilizadas en el estudio

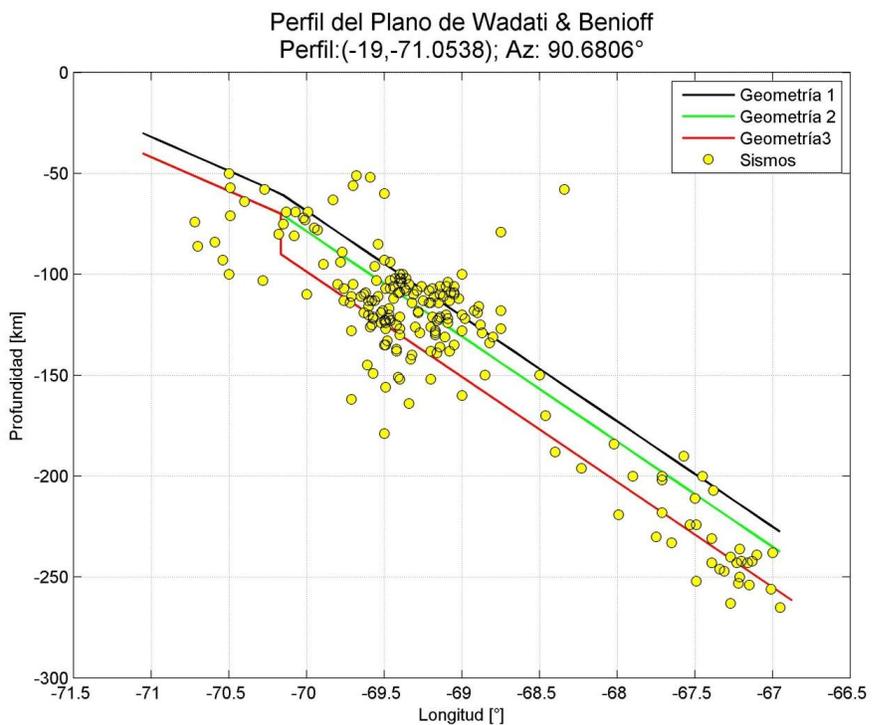


Figura B 165: Perfil Latitud: -19° ; Geometrías utilizadas en el estudio

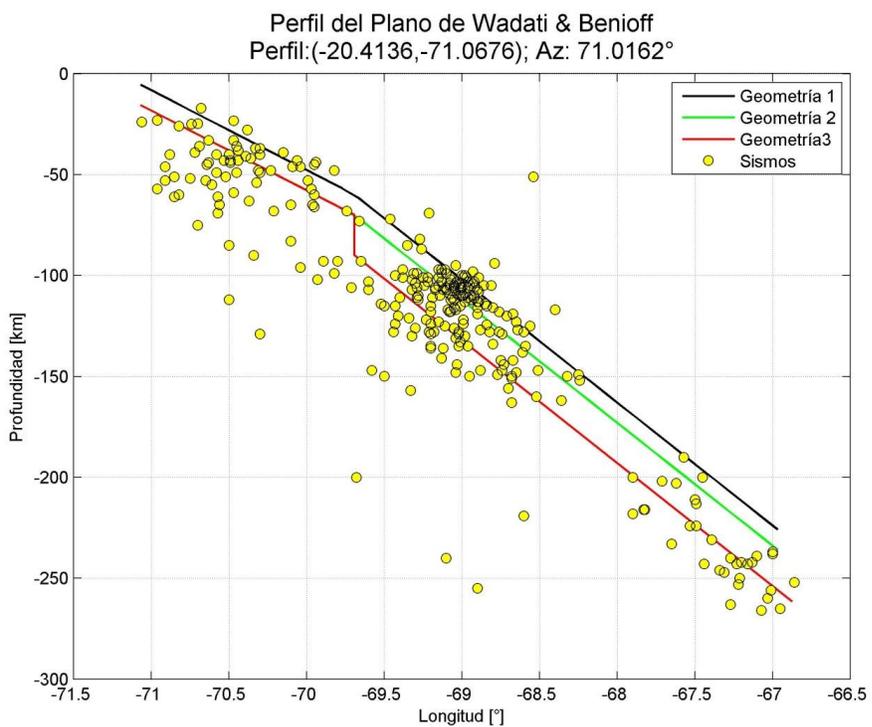


Figura B 166: Perfil Latitud: -20.41° ; Geometrías utilizadas en el estudio

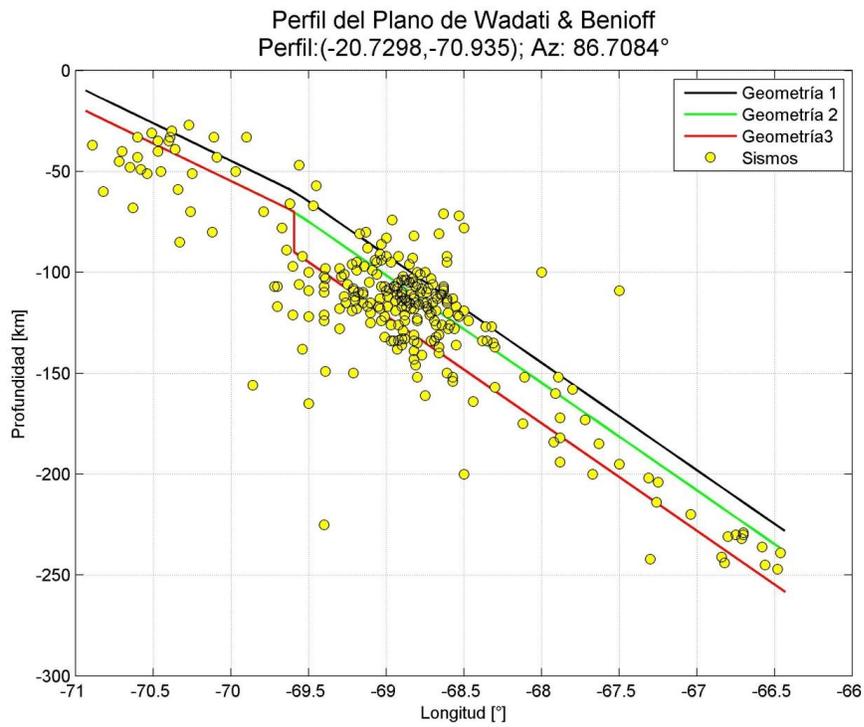


Figura B 167: Perfil Latitud: -20.73° ; Geometrías utilizadas en el estudio

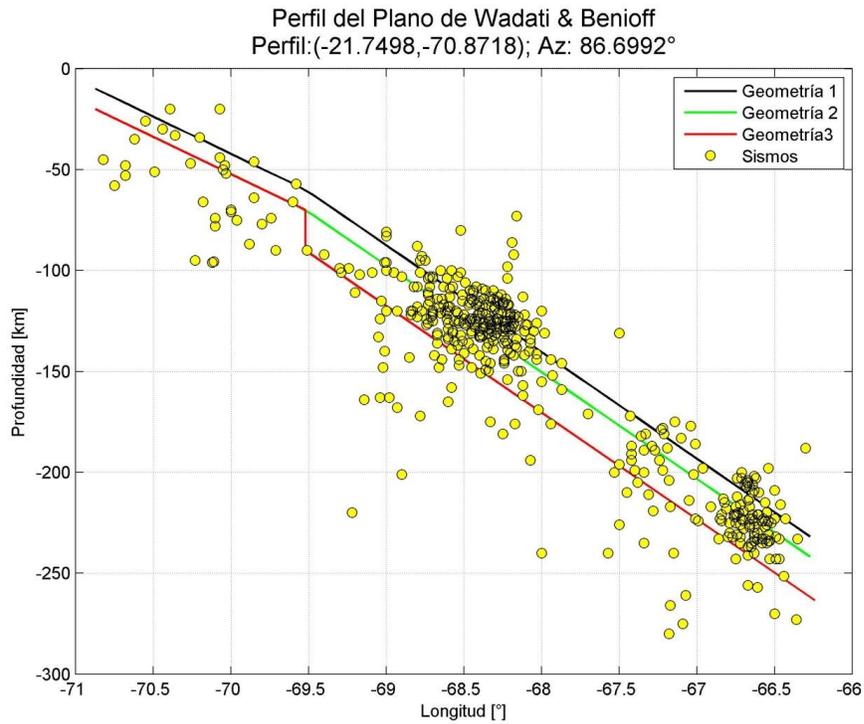


Figura B 168: Perfil Latitud: -21.75° ; Geometrías utilizadas en el estudio

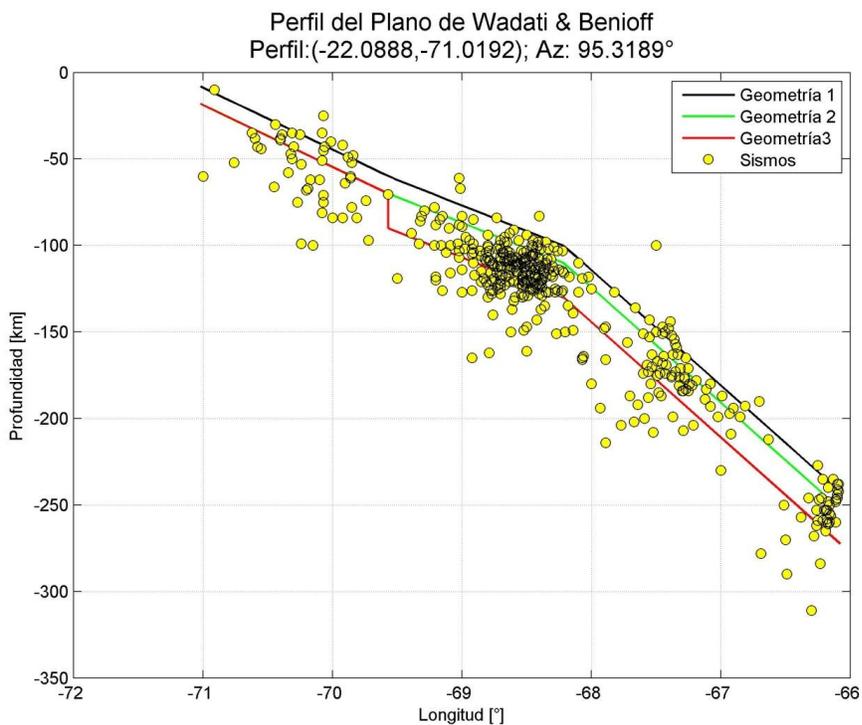


Figura B 169: Perfil Latitud: -22.09° ; Geometrías utilizadas en el estudio

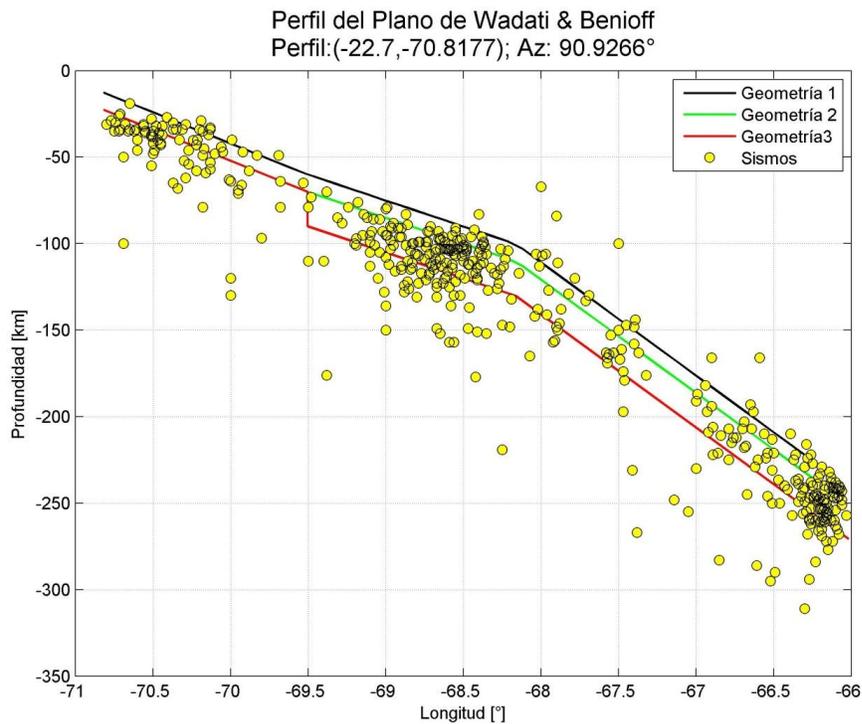


Figura B 170: Perfil Latitud: -22.7° ; Geometrías utilizadas en el estudio

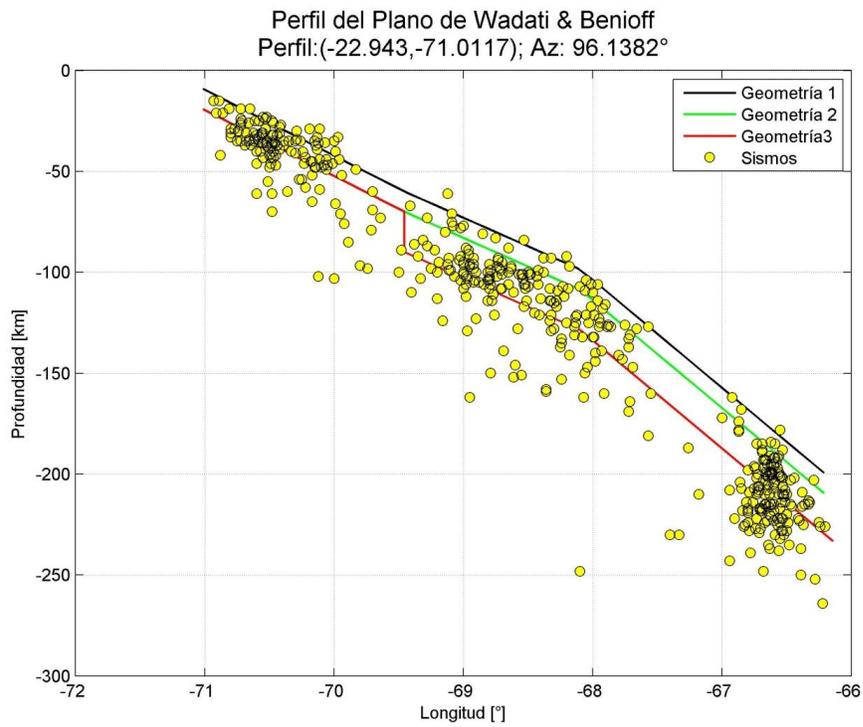


Figura B 171: Perfil Latitud: -22.94° ; Geometrías utilizadas en el estudio

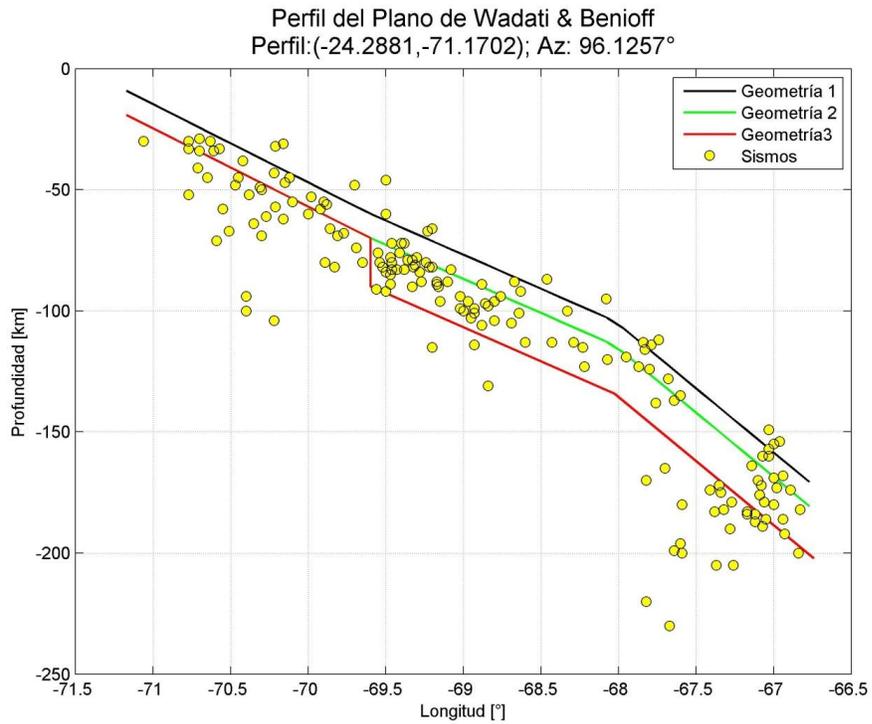


Figura B 172: Perfil Latitud: -24.29° ; Geometrías utilizadas en el estudio

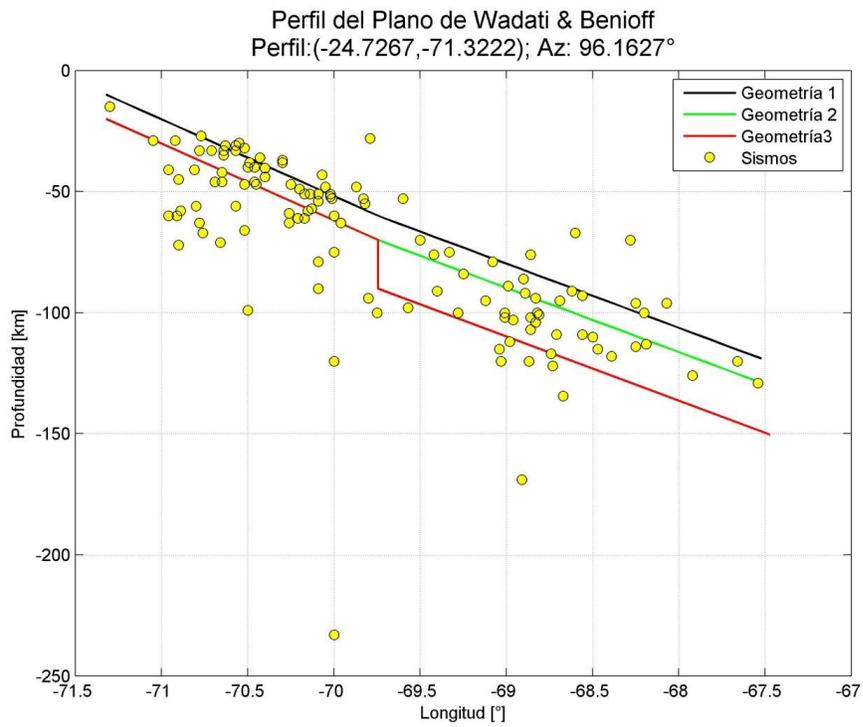


Figura B 173: Perfil Latitud: -24.73° ; Geometrías utilizadas en el estudio

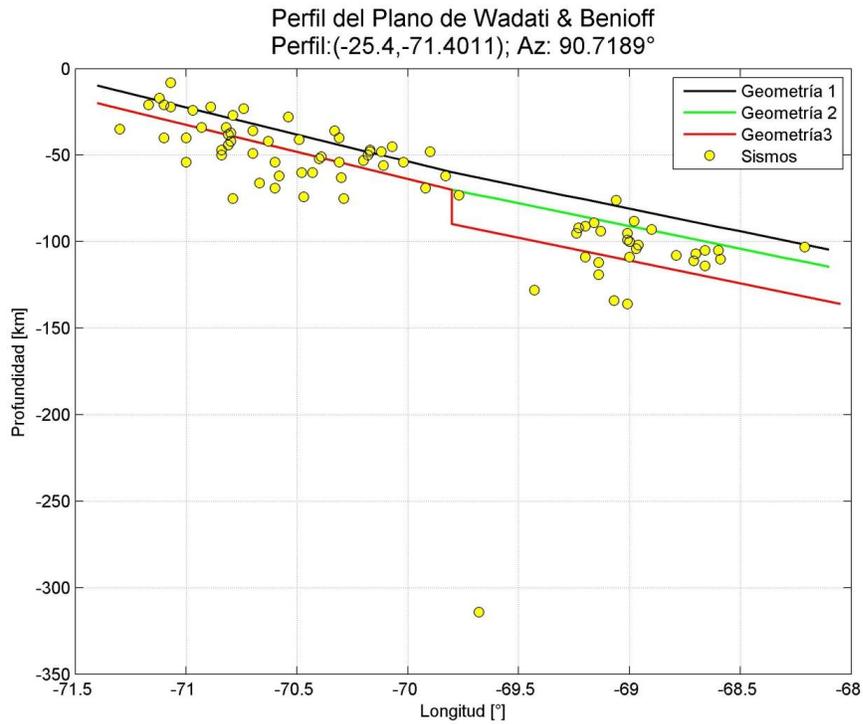


Figura B 174: Perfil Latitud: -25.4° ; Geometrías utilizadas en el estudio

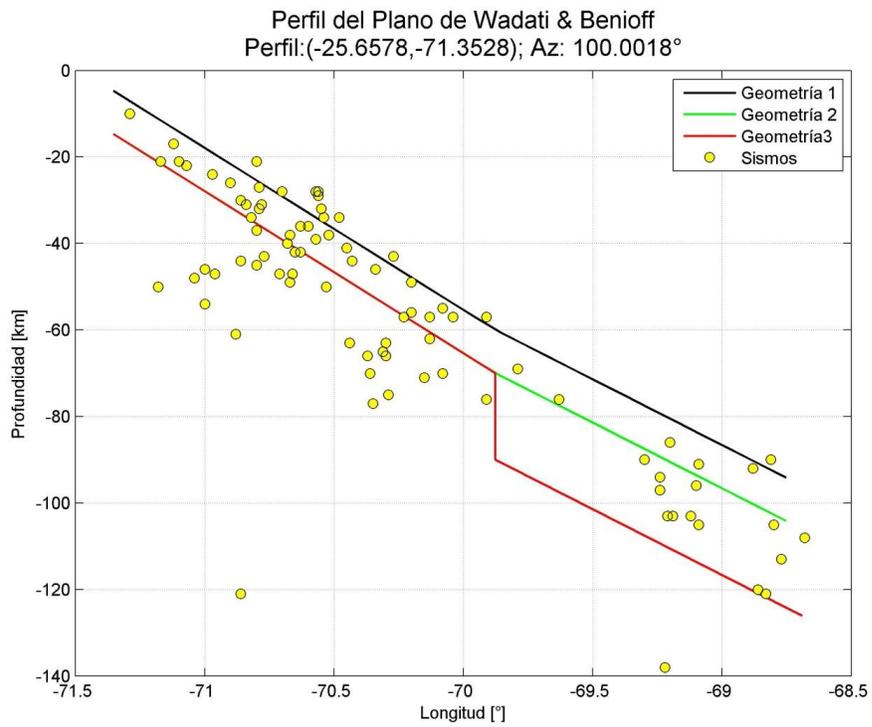


Figura B 175: Perfil Latitud: -25.66° ; Geometrías utilizadas en el estudio

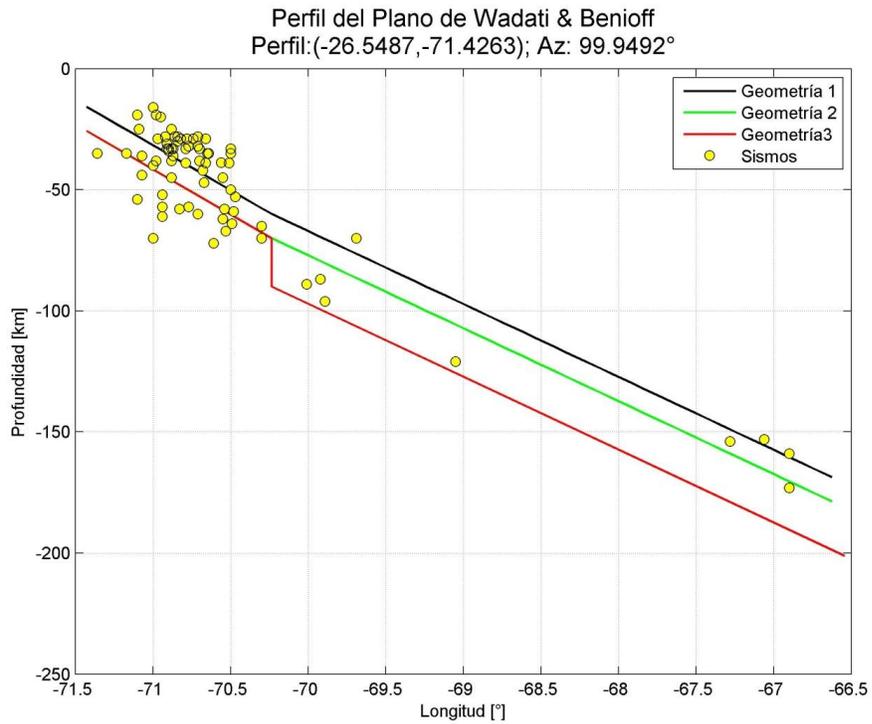


Figura B 176: Perfil Latitud: -26.55° ; Geometrías utilizadas en el estudio

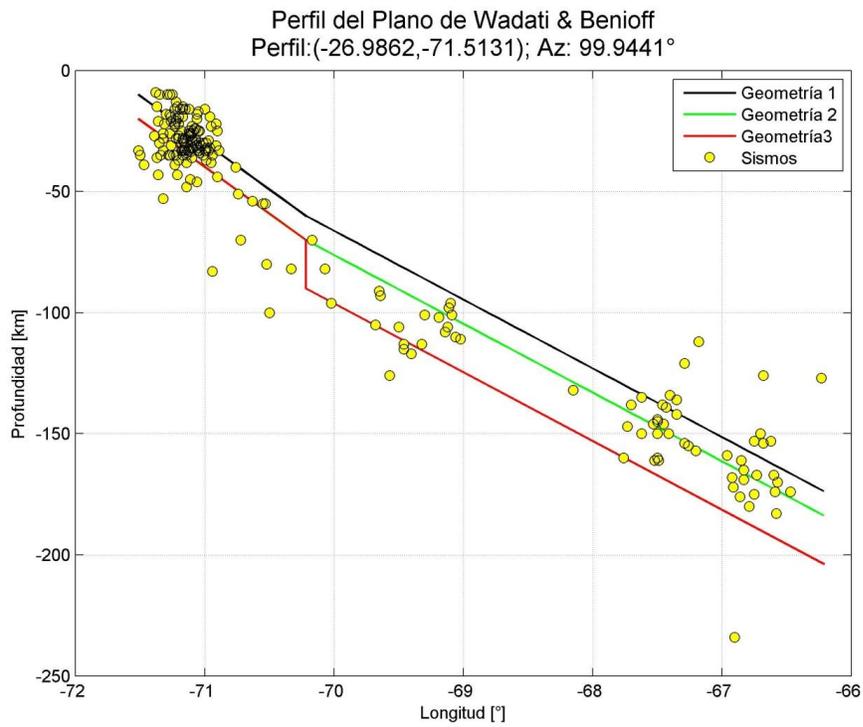


Figura B 177: Perfil Latitud: -26.99° ; Geometrías utilizadas en el estudio

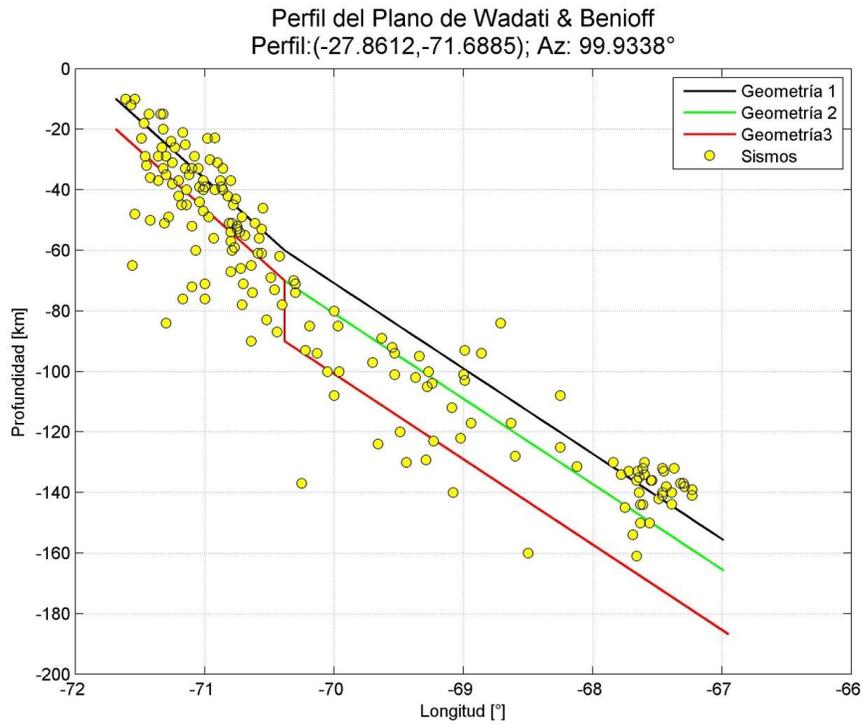


Figura B 178: Perfil Latitud: -27.86° ; Geometrías utilizadas en el estudio

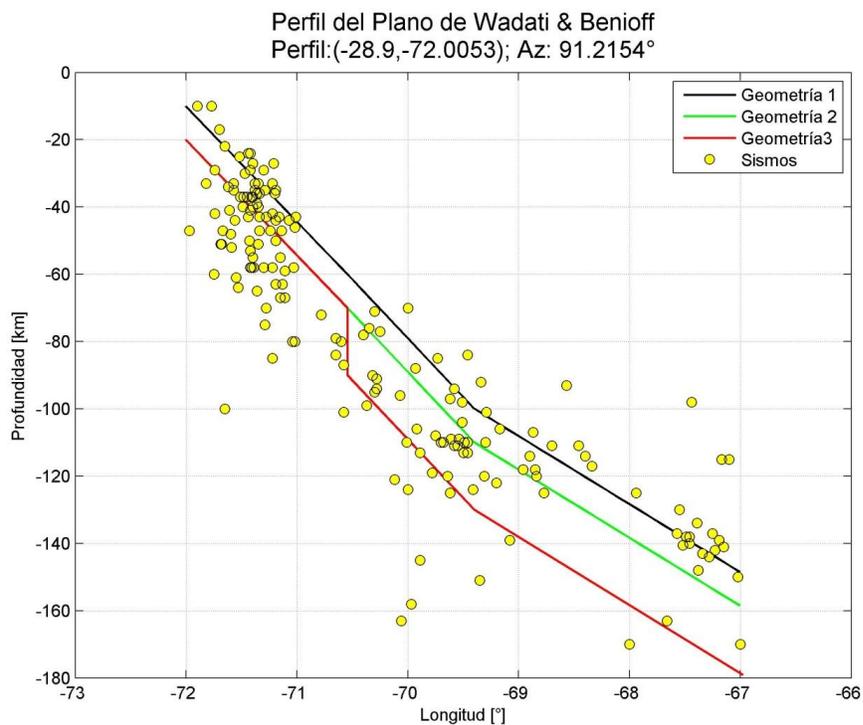


Figura B 179: Perfil Latitud: -28.9° ; Geometrías utilizadas en el estudio

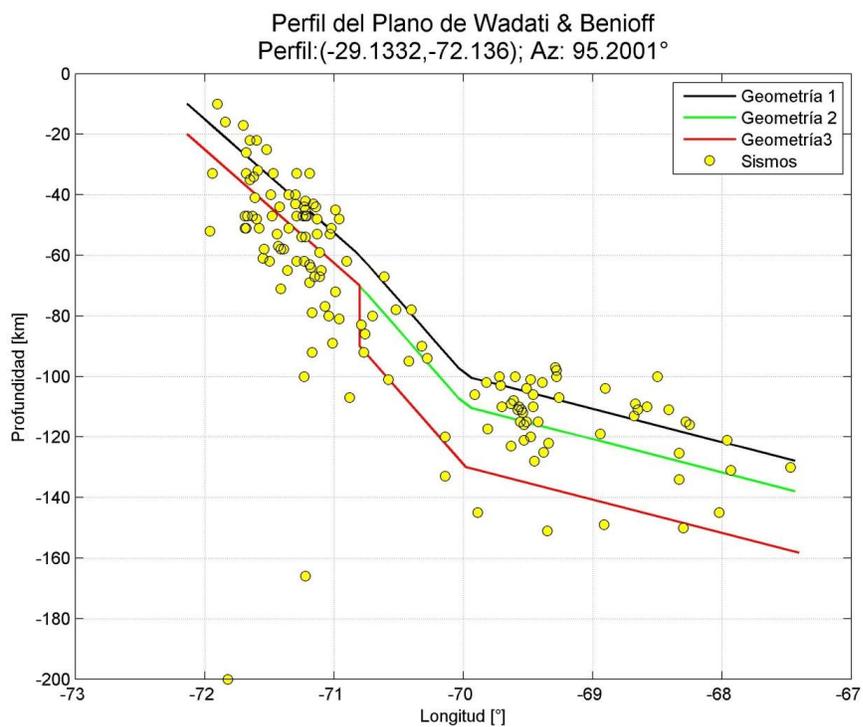


Figura B 180: Perfil Latitud: -29.13° ; Geometrías utilizadas en el estudio

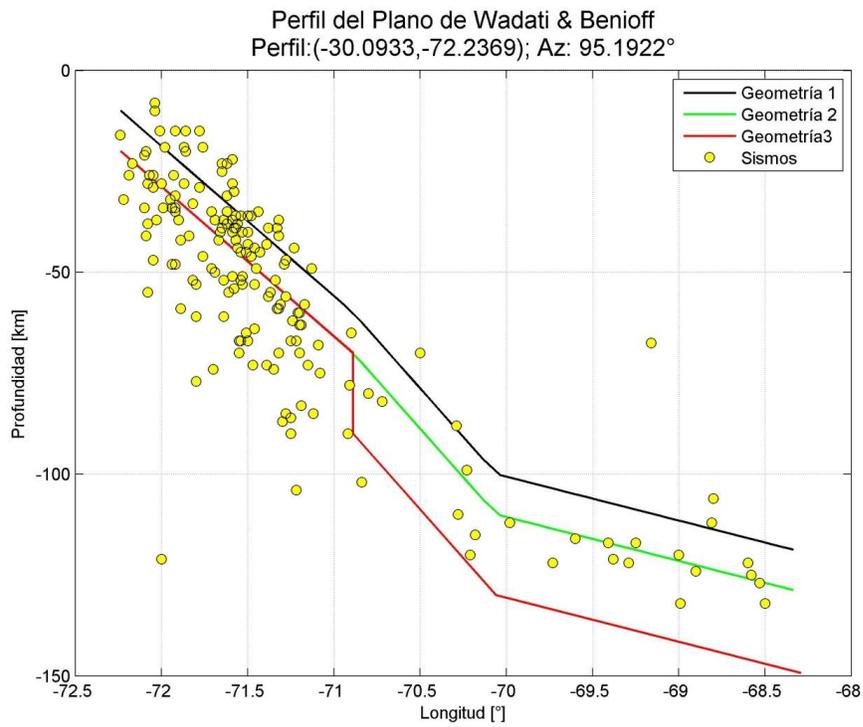


Figura B 181: Perfil Latitud: -30.09° ; Geometrías utilizadas en el estudio

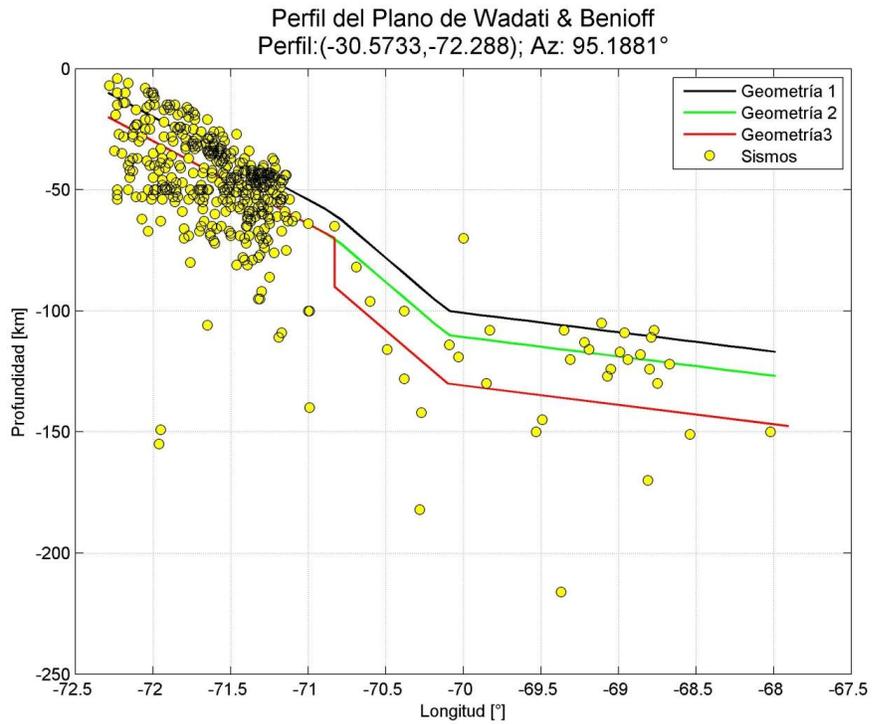


Figura B 182: Perfil Latitud: -30.57° ; Geometrías utilizadas en el estudio

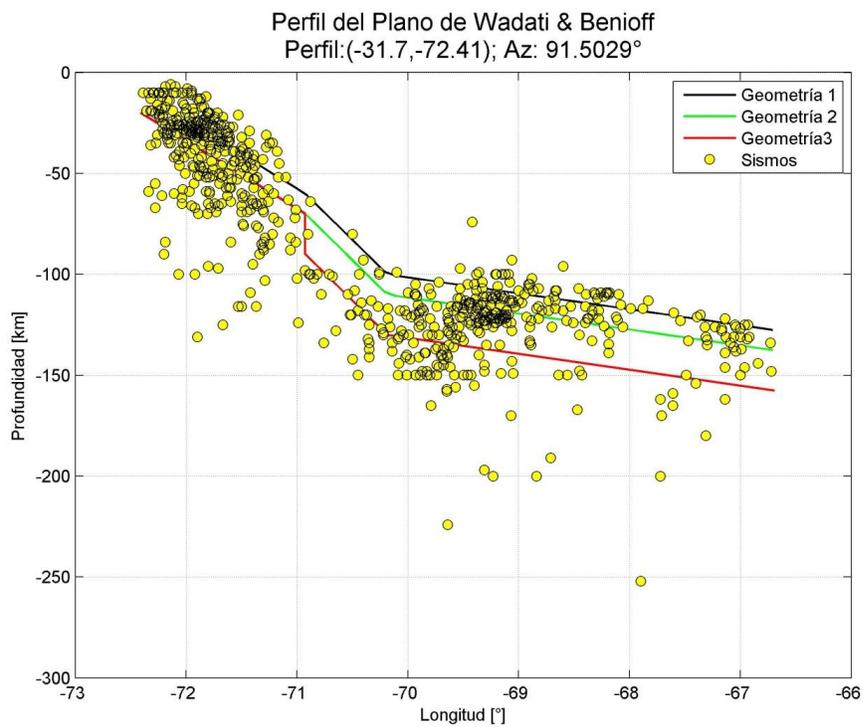


Figura B 183: Perfil Latitud: -31.7° ; Geometrías utilizadas en el estudio

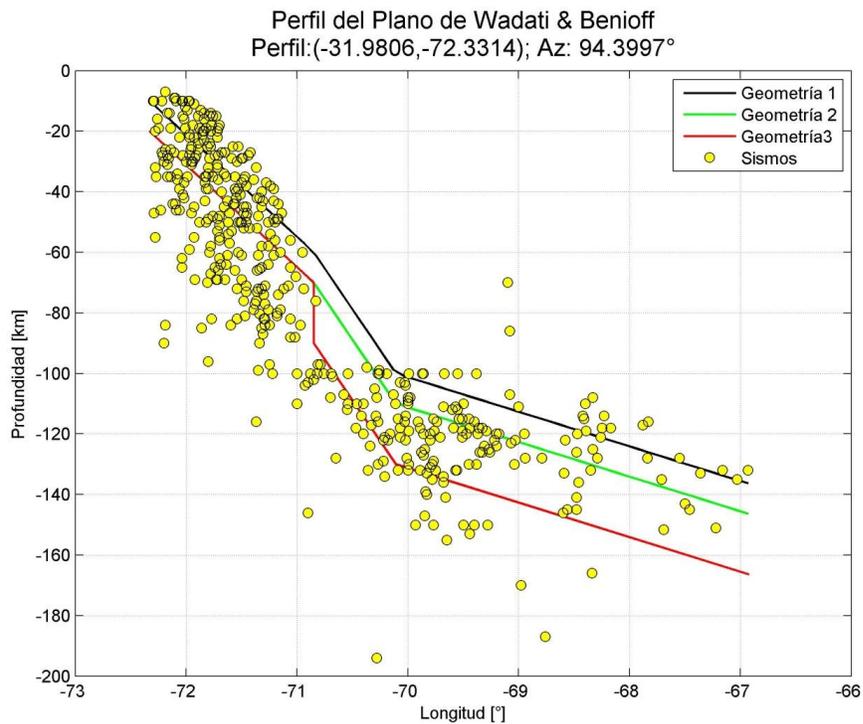


Figura B 184: Perfil Latitud: -31.98° ; Geometrías utilizadas en el estudio

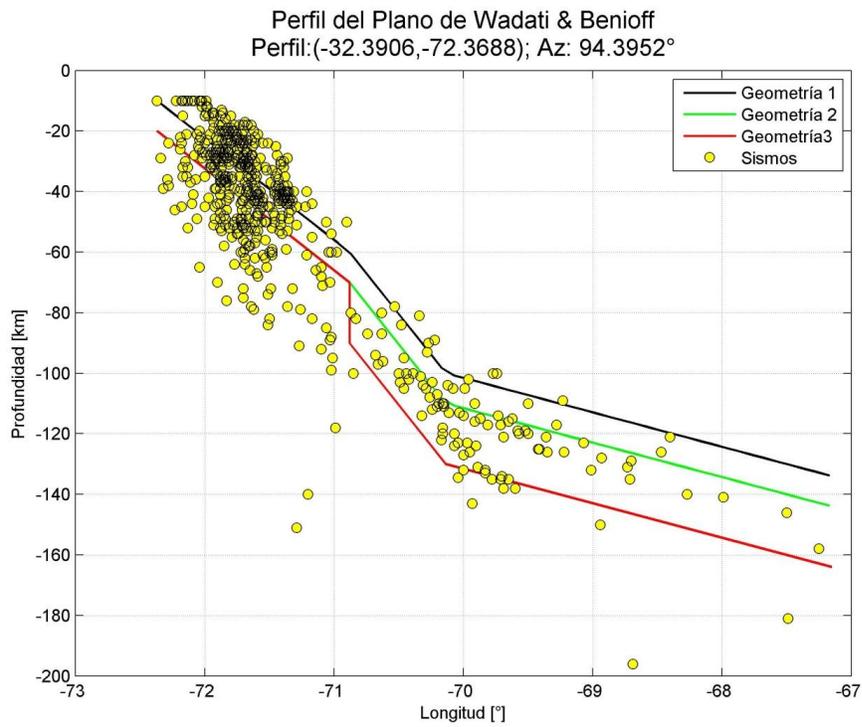


Figura B 185: Perfil Latitud: -32.39° ; Geometrías utilizadas en el estudio

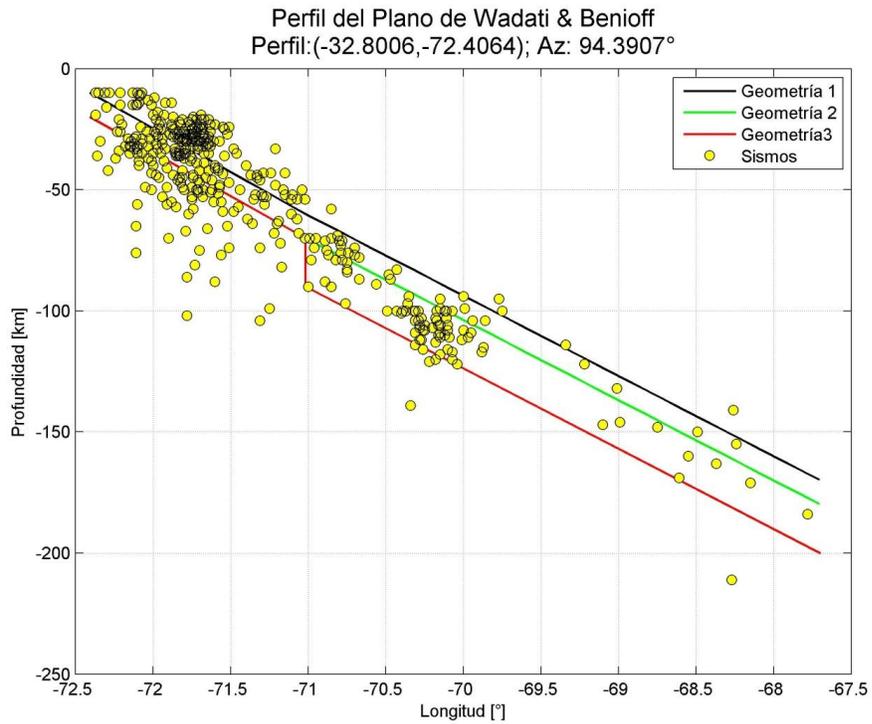


Figura B 186: Perfil Latitud: -32.80° ; Geometrías utilizadas en el estudio

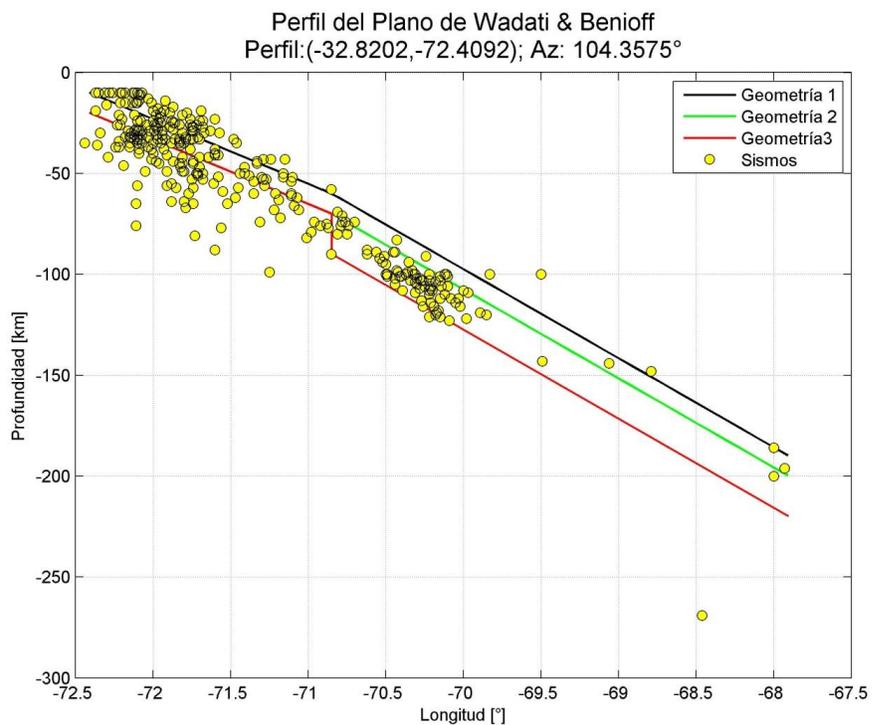


Figura B 187: Perfil Latitud: -32.82° ; Geometrías utilizadas en el estudio

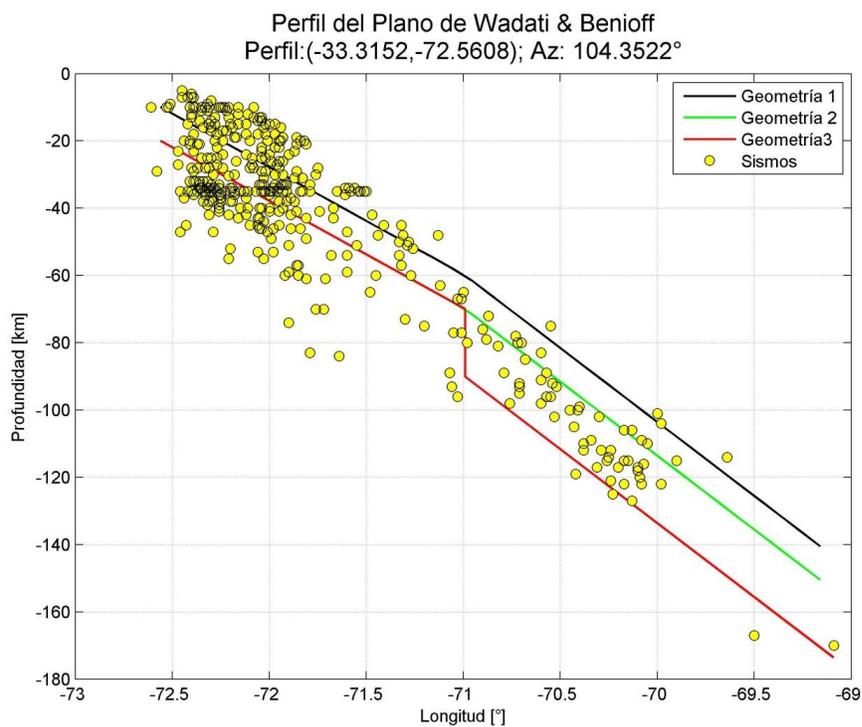


Figura B 188: Perfil Latitud: -33.32° ; Geometrías utilizadas en el estudio

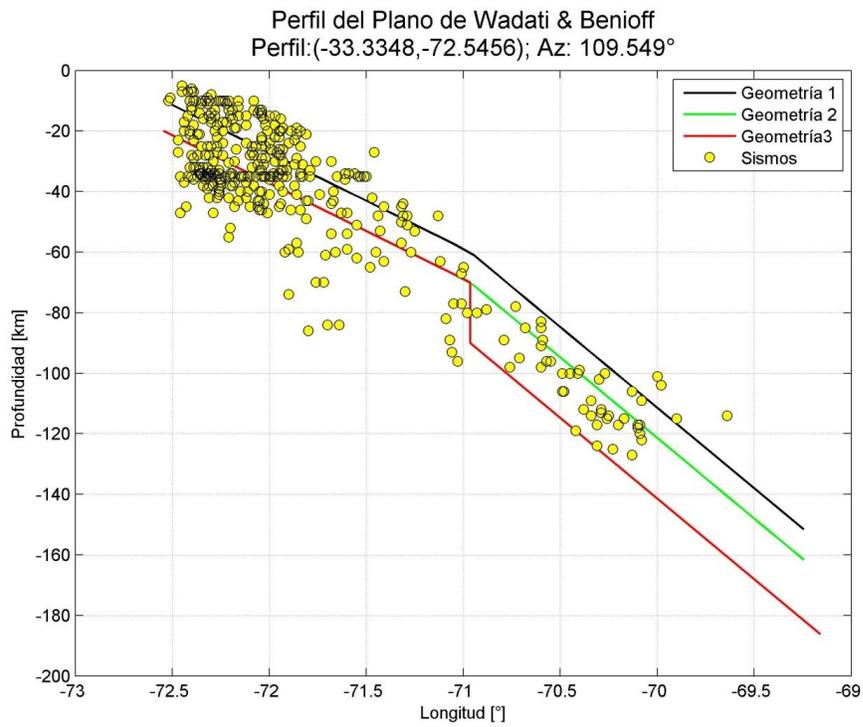


Figura B 189: Perfil Latitud: 33.34° ; Geometrías utilizadas en el estudio

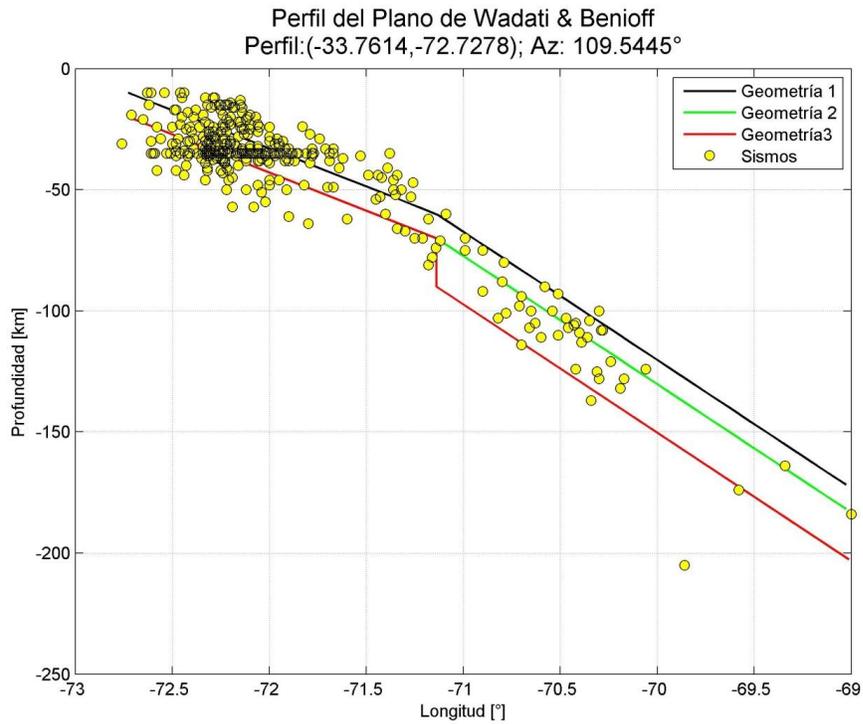


Figura B 190: Perfil Latitud: -33.76° ; Geometrías utilizadas en el estudio

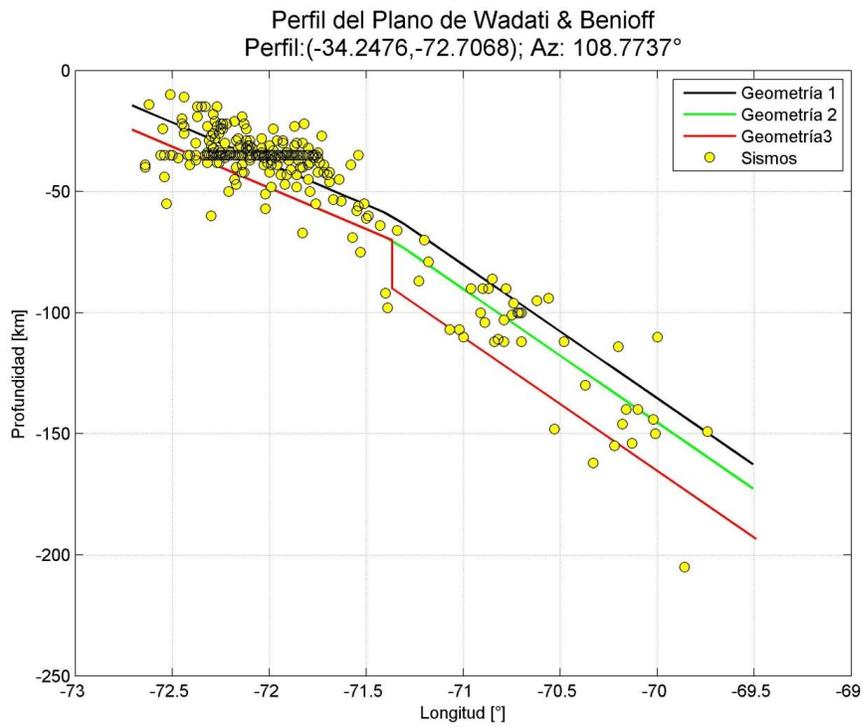


Figura B 191: Perfil Latitud: -34.25° ; Geometrías utilizadas en el estudio

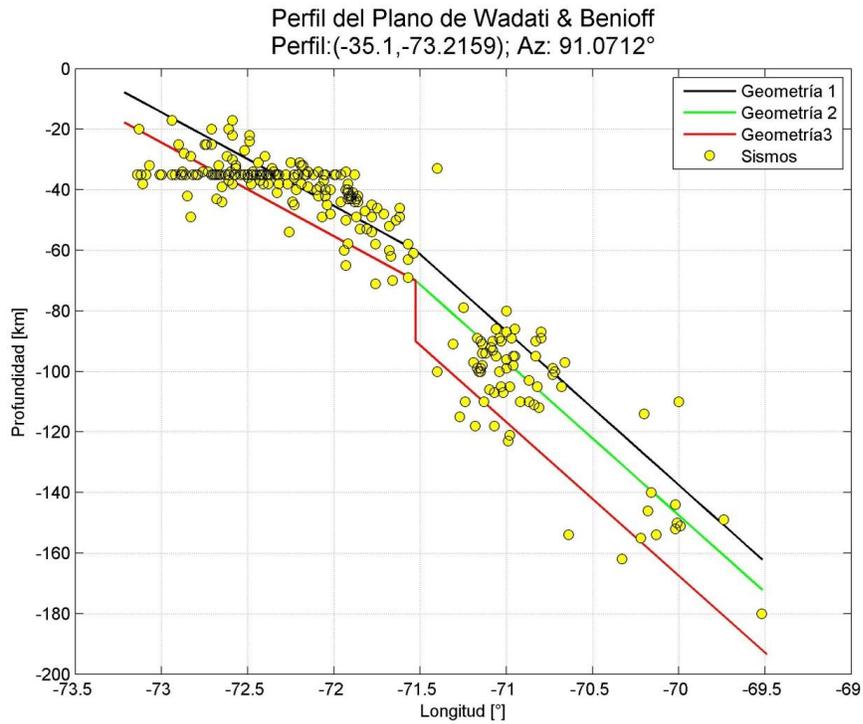


Figura B 192: Perfil Latitud: -35.1° ; Geometrías utilizadas en el estudio

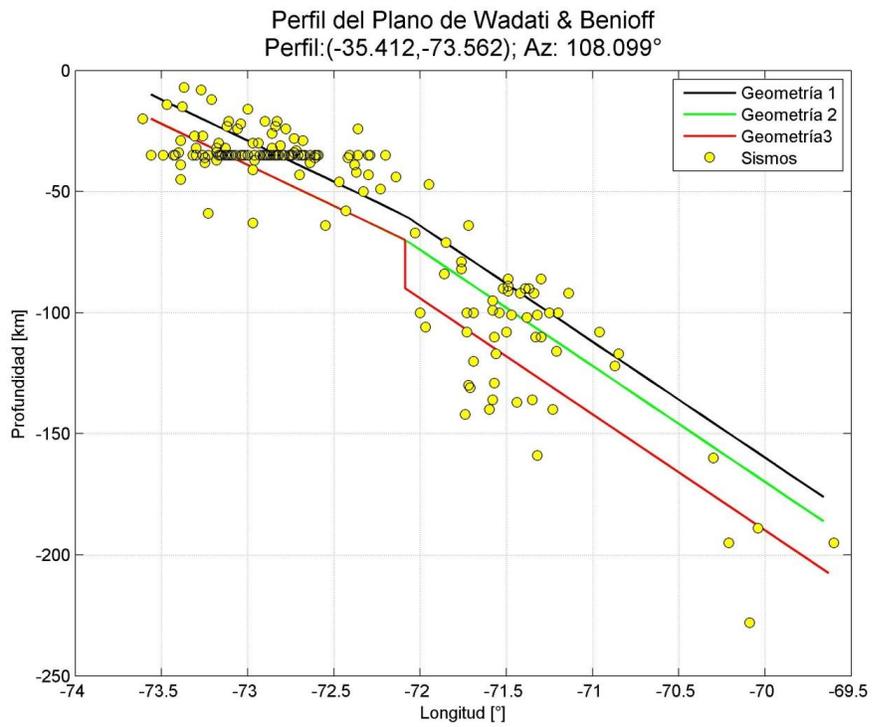


Figura B 193: Perfil Latitud: 35.41° ; Geometrías utilizadas en el estudio

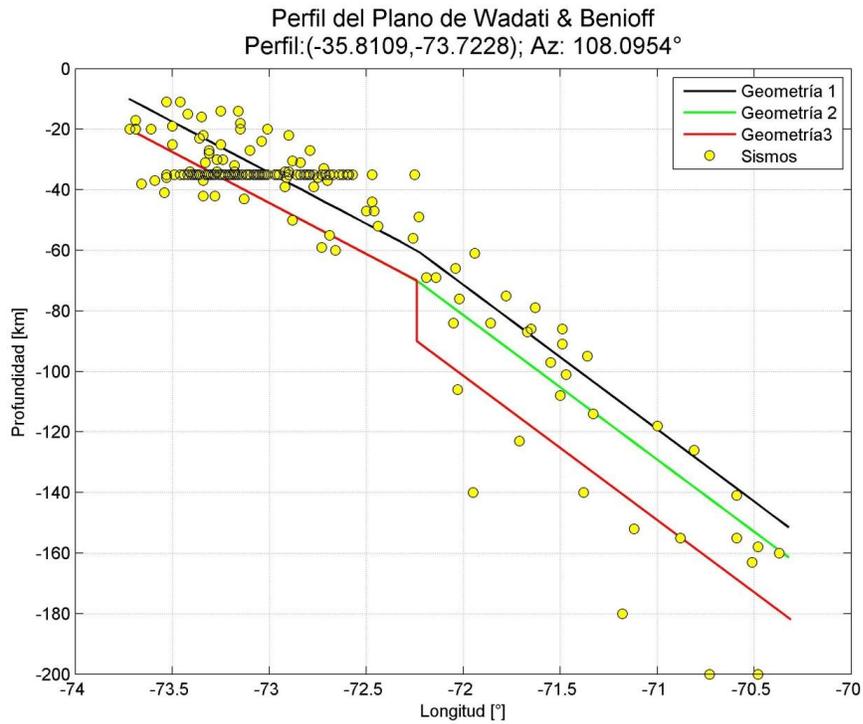


Figura B 194: Perfil Latitud: -35.81° ; Geometrías utilizadas en el estudio

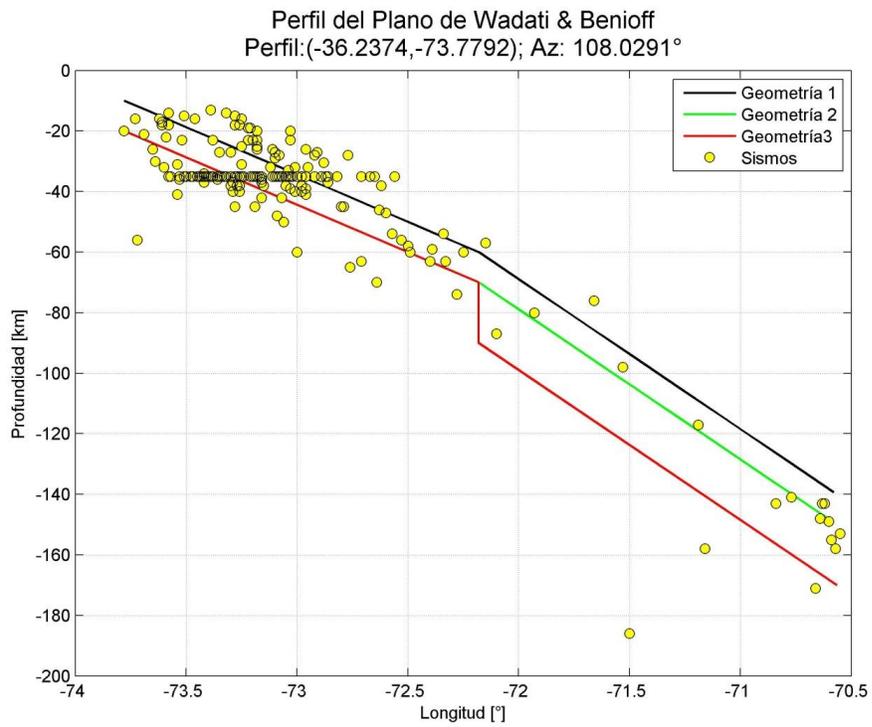


Figura B 195: Perfil Latitud: -36.24° ; Geometrías utilizadas en el estudio

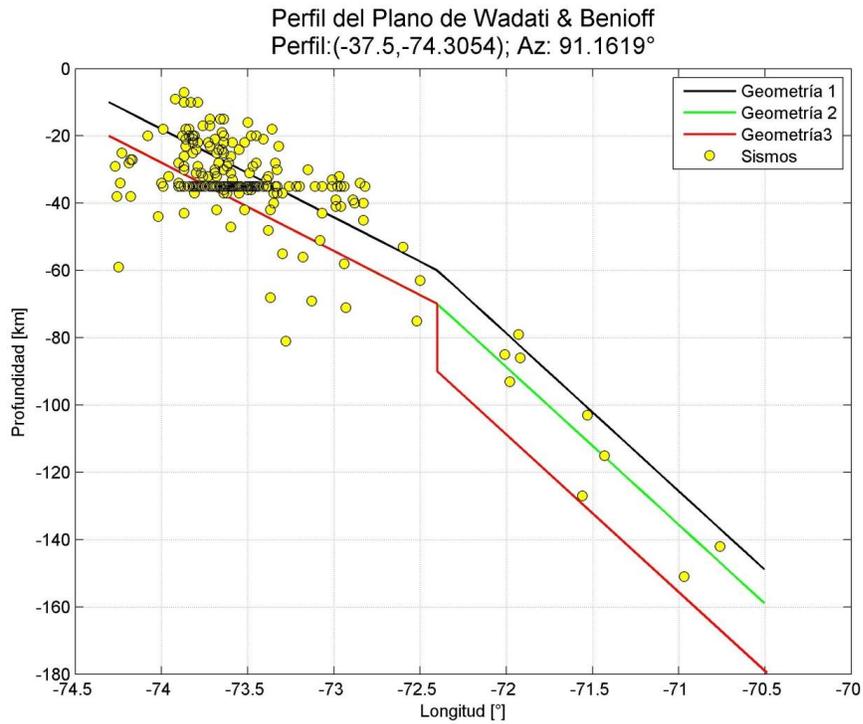


Figura B 196: Perfil Latitud: -37.5° ; Geometrías utilizadas en el estudio

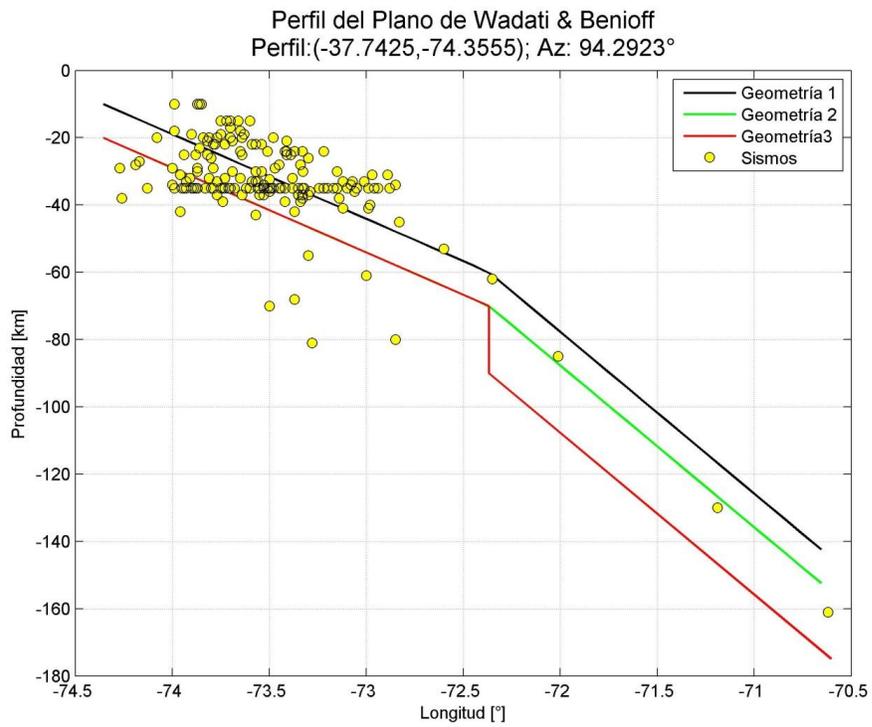


Figura B 197: Perfil Latitud: -37.74° ; Geometrías utilizadas en el estudio

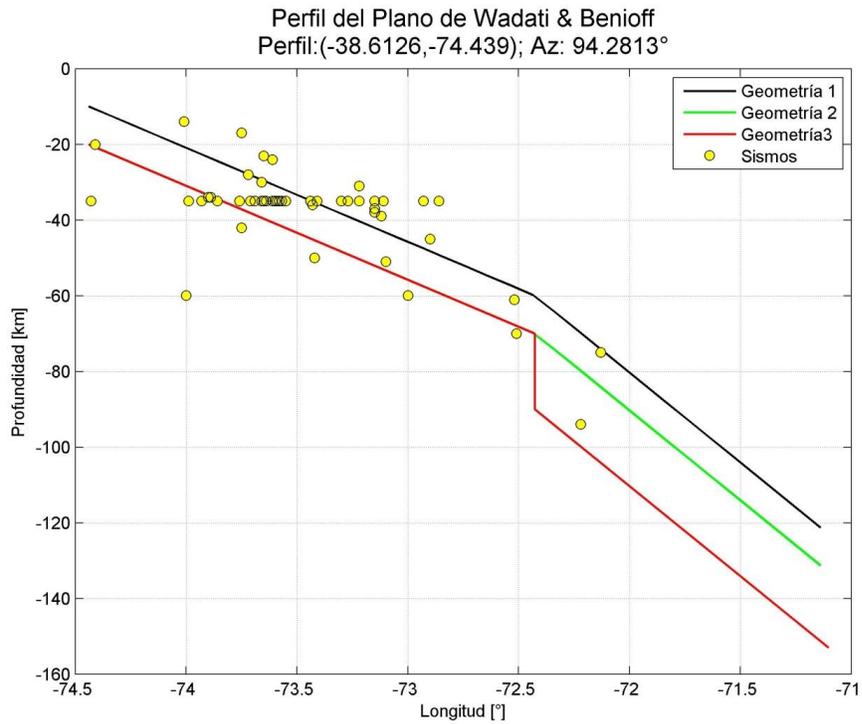


Figura B 198: Perfil Latitud: -38.61° ; Geometrías utilizadas en el estudio

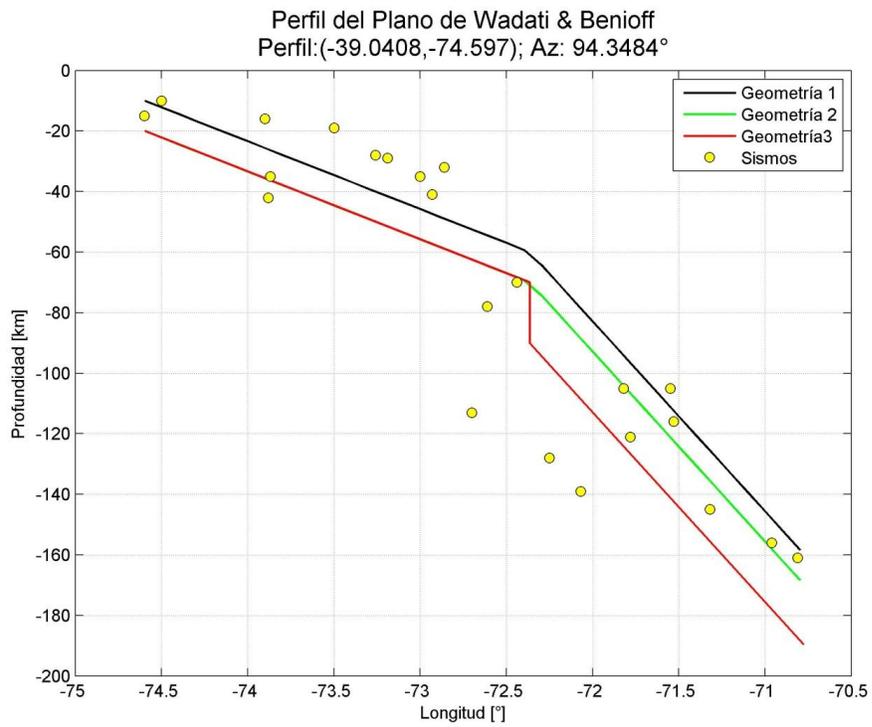


Figura B 199: Perfil Latitud: 39.04° ; Geometrías utilizadas en el estudio

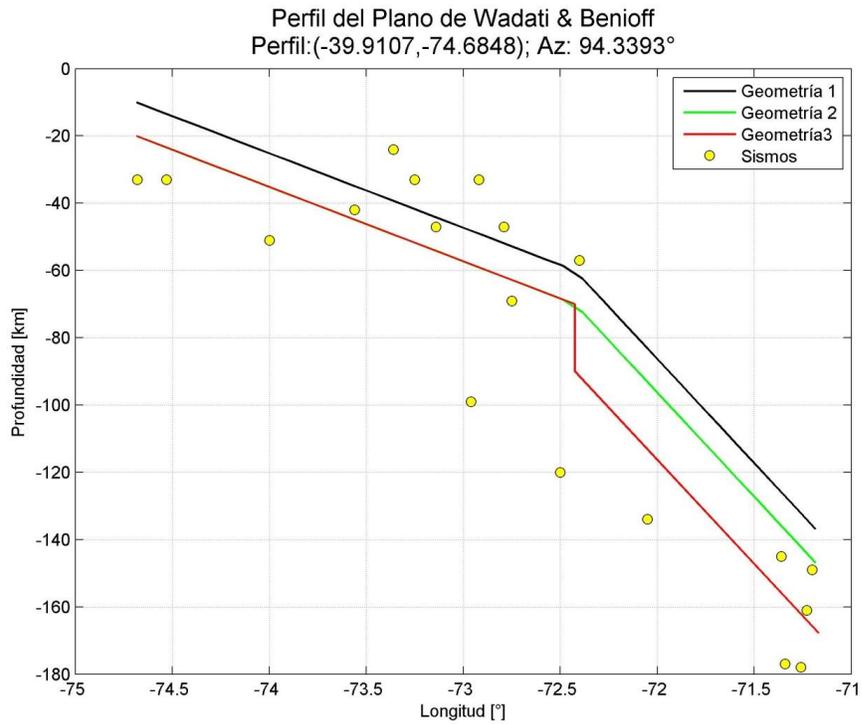


Figura B 200: Perfil Latitud: -39.91° ; Geometrías utilizadas en el estudio

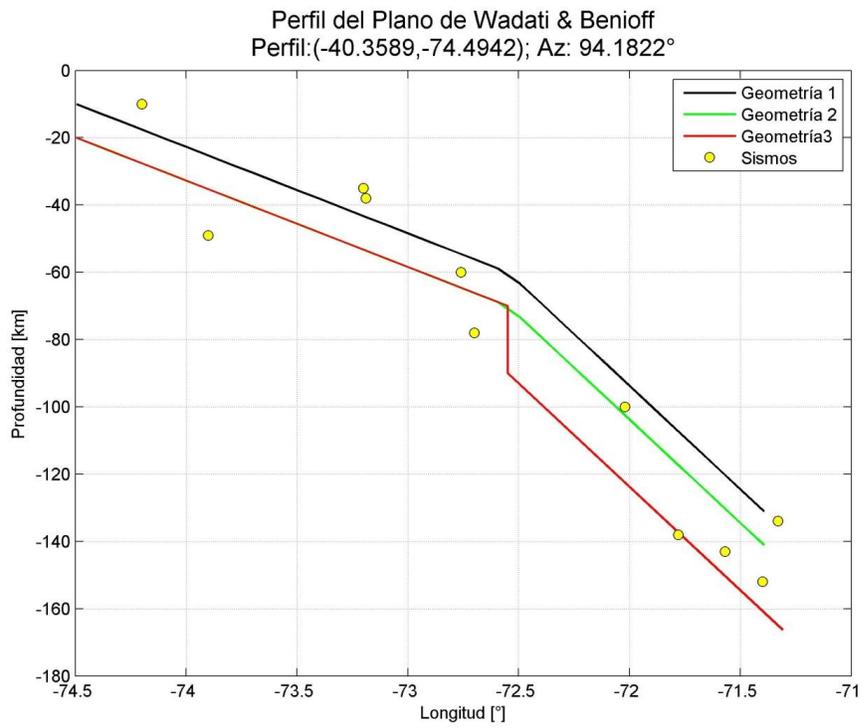


Figura B 201: Perfil Latitud: 40.36-° ; Geometrías utilizadas en el estudio

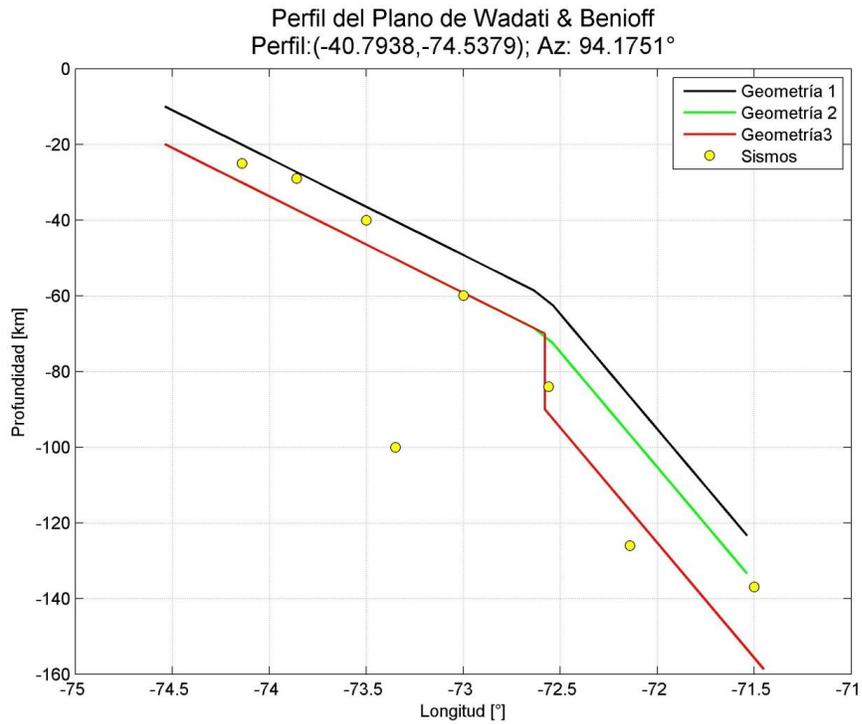


Figura B 202: Perfil Latitud: 40.79-° ; Geometrías utilizadas en el estudio

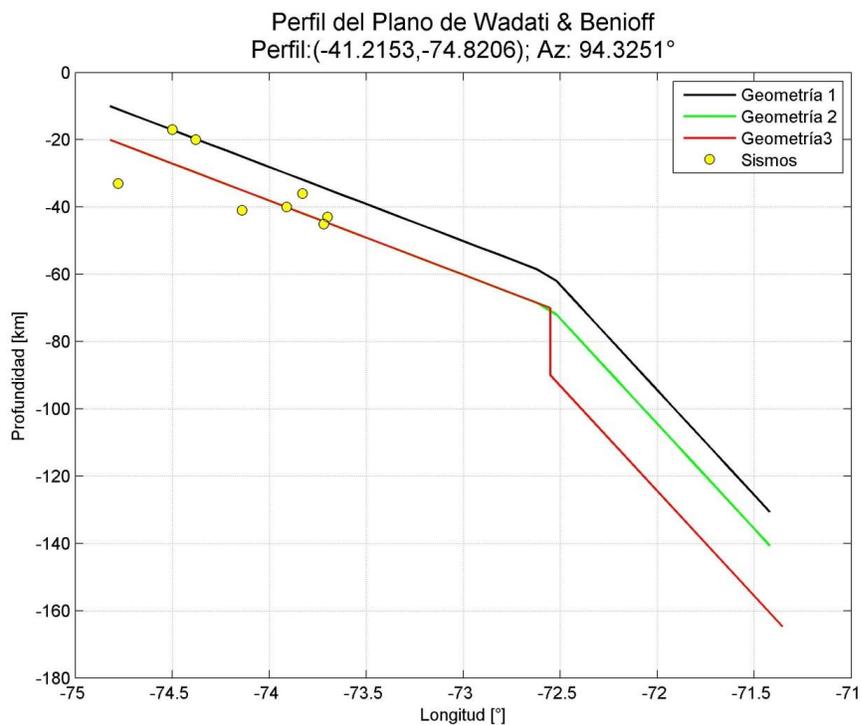


Figura B 203: Perfil Latitud: -41.21° ; Geometrías utilizadas en el estudio

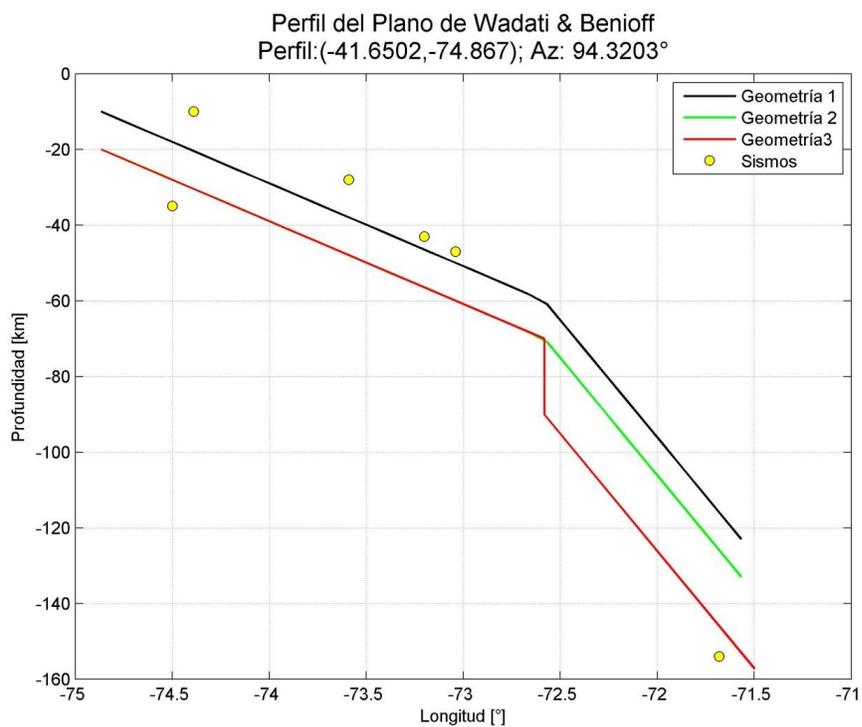


Figura B 204: Perfil Latitud: -41.65° ; Geometrías utilizadas en el estudio

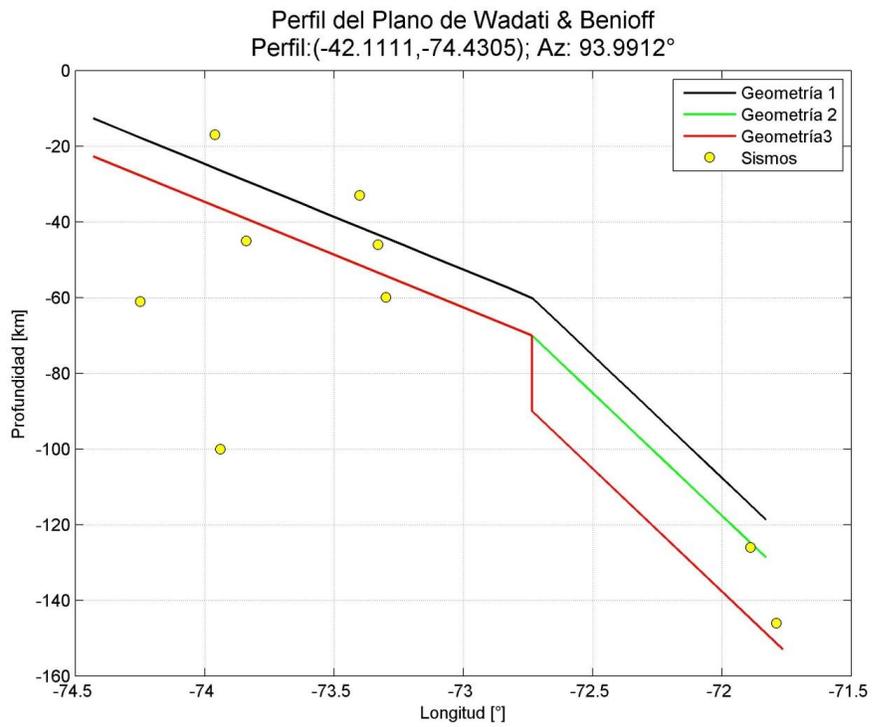


Figura B 205: Perfil Latitud: -42.11° ; Geometrías utilizadas en el estudio

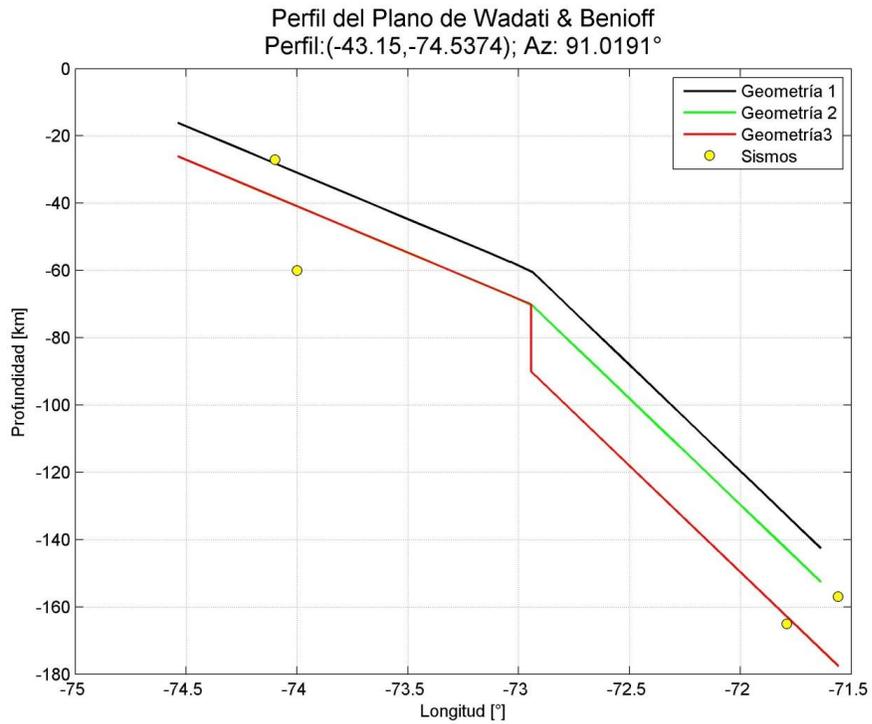


Figura B 206: Perfil Latitud: -43.15° ; Geometrías utilizadas en el estudio

B.4 COMPARACIÓN GEOMETRÍA BASE DE ESTE ESTUDIO CON TASSARA ET AL. (2006).

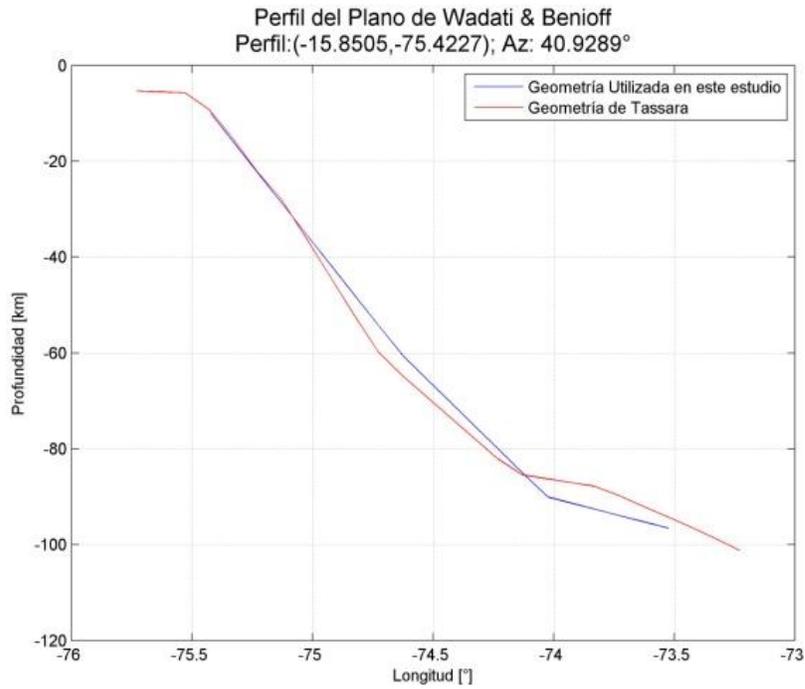


Figura B 207: Comparación Perfil Latitud° -15.85

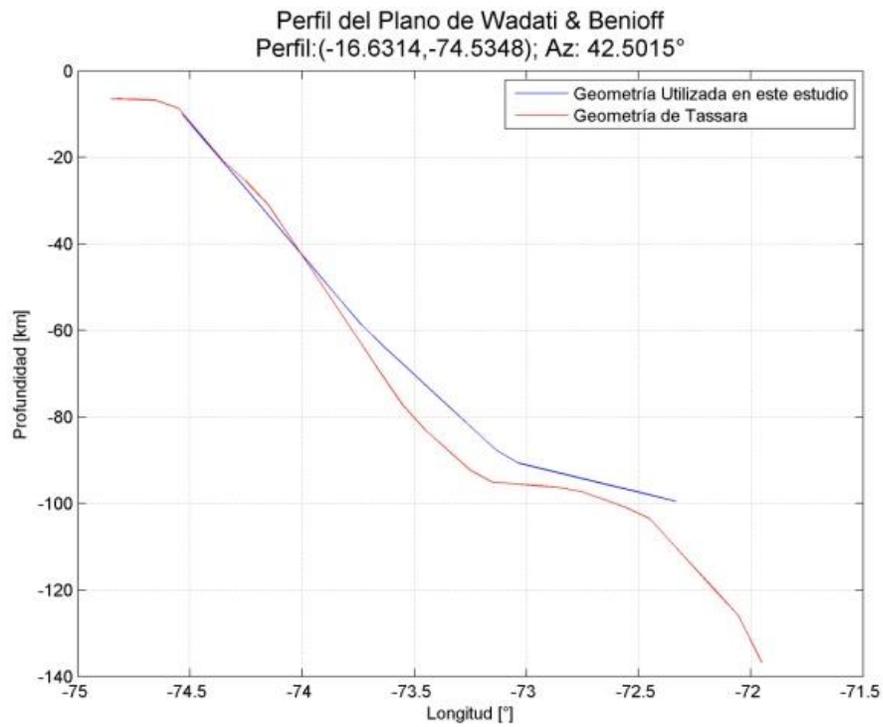


Figura B 208: Comparación Perfil Latitud° -16.63

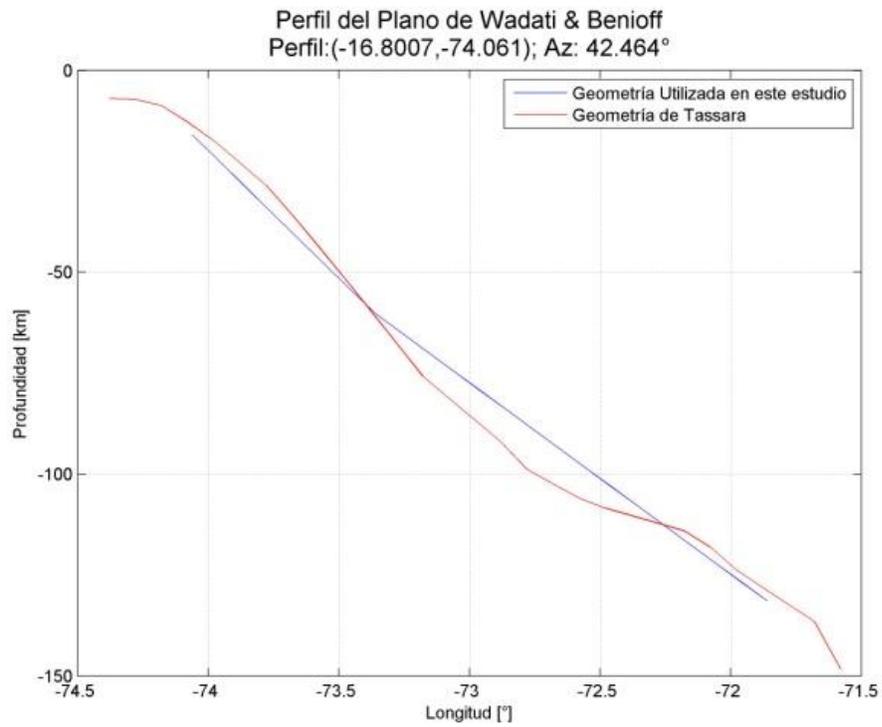


Figura B 209: Comparación Perfil Latitud° -16.80

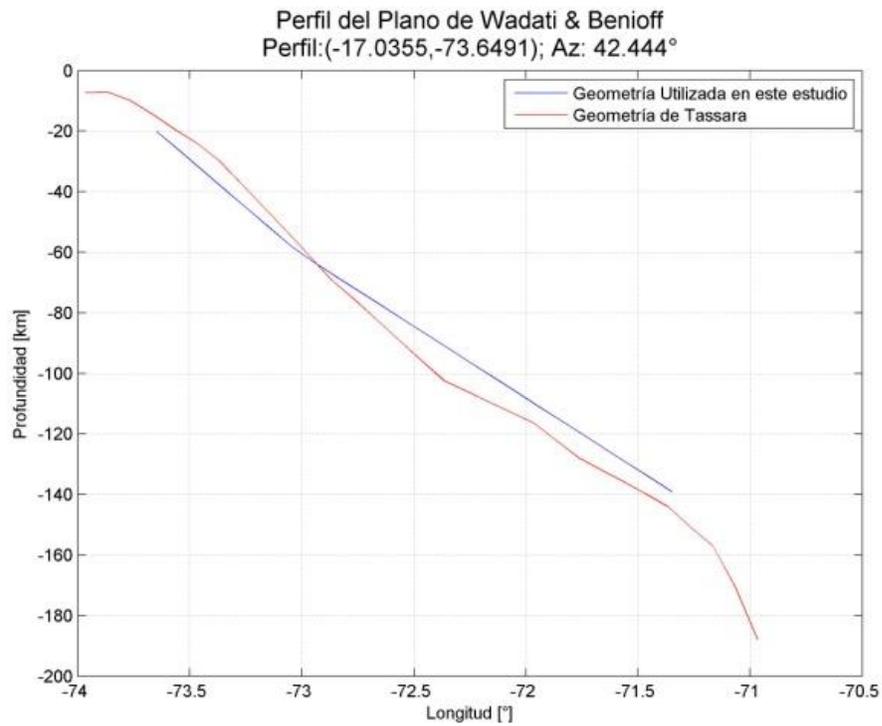


Figura B 210: Comparación Perfil Latitud° -17.04

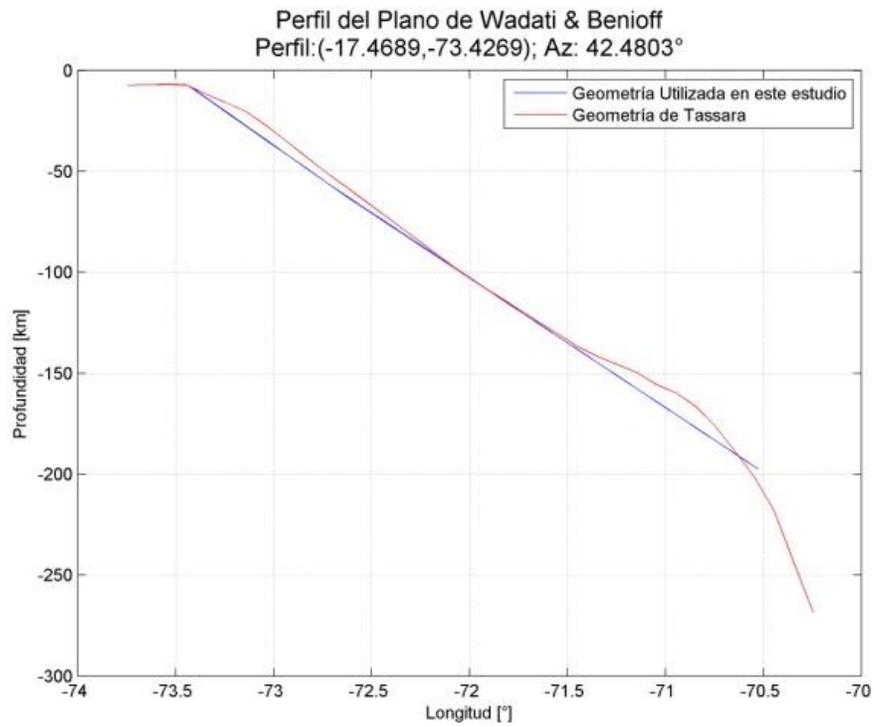


Figura B 211: Comparación Perfil Latitud° -17.47

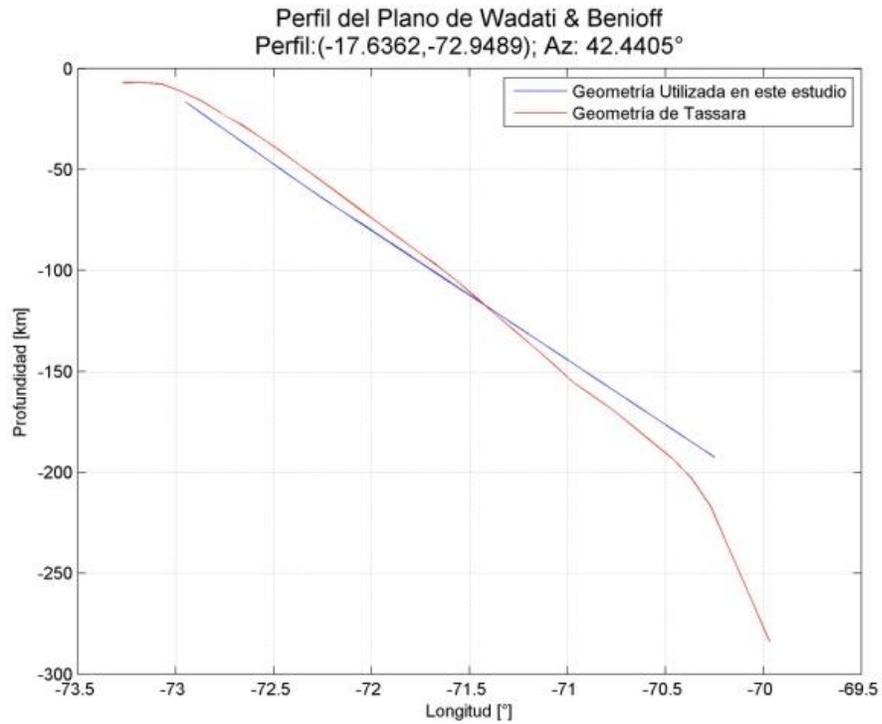


Figura B 212: Comparación Perfil Latitud° -17.64

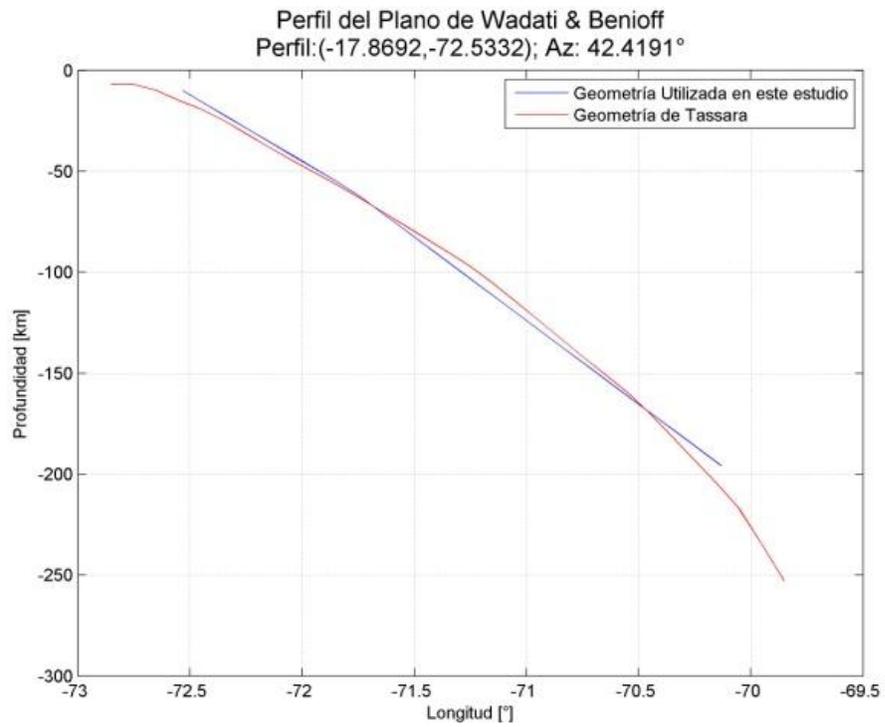


Figura B 213: Comparación Perfil Latitud° -17.87

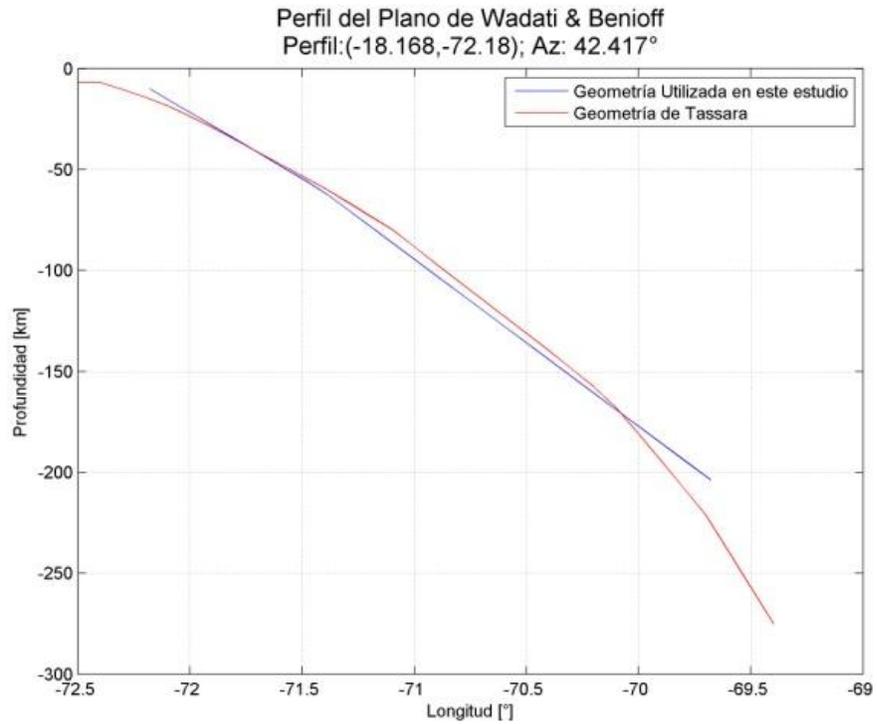


Figura B 214: Comparación Perfil Latitud° -18.17

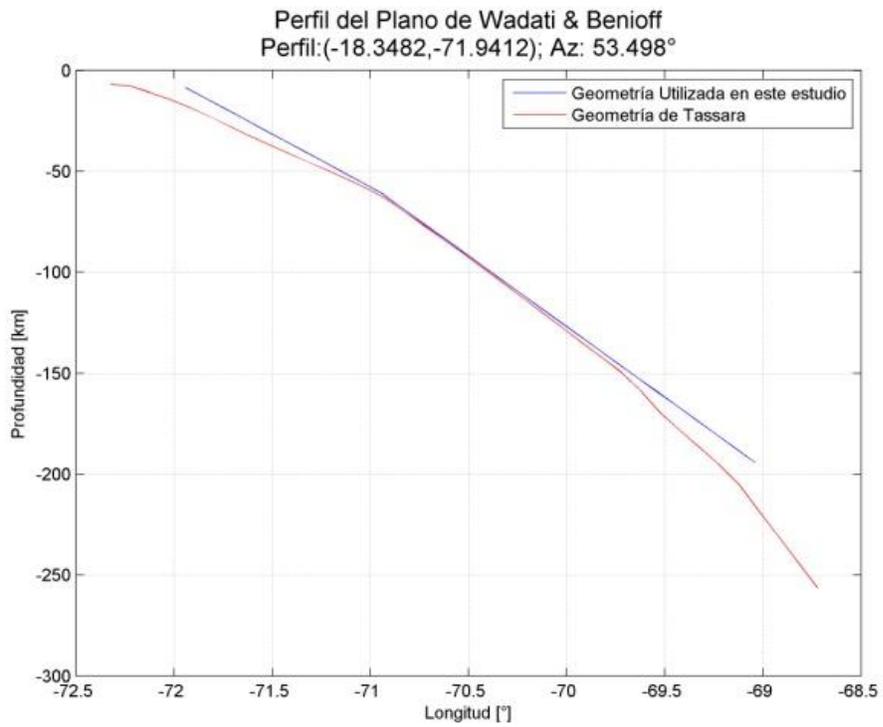


Figura B 215: Comparación Perfil Latitud° -18.35

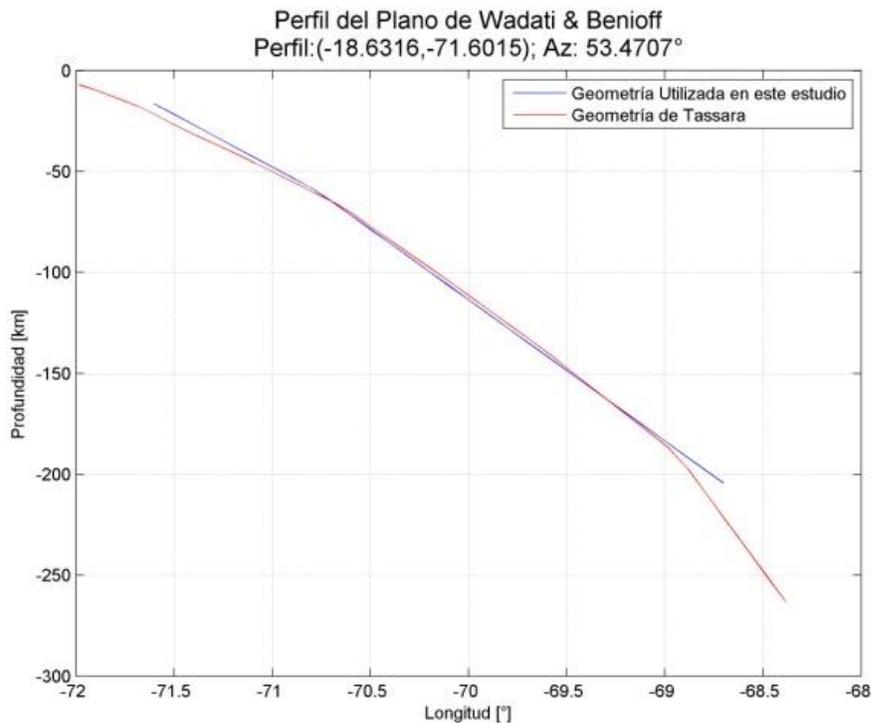


Figura B 216: Comparación Perfil Latitud° -18.63

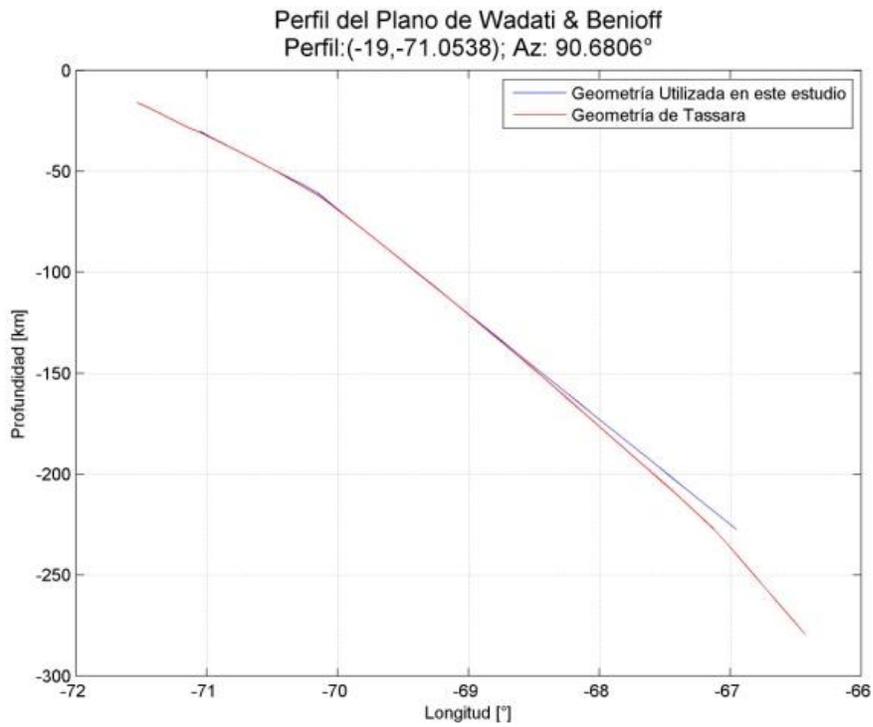


Figura B 217: Comparación Perfil Latitud° -19

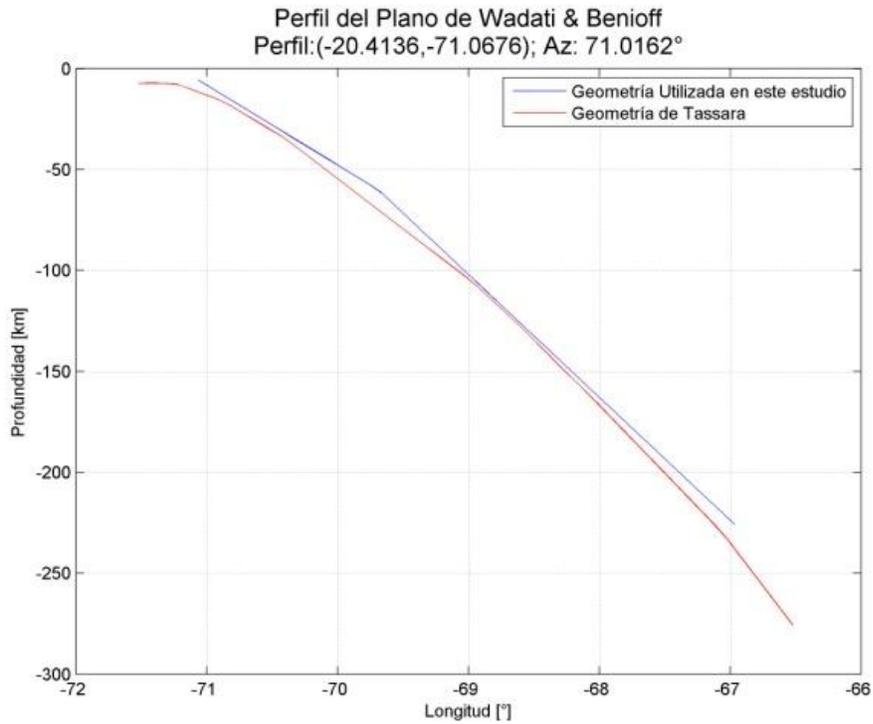


Figura B 218: Comparación Perfil Latitud° -20.41

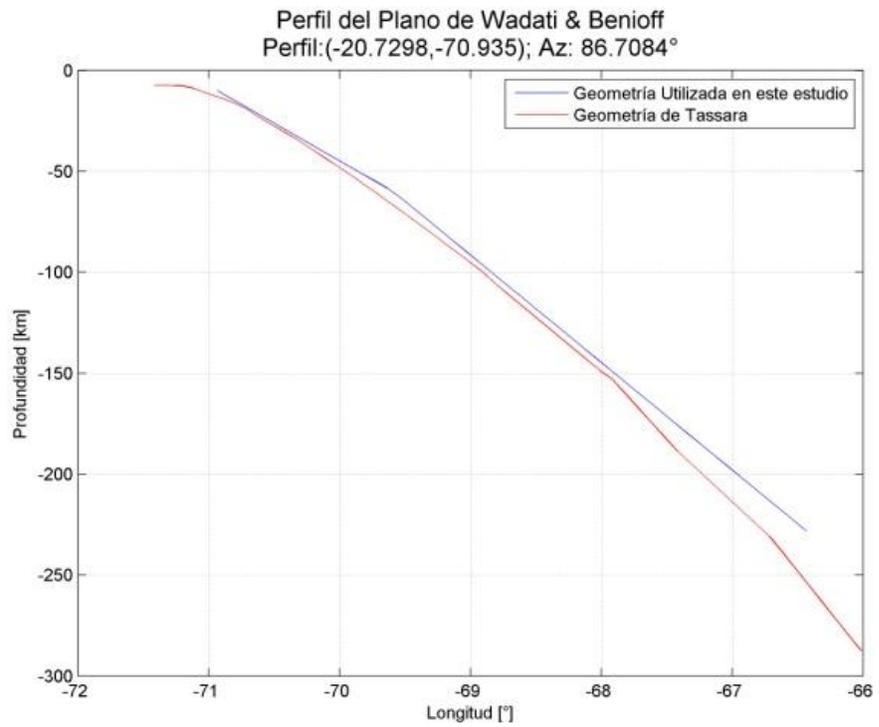


Figura B 219: Comparación Perfil Latitud° -20.73

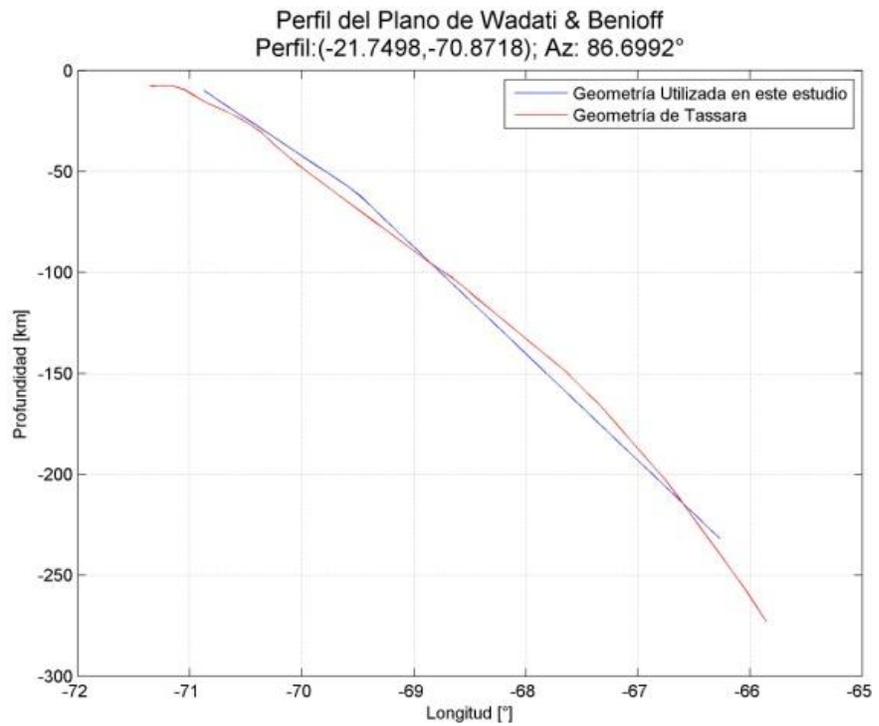


Figura B 220: Comparación Perfil Latitud° -21.75

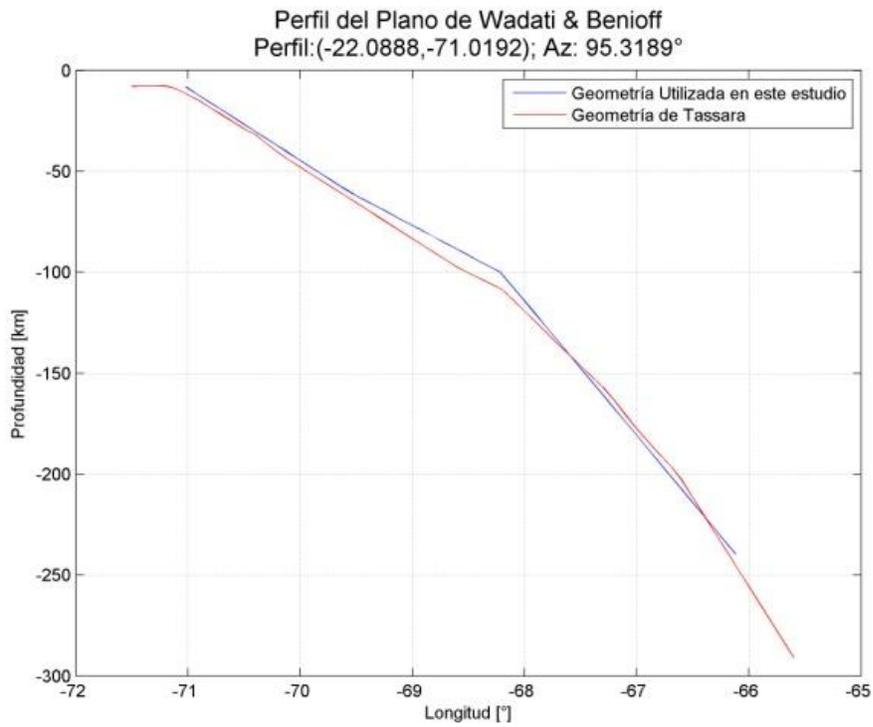


Figura B 221: Comparación Perfil Latitud° -22.09

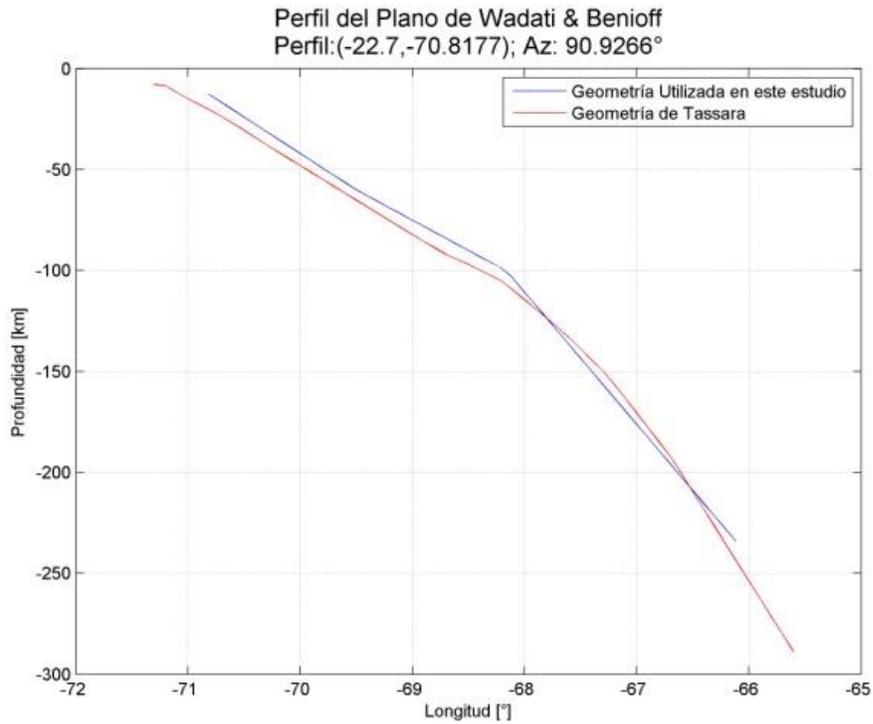


Figura B 222: Comparación Perfil Latitud° -22.7

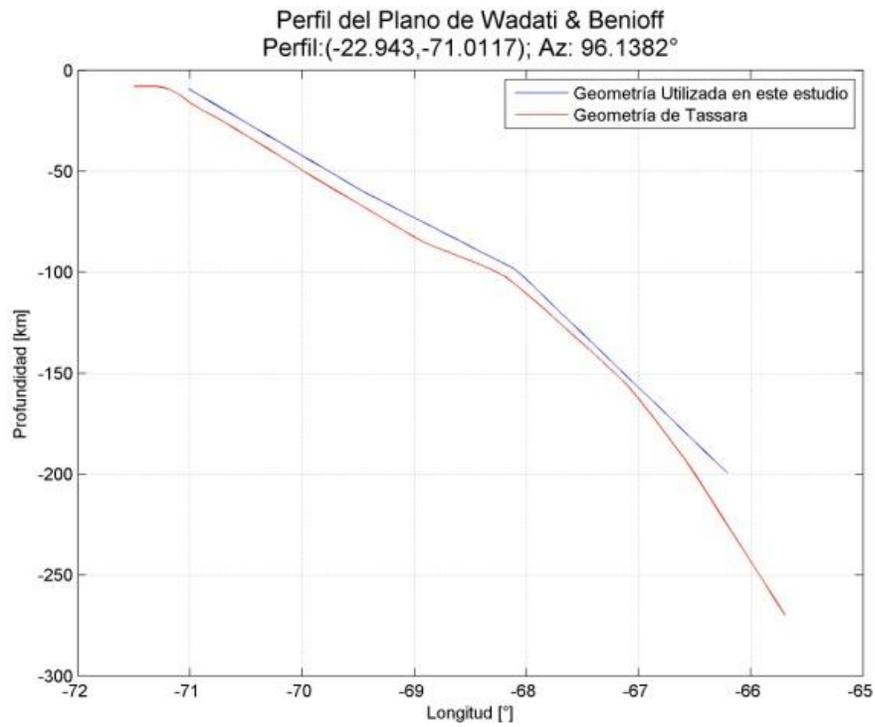


Figura B 223: Comparación Perfil Latitud° -22.94

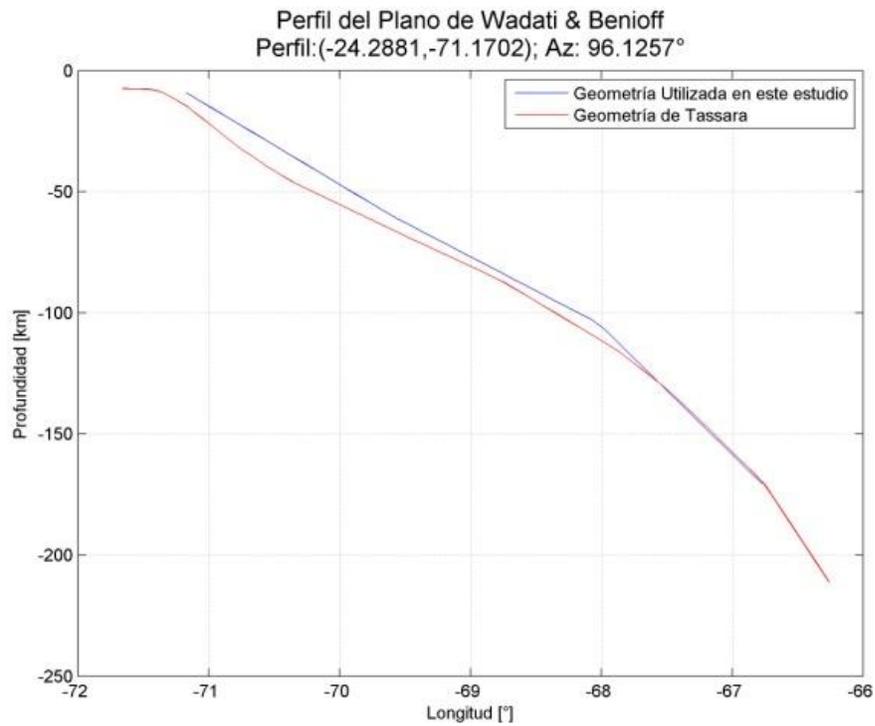


Figura B 224: Comparación Perfil Latitud° -22.29

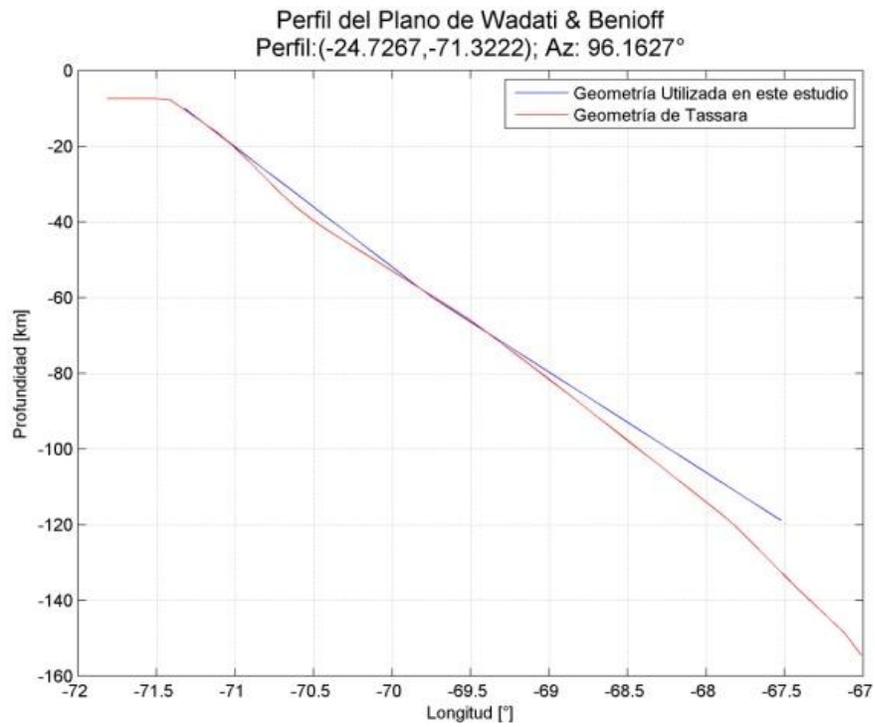


Figura B 225: Comparación Perfil Latitud° -24.73

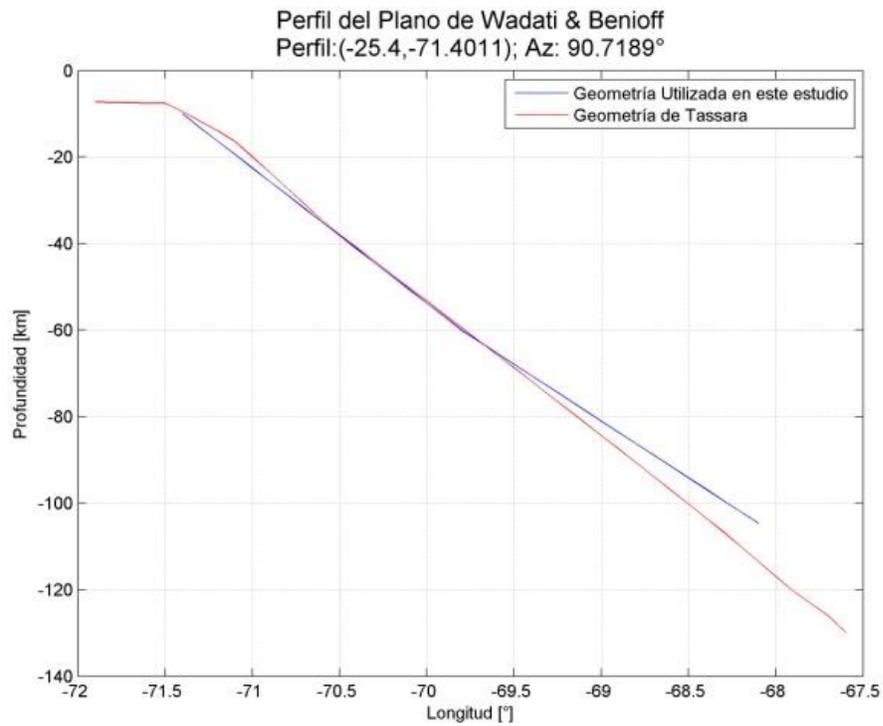


Figura B 226: Comparación Perfil Latitud° -25.4

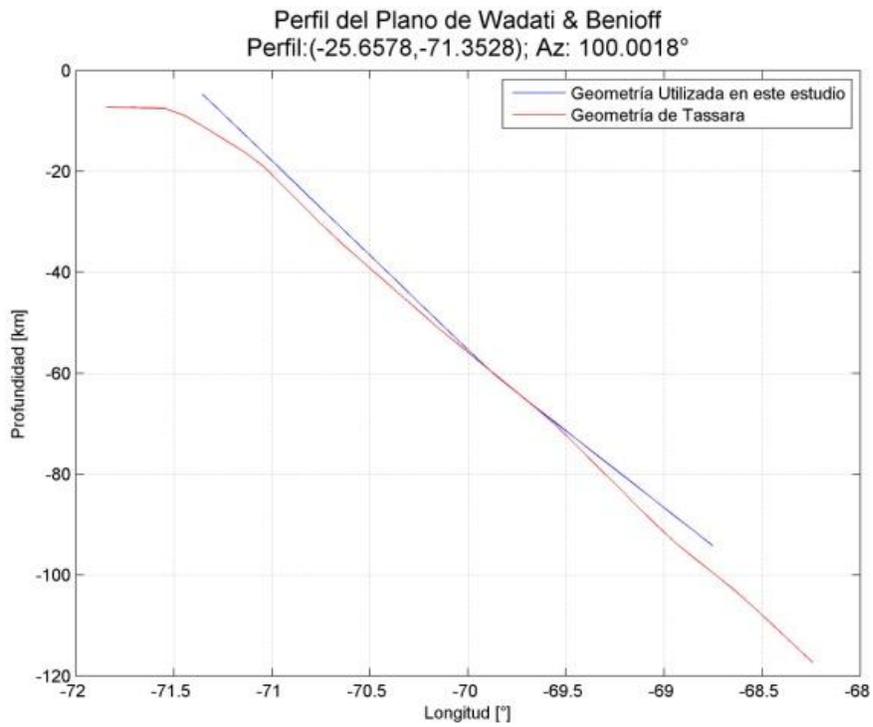


Figura B 227: Comparación Perfil Latitud° -25.66

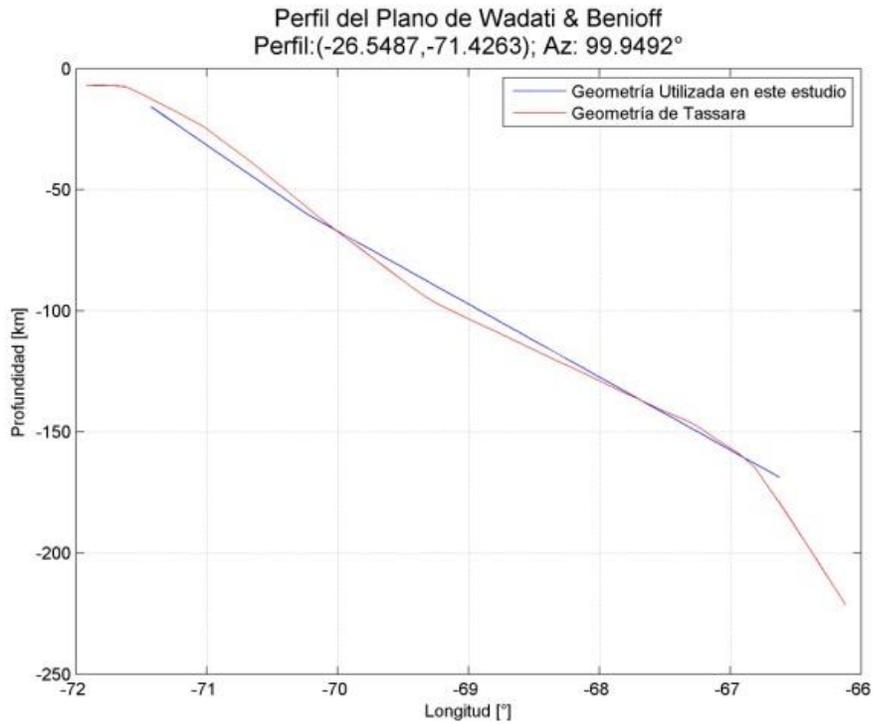


Figura B 228: Comparación Perfil Latitud° -26.55

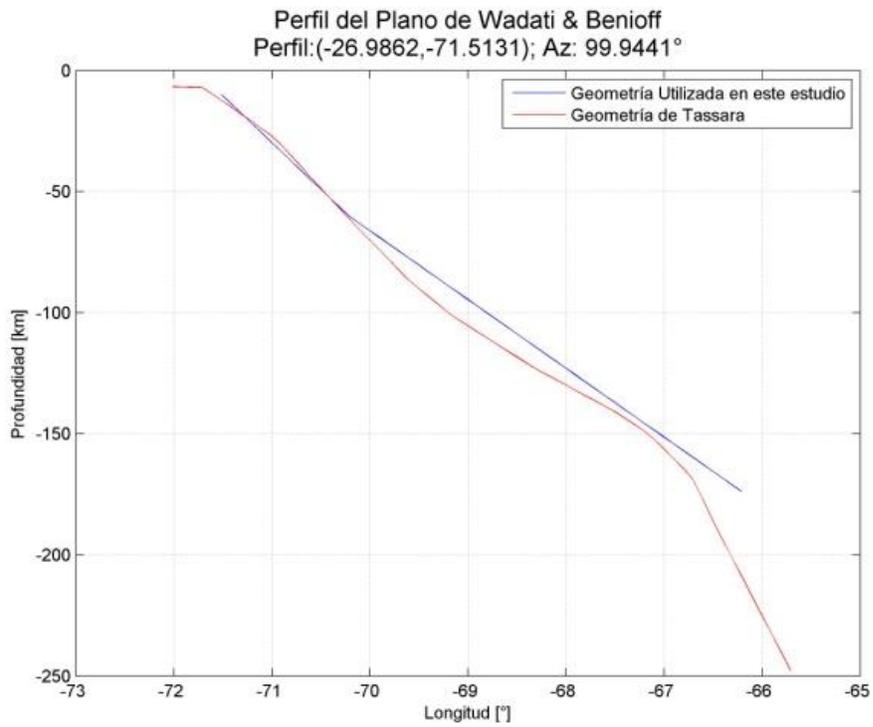


Figura B 229: Comparación Perfil Latitud° -26.99

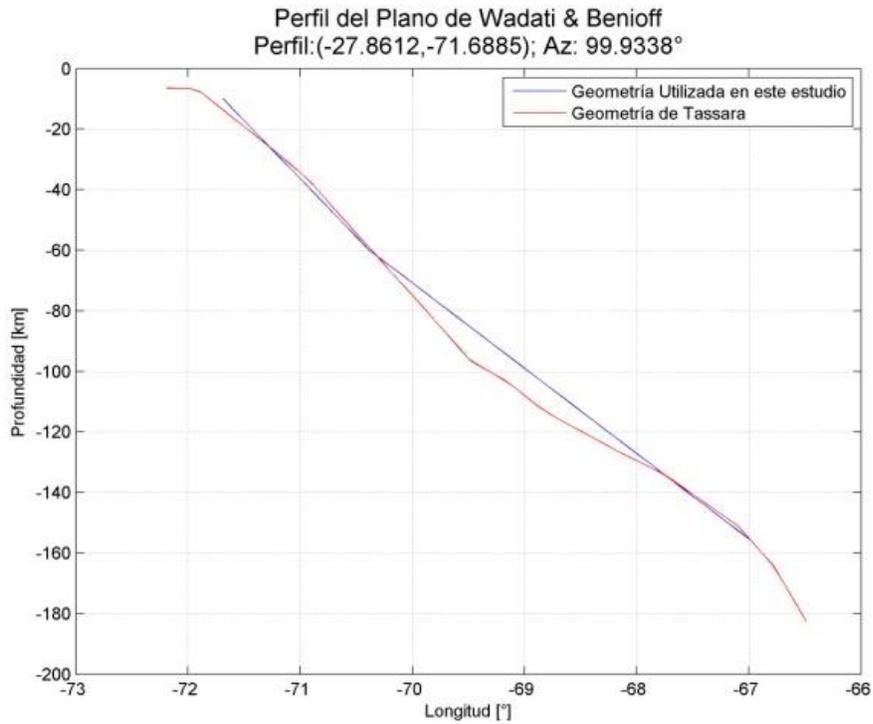


Figura B 230: Comparación Perfil Latitud° -27.86

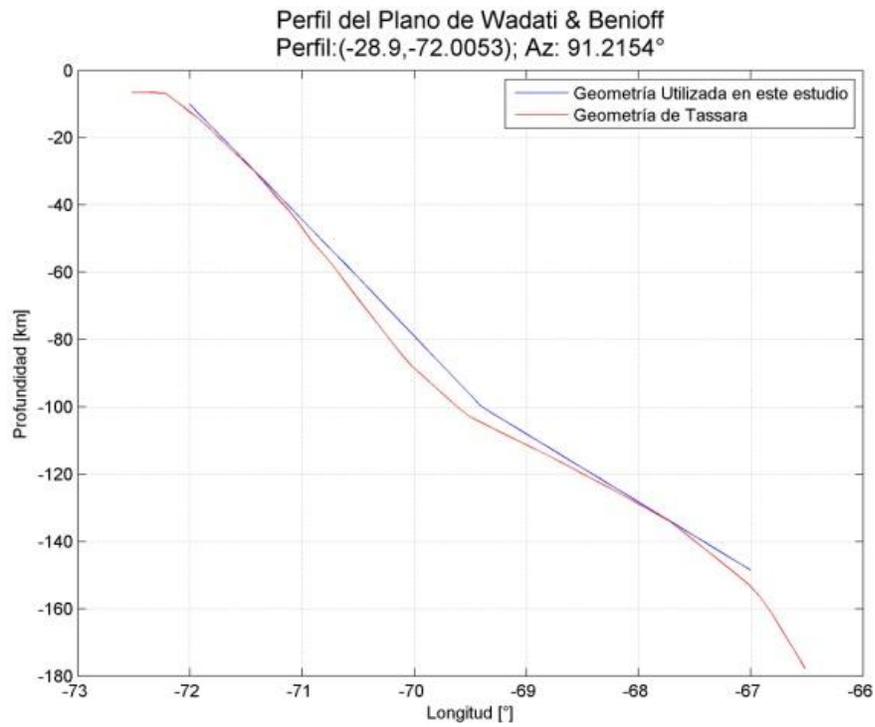


Figura B 231: Comparación Perfil Latitud° -28.9

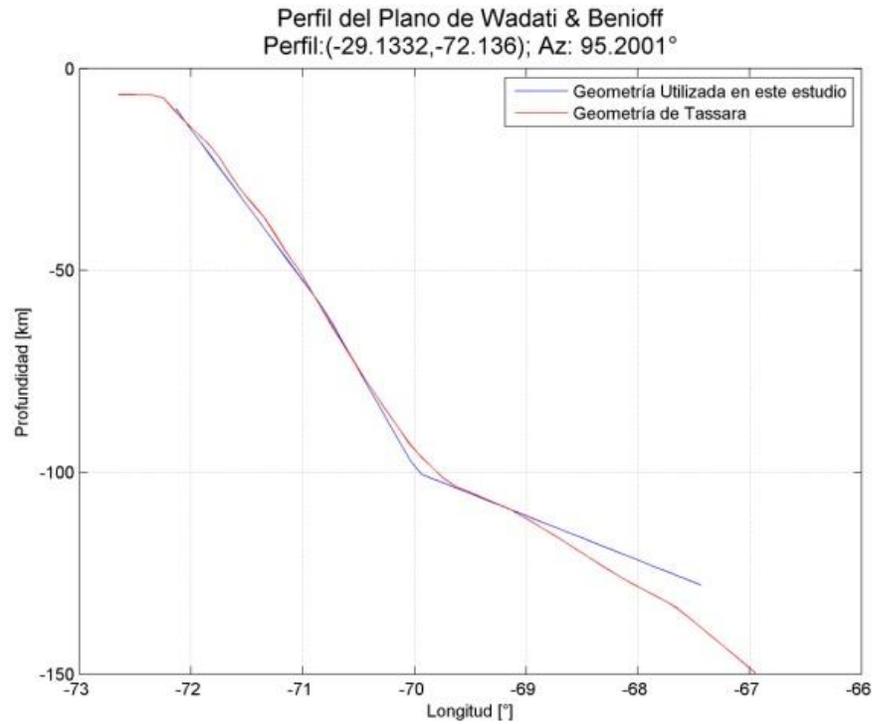


Figura B 232: Comparación Perfil Latitud° -29.13

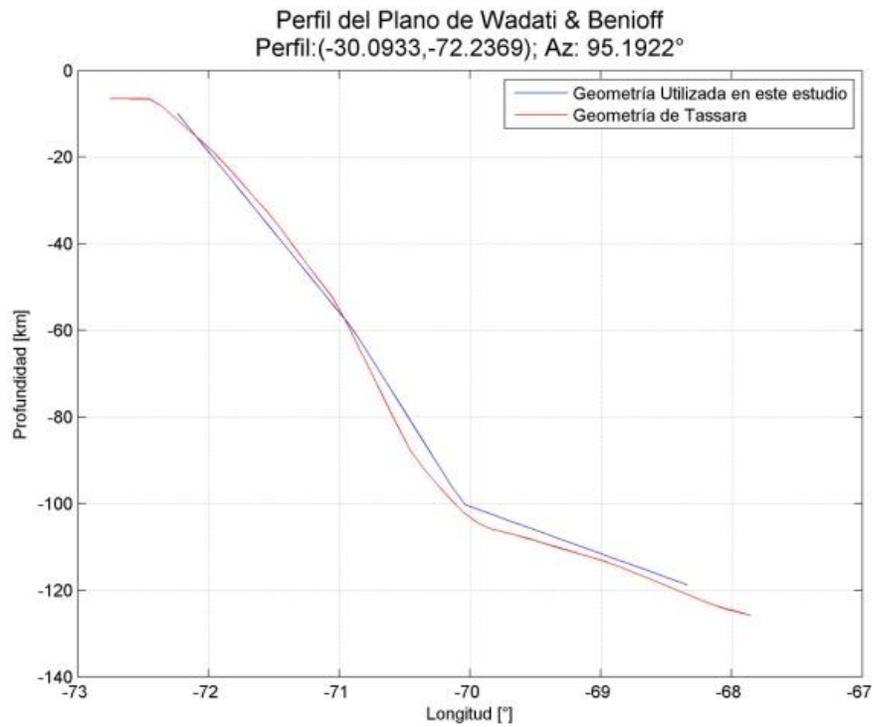


Figura B 233: Comparación Perfil Latitud° -30.09

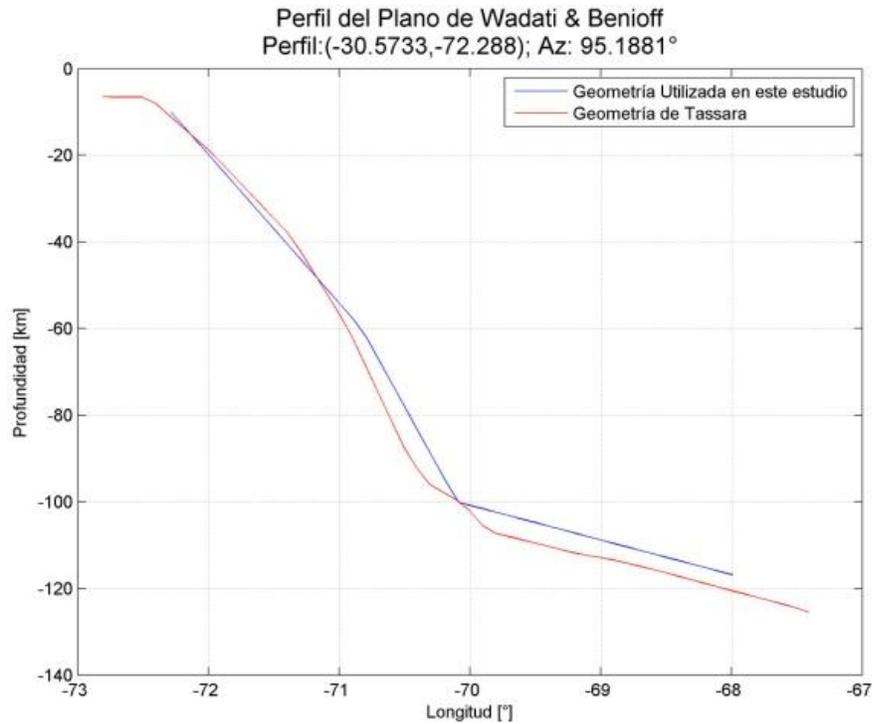


Figura B 234: Comparación Perfil Latitud° -30.57

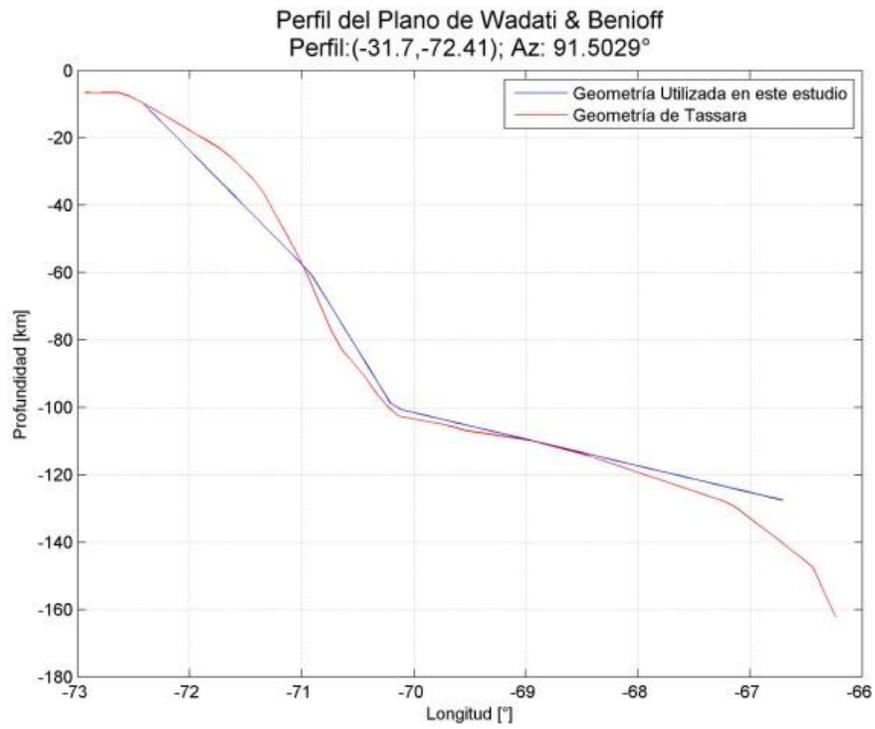


Figura B 235: Comparación Perfil Latitud° -31.7

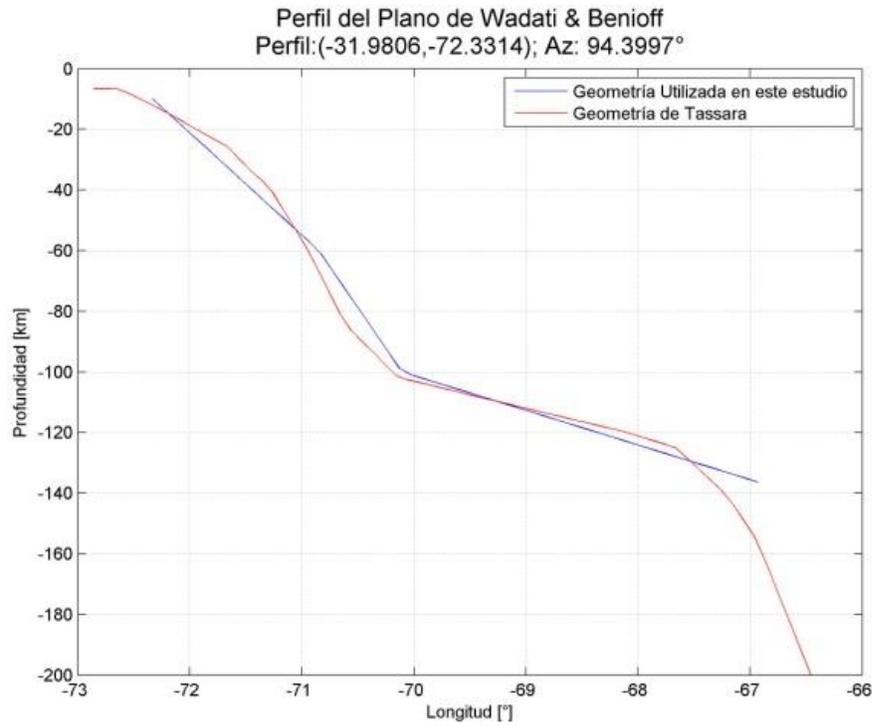


Figura B 236: Comparación Perfil Latitud° -31.98

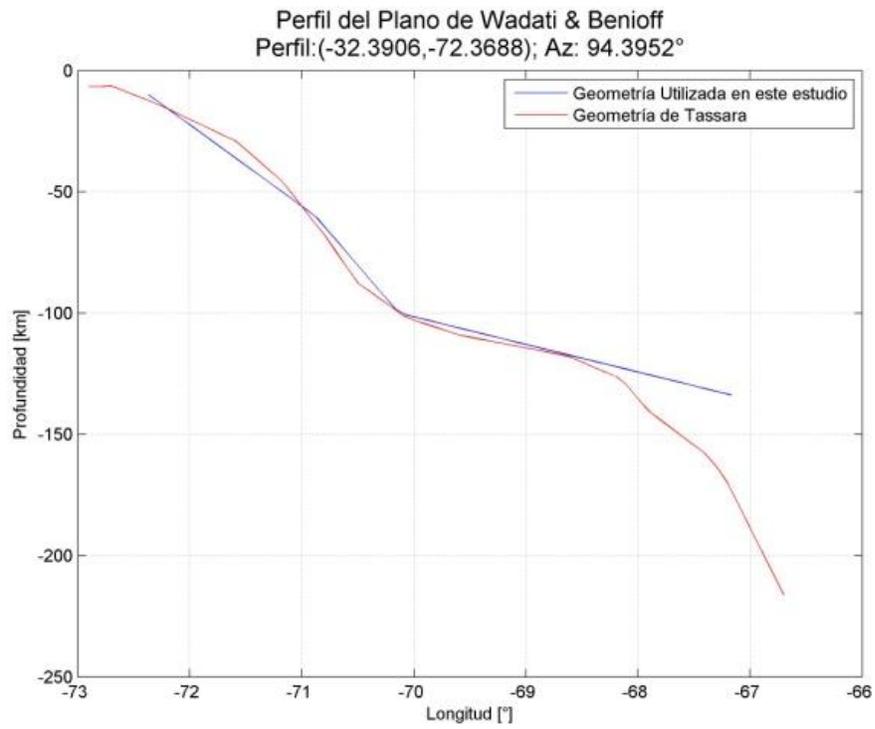


Figura B 237: Comparación Perfil Latitud° -32.39

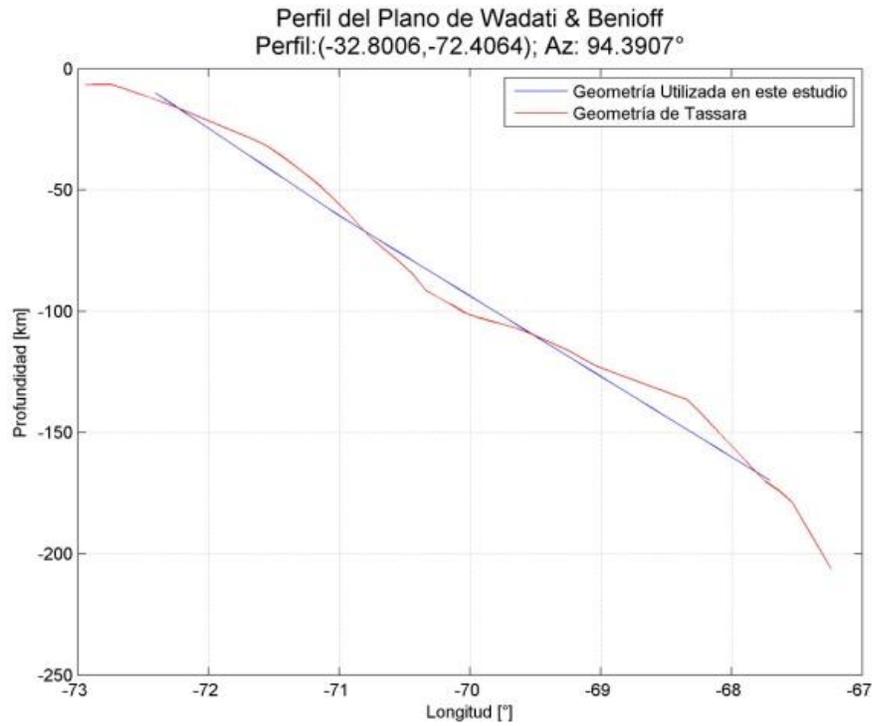


Figura B 238: Comparación Perfil Latitud° -32.8

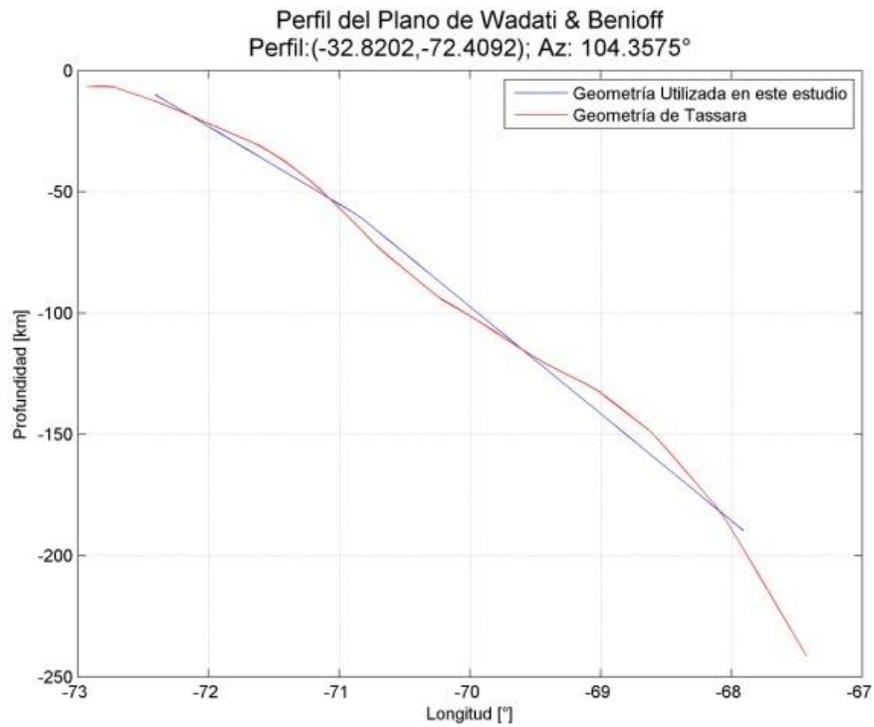


Figura B 239: Comparación Perfil Latitud° -32.82

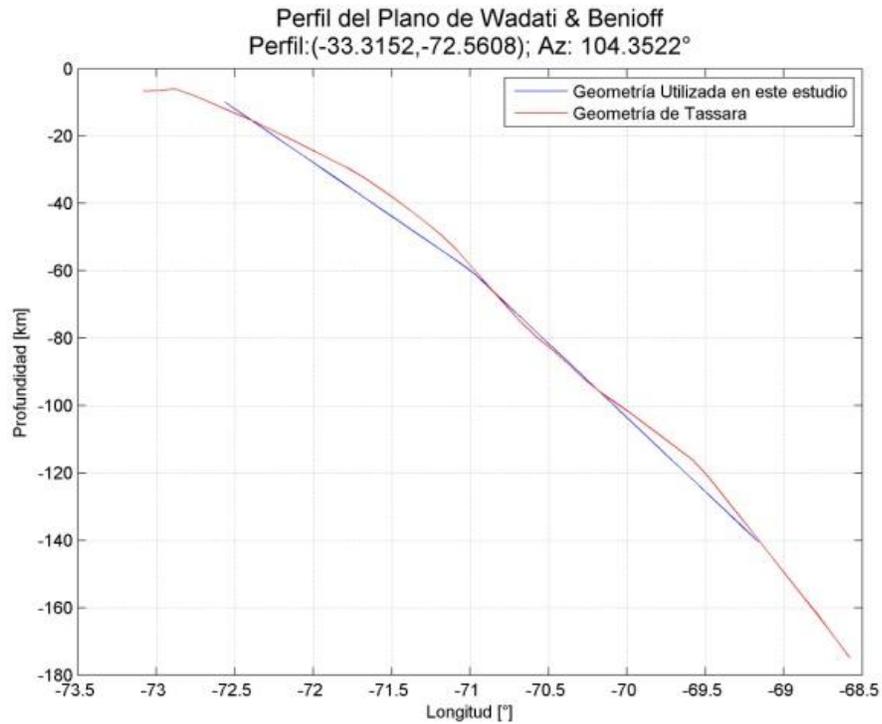


Figura B 240: Comparación Perfil Latitud° -33.32

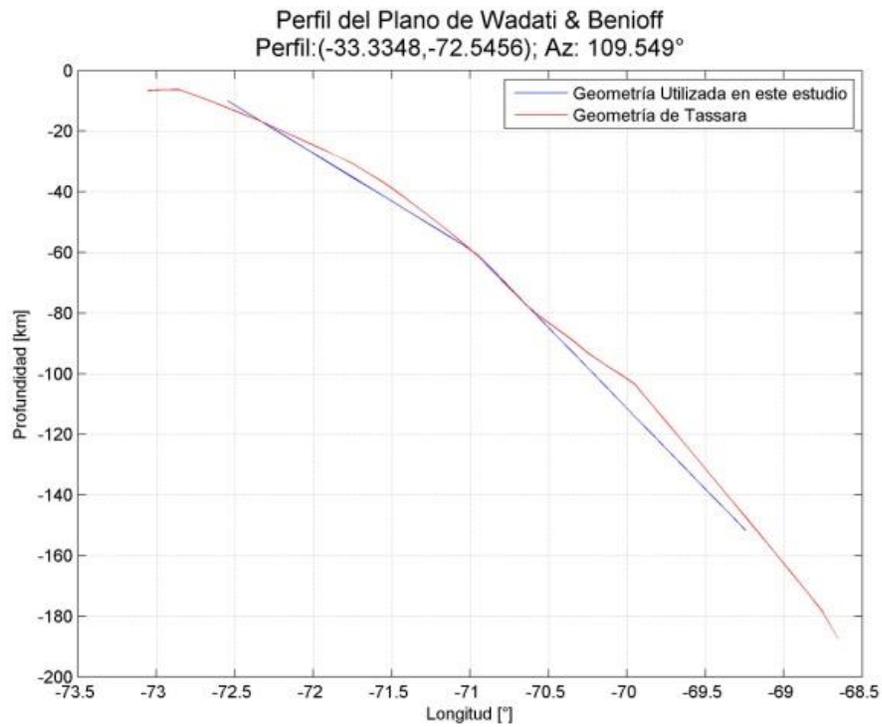


Figura B 241: Comparación Perfil Latitud° -33.34

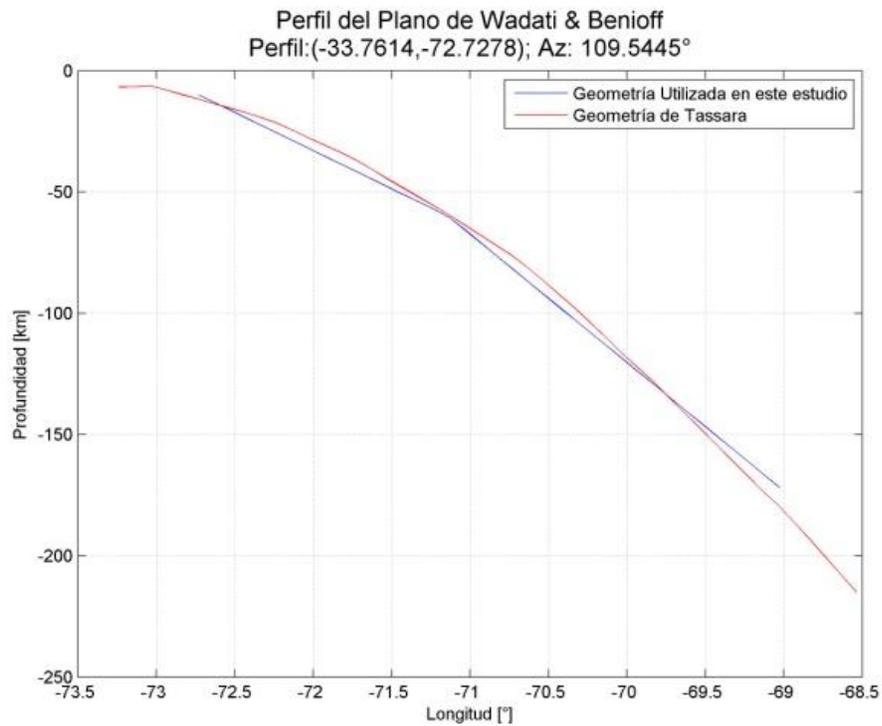


Figura B 242: Comparación Perfil Latitud° -33.76

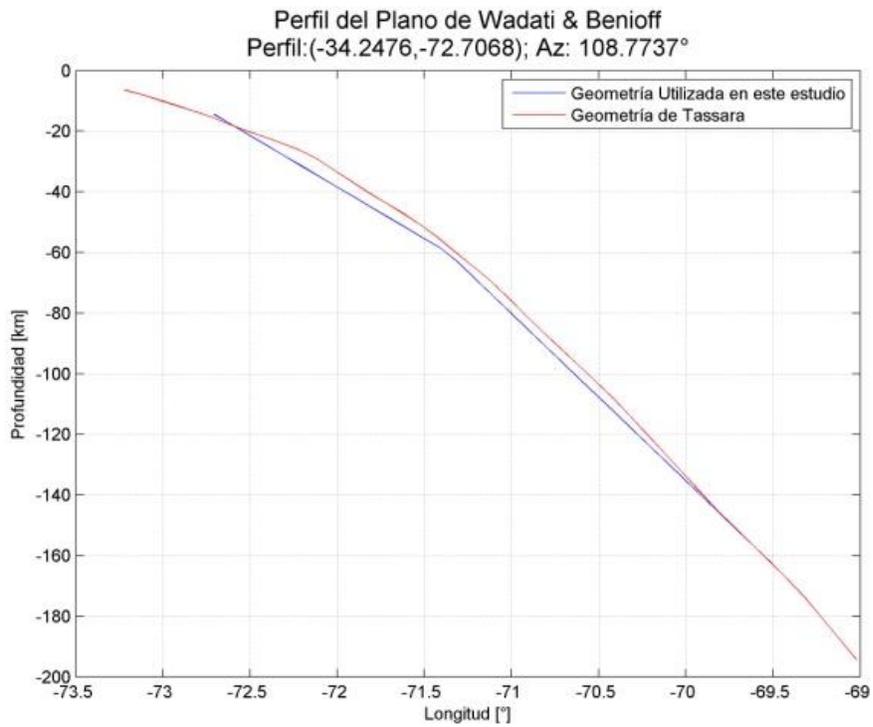


Figura B 243: Comparación Perfil Latitud° -34.25

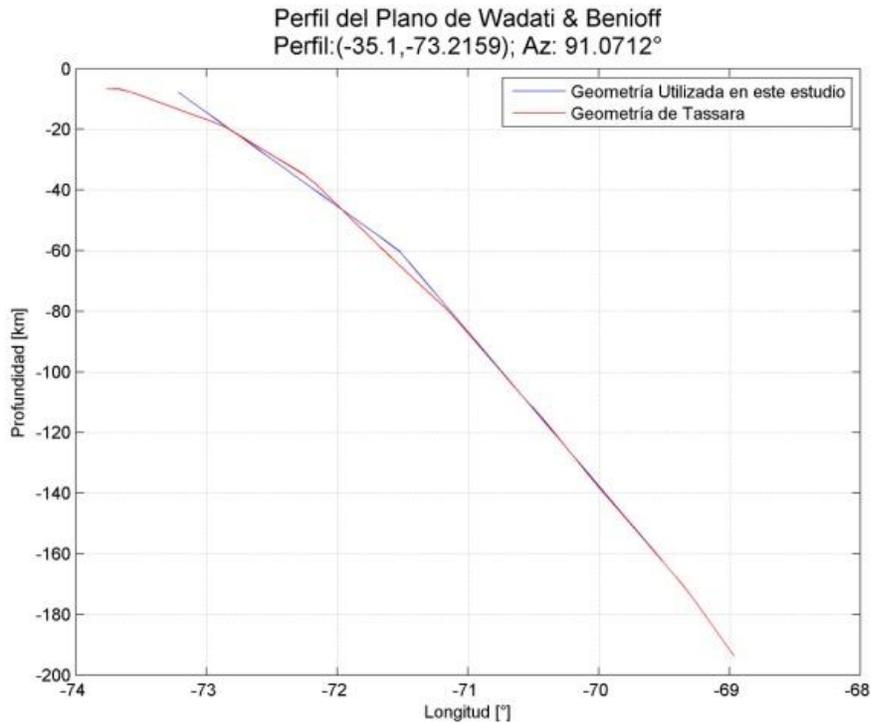


Figura B 244: Comparación Perfil Latitud° -35.1

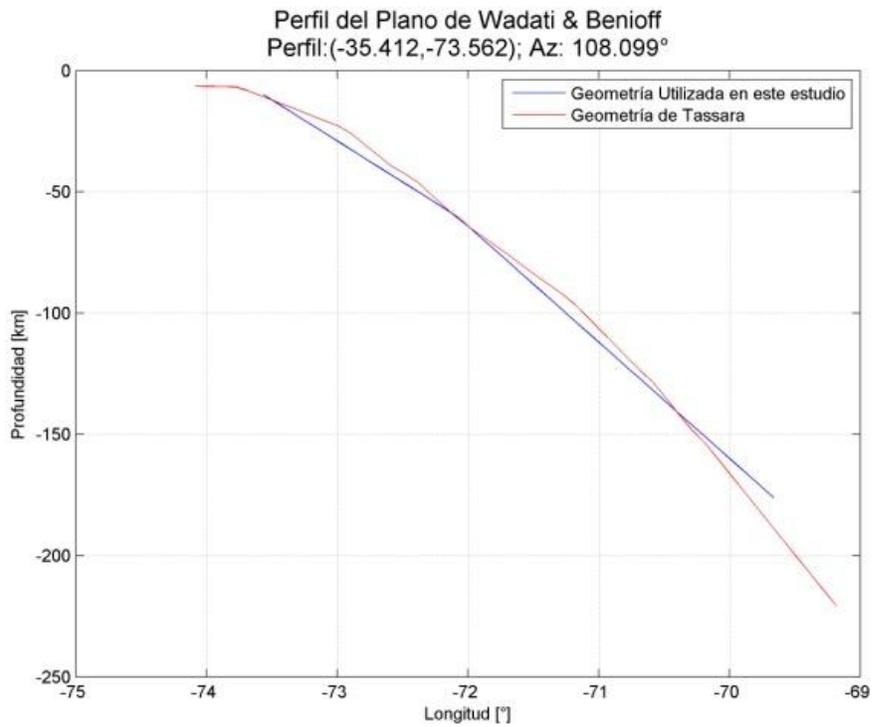


Figura B 245: Comparación Perfil Latitud° -35.41

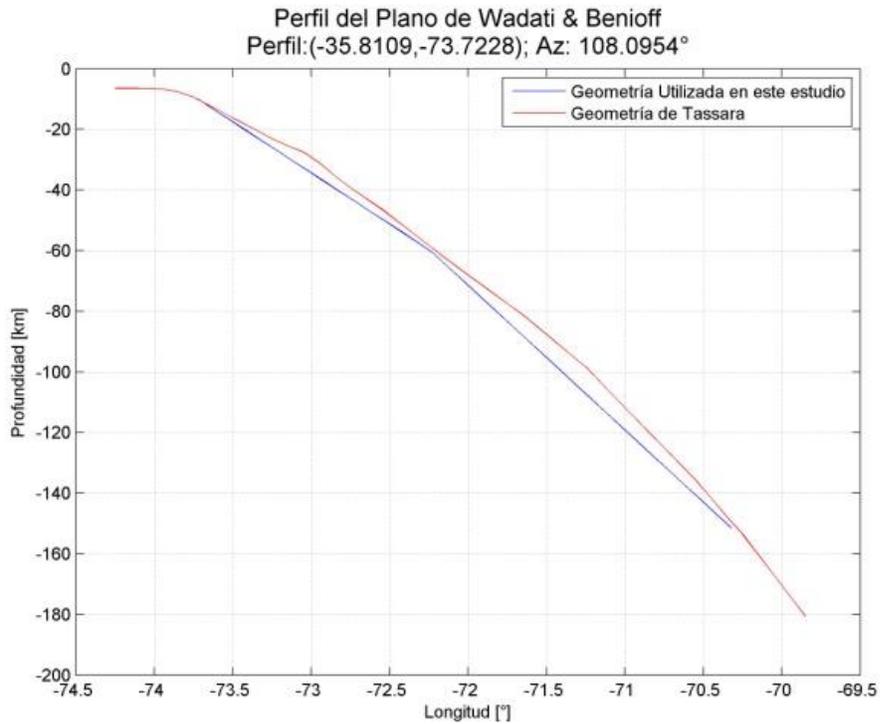


Figura B 246: Comparación Perfil Latitud° 35.81

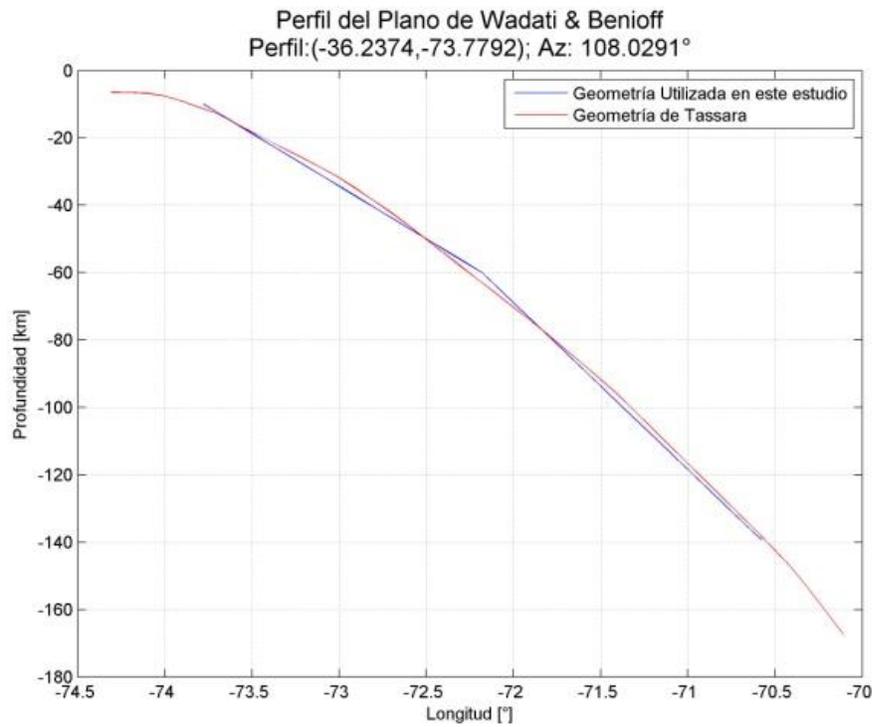


Figura B 247: Comparación Perfil Latitud° -36.24

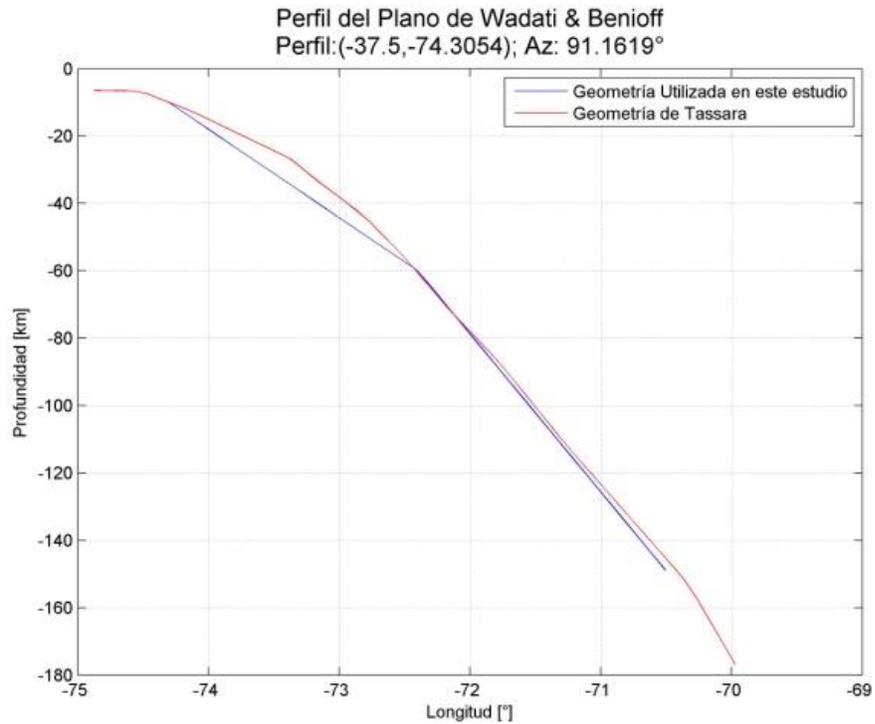


Figura B 248: Comparación Perfil Latitud° -37.5

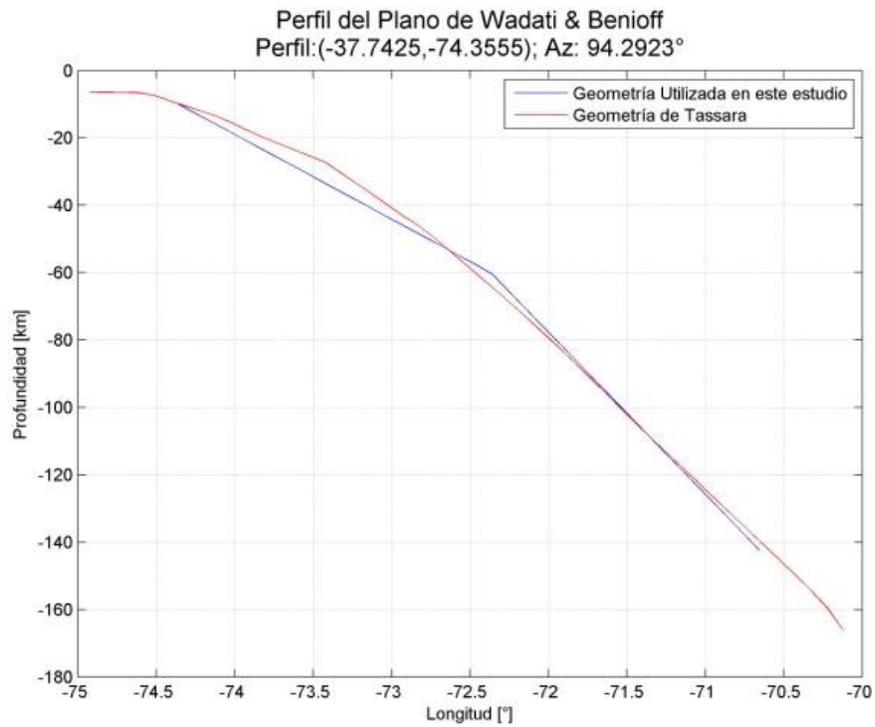


Figura B 249: Comparación Perfil Latitud° -37.74

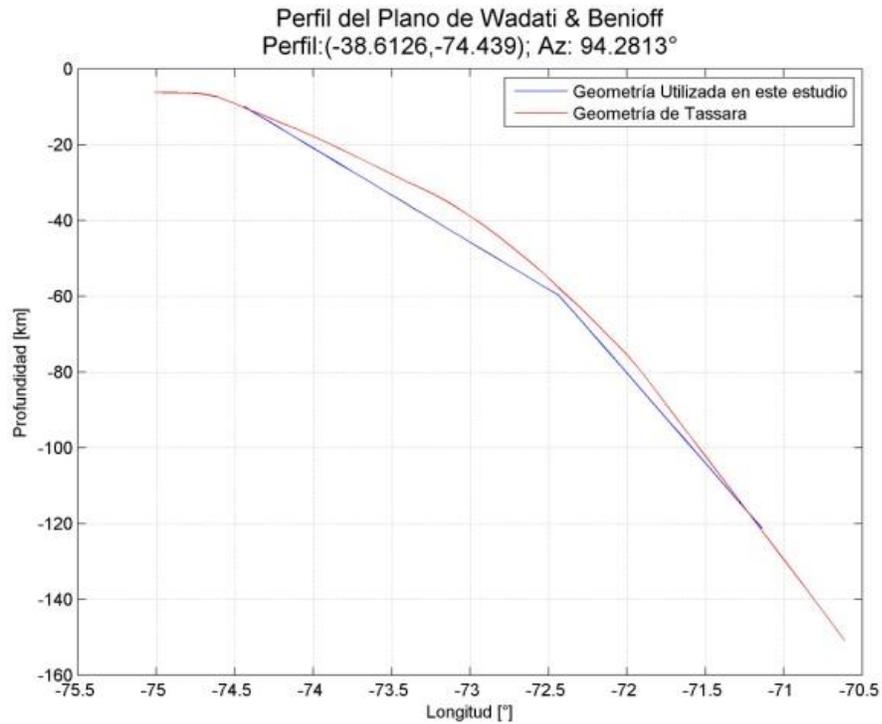


Figura B 250: Comparación Perfil Latitud° -38.61

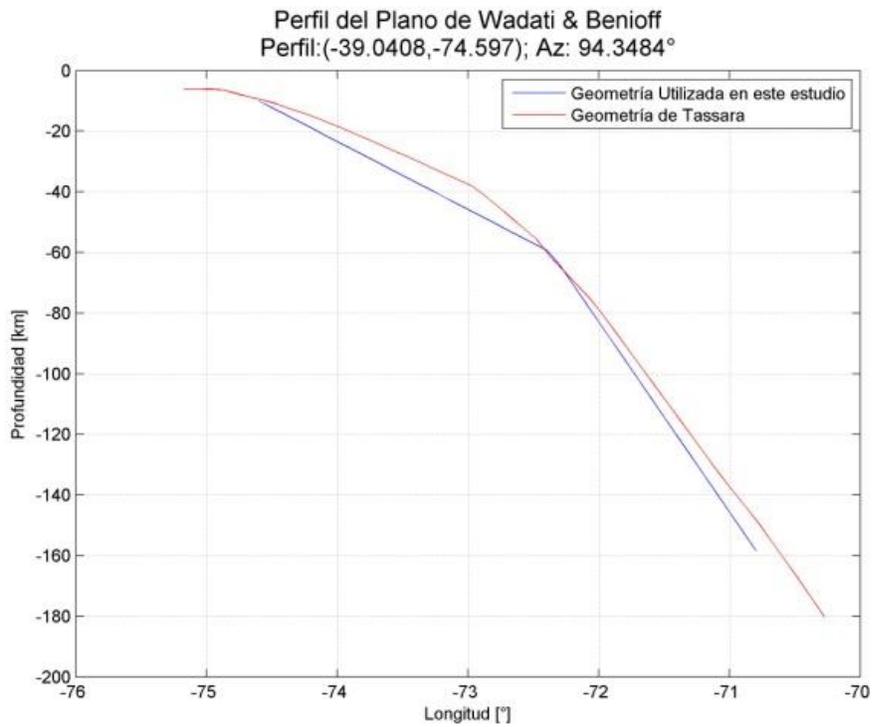


Figura B 251: Comparación Perfil Latitud° -39.04

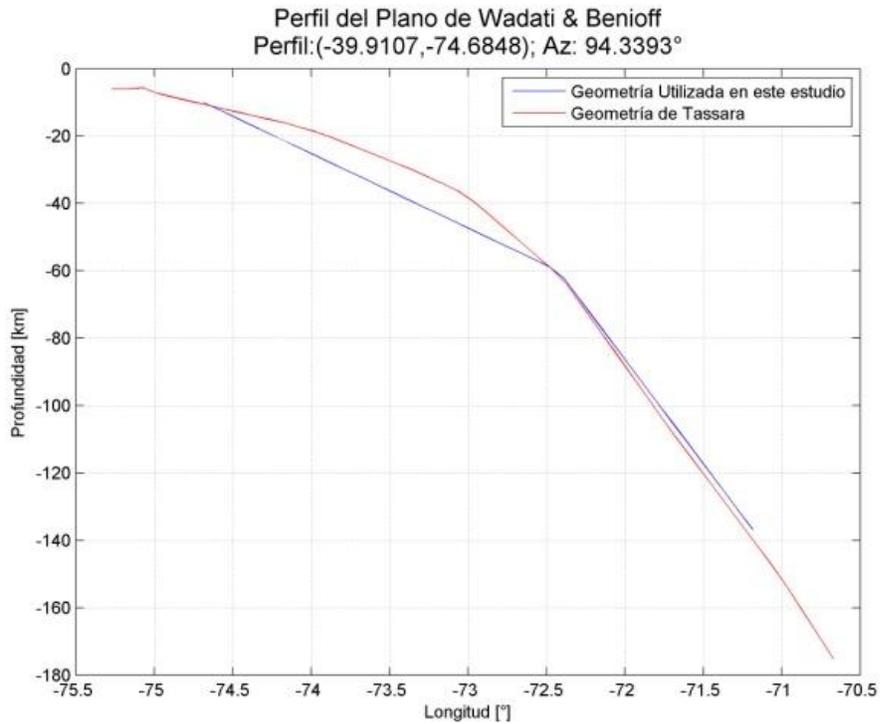


Figura B 252: Comparación Perfil Latitud° -39.91

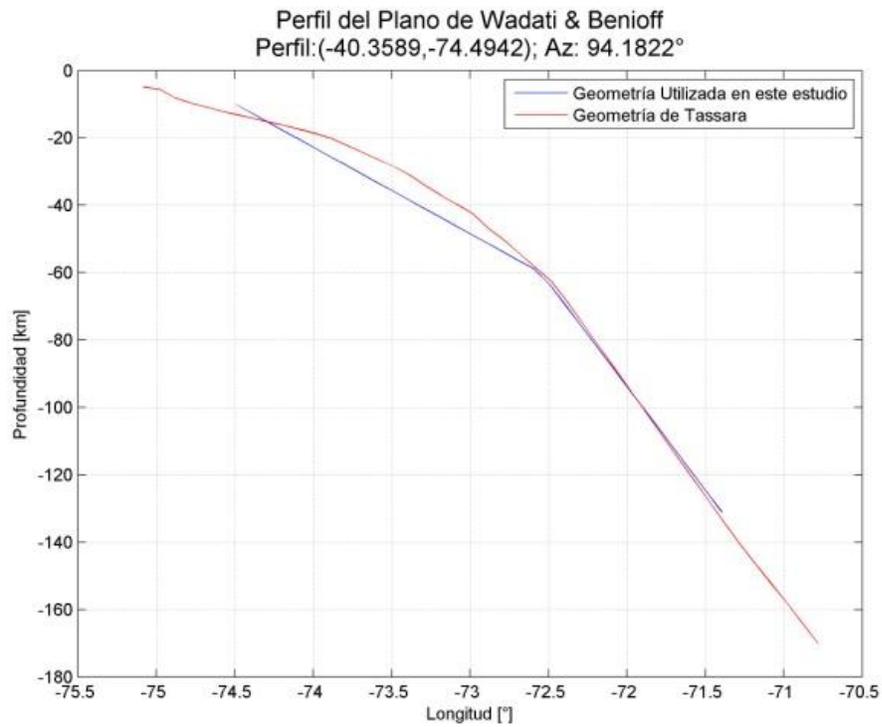


Figura B 253: Comparación Perfil Latitud° -40.36

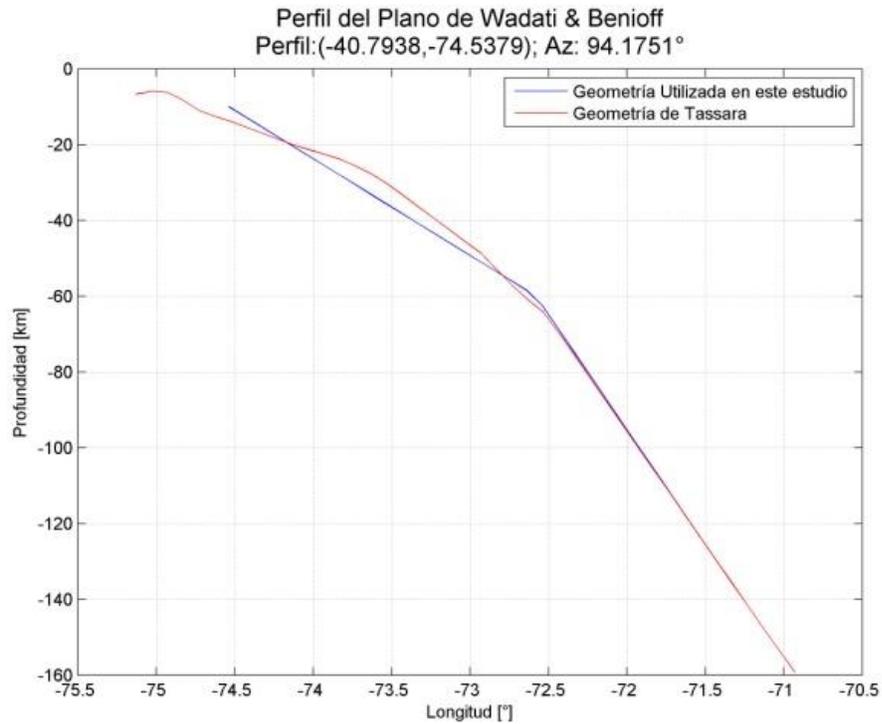


Figura B 254: Comparación Perfil Latitud° -40.79

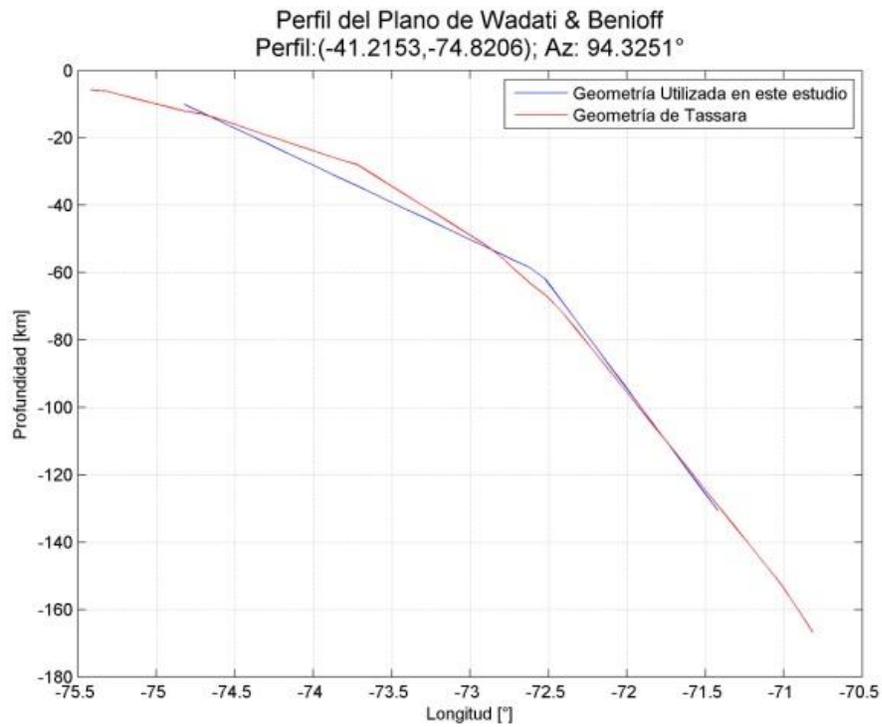


Figura B 255: Comparación Perfil Latitud° -41.22

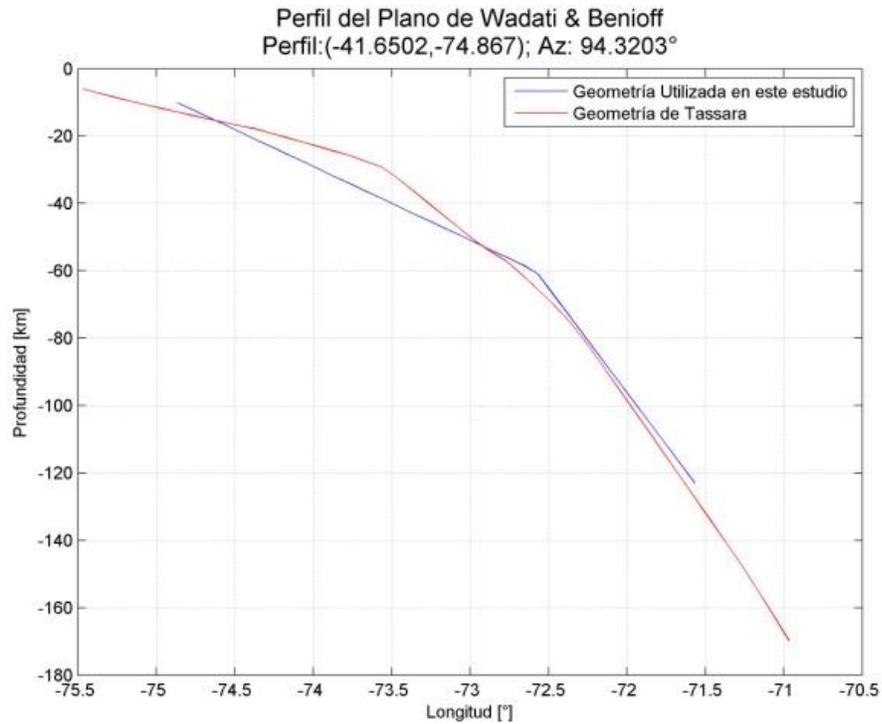


Figura B 256: Comparación Perfil Latitud° -41.65

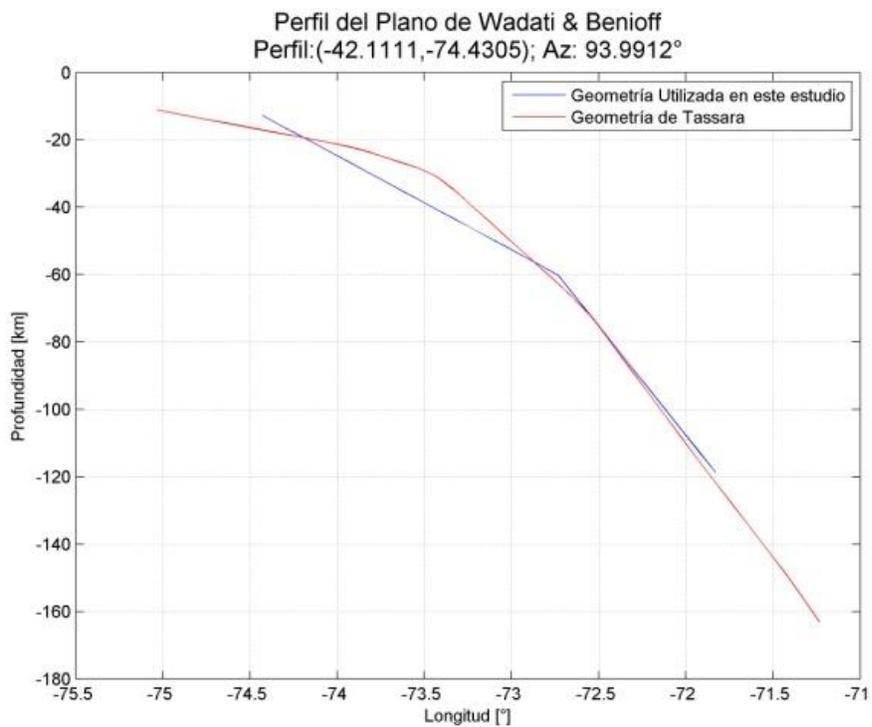


Figura B 257: Comparación Perfil Latitud° -42.11

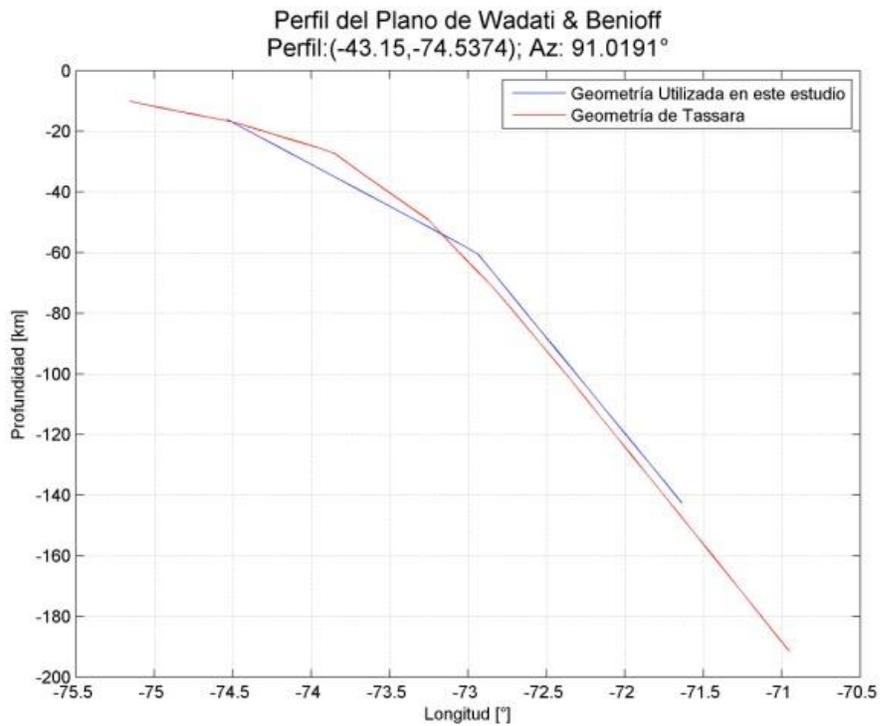


Figura B 258: Comparación Perfil Latitud° -43.15

B.5 ESPECTROS CAPITALES PROVINCIALES.

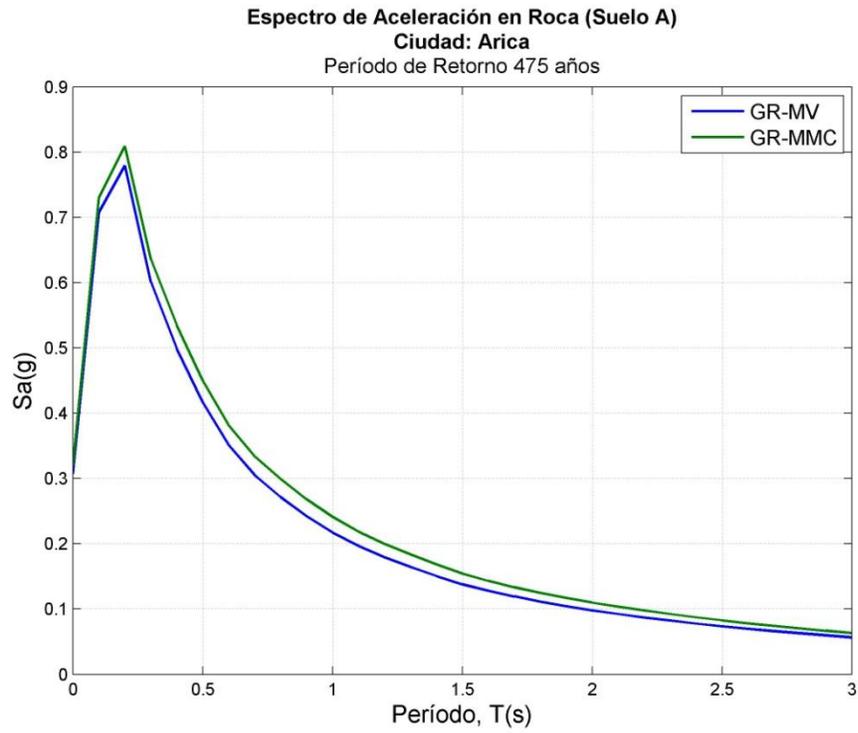


Figura B 259: Espectro de Aceleración de Arica; Período de Retorno 475 años

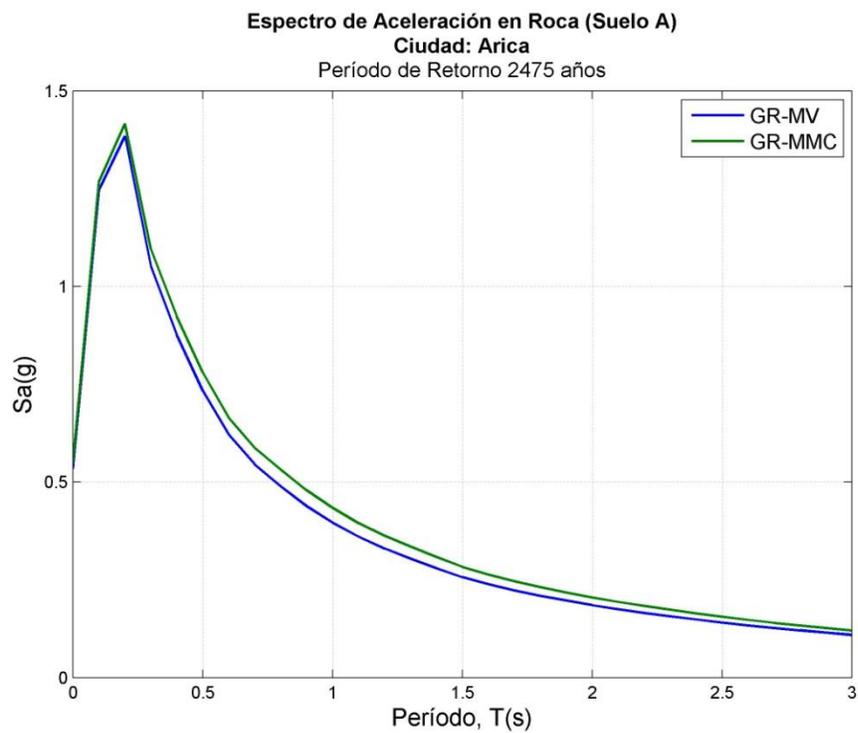


Figura B 260: Espectro de Aceleración de Arica; Período de Retorno 2475 años

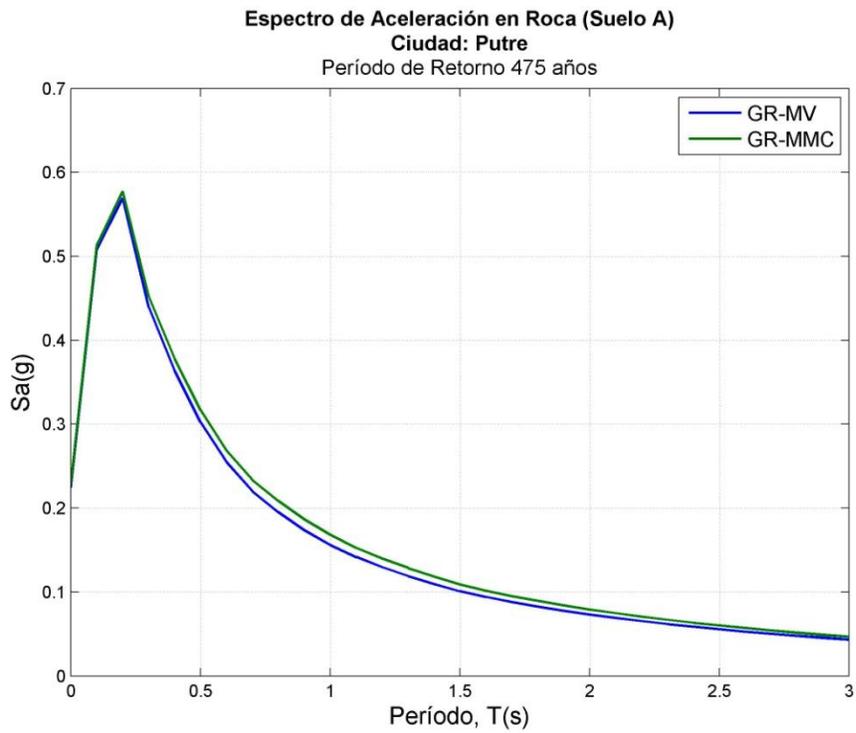


Figura B 261: Espectro de Aceleración de Putre; Período de Retorno 475 años

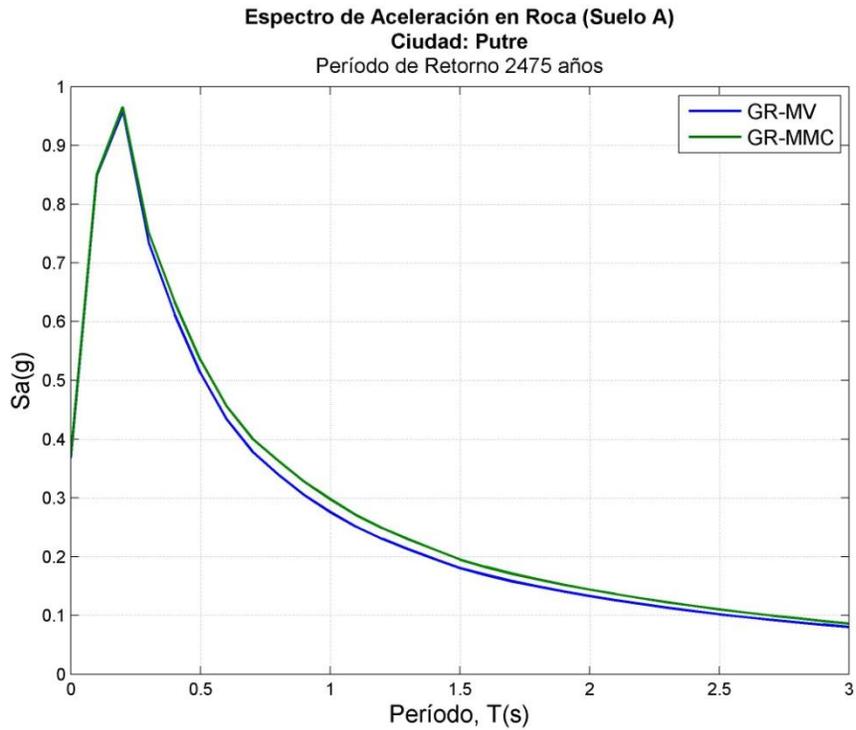


Figura B 262: Espectro de Aceleración de Putre; Período de Retorno 2475 años

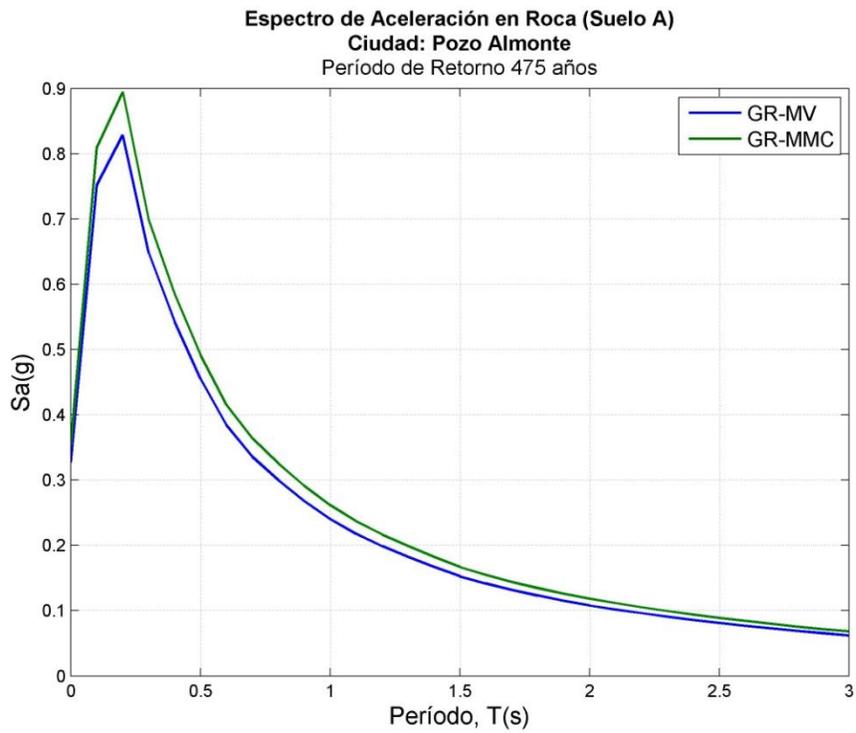


Figura B 263 Espectro de Aceleración de Pozo Almonte; Período de Retorno 475 años

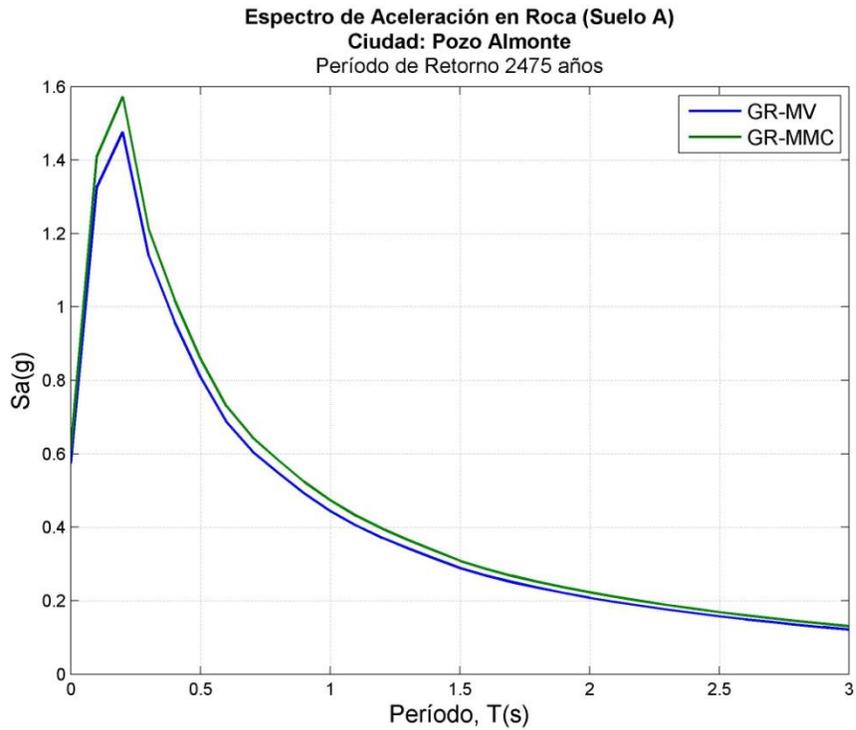


Figura B 264 Espectro de Aceleración de Pozo Almonte; Período de Retorno 2475 años

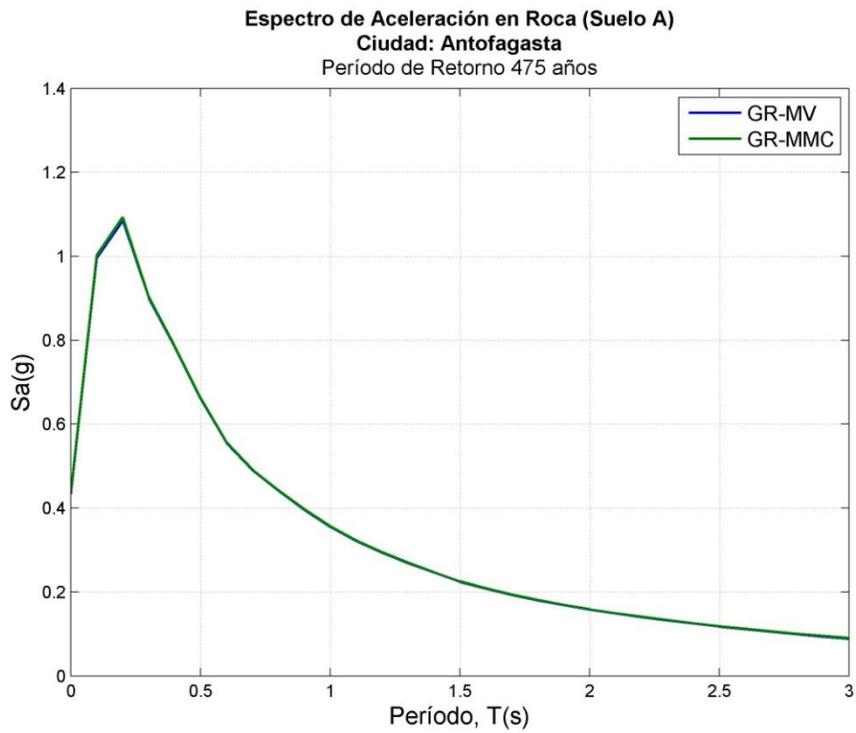


Figura B 265: Espectro de Aceleración de Antofagasta; Período de Retorno 475 años

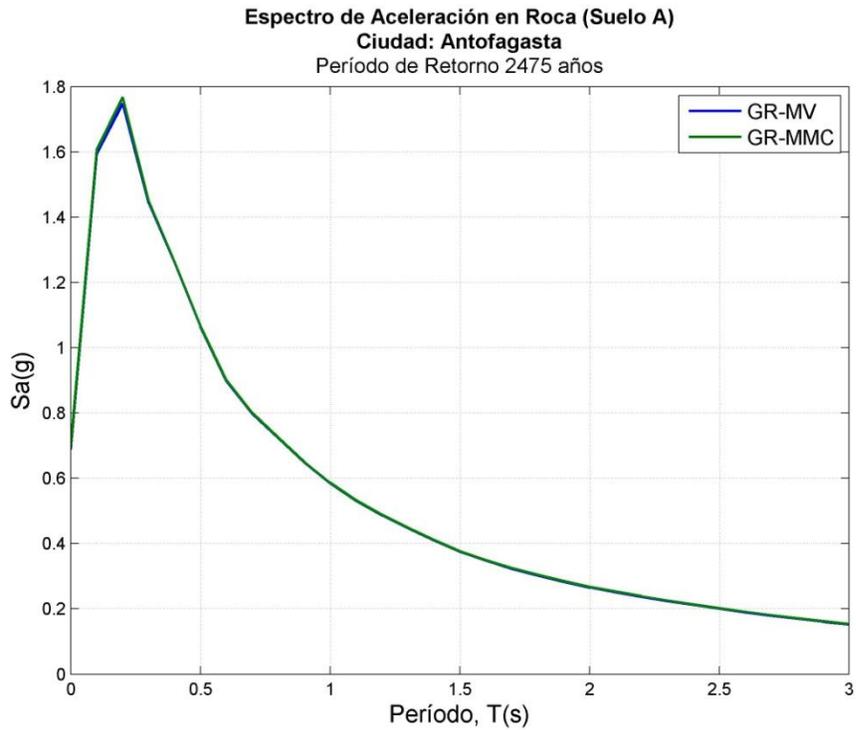


Figura B 266: Espectro de Aceleración de Antofagasta; Período de Retorno 2475 años

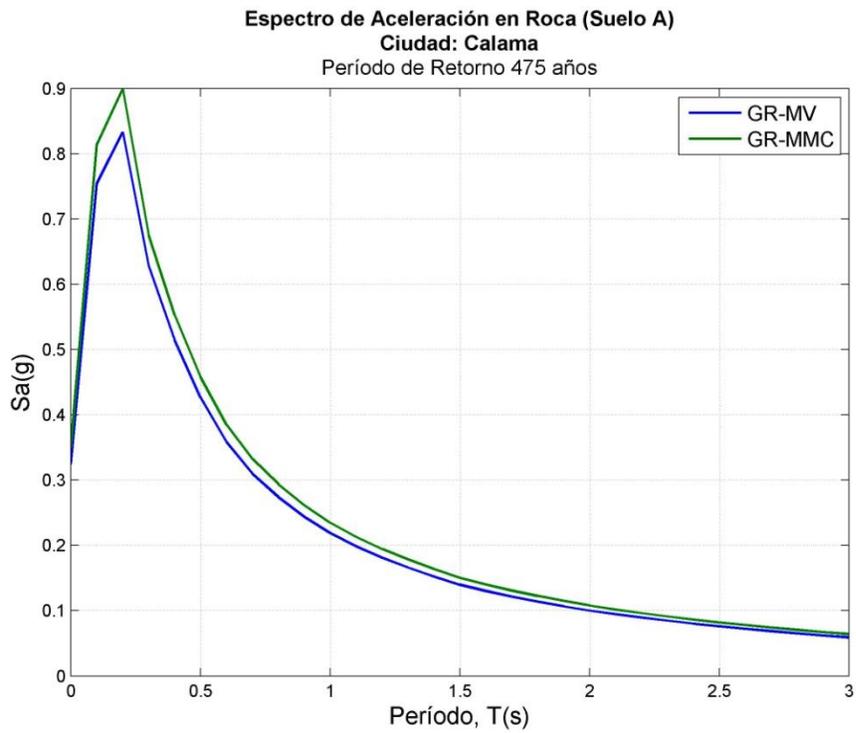


Figura B 267: Espectro de Aceleración de Calama; Período de Retorno 475 años

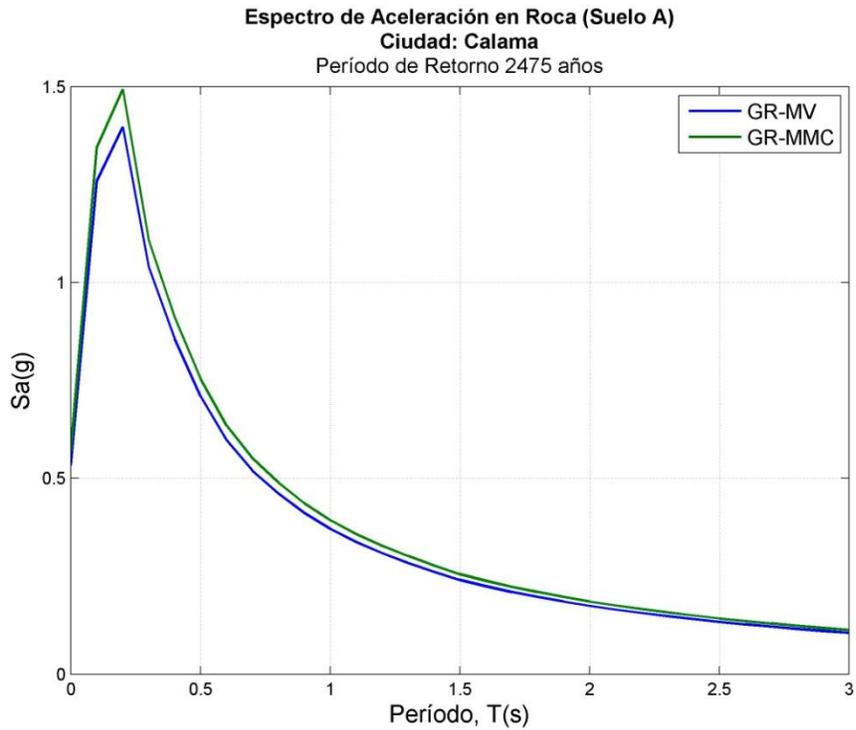


Figura B 268: Espectro de Aceleración de Calama; Período de Retorno 2475 años

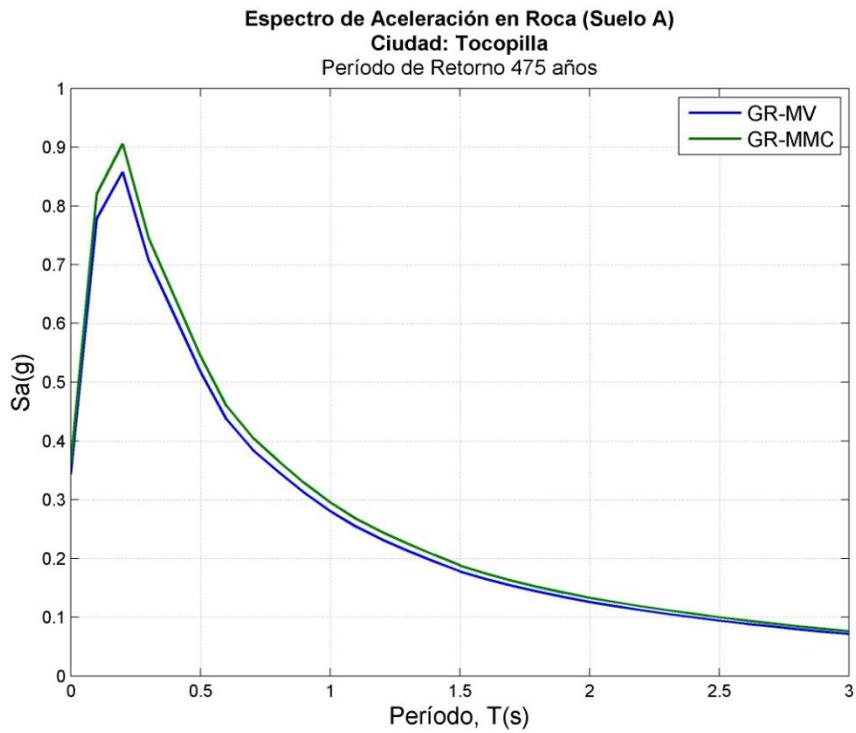


Figura B 269: Espectro de Aceleración de Tocopilla; Período de Retorno 475 años

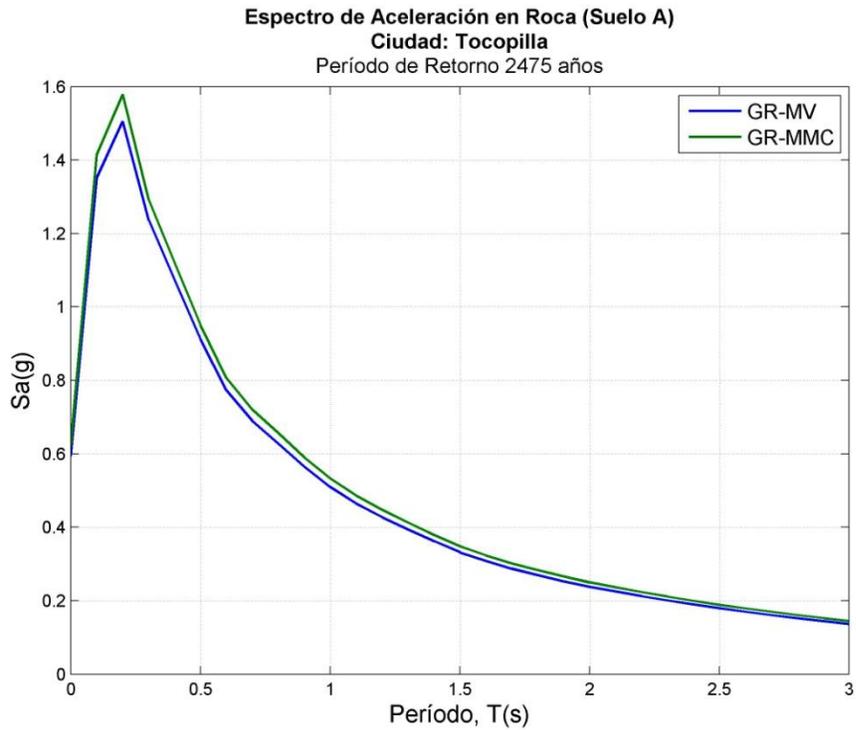


Figura B 270: Espectro de Aceleración de Tocopilla; Período de Retorno 2475 años

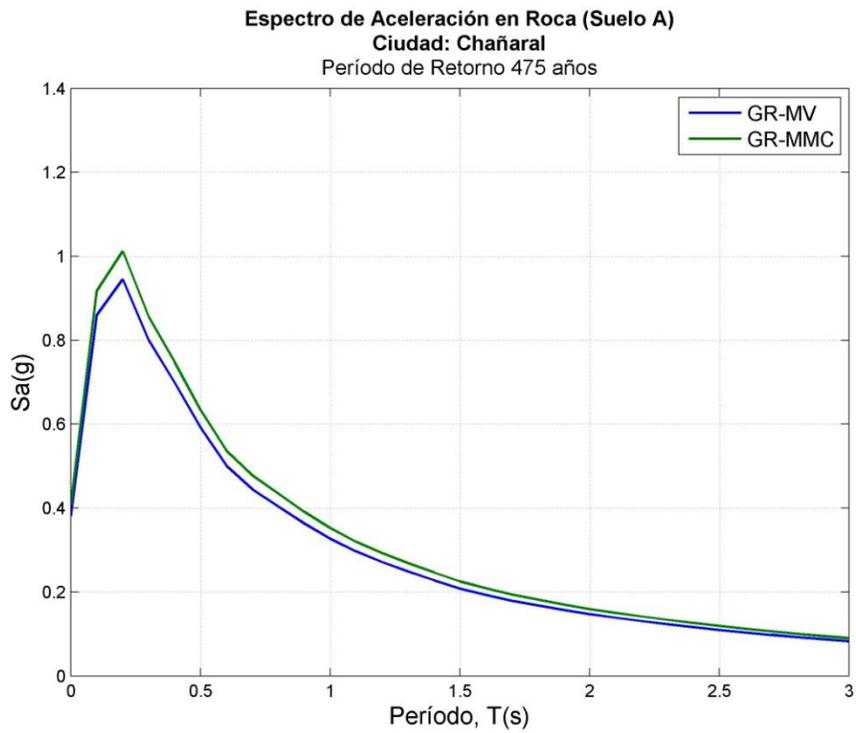


Figura B 271: Espectro de Aceleración de Chañaral; Período de Retorno 475 años

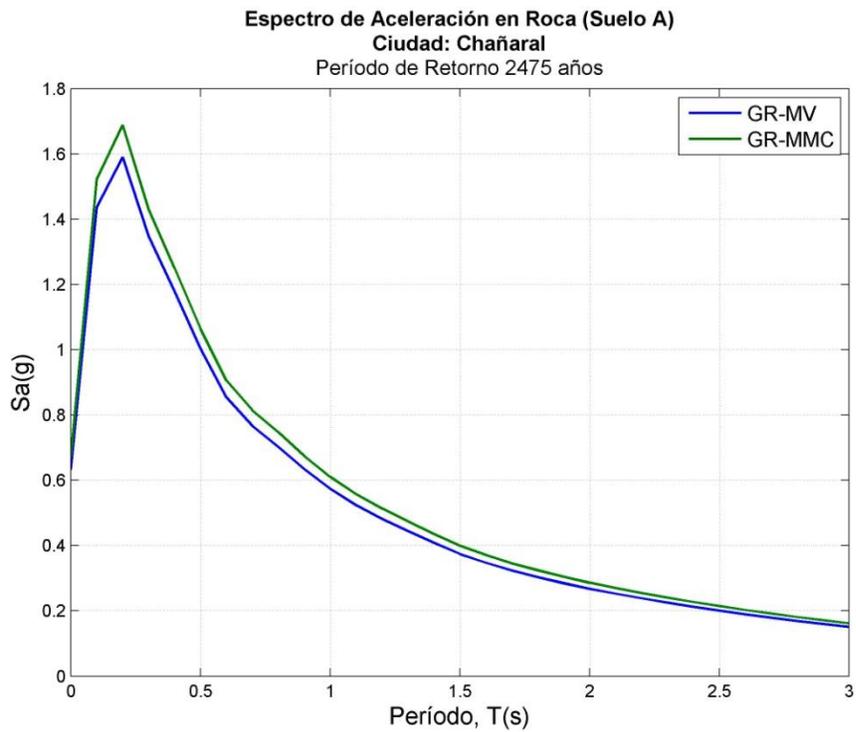


Figura B 272: Espectro de Aceleración de Chañaral; Período de Retorno 2475 años

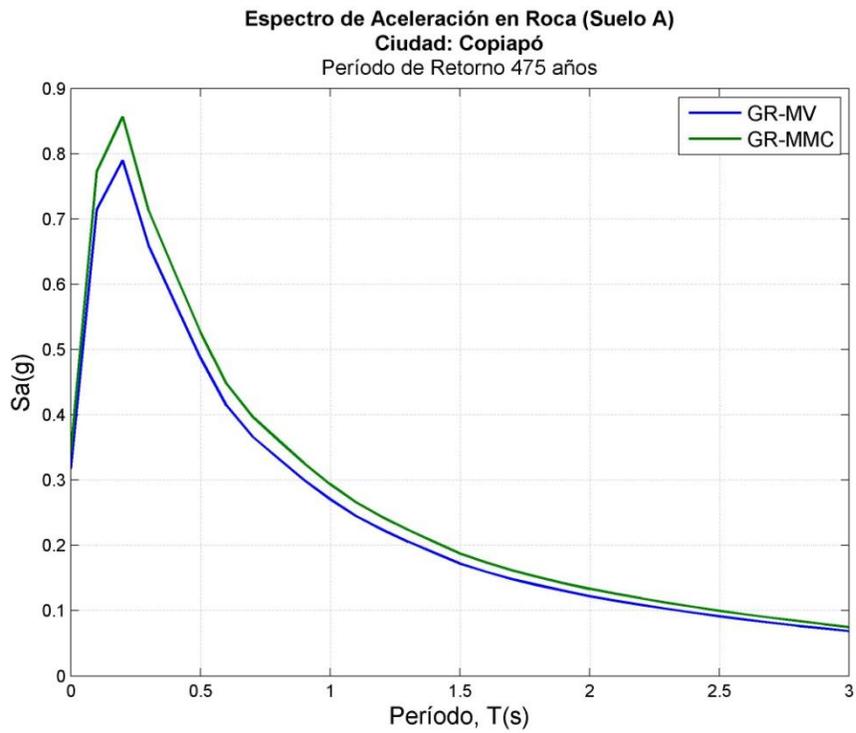


Figura B 273: Espectro de Aceleración de Copiapó; Período de Retorno 475 años

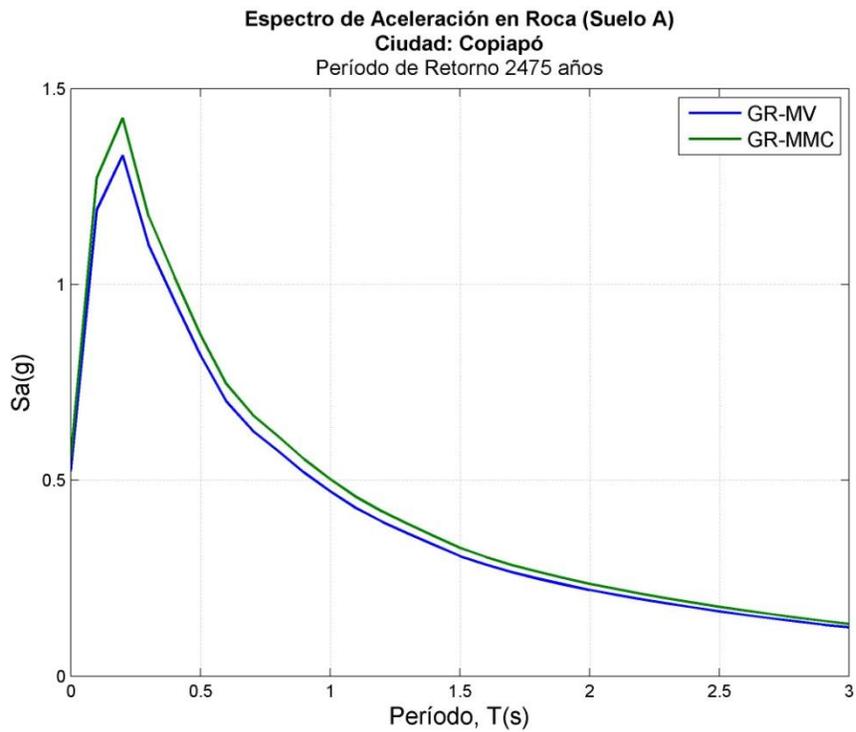


Figura B 274: Espectro de Aceleración de Copiapó; Período de Retorno 2475 años

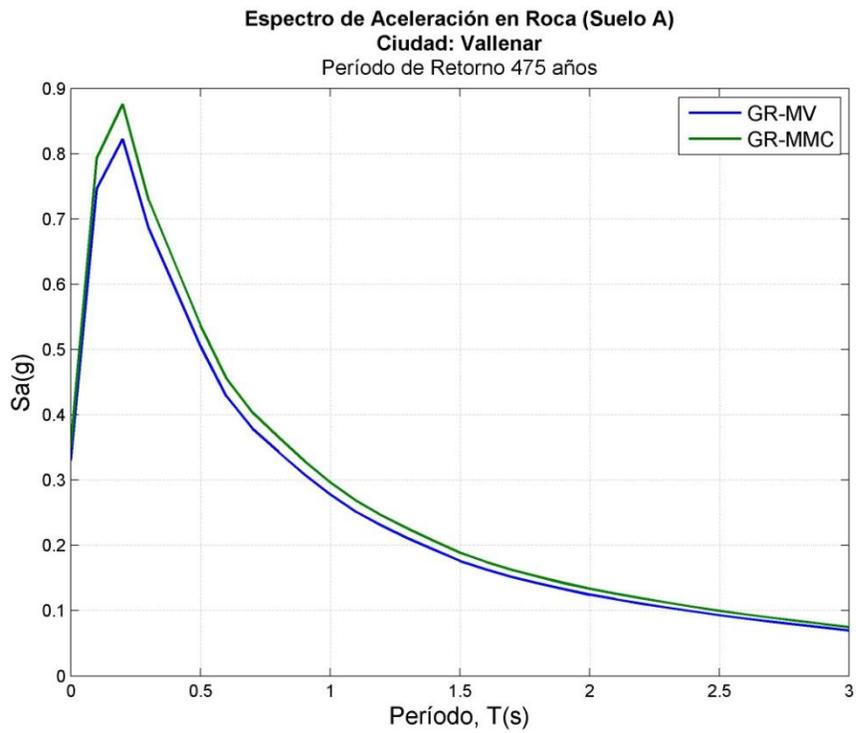


Figura B 275: Espectro de Aceleración de Vallenar; Período de Retorno 475 años

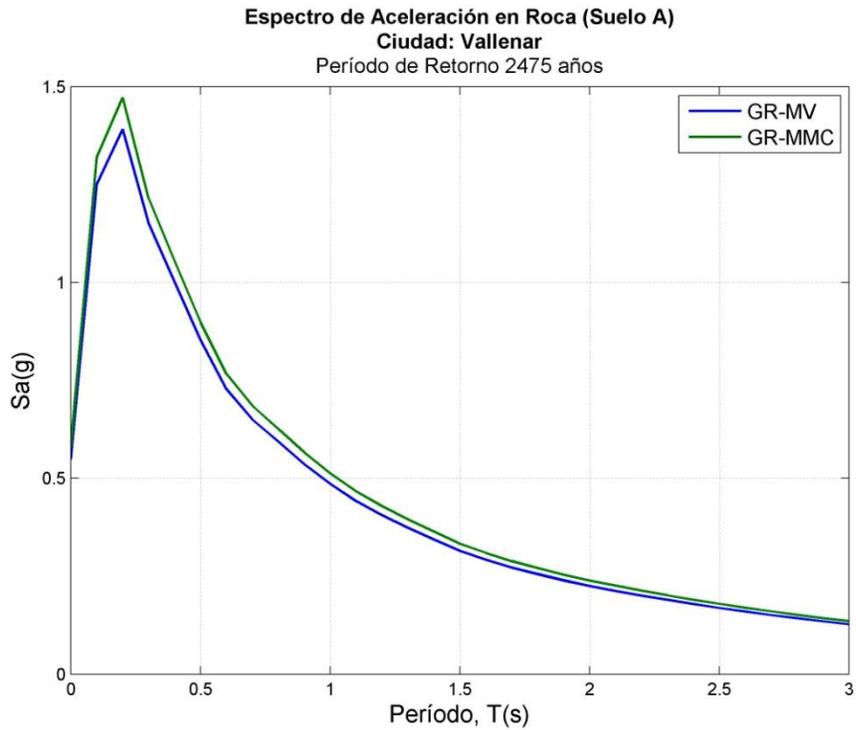


Figura B 276: Espectro de Aceleración de Vallenar; Período de Retorno 2475 años

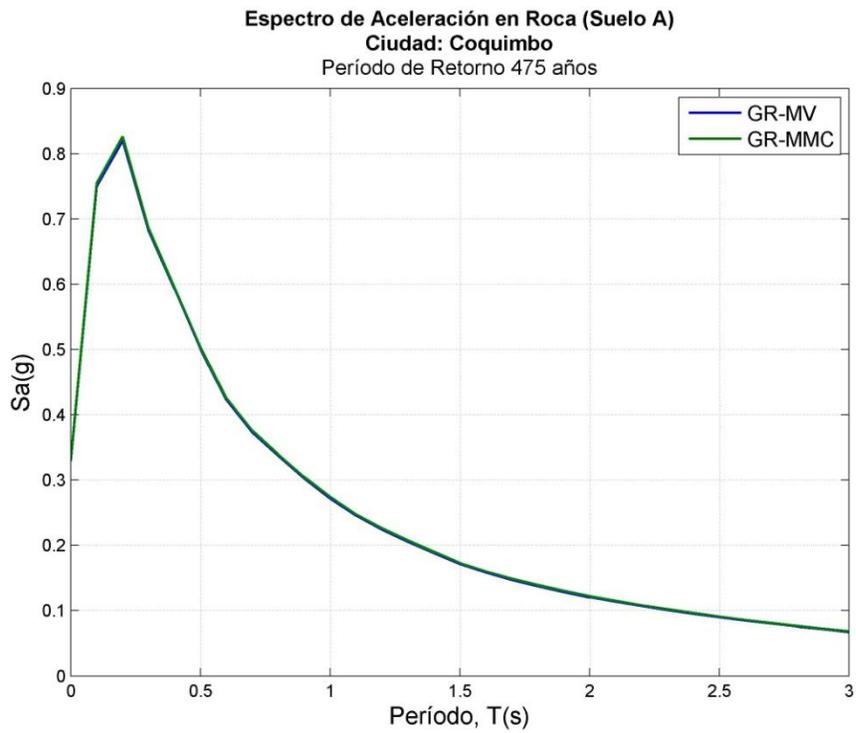


Figura B 277: Espectro de Aceleración de Coquimbo; Período de Retorno 475 años

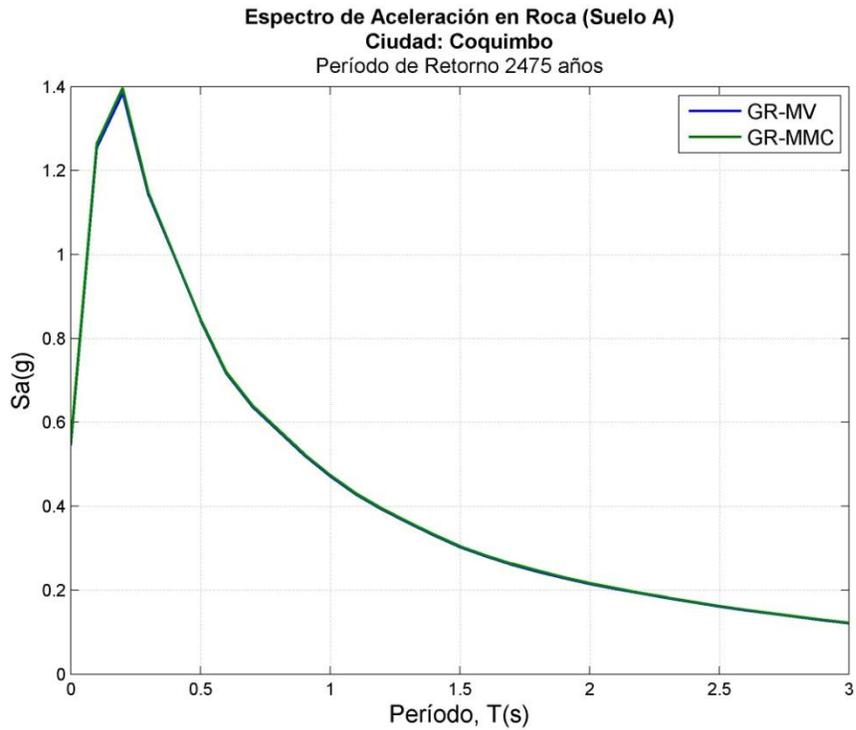


Figura B 278: Espectro de Aceleración de Coquimbo; Período de Retorno 2475 años

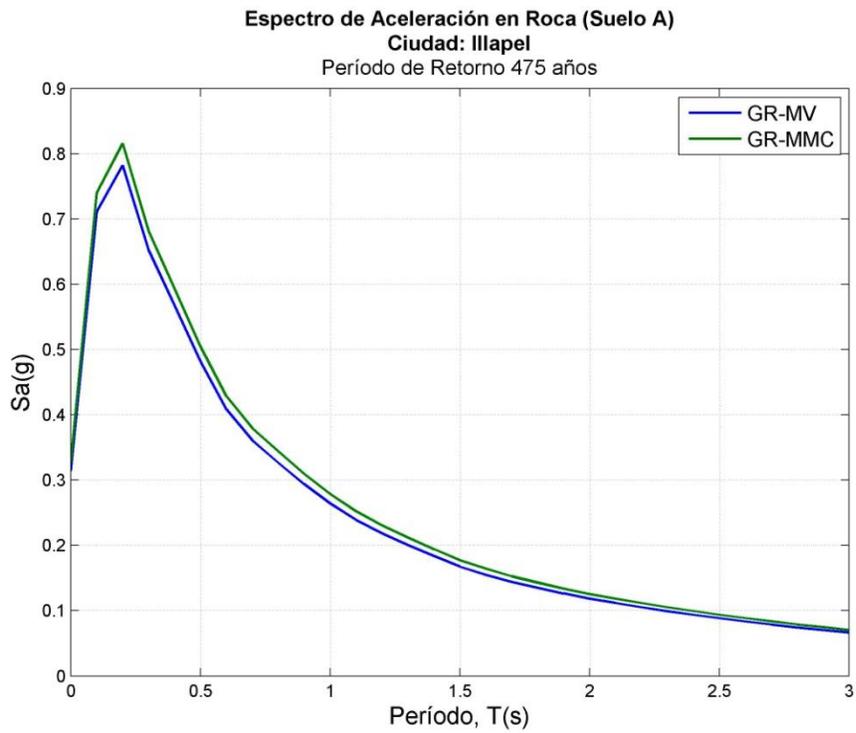


Figura B 279: Espectro de Aceleración de Illapel; Período de Retorno 475 años

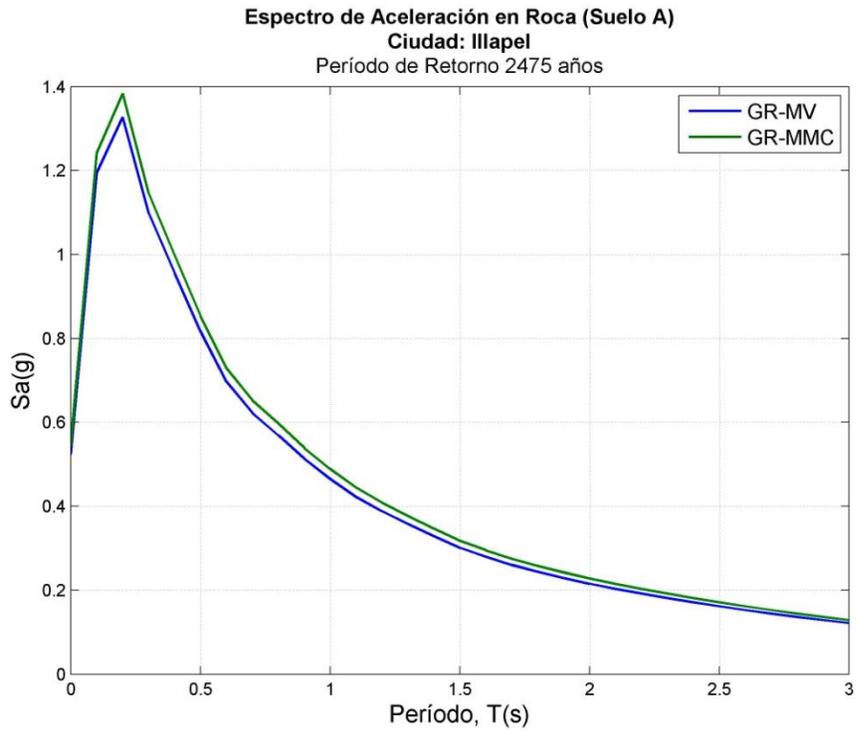


Figura B 280: Espectro de Aceleración de Illapel; Período de Retorno 2475 años

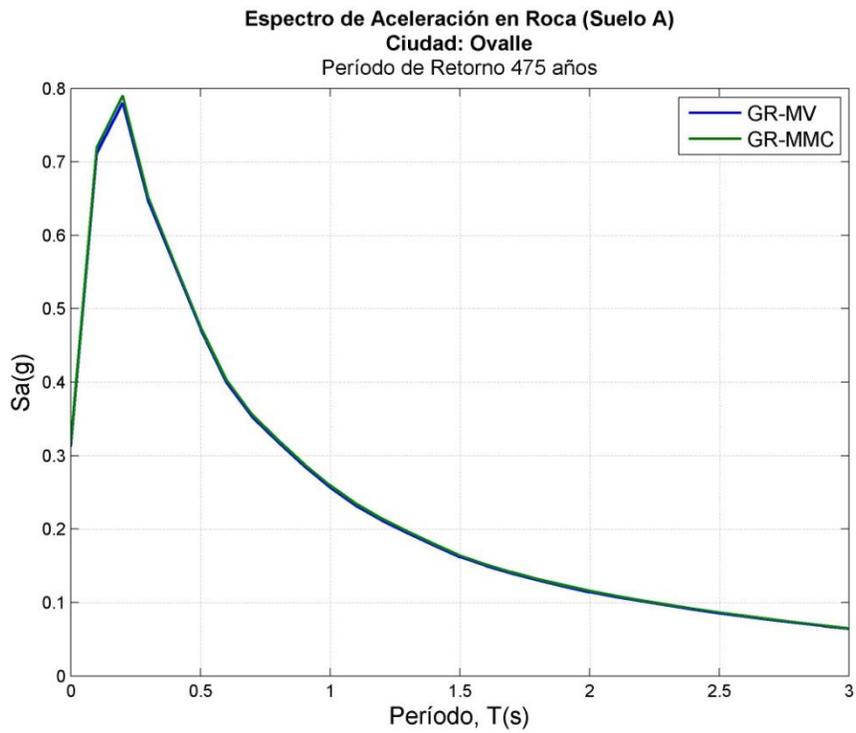


Figura B 281: Espectro de Aceleración de Ovalle; Período de Retorno 475 años

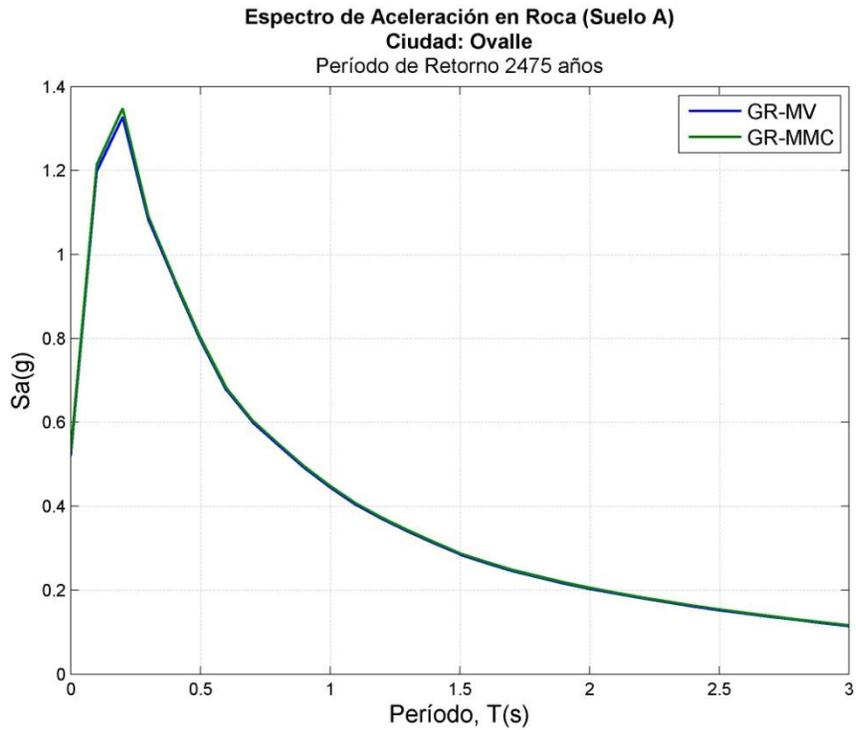


Figura B 282: Espectro de Aceleración de Ovalle; Período de Retorno 2475 años

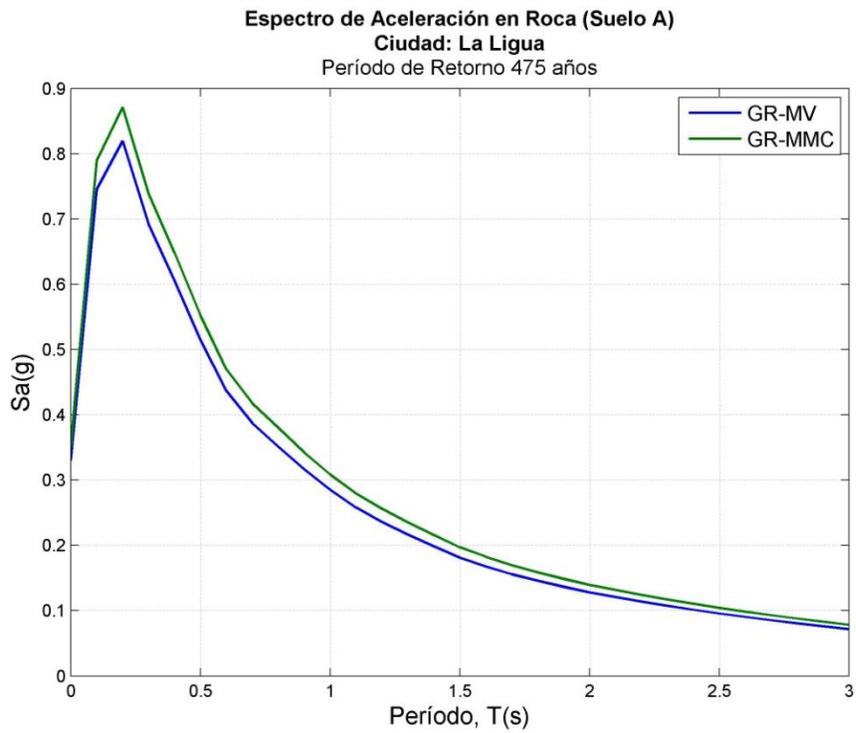


Figura B 283: Espectro de Aceleración de La Ligua; Período de Retorno 475 años

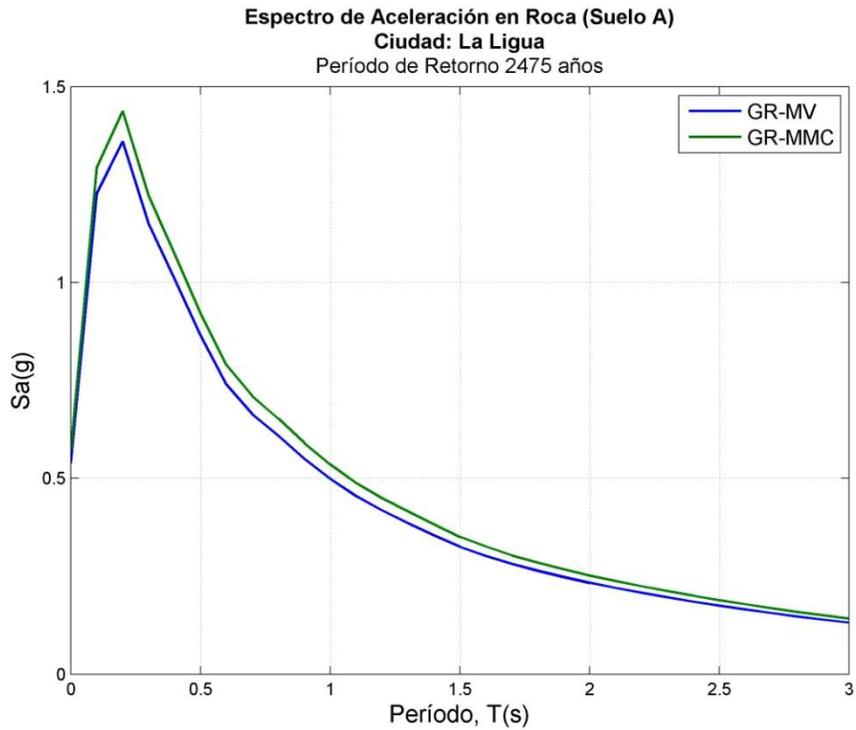


Figura B 284: Espectro de Aceleración de La Ligua; Período de Retorno 2475 años

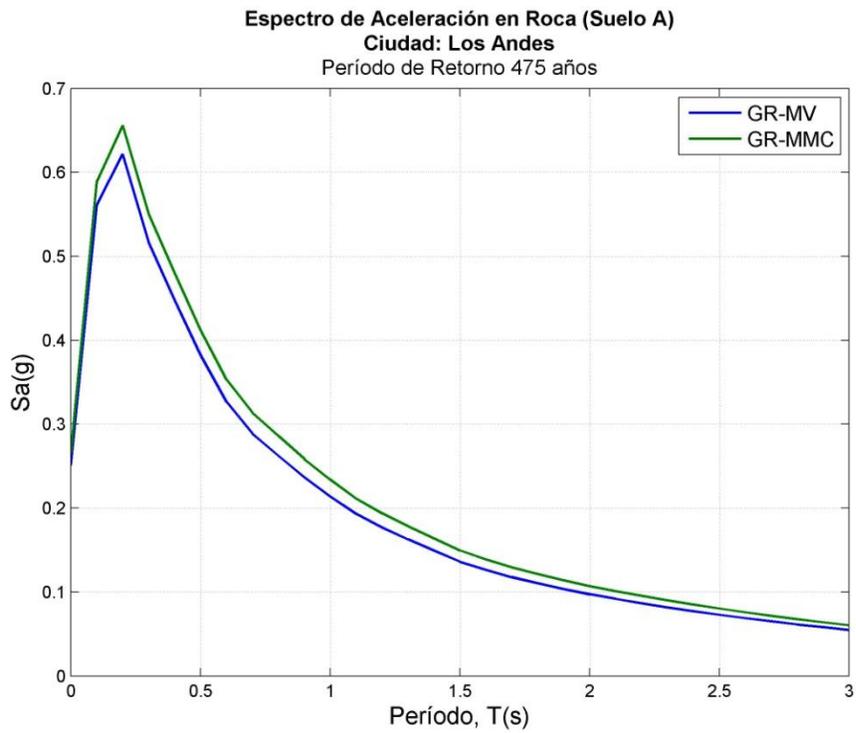


Figura B 285: Espectro de Aceleración de Los Andes; Período de Retorno 475 años

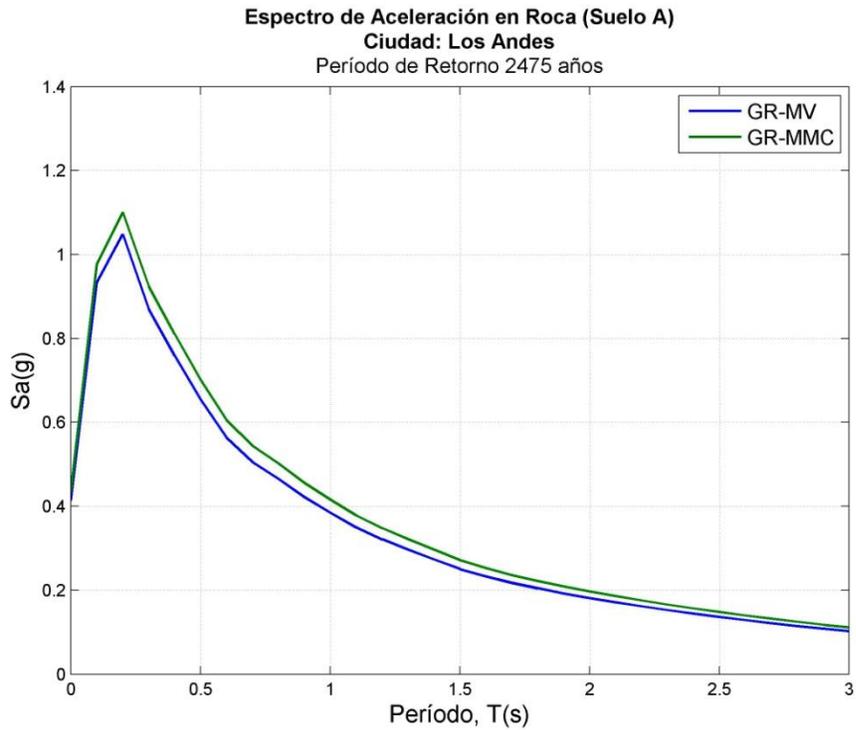


Figura B 286: Espectro de Aceleración de Los Andes; Período de Retorno 2475 años

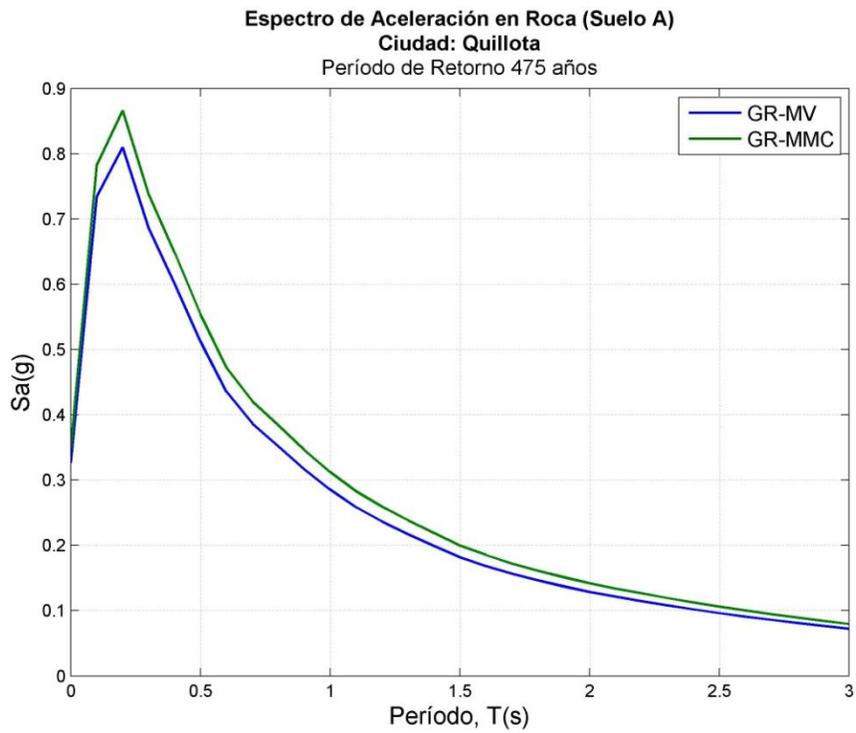


Figura B 287: Espectro de Aceleración de Quillota; Período de Retorno 475 años

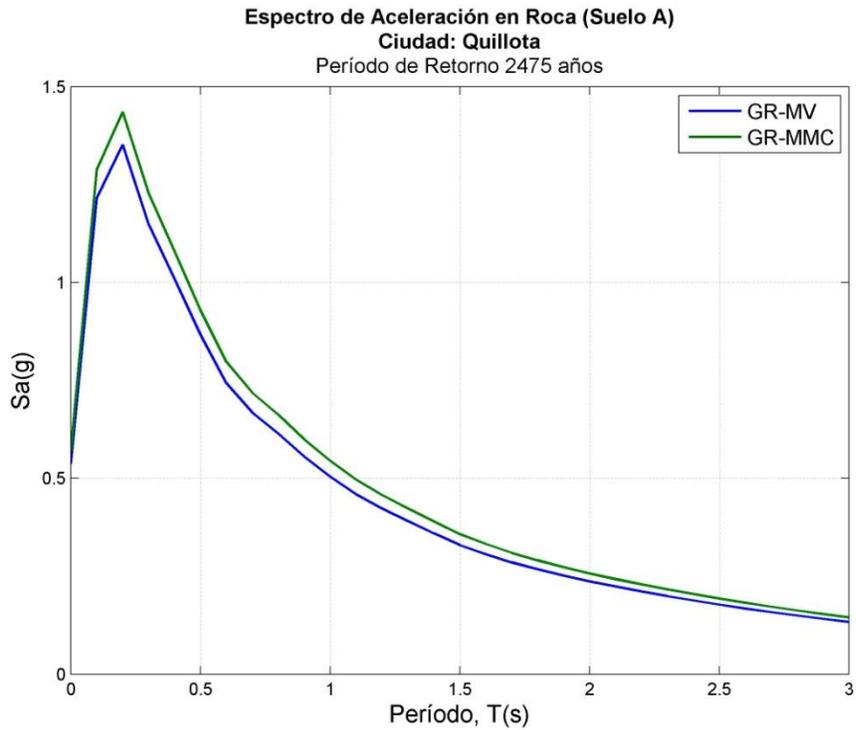


Figura B 288: Espectro de Aceleración de Quillota; Período de Retorno 2475 años

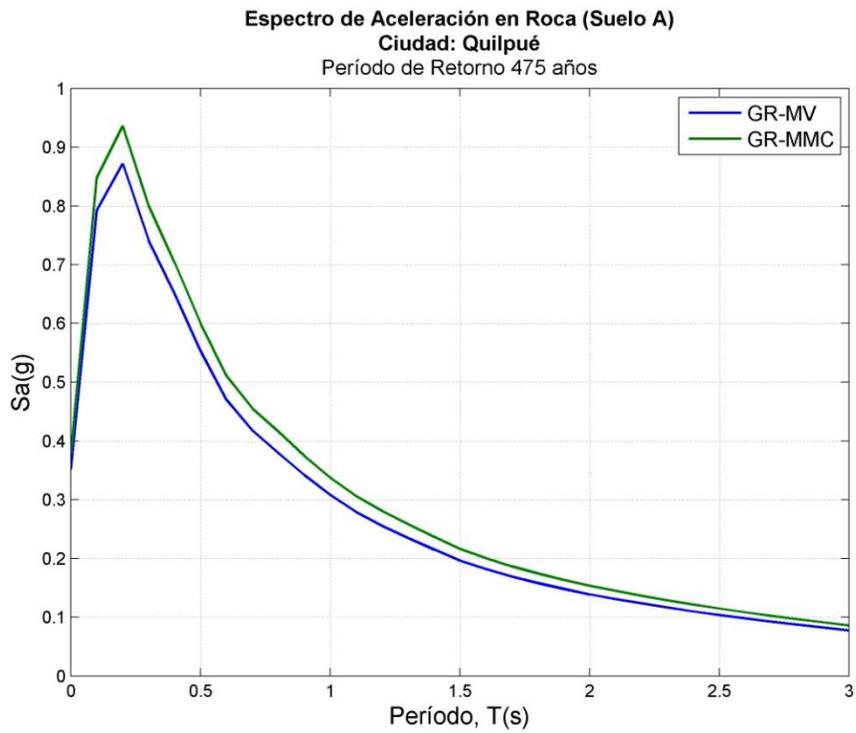


Figura B 289: Espectro de Aceleración de Quilpué; Período de Retorno 475 años

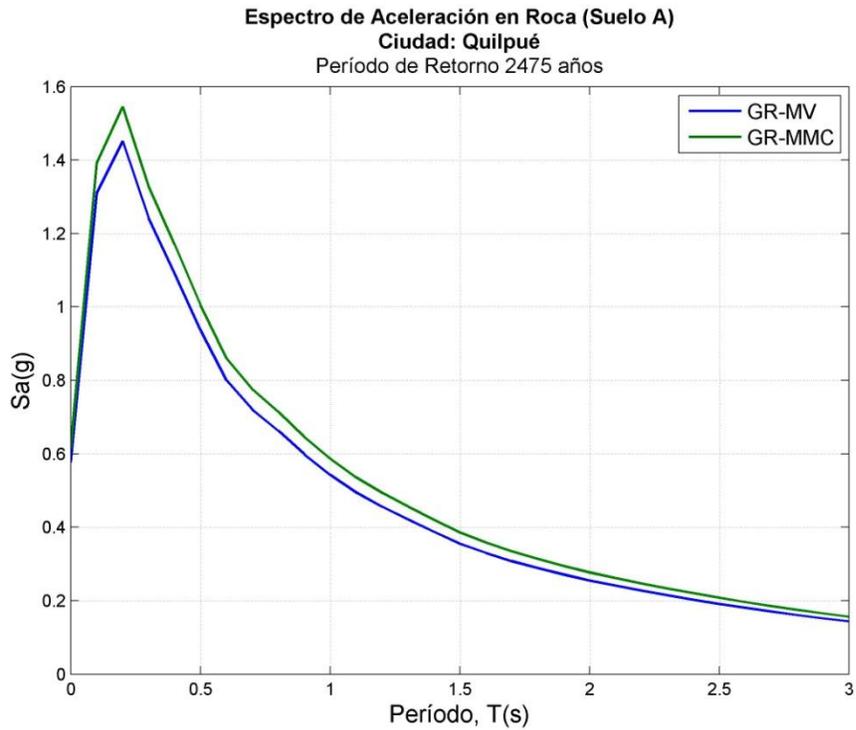


Figura B 290: Espectro de Aceleración de Quilpué; Período de Retorno 2475 años

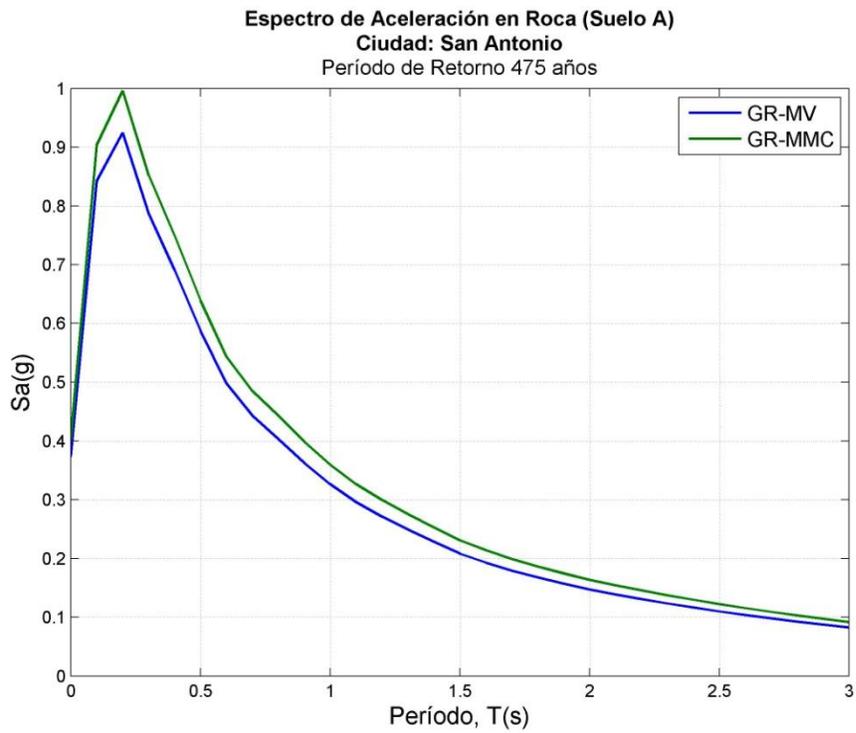


Figura B 291: Espectro de Aceleración de San Antonio; Período de Retorno 475 años

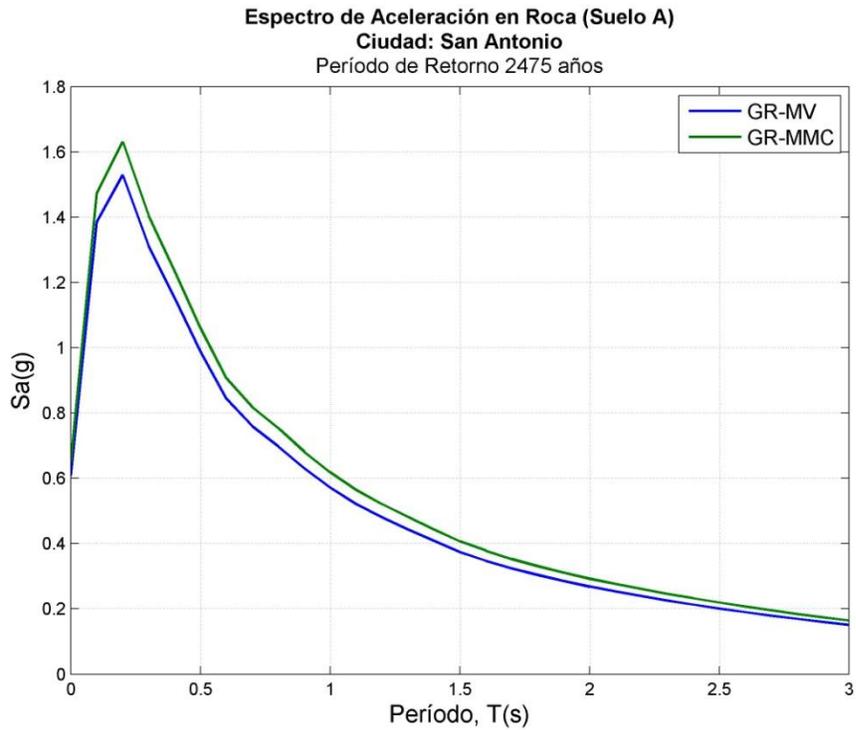


Figura B 292: Espectro de Aceleración de San Antonio; Período de Retorno 2475 años

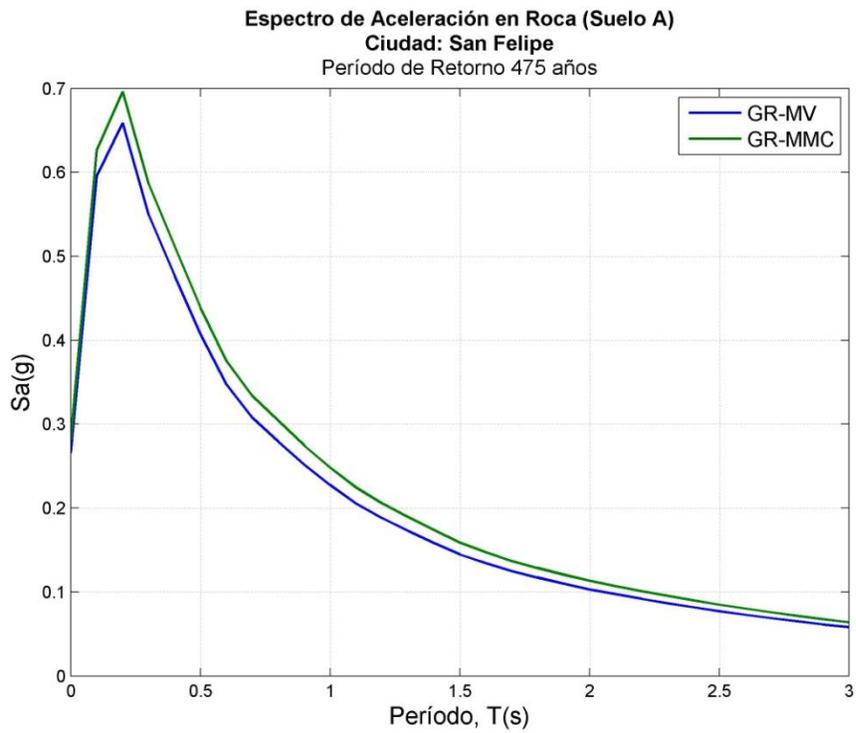


Figura B 293: Espectro de Aceleración de San Felipe; Período de Retorno 475 años

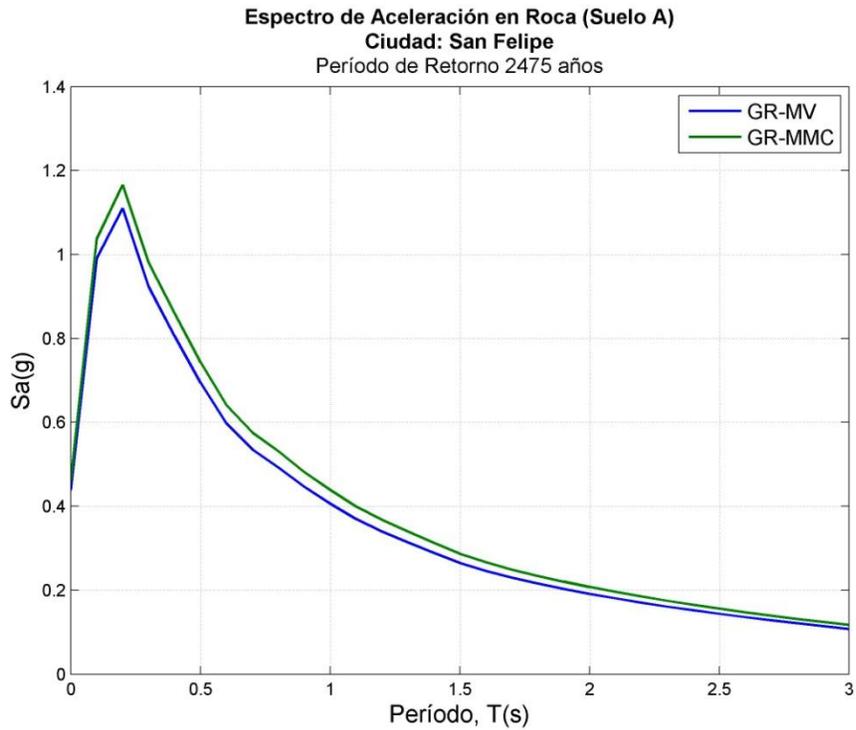


Figura B 294: Espectro de Aceleración de San Felipe; Período de Retorno 2475 años

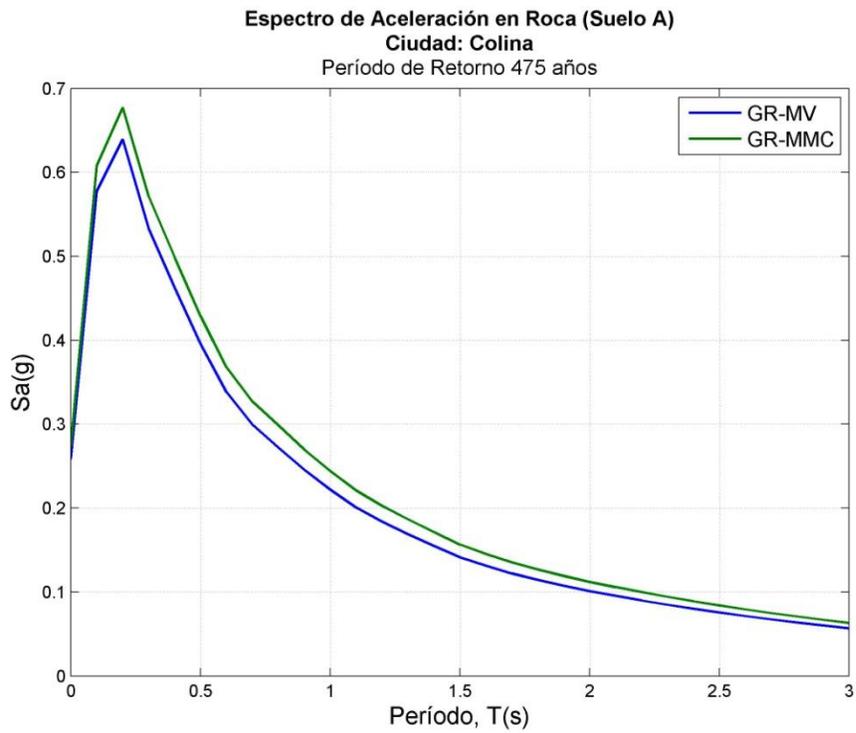


Figura B 295: Espectro de Aceleración de Colina; Período de Retorno 475 años

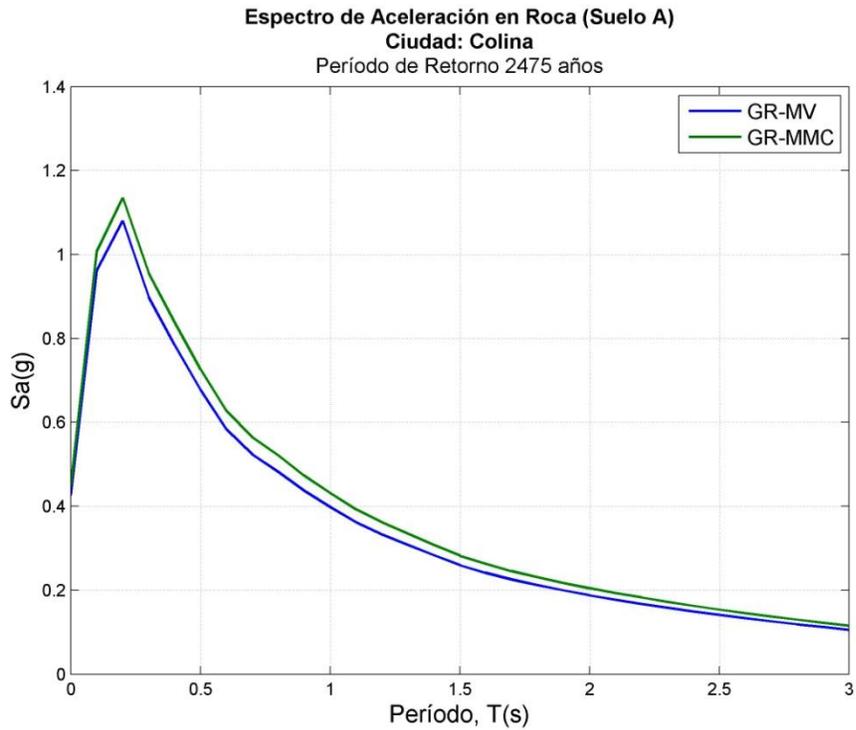


Figura B 296: Espectro de Aceleración de Colina; Período de Retorno 2475 años

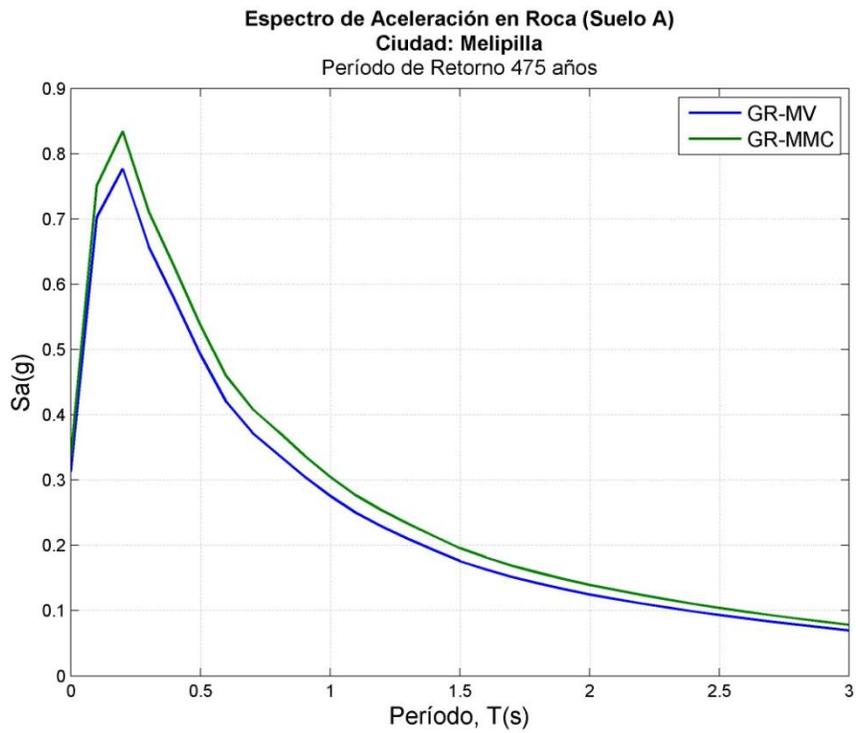


Figura B 297: Espectro de Aceleración de Melipilla; Período de Retorno 475 años

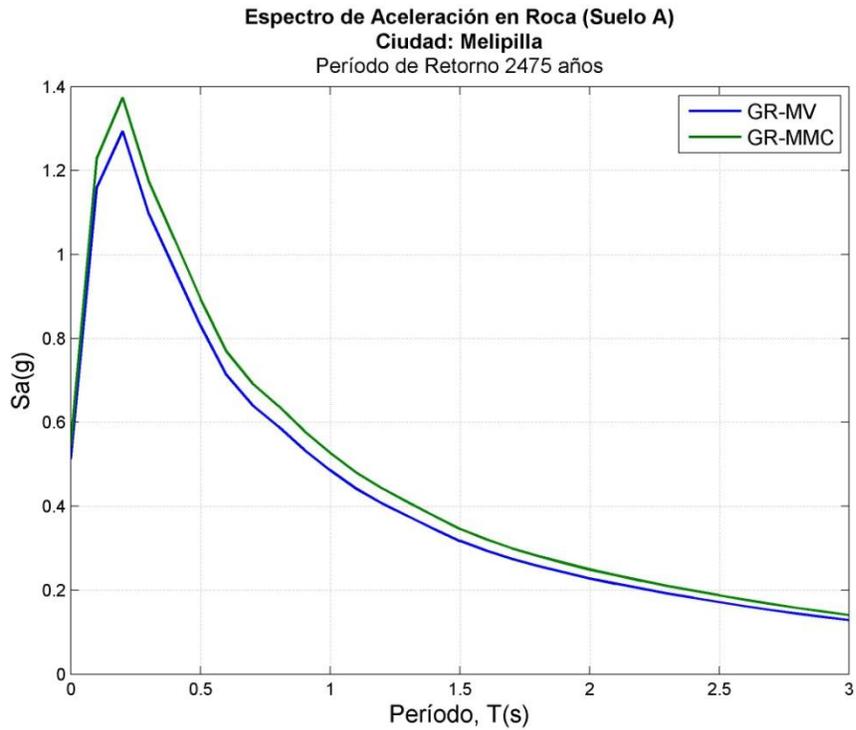


Figura B 298: Espectro de Aceleración de Melipilla; Período de Retorno 2475 años

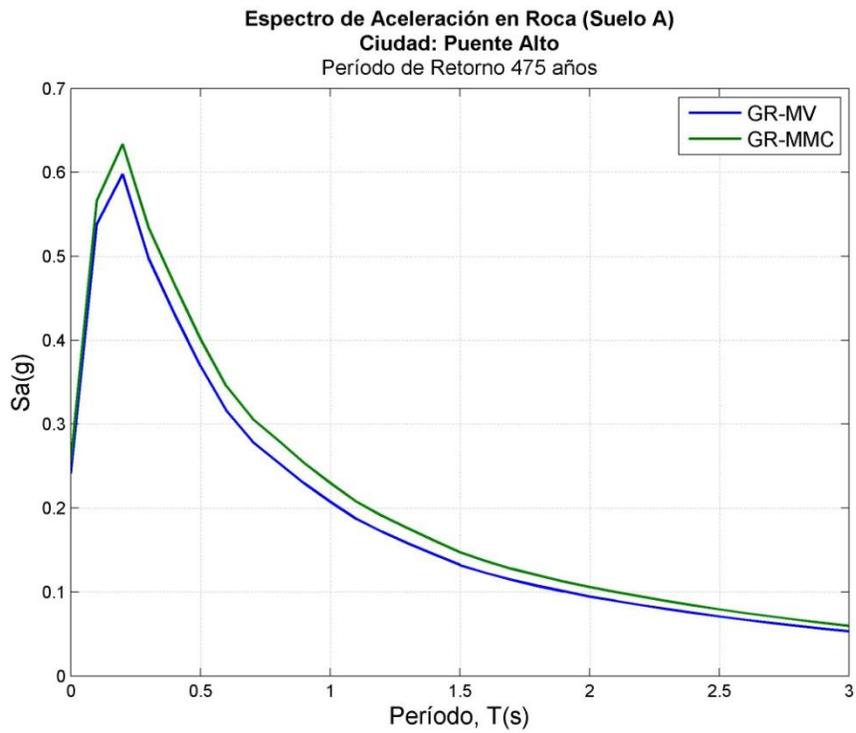


Figura B 299: Espectro de Aceleración de Puente Alto; Período de Retorno 475 años

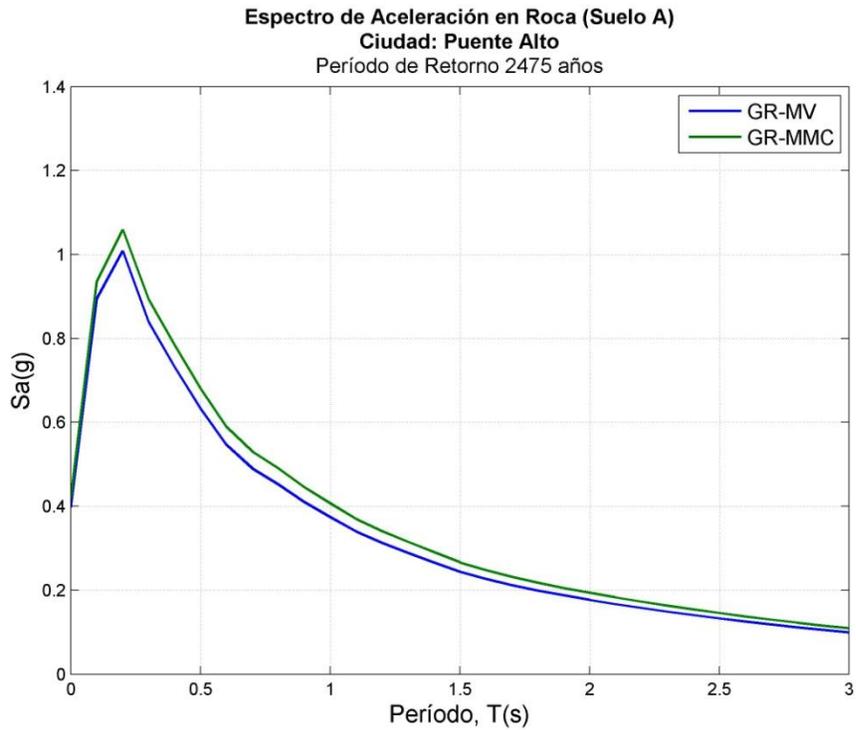


Figura B 300: Espectro de Aceleración de Puente Alto; Período de Retorno 2475 años

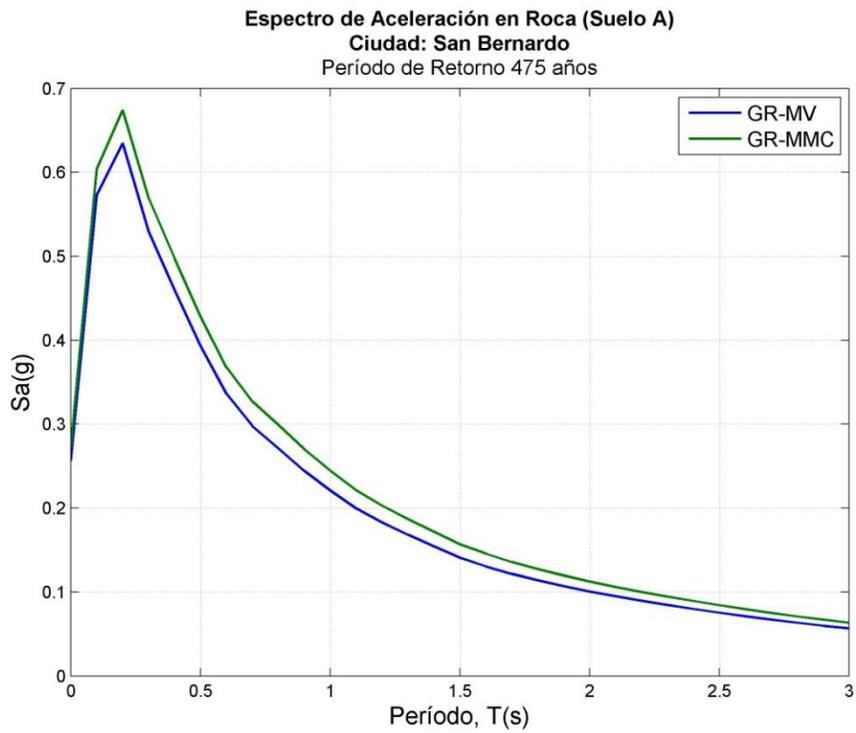


Figura B 301: Espectro de Aceleración de San Bernardo; Período de Retorno 475 años

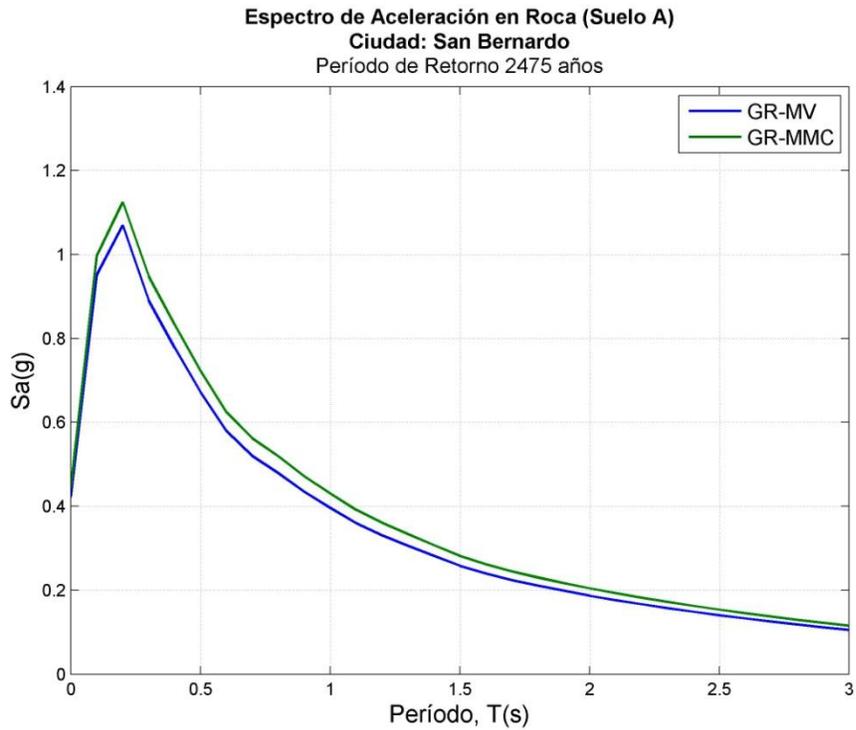


Figura B 302: Espectro de Aceleración de San Bernardo; Período de Retorno 2475 años

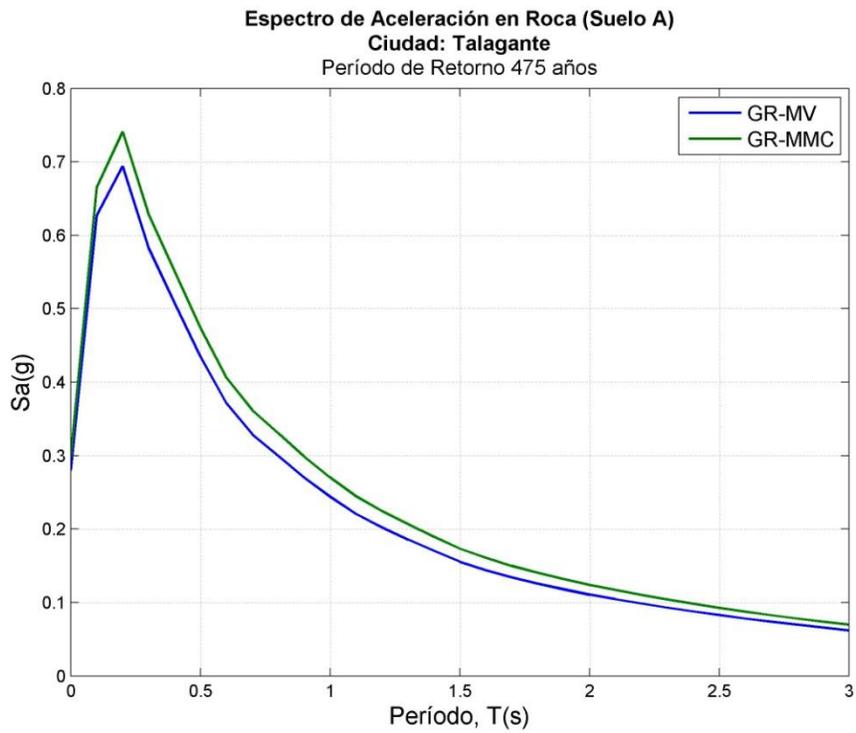


Figura B 303: Espectro de Aceleración de Talagante; Período de Retorno 475 años

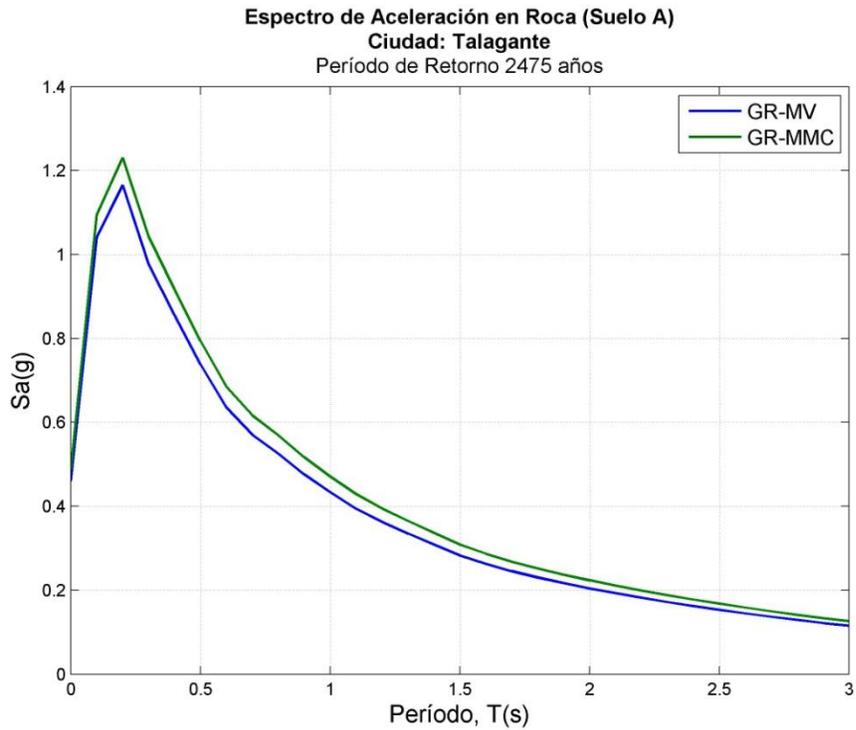


Figura B 304: Espectro de Aceleración de Talagante; Período de Retorno 2475 años

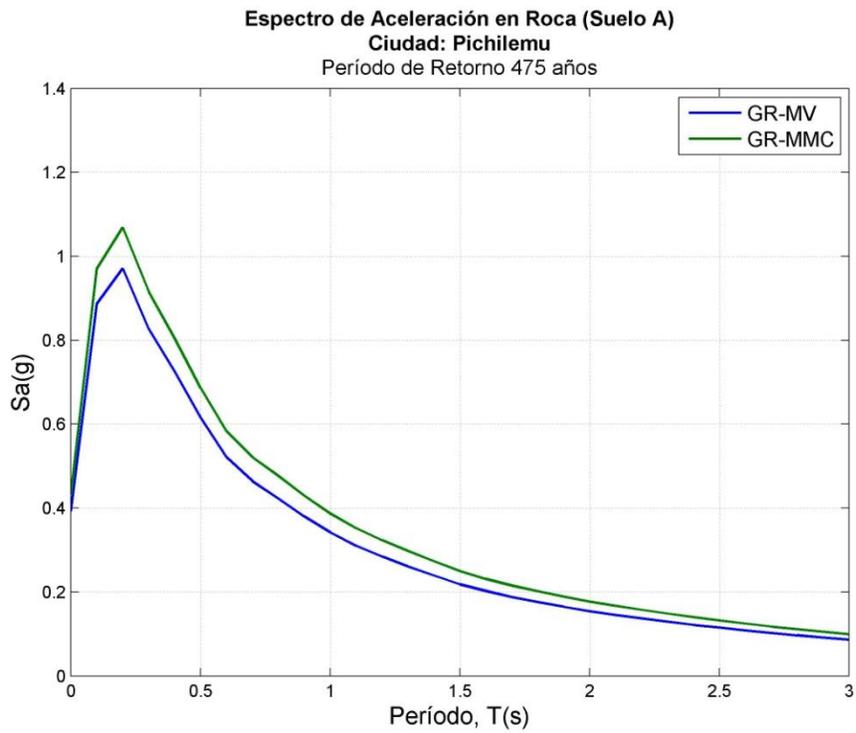


Figura B 305: Espectro de Aceleración de Pichilemu; Período de Retorno 475 años

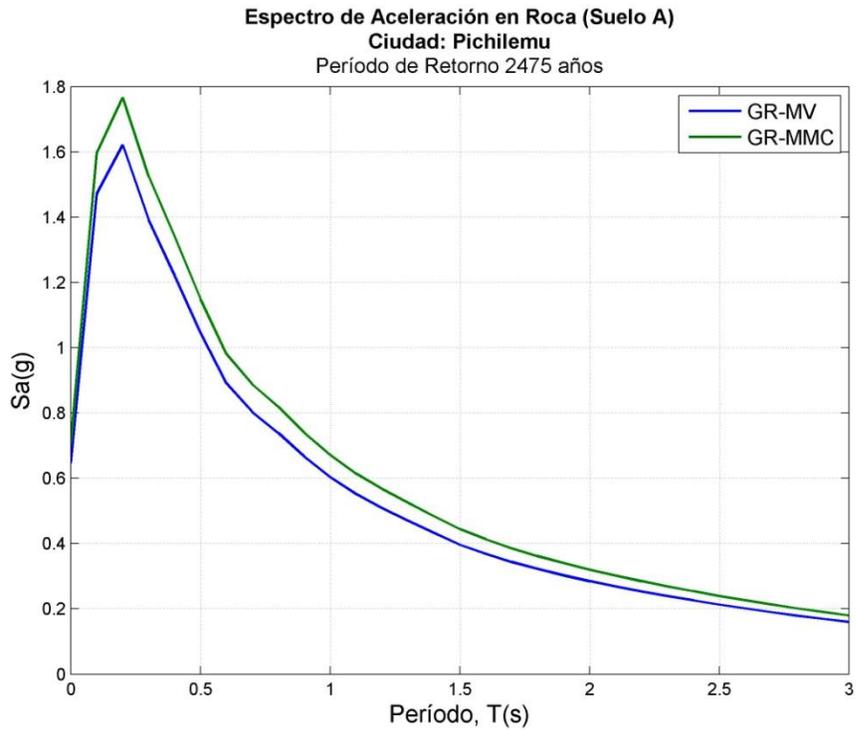


Figura B 306: Espectro de Aceleración de Pichilemu; Período de Retorno 2475 años

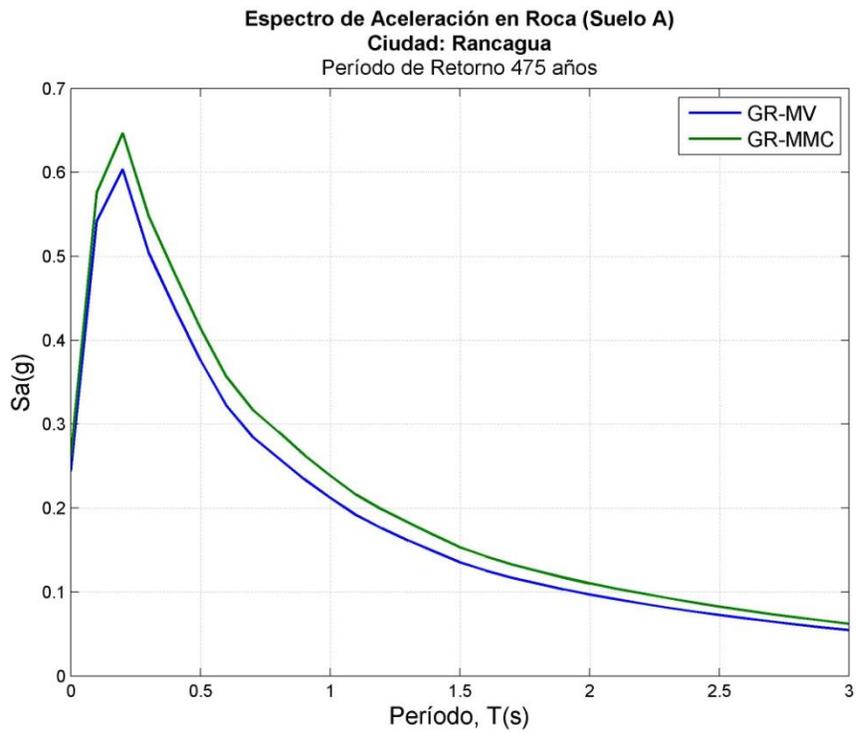


Figura B 307: Espectro de Aceleración de Rancagua; Período de Retorno 475 años

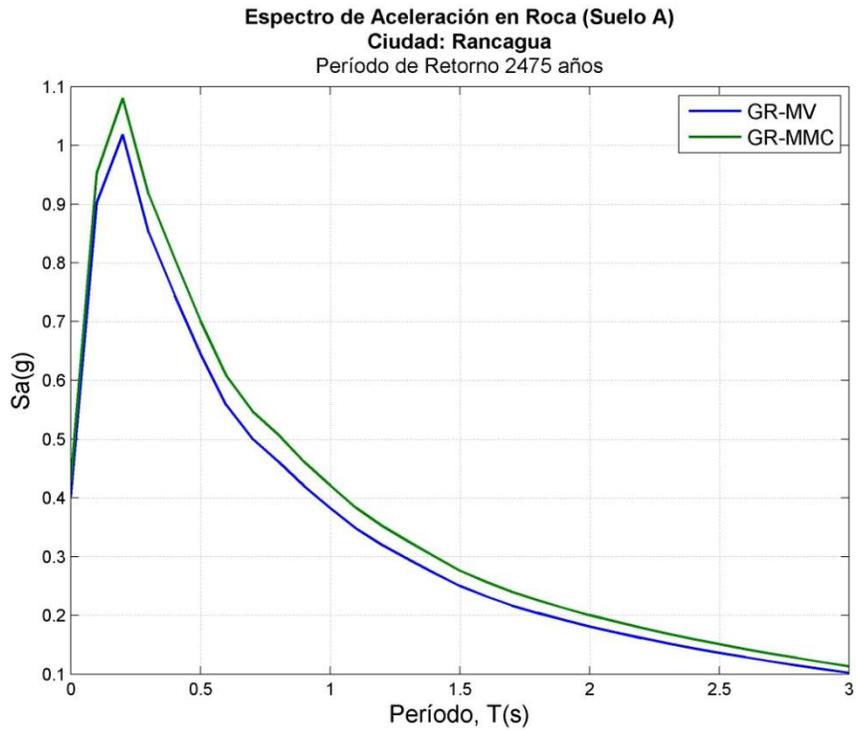


Figura B 308: Espectro de Aceleración de Rancagua; Período de Retorno 2475 años

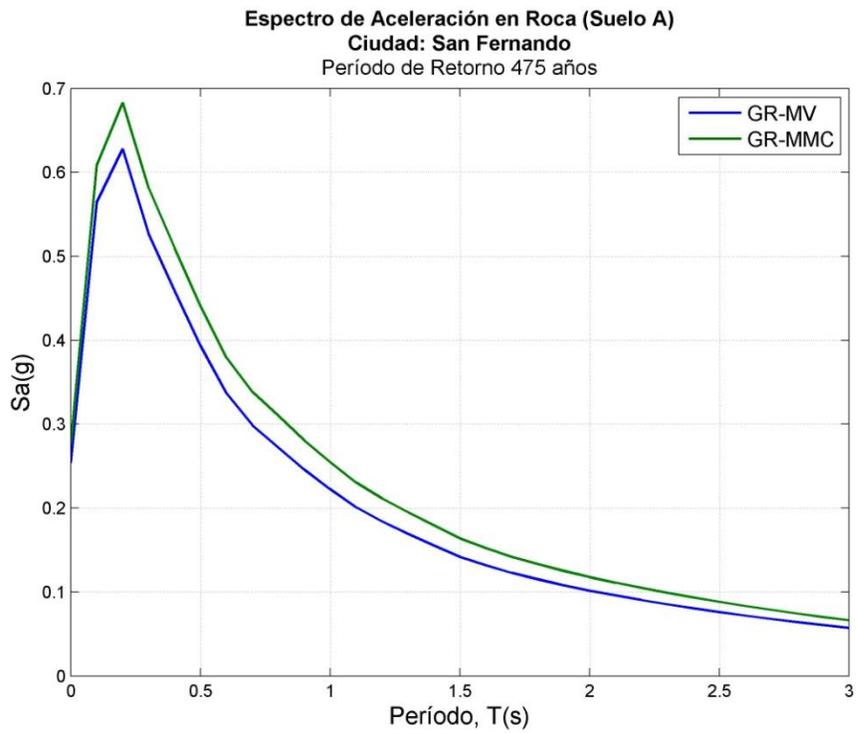


Figura B 309: Espectro de Aceleración de San Fernando; Período de Retorno 475 años

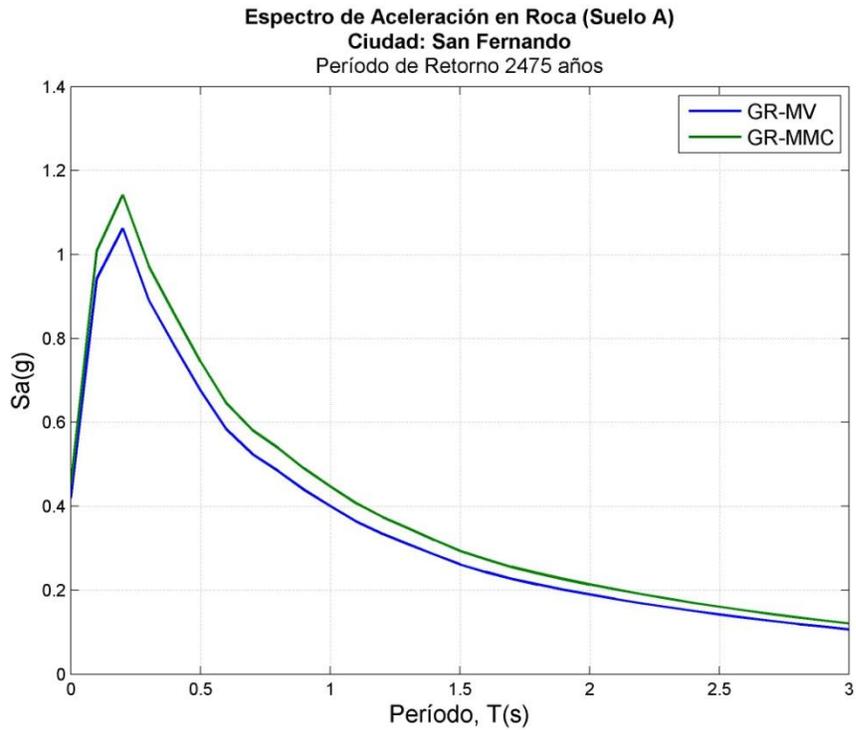


Figura B 310: Espectro de Aceleración de San Fernando; Período de Retorno 2475 años

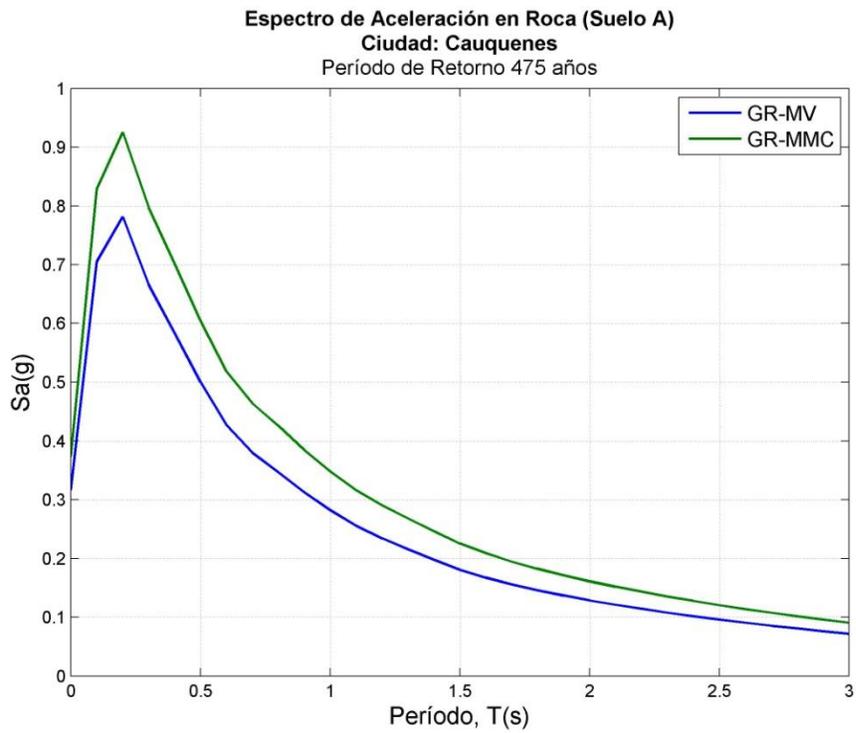


Figura B 311: Espectro de Aceleración de Cauquenes; Período de Retorno 475 años

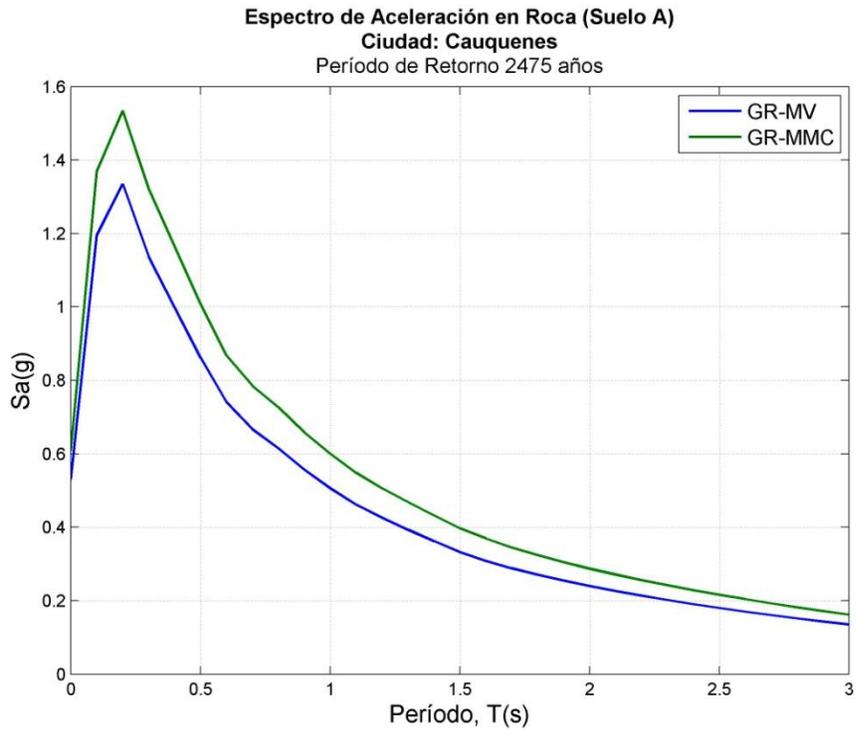


Figura B 312: Espectro de Aceleración de Cauquenes; Período de Retorno 2475 años

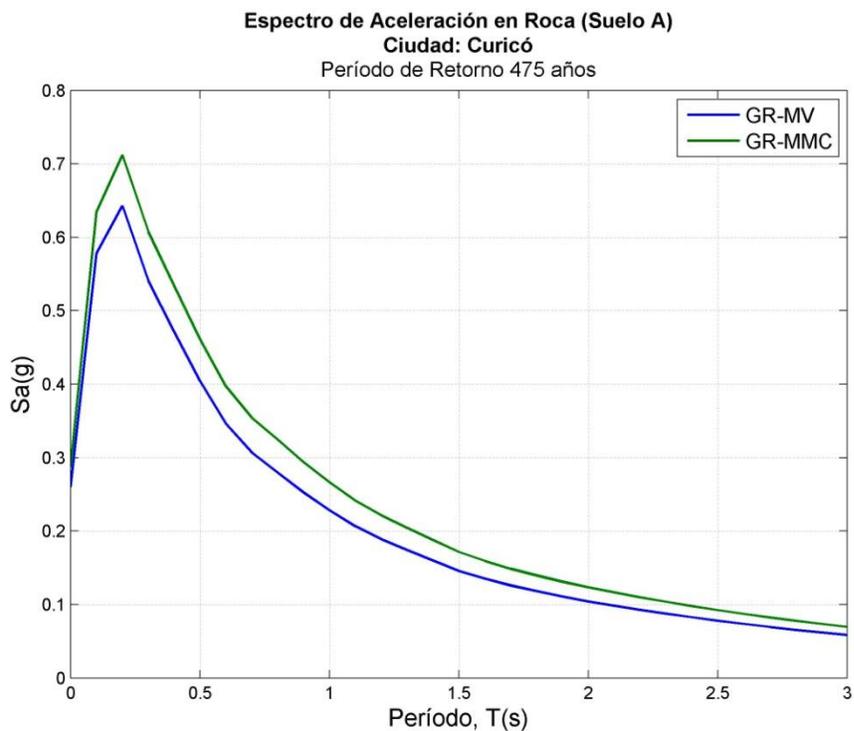


Figura B 313: Espectro de Aceleración de Curicó; Período de Retorno 475 años

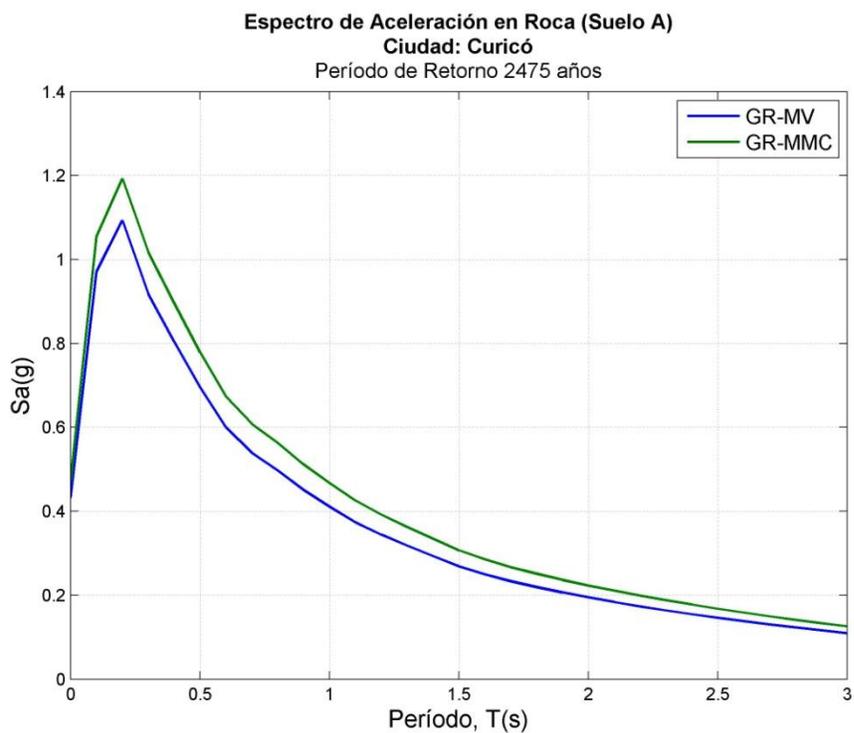


Figura B 314: Espectro de Aceleración de Curicó; Período de Retorno 2475 años

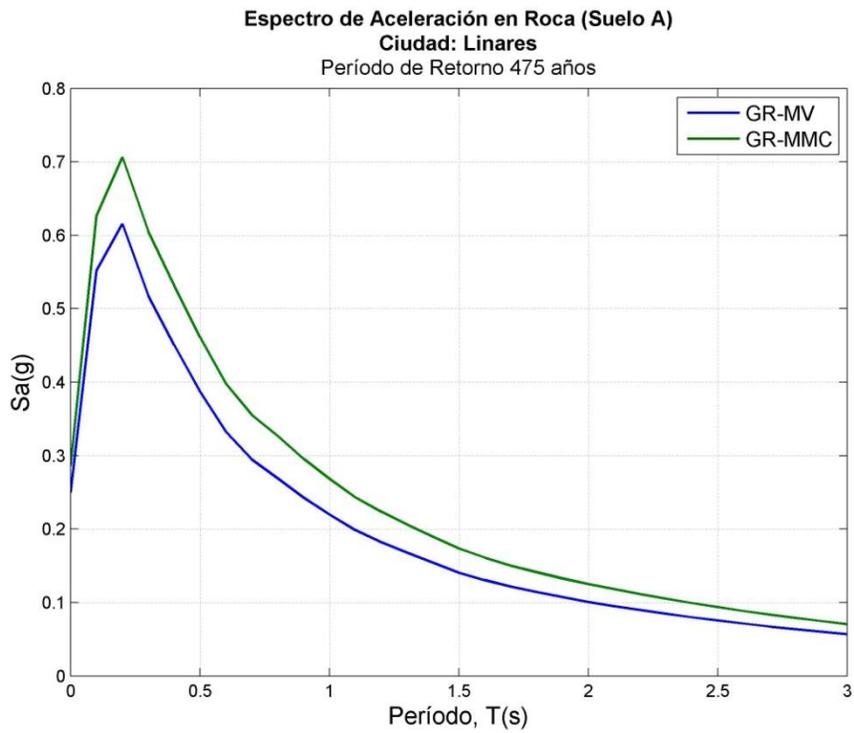


Figura B 315: Espectro de Aceleración de Linares; Período de Retorno 475 años

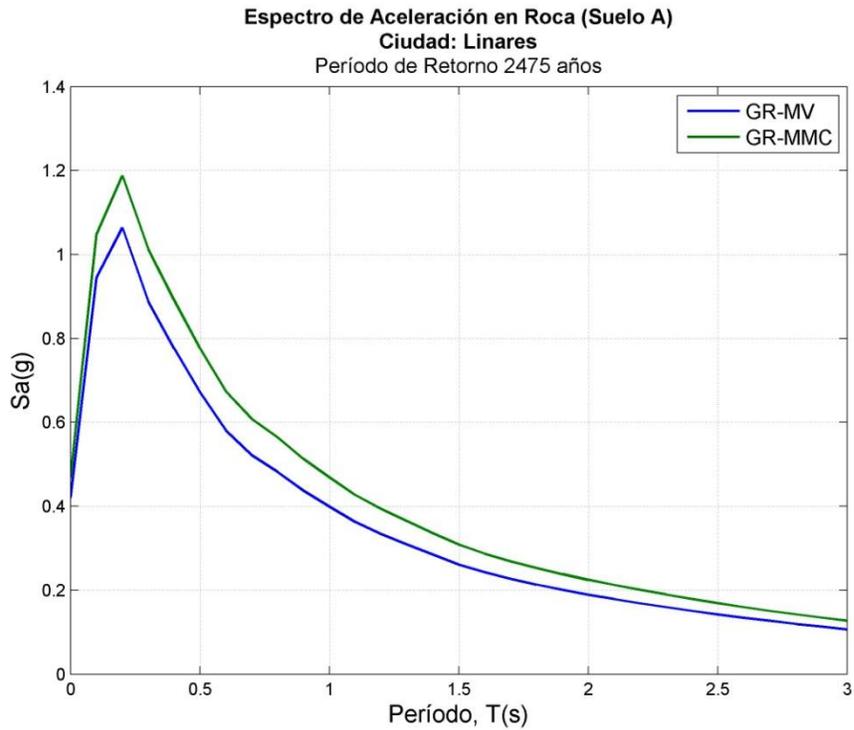


Figura B 316: Espectro de Aceleración de Linares; Período de Retorno 2475 años

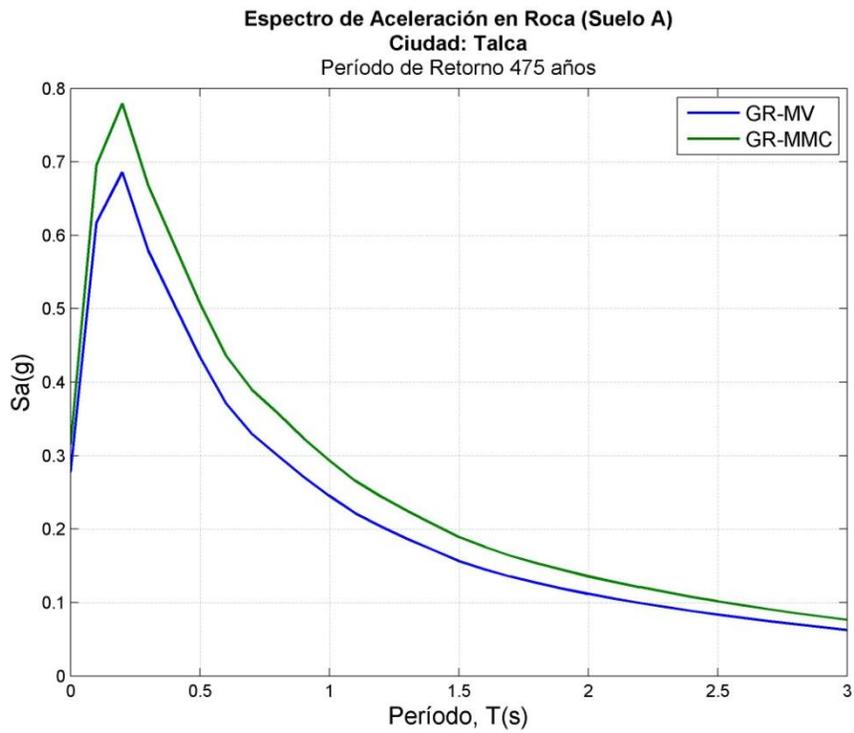


Figura B 317: Espectro de Aceleración de Talca; Período de Retorno 475 años

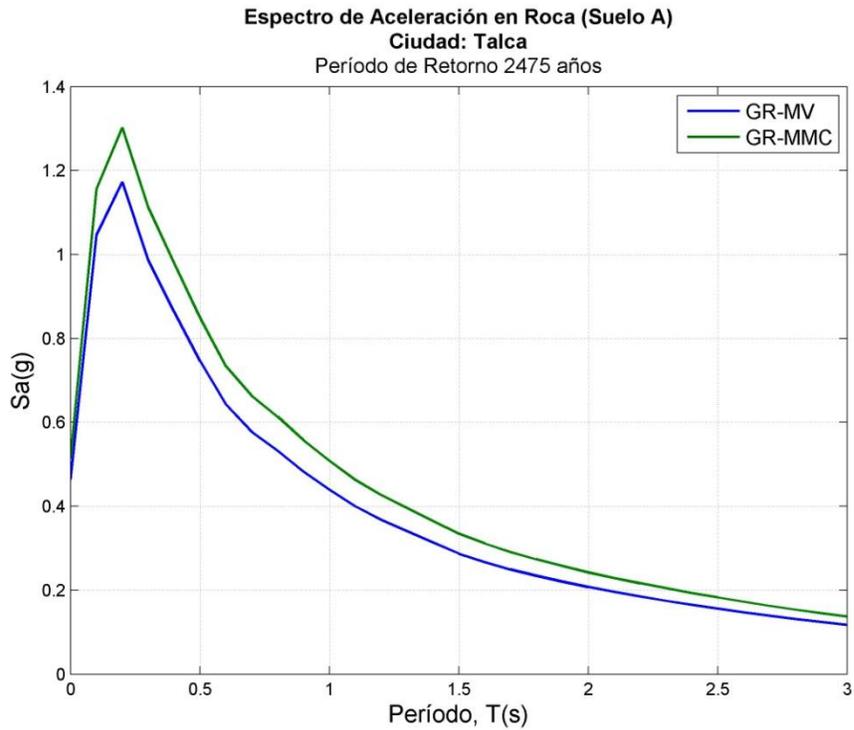


Figura B 318: Espectro de Aceleración de Talca; Período de Retorno 2475 años

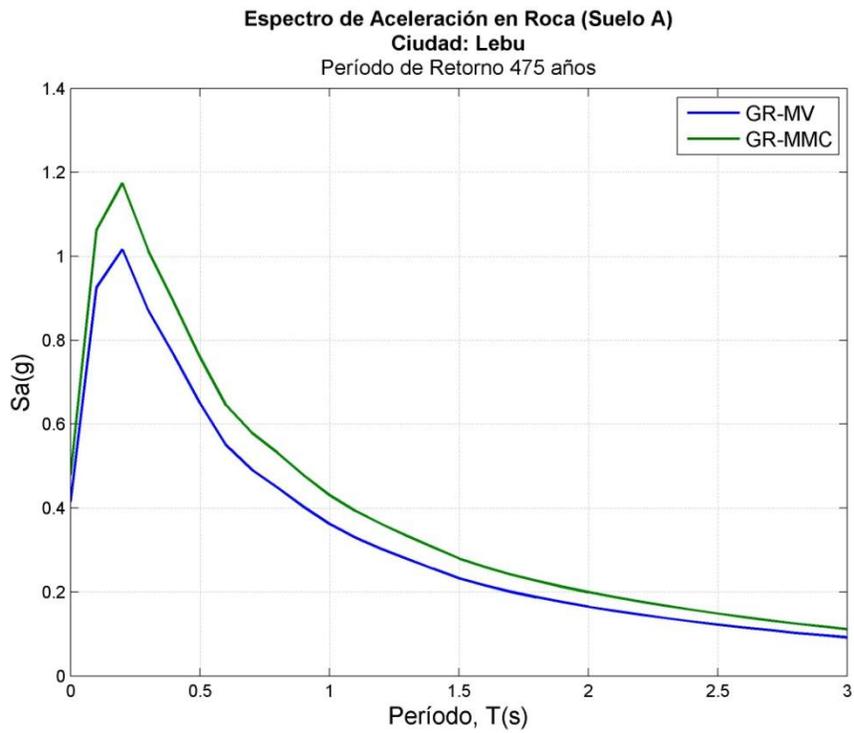


Figura B 319: Espectro de Aceleración de Lebu; Período de Retorno 475 años

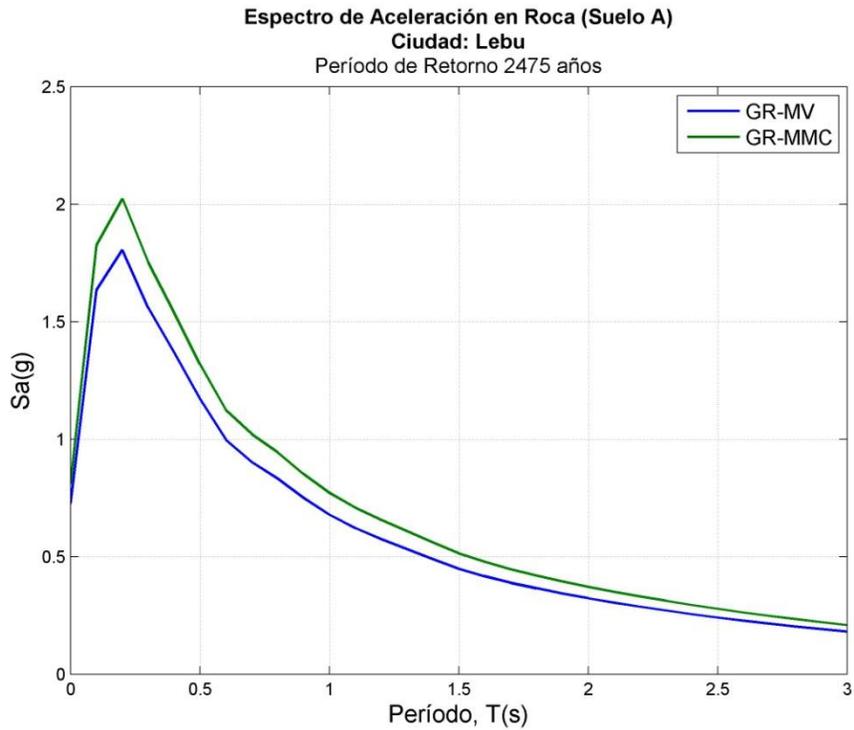


Figura B 320: Espectro de Aceleración de Lebu; Período de Retorno 2475 años

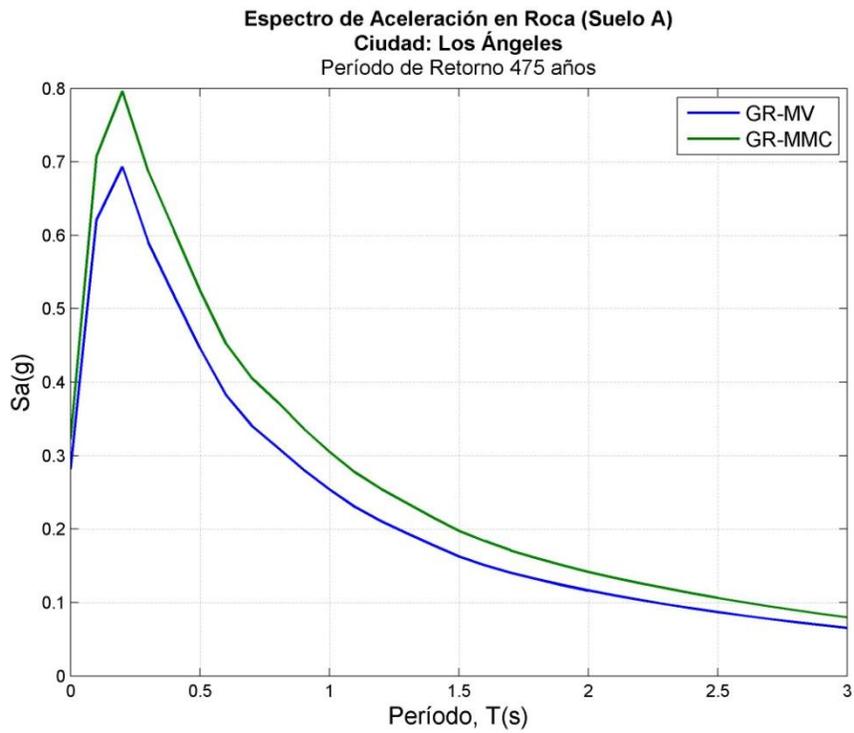


Figura B 321: Espectro de Aceleración de Los Ángeles; Período de Retorno 475 años

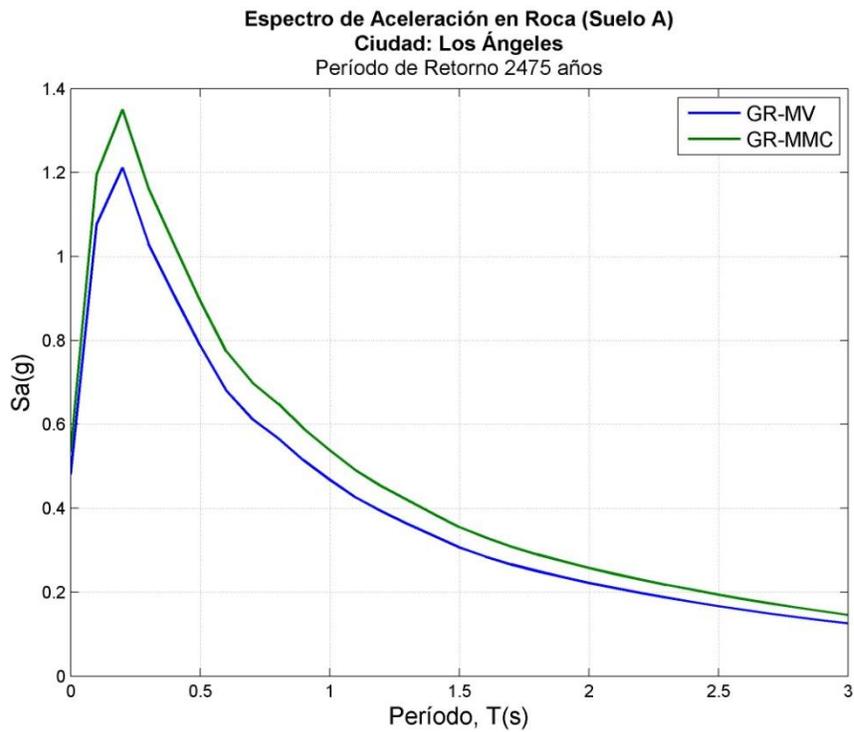


Figura B 322: Espectro de Aceleración de Los Ángeles; Período de Retorno 2475 años

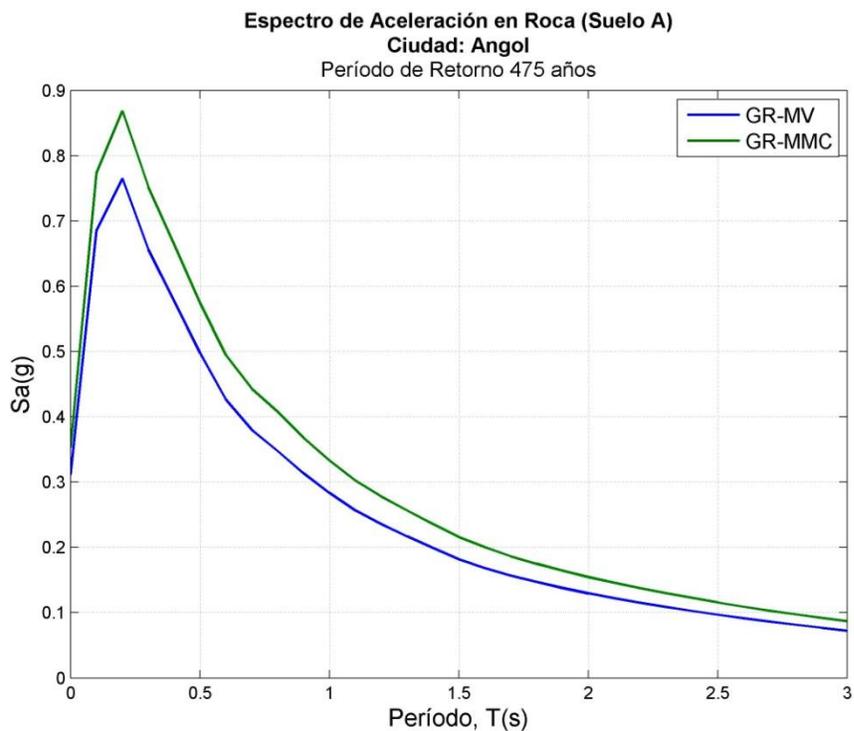


Figura B 323: Espectro de Aceleración de Angol; Período de Retorno 475 años

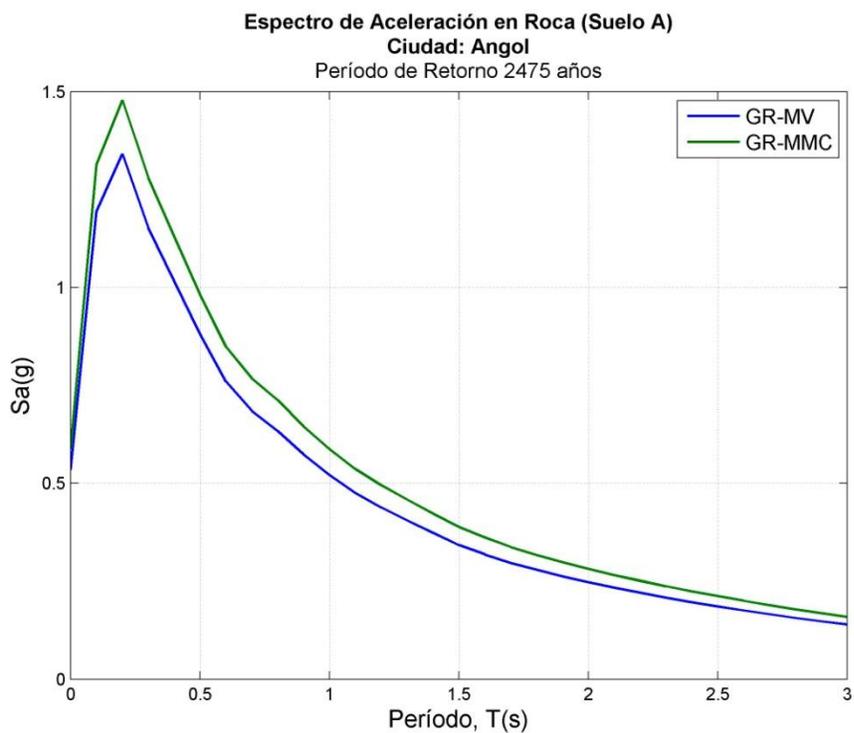


Figura B 324: Espectro de Aceleración de Angol; Período de Retorno 2475 años

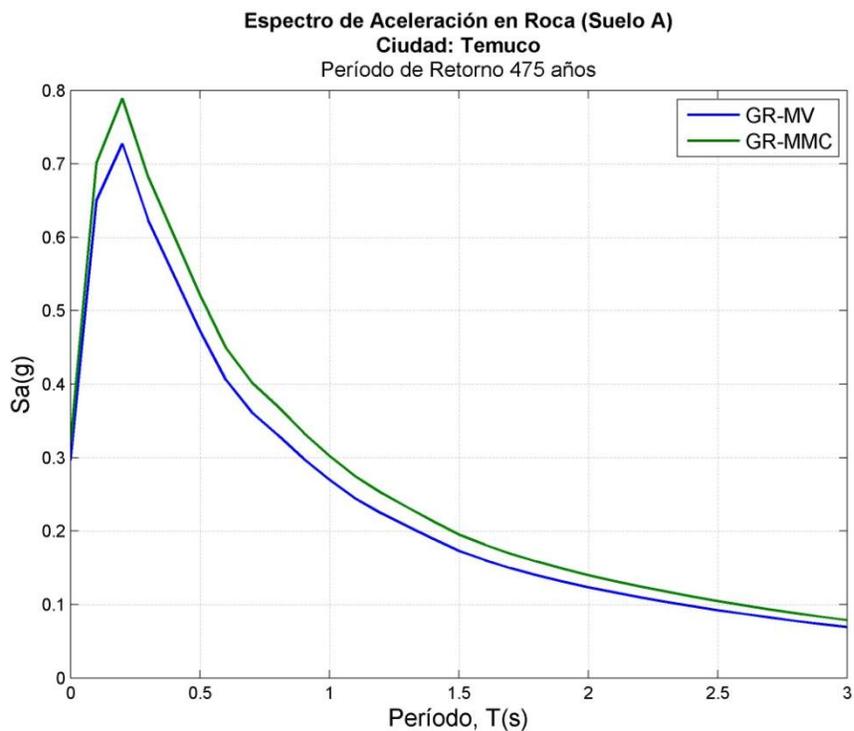


Figura B 325: Espectro de Aceleración de Temuco; Período de Retorno 475 años

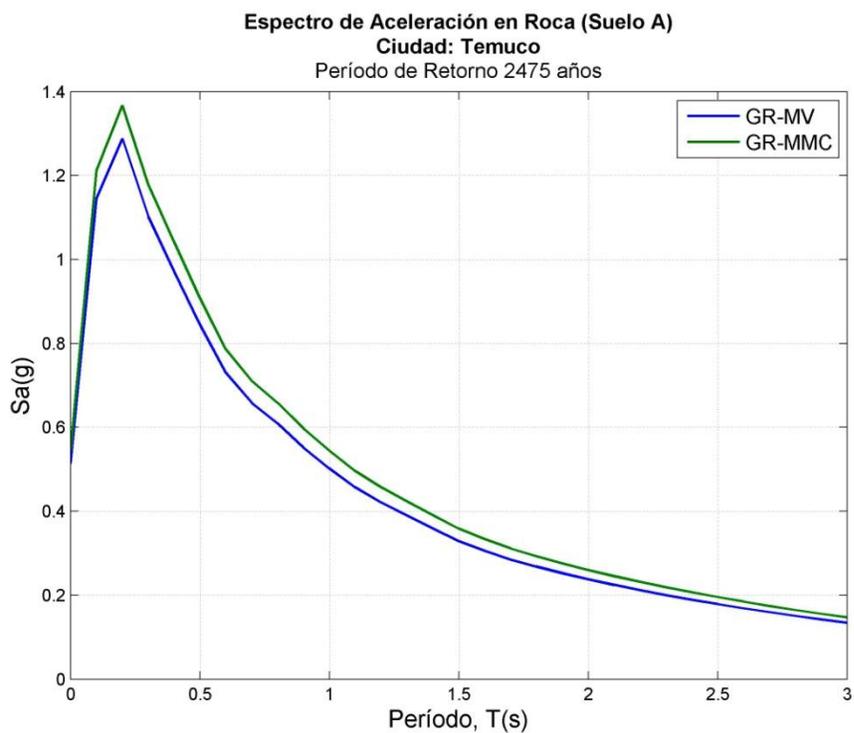


Figura B 326: Espectro de Aceleración de Temuco; Período de Retorno 2475 años

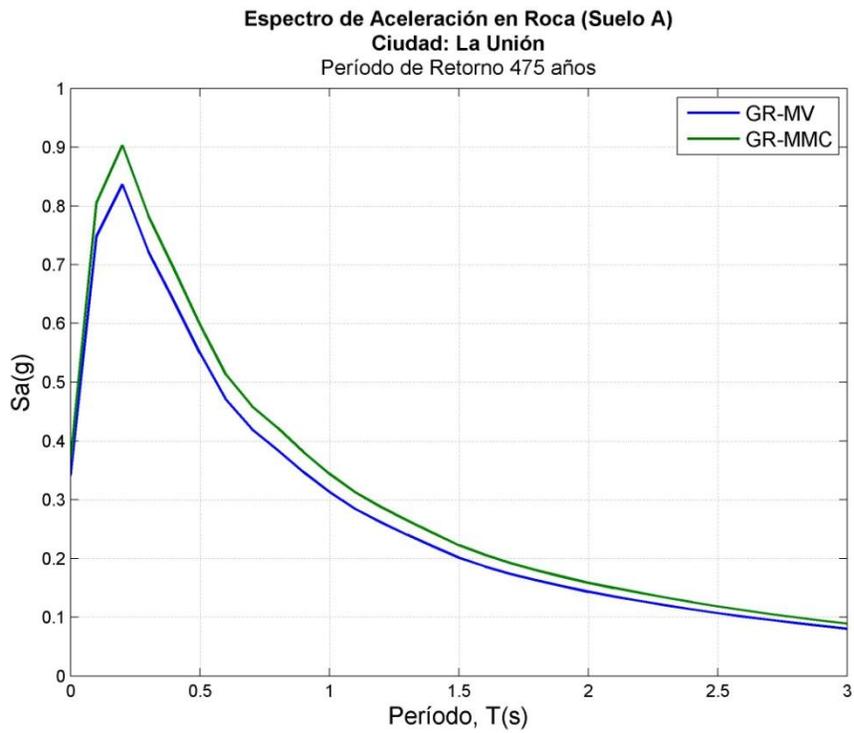


Figura B 327: Espectro de Aceleración de La Unión; Período de Retorno 475 años

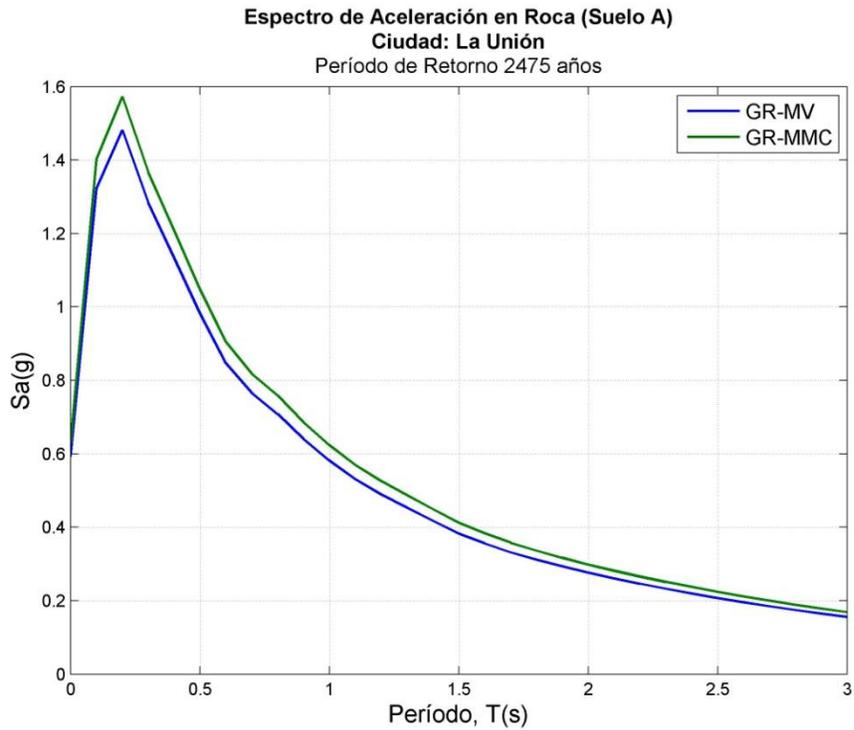


Figura B 328: Espectro de Aceleración de La Unión; Período de Retorno 2475 años

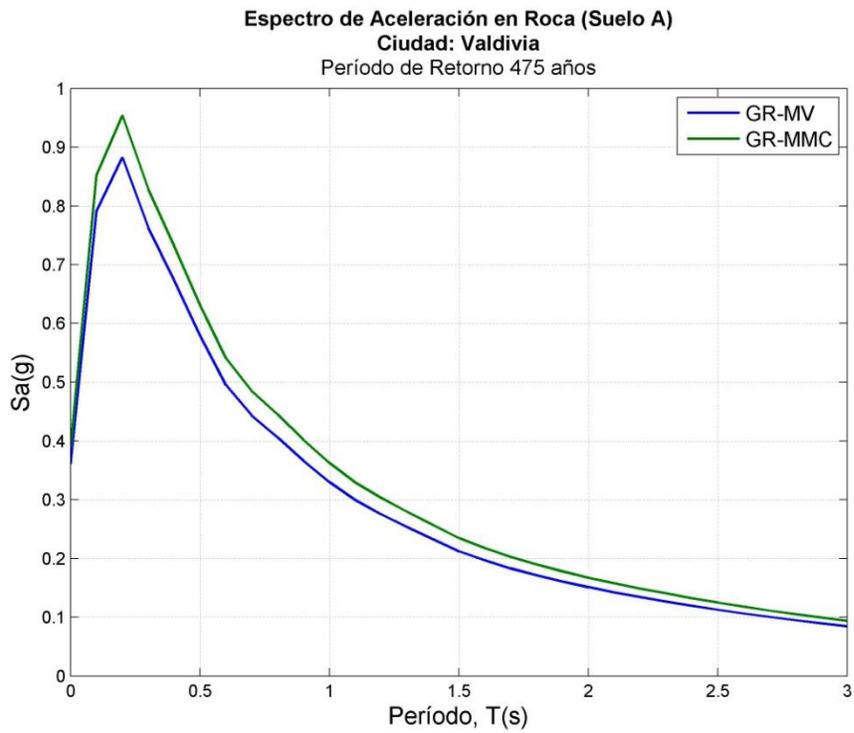


Figura B 329: Espectro de Aceleración de Valdivia; Período de Retorno 475 años

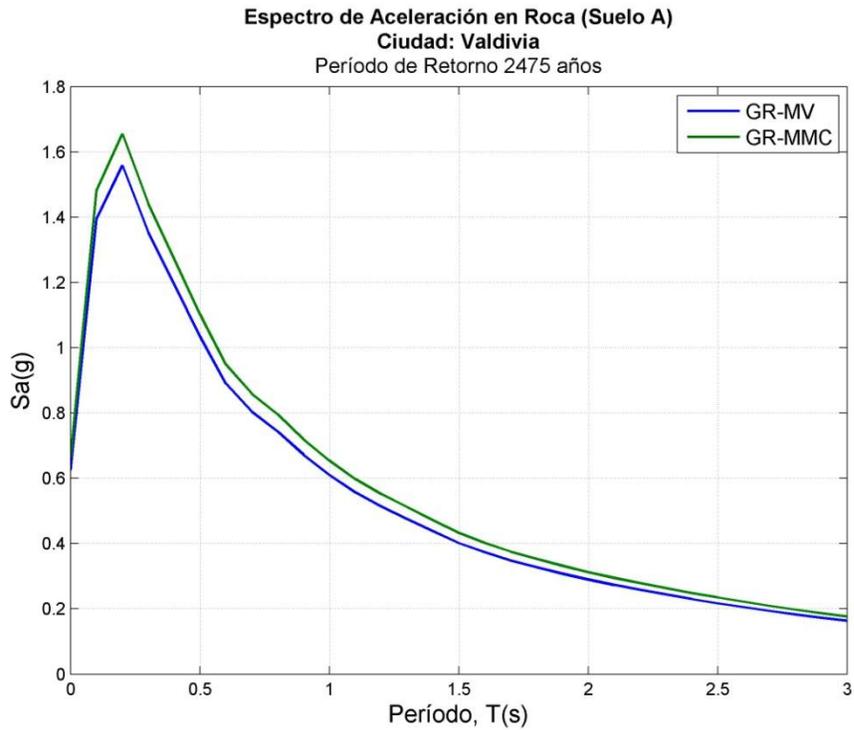


Figura B 330: Espectro de Aceleración de Valdivia; Período de Retorno 2475 años

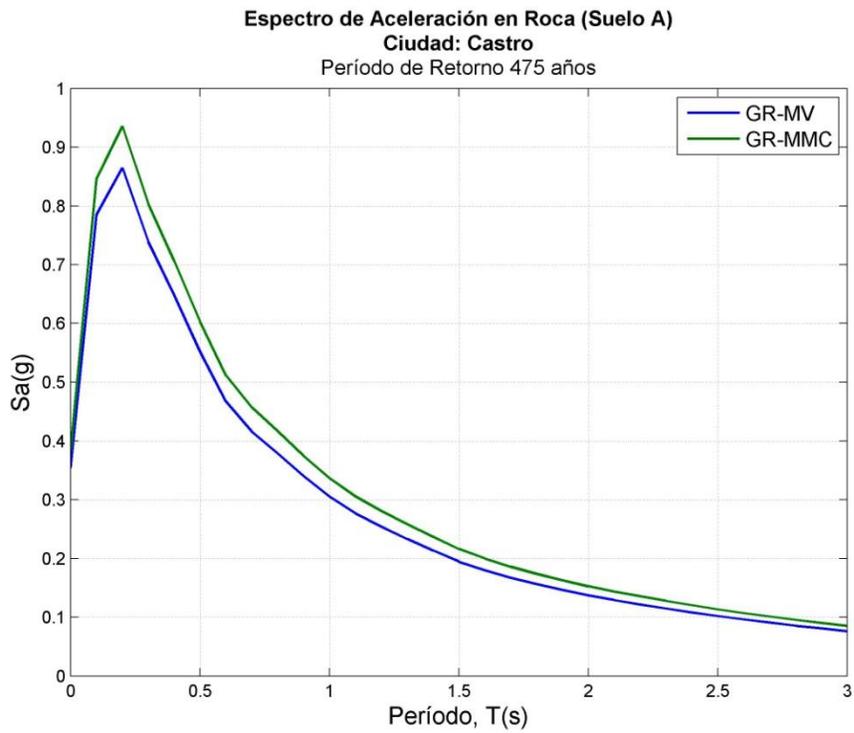


Figura B 331: Espectro de Aceleración de Castro; Período de Retorno 475 años

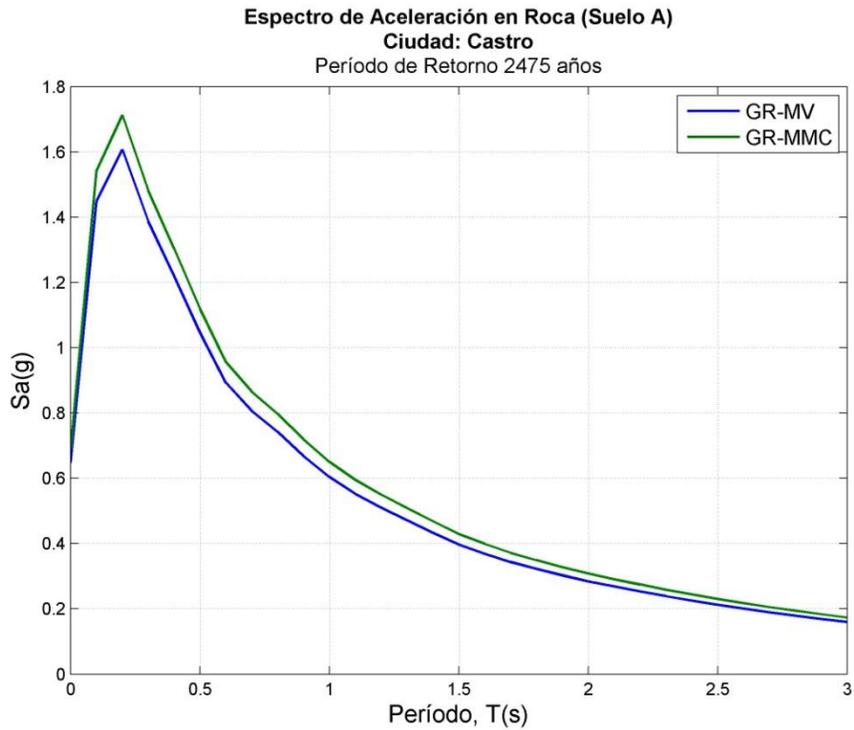


Figura B 332: Espectro de Aceleración de Castro; Período de Retorno 2475 años

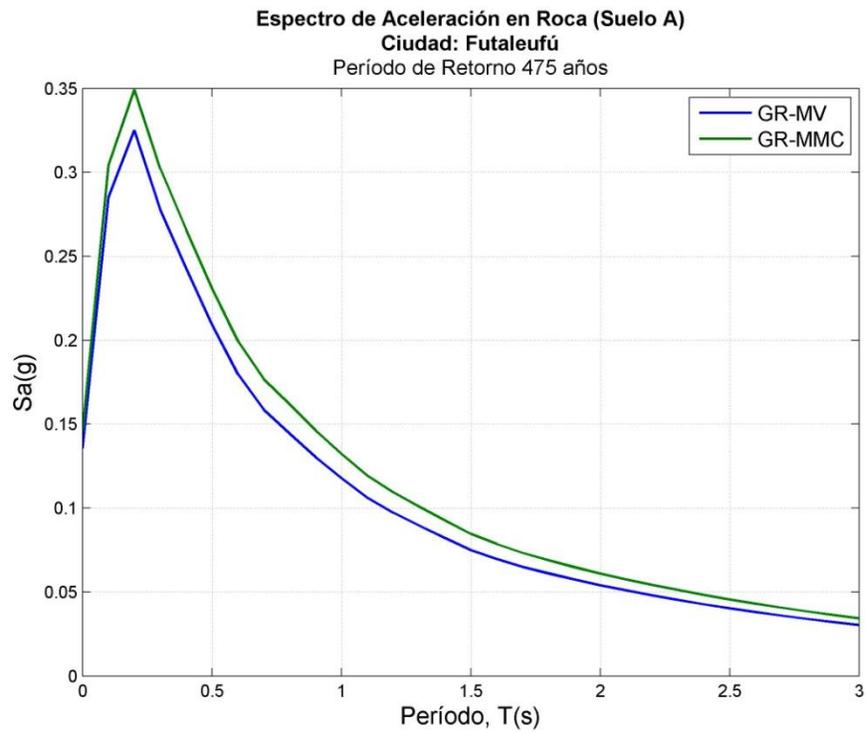


Figura B 333: Espectro de Aceleración de Futaleufú; Período de Retorno 475 años

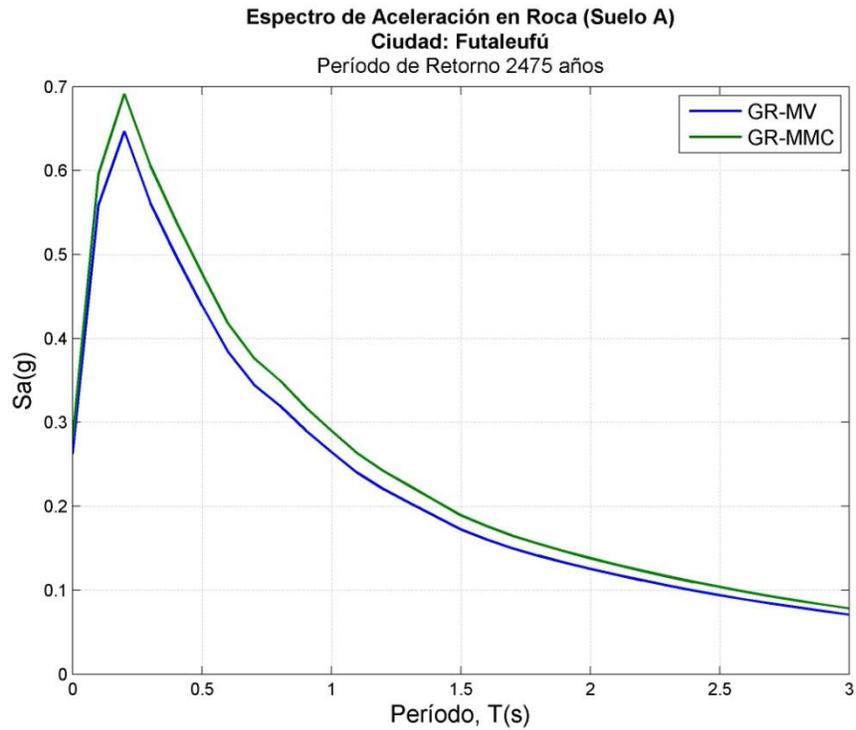


Figura B 334: Espectro de Aceleración de Futaleufú; Período de Retorno 2475 años

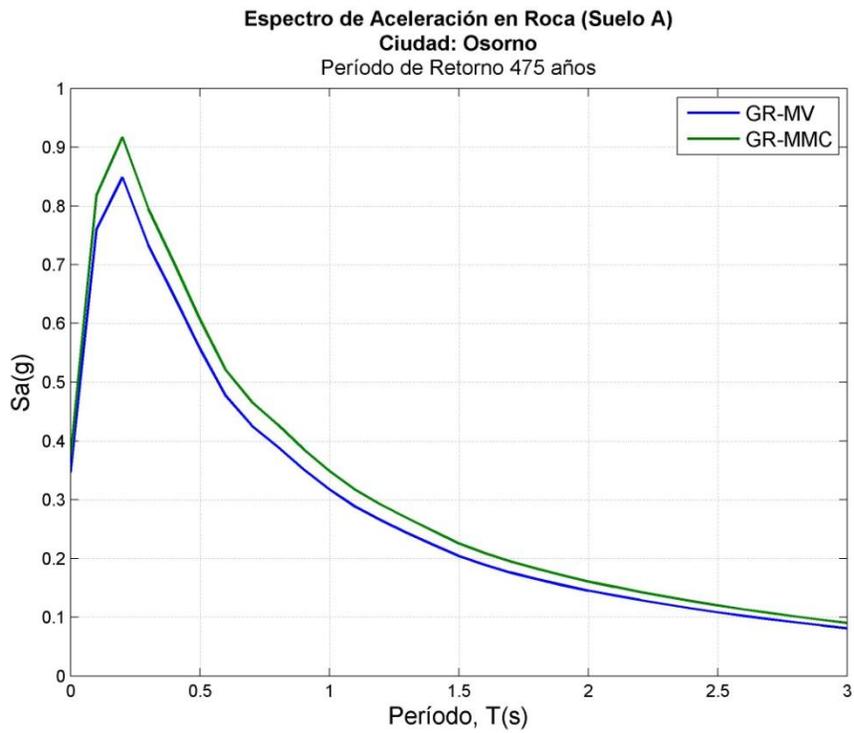


Figura B 335: Espectro de Aceleración de Osorno; Período de Retorno 475 años

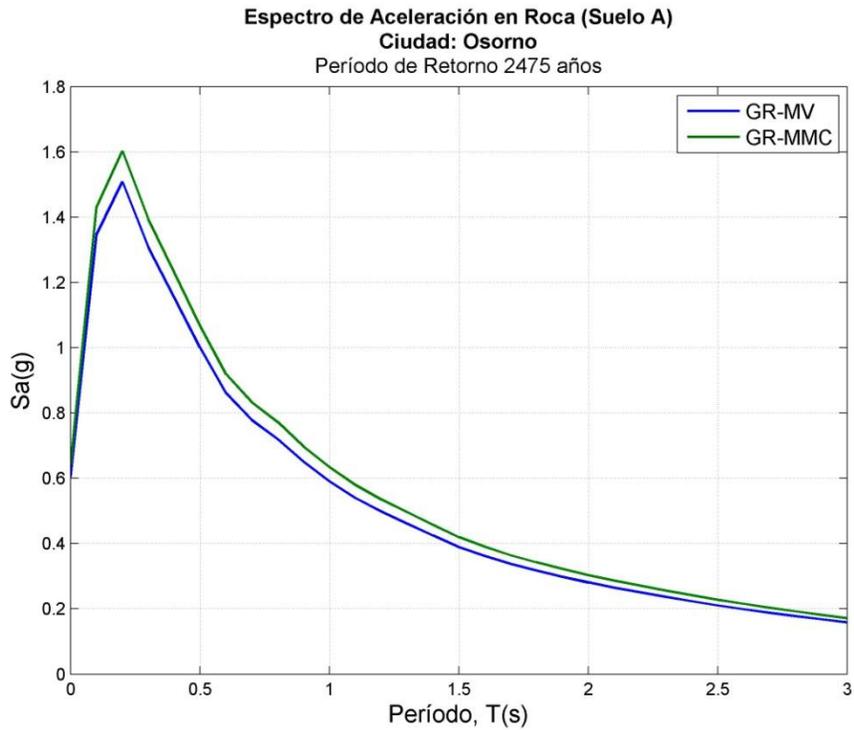


Figura B 336: Espectro de Aceleración de Osorno; Período de Retorno 2475 años

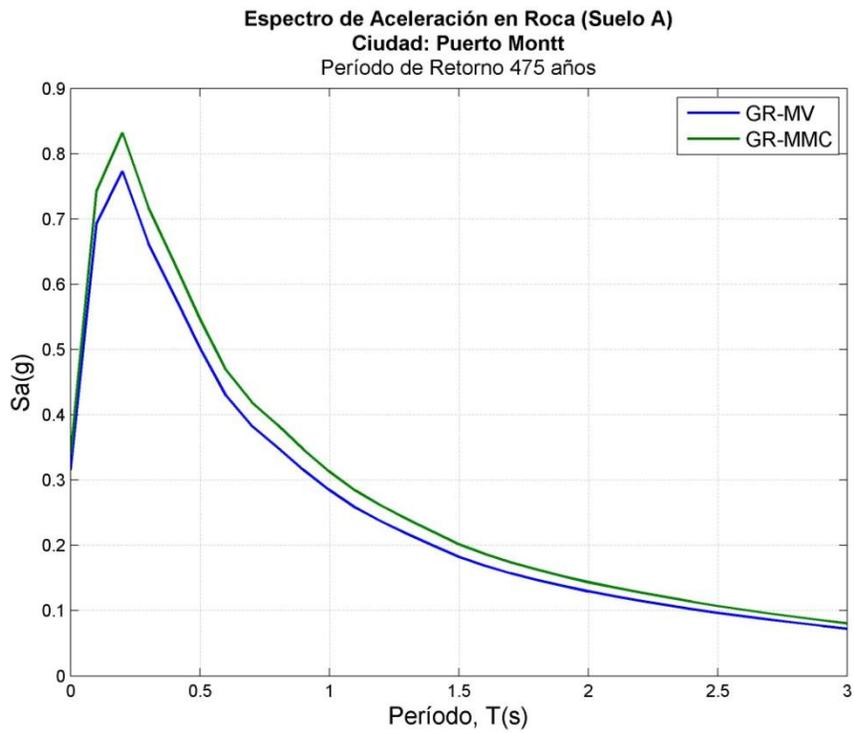


Figura B 337: Espectro de Aceleración de Puerto Montt; Período de Retorno 475 años

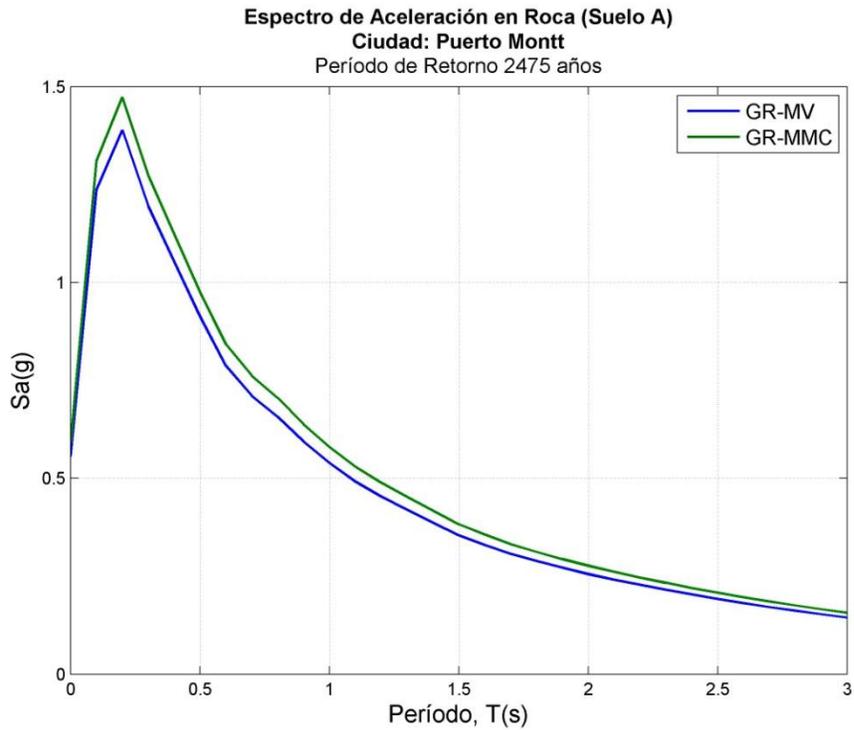


Figura B 338: Espectro de Aceleración de Puerto Montt; Período de Retorno 2475 años

B.6 COMPARACIÓN ESPECTROS CON DS61 Y NCH 2745.

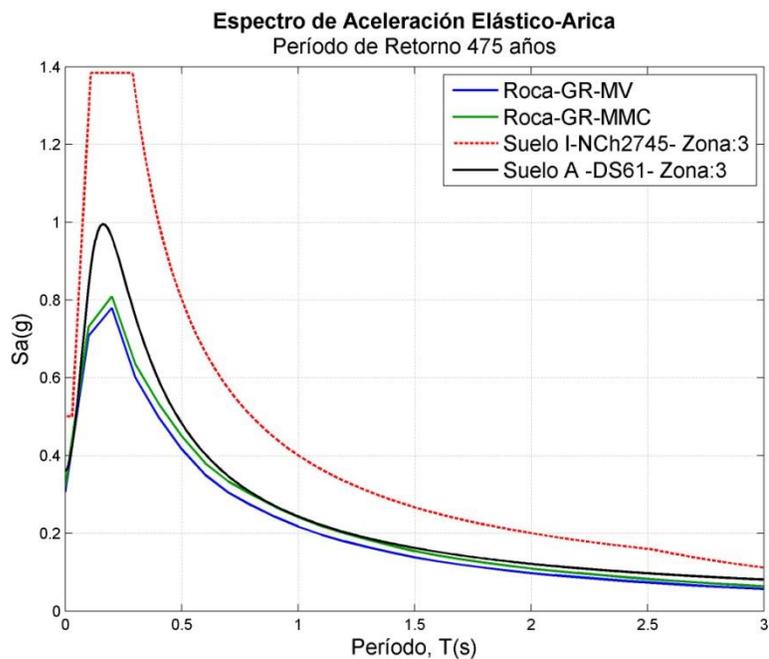


Figura B 339 Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Arica PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

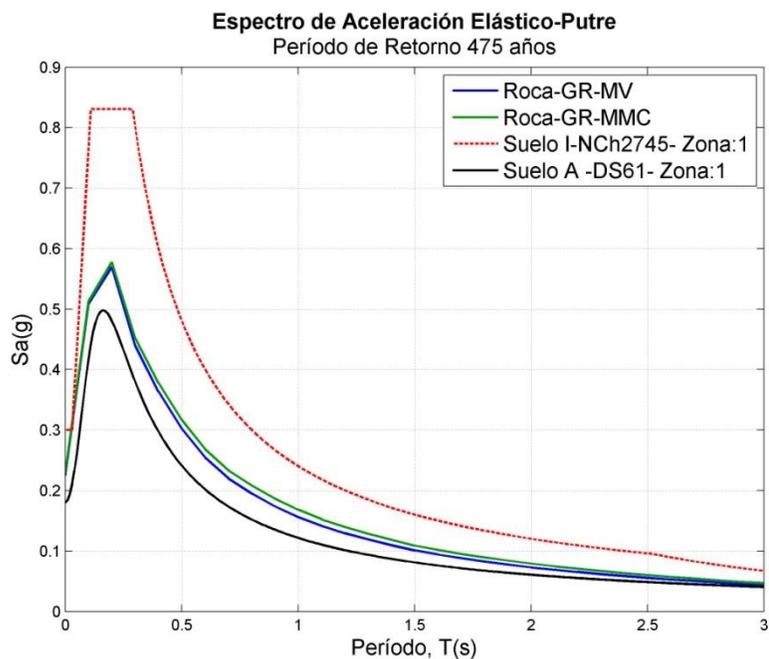


Figura B 340 Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Putre PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

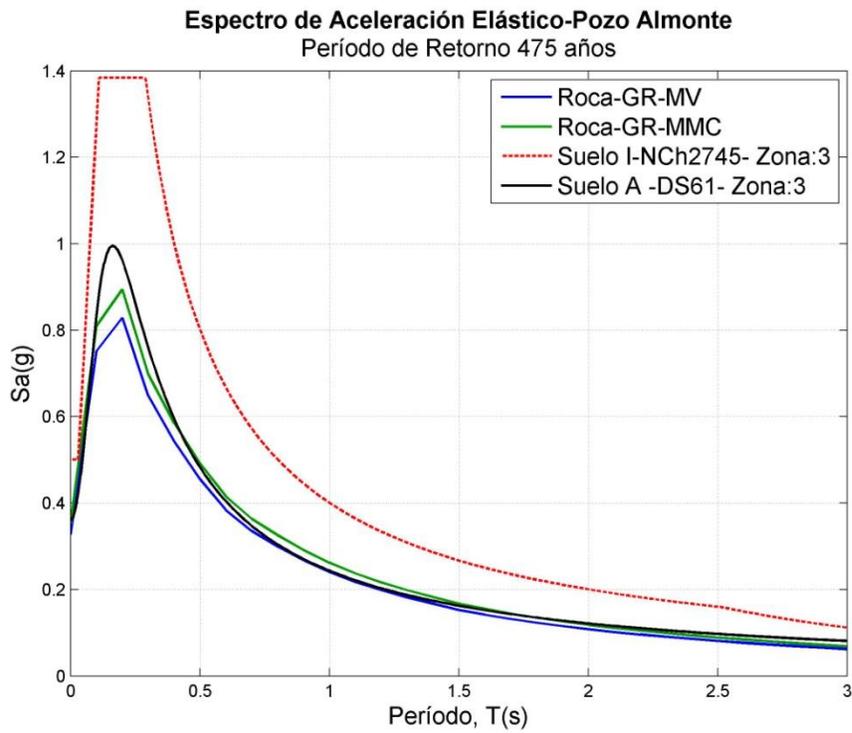


Figura B 341: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Pozo Almonte PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

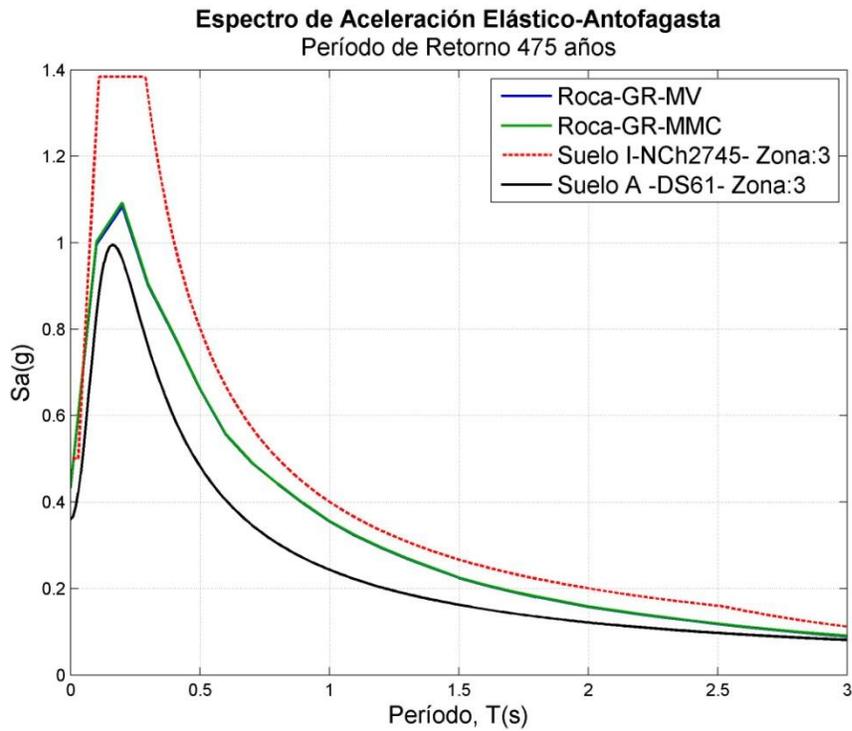


Figura B 342: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Antofagasta PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

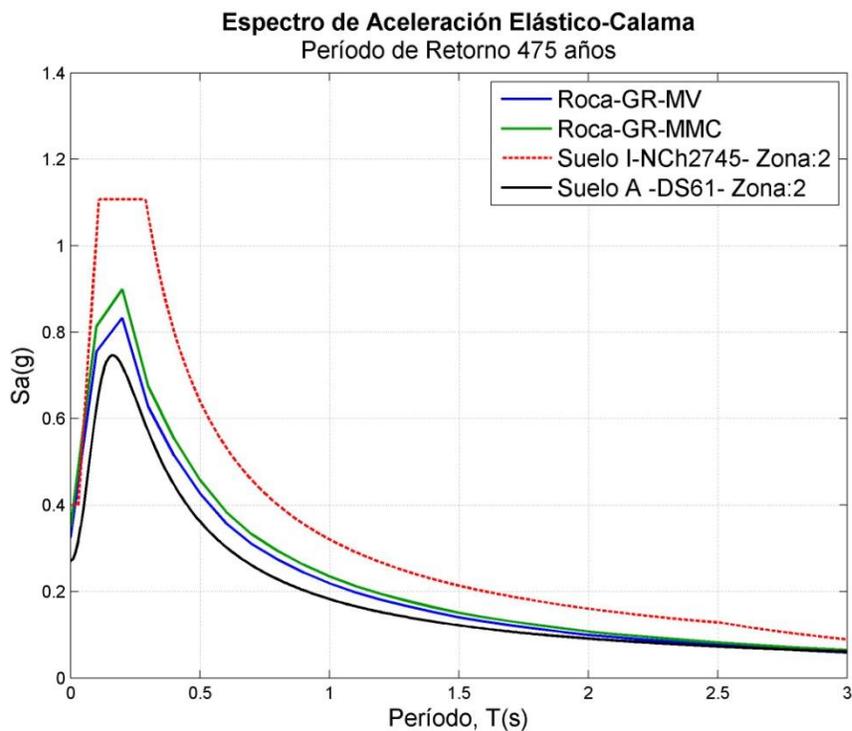


Figura B 343: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Calama PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

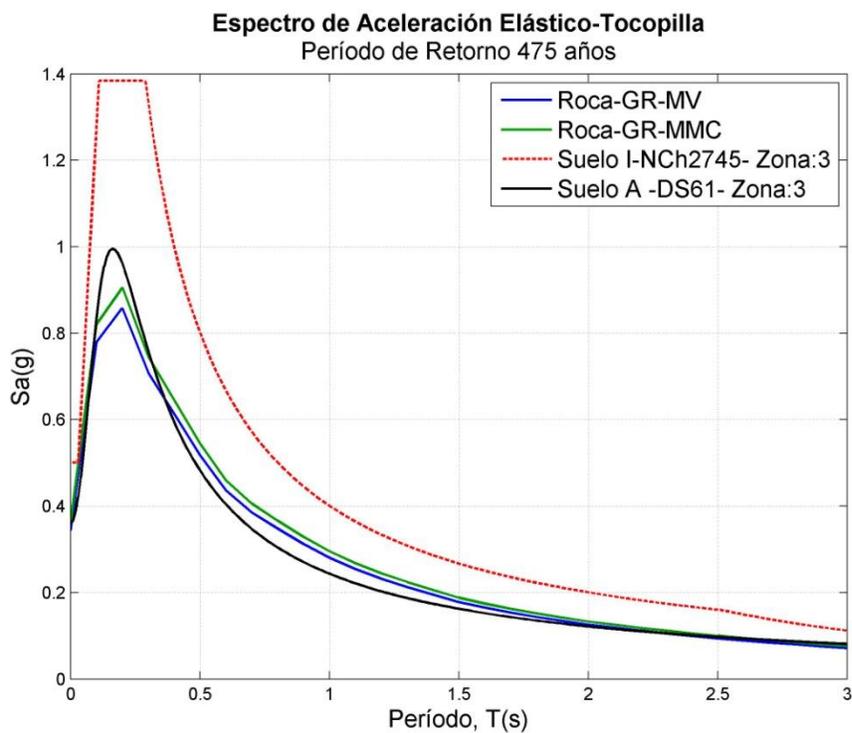


Figura B 344: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Tocopilla PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

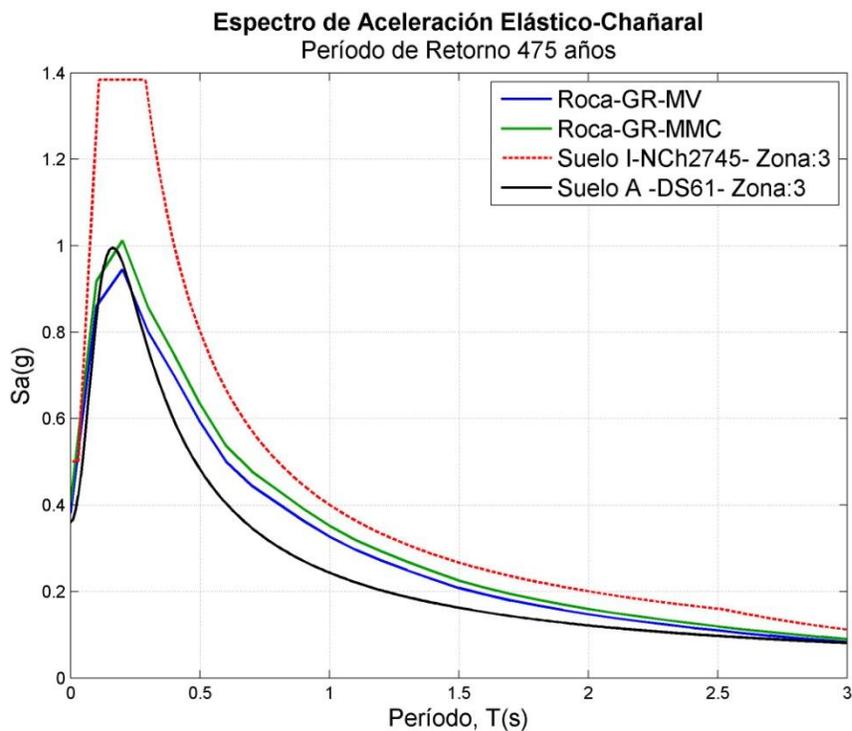


Figura B 345: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Chañaral PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

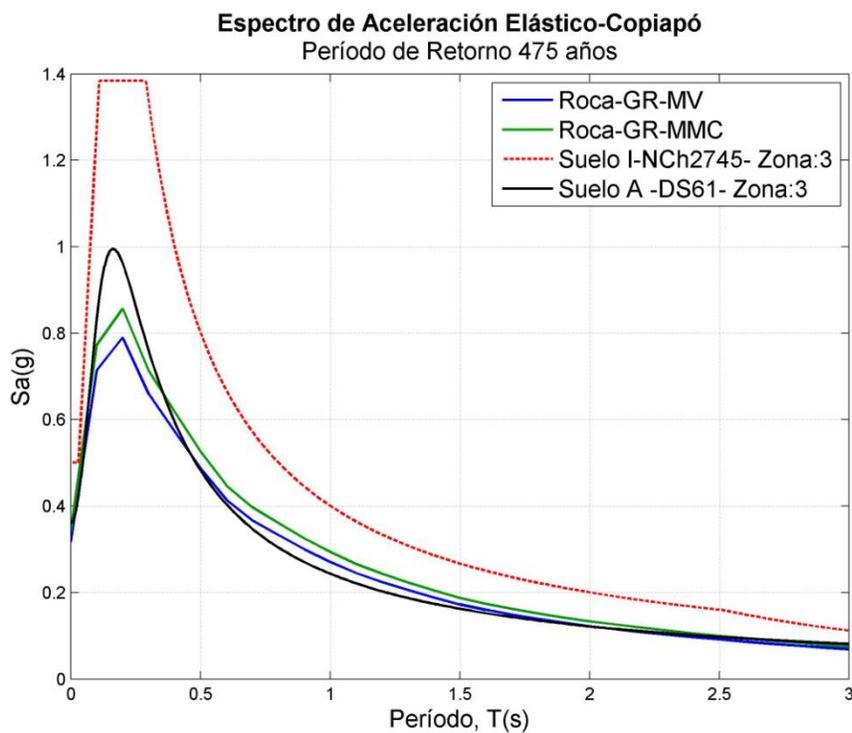


Figura B 346: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Copiapó PR=475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

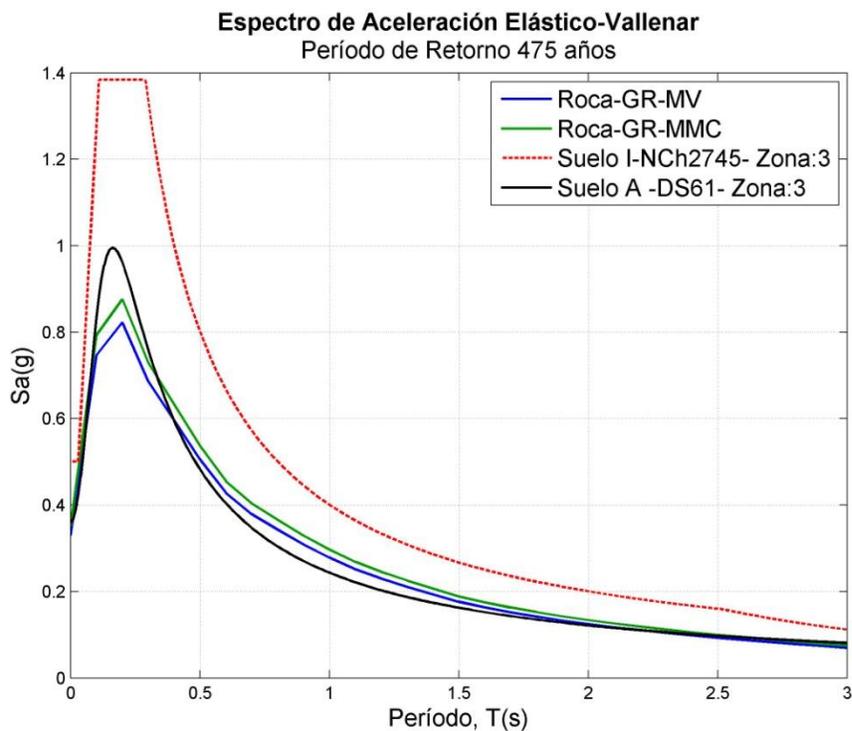


Figura B 347: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Vallenar PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

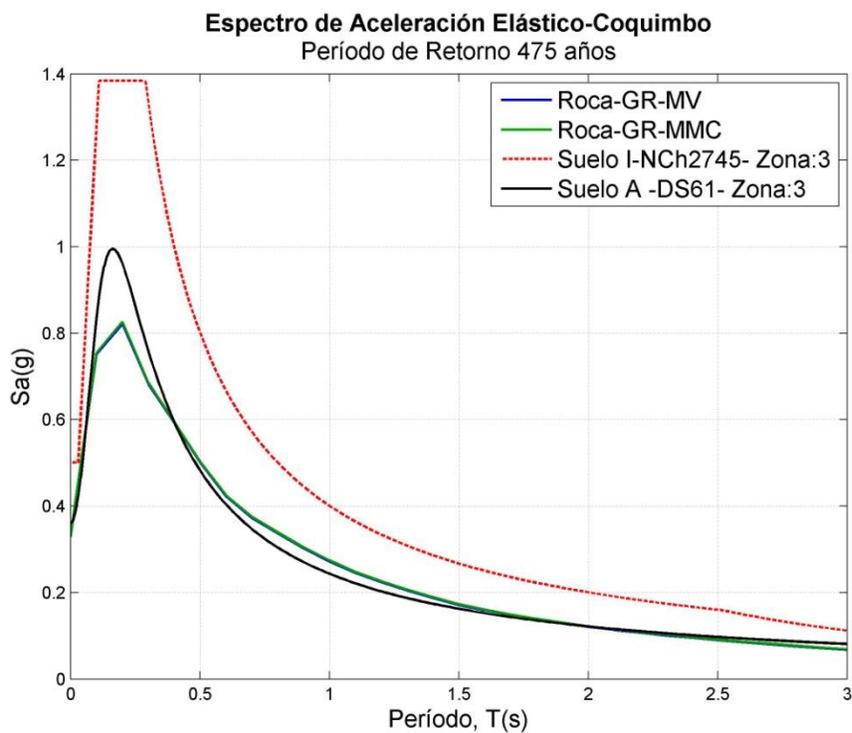


Figura B 348: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Coquimbo PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

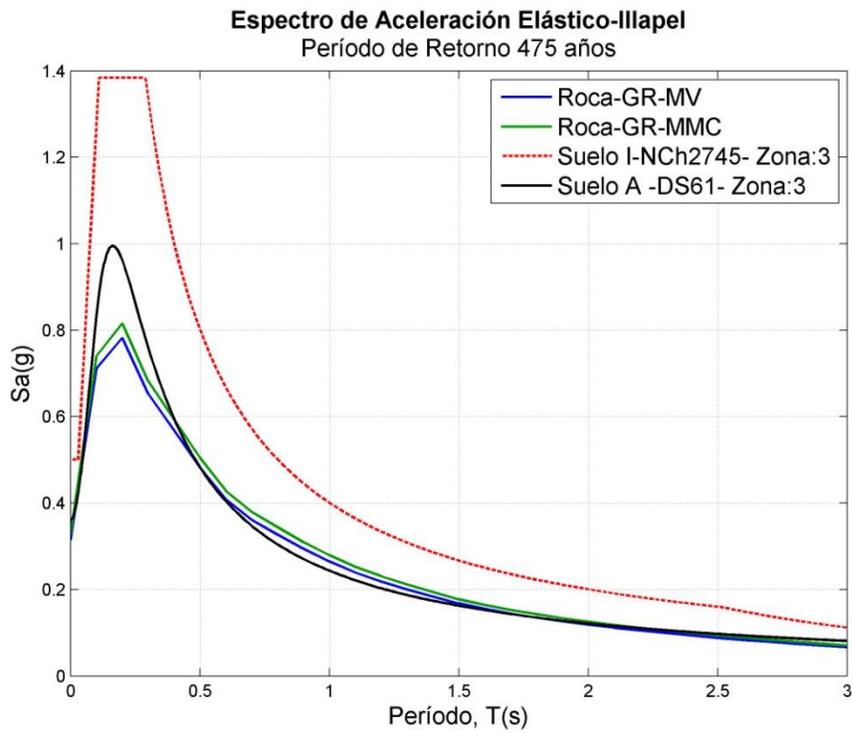


Figura B 349: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Illapel PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

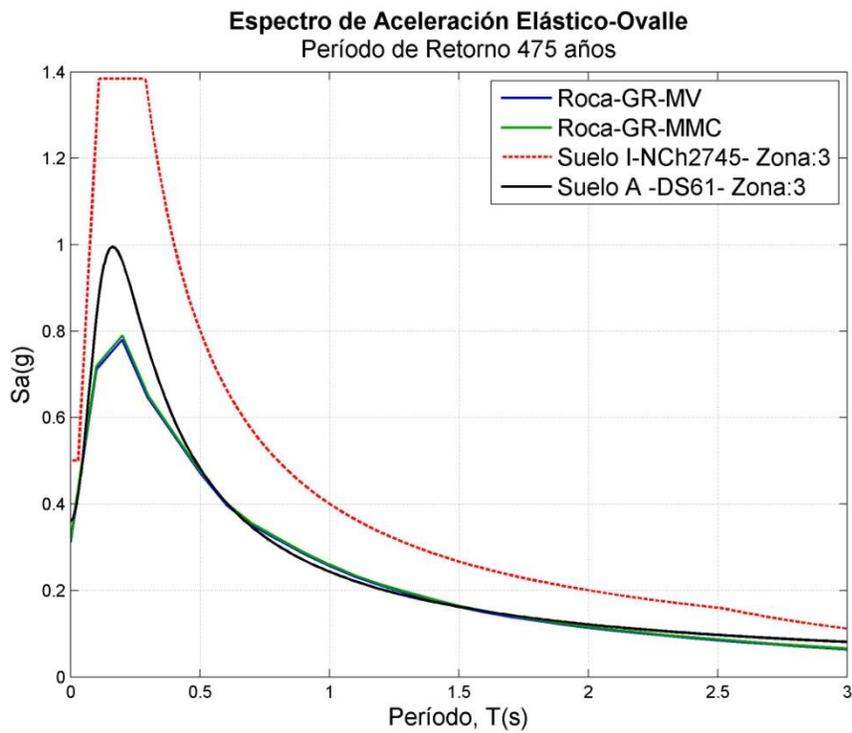


Figura B 350: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Ovalle PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

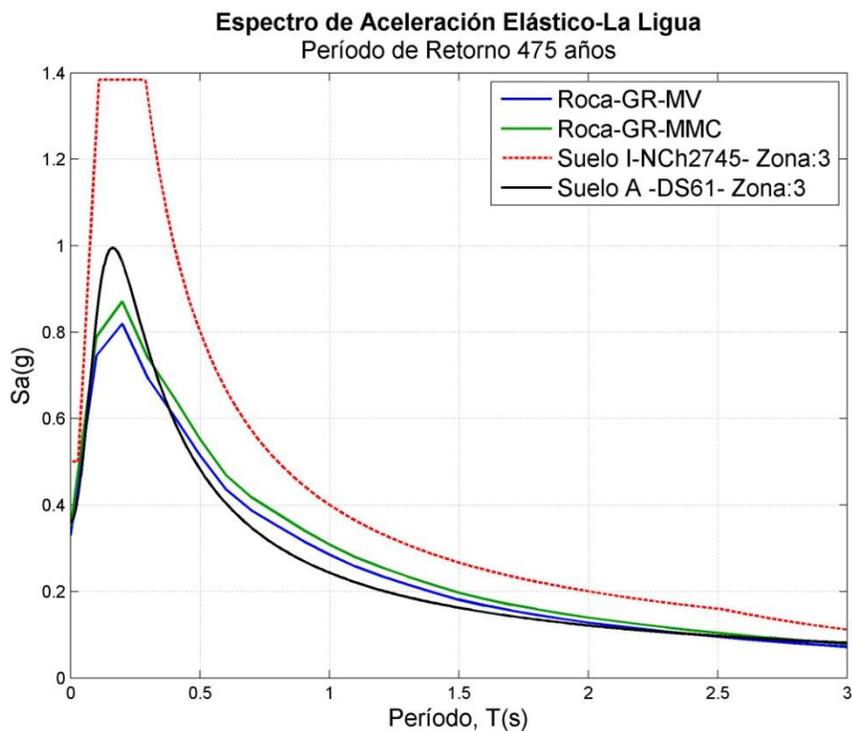


Figura B 351: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para La Ligua PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

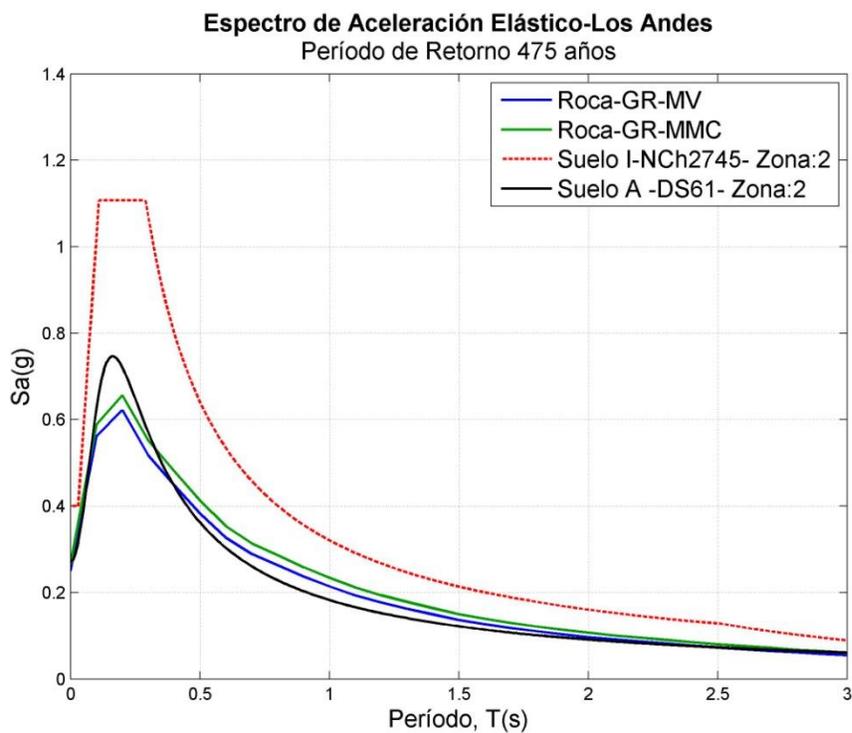


Figura B 352: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Los Andes PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

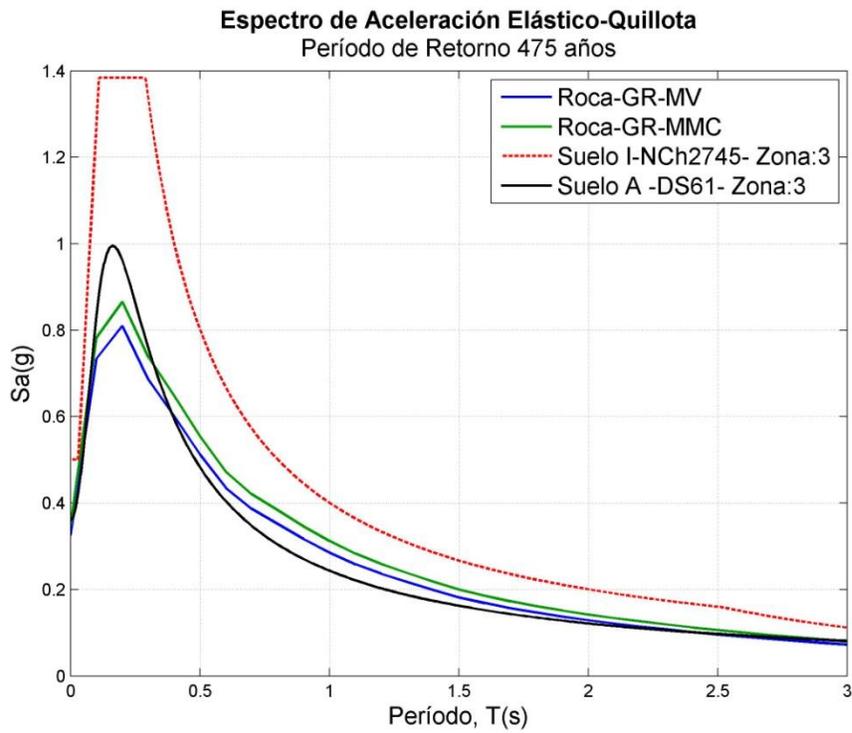


Figura B 353: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Quillota PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

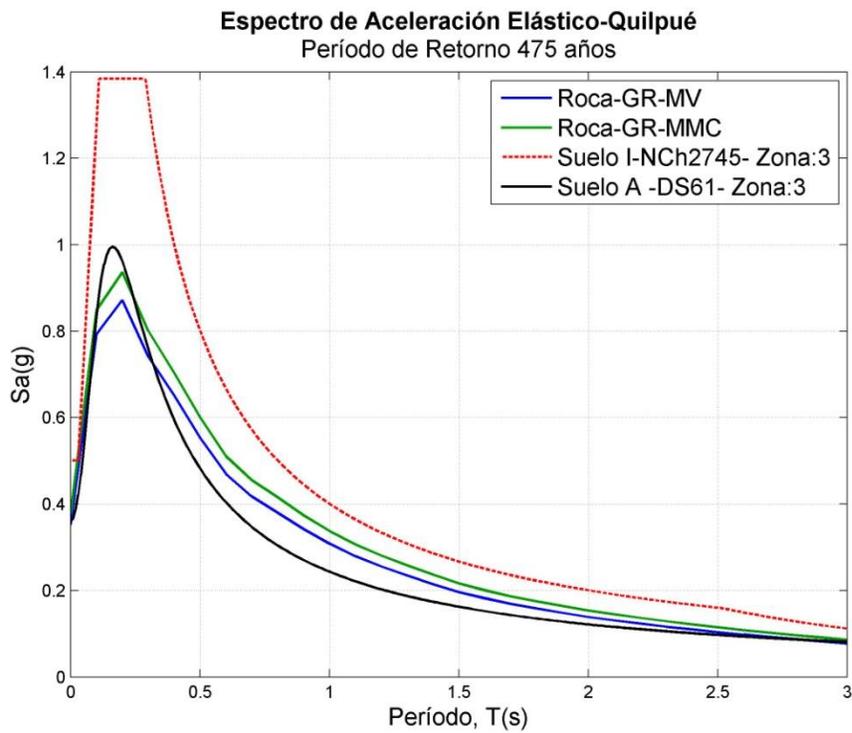


Figura B 354: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Quilpué PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

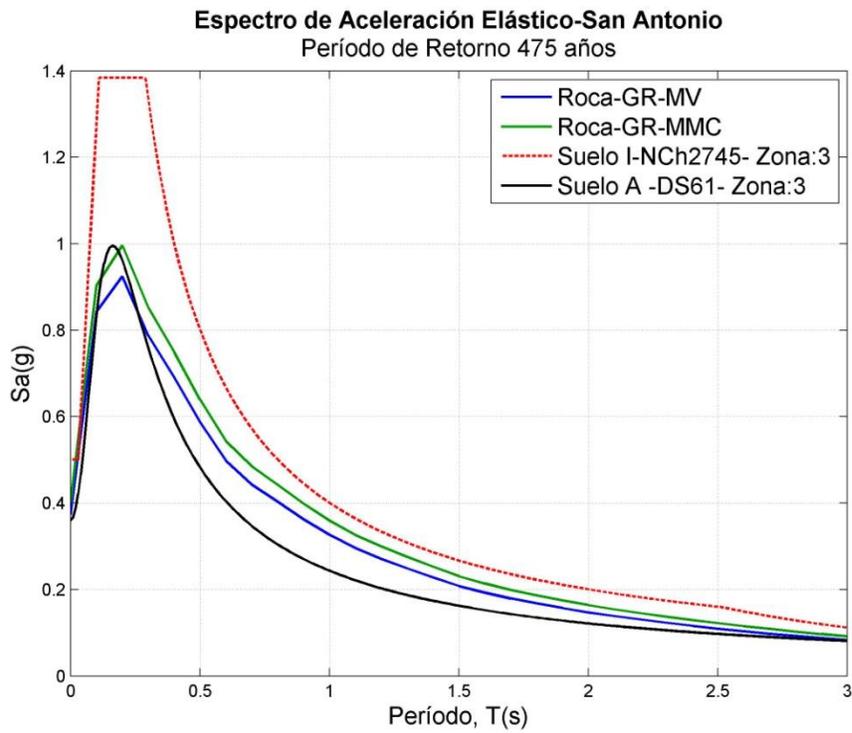


Figura B 355: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Antonio PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

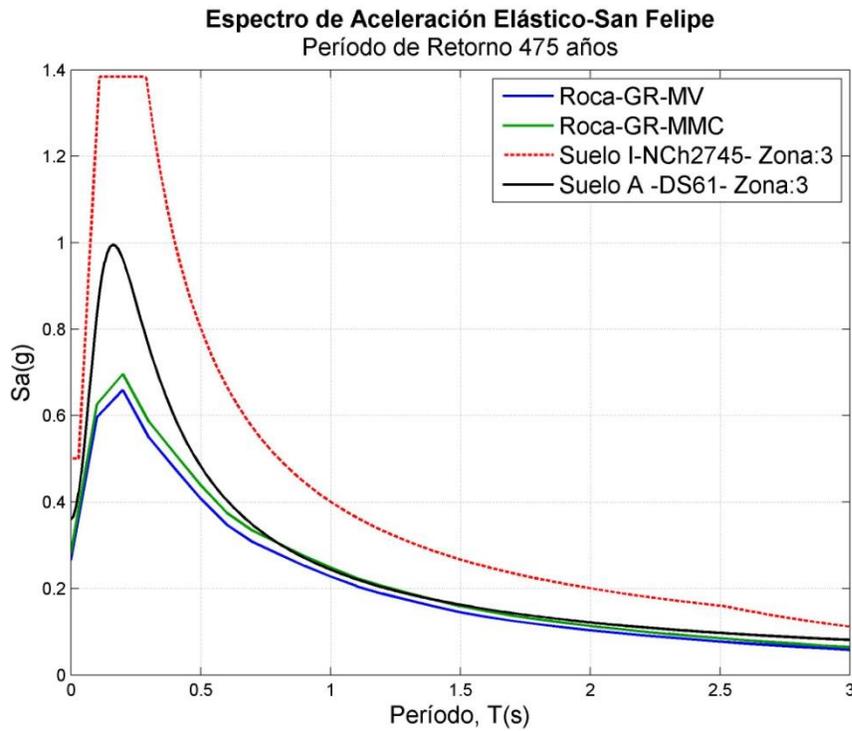


Figura B 356: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Felipe PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

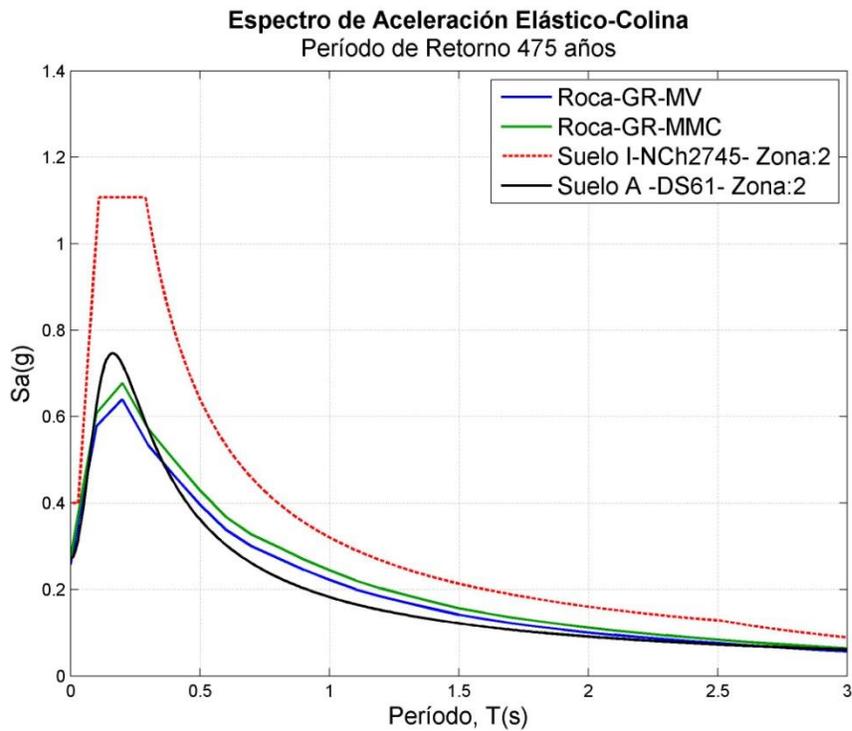


Figura B 357: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Colina PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

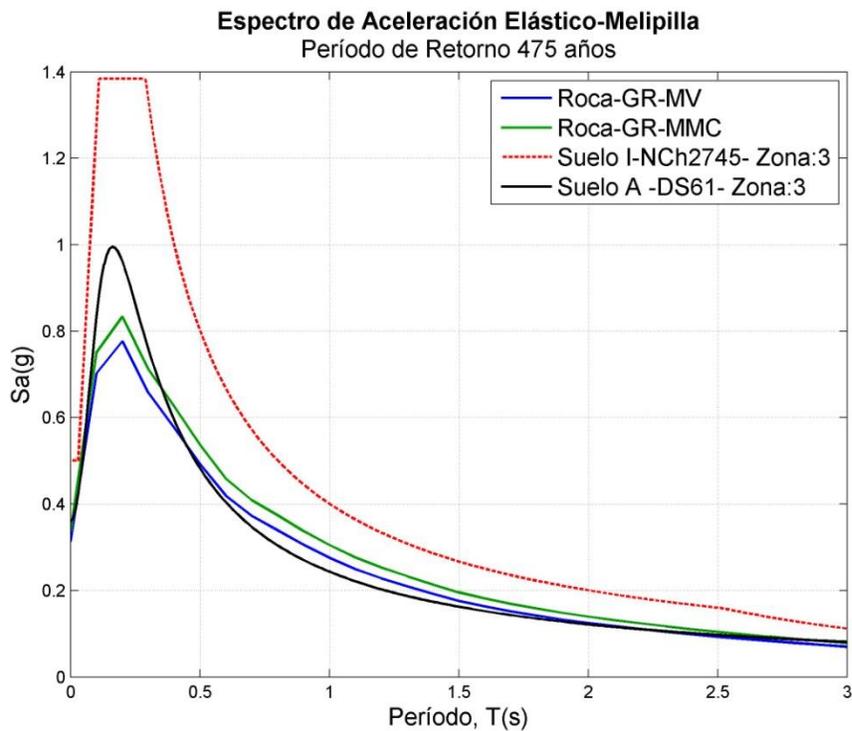


Figura B 358: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Melipilla PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

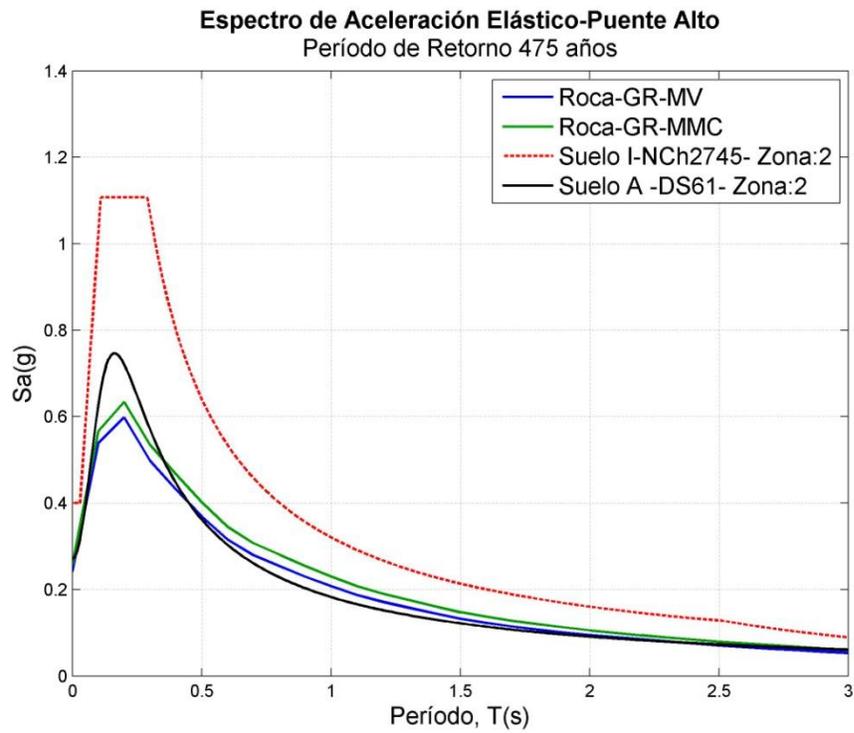


Figura B 359: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Puente Alto PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

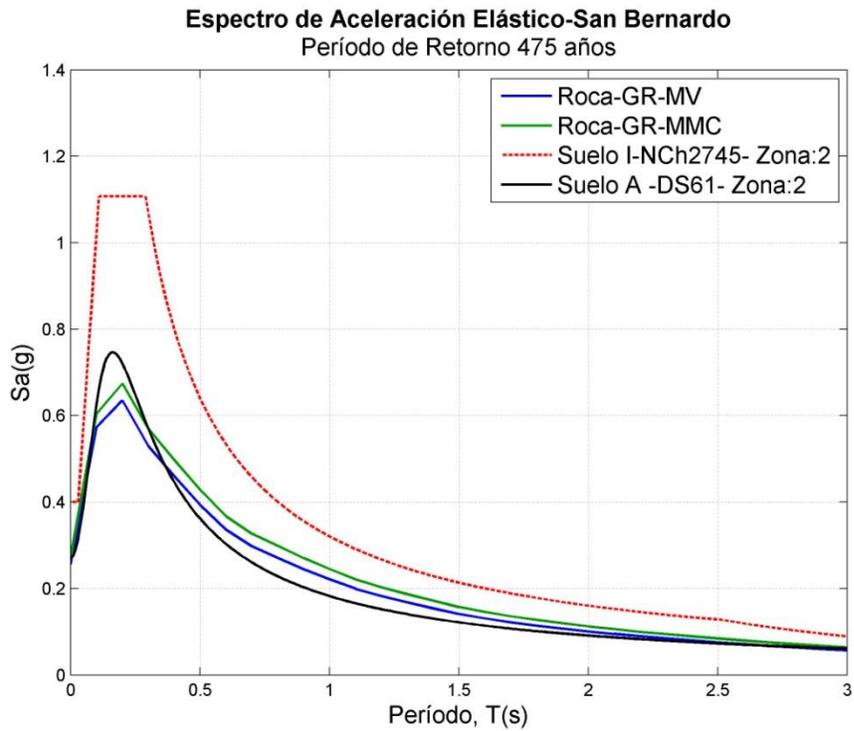


Figura B 360: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Bernardo PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

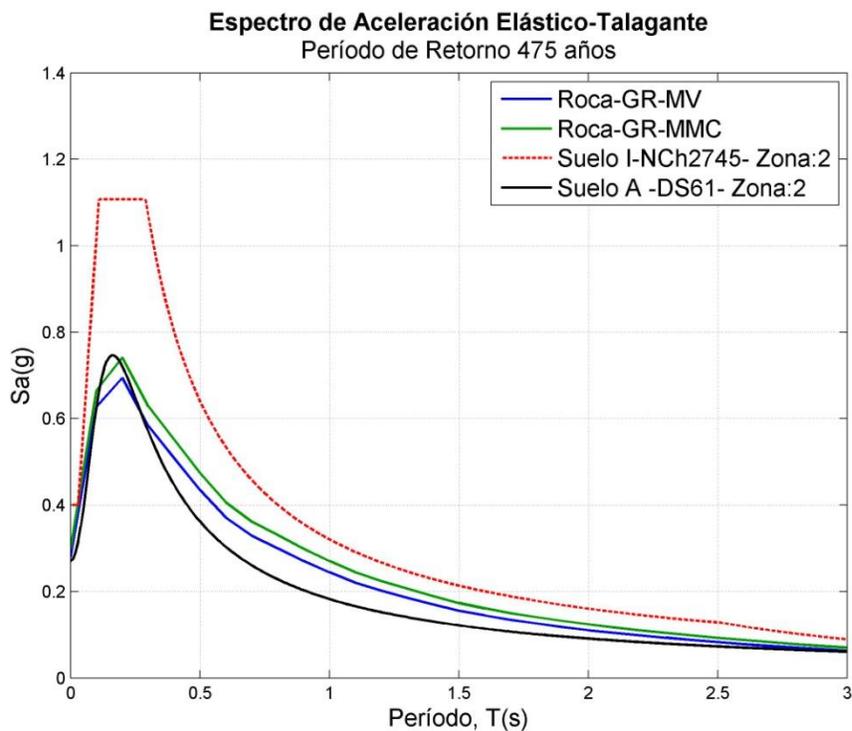


Figura B 361: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Talagante PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

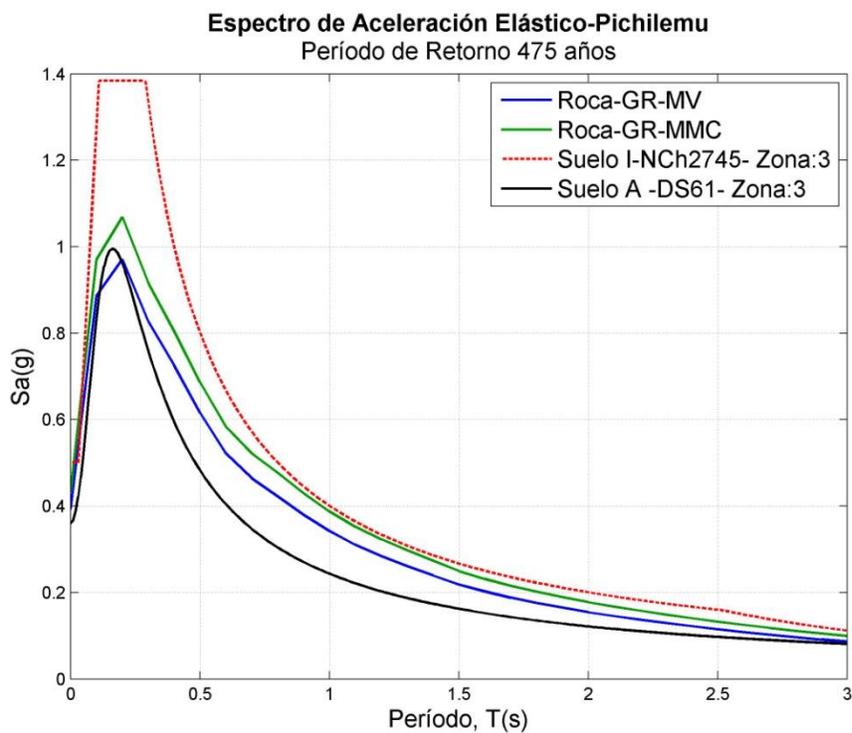


Figura B 362: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Pichilemu PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

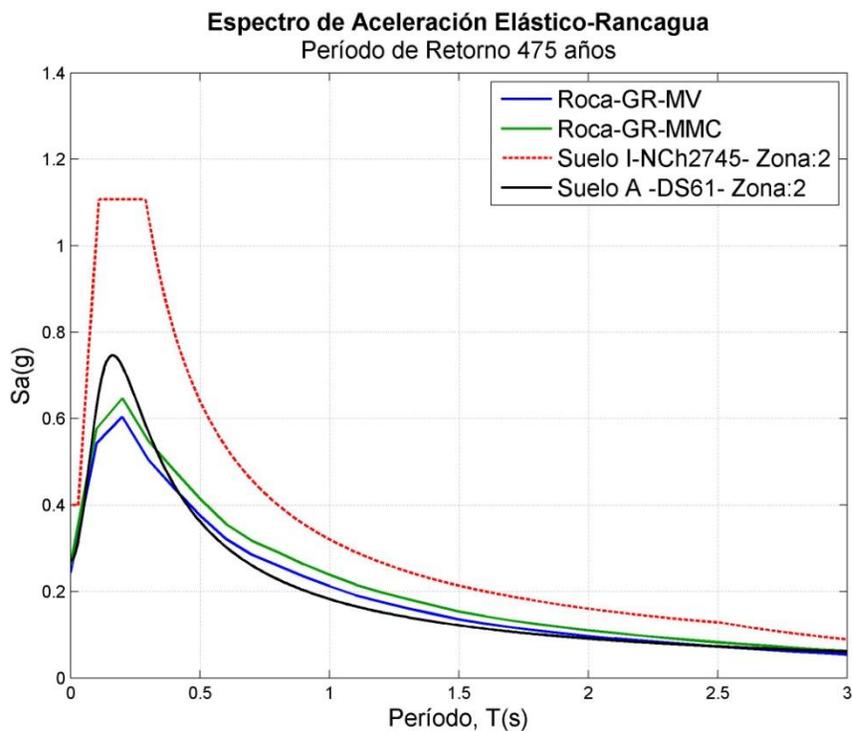


Figura B 363: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Rancagua PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

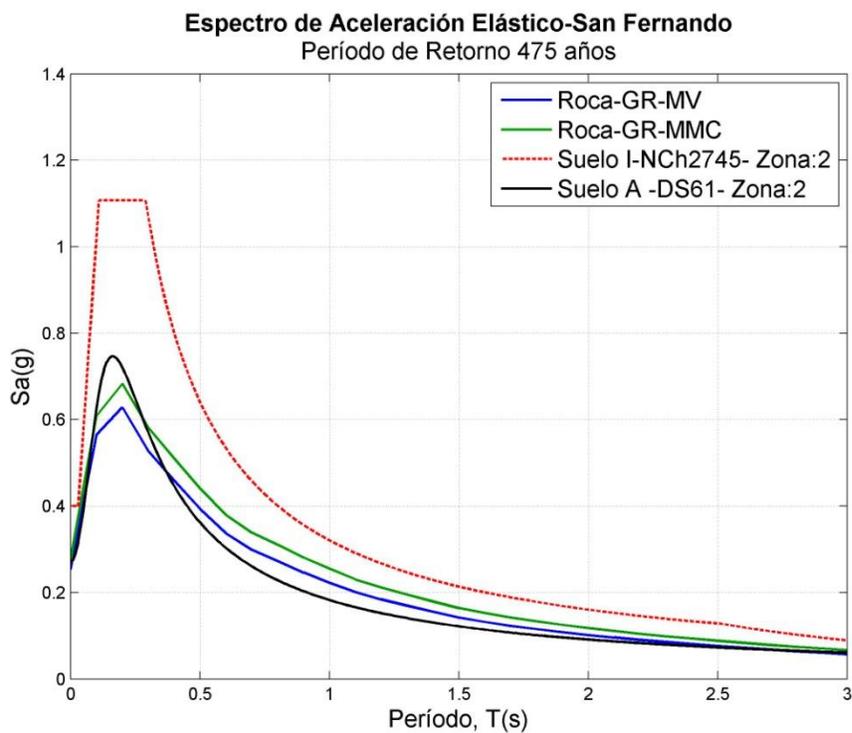


Figura B 364: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para San Fernando PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

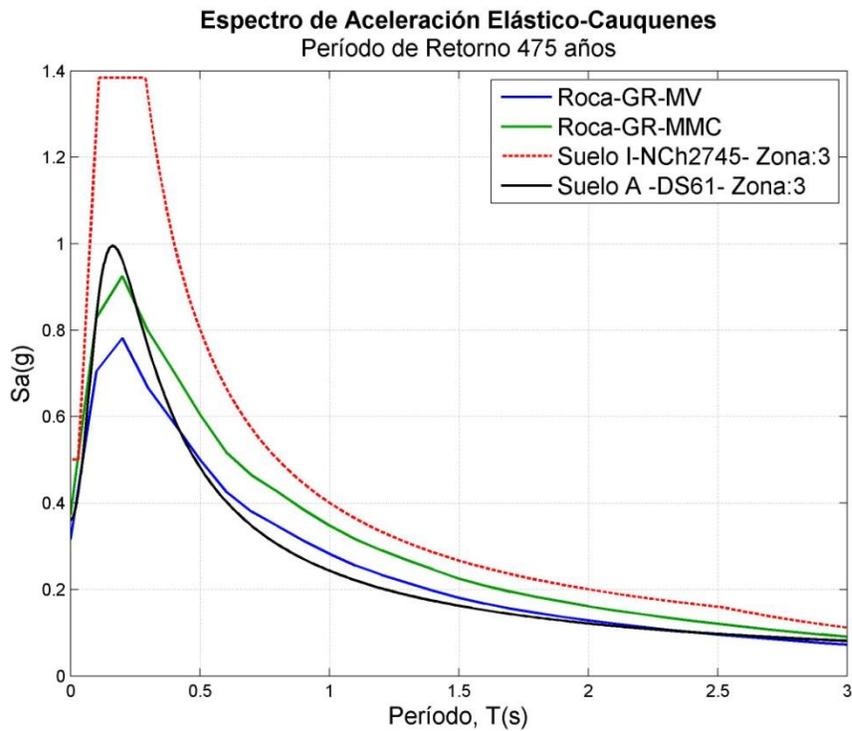


Figura B 365 Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Cauquenes PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

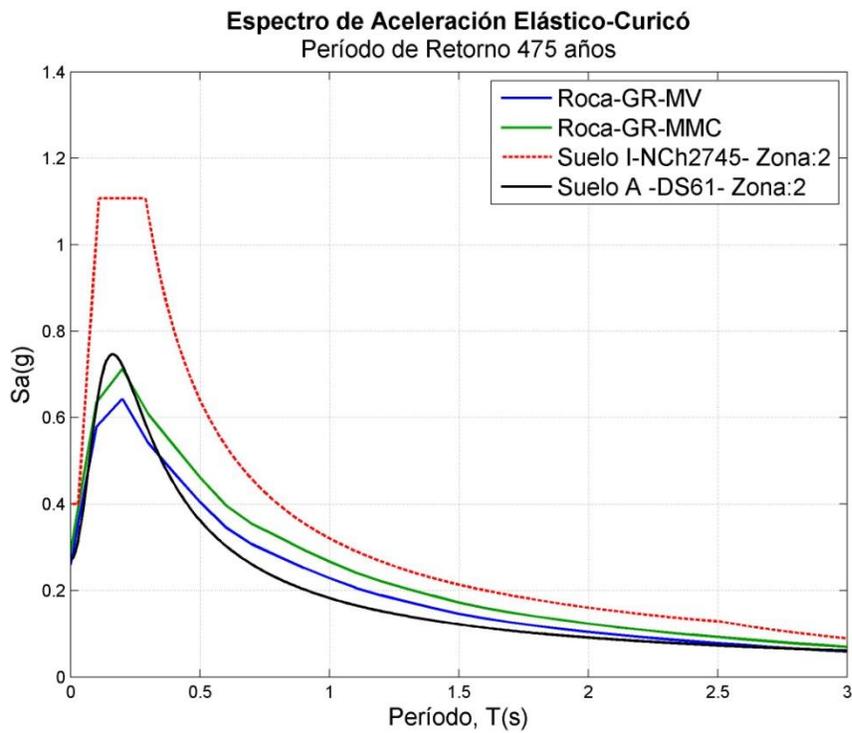


Figura B 366: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Curicó PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

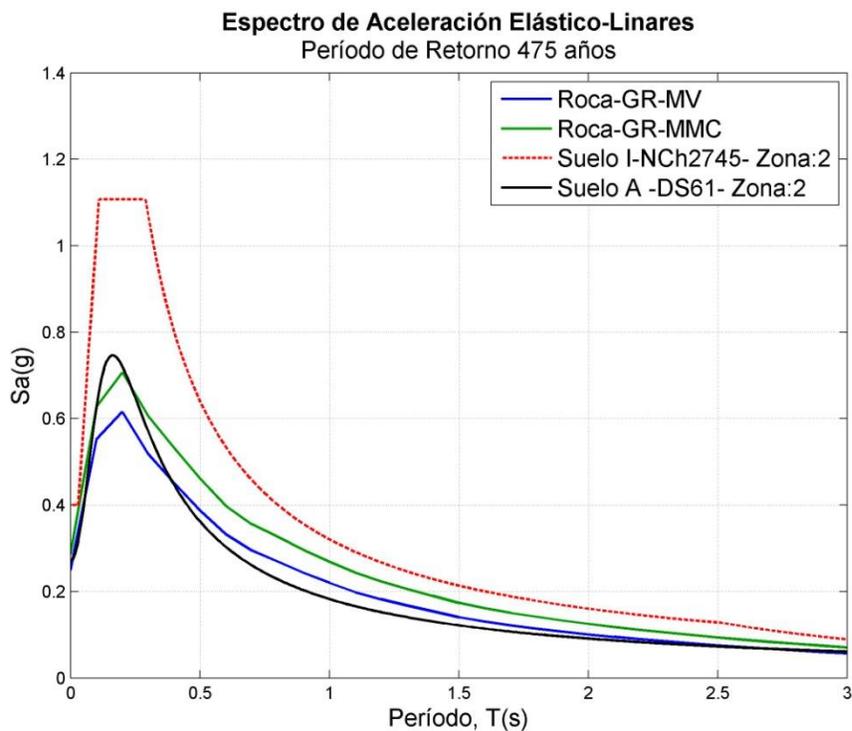


Figura B 367: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Linares PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

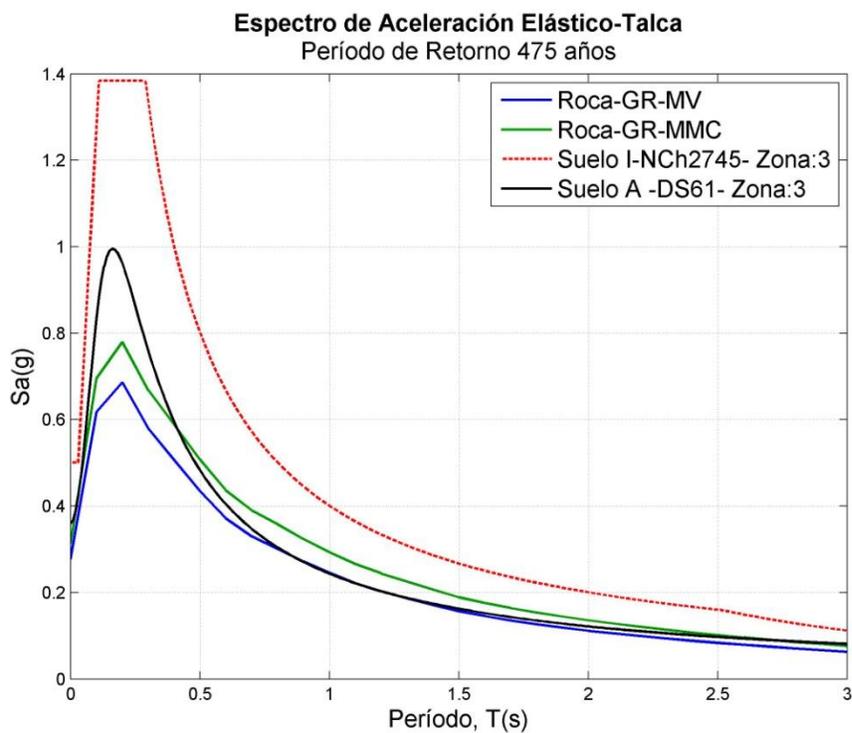


Figura B 368: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Talca PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

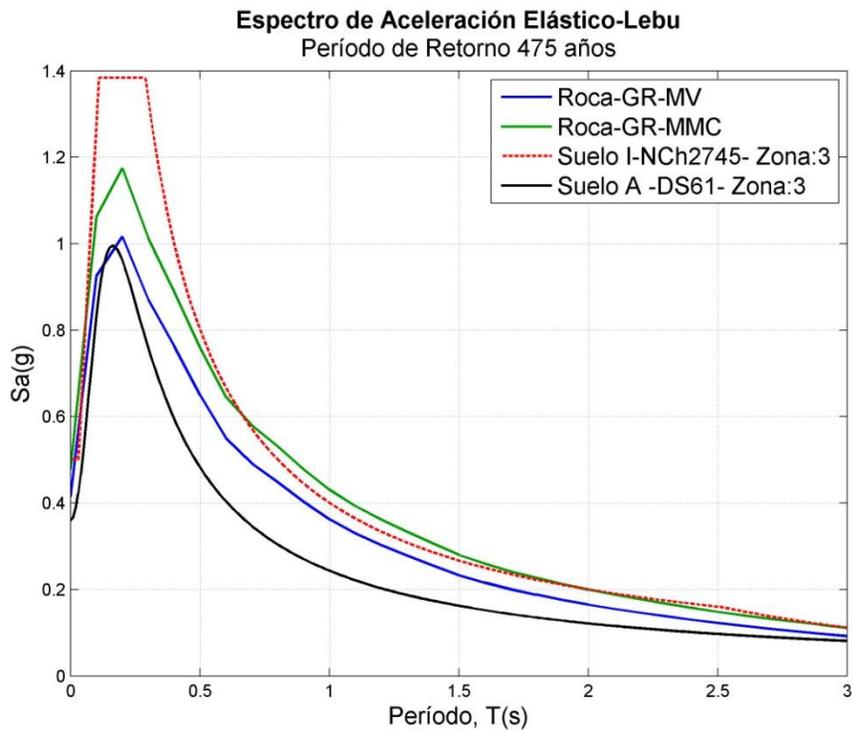


Figura B 369: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Lebu PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

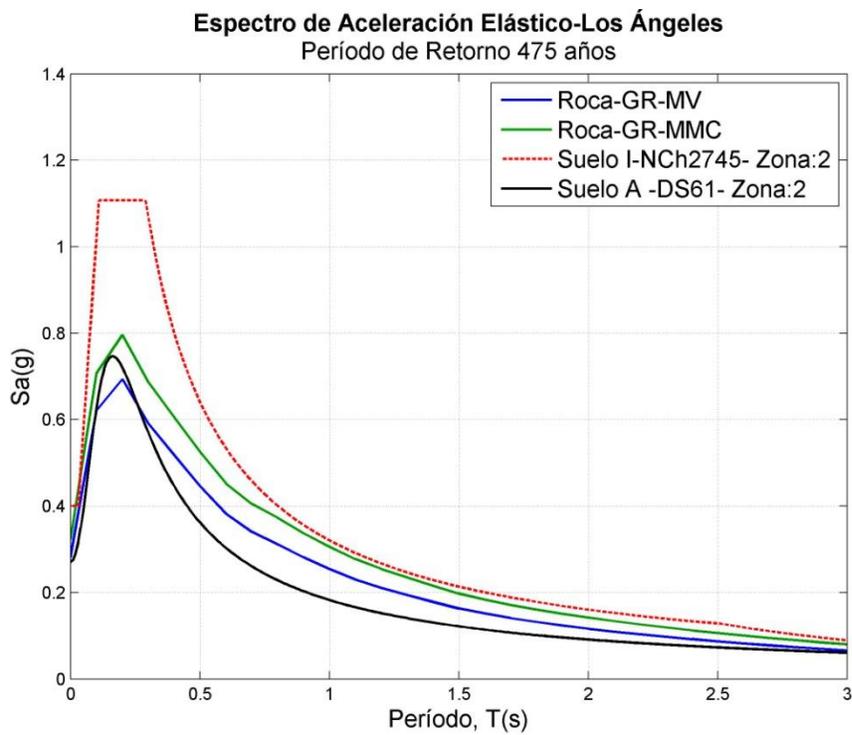


Figura B 370: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Los Ángeles PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

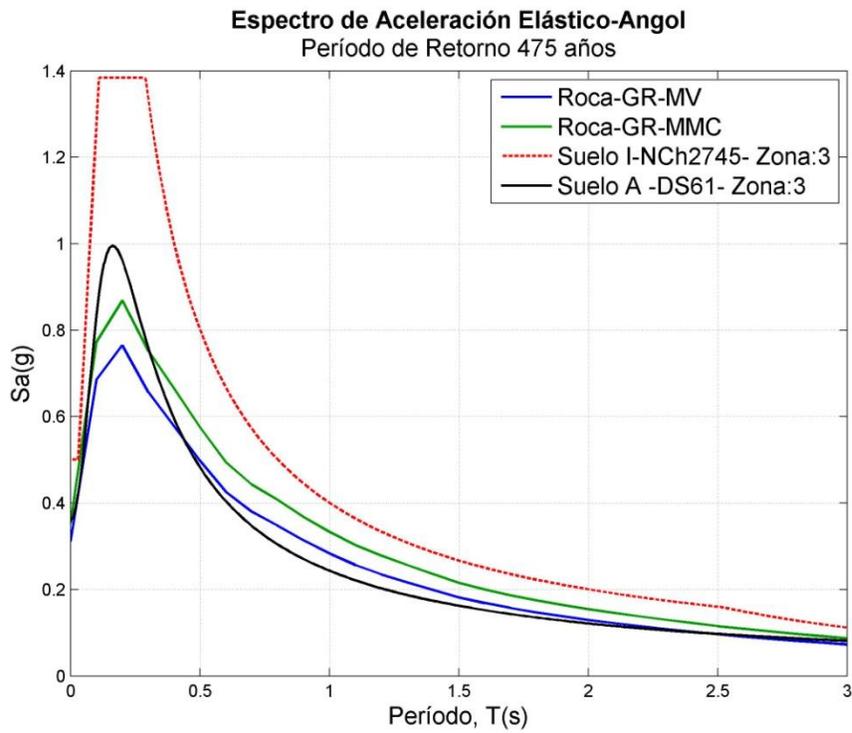


Figura B 371: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Angol PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

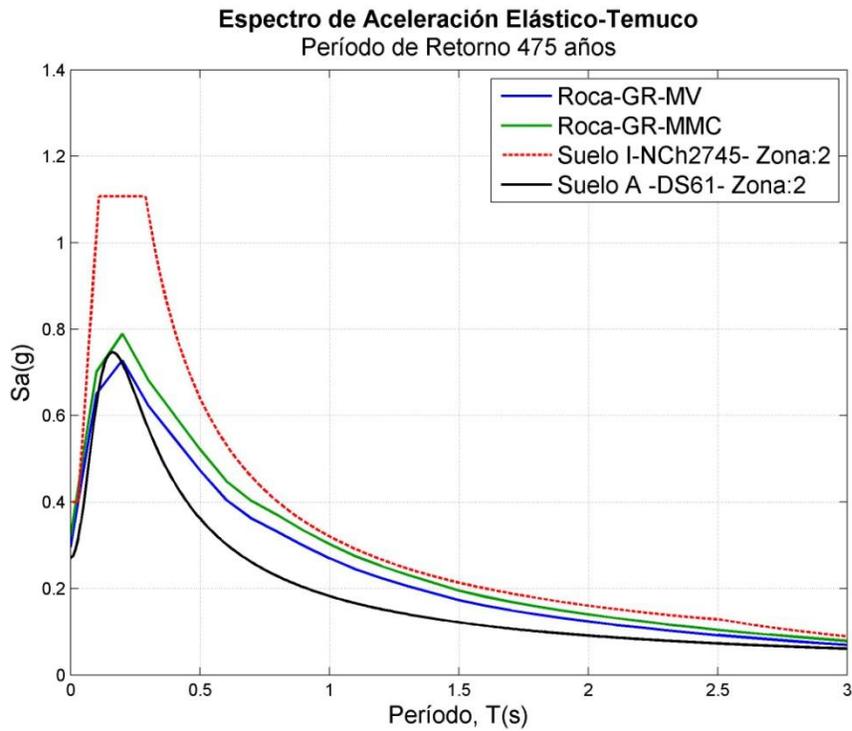


Figura B 372: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Temuco PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

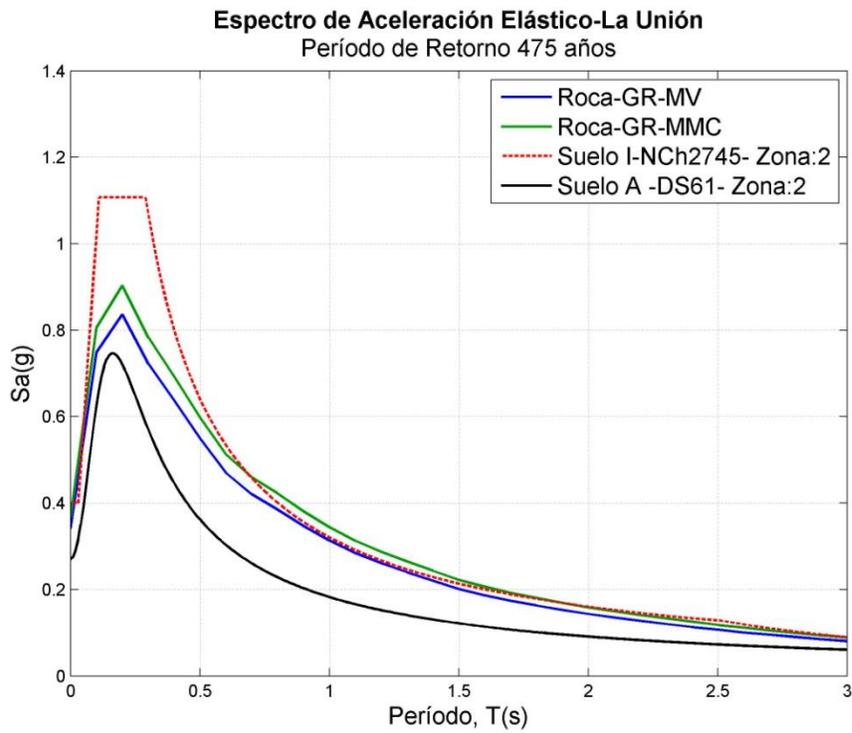


Figura B 373: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para La Unión PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

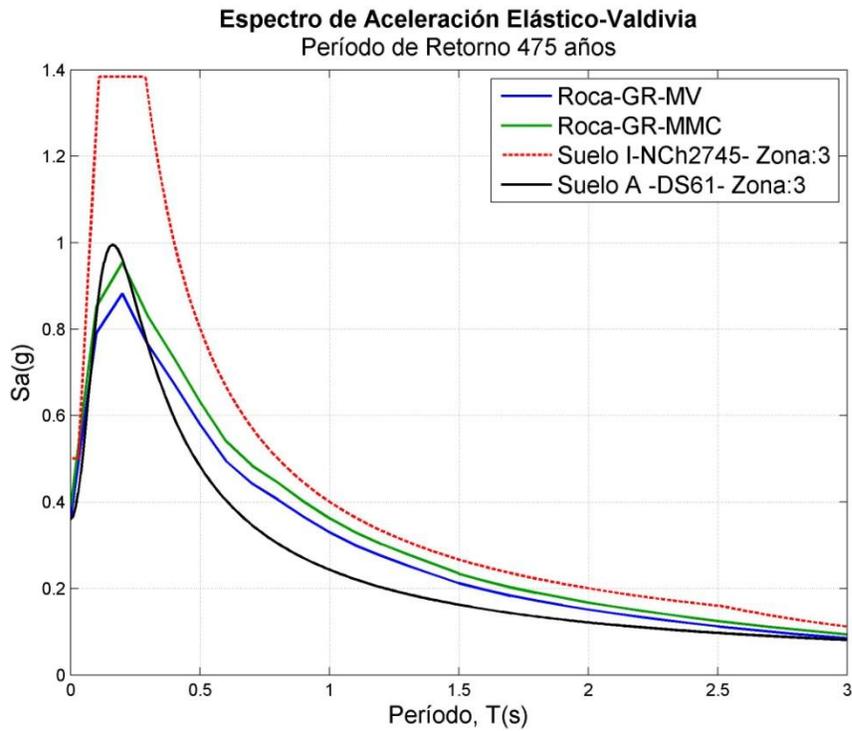


Figura B 374: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Valdivia PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

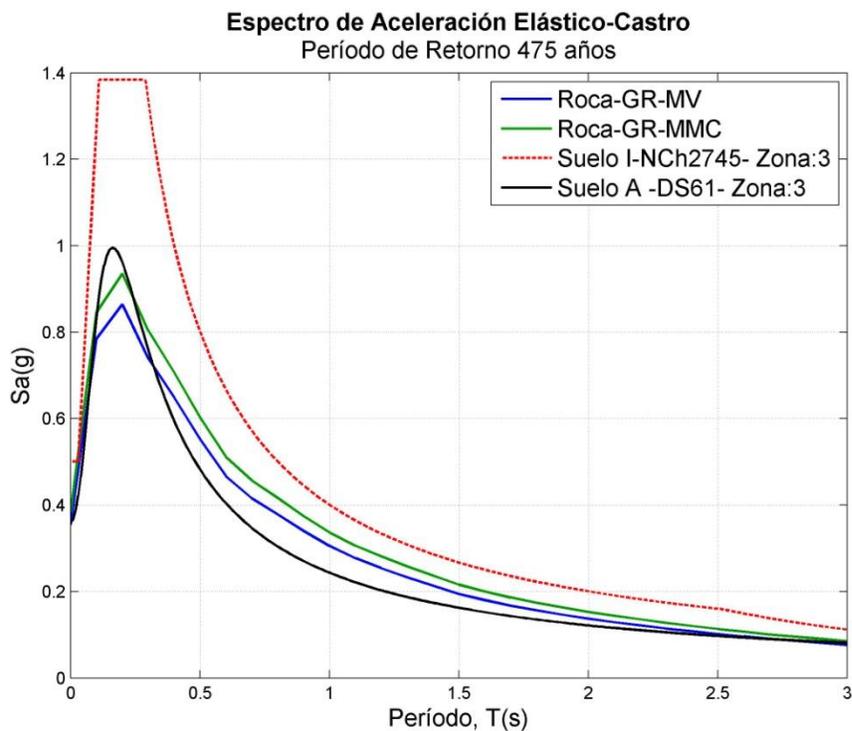


Figura B 375: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Castro PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

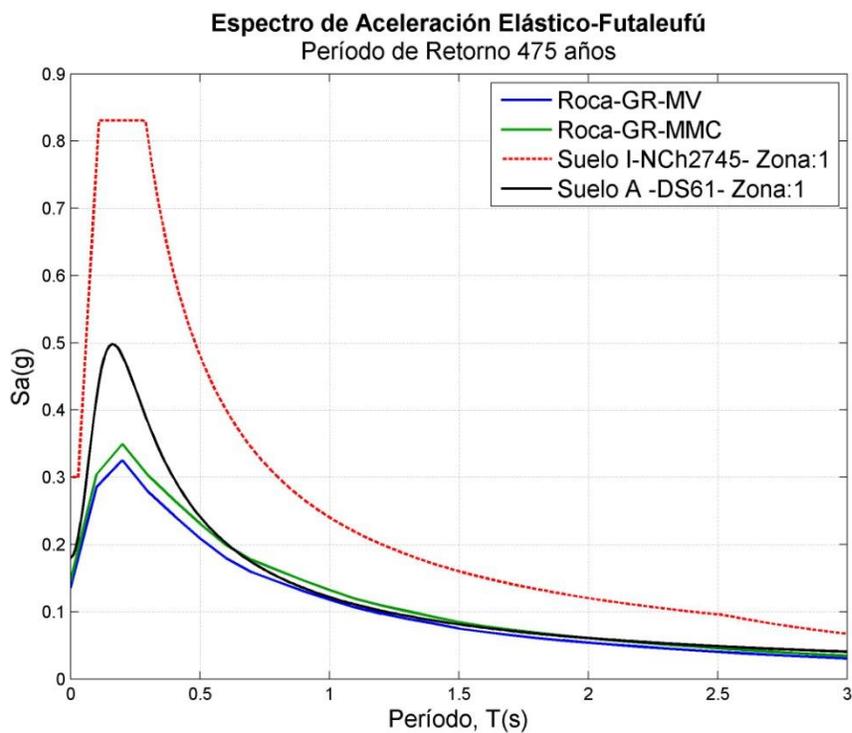


Figura B 376: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Futaleufú PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

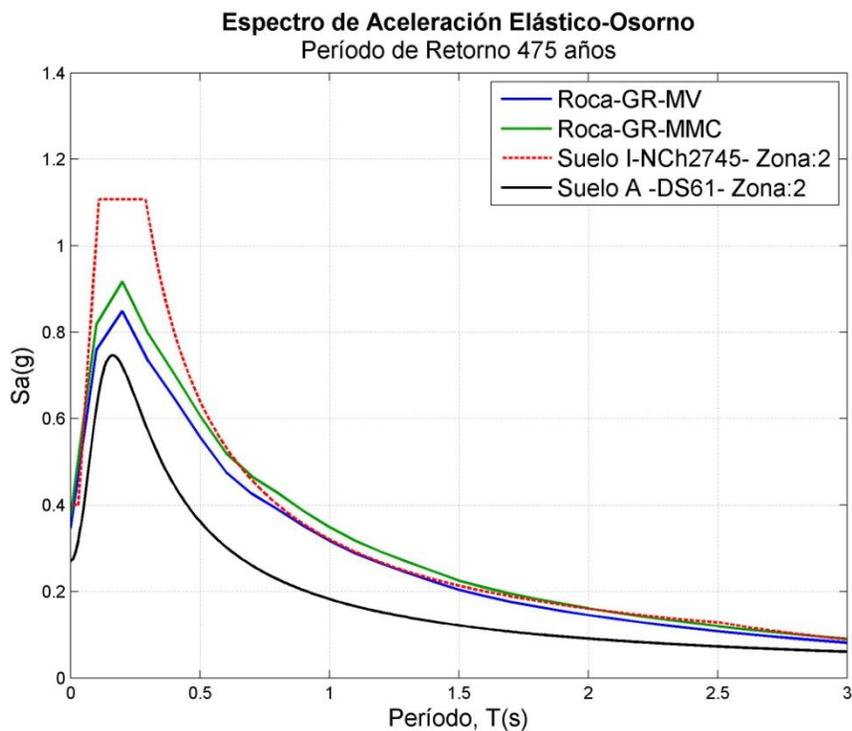


Figura B 377: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Osorno PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

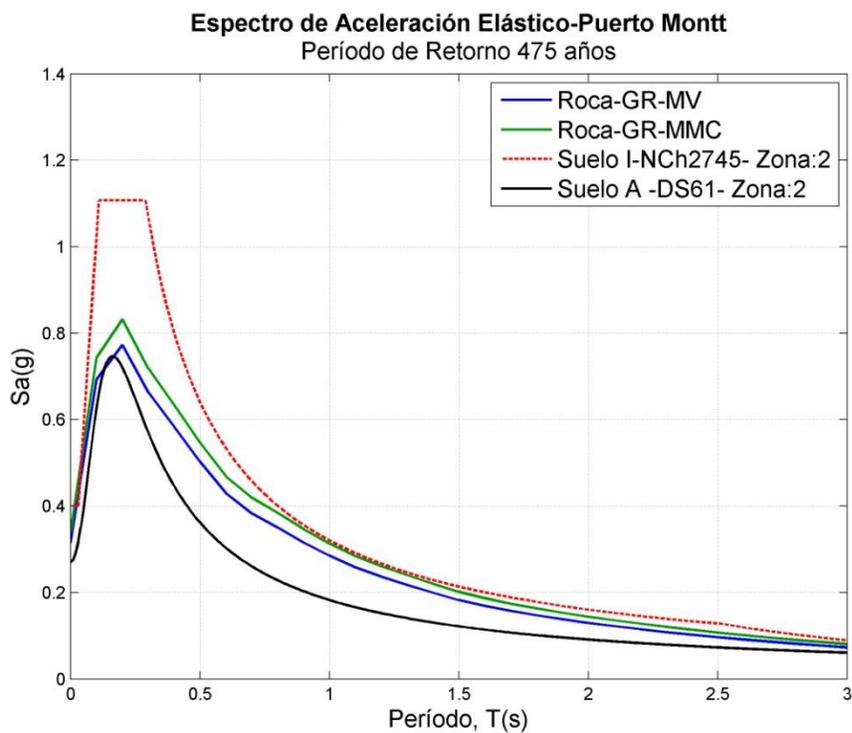


Figura B 378: Comparación entre espectro de Peligro Sísmico para Puerto Montt PR= 475 años con los de la Norma Nch 2745 y DS61

B.7 MAPAS DE ISOACELERACIONES PARA SA(0.2S) Y SA(1S) PARA 475 Y 2475 AÑOS DE PERÍODO DE RETORNO.

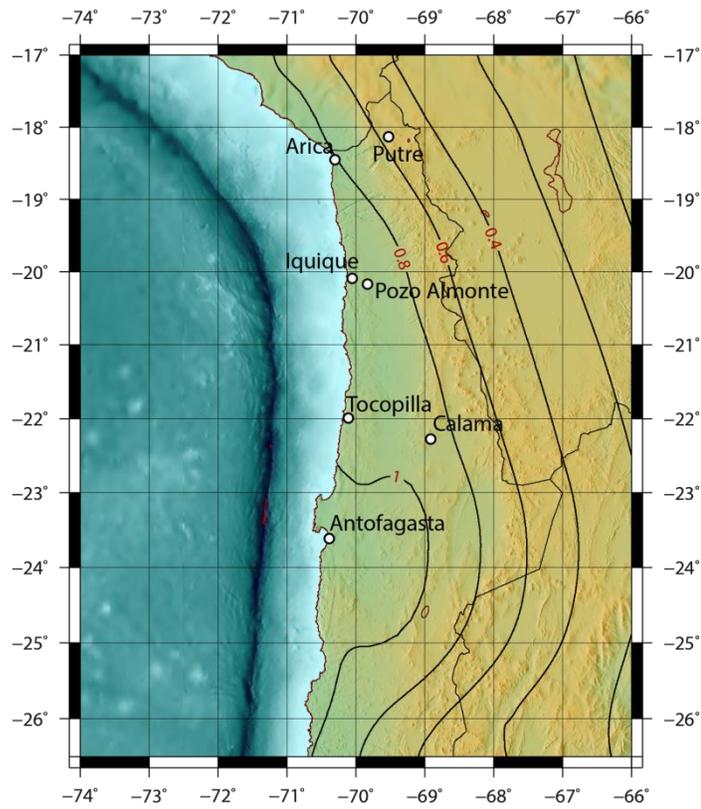


Figura B 379: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MMC

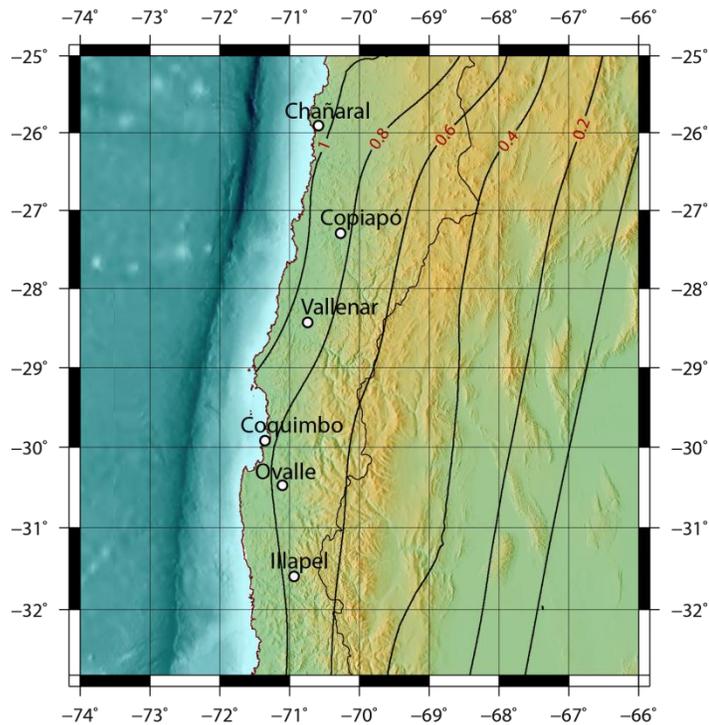


Figura B 380: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MMC

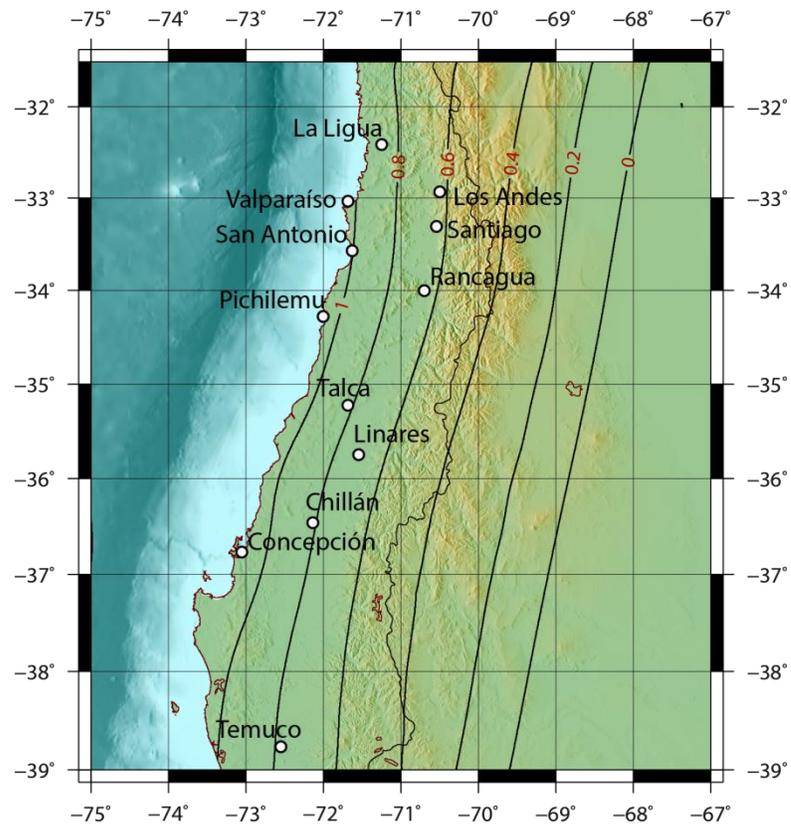


Figura B 381: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MMC

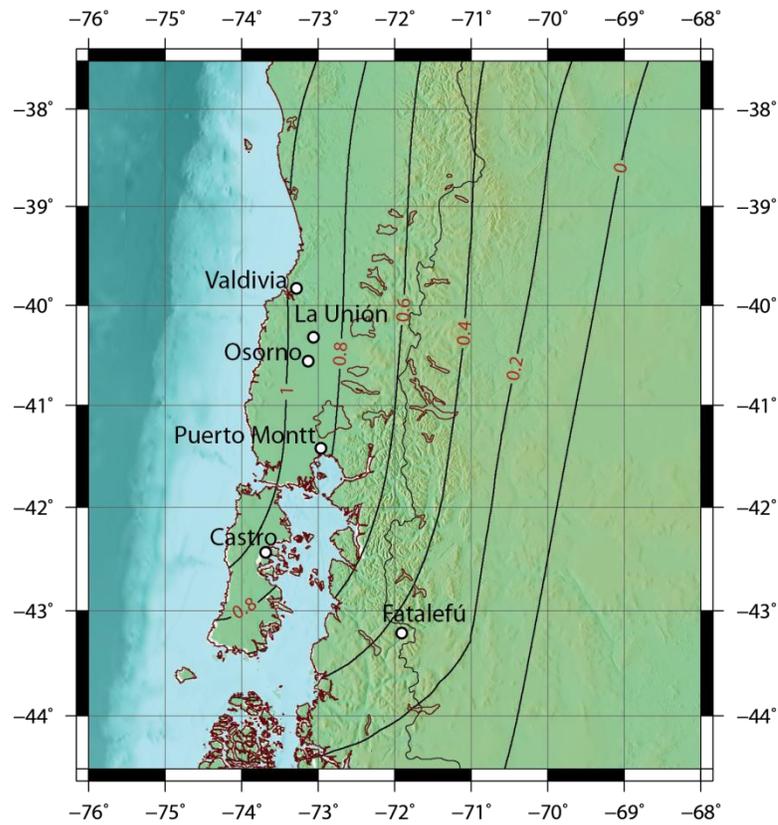


Figura B 382: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MMC

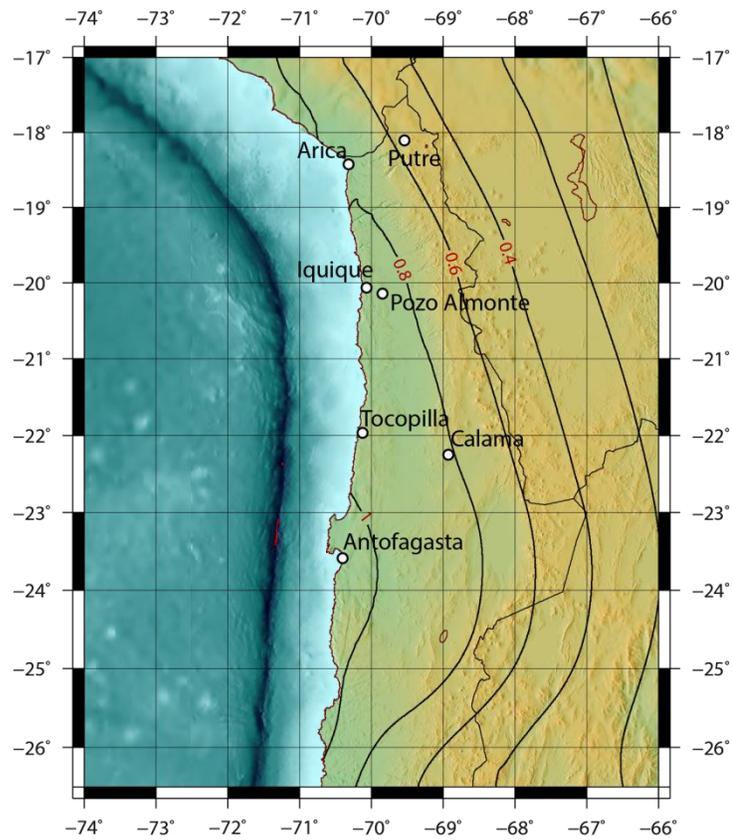


Figura B 383: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MV

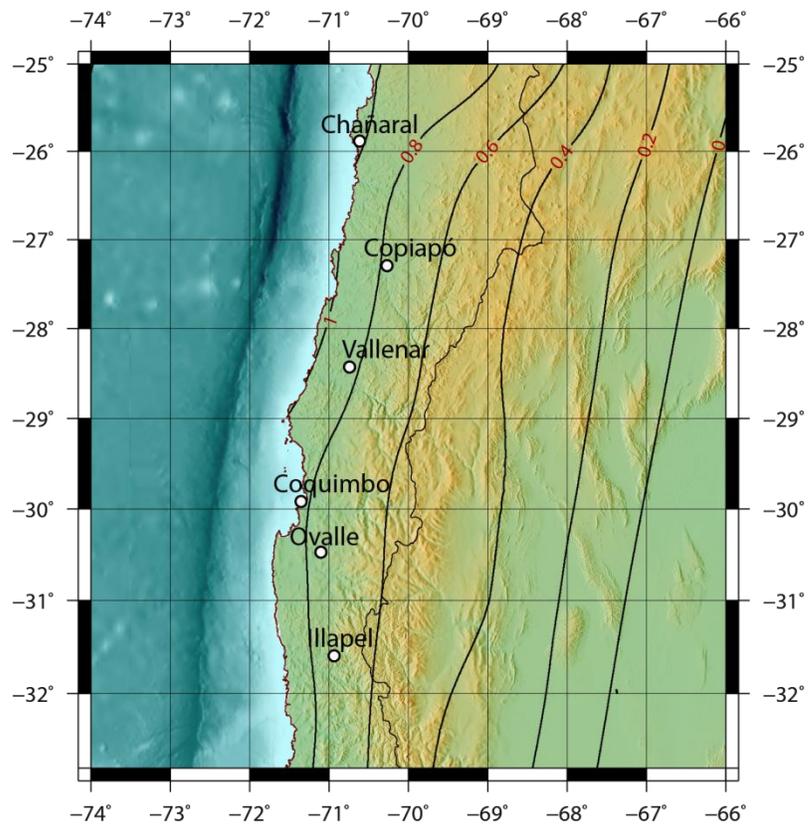


Figura B 384: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MV

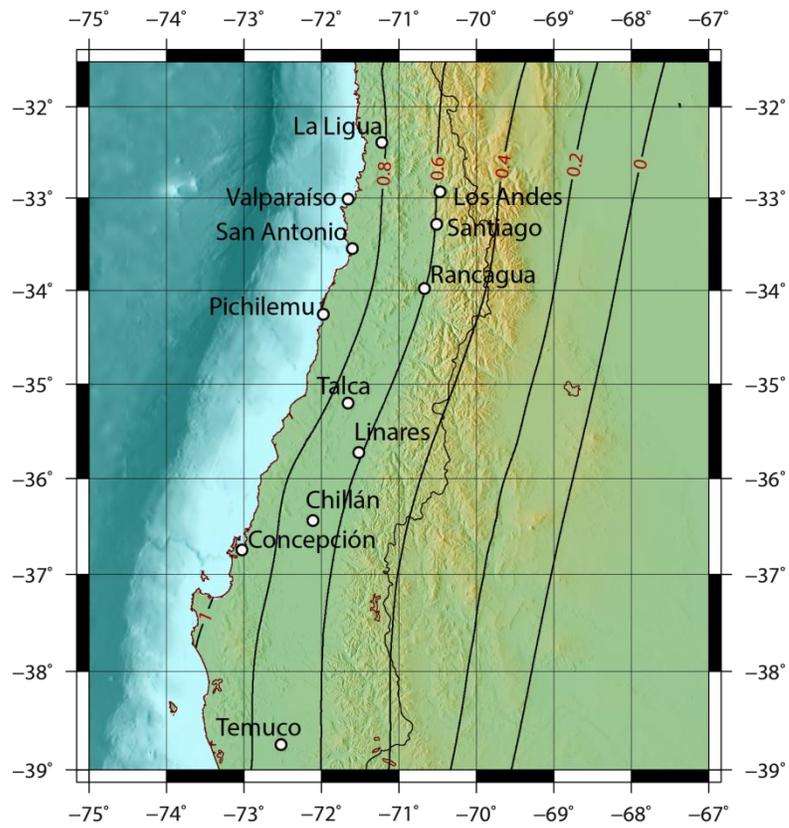


Figura B 385: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MV

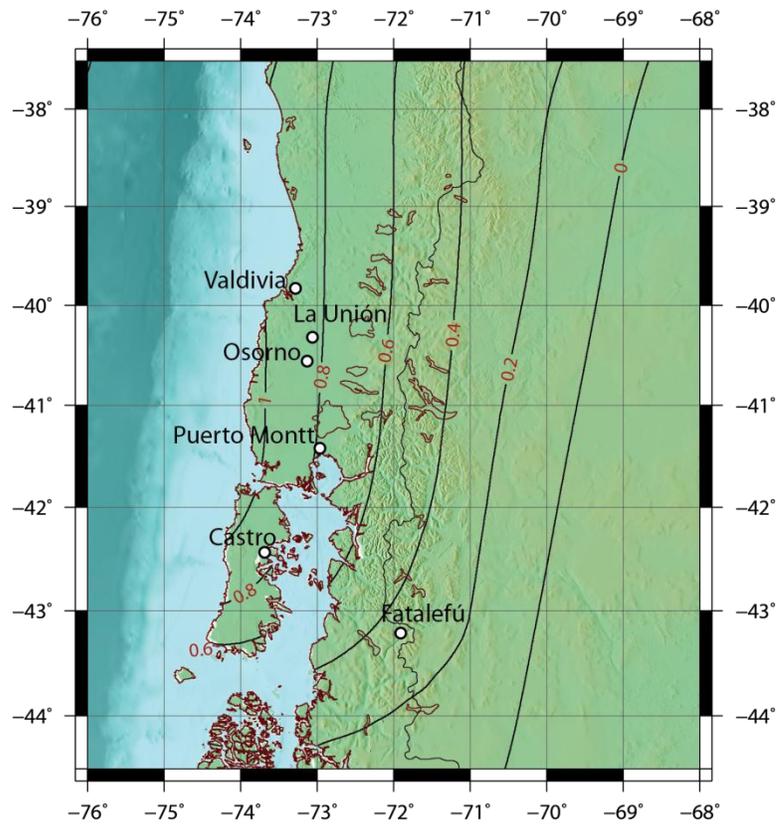


Figura B 386: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MV

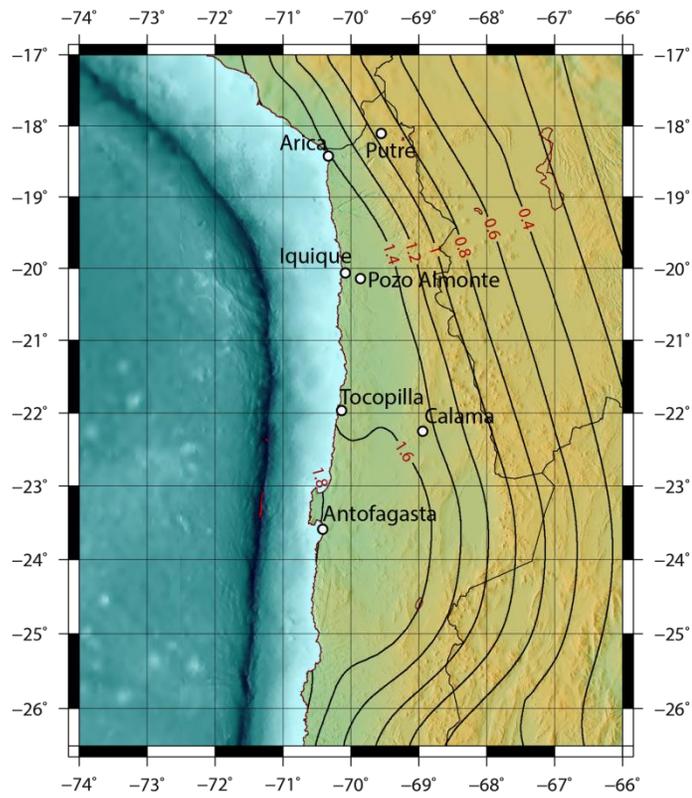


Figura B 387: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MMC

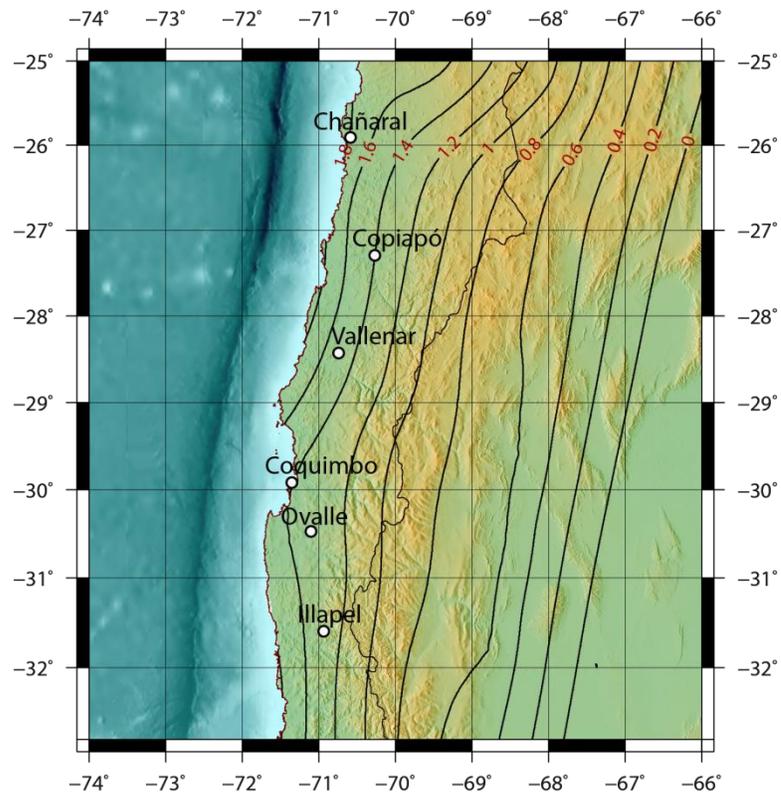


Figura B 388: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MMC

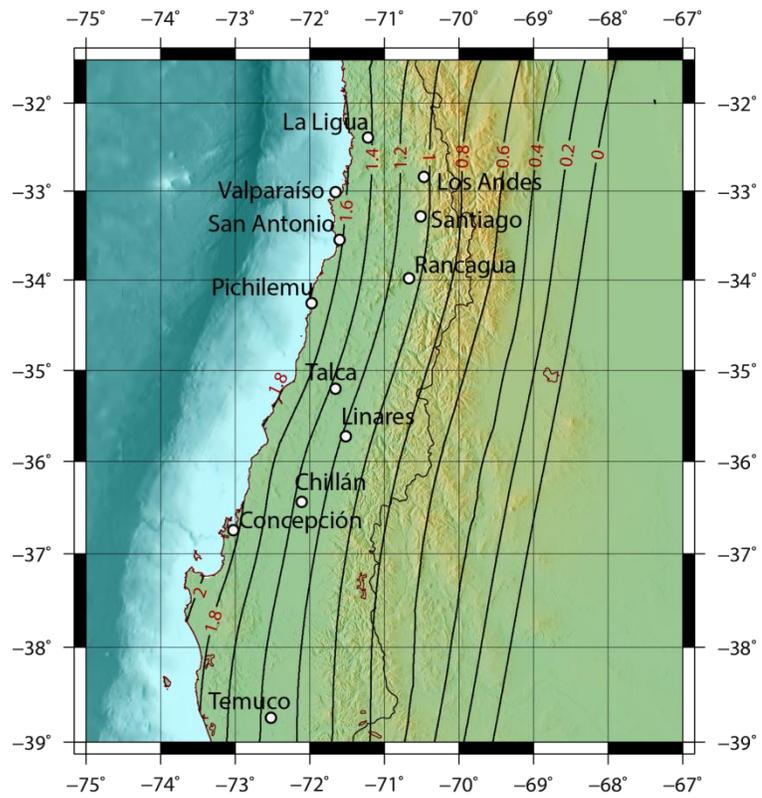


Figura B 389: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MMC

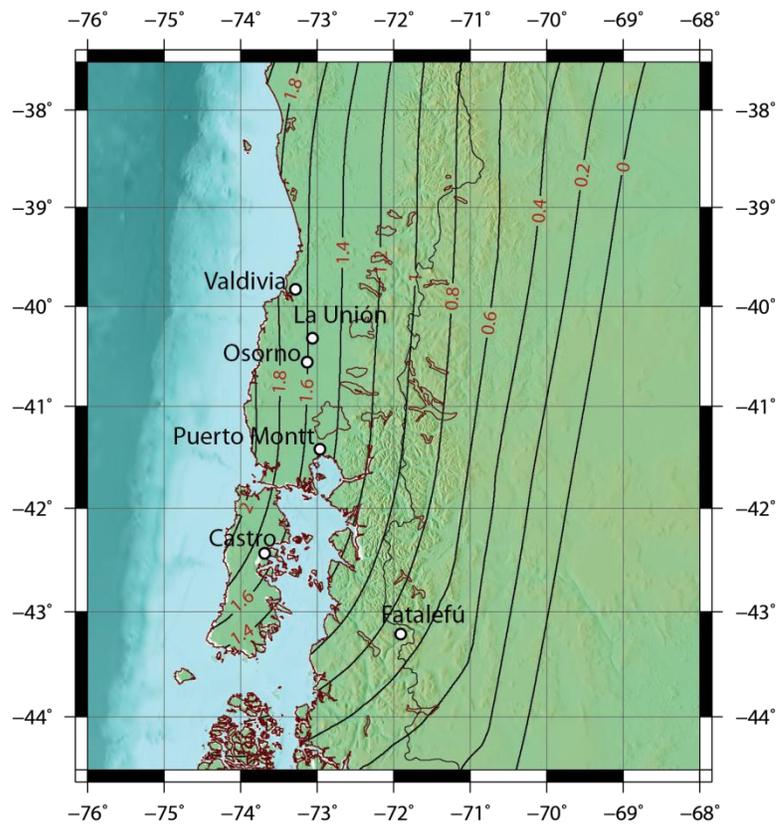


Figura B 390: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MMC

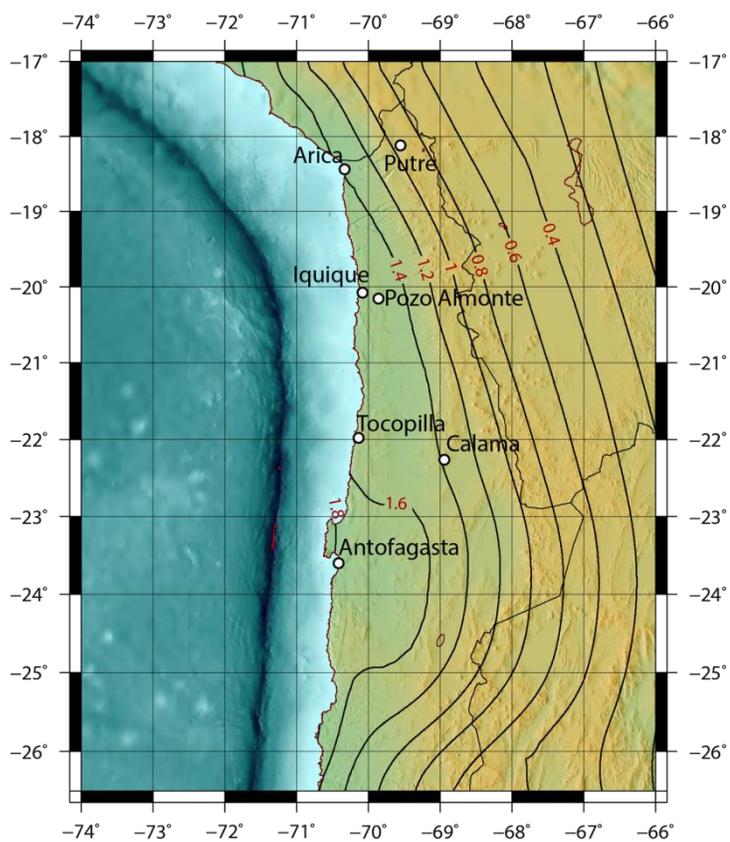


Figura B 391: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MV

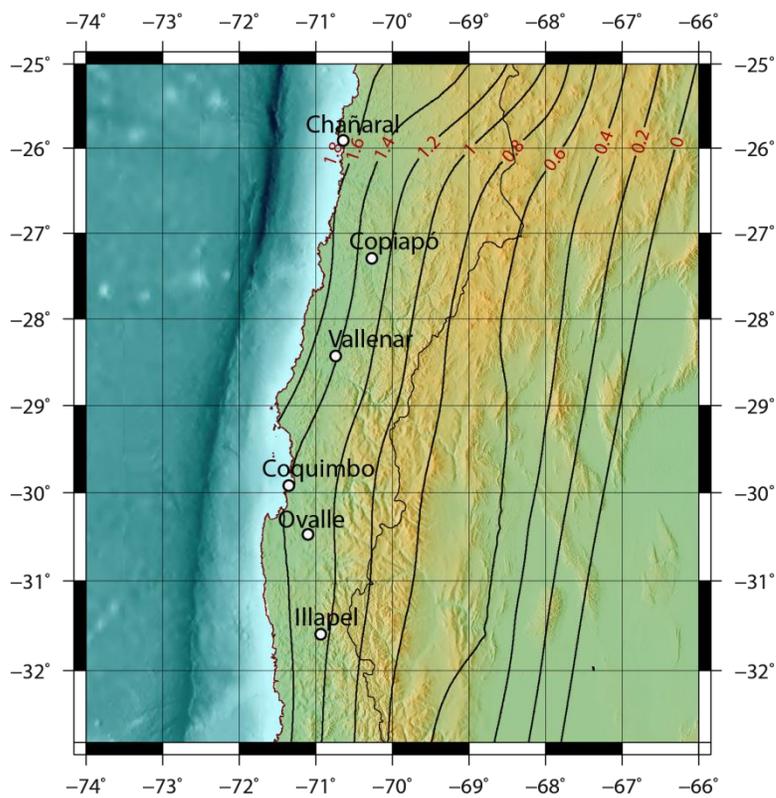


Figura B 392: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MV

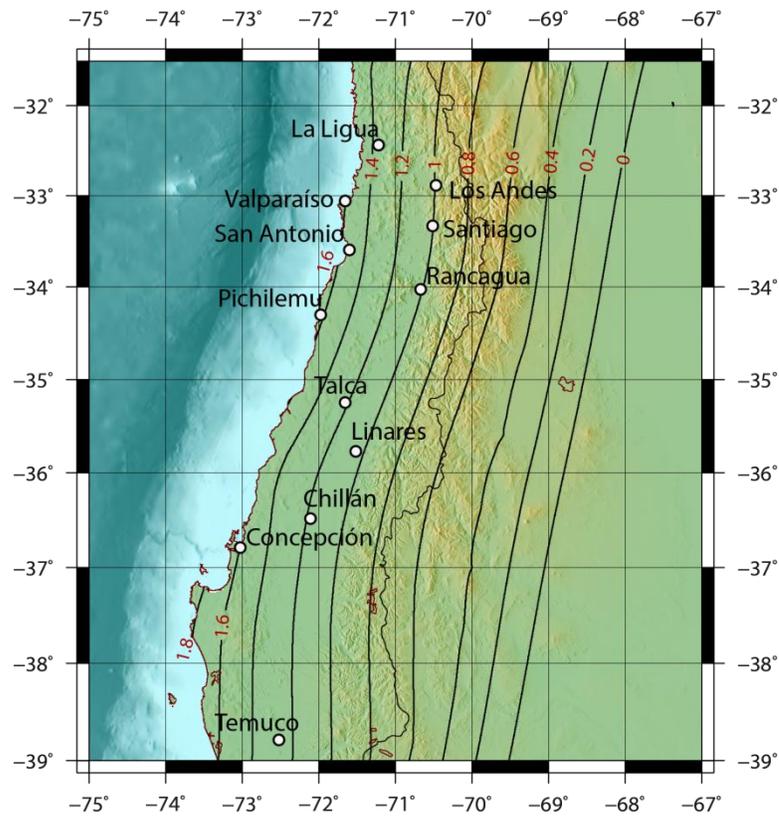


Figura B 393: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MV

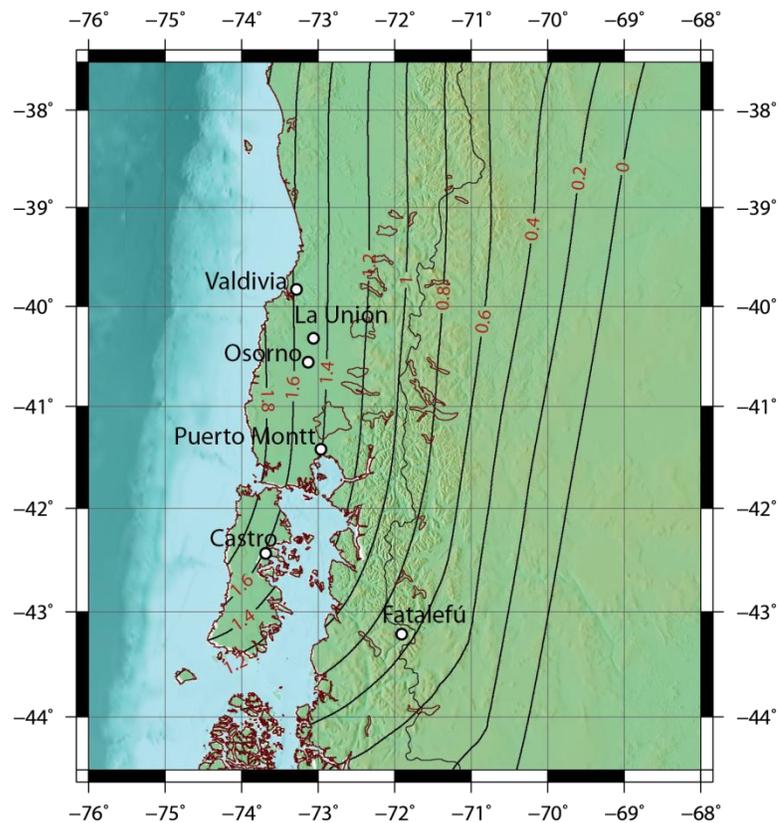


Figura B 394: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(0.2s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MV

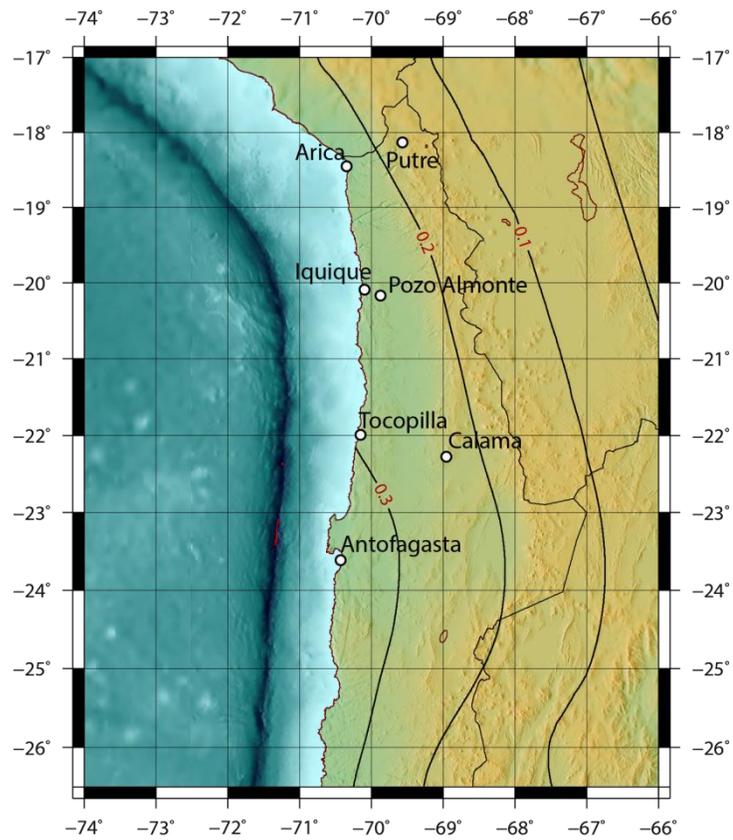


Figura B 395: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MMC

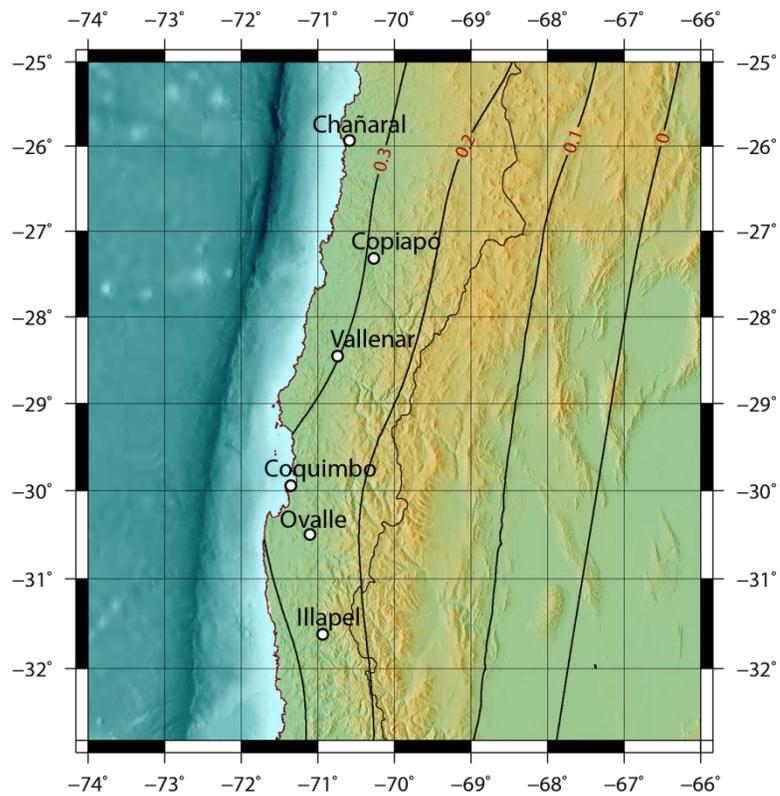


Figura B 396: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MMC

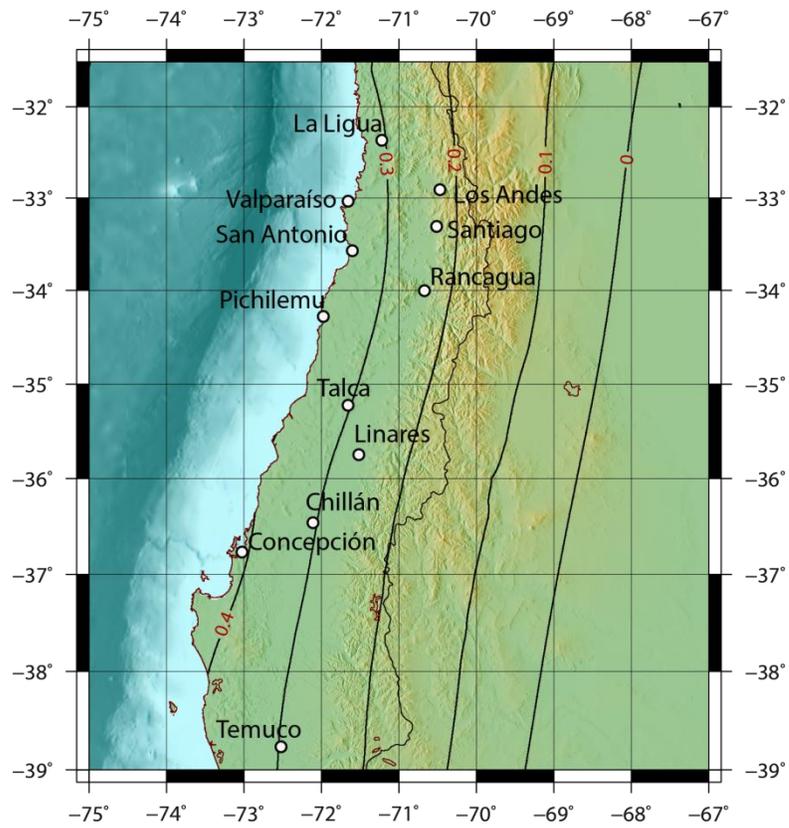


Figura B 397: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro, PR=475 años; GR: MMC

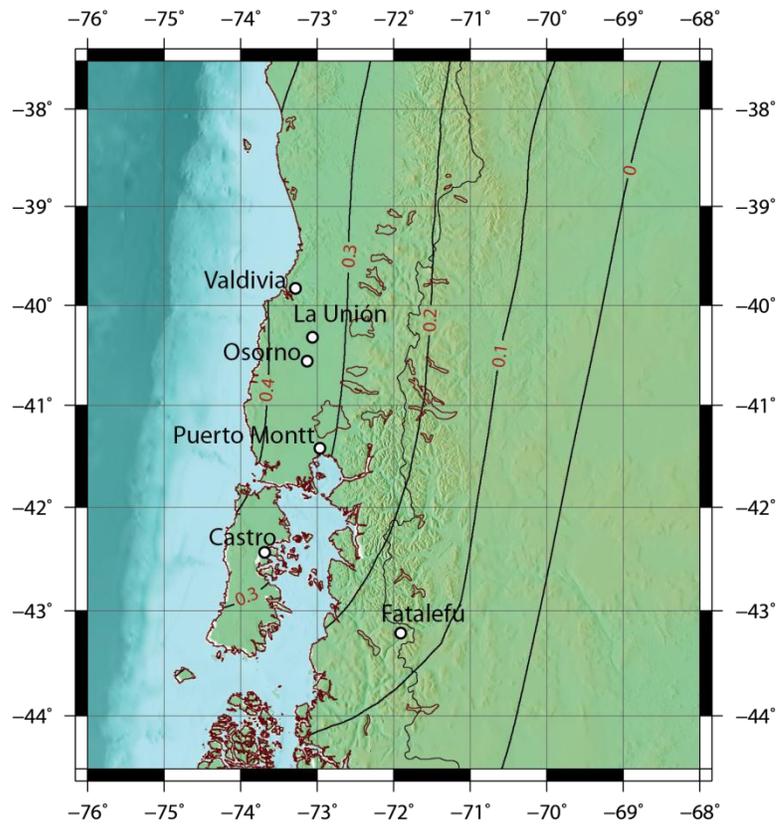


Figura B 398: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur, PR=475 años; GR: MMC

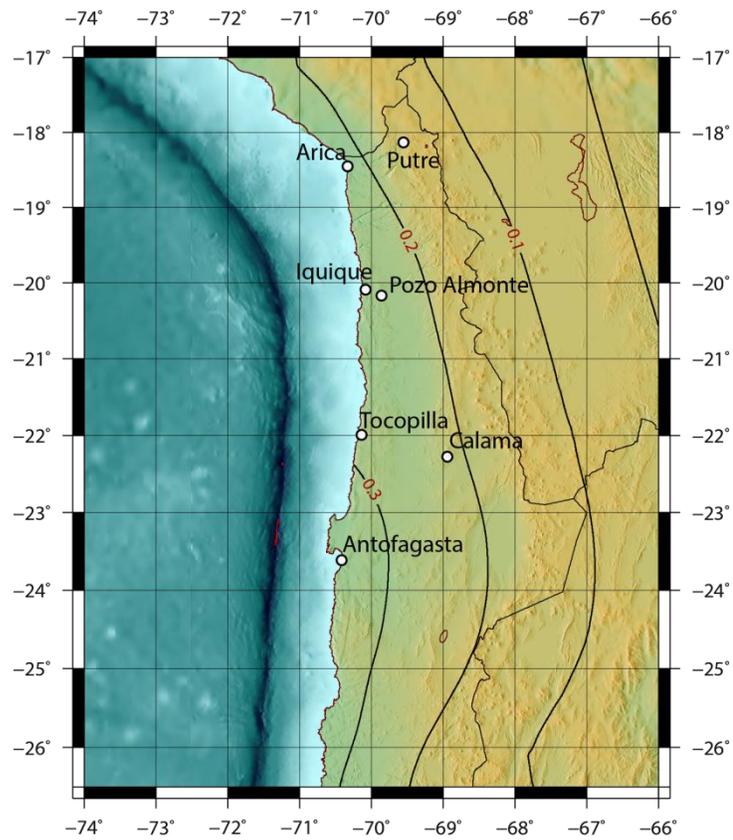


Figura B 399: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=475 años; GR: MV

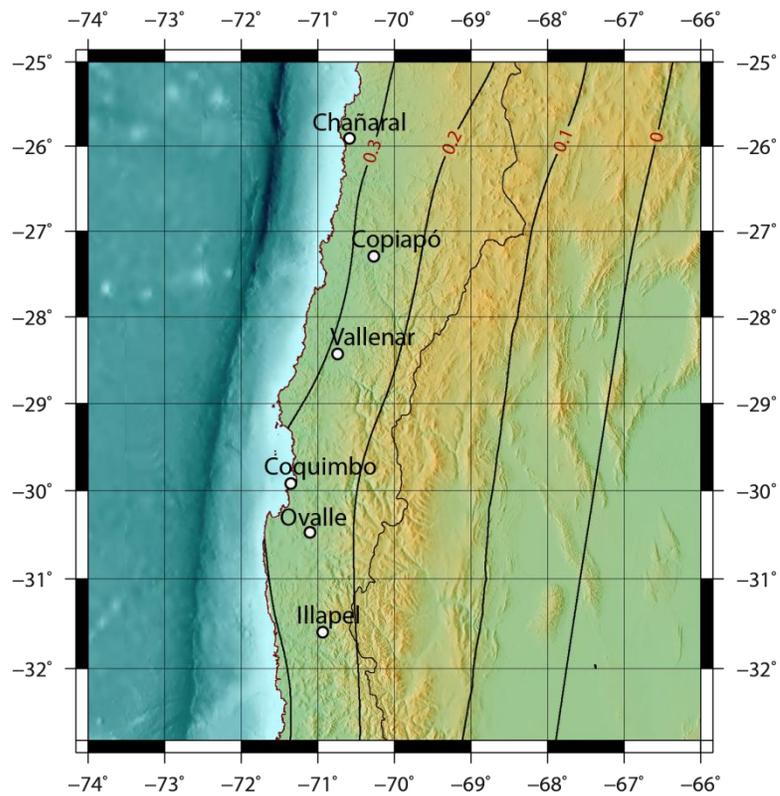


Figura B 400: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=475 años; GR: MV

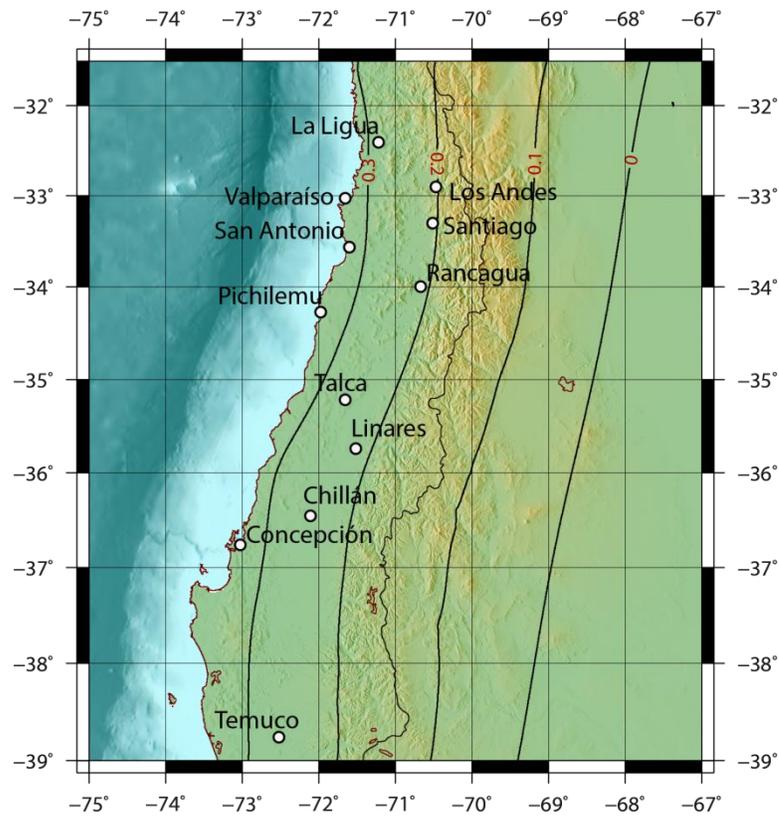


Figura B 401: Mapa de Isoaceleraciones en términos de $SA(1s)$ Zona Centro, $PR=475$ años; $GR: MV$

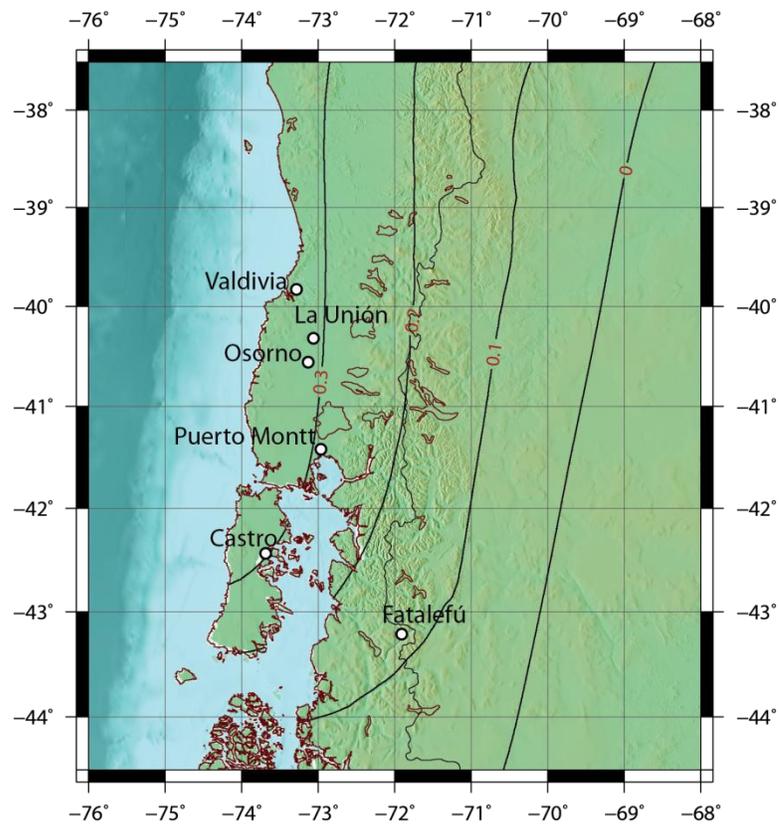


Figura B 402: Mapa de Isoaceleraciones en términos de $SA(1s)$ Zona Sur, $PR=475$ años; $GR: MV$

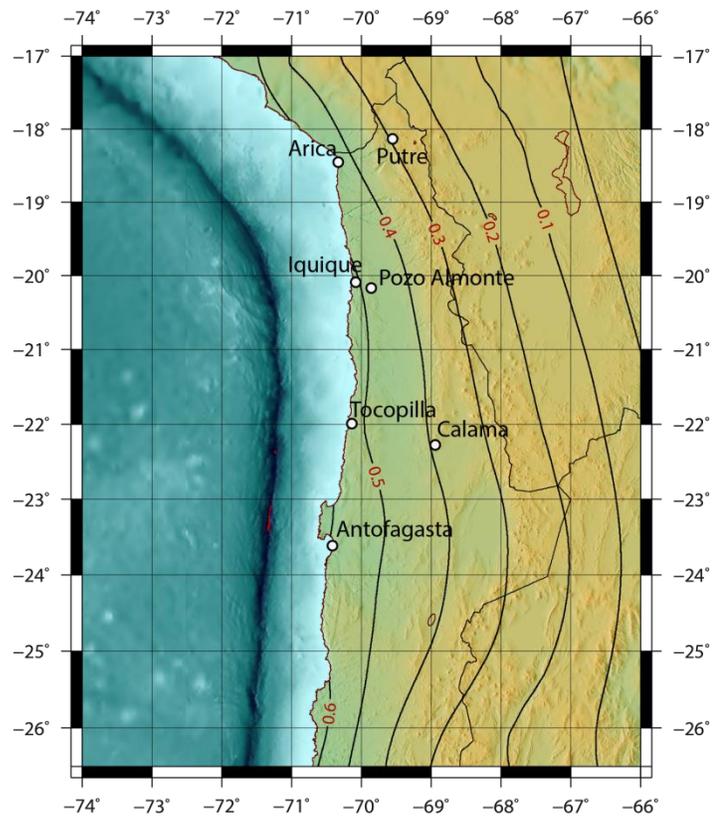


Figura B 403: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MMC

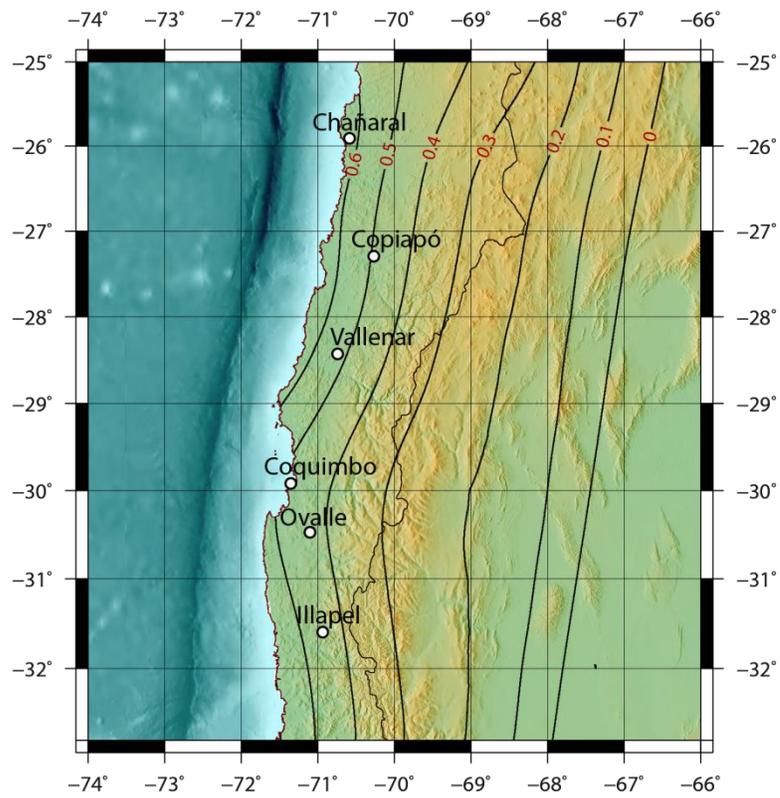


Figura B 404: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico, PR=2475 años; GR: MMC

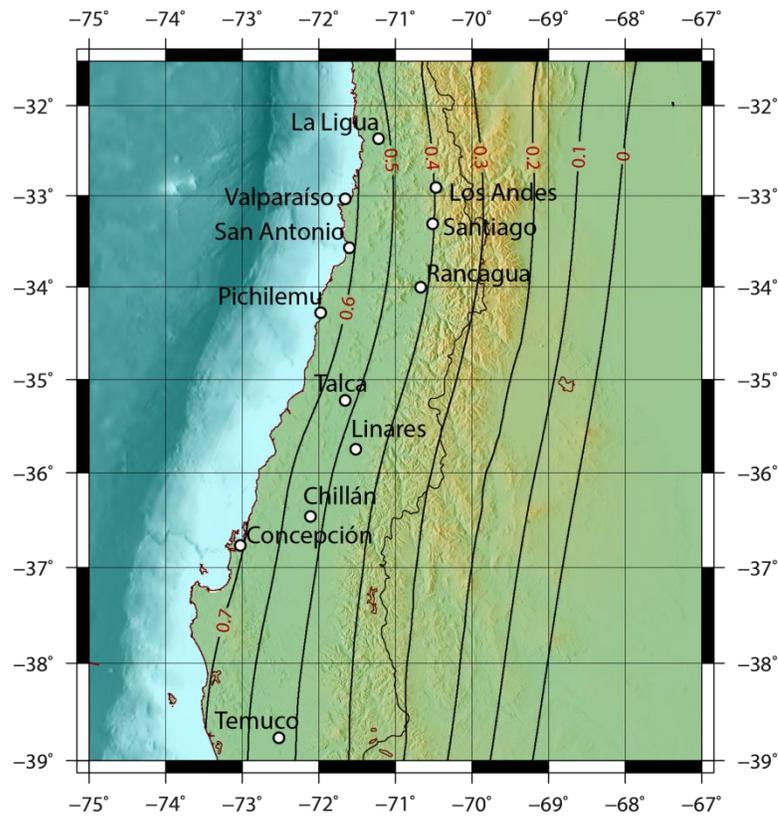


Figura B 405: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro, PR=2475 años; GR: MMC

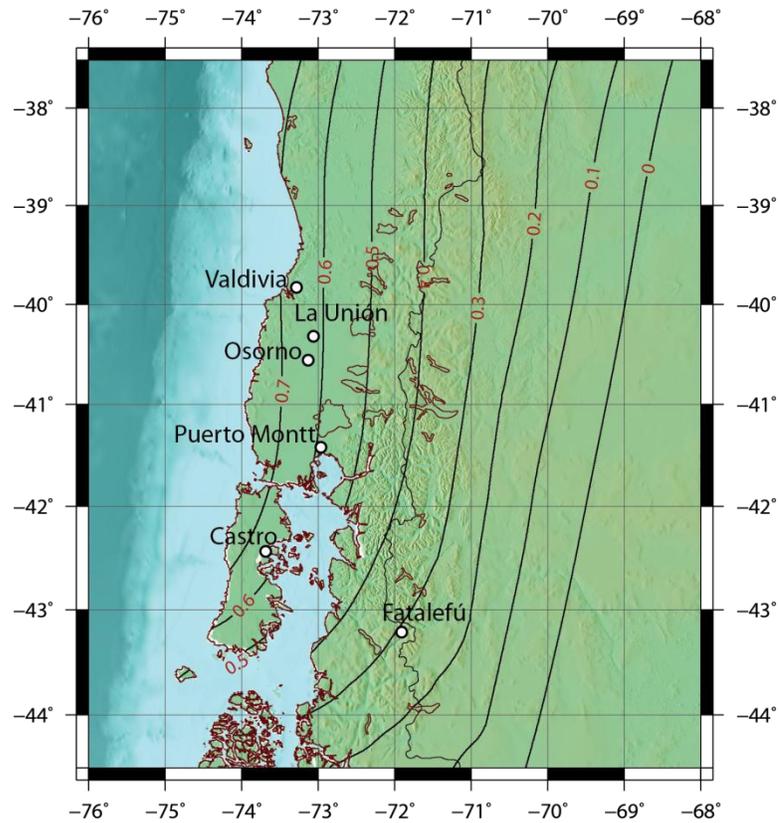


Figura B 406: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur, PR=2475 años; GR: MMC

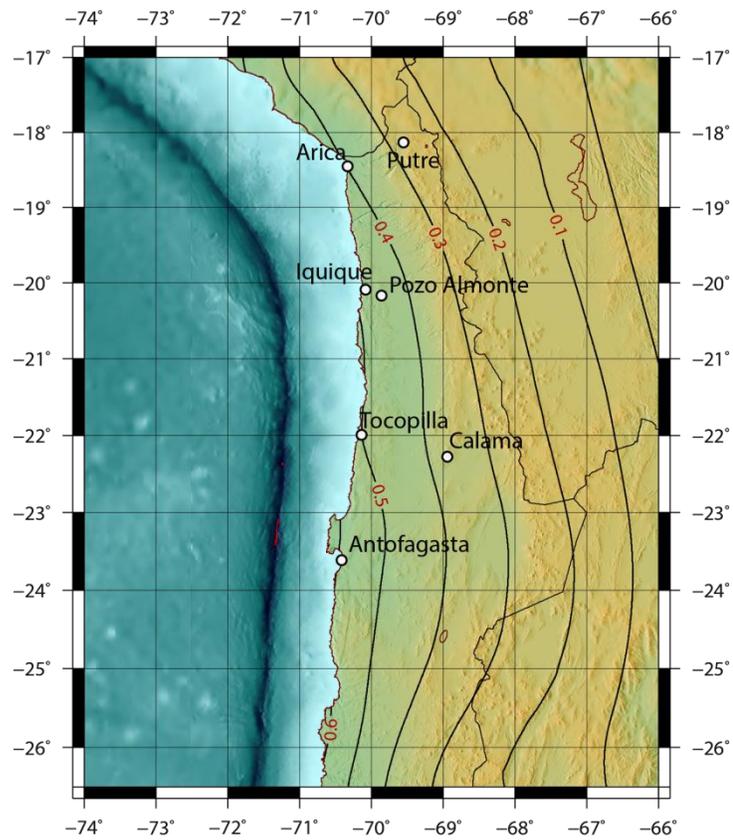


Figura B 407: Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Grande, PR=2475 años; GR: MV

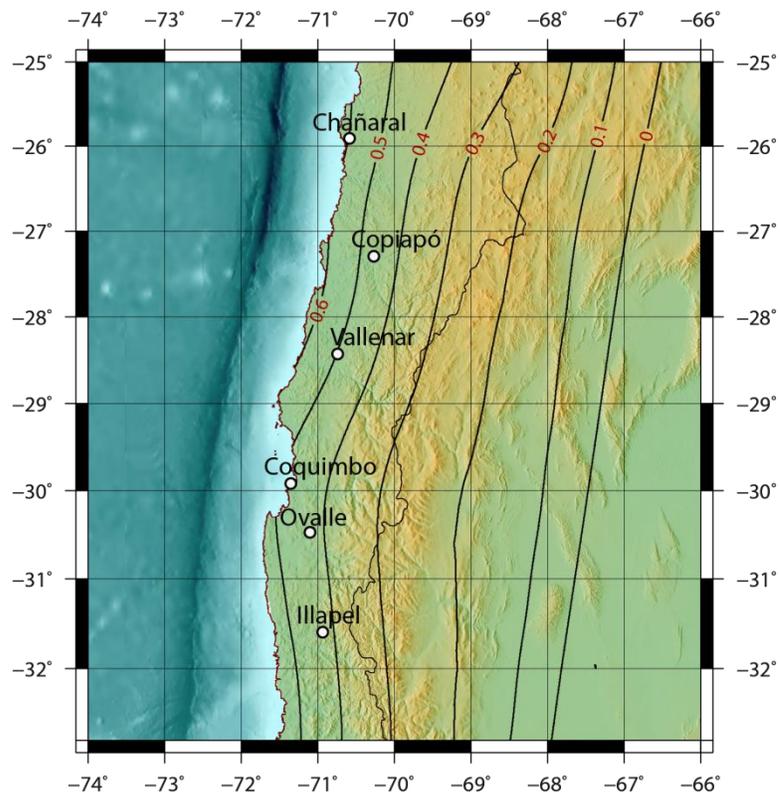


Figura B 408: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Norte Chico PR=2475 años; GR: MV

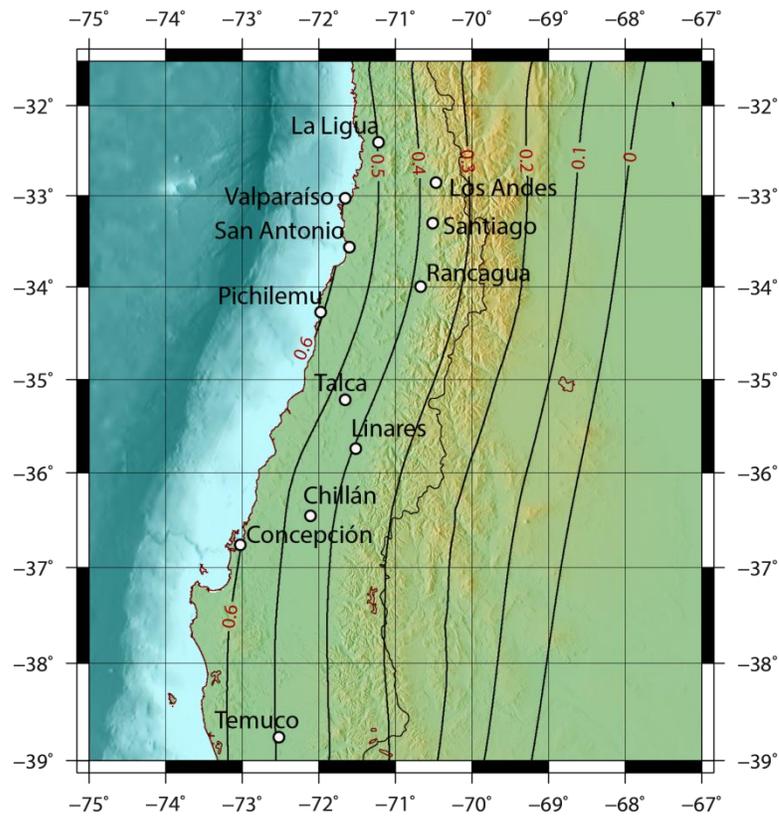


Figura B 409: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Centro PR=2475 años; GR: MV

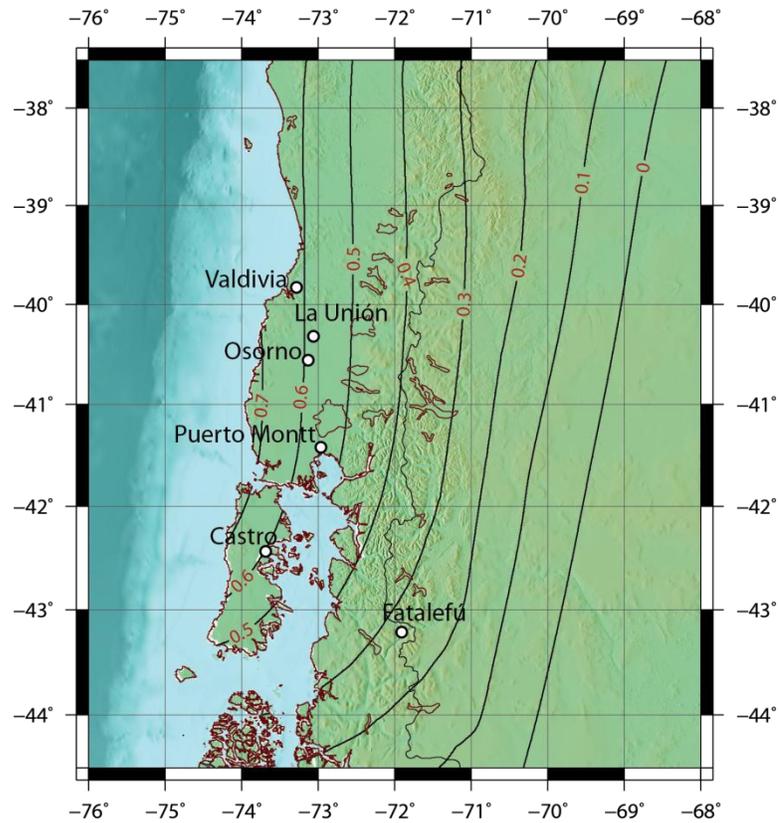


Figura B 410: : Mapa de Isoaceleraciones en términos de SA(1s) Zona Sur PR=2475 años; GR: MV