



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CURVAS DE ATENUACIÓN DE PARÁMETROS SÍSMICOS DE REGISTROS
DE MOVIMIENTO FUERTE EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA SOLEDAD CÉSPEDES RÍOS

PROFESOR GUÍA:

RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAFAEL RUIZ GARCÍA

FABIÁN ROJAS BARRALES

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL
POR: MARÍA SOLEDAD CÉSPEDES RÍOS
FECHA: JULIO DE 2017
PROF. GUÍA: SR. RUBÉN BOROSCHEK K.**

CURVAS DE ATENUACIÓN DE PARÁMETROS SÍSMICOS DE REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE EN CHILE

Producto de la alta sismicidad que caracteriza al país se hace necesario desarrollar herramientas para el estudio de peligro sísmico. Éstas proveen información significativa en lo que respecta a la estimación de demanda sísmica sobre las estructuras y del movimiento del suelo. Así, en el presente trabajo de título se tiene como objetivo desarrollar curvas de atenuación para dos parámetros sísmicos de registros de movimiento fuerte en Chile, la Intensidad de Arias y la duración del movimiento fuerte, utilizando el método de ajuste Bayesiano.

Se lleva a cabo una revisión bibliográfica donde se escogen algunos funcionales aplicables para la curva de atenuación de los parámetros en estudio. Se desarrolla una base de datos de sismos chilenos con la información necesaria de todos los eventos y estaciones utilizadas, sumando un total de 1117 registros correspondientes a 311 eventos con magnitudes desde $4,5 M_w$ hasta $8,8 M_w$ y distancias a la ruptura que varían de 22,1 [km] hasta 1026,01 [km]. El ajuste de las constantes se realiza utilizando un método de actualización Bayesiano, el cual permite actualizar la estimación de parámetros con incertidumbre. Para escoger el funcional que mejor se ajusta a cada parámetro se verifican los residuos, se comparan las desviaciones estándar, se comprueba que los resultados tengan sentido físico, entre otros. Es así como se obtienen los modelos predictivos de movimiento del suelo para la Intensidad de Arias, la duración significativa y la duración entre intervalos, en función de la magnitud de momento (M_w), la fuente sismogénica, la profundidad del sismo (h), la distancia más cercana a la falla (R) y la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 metros (V_{s30}).

La curva obtenida para la Intensidad de Arias presenta una desviación estándar del error de 1,19, la cual se justifica por la variabilidad natural que presenta el parámetro. En cuanto a la duración significativa se utiliza un intervalo de 5%-95% de energía liberada, obteniendo una curva con una desviación estándar de 0,47. Para la duración entre intervalos se utiliza un límite de 0,05g, donde se obtiene una desviación estándar del error de 1,09, que se justifica en parte por la cantidad más limitada de registros utilizados, esto debido a que el ajuste se realiza únicamente con registros con duraciones entre intervalos mayores a cero, incorporando el resto por medio de un método de clasificación basado en *Support Vector Machine*. Los residuos obtenidos para las tres curvas no presentan ninguna tendencia en relación a M_w , V_{s30} y R , además para la Intensidad de Arias los residuos presentan una distribución normal. Para la duración significativa los residuos muestran una distribución cercana a la normal y para la duración entre intervalos no presentan una distribución normal.

A mi mamá
Por todo su apoyo y dedicación

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han entregado durante todo el desarrollo de mi carrera universitaria, el colegio y lo que vino antes de eso. A mi mamá por siempre enseñarme y mostrarme que las mujeres podemos hacer cualquier cosa, sin importar lo que diga el resto, y que siempre hay que andar con herramientas en la cartera, también por acompañarme en los momentos difíciles de la universidad y por darnos comida a mí a mis amigos cuando nos quedábamos todo el fin de semana trabajando; a mi papá por siempre estar preocupado de cómo me estaba yendo en la universidad y que ramos estaba tomando para ver si podía pasarme algún libro; a mis abuelos paternos por siempre preocuparse por mí y emocionarse porque su querida nieta por fin está terminando esta etapa; a mi abuelita Marta por siempre habernos tenido presente en sus pensamientos.

También agradecer a mis amigas del colegio, con quienes nos seguimos viendo a pesar de los años que han pasado. Por aquellos paseos a la playa, esas tardes de copuchas y de deliciosa comida preparada por nosotras, por hablar de una forma extraña que poca gente entiende y por hacernos tanto bullying.

A mis amigas y amigos de la universidad, con quienes a pesar de no compartir ramos hace varios años seguimos en contacto, ya sea en tardes de película, idas a la nieve o entrenando. A mis amigos de civil, con quienes sufrimos y sobrevivimos juntos a todos los ramos, informes, tareas y laboratorios, sin ellos todo esto hubiera sido mucho más difícil. A todos los de la Pecera y la Geopecera, por hacer esos largos días de trabajo más entretenidos. Gracias a todos mis amigos a los que fui a molestar tantas veces para que me ayudaran a resolver problemas con la memoria.

También agradecer a mi profesor guía Rubén Boroschek por permitirme realizar este trabajo con él, por todos sus consejos y guía para poder realizar esta memoria; al profesor Rafael Ruíz por toda su paciencia, disposición e interés por ayudarme a desarrollar este trabajo; al profesor Fabián Rojas por sus correcciones y comentarios desde una perspectiva diferente.

En fin, me siento feliz de por fin poder terminar esta etapa, gracias a todos los que me ayudaron a completarla.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Metodología	2
1.3.1	Revisión bibliográfica	2
1.3.2	Identificar y ordenar la base de datos	2
1.3.3	Cálculo de parámetros	2
1.3.4	Herramienta de ajuste	3
1.3.5	Obtención del funcional y curva de atenuación	3
1.3.6	Análisis y conclusiones	3
1.4	Resultados esperados	3
1.5	Organización del informe	3

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1	Marco sismotectónico.....	5
2.2	Variables consideradas en el estudio	7
2.3	Parámetros en estudio.....	8
2.3.1	Intensidad de Arias	8
2.3.2	Duración del movimiento fuerte	9
2.4	Antecedentes de curvas de atenuación.....	11
2.4.1	Funcionales para la Intensidad de Arias	11
2.4.2	Funcionales para la duración significativa.....	15
2.4.3	Funcionales para la duración entre intervalos	17

CAPÍTULO 3: BASE DE DATOS

3.1	Eventos de la base de datos	19
3.1.1	Variables consideradas y datos disponibles	19
3.1.2	Distribución de los eventos de la base de datos	20
3.2	Estaciones de la base de datos.....	23
3.2.1	Variables consideradas y datos disponibles	23
3.2.2	Distribución de las estaciones de la base de datos	24
3.3	Registros de la base de datos	26
3.3.1	Variables consideradas y datos disponibles	27
3.3.2	Distribución de los registros de la base de datos	27
3.4	Descripción general de los datos	32

CAPÍTULO 4: OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE ATENUACIÓN

4.1	Modelos de atenuación	38
4.1.1	Modelos de atenuación para la Intensidad de Arias	38
4.1.2	Modelos de atenuación para la duración significativa	40
4.1.3	Modelos de atenuación para la duración entre intervalos	41
4.2	Método de ajuste.....	42
4.3	Resultados de los ajustes	47
4.3.1	Resultados de los ajustes para la Intensidad de Arias	49
4.3.2	Resultados de los ajustes para la duración significativa	63
4.3.3	Resultados de los ajustes para la duración entre intervalos	75
4.3.4	Comparación de resultados entre la Intensidad de Arias y la duración significativa.....	91

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	92
5.2	Recomendaciones	96

BIBLIOGRAFÍA

97

ANEXO A: INFORMACIÓN DE EVENTOS, ESTACIONES Y REGISTROS

A.1	Caracterización de eventos	100
A.2	Caracterización de estaciones	103
A.3	Caracterización general de los datos	104

ANEXO B: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LOS MODELOS DE ATENUACIÓN UTILIZADOS.....

107

ANEXO C: DEMOSTRACIONES

C.1	Demostración N°1	110
C.2	Demostración N°2	111

ANEXO D: RESULTADOS

D.1	Resultados para modelos de atenuación de Intensidad de Arias.....	112
D.2	Resultados para modelos de atenuación de duración significativa	128
D.3	Resultados para modelos de atenuación de duración entre intervalos	139
D.4	Resultados curvas de excedencia de duración del movimiento fuerte para sitios con roca	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Distribución de eventos según fuente sismogénica.....	20
Tabla 3.2: Distribución de eventos según magnitud.	21
Tabla 3.3: Distribución de eventos según año de ocurrencia.....	22
Tabla 3.4: Clasificación de suelo. Fuente: DS N°61.	24
Tabla 3.5: Distribución de estaciones según $Vs30$	25
Tabla 3.6: Distribución de estaciones según tipo de suelo.	26
Tabla 3.7: Distribución de registros según magnitud.	27
Tabla 3.8: Distribución de registros según fuente sismogénica.	28
Tabla 3.9: Distribución de registros según $Vs30$	29
Tabla 3.10: Distribución de registros según tipo de suelo.	30
Tabla 3.11: Distribución de registros según distancia a la ruptura.	31
Tabla 4.1: Resultados de los ajustes para las curvas de Intensidad de Arias.....	50
Tabla 4.2: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.....	52
Tabla 4.3: Matriz de covarianza (Σ) de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.	53
Tabla 4.4: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.	53
Tabla 4.5: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la Intensidad de Arias.....	54
Tabla 4.6: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la Intensidad de Arias. ...	60
Tabla 4.7: Resultados de los ajustes para las curvas de duración significativa.	64
Tabla 4.8: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.	65
Tabla 4.9: Matriz de covarianza de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.....	65
Tabla 4.10: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.	65
Tabla 4.11: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la duración significativa.....	66
Tabla 4.12: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la duración significativa.	74
Tabla 4.13: Resultados de los ajustes para las curvas de duración entre intervalos.	76

Tabla 4.14: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.	77
Tabla 4.15: Matriz de covarianza de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.....	78
Tabla 4.16: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.	78
Tabla 4.17: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la duración entre intervalos.	79
Tabla 4.18: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la duración significativa.	87
Tabla 4.19: Pendientes y coeficientes de posición para las rectas de probabilidad de la Figura 4.27.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Marco tectónico de Chile. Fuente: www.sismologia.cl	6
Figura 2.2: Zona de subducción y tipos de sismos en ella. Fuente: www.sismologia.cl	7
Figura 2.3: Cálculo de la duración significativa D_{5-75} y D_{5-95} para sismo registrado en el sitio de North Palm Springs Airport. Fuente: Kempton & Stewart, 2006.	10
Figura 2.4: Cálculo de la duración entre intervalos (límite de 0,05 g) para el acelerograma 1125S17L del sismo Saguenay de 1988 de magnitud 5,9 y distancia a la ruptura 70,3 [km]. Fuente: Lee y Green, 2012.	10
Figura 3.1: Distribución en planta de los eventos disponibles separados por fuente sismogénica.	20
Figura 3.2: Histograma de eventos según fuente sismogénica.	21
Figura 3.3: Histograma de eventos según magnitud.	22
Figura 3.4: Histograma de eventos según año.	23
Figura 3.5: Distribución en planta de las estaciones utilizadas.	24
Figura 3.6: Histograma de estaciones según velocidad de onda de corte.	25
Figura 3.7: Histograma de estaciones según el tipo de suelo.	26
Figura 3.8: Histograma de registros según magnitud.	28
Figura 3.9: Histograma de registros según fuente sismogénica.	29
Figura 3.10: Histograma de registros según velocidad de onda de corte.	30
Figura 3.11: Histograma de registros según tipo de suelo.	31
Figura 3.12: Histograma de registros según distancia a la ruptura.	32
Figura 3.13: Magnitud de momento vs distancia a la ruptura de los registros utilizados.	33
Figura 3.14: PGA vs distancia a la ruptura de los registros utilizados.	34
Figura 3.15: Promedio de la Intensidad de Arias de las componentes horizontales vs distancia a la ruptura.	34
Figura 3.16: Duración significativa (5%-95%) vs distancia a la ruptura.	35
Figura 3.17: Duración significativa (5%-95%) vs magnitud de momento.	35
Figura 3.18: Duración entre intervalos (0,05g) vs distancia a la ruptura.	36
Figura 3.19: Duración entre intervalos (0,05g) vs magnitud de momento.	36
Figura 3.20: Magnitud de momento vs distancia a la ruptura para datos de duración entre intervalos (0,05g) separado según si es duración nula o mayor a cero.	37

Figura 4.1: Curvas de atenuación obtenidas para la Intensidad de Arias. a) Curva para sismos interplaca tipo thrust con $h=20$ [km]. b) Curva para sismos interplaca tipo thrust con $h=40$ [km]. c) Curva para sismos intraplaca profundidad intermedia con $h=80$ [km]. d) Curva para sismos intraplaca profundidad intermedia con $h=100$ [km].	55
Figura 4.2: Curvas de atenuación de Intensidad de Arias para sismos interplaca tipo thrust ($h=60$ [km]). a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.	56
Figura 4.3: Curvas de atenuación de Intensidad de Arias para sismos intraplaca de profundidad intermedia ($h=60$ [km]). a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.	57
Figura 4.4: Residuos para la curva de atenuación de Intensidad de Arias. a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs Vs_{30} . c) Residuos vs R .	58
Figura 4.5: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de Intensidad de Arias.	59
Figura 4.6: Curvas de excedencia del 10% para curvas de atenuación de Intensidad de Arias. a) Sismos interplaca, suelo y $h=40$ [km]. b) Sismos interplaca, roca y $h=40$ [km]. c) Sismos intraplaca, suelo y $h=80$ [km]. d) Sismos intraplaca, roca y $h=80$ [km].	60
Figura 4.7: Comparación de la curva de atenuación de Intensidad de Arias obtenida en este estudio con la de otros autores.	61
Figura 4.8: Comparación curvas de excedencia para ver el efecto de la desviación estándar de las constantes y del error, para sismos interplaca, sitios con suelo y $h=40$ [km]. a) Curvas de excedencia incluyendo solo la desviación estándar de las constantes. b) Curvas de excedencia incluyendo solo la desviación estándar del error. c) Curvas de excedencia incluyendo tanto las desviaciones estándar de las constantes como las del error.	62
Figura 4.9: Curvas de atenuación obtenidas para la duración significativa (5%-95%). a) Curva SD vs R para sismos interplaca tipo thrust. b) Curva SD vs R para sismos intraplaca de profundidad intermedia. c) Curva SD vs M_w para sismos interplaca tipo thrust. d) Curva SD vs M_w para sismos intraplaca de profundidad intermedia.	67
Figura 4.10: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas en curvas de SD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.	68
Figura 4.11: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas en curvas de SD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].	69

Figura 4.12: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos intraplaca de profundidad intermedia, presentadas en curvas de SD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$	70
Figura 4.13: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos intraplaca de profundidad intermedia, presentadas en curvas de SD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].	71
Figura 4.14: Residuos para la curva de atenuación de duración significativa (5%-95%). a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs V_s30 . c) Residuos vs R	72
Figura 4.15: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración significativa (5%-95%).	73
Figura 4.16: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%). a) Curva presentada como SD vs R , sismo interplaca, suelo. b) Curva presentada como SD vs M_w , sismo interplaca, suelo. c) Curva presentada como SD vs R , sismo intraplaca, suelo. d) Curva presentada como SD vs M_w , sismo intraplaca, suelo.	74
Figura 4.17: Comparación de la curva de atenuación de duración significativa obtenida en este estudio con la de otros autores.	75
Figura 4.18: Curvas de atenuación obtenidas para la duración entre intervalos (0,05g). a) Curva BD vs R para sismos interplaca tipo thrust. b) Curva BD vs R para sismos intraplaca de profundidad intermedia. c) Curva BD vs M_w para sismos interplaca tipo thrust. d) Curva BD vs M_w para sismos intraplaca de profundidad intermedia.	80
Figura 4.19: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas como BD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$	81
Figura 4.20: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas como BD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].	82
Figura 4.21: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos intraplaca profundidad intermedia, presentadas como BD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$	83
Figura 4.22: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos intraplaca profundidad intermedia, presentadas como BD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].	84

Figura 4.23: Residuos para la curva de atenuación de duración entre intervalos (0,05g). a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs V_s30 . c) Residuos vs R	85
Figura 4.24: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración entre intervalos (0,05g).....	86
Figura 4.25: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sitios con suelo. a) Curva presentada como BD vs R , sismo interplaca. b) Curva presentada como BD vs M_w , sismo interplaca. c) Curva presentada como BD vs R , sismo intraplaca. d) Curva presentada como BD vs M_w , sismo intraplaca.	87
Figura 4.26: Comparación de la curva de atenuación de duración entre intervalos obtenida en este estudio con la de otros autores.	88
Figura 4.27: Clasificación de duraciones entre intervalos utilizando el límite de 0,05g por medio del método de clasificación basado en Support Vector Machine (SVM).	90

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Chile se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas del mundo, lo cual se debe a que es parte de un sistema de subducción de aproximadamente 5000 kilómetros con una velocidad de convergencia de 6,8 [cm/año], donde la placa de Nazca se desliza bajo la placa Sudamericana. A lo largo de la historia se han registrado grandes eventos en Chile, entre los que se encuentran el terremoto de Valdivia de 1960 con una magnitud de 9,5 M_w , el más grande registrado en el mundo hasta la fecha, el terremoto de Algarrobo de 1985 con una magnitud de 7,9 M_w , el terremoto del Maule en 2010 con una magnitud de 8,8 M_w , entre otros. Todos estos eventos han provocado grandes daños y pérdidas para el país, tanto en vidas humanas como en infraestructura, es por este motivo que se hace necesario prever los efectos que los grandes eventos, junto con los de menor magnitud, tienen sobre el territorio nacional. Para lo anterior se utilizan algunos parámetros sísmicos que permiten conocer la respuesta del suelo frente a eventos sísmicos y estimar los daños que podrían provocar en las estructuras. Dentro del marco anterior, para la estimación de parámetros descriptivos del movimiento del suelo en función de las características del sismo, se utilizan las curvas de atenuación.

Una curva de atenuación se define como una expresión matemática que permite estimar el máximo valor de algún parámetro sísmico en función de diferentes características de un sismo, donde las más destacables son la magnitud de momento y la distancia a la ruptura. Estudios previos han demostrado que la estimación de los modelos de predicción de movimiento de suelo de diversos parámetros sísmicos puede proveer una información significativa en lo que respecta a la estimación de demanda sísmica sobre las estructuras. Travarosou *et al.* (2003) desarrollaron un modelo de curva de atenuación para la Intensidad de Arias lo suficientemente robusto como para ser utilizado hasta el día de hoy como base para nuevos modelos aplicables en estudios de peligro sísmico. Trifunac y Brady (1975) presentaron una definición para la duración del movimiento fuerte, la cual se mantiene hasta el día de hoy, permitiendo el desarrollo de múltiples curvas de atenuación para la duración significativa.

Diversas curvas de atenuación para diferentes parámetros sísmicos han sido desarrolladas alrededor del mundo, sin embargo, en Chile, modelos de predicción del movimiento del suelo solo han sido desarrollados para algunos parámetros, como lo son la aceleración, velocidad o desplazamiento máximo del suelo, ya que estos son los más utilizados en diseños estructurales. Por este motivo se pretende encontrar funcionales aplicables a dos parámetros sísmicos observados en los registros sísmicos chilenos, la Intensidad de Arias y la duración del movimiento fuerte, en función de la magnitud de momento, el tipo de evento, la profundidad del hipocentro, la distancia más cercana a la falla y el tipo de suelo. Por otra parte, debido a la incertidumbre que conlleva la estimación de estos parámetros, producto de la naturaleza de los eventos sísmicos, es que el resultado de las curvas de atenuación es más certero a mayor cantidad de registros utilizados, por lo tanto se trabaja con una base de datos lo más amplia y actualizada posible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de este estudio es definir curvas de atenuación para la Intensidad de Arias y la duración del movimiento fuerte, calculada como duración significativa y duración entre intervalos, a partir de una base de datos de sismos chilenos.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Determinar los funcionales aplicables para la curva de atenuación de cada parámetro en estudio, identificando la herramienta de ajuste que se utiliza para determinar las constantes de los modelos de predicción de movimiento del suelo y obtener así las curvas de atenuación para cada parámetro.
2. Determinar la validez de los resultados obtenidos mediante el análisis de los resultados y métodos estadísticos.

1.3 Metodología

La metodología seguida para obtener las curvas de atenuación de cada parámetro es la siguiente:

1.3.1 Revisión bibliográfica

Se realiza una revisión bibliográfica de los parámetros en estudio. Se determina qué variables son las que lo afectan, se estudian los funcionales que se han implementado anteriormente y se establece cuáles de estos modelos son aplicables para el presente estudio.

1.3.2 Identificar y ordenar la base de datos

Se identifica y ordena la base de datos existente. Se complementa con sismos importantes ausentes. La base de datos contiene los registros sísmicos corregidos que se utilizan y las distancias a la ruptura, además de los eventos y estaciones caracterizadas.

1.3.3 Cálculo de parámetros

Los parámetros que se ajustan en este trabajo son los siguientes:

1. Intensidad de Arias
2. Duración del movimiento fuerte, calculada como duración significativa y duración entre intervalos.

Con la base de datos mencionada anteriormente se calculan los parámetros que se busca ajustar durante este estudio.

1.3.4 Herramienta de ajuste

Usando una serie de registros chilenos se utiliza un método actualización Bayesiana para realizar el ajuste y determinar las constantes de los funcionales escogidos anteriormente.

1.3.5 Obtención del funcional y curva de atenuación

Se comparan los resultados anteriores realizando test estadísticos. Aquel funcional que presenta los mejores resultados y que teóricamente se ajusta mejor a las condiciones del país, es el que se utiliza para cada curva de atenuación.

1.3.6 Análisis y conclusiones

Mediante la comparación y análisis de los resultados obtenidos se determina si el estudio es válido. Finalmente se concluye y comenta sobre los resultados obtenidos a lo largo de todo el trabajo.

1.4 Resultados esperados

A partir de ajustes y análisis estadísticos se pretende obtener el funcional más adecuado y curvas de atenuación para la Intensidad de Arias y a la duración del movimiento fuerte para sismos chilenos, en función de la magnitud, el tipo de evento, la profundidad del hipocentro, la distancia a la falla y el tipo de suelo.

1.5 Organización del informe

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Se presenta una breve introducción a lo que es el presente trabajo de título y se explica a grandes rasgos la metodología a utilizar y los resultados esperados.

Capítulo 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realiza una revisión bibliográfica en donde se explican las variables utilizadas en las curvas de atenuación y se entrega una definición de todos los parámetros sísmicos a ajustar. Además, se muestran los modelos de predicción de movimiento del suelo más relevantes en las últimas décadas, desarrollados para los parámetros en estudio.

Capítulo 3: BASE DE DATOS

Se caracterizan e identifican los sismos y estaciones que se utilizan como base de datos para realizar los ajustes de las curvas de atenuación.

Capítulo 4: OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE ATENUACIÓN

Se explica el método de ajuste a utilizar para obtener los resultados. Se calculan las curvas de atenuación para cada uno de los parámetros, posteriormente se comparan los resultados y se escogen las curvas de atenuación definitivas. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos para las tres curvas de atenuación.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se rescatan los principales resultados y conclusiones del trabajo de título, complementando con recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Marco sismotectónico

Los límites de las placas tectónicas se dividen de la siguiente forma:

1. Divergentes

Zonas donde una placa se fractura dando origen a dos placas, las cuales se empujan mutuamente con tendencia a separarse. La mayoría de los bordes divergentes se encuentran en los océanos y se caracterizan por el magma basáltico que se inyecta en las fisuras, el cual es enfriado y transformado en nueva corteza.

2. Convergentes

Zonas donde dos placas colisionan o una de ellas se desliza bajo la otra penetrando en el manto. Los procesos específicos que se activan a lo largo de un borde de placas convergentes dependen del tipo de corteza de las placas envueltas en la colisión o subducción.

3. Transcurrentes

Zonas de cizallamiento, donde los bordes de dos placas se deslizan de forma horizontal y paralela, una respecto de otra, sin creación ni destrucción importante de la litósfera. Cuando el fenómeno ocurre en una misma placa se le dice transformante. En los bordes transcurrentes se producen sismos poco profundos y baja actividad volcánica.

En el contexto nacional se tiene el caso de límite convergente, más específicamente el caso de subducción. Desde aproximadamente la línea ecuatorial hasta la latitud -45° , la placa oceánica de Nazca se desplaza hacia el Este, por debajo de la placa continental Sudamericana a una velocidad aproximada de 6,8 [cm/año] (Fuente: www.sismologia.cl, ver Figura 2.1). La compresión a la que es sometido este borde en subducción deforma el margen continental en una cadena montañosa, conocida como la Cordillera de Los Andes. Las características anteriores generan una gran acumulación de tensiones, las cuales al ser liberadas provocan los sismos.

Desde la latitud -45° hacia el sur es la placa oceánica Antártica la que se mueve bajo la placa continental Sudamericana, a una velocidad aproximada de 2 [cm/año] (Fuente: www.sismologia.cl, ver Figura 2.1).

La subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana es la responsable de la alta sismicidad en el país, principalmente producto de la alta velocidad relativa de convergencia entre ambas placas.

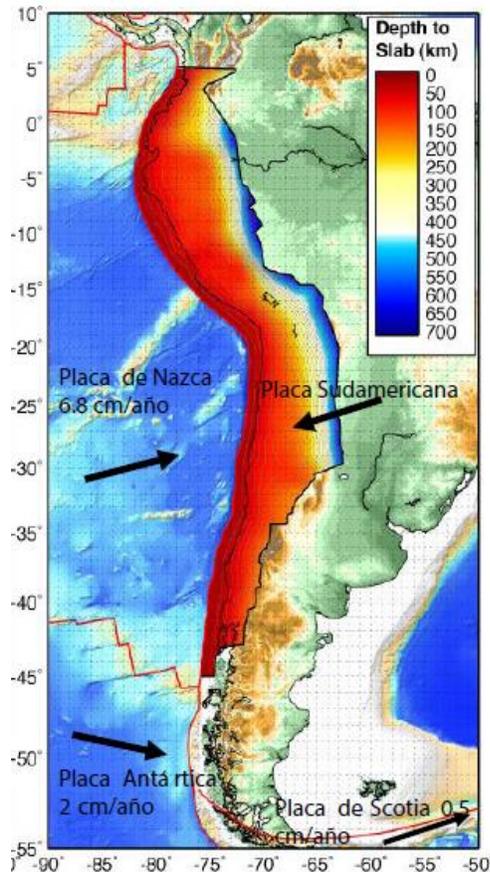


Figura 2.1: Marco tectónico de Chile. Fuente: www.sismologia.cl.

En función de lo anterior, los tipos de sismos que se pueden diferenciar en el país según el lugar donde ocurren son los siguientes:

1. **Outer-rise**

Son sismos que ocurren costa afuera de la fosa oceánica. Son producto de la deformación de la placa de Nazca al tratar de sumergirse bajo la placa Sudamericana y que el contacto interplaca no se mueve por estar acoplado. En general tienen magnitudes menores a 8 M_w . (Fuente: www.sismologia.cl).

2. **Interplaca**

Son sismos que ocurren en la zona de contacto de las placas. La fuerza de roce entre las placas trava el movimiento entre estas, las placas se pueden mover relativamente solo cuando la fuerza neta en la zona es mayor que la fuerza entre ellas, cada vez que logren moverse ocurre un sismo de este tipo. La magnitud del sismo es función del área de ruptura. Estos son los sismos de mayor magnitud. (Fuente: www.sismologia.cl).

3. **Intraplaca oceánica**

Son sismos que ocurren en la zona de la placa oceánica subductada. Se originan en su mayoría a profundidades mayores a 60 [km] hasta la máxima profundidad en que la placa siga siendo frágil y/o ocurran cambios de fase que originen

sismos. Según su profundidad se denominan intraplaca de profundidad intermedia o intraplaca profundos. (Fuente: www.sismologia.cl).

4. Intraplaca continental o superficiales corticales

Son sismos que ocurren dentro de la placa continental. Se originan en la corteza a profundidades menores a 30 [km], son producto de la deformación generada principalmente por la convergencia entre placas y por esfuerzos locales. En general ocurren en torno a la cordillera. (Fuente: www.sismologia.cl).

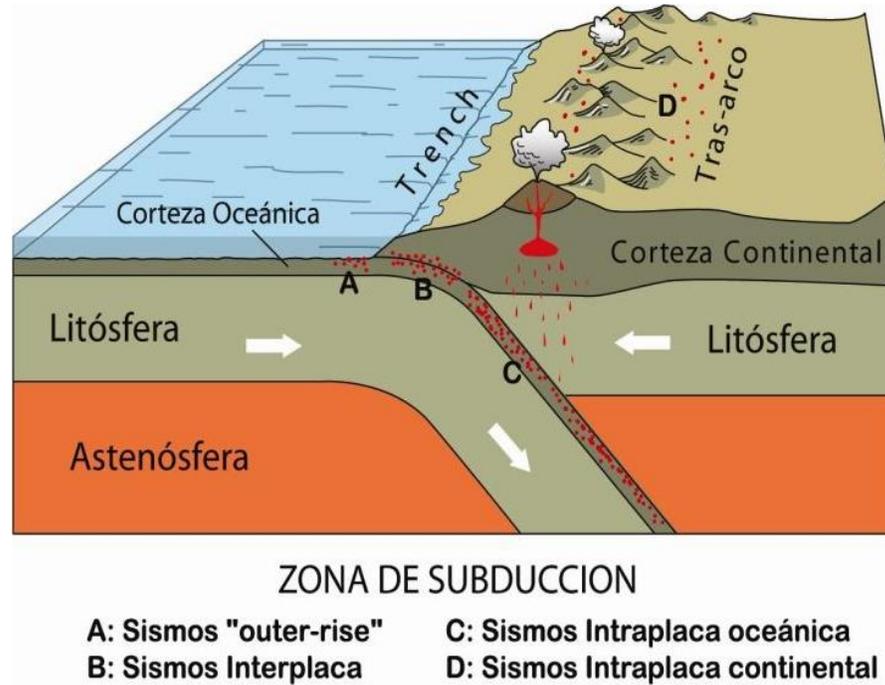


Figura 2.2: Zona de subducción y tipos de sismos en ella. Fuente: www.sismologia.cl.

2.2 Variables consideradas en el estudio

En el presente estudio se desarrollan diversas curvas de atenuación, las cuales dependen de varias características sísmicas importantes. Por lo anterior se hace necesario reconocer y explicar estas variables que intervienen en el análisis desarrollado.

1. Magnitud de momento (M_w)

Es una medida cuantitativa que tiene relación con la cantidad de energía liberada en forma de ondas producto de un sismo. Esta escala de magnitud, a diferencia de las otras que existen, no se satura.

2. Distancia a la ruptura (R)

Es la menor distancia entre el plano de falla y la estación de registro.

3. Profundidad focal (h)

Es la distancia vertical entre el punto donde se origina el sismo y el epicentro.

4. Velocidad de onda de corte (V_{s30})

Velocidad a la que se propaga la onda de cuerpo S. Se utiliza la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 metros de profundidad.

2.3 Parámetros en estudio

El principal objetivo de la ingeniería sísmica es suministrar estimaciones cuantitativas del movimiento del suelo, para así poder realizar evaluaciones de peligro y riesgo sísmico.

A continuación se realiza una breve descripción de los parámetros sísmicos a ajustar, la Intensidad de Arias y la duración del movimiento fuerte.

2.3.1 Intensidad de Arias

La Intensidad de Arias es un parámetro que contiene el potencial destructivo de un sismo y se define como la energía total almacenada por una serie infinita de osciladores de peso unitario, los cuales se caracterizan por tener un grado de libertad y frecuencias que varían uniformemente desde cero hasta infinito (Travasarou *et al.* 2003).

La Intensidad de Arias, definida en 1970 por A. Arias, se calcula en su representación más común como la integral del cuadrado de la aceleración en el tiempo, tal como se muestra en la ecuación (2.1),

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{max}} a(t)^2 dt \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.1)$$

donde g es la aceleración de gravedad en $[m/s^2]$, $a(t)$ es la aceleración en el tiempo t en la dirección en estudio medida en $[m/s^2]$ y t_{max} es la duración total del sismo en segundos.

La Intensidad de Arias es un tensor de segundo orden, lo cual implica que su traza se mantiene invariante ($I_{H1} + I_{H2} + I_{H3}$), consecuentemente todo par de ejes ortogonales que pasan por un punto de origen predefinido tienen el mismo valor de Intensidad de Arias (i.e. $I_{H1} + I_{H2} = cte.$; Travasarou *et al.* 2003). Es por lo anterior que la mayoría de los autores utilizan la media aritmética de las dos componentes horizontales, ya que entrega un valor que es independiente de la orientación. A pesar de lo anterior, existen otras formas para obtener una medida de Intensidad de Arias utilizando las componentes horizontales, que son la parte más relevante del sismo en lo que respecta a los efectos destructivos.

Considerando lo anterior, la curva de atenuación estima la Intensidad de Arias como la suma de las componentes horizontales (ecuación (2.2)), como la media aritmética (ecuación (2.3)), como la media geométrica (ecuación (2.4)) o como el máximo de las componentes horizontales (ecuación (2.5)), dependiendo del autor.

$$I_A = I_{H1} + I_{H2} \quad (2.2)$$

$$I_A = \frac{I_{H1} + I_{H2}}{2} \quad (2.3)$$

$$I_A = \sqrt{I_{H1} \cdot I_{H2}} \quad (2.4)$$

$$I_A = \max(I_{H1}, I_{H2}) \quad (2.5)$$

La Intensidad de Arias es capaz de reflejar múltiples características del sismo, esto se debe a que incluye características de amplitud y duración del sismo para todo el rango registrado de frecuencias. Por este motivo es uno de los parámetros sísmicos comúnmente utilizados en los estudios de peligro sísmico.

La variabilidad aleatoria asociada con la Intensidad de Arias es mayor que la de la mayoría de los parámetros sísmicos utilizados, sin embargo puede ser útil en la evaluación del rendimiento sísmico de sistemas rígidos cuya respuesta está dominada por las características de bajo periodo del sismo. Además, en años recientes se ha demostrado que la Intensidad de Arias se correlaciona bien con medidas comúnmente utilizadas en la demanda de desempeño estructural, licuefacción y estabilidad sísmica de taludes (Travasarou *et al.* 2003).

2.3.2 Duración del movimiento fuerte

No existe una definición universalmente aceptada para la duración del movimiento del suelo producto de un sismo, por lo que varios investigadores han propuesto diferentes definiciones de duración a través de los años. Sin embargo, existen dos parámetros de duración que son los más comunes, la duración significativa y la duración entre intervalos, mejor conocida como *bracketed duration* (Kempton & Stewart, 2006).

La duración significativa se define como el intervalo de tiempo en que se ha liberado una cantidad determinada de energía. La acumulación de energía liberada se representa como la integral del cuadrado de la aceleración del suelo, vale decir, la Intensidad de Arias. Comúnmente se utilizan intervalos de 5%-75% y 5%-95% de la Intensidad de Arias acumulada (Kempton & Stewart, 2006). En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de este cálculo.

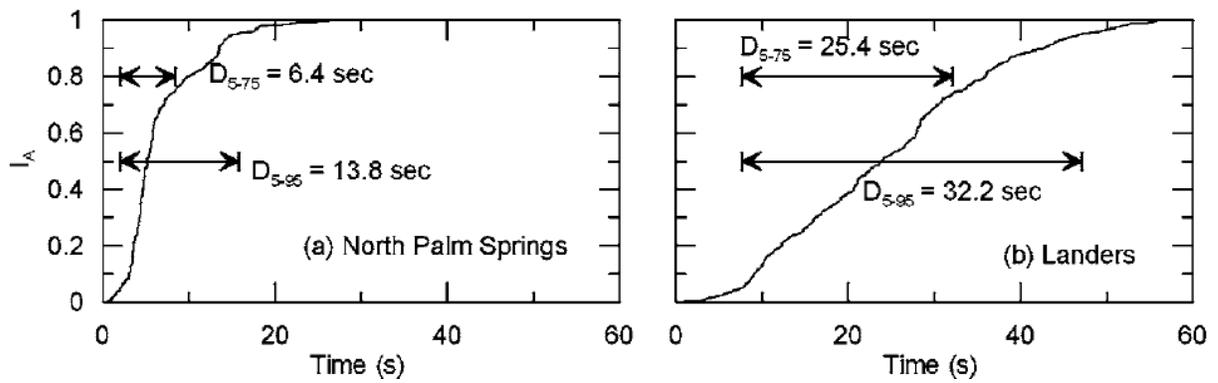


Figura 2.3: Cálculo de la duración significativa D_{5-75} y D_{5-95} para sismo registrado en el sitio de North Palm Springs Airport. Fuente: Kempton & Stewart, 2006.

La duración entre intervalos se define como el tiempo transcurrido entre la primera y última aparición de un valor determinado de aceleración en el registro (comúnmente se utiliza 0,05g o 0,1g). Este parámetro suele ser sensible al umbral de aceleración utilizado y a pequeños sub-eventos ocurridos al final del registro (Kempton & Stewart, 2006). En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de este cálculo.

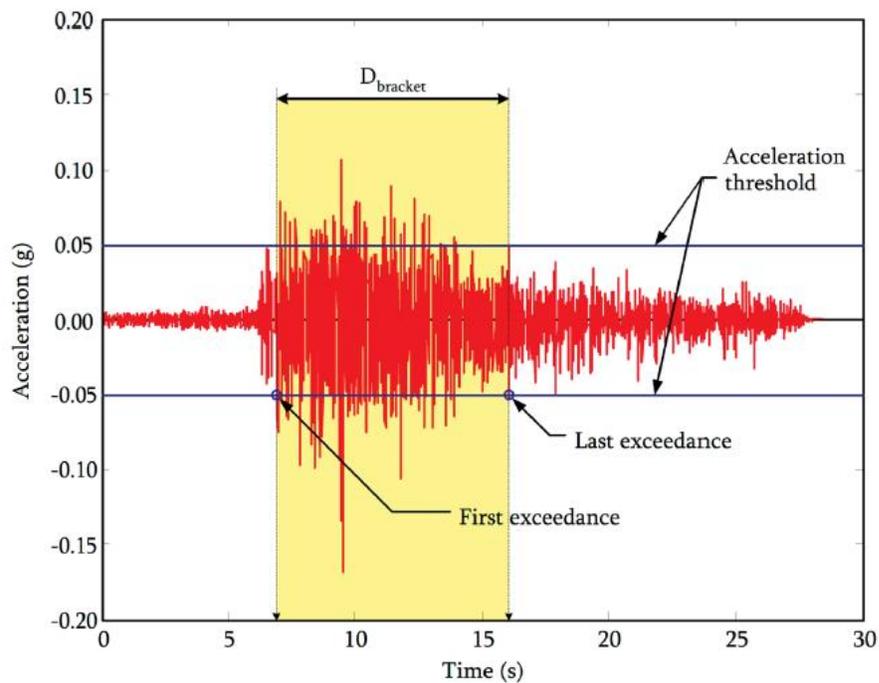


Figura 2.4: Cálculo de la duración entre intervalos (límite de 0,05 g) para el acelerograma 1125S17L del sismo Saguenay de 1988 de magnitud 5,9 y distancia a la ruptura 70,3 [km]. Fuente: Lee y Green, 2012.

Ya sea que se calcule la duración utilizando la duración significativa o la duración entre intervalos, se logra obtener un valor para cada componente del registro, dos horizontales y uno vertical. Por esto se combinan las componentes horizontales como la media geométrica (ecuación (2.6)) para obtener la duración del evento en la estación de registro (Afshari & Stewart, 2016).

$$D = \sqrt{D_{H1} \cdot D_{H2}} \quad (2.6)$$

La duración del movimiento fuerte es un parámetro importante en la falla de estructuras o sistemas geotécnicos producto de la sollicitación sísmica. Cabe recordar que existen situaciones en donde la respuesta de las estructuras no depende solo de la amplitud de la respuesta del suelo, si no que su desempeño también se ve afectado por el daño acumulado durante un evento que induce cargas cíclicas.

Este parámetro ha demostrado ser un predictor importante en el desempeño, junto con los parámetros de amplitud y de frecuencia, para sistemas estructurales que poseen un potencial de degradación bajo cargas cíclicas (Kempton & Stewart, 2006).

2.4 Antecedentes de curvas de atenuación

Una vez que un parámetro ha sido seleccionado para caracterizar el movimiento del suelo es necesario desarrollar relaciones entre este parámetro y características sísmicas importantes.

Es con motivo de lo anterior que se han desarrollado diversas curvas de atenuación para diferentes parámetros sísmicos alrededor del mundo en las últimas décadas. A continuación se muestra una recopilación bibliográfica de algunos modelos de predicción del movimiento del suelo desarrollados para los parámetros en estudio y que posteriormente son utilizados para desarrollar la presente investigación.

2.4.1 Funcionales para la Intensidad de Arias

1. Travararou, Bray y Abrahamson (2003)

Travararou *et al.* (2003) desarrollaron una nueva curva de atenuación para estimar la Intensidad de Arias como función de la magnitud, distancia, mecanismo de falla y categoría del sitio. El funcional desarrollado es el mostrado en la ecuación (2.7),

$$\ln(I_{Aref}) = c_1 + c_2(M_W - 6) + c_3 \ln\left(\frac{M_W}{6}\right) + c_4 \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2}\right) + (s_{11} + s_{12}(M_W - 6))S_C + (s_{21} + s_{22}(M_W - 6))S_D + f_1 F_N + f_2 F_R \quad (2.7)$$

donde M_W es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al punto de ruptura en [km], S_C y S_D son variables ficticias para indicar el tipo de suelo, F_N y F_R son variables ficticias para indicar el tipo de falla, c_i , h , s_{ij} y f_i son las constantes a determinar con la regresión.

Travararou *et al.* (2003) calcularon la Intensidad de Arias observada como el promedio de las dos componentes horizontales, como se muestra en la ecuación (2.3). Los coeficientes de la curva de atenuación fueron determinados a través de una regresión no lineal utilizando el modelo de efectos aleatorios.

En su estudio Travararou *et al.* (2003) concluyeron que para sismos de grandes magnitudes ($M_w > 7$) la Intensidad de Arias estaba significativamente sobreestimada por modelos anteriores, mientras que para eventos con magnitudes bajas ($M_w < 6$) estaba subestimada. Los resultados de la regresión mostraron que hacer la distinción según el tipo de suelo era necesario.

Cabe mencionar que este es uno de los modelos más robustos desarrollados para la Intensidad de Arias, por este motivo el funcional desarrollado por Travararou *et al.* (2003) es la base de muchos autores para desarrollar sus propios modelos.

2. Hwang, Lin, Yeh, Cheng y Chen (2004)

Hwang *et al.* (2004) desarrollaron una curva de atenuación en función de la magnitud de momento y la distancia a la fuente para varias condiciones de sitio, además incluyeron un término asociado al error aleatorio. El funcional utilizado se muestra en la ecuación (2.8),

$$\ln(I_A) = aM_w + b \ln(\sqrt{R^2 + h^2}) + c + \varepsilon \quad (2.8)$$

donde M_w es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], h es la distancia focal en [km], ε es el error aleatorio, y a , b y c son las constantes a determinar con la regresión.

Debido a la naturaleza aditiva de las medidas escalares de energía Hwang *et al.* (2004) definieron la Intensidad de Arias como la suma de las componentes horizontales (ecuación (2.2)). La curva de atenuación propuesta por Hwang *et al.* (2004) fue ajustada utilizando la regresión de dos pasos propuesta por Joyner y Boore (1981, 1993).

La principal conclusión del trabajo de Hwang *et al.* (2004) es que la curva de atenuación para roca decrece más rápidamente que para sitios con suelo.

3. Rajabi, Khamehchiyan, Mahdaviyar y Del Gaudio (2010)

Rajabi *et al.* (2010) compararon cinco modelos de curvas de atenuación, a través de análisis estadísticos determinaron cual era el más adecuado para la región en estudio. El funcional que consideraron más adecuado en términos de la simplicidad de su formulación y concordancia con los datos fue un modelo propuesto por Ambraseys & Bommer (1991), el cual depende de la de la magnitud de momento y de la distancia epicentral, este último en una combinación de un término logarítmico y uno lineal con el objetivo de representar el efecto combinado de la propagación geométrica y la atenuación anelástica en la reducción de amplitud de las ondas sísmicas. El modelo utilizado es el mostrado en la ecuación (2.9),

$$\ln(I_A) = b_1 + b_2M_w + b_3 \ln(\sqrt{R^2 + h^2}) + b_4\sqrt{R^2 + h^2} \quad (2.9)$$

donde M_W es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], h es la distancia focal obtenida de la regresión [km], b_i son las constantes a determinar con la regresión.

Rajabi *et al.* (2010) calcularon la Intensidad de Arias observada como el máximo de las componentes horizontales (ecuación (2.5)). La curva de atenuación propuesta fue encontrada realizando un análisis de regresión de mínimos cuadrados. Para confirmar los resultados se calculó la media cuadrática de los residuos de la regresión.

La principal conclusión obtenida por Rajabi *et al.* (2010) después de comparar cinco modelos diferentes es que el funcional más complejo no siempre es el óptimo.

4. Gómez-Bernal, Lecea y Juárez-García (2012)

Gómez-Bernal *et al.* (2012) desarrollaron una curva de atenuación para estimar la Intensidad de Arias en función de la magnitud, la distancia y el mecanismo de falla. El modelo utilizado es el mostrado en la ecuación (2.10),

$$\ln(I_A) = b - \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2} + c\right) - k\sqrt{R^2 + h^2} \quad (2.10)$$

donde la variable c que toma en cuenta la saturación de la amplitud debido a la proximidad de la fuente y considera una distancia efectiva que aumenta con la magnitud se calcula según la ecuación (2.11).

$$c = 0,0055 \cdot 10^{0,525M_W} \quad (2.11)$$

El coeficiente b que depende de la magnitud de momento, el tipo de falla y la profundidad focal se obtiene como se indica en la ecuación (2.12),

$$b = aM_W + d h + e_1S_1 + e_2S_2 + e_3S_3 + f + \varepsilon \quad (2.12)$$

donde M_W es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], h es la distancia focal en [km], k toma un valor de 0,0015, S_i es una variable ficticia que indica el tipo de falla, ε es la desviación estándar, e_i y f son las constantes a determinar.

Gómez-Bernal *et al.* (2012) calcularon la Intensidad de Arias observada para la componente horizontal y para la vertical, donde la primera fue calculada como el máximo valor de Intensidad de Arias de las componentes horizontales del registro (ecuación (2.5)). La curva de atenuación propuesta fue obtenida con una regresión de dos pasos, en donde la primera etapa fue realizada con el funcional de la ecuación (2.10) y la ecuación (2.11), y en la segunda etapa se utilizó la ecuación (2.12) donde se considera el tipo de falla.

Las principales conclusiones obtenidas por Gómez-Bernal *et al.* son que las amplitudes de la Intensidad de Arias atenuada de sismos intraplaca son más bajas que la de los eventos interplaca.

5. Lee, Hsieh, Sung y Lin (2012)

Lee *et al.* (2012) desarrollaron una nueva curva de atenuación donde además de incluir la magnitud de momento y la distancia a la falla, se consideraron dos tipos de fallas y la variable de sitio V_{s30} . La curva utilizada es una modificación de la función desarrollada por Travarasrou *et al.* (2003). El funcional desarrollado es el mostrado en la ecuación (2.13),

$$\ln(I_A) = c_1 + c_2(M_W - 6) + c_3 \ln\left(\frac{M_W}{6}\right) + c_4 \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2}\right) + c_5 \ln(V_{s30}/1130) + c_6 F_N + c_7 F_R + \eta + \varepsilon \quad (2.13)$$

donde M_W es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura para grandes sismos (usualmente mayores a $6,2 M_W$) y la distancia hipocentral para los otros, medida en [km], h es la distancia hipocentral ficticia obtenida de la regresión en [km], V_{s30} es la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m] del depósito de suelo en [m/s], F_N y F_R son variables ficticias que dependen del mecanismo focal, η corresponde al error inter-evento, ε corresponde al error intra-evento, y c_i son las constantes a determinar.

Lee *et al.* (2012) calcularon la Intensidad de Arias observada como el promedio de las dos componentes horizontales (ecuación (2.3)). La curva de atenuación propuesta fue encontrada utilizando el modelo de efectos mixtos y la estimación por máxima verosimilitud (MLE). Para confirmar los resultados se calcularon los residuos obtenidos de la regresión.

Las principales conclusiones de esta investigación son que la incorporación de la velocidad de onda de corte reduce significativamente el error de la regresión y que el modelo entrega resultados similares a los propuestos por otros autores, tales como Travarasrou *et al.* (2003).

6. Foulser-Piggott y Goda (2015)

Foulser-Piggott y Goda (2015) desarrollaron un nuevo modelo para estimar la Intensidad de Arias de la componente horizontal promedio de un sismo. En su estudio presentaron dos funcionales, uno donde se consideraba un modelo de respuesta de sitio lineal y el otro un modelo de respuesta de sitio no lineal. Los funcionales desarrollados son los mostrados en las ecuaciones (2.14) y (2.15),

Modelo lineal:

$$\ln(I_{ALIN}) = \ln(I_{Aref}) + e_1 + v_1 \ln\left(\frac{V_{s30}}{1100}\right) \quad (2.14)$$

Modelo no lineal:

$$\ln(I_{ANL}) = \ln(I_{Aref}) + e_1 + v_1 \ln\left(\frac{V_{s30}}{1100}\right) + v_2(e^{v_3[\min(V_{s30}, 1100)-280]}) - e^{v_3(1100-280)} \ln\left(\frac{e^{\ln(I_{Aref})+e_1} + v_4}{v_4}\right) \quad (2.15)$$

donde la intensidad de movimiento de suelo referencial que depende de la magnitud de momento, de la distancia a la fuente, el tipo de sismo y el tipo de falla se calcula como se muestra en la ecuación (2.16).

$$\ln(I_{Aref}) = c_0 + c_1(M_w - 5) + (c_2 + c_3M_w) \ln\left(\sqrt{R^2 + c_4^2}\right) + c_5 \max(H - 30) + (c_6F_{rfa} + c_7F_{rba})R + c_8F_{instab} + c_9F_{interfase} + c_{10}F_{rv} + c_{11}F_{nm} \quad (2.16)$$

Donde M_w es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], H es la distancia focal en [km], e_1 es el efecto aleatorio para eventos individuales, v_i son las constantes a obtener con la regresión para el modelo de respuesta del sitio, c_i son las constantes a obtener con la regresión para el movimiento referencial del suelo, F_{rfa} y F_{rba} son variables ficticias para indicar la región, F_{instab} y $F_{interfase}$ son variables ficticias para indicar el tipo de evento en consideración, F_{rv} y F_{nm} son término adicionales para describir el efecto producto de la falla inversa y falla normal respectivamente.

Foulser-Piggott y Goda (2015) calculan la Intensidad de Arias observada como el promedio de las dos componentes horizontales (ecuación (2.3)). Los modelos finales fueron desarrollados utilizando un análisis de regresión no lineal de efectos aleatorios. Para confirmar los resultados se calcularon los residuos obtenidos de la regresión.

Las principales conclusiones de esta investigación son que el modelo de respuesta de sitio no lineal se comporta de forma similar al modelo lineal, pero con algunas restricciones desde el punto de vista físico.

2.4.2 Funcionales para la duración significativa

1. Hernández y Cotton (2000)

Hernández y Cotton (2000) desarrollaron un modelo de predicción de la duración del movimiento fuerte como función de la magnitud del sismo, la distancia a la ruptura y la categoría de suelo. El modelo desarrollado se muestra en la ecuación (2.17),

$$\ln(SD) = a + b \cdot M_w + c \cdot \ln(R) + d \cdot Suelo \pm \sigma \quad (2.17)$$

donde M_w es la magnitud de momento, R es la distancia más corta al plano de ruptura medido desde la estación en [km], $Suelo$ es una variable ficticia que toma el valor de 1 si

la velocidad de onda de corte es menor a 750 [m/s] y 0 de ser mayor a dicho valor, σ es la desviación estándar y a, b, c, d son las constantes a atenuar.

Hernández y Cotton (2000) calculan la duración del movimiento fuerte como la duración significativa considerando un intervalo del 5% al 95% del valor de la Intensidad de Arias acumulada. El ajuste utilizado para obtener las constantes es la regresión de mínimos cuadrados.

Las principales conclusiones de esta investigación son que cerca de la fuente solo un buen conocimiento de la geometría de la falla y un enfoque de modelo directo, es eficiente para algunos casos de efectos no lineales. También concluyen que para igual energía, sismos de corta duración presentan un mayor riesgo que sismos de grandes duraciones de aceleración.

2. Kempton y Stewart (2006)

Kempton y Stewart (2006) desarrollaron un modelo de predicción de movimiento de suelo para la duración significativa como función de magnitud, distancia más cercana a la ruptura, parámetros de sitio que reflejan tanto características geológicas superficiales como estructuras profundas de la cuenca, y parámetros de cercanía a la fuente. El modelo base desarrollado para la duración es el presentado en la ecuación (2.18),

$$\ln(SD)_{ij} = \ln \left(\frac{\left(\frac{e^{b_1 + b_2(M_i - M^*)}}{10^{1.5M_i + 16.05}} \right)^{-\frac{1}{3}}}{4.9 \cdot 10^6 \cdot \beta} + r_{ij} \cdot c_2 + (c_4 + c_5(V_{s-30})_{ij}) \right) + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.18)$$

donde β es la velocidad de onda de corte en la fuente (tomado como 3.2 [km/s]), M es la magnitud de momento del evento, M^* es una magnitud de referencia tomada como 6, r es la distancia más corta al plano de ruptura, V_{s30} es la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m] del depósito de suelo en [m/s], η_i es el error inter-evento, ε_{ij} corresponde al error intra-evento, y los términos b_i y c_i son las constantes a atenuar.

Además, Kempton y Stewart (2006) incorporaron a su modelo base términos de sitio asociados a los efectos de la cuenca y también consideraron los efectos de falla cercana en los residuos.

Para obtener la duración utilizaron la duración significativa. El modelo final fue desarrollado utilizando el procedimiento de regresión de efectos aleatorios.

Kempton y Stewart (2006) concluyeron que la duración significativa aumenta fuertemente con la magnitud del sismo y moderadamente con la distancia, pero disminuye con el aumento de la velocidad de onda de corte.

2.4.3 Funcionales para la duración entre intervalos

1. Bommer, Stafford y Alarcón (2009)

Bommer, Stafford y Alarcón (2009) desarrollaron un nuevo modelo predictivo para diferentes definiciones de duración del movimiento fuerte como función de la magnitud del sismo, la distancia a la ruptura, la velocidad de onda de corte y el mecanismo focal. El modelo desarrollado para la duración entre intervalos se muestra en la ecuación (2.19),

$$\ln(BD) = c_0 + m_1 \cdot M_w + r_1 \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + h_1^2}\right) + v_1 \cdot \ln(V_{s30}) + f_1 \cdot F_{rv} \quad (2.19)$$

donde M_w es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], V_{s30} es la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m] del depósito de suelo en [m/s] y $c_0, m_1, r_1, h_1, v_1, f_1$ son las constantes a ajustar.

En el modelo de la ecuación (2.19) calculan la duración como la duración entre intervalos utilizando como límite 0,025g, 0,05g y 0,1g. Las constantes las obtuvieron a través de un código desarrollado en *Matlab*, pero el modelo fue testeado previamente con el modelo no lineal de efectos aleatorios.

Las principales conclusiones de la investigación son que los nuevos modelos desarrollados para medidas de duración basadas en límites de la aceleración absoluta aparentemente funcionan consistentemente mejor que los modelos previamente publicados para medidas similares de duración de movimiento fuerte.

2. Lee y Green (2012)

Lee y Green (2012) presentaron un modelo predictivo que correlaciona la duración entre intervalos con la magnitud del sismo, la distancia más cercana a la fuente y las condiciones de sitio. En su modelo consideran además los eventos que presentan duración 0 a través de una función de ponderación. El modelo desarrollado se muestra en la ecuación (2.20) y la función de ponderación se muestra en la ecuación (2.21),

$$E[D_{bracketed}] = \{exp(C_1 + C_2 \cdot (M_w - 6) + C_3 \cdot R + (S_1 + S_2 \cdot R) \cdot S_s) - 1\} \cdot p(D_{bracketed} > 0 | M_w, R) \geq 0 \quad (2.20)$$

$$p(D_{bracketed} > 0 | M_w, R) = \frac{1}{1 + exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot M_w + \beta_3 \cdot R)} \quad (2.21)$$

donde M_w es la magnitud de momento, R es la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km], S_s es una variable ficticia que toma valor de 1 para sitios con suelo y 0 para sitios con roca, C_i y β_i son las constantes a atenuar.

Para calcular la duración utilizaron la duración entre intervalos con un límite de 0,05g. Las constantes del modelo de la ecuación (2.20) las obtuvieron a través de una regresión

no lineal de efectos aleatorios, mientras que las constantes de la función de ponderación (2.21) las obtuvieron utilizando una regresión logística.

Entre las conclusiones más relevantes se tiene que la duración entre intervalos disminuye con el aumento de la distancia, pero incrementa significativamente con el aumento de la magnitud, especialmente para distancias menores a 50 [km].

CAPÍTULO 3: BASE DE DATOS

Una parte esencial en el desarrollo de las curvas de atenuación es la base de datos que se utiliza. Esta influye directamente en los resultados que se obtienen y determina cuál es el rango de aplicación de los modelos en lo que respecta a magnitud, velocidad de onda de corte, distancias y fuente sismogénica. En este capítulo se describe la base de datos utilizada en el presente estudio, se caracterizan los eventos, estaciones y registros utilizados, indicando además la fuente de los datos utilizados.

3.1 Eventos de la base de datos

Se utilizan eventos sísmicos con datos de aceleraciones disponibles y magnitudes mayores a $4,5 M_w$ desde marzo de 1985 hasta septiembre de 2015, llegando a un total de 311 eventos. En el Anexo A.1 se muestra una caracterización adicional a la mostrada en la presente sección.

3.1.1 Variables consideradas y datos disponibles

1. Fecha y hora

La fecha y hora de los eventos fueron obtenidas del Centro Sismológico Nacional (CSN), y para aquellos eventos disponibles se obtuvieron estos datos del catálogo EVTDB del CSN. La hora utilizada corresponde a la hora universal (*Universal Time Coordinate*, UTC).

2. Magnitud de los eventos

La magnitud de momento de los eventos utilizados es obtenida del *Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project*, operado por *Harvard University*. Para obtener la magnitud de aquellos eventos que no se encontraban disponibles en el catálogo recién mencionado se utiliza la base de datos disponible en *United States Geological Survey (USGS)*. Finalmente, para aquellos eventos con magnitudes menores a $5,5 M_w$ y no disponibles en el catálogo CMT se utiliza la información disponible en el Centro Sismológico Nacional (CSN).

3. Fuente sismogénica

La fuente sismogénica de los eventos con magnitudes superiores a $5,5 M_w$ es obtenida de estudios realizados por otros autores, tales como Benjamín Idini (2016), Daniela Vilches (2016), Iván López (2016) y Jennyfer Ordenes (2017). Para aquellos eventos restantes se determina la fuente sismogénica a partir del hipocentro y un modelo de la geometría de la placa de Nazca, realizando las revisiones pertinentes.

3.1.2 Distribución de los eventos de la base de datos

1. Fuente sismogénica

En la Figura 3.1 se muestra la distribución en planta de los eventos, separados por fuente sismogénica.

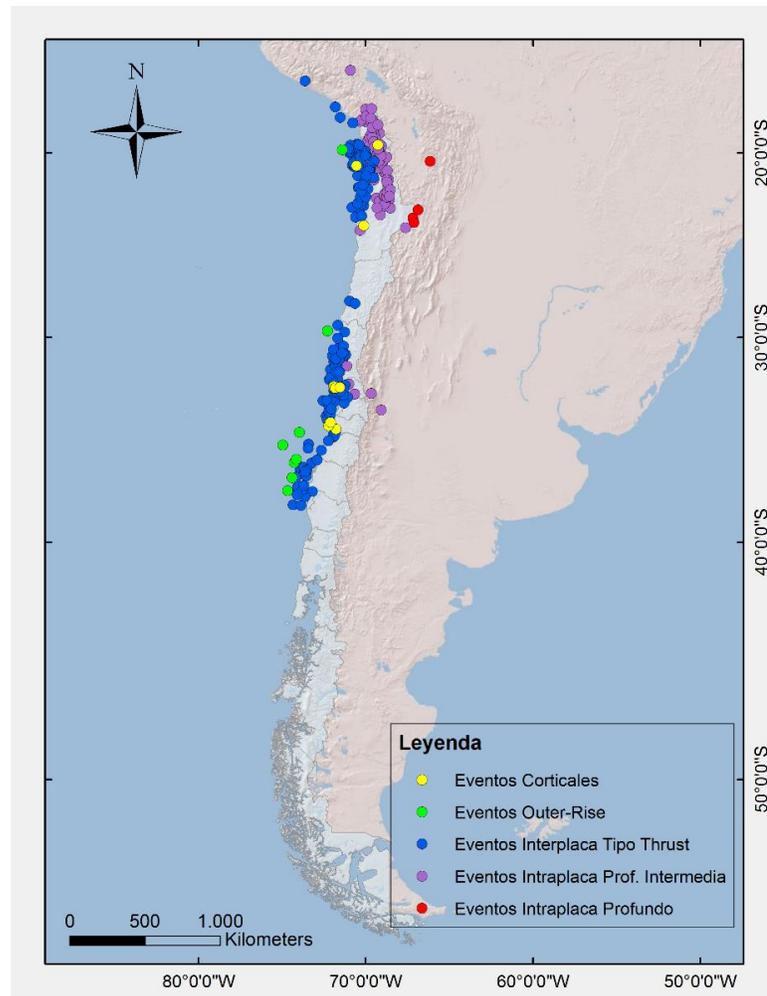


Figura 3.1: Distribución en planta de los eventos disponibles separados por fuente sismogénica.

Para complementar la figura anterior, en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.2 se muestra la distribución de los eventos de acuerdo a su fuente sismogénica.

Tabla 3.1: Distribución de eventos según fuente sismogénica.

Fuente sismogénica	Cantidad de eventos
Subducción Interplaca	165
Subducción Intraplaca de prof. Intermedia	123
Cortical	11
Outer-rise	8
Subducción Intraplaca profundo	4

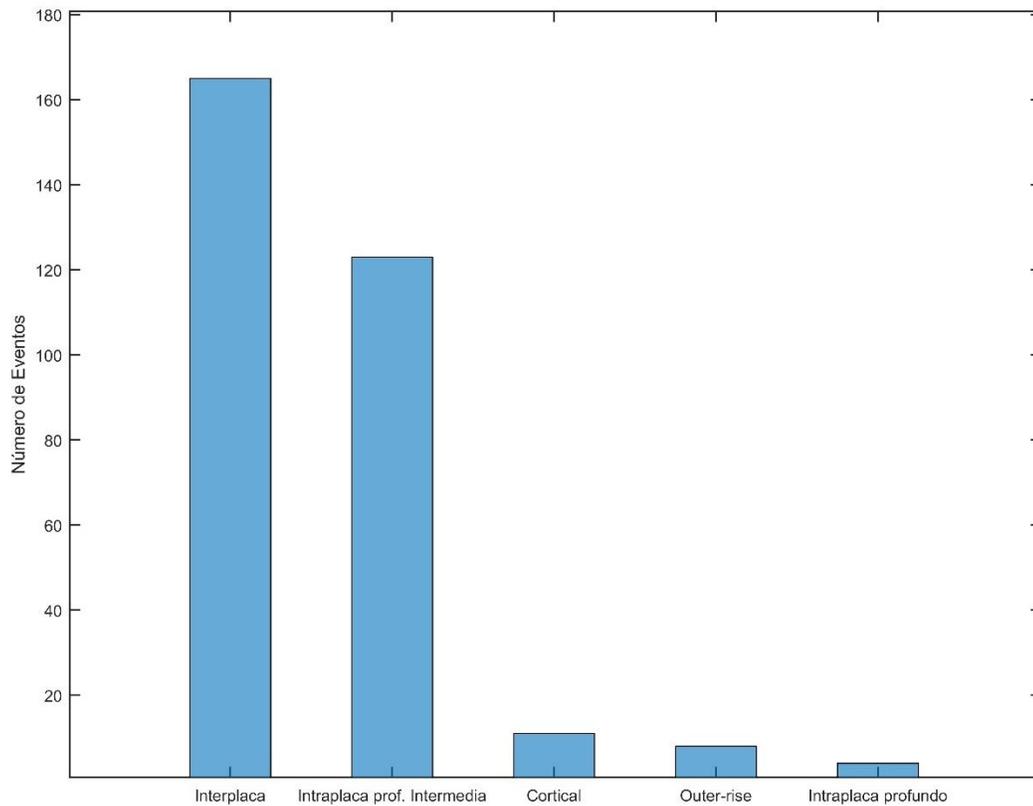


Figura 3.2: Histograma de eventos según fuente sismogénica.

2. Magnitud de momento

En la Tabla 3.2 y en la Figura 3.3 se muestra la distribución de los eventos de acuerdo a su magnitud de momento.

Tabla 3.2: Distribución de eventos según magnitud.

M_w	Cantidad de eventos
$4,5 \leq M_w < 5$	66
$5 \leq M_w < 5,5$	101
$5,5 \leq M_w < 6$	75
$6 \leq M_w < 6,5$	40
$6,5 \leq M_w < 7$	16
$7 \leq M_w < 7,5$	4
$7,5 \leq M_w < 8$	4
$8 \leq M_w < 8,5$	4
$8,5 \leq M_w < 9$	1

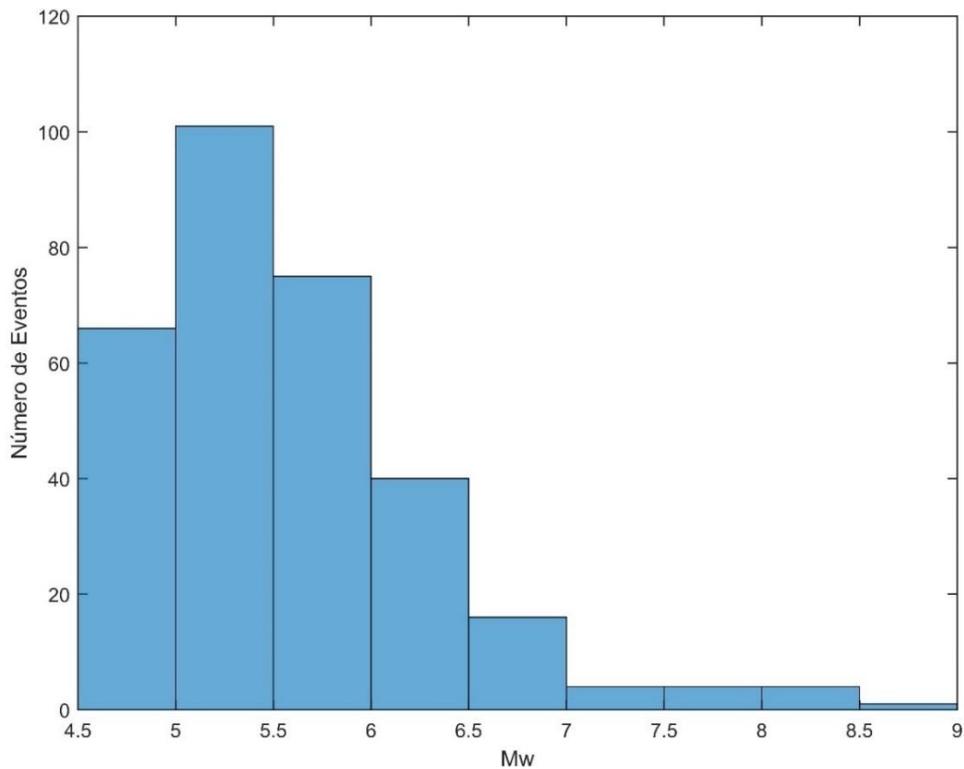


Figura 3.3: Histograma de eventos según magnitud.

3. Eventos por año

En la Tabla 3.3 y en la Figura 3.4 se muestra la distribución de los eventos de acuerdo al año en que ocurrieron. Cabe mencionar que inicialmente la base de datos consistía principalmente en eventos del año 2008 hasta el 2015, sin embargo se completa con sismos importantes ausentes para los años anteriores.

Tabla 3.3: Distribución de eventos según año de ocurrencia.

Año	N° de eventos
1985	1
1995	1
1997	1
1999	1
2001	2
2005	1
2007	2
2008	16
2009	33
2010	70
2011	32
2012	29
2013	21
2014	60
2015	41

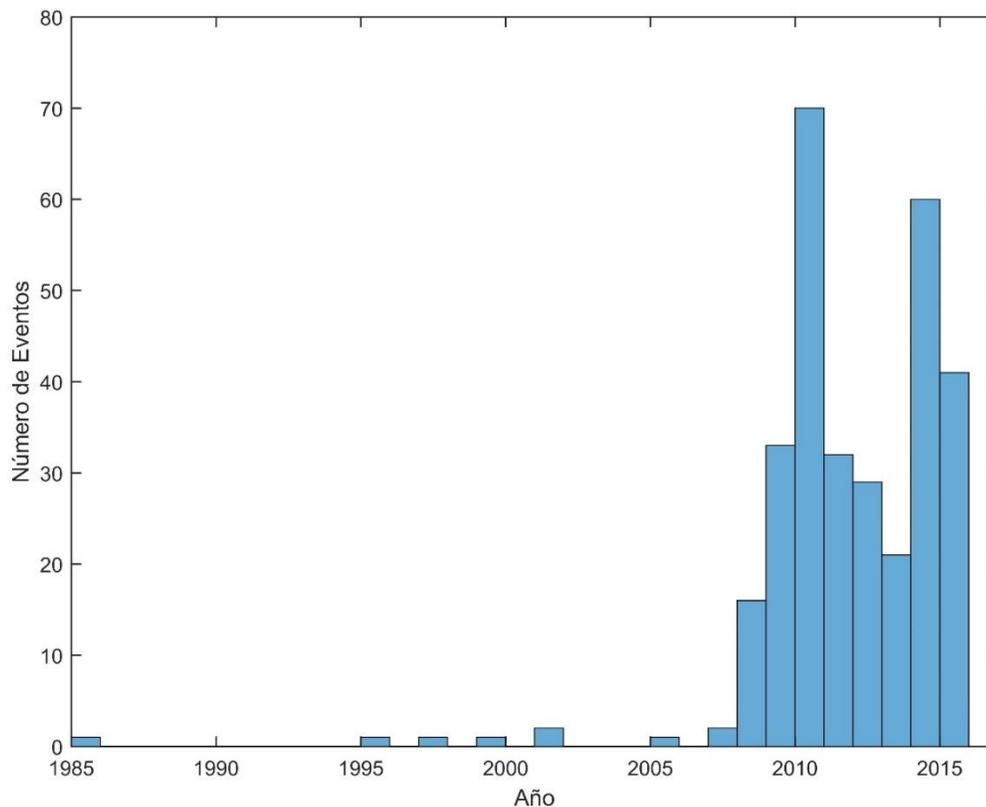


Figura 3.4: Histograma de eventos según año.

3.2 Estaciones de la base de datos

Se utilizan estaciones ubicadas desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Ríos, llegando a un total de 145 estaciones. Cabe mencionar que no todas las estaciones utilizadas en este estudio están en funcionamiento actualmente. En el Anexo A.2 se muestra una caracterización adicional a la mostrada en la presente sección.

3.2.1 Variables consideradas y datos disponibles

1. Red de las estaciones

Se utilizan estaciones que pertenecen a la red de ONEMI y a la red de RENADIC.

2. Coordenadas de las estaciones

En la Figura 3.5 se muestra la ubicación de las estaciones, cuyas coordenadas se obtienen del listado de estaciones disponibles la página de Terremotos de Chile de la Universidad de Chile, ordenanzas emitidas por ONEMI y listado de estaciones utilizadas en otros trabajos de título.

3. Clasificación del suelo

Para clasificar el suelo de cada estación se utilizó el D.S. N°61, en el cual se le asigna una categoría al suelo de A hasta F de acuerdo a la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m] calculada (Ver Tabla 3.4). Esta última fue obtenida principalmente de otros trabajos de título y de la base de datos N. Bastias y G. Montalva (2015).

Tabla 3.4: Clasificación de suelo. Fuente: DS N°61.

Suelo Tipo		V_{s30} [m/s]
A	Roca, suelo cementado	≥ 900
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500
C	Suelo denso o firme	≥ 350
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180
F	Suelos Especiales	*

3.2.2 Distribución de las estaciones de la base de datos

La distribución de las estaciones en el mapa se muestra en la Figura 3.5.

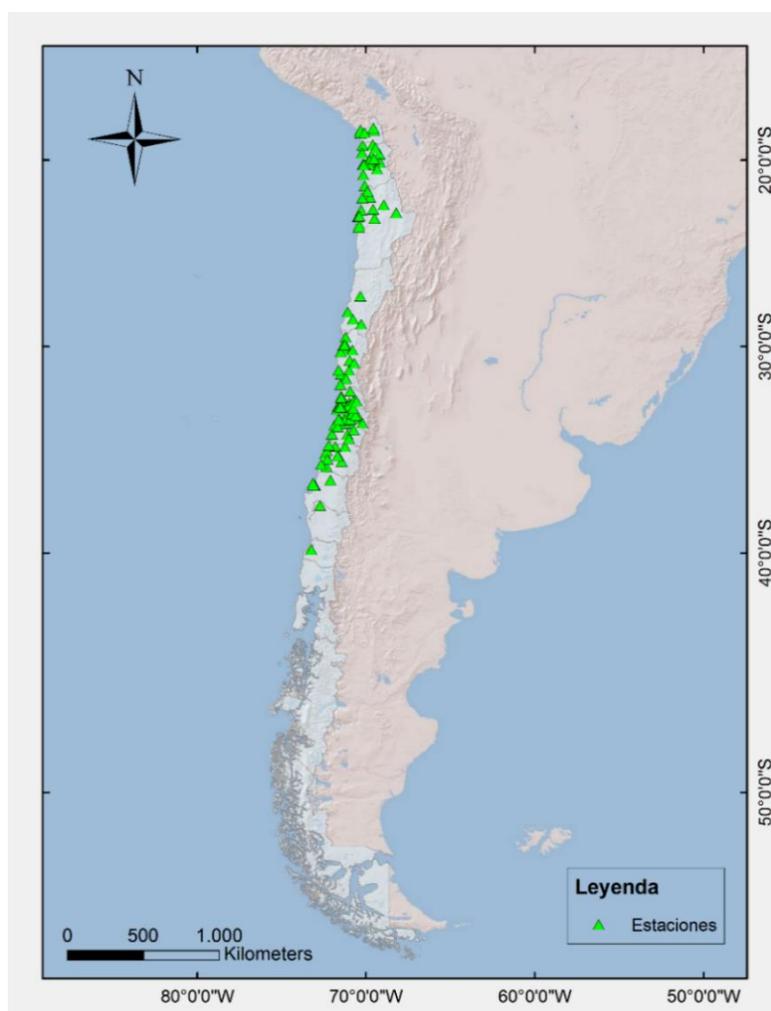


Figura 3.5: Distribución en planta de las estaciones utilizadas.

1. Velocidad de onda de corte V_{s30}

En la Tabla 3.5 y en la Figura 3.6 se muestra la distribución de las estaciones de acuerdo a su V_{s30} .

Tabla 3.5: Distribución de estaciones según V_{s30} .

V_{s30} [m/s]	Nº de estaciones
$100 \leq V_{s30} < 200$	1
$200 \leq V_{s30} < 300$	13
$300 \leq V_{s30} < 400$	30
$400 \leq V_{s30} < 500$	18
$500 \leq V_{s30} < 600$	27
$600 \leq V_{s30} < 700$	23
$700 \leq V_{s30} < 800$	10
$800 \leq V_{s30} < 900$	7
$900 \leq V_{s30} < 1000$	8
$1100 \leq V_{s30} < 1200$	2
$1200 \leq V_{s30} < 1300$	2
$1400 \leq V_{s30} < 1500$	1
$1900 \leq V_{s30} < 2000$	1
$2100 \leq V_{s30} < 2200$	1
$3000 \leq V_{s30} < 3100$	1

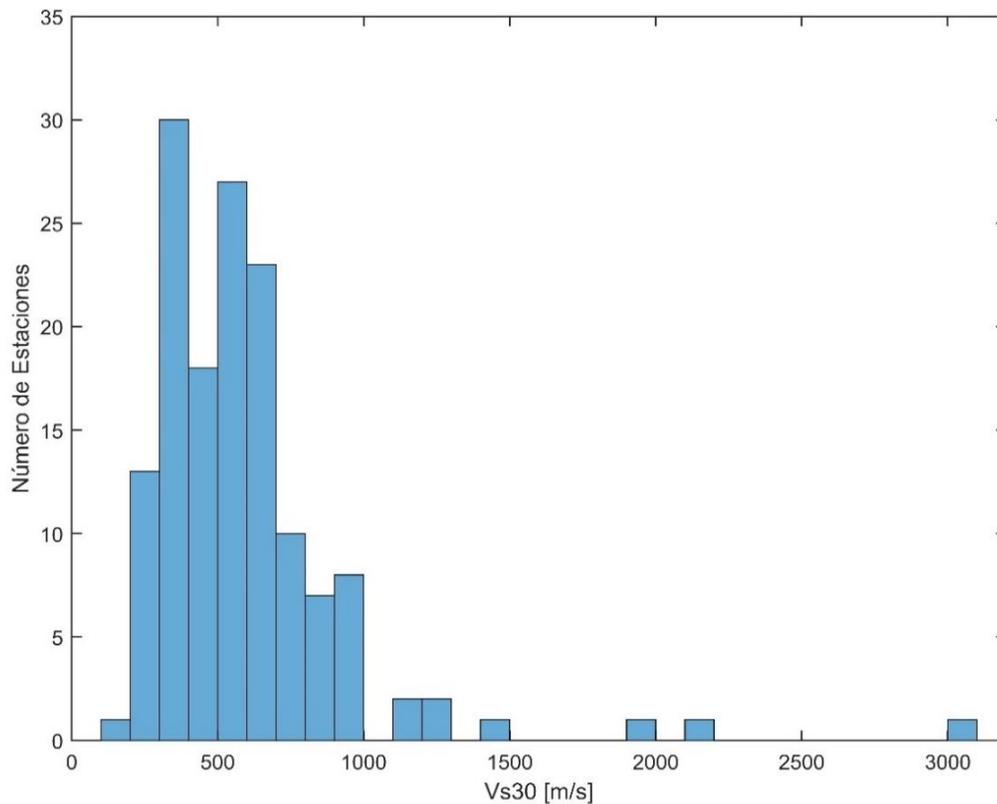


Figura 3.6: Histograma de estaciones según velocidad de onda de corte.

1. Tipo de suelo

En la Tabla 3.6 y en la Figura 3.7 se muestra la distribución de las estaciones según el tipo de suelo, de acuerdo a la clasificación del DS N°61.

Tabla 3.6: Distribución de estaciones según tipo de suelo.

Tipo de Suelo	N° de estaciones
A	16
B	65
C	34
D	27
E	1
F	2

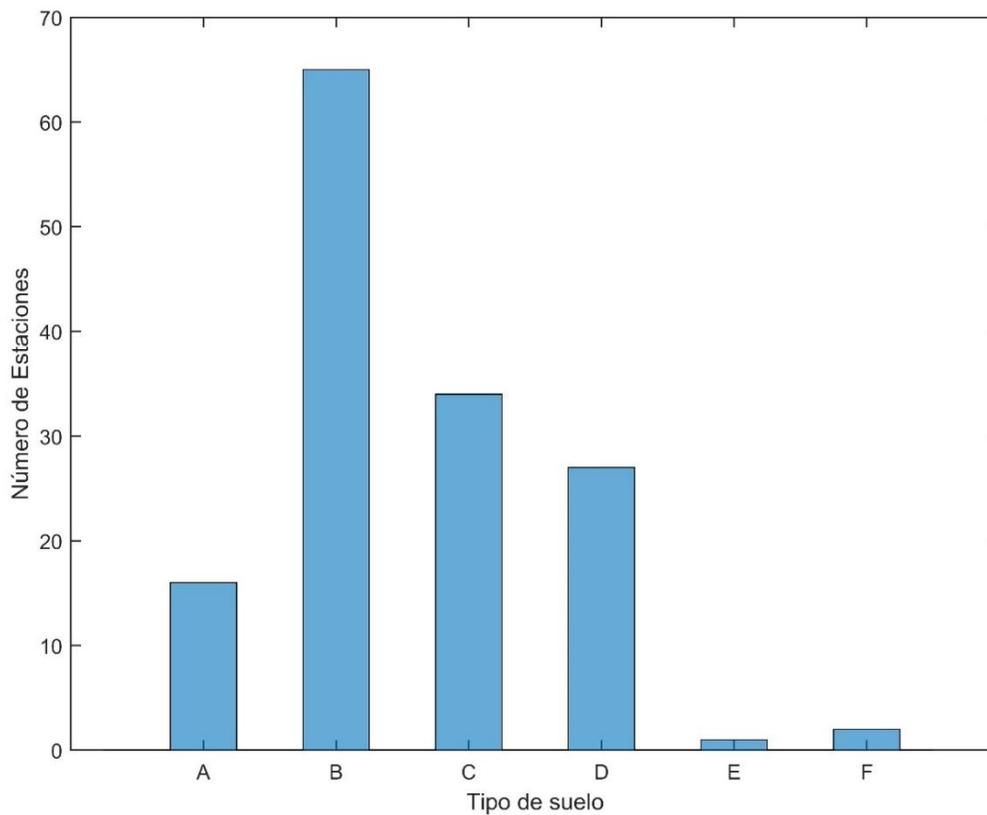


Figura 3.7: Histograma de estaciones según el tipo de suelo.

3.3 Registros de la base de datos

La base de datos utilizada cuenta con 1117 registros procesados de eventos sísmicos ocurridos en Chile, cada registro tiene los datos de aceleración para las tres componentes.

3.3.1 Variables consideradas y datos disponibles

1. Procesamiento de los registros

Los registros con magnitudes superiores a 5,5 M_w , con excepción del terremoto de 1985, fueron procesados por Iván López (2016), Daniela Vilches (2016) y Jennyfer Ordenes (2017) en sus respectivos trabajos de título. Los registros procesados del terremoto de 1985 fueron obtenidos del *Strong Motion Virtual Data Center* (VDC). El resto de los registros son procesados utilizando un código de procesamiento, válido solo para registros obtenidos mediante equipos digitales.

2. Distancias a la ruptura

Para los registros con magnitudes superiores a 5,5 M_w las distancias a la ruptura son obtenidas de los trabajos de título desarrollados por Víctor Contreras (2009), Daniela Vilches (2016) y Jennyfer Ordenes (2017). Para los registros con magnitudes inferiores a 5,5 M_w las distancias a la ruptura son calculadas como la distancia hipocentral. Cabe mencionar que las distancias a la ruptura son las informadas hasta la fecha del 10 de noviembre del 2016.

3.3.2 Distribución de los registros de la base de datos

1. Magnitud de momento

En la Tabla 3.7 y en la Figura 3.8 se muestra la distribución de los registros según la magnitud de momento.

Tabla 3.7: Distribución de registros según magnitud.

M_w	Cantidad de registros
$4,5 \leq M_w < 5$	82
$5 \leq M_w < 5,5$	225
$5,5 \leq M_w < 6$	236
$6 \leq M_w < 6,5$	267
$6,5 \leq M_w < 7$	132
$7 \leq M_w < 7,5$	47
$7,5 \leq M_w < 8$	53
$8 \leq M_w < 8,5$	54
$8,5 \leq M_w < 9$	21

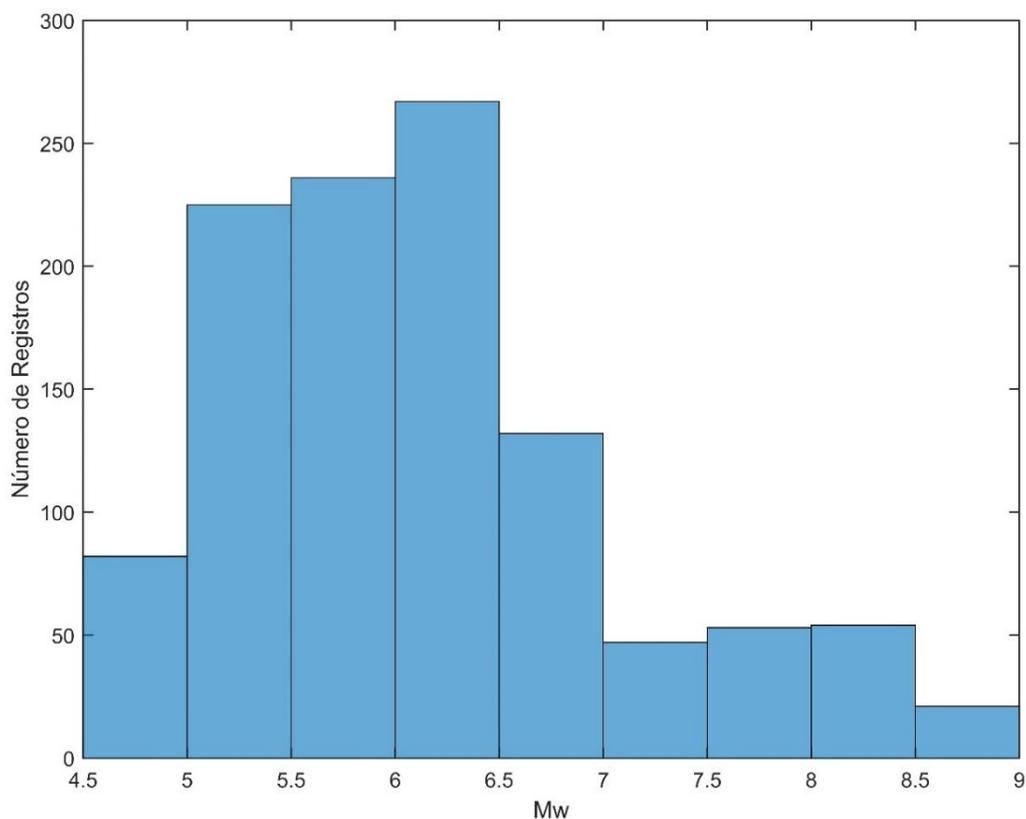


Figura 3.8: Histograma de registros según magnitud.

2. Fuente sismogénica

En la Tabla 3.8 y en la Figura 3.9 se muestra la distribución de los registros según la fuente sismogénica.

Tabla 3.8: Distribución de registros según fuente sismogénica.

Fuente sismogénica	Cantidad de registros
Subducción Interplaca	704
Subducción Intraplaca de prof. Intermedia	348
Cortical	32
Outer-rise	24
Subducción Intraplaca profundo	9

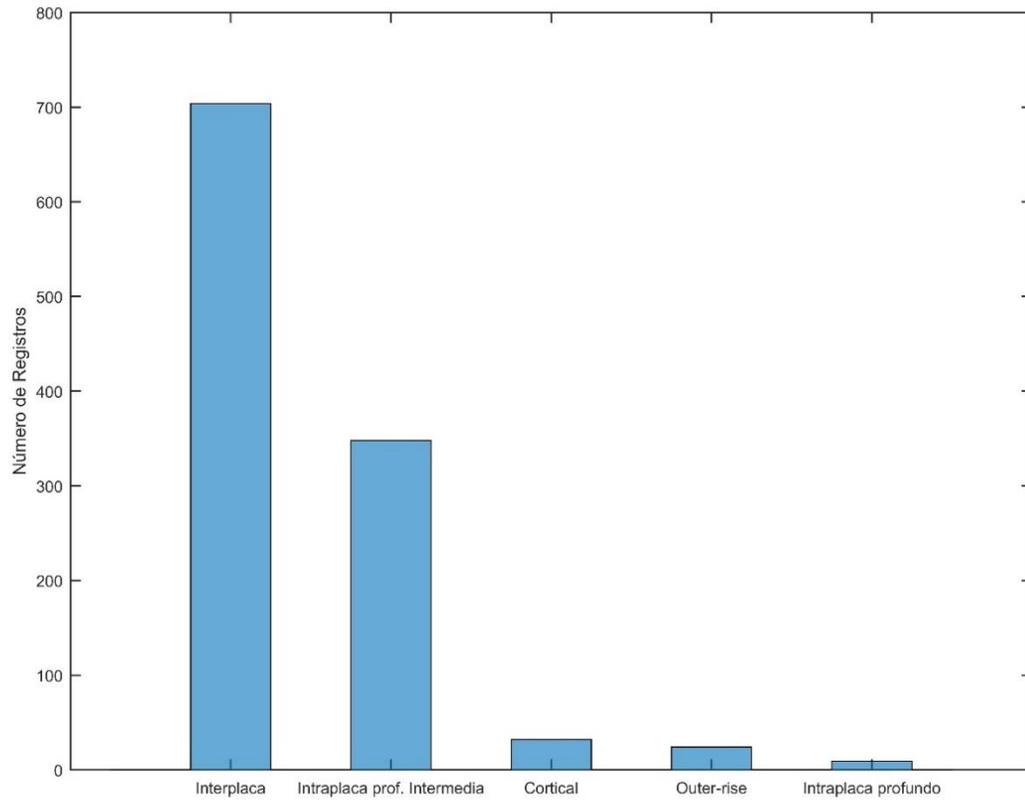


Figura 3.9: Histograma de registros según fuente sismogénica.

3. Velocidad de onda de corte V_{s30}

En la Tabla 3.9 y en la Figura 3.10 se muestra la distribución de los registros según la velocidad de onda de corte V_{s30} .

Tabla 3.9: Distribución de registros según V_{s30} .

V_{s30} [m/s]	Nº de registros
$100 \leq V_{s30} < 200$	2
$200 \leq V_{s30} < 300$	129
$300 \leq V_{s30} < 400$	310
$400 \leq V_{s30} < 500$	277
$500 \leq V_{s30} < 600$	185
$600 \leq V_{s30} < 700$	123
$700 \leq V_{s30} < 800$	17
$800 \leq V_{s30} < 900$	13
$900 \leq V_{s30} < 1000$	12
$1100 \leq V_{s30} < 1200$	16
$1200 \leq V_{s30} < 1300$	3
$1400 \leq V_{s30} < 1500$	13
$1900 \leq V_{s30} < 2000$	4
$2100 \leq V_{s30} < 2200$	12
$3000 \leq V_{s30} < 3100$	1

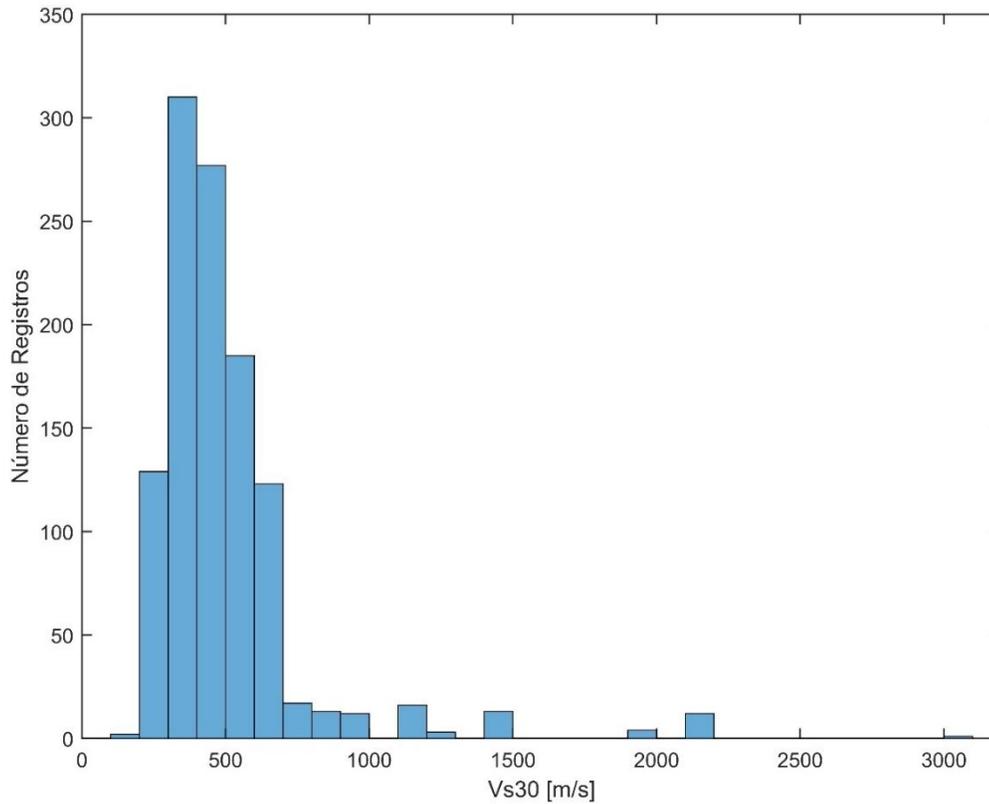


Figura 3.10: Histograma de registros según velocidad de onda de corte.

4. Tipo de suelo

En la Tabla 3.10 y en la Figura 3.11 se muestra la distribución de los registros según el tipo de suelo, de acuerdo a la clasificación del DS N°61.

Tabla 3.10: Distribución de registros según tipo de suelo.

Tipo de suelo	N° de registros
A	61
B	327
C	465
D	242
E	18
F	4

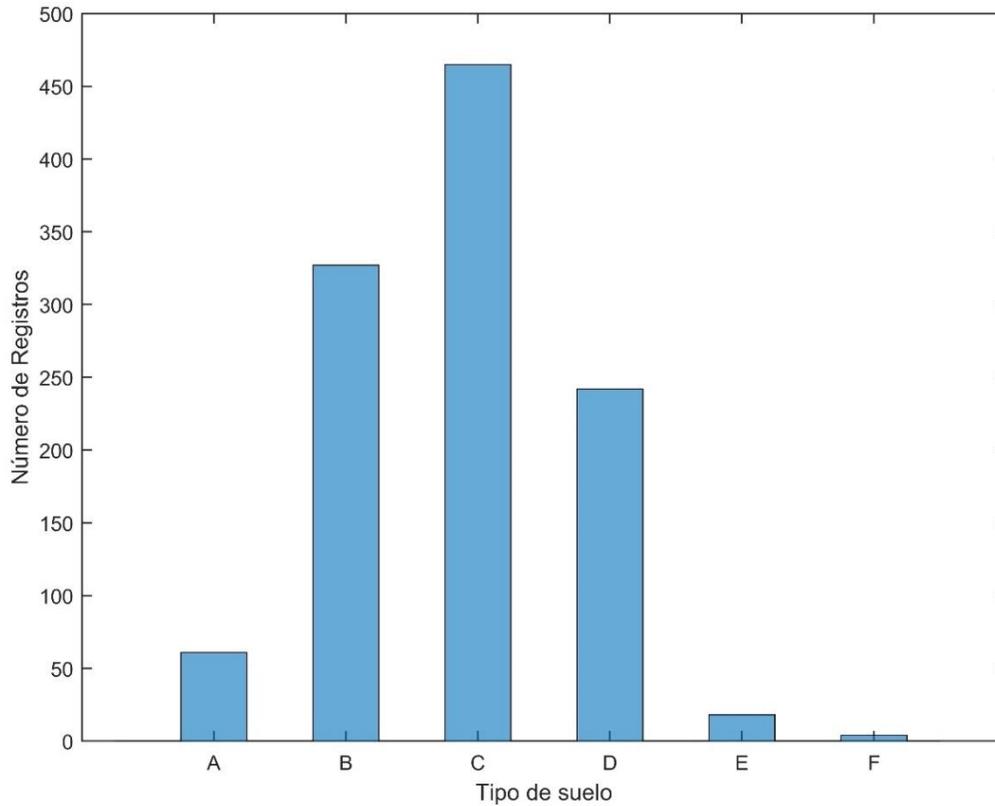


Figura 3.11: Histograma de registros según tipo de suelo.

5. Distancia a la ruptura

En la Tabla 3.11 y en la Figura 3.12 se muestra la distribución de los registros según la distancia a la ruptura.

Tabla 3.11: Distribución de registros según distancia a la ruptura.

Distancia a la ruptura [km]	N° de registros
$0 \leq R < 100$	258
$100 \leq R < 200$	589
$200 \leq R < 300$	217
$300 \leq R < 400$	31
$400 \leq R < 500$	10
$500 \leq R < 600$	8
$600 \leq R < 700$	1
$700 \leq R < 800$	0
$800 \leq R < 900$	1
$900 \leq R < 1000$	0
$1000 \leq R < 1100$	2

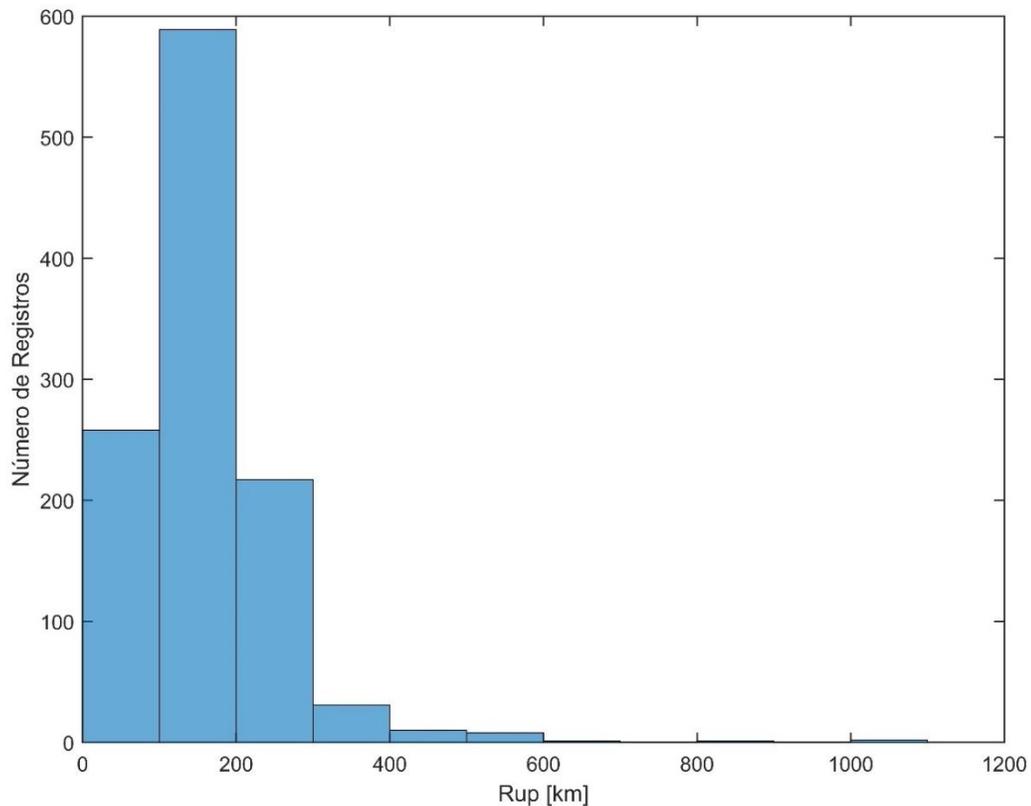


Figura 3.12: Histograma de registros según distancia a la ruptura.

3.4 Descripción general de los datos

Con el fin de caracterizar correctamente los datos que se utilizan en la presente investigación es que a continuación se muestran gráficos de magnitud, aceleración máxima del suelo (PGA), Intensidad de Arias y duración versus distancia a la ruptura, y gráficos de duración versus magnitud. Una descripción adicional de los datos utilizados se muestra en el Anexo A.3.

Es importante tener claro cuál es la tendencia que tienen los datos a utilizar, ya que de esta forma se tiene una idea de lo que se desea obtener con los resultados de las curvas de atenuación y se puede determinar en primera instancia si los resultados obtenidos tienen sentido o no.

En la Figura 3.15 se grafica la Intensidad de Arias versus la distancia a la ruptura, en el cual se observa que un aumento de la magnitud de momento implica un aumento de la Intensidad de Arias, mientras que una mayor distancia a la ruptura conlleva menores valores de Intensidad de Arias.

En la Figura 3.16 y Figura 3.17 se grafica la duración significativa en un intervalo del 5% al 95% versus la distancia a la ruptura y la magnitud de momento respectivamente. De estas figuras se observa que tanto un aumento de la distancia a la ruptura como de la magnitud de momento implican un aumento de la duración.

En la Figura 3.18 y Figura 3.19 se grafica la duración entre intervalos con un límite de 0,05g versus la distancia a la ruptura y la magnitud de momento, respectivamente. De estas figuras se observa que un aumento de la magnitud implica un aumento de la duración, mientras que una mayor distancia a la ruptura conlleva menores valores de duración entre intervalos.

En la Figura 3.20 se muestran los datos de duración entre intervalos con un límite de 0,05g en un gráfico de magnitud de momento versus distancia a la ruptura, separando los datos en duraciones mayores a 0 y duraciones nulas. Se observa que los datos con las magnitudes más bajas son los que poseen más datos con duraciones nulas, en especial para altas distancias a la ruptura, pero a medida que la magnitud y la distancia a la ruptura van aumentando también lo hace la cantidad de datos con duraciones mayores a 0.

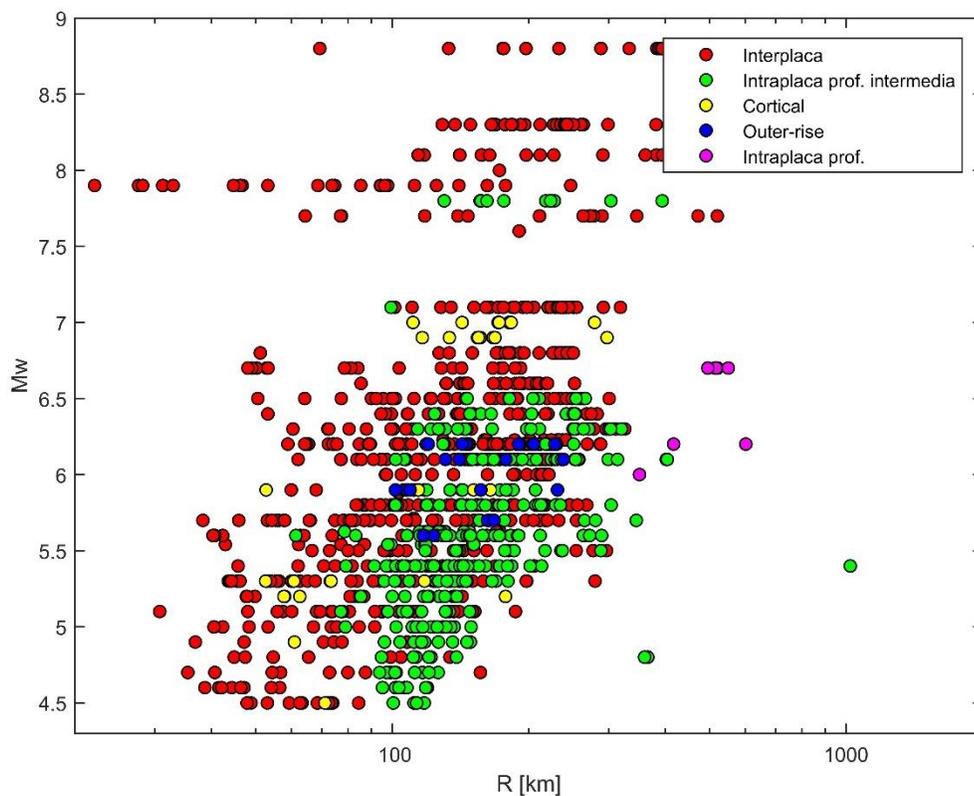


Figura 3.13: Magnitud de momento vs distancia a la ruptura de los registros utilizados.

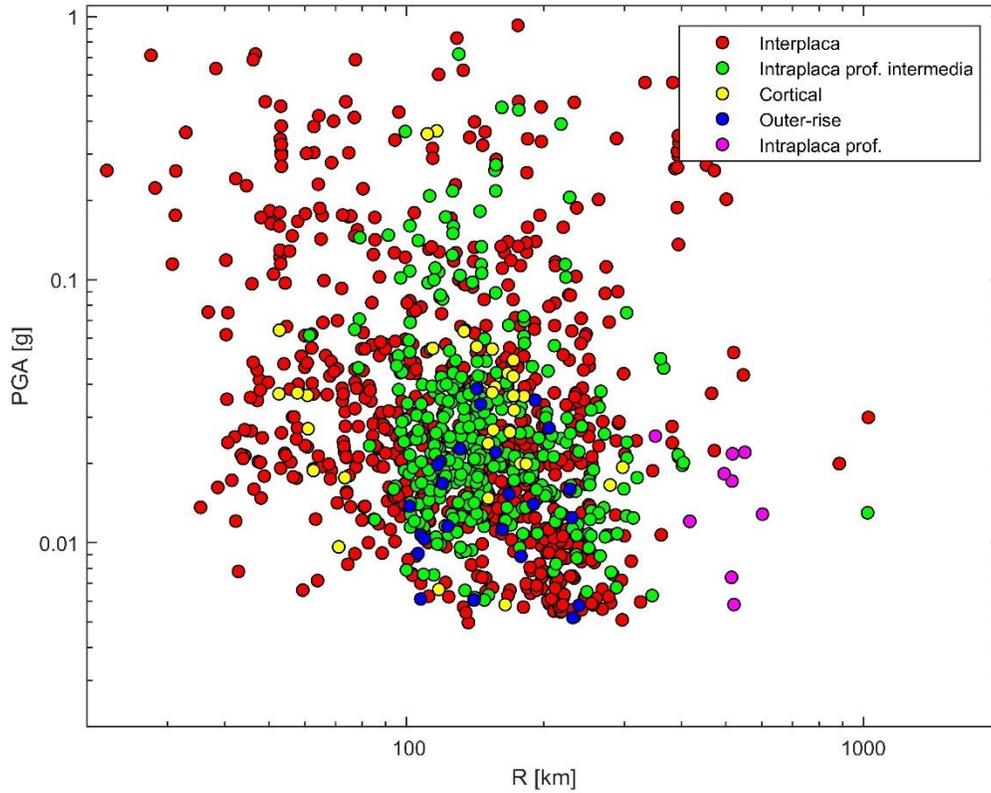


Figura 3.14: PGA vs distancia a la ruptura de los registros utilizados.

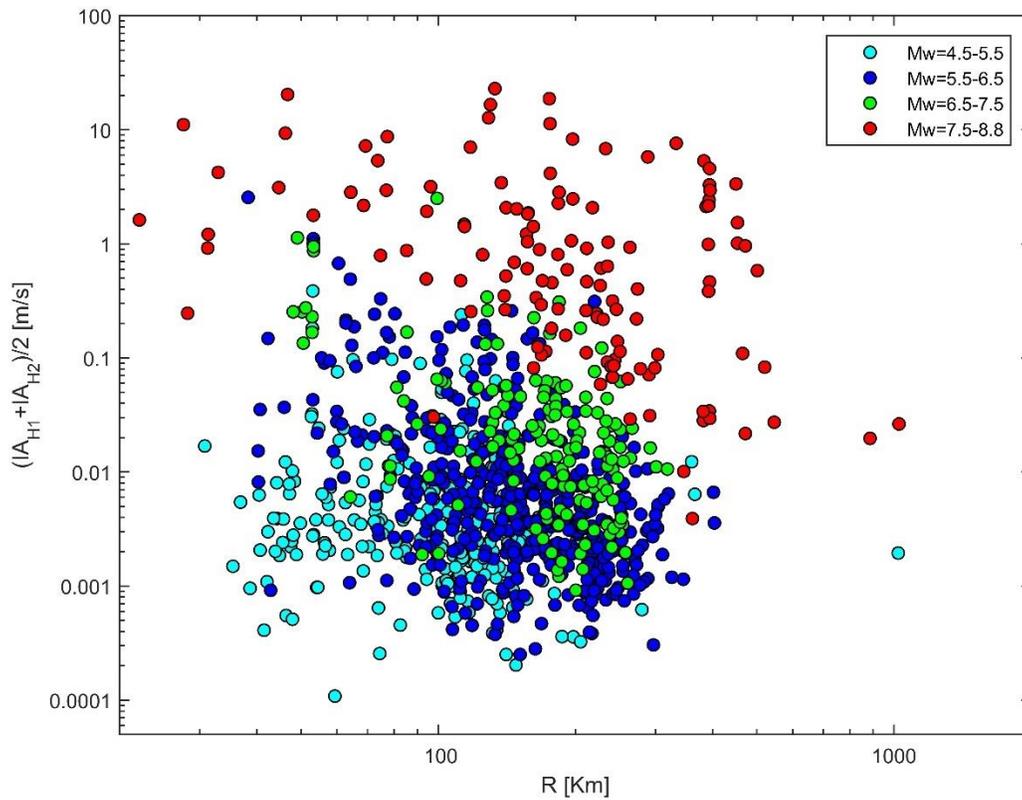


Figura 3.15: Promedio de la Intensidad de Arias de las componentes horizontales vs distancia a la ruptura.

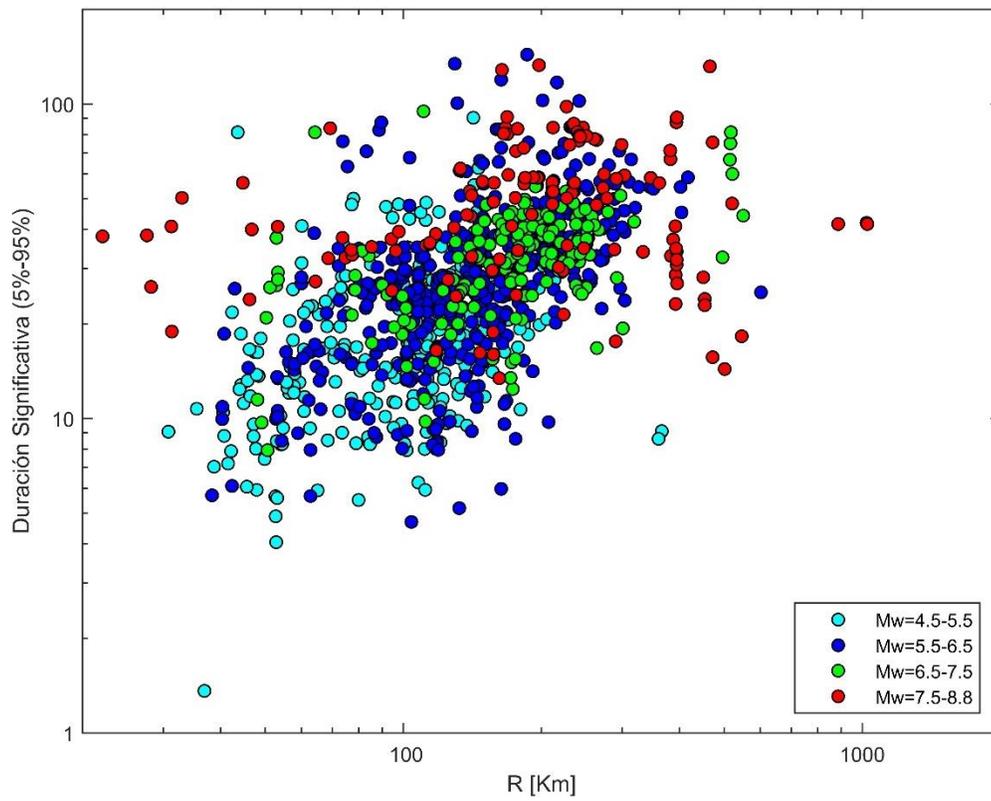


Figura 3.16: Duración significativa (5%-95%) vs distancia a la ruptura.

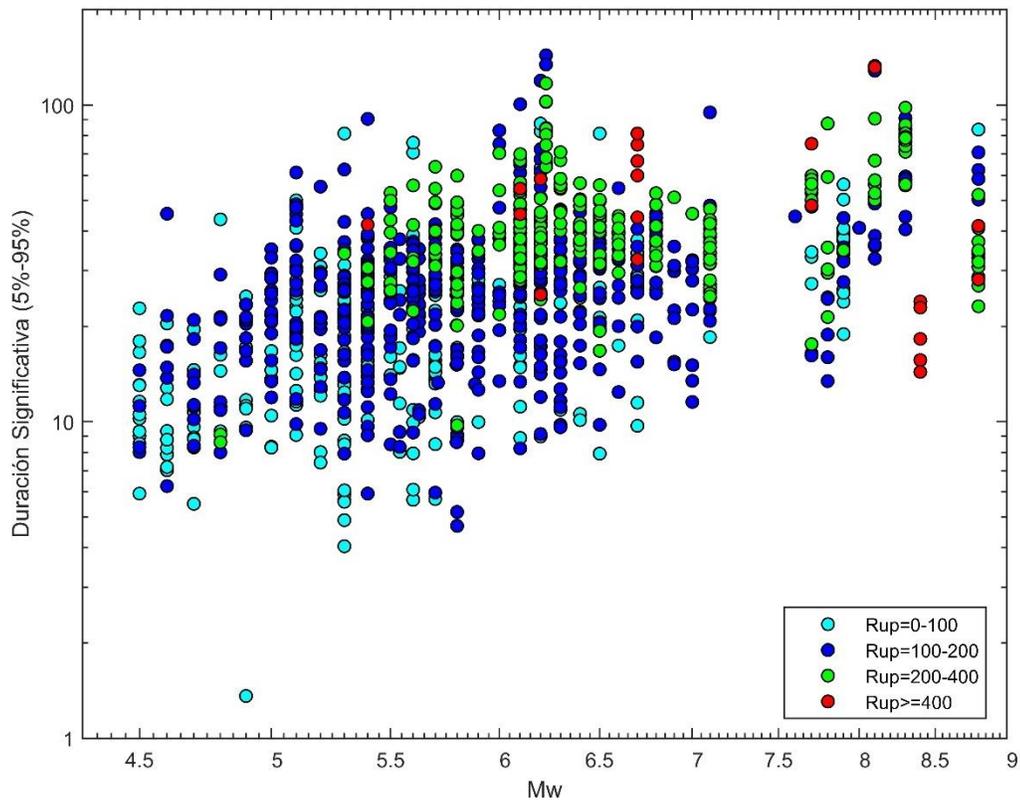


Figura 3.17: Duración significativa (5%-95%) vs magnitud de momento.

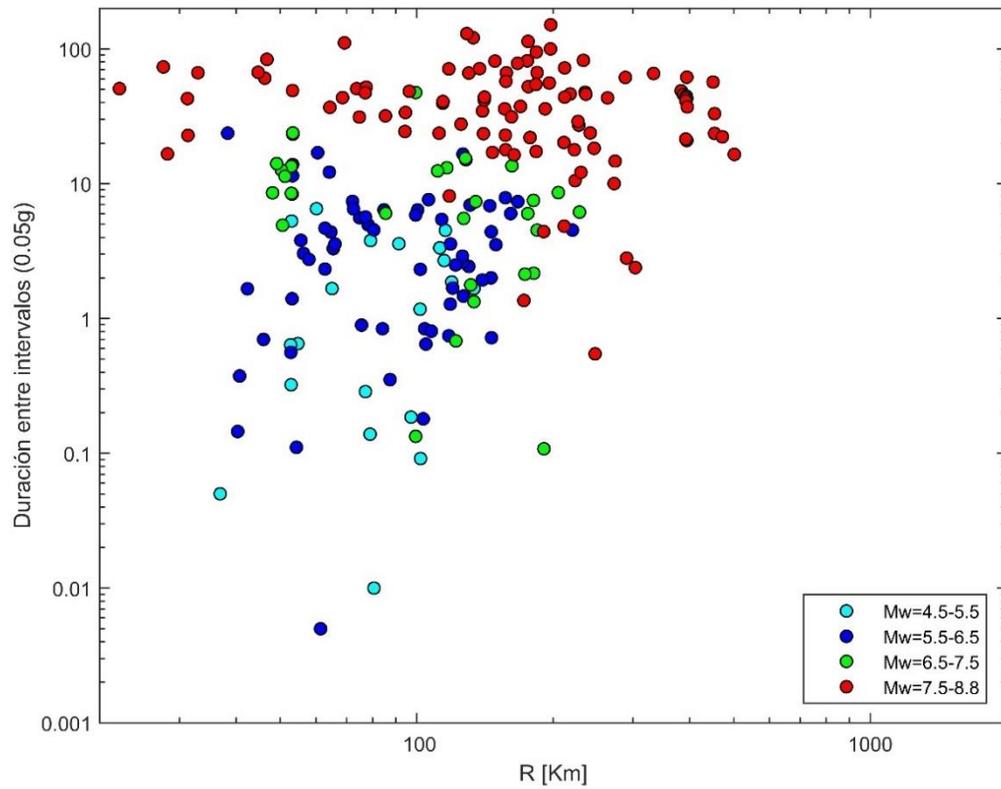


Figura 3.18: Duración entre intervalos (0,05g) vs distancia a la ruptura.

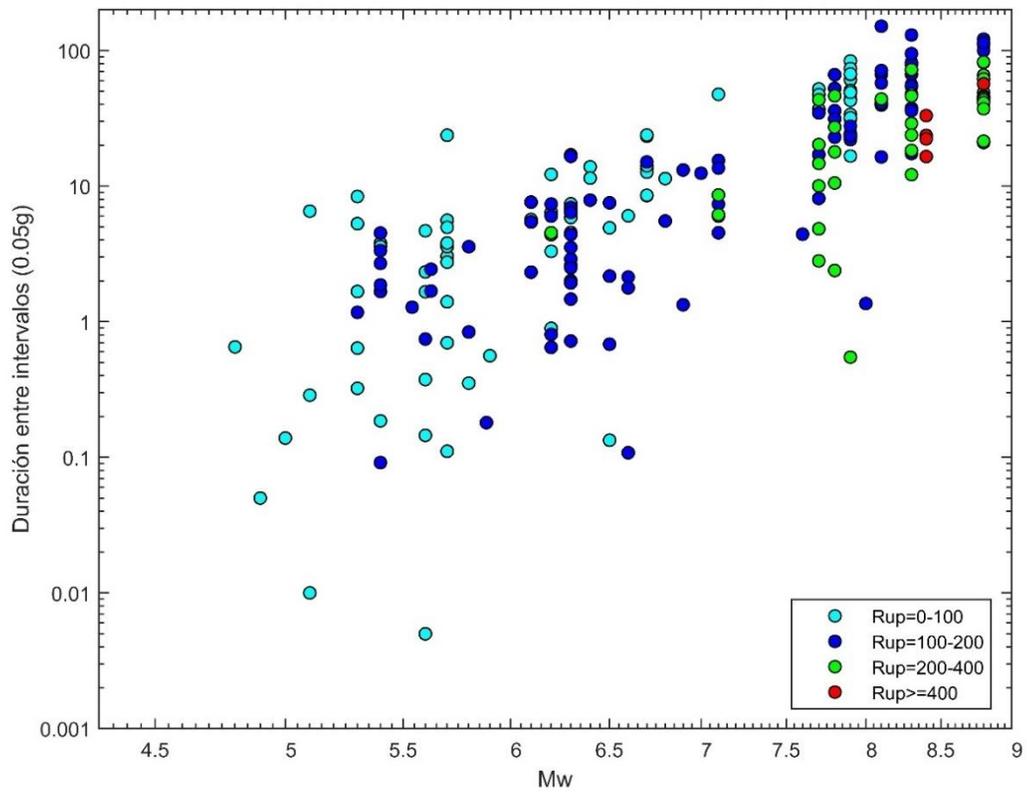


Figura 3.19: Duración entre intervalos (0,05g) vs magnitud de momento.

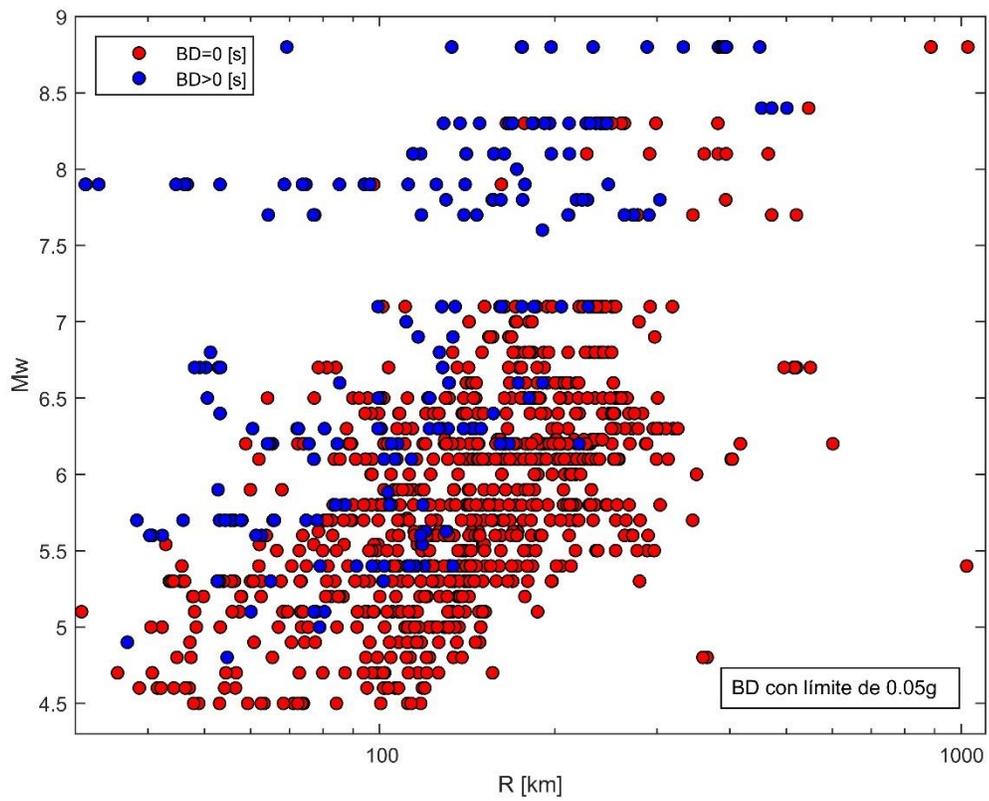


Figura 3.20: Magnitud de momento vs distancia a la ruptura para datos de duración entre intervalos (0,05g) separado según si es duración nula o mayor a cero.

CAPÍTULO 4: OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE ATENUACIÓN

4.1 Modelos de atenuación

Los modelos de atenuación descritos en la sección 2.4 fueron hechos para funcionar correctamente con los datos utilizados por cada autor, ya sea para un rango determinado de magnitud o solo para ciertas fuentes sismogénicas (Ver Tabla B.1, Tabla B.2 y Tabla B.3 del Anexo B). Es por este motivo que los modelos expuestos en la sección 2.4 fueron levemente modificados para realizar los ajustes, de este modo pueden aplicarse correctamente de acuerdo con los datos disponibles en la presente investigación.

Las variables utilizadas en este estudio son la magnitud de momento M_W , la distancia más cercana al plano de ruptura medido desde la estación en [km] R , la distancia focal en [km] h , la velocidad de onda de corte para los primeros 30 metros del depósito de suelo medida en [m/s] V_{s30} , F_{inter} es una variable ficticia que toma valores de 1 para sismos interplaca tipo thrust y 0 en el resto de los casos, F_{intra} es una variable ficticia que toma valores de 1 para sismos intraplaca de profundidad intermedia y 0 en el resto de los casos, M_{wr} es la magnitud de referencia, la cual toma valores de 4,5, 5, 6 y 7 M_W , F_{suelo} es una variable ficticia que toma el valor de 1 cuando la estación de medición está en suelo (sitios tipo B, C, D, y E) y 0 cuando está en roca (sitios tipo A). La Intensidad de Arias se representa por I_A , la duración significativa se representa por SD , y la duración entre intervalos se representa por BD . Las constantes a determinar se representan por la letra c_i . La curtosis se representa por $Kurt$ y la asimetría, o más conocida como *skewness* en inglés, se representa por $Skew$.

4.1.1 Modelos de atenuación para la Intensidad de Arias

Los modelos utilizados para realizar los ajustes, con el fin de obtener la curva de atenuación para la Intensidad de Arias, se muestran a continuación en la presente sección.

Es importante mencionar que para los modelos del 1 al 6 se realizan siete ajustes, uno utilizando todos los datos y seis separando por tipo de suelo, la diferenciación por tipo de suelo se hace ya que estos modelos no presentan ningún término que represente las diferencias en las características del sitio para las diferentes estaciones.

Modelo 1

El modelo 1 se basa en el funcional propuesto por Hwang *et al.* en 2004, donde el cambio realizado es la inclusión de variables ficticias para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.1).

$$\ln(I_A) = c_1 M_W + c_2 \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2}\right) + c_3 + c_4 F_{inter} + c_5 F_{intra} \quad (4.1)$$

Modelo 2

El modelo 2 se basa en el funcional propuesto por Hwang *et al.* en 2004. Incluye los cambios indicados en el modelo 1, pero además, en lugar de considerar la distancia focal como parámetro de entrada se considera como una constante a ajustar.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.2).

$$\ln(I_A) = c_1 M_W + c_2 \ln\left(\sqrt{R^2 + c_4^2}\right) + c_3 + c_5 F_{inter} + c_6 F_{intra} \quad (4.2)$$

Modelo 3

El modelo 3 se basa en el funcional propuesto por Rajabi *et al.* en 2010, donde el cambio realizado es la inclusión de variables ficticias para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.3).

$$\ln(I_A) = c_1 + c_2 M_W + c_3 \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2}\right) + c_4 \sqrt{R^2 + h^2} + c_5 F_{inter} + c_6 F_{intra} \quad (4.3)$$

Modelo 4

El modelo 4 se basa en el funcional propuesto por Rajabi *et al.* en 2010. Incluye los cambios indicados en el modelo 3, pero además, en lugar de considerar la distancia focal como parámetro de entrada se considera como una constante a ajustar.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.4).

$$\ln(I_A) = c_1 + c_2 M_W + c_3 \ln\left(\sqrt{R^2 + c_5^2}\right) + c_4 \sqrt{R^2 + c_5^2} + c_6 F_{inter} + c_7 F_{intra} \quad (4.4)$$

Modelo 5

El modelo 5 se basa en el funcional propuesto por Gomez-Bernal *et al.* en 2012. El cambio realizado es que en lugar de utilizar variables ficticias para diferenciar el mecanismo focal, se utilizan para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.5).

$$\ln(I_A) = c_1 M_W + c_2 h + c_3 F_{inter} + c_4 F_{intra} + c_5 - \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2} + 0,0055 \cdot 10^{0,525 M_W}\right) - 0,0015 \sqrt{R^2 + h^2} \quad (4.5)$$

Modelo 6

El modelo 6 se basa en el funcional propuesto por Gomez-Bernal *et al.* en 2012. Es similar al modelo 5, sin embargo, en lugar de considerar la profundidad focal como parámetro de entrada se considera como una constante a ajustar.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.6).

$$\ln(I_A) = c_1 M_W + c_2 h + c_3 F_{inter} + c_4 F_{intra} + c_5 - \ln\left(\sqrt{R^2 + c_6^2} + 0.0055 \cdot 10^{0,525M_W}\right) - 0.0015 \sqrt{R^2 + c_6^2} \quad (4.6)$$

Modelo 7

El modelo 7 se basa en el funcional propuesto por Lee *et al.* en 2012. El cambio que se le realiza al modelo original es que, en lugar de utilizar una magnitud de referencia de 6, se prueba con diferentes magnitudes de referencia para encontrar la más adecuada según los criterios establecidos en la sección 4.3. También, en lugar de utilizar una velocidad de onda de corte de referencia de 1130 [m/s] se utiliza una de 1100 [m/s]. Además, en lugar de utilizar variables ficticias para diferenciar el mecanismo focal, se utilizan para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.7).

$$\ln(I_A) = c_1 + c_2(M_W - M_{wr}) + c_3 \ln\left(\frac{M_W}{M_{wr}}\right) + c_4 \ln\left(\sqrt{R^2 + c_8^2}\right) + c_5 \ln(V_{s30}/1100) + c_6 F_{inter} + c_7 F_{intra} \quad (4.7)$$

Modelo 8

El modelo 8 se basa en el funcional propuesto por Foulser-Piggot y Goda en 2012. El cambio que se le realiza al modelo original es que, en lugar de utilizar una magnitud de referencia de 5, se prueba con diferentes magnitudes de referencia para encontrar la más adecuada según los criterios establecidos en la sección 4.3. Además, en lugar de utilizar variables ficticias para diferenciar el mecanismo focal, se utilizan para diferenciar únicamente la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.8).

$$\ln(I_A) = c_1 + c_2(M_W - M_{wr}) + (c_3 + c_4 M_W) \ln\left(\sqrt{R^2 + c_5^2}\right) + c_6 \max(H - 30) + c_7 F_{inter} + c_8 F_{intra} + c_9 \ln\left(\frac{V_{s30}}{1100}\right) \quad (4.8)$$

4.1.2 Modelos de atenuación para la duración significativa

Los modelos utilizados para realizar los ajustes, con el fin de obtener la curva de atenuación para la duración significativa de un sismo, se muestran a continuación.

Modelo 1

El modelo 1 se basa en el funcional propuesto por Hernández y Cotton en el 2000. El cambio que se le realiza al modelo original es que se incorporan variables ficticias para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.9).

$$\ln(SD) = c_1 + c_2 \cdot M_w + c_3 \cdot \ln(R) + c_4 \cdot F_{suelo} + c_5 \cdot F_{inter} + c_6 \cdot F_{intra} \quad (4.9)$$

Modelo 2

El modelo 2 se basa en el funcional propuesto por Kempton y Stewart en 2006. El cambio que se le realiza al modelo base original es que se incorporan variables ficticias para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.10).

$$\ln(SD) = \ln \left(\frac{\left(\frac{e^{c_1 + c_2(M_w - M_{wr})}}{10^{1.5M_w + 16.05}} \right)^{-\frac{1}{3}}}{4.9 \cdot 10^6 \cdot \beta} + c_3 \cdot R + c_4 + c_5 V_{s30} + c_6 F_{inter} + c_7 F_{intra} \right) \quad (4.10)$$

4.1.3 Modelos de atenuación para la duración entre intervalos

Los modelos utilizados para realizar los ajustes, con el fin de obtener la curva de atenuación para la duración entre intervalos de un sismo, se muestran a continuación.

Modelo 1

El modelo 1 se basa en el funcional propuesto por Bommer *et al.* en 2009. No se le realiza ningún cambio al modelo original.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.11).

$$\ln(BD) = c_1 + c_2 \cdot M_w + c_3 \cdot \ln \left(\sqrt{R^2 + c_4^2} \right) + c_5 \cdot \ln(V_{s30}) + c_6 \cdot F_{inter} \quad (4.11)$$

Modelo 2

El modelo 2 se basa en el funcional propuesto por Lee y Green en 2012. El cambio realizado al modelo original es que no se utiliza la función de ponderación, si no que se utiliza un método de clasificación basado en Support Vector Machine (SVM), el cual se explica en la sección 4.3.3. Además, se incorporan variables ficticias para diferenciar la fuente sismogénica.

El modelo utilizado se muestra en la ecuación (4.12).

$$\ln(BD) = c_1 + c_2 \cdot (M_w - 6) + c_3 \cdot R + (c_4 + c_5 \cdot R) \cdot F_{suelo} + c_6 \cdot F_{inter} + c_7 \cdot F_{intra} \quad (4.12)$$

4.2 Método de ajuste

Para realizar los ajustes necesarios, de modo de obtener los coeficientes de los modelos de atenuación, se utiliza el método Bayesiano para actualizar la estimación de parámetros con incertidumbre. Se utiliza este método ya que las curvas de atenuación entregan un valor esperado, y no un valor único, teniendo esto en cuenta, el método Bayesiano permite obtener una distribución de probabilidad para cada constante optimizada, y por consiguiente, para el parámetro en estudio. A partir de lo anterior, al utilizar la curva de atenuación se puede decidir que intervalo de confianza se le quiere otorgar al resultado de cada parámetro.

A modo general, para llevar a cabo este procedimiento se le otorga una distribución de probabilidad aproximada a cada coeficiente, luego mediante una optimización se obtiene la distribución ajustada de estas constantes, lo cual a su vez permite obtener la distribución de probabilidad del parámetro en estudio. A continuación se explica el problema matemático que se resuelve con este ajuste.

En la teoría de probabilidades existen tres teoremas principales. El primero es el teorema de marginalización, el cual se muestra en la ecuación (4.13), el segundo es el teorema de probabilidad total, enunciado en la ecuación (4.14), y el tercero es el teorema de Bayes, el cual se muestra en la ecuación (4.15).

Teorema de Marginalización:

$$p(\theta_i) = \int_{\theta} p(\theta_i, \theta_j) d\theta_j \quad (4.13)$$

Teorema de Probabilidad Total:

$$p(\theta_i) = \int_{\theta} p(\theta_i | \theta_j) p(\theta_j) d\theta_j \quad (4.14)$$

Teorema de Bayes:

$$p(\theta_j | \theta_i) = \frac{p(\theta_i | \theta_j) p(\theta_j)}{\int_{\theta} p(\theta_i | \theta_j) p(\theta_j) d\theta_j} \quad (4.15)$$

Donde se entiende que $p(\theta_i)$ corresponde a la distribución de probabilidad de θ_i , $p(\theta_i, \theta_j)$ corresponde a la distribución conjunta de θ_i y θ_j , y por último $p(\theta_i | \theta_j)$ corresponde a la distribución condicional de θ_i conociendo θ_j .

De los tres teoremas anteriores el más relevante es el teorema de Bayes, en lo que a este estudio respecta, debido a que el método de análisis Bayesiano se realiza a partir del teorema de Bayes. Para aplicarlo al problema que se busca resolver, se puede escribir como se muestra en la ecuación (4.16),

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D}) = \frac{p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})}{\int_{\boldsymbol{\theta}} p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})d\boldsymbol{\theta}} \quad (4.16)$$

donde \mathbf{D} representa los datos disponibles, tanto parámetros de entrada como de salida (magnitud, distancia, velocidad de onda de corte, Intensidad de Arias, duración, etc.), $\boldsymbol{\theta}$ corresponde a los coeficientes que se desean ajustar, $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})$ se conoce como función de verosimilitud o *likelihood function*, $p(\boldsymbol{\theta})$ se conoce como distribución previa o *prior distribution*, $p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})$ se conoce como distribución posterior o *posterior distribution*, finalmente $\int_{\boldsymbol{\theta}} p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})d\boldsymbol{\theta}$ se conoce como evidencia o *evidence* y es una integral multidimensional, que al ser evaluada es una constante que normaliza la ecuación (4.16).

Suponemos que la función a atenuar, la cual corresponde a un modelo determinístico, se define como $h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{u})$, donde \mathbf{u} corresponde a los parámetros de entrada. Además, se considera que el modelo determinista puede presentar cierto nivel de error, lo cual se modela considerando un error aditivo e , por lo que el valor real del parámetro de salida se define como $y = h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) + e$, donde y es la salida real del problema. Se asume que el error e sigue una distribución Gaussiana con media cero y desviación estándar σ_e , lo que lleva, por aditividad, a que y también siga una distribución Gaussiana con desviación estándar σ_e , pero con media $h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{u})$.

La razón de escoger una distribución Gaussiana para las constantes y el error es que para una variable aleatoria con media y varianza conocida, la función de densidad de probabilidad que incluye la mayor cantidad de incertidumbres es un Gaussiano, que es el caso más desfavorable, lo anterior se justifica por el principio de máxima entropía de información, de acuerdo a lo descrito por Jaynes (2003).

Por definición, la función de la distribución Gaussiana es la que se muestra en la expresión (4.17),

$$p(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{\theta} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.17)$$

donde σ corresponde a la desviación estándar y μ corresponde a la media. Al aplicar la ecuación (4.17) al problema que se está resolviendo se obtiene la ecuación (4.18).

$$p(y|\mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y - h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}))^2}{2\sigma_e^2}\right) \quad (4.18)$$

La ecuación (4.18) es aplicable a cada par de datos entrada-salida de cada uno de los registros, pudiéndose escribir como se muestra en la ecuación (4.19),

$$p(\hat{y}_i|\hat{\mathbf{u}}_i, \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i))^2}{2\sigma_e^2}\right) \quad (4.19)$$

donde i corresponde al número del registro, $\hat{\mathbf{u}}_i$ es el vector con los valores de entrada del registro i , $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ es el vector con las variables a obtener con el ajuste e \hat{y}_i corresponde al escalar con el valor del parámetro de salida del registro i . Para cada valor de i se define, utilizando la ecuación (4.19), la función de densidad de probabilidad esperada para cada salida \hat{y}_i , con $\hat{\mathbf{u}}_i$ conocido y asumiendo un $\hat{\boldsymbol{\theta}}$.

Asumiendo el caso en el que todos los registros son independientes, se cumple que la probabilidad de que ocurran todos simultáneamente es igual al producto de las probabilidades independientes de cada registro (i.e. $p(x_1, x_2, \dots, x_M) = p(x_1) \cdot p(x_2) \cdot \dots \cdot p(x_M)$). Como consecuencia de esto, la función de probabilidad que incluye a todos los registros se escribe como en la ecuación (4.20),

$$p(\hat{\mathbf{Y}}|\hat{\mathbf{U}}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^M p(\hat{y}_i|\hat{\mathbf{u}}_i, \boldsymbol{\theta}) = \left(\frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}}\right)^M \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i)]^2\right) \quad (4.20)$$

donde $p(\hat{\mathbf{Y}}|\hat{\mathbf{U}}, \boldsymbol{\theta}) = p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})$ y representa la función de densidad de probabilidad de las salidas estimada por la predicción, $\hat{\mathbf{Y}}$ es el vector con todos los escalares de salida, $\hat{\mathbf{U}}$ es el vector con todos los vectores de entrada, \mathbf{D} representa a todos los datos disponibles (i.e. $\mathbf{D} = [\hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{Y}}]$) y M es el número total de registros utilizados.

Lo que se busca resolver con el ajuste es la ecuación (4.16), es decir, el valor esperado de $p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})$. Sin embargo, el denominador de dicha ecuación es una forma de normalizar la expresión y por lo tanto no es importante en la resolución de este problema. En otras palabras, el problema a resolver ahora se puede escribir como se muestra en la ecuación (4.21),

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D}) \propto p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.21)$$

donde $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})$ esta dado por la ecuación (4.20) y $p(\boldsymbol{\theta})$ es la distribución de probabilidad de las constantes a ajustar. Para obtener dicha distribución de probabilidad se utiliza la función de *Matlab mvnpdf* (*multivariate normal probability density function*), la cual entrega un vector que contiene la densidad de probabilidad multivariable con distribución normal para las constantes a atenuar.

Para encontrar $p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})$ y el valor de $\boldsymbol{\theta}$, lo que se debe hacer es encontrar el máximo argumento de dicha ecuación, vale decir, resolver la ecuación (4.22). Se busca encontrar el máximo debido a que el valor óptimo que se está buscando es el valor medio de la distribución de probabilidad, la cual al ser gaussiana implica que el óptimo coincide con el máximo.

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max(p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})) \quad (4.22)$$

En la ecuación (4.22) $\boldsymbol{\theta}^*$ corresponde al $\boldsymbol{\theta}$ óptimo. Como una forma de estabilizar la solución típicamente se utiliza el logaritmo natural, ya que es monótonicamente creciente y la posición del máximo se mantiene. En consecuencia de lo anterior, para

resolver la ecuación (4.21) se obtiene el argumento máximo del logaritmo de dicha expresión, en otras palabras, se resuelve la ecuación (4.23).

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max \left(\ln(p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})) \right) \quad (4.23)$$

La forma utilizada para resolver la ecuación (4.23) es una herramienta de optimización que entrega el programa *Matlab* llamada *fmincon*, la cual encuentra el mínimo de una función multivariable con restricciones. Debido a que lo que se busca es encontrar el máximo de la función (4.23) y no el mínimo, que es lo que hace la herramienta de *Matlab*, lo que se resuelve, estrictamente hablando, es la ecuación (4.24).

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max \left(-\ln(p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})) \right) \quad (4.24)$$

Al reemplazar la ecuación (4.20) en la ecuación (4.24) se obtiene finalmente la ecuación a optimizar (4.25).

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max \left(-\ln \left(\left(\frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \right)^M \exp \left(-\frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i)]^2 \right) p(\boldsymbol{\theta}) \right) \right) \quad (4.25)$$

Debido a que σ_e también se puede incluir como una variable a optimizar se hace necesario sacarla de la ecuación (4.25) para poder realizar la optimización solo con las constantes a atenuar como incógnitas. Para esto se asume una condición estacionaria para la desviación estándar del error, es decir, se asume que σ_e es el mismo sin importar la cantidad de registros que se utilicen. Matemáticamente esta condición estacionaria implica que la derivada la ecuación (4.21) respecto a σ_e es igual a 0. Si $L = \ln(p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta}))$, entonces en la condición estacionaria se cumple la ecuación (4.26).

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_e} = 0 \quad (4.26)$$

De la ecuación (4.26) se obtiene entonces que la desviación estándar del error puede ser reemplazada por la ecuación (4.27). La demostración de este paso se encuentra en el Anexo C.1.

$$\sigma_e^2 = J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i)]^2 \quad (4.27)$$

En la ecuación (4.27) se entiende que $J(\boldsymbol{\theta})$ es el valor medio cuadrático del error. Finalmente, al reemplazar la ecuación (4.27) en la ecuación (4.25) se obtiene que la función a optimizar es la que se ve en la expresión (4.28). La demostración de este paso se encuentra en el Anexo C.2.

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max \left(- \left(-\frac{M}{2} \ln(J(\boldsymbol{\theta}) \cdot 2\pi) - \frac{M}{2} + \ln(p(\boldsymbol{\theta})) \right) \right) \quad (4.28)$$

Los valores óptimos obtenidos para las constantes ajustadas tienen una distribución de probabilidad gaussiana, de media $\boldsymbol{\theta}^*$ y desviación estándar $\boldsymbol{\sigma}$, la cual se calcula a partir de la raíz cuadrada de la diagonal de la matriz de covarianza Σ^* .

Para resolver el problema anterior es necesario entregar cuatro parámetros de entrada para cada constante, un valor medio inicial aproximado, un límite inferior y uno superior, y por último una desviación estándar inicial. Los valores medios iniciales aproximados de las constantes se obtienen de la regresión de dos pasos propuesta por Joyner y Boore (1993), de las constantes de los modelos originales o de la regresión de mínimos cuadrados. Los límites inferiores y superiores para dichas constantes se asignan de modo de no interferir con la optimización, vale decir, se busca que el gradiente obtenido sea cercano a cero, ya que esto indica que se alcanza el mínimo. Finalmente, se le otorga una desviación estándar inicial del 50% del valor medio aproximado a cada constante.

Debido a la diferencia en órdenes de magnitud de las constantes a atenuar se genera un error asociado a este problema, por lo que una medida que se toma para minimizar este error, es trabajar las distribuciones de probabilidad de las constantes a atenuar en otro espacio, el espacio Gaussiano estándar. Inicialmente la distribución de probabilidad de dichas constantes sigue una distribución normal de media $\boldsymbol{\mu}$ y matriz de covarianza $\boldsymbol{\Sigma}$ (expresión (4.29)), pero al pasar al espacio Gaussiano estándar siguen una distribución normal con media cero y matriz de covarianza la matriz identidad (expresión (4.30)).

$$\boldsymbol{\theta} \rightarrow N \sim (\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4.29)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{sg} \rightarrow N \sim (0, I) \quad (4.30)$$

Debido a que la optimización se hace en el espacio Gaussiano estándar es necesario llevar los parámetros de entrada a este nuevo espacio, para realizar esto se utilizan las ecuaciones (4.31), (4.32) y (4.33),

$$\boldsymbol{\theta}_{sg} = -C^{-1}\boldsymbol{\mu} + C^{-1}\boldsymbol{\theta} \quad (4.31)$$

$$\boldsymbol{lb}_{sg} = C^{-1}(\boldsymbol{lb} - \boldsymbol{\mu}) \quad (4.32)$$

$$\boldsymbol{ub}_{sg} = C^{-1}(\boldsymbol{ub} - \boldsymbol{\mu}) \quad (4.33)$$

donde \boldsymbol{lb} y \boldsymbol{ub} son los valores mínimos y máximos, respectivamente, para las constantes a atenuar en el espacio original, \boldsymbol{lb}_{sg} y \boldsymbol{ub}_{sg} son los valores mínimos y máximos, respectivamente, pero en el espacio Gaussiano estándar, y C es la matriz de la descomposición de Cholesky de la covarianza, la cual se define en la ecuación (4.34).

$$\boldsymbol{\Sigma} = C C^T \quad (4.34)$$

Para el cálculo de la matriz C se utiliza la función de *Matlab chol* ($chol = (\Sigma, 'lower')$), la cual realiza la descomposición de Cholesky a partir de la matriz de covarianza, resolviendo así la ecuación (4.34).

Los parámetros de salida de este análisis son los valores óptimos para las constantes y el hessiano, ambos en el espacio Gaussiano estándar, además se obtiene el gradiente de la optimización y la desviación estándar del error se puede calcular con la ecuación (4.27), teniendo en cuenta que el cálculo debe hacerse con las constantes en el espacio original. Para realizar la transformación del espacio Gaussiano estándar al espacio original, de las constantes optimizadas y del hessiano, se utilizan las ecuaciones (4.35) y (4.36),

$$\boldsymbol{\theta}^* = \boldsymbol{\mu} + C\boldsymbol{\theta}_{sg}^* \quad (4.35)$$

$$\Sigma^* = C\Sigma_{sg}^*C^T \quad (4.36)$$

donde el superíndice $*$ indica que se refiere a la variable optimizada y Σ_{sg}^* es la matriz de covarianza óptima en el espacio Gaussiano estándar, la cual se calcula como el inverso del hessiano ($\Sigma_{sg}^* = H_{sg}^{-1}$).

4.3 Resultados de los ajustes

En todos los ajustes realizados en la presente sección se utiliza el método Bayesiano para actualizar la estimación de parámetros con incertidumbre, explicado en la sección 4.2.

Para realizar los ajustes se descartan todos los registros asociados a eventos intraplaca profundos, corticales y outer-rise debido a que se cuenta con muy pocos sismos asociados a las fuentes sismogénicas mencionadas, lo que podría provocar resultados poco representativos para este tipo de eventos, además de un mayor error asociado. Asimismo, debido a la naturaleza de los suelos tipo F, los registros asociados a estaciones con suelos especiales también son descartados.

Los ajustes son realizados con 288 eventos diferentes, sumando un total de 1048 registros, de los cuales 701 están asociados a eventos interplaca tipo thrust y 347 a intraplaca de profundidad intermedia. El rango de magnitud utilizado en los ajustes es de 4,5 hasta 8,8 M_w , las distancias a la ruptura van desde 22,1 [km] hasta 1026,01 [km], las profundidades del hipocentro van desde 8,8 [km] hasta 197,1 [km] y las velocidades de onda de corte V_{s30} varían de 223 [m/s] hasta 3010 [m/s].

La Intensidad de Arias utilizada en los ajustes es calculada como el promedio de las dos componentes horizontales. Se escoge esta forma para calcular la Intensidad de Arias debido a que es la que tiene el mejor respaldo teórico, ya que tal y como se explica en la sección 2.3.1, es un tensor de segundo orden, lo cual implica que su traza se mantiene invariante, y por lo tanto cada par de ejes ortogonales que pasan por un punto de origen predefinido tienen el mismo valor de Intensidad de Arias (i.e. $I_{H1} + I_{H2} = cte.$). Se utilizan las componentes horizontales debido a que son la parte más relevante del sismo en lo que respecta a efectos destructivos, y se utiliza el promedio para evitar tener

valores de Intensidad de Arias que a primera vista pudiesen parecer que son el doble de lo que es acostumbrado para este parámetro.

Para la duración del movimiento fuerte se utilizan las dos definiciones explicadas en la sección 2.3.2, la duración significativa y la duración entre intervalos. La duración significativa se calcula para dos intervalos diferentes de porcentaje de energía liberada, del 5% al 75% y del 5% al 95%. Por otra parte, la duración entre intervalos se calcula para dos límites de aceleración diferentes, 0,05g y 0,1g, donde g es la aceleración de gravedad. Además, independiente de la definición utilizada, la duración del evento en la estación de registro se calcula como la media geométrica de las componentes horizontales.

En la Tabla 4.1, Tabla 4.7 y Tabla 4.13 se presentan los resultados más relevantes obtenidos de los ajustes, a partir de los cuales se escoge el modelo que mejor se ajusta, según los criterios expuestos más adelante en la presente sección, a los sismos chilenos de tipo interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia, para los diferentes parámetros en estudio. En las tablas se expone la desviación estándar del error (σ_e), la cual se obtiene de la ecuación (4.27), también se muestra la desviación estándar (σ) de los residuos, ambas en unidades de logaritmo natural (i.e. $\ln(\text{valor medido}) - \ln(\text{valor esperado})$), la media (μ), la curtosis (*Kurt*) y la asimetría (*Skew*) de los residuos obtenidos de los ajustes realizados a los diferentes modelos.

Es importante tener claro que la curtosis es una medida de cuan concentrada es la distribución. Una distribución normal posee una curtosis de 3, una distribución con menos cola que una normal tiene una curtosis mayor a 3, mientras que una con más cola presenta una curtosis menor a 3. Por otra parte, la asimetría, o mejor conocida por su nombre en inglés *skewness*, es una medida de asimetría de los datos respecto a la media. Una distribución simétrica posee una asimetría de 0, pero se considera simétrica para un rango de asimetría entre -0,5 y 0,5, si los datos están más distribuidos hacia la izquierda la asimetría es negativa, mientras que si los datos están más distribuidos hacia la derecha la asimetría es positiva.

Para la elección del funcional óptimo es necesario tener en consideración los siguientes puntos:

1. Una menor desviación estándar del error implica un menor error asociado al ajuste, y por lo tanto una menor incertidumbre.
2. Una baja diferencia entre la desviación estándar del error y la desviación estándar de los residuos indica que la optimización es consistente con el modelo obtenido.
3. Una media de los residuos cercana a 0 es favorable, ya que indica que la curva obtenida se encuentra centrada respecto a los datos.
4. Una distribución normal de los residuos indica que la sobreestimación y la subestimación de los resultados obtenidos del modelo, respecto de los datos de los parámetros en estudio, es consistente, y por lo tanto no existe una tendencia en los residuos.

Los valores de Intensidad de Arias o duración del movimiento fuerte que se obtienen con las curvas de atenuación son valores esperados de los mismos. Cada punto de las curvas obtenidas representa la media de una distribución de probabilidad gaussiana, lo que significa que un 50% de los valores de una muestra aleatoria se encuentran por debajo de la curva y un 50% sobre esta. Producto de la dispersión natural que tienen los parámetros con los que se está trabajando se hace necesario establecer un intervalo de confianza. En ambos casos, para la Intensidad de Arias y duración, un valor más alto es menos favorable para las estructuras o el suelo, por lo tanto se presenta en los gráficos una curva de excedencia del 10%. Esta curva indica que un 10% de los valores, que poseen una distribución gaussiana, son mayores que el indicado por esta curva.

Para construir la curva antes mencionada, que representa la línea de excedencia del 10%, se utiliza el método de Monte Carlo. Este consiste en crear 10.000 muestras aleatorias de las constantes que se atenúan, con una distribución normal multivariable que tiene como media el valor óptimo de cada constante y Σ como matriz de covarianza, además se incorpora el error asociado creando también 10.000 muestras aleatorias de distribución normal, de media 0 y desviación estándar σ_e . Una vez obtenidas las muestras aleatorias se calcula el valor del parámetro en estudio con la curva de atenuación, incluyendo el error, para cada una de las muestras y para una combinación de las variables que influyen en la curva de atenuación (M_w , R , h , etc.), luego los valores obtenidos se ordenan en forma ascendente y se guarda el mínimo valor del 10% superior para construir la curva del 10% de excedencia. Esto se repite para cada combinación que se desee graficar de las variables que influyen en la curva de atenuación (M_w , R , h , etc.), y de esta forma se obtienen todos los puntos que forman la curva de excedencia.

Es importante notar que la curva de excedencia es una alternativa a utilizar en lugar de la desviación estándar del error. La diferencia está en que, en el caso de la curva de excedencia, se está considerando tanto la desviación estándar del error como de las constantes, dejando un 10% de los datos de una muestra aleatoria por sobre la curva, mientras que si a la curva de atenuación únicamente se le suma la desviación del error, se está ignorando el efecto de la incertidumbre de las constantes, y según la definición de desviación gaussiana un 15,8% de los datos de una muestra aleatoria queda por sobre la curva.

4.3.1 Resultados de los ajustes para la Intensidad de Arias

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos para las curvas de atenuación de la Intensidad de Arias. El detalle de los resultados, que incluye las constantes, curvas de atenuación y residuos obtenidos para cada uno de los modelos se encuentra en el Anexo D.1.

En la Tabla 4.1 se ve que los modelos del 1 al 4 presentan altas desviaciones estándar en comparación con los modelos 7 y 8, tanto cuando se utilizan todos los registros como cuando se hace la diferenciación por tipo de suelo, a excepción de cuando se considera únicamente el suelo tipo E. Al hacer la diferenciación por tipo de suelo no se ve una notable mejoría en los resultados obtenidos, teniendo en algunos casos resultados más desfavorables que cuando se utilizan todos los registros. En cuanto al ajuste realizado con el suelo tipo E, se utilizan únicamente 18 registros, por lo que no es una muestra muy representativa en comparación con los otros ajustes realizados.

Los modelos 5 y 6 también presentan una alta desviación estándar en comparación con los modelos 7 y 8, además de un bajo valor del factor R^2 en comparación con el resto de los resultados. Tampoco se observa una mejoría en los resultados al realizar la diferenciación por tipo de suelo.

Los modelos 7 y 8 son los que muestran los mejores resultados en cuanto a la desviación estándar y factor R^2 se refiere, siendo los resultados de ambos indicadores muy similares para ambos modelos, con diferencias del 0,85% para el caso de σ y σ_e , y de un 1,45% para el caso de R^2 . Donde se ve una diferencia ligeramente más notable es en la curtosis, presentando el modelo 8 un valor más cercano a 3, que es lo que se está buscando.

Luego de comparar y analizar los resultados obtenidos para los 8 modelos en estudio, se llega a la conclusión de que el más conveniente para la base de datos utilizada es el modelo 8, utilizando una magnitud de referencia M_{wr} de 6. Para la toma de esta decisión se tienen en cuenta los valores obtenidos para la desviación estándar del error y de los residuos, la curtosis y la asimetría, también se verifica que los residuos no presenten ninguna tendencia, ya que de lo contrario significa que existe algún factor que no se está tomando en cuenta en el modelo, y finalmente se verifica que los resultados obtenidos para las constantes tengan coherencia física.

Tabla 4.1: Resultados de los ajustes para las curvas de Intensidad de Arias.

Funcional	Notas	Regresión		Residuos			
		σ_e	R^2	μ	σ	Skew	Kurt
Modelo 1	Ajuste con todos los registros	1,23	0,67	0,00	1,23	0,20	3,47
	Ajuste con estaciones con suelo	1,21	0,69	0,00	1,21	0,23	3,60
	Ajuste con estaciones con roca	1,28	0,56	0,00	1,29	0,35	2,24
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,30	0,66	-0,01	1,30	0,31	4,03
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,23	0,64	0,00	1,23	0,14	3,58
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,12	0,76	0,00	1,12	0,41	3,58
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,64	0,79	0,00	0,66	-0,23	2,99
Modelo 2	Ajuste con todos los registros	1,26	0,66	0,00	1,27	0,21	3,27
	Ajuste con estaciones con suelo	1,24	0,67	0,00	1,24	0,23	3,37
	Ajuste con estaciones con roca	1,36	0,51	0,00	1,37	0,37	2,10
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,30	0,66	0,00	1,30	0,13	3,15
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,31	0,59	-0,03	1,31	0,11	3,24
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,18	0,73	0,00	1,18	0,43	3,63
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,67	0,77	0,00	0,69	-0,12	2,98
Modelo 3	Ajuste con todos los registros	1,23	0,68	0,00	1,23	0,19	3,43
	Ajuste con estaciones con suelo	1,21	0,69	0,00	1,21	0,22	3,55
	Ajuste con estaciones con roca	1,30	0,55	0,00	1,31	0,33	2,22
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,26	0,68	0,00	1,26	0,18	3,45
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,23	0,64	0,00	1,23	0,12	3,46
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,11	0,76	0,00	1,11	0,40	3,55
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,65	0,79	0,00	0,67	-0,29	3,22

Funcional	Notas	Regresión		Residuos			
		σ_e	R^2	μ	σ	Skew	Kurt
Modelo 4	Ajuste con todos los registros	1,27	0,66	0,00	1,27	0,22	3,27
	Ajuste con estaciones con suelo	1,24	0,67	0,00	1,24	0,24	3,36
	Ajuste con estaciones con roca	1,37	0,50	0,00	1,38	0,36	2,22
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,30	0,66	-0,01	1,30	0,10	3,11
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,27	0,61	0,00	1,27	0,19	3,30
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,18	0,73	0,00	1,18	0,41	3,71
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,69	0,76	-0,01	0,71	-0,19	2,99
Modelo 5	Ajuste con todos los registros	1,31	0,63	0,00	1,31	0,29	3,18
	Ajuste con estaciones con suelo	1,29	0,65	0,00	1,29	0,31	3,23
	Ajuste con estaciones con roca	1,29	0,56	0,00	1,30	0,14	2,26
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,35	0,63	0,00	1,36	0,24	2,93
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,27	0,62	0,00	1,27	0,24	3,52
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,22	0,71	0,00	1,23	0,59	3,16
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,66	0,78	0,00	0,68	-0,42	2,43
Modelo 6	Ajuste con todos los registros	1,34	0,62	0,00	1,34	0,33	3,15
	Ajuste con estaciones con suelo	1,31	0,63	0,00	1,32	0,32	3,19
	Ajuste con estaciones con roca	1,31	0,55	0,00	1,32	0,12	2,21
	Ajuste con estaciones con suelo B	1,37	0,62	0,00	1,38	0,22	2,87
	Ajuste con estaciones con suelo C	1,29	0,60	0,00	1,29	0,28	3,51
	Ajuste con estaciones con suelo D	1,26	0,69	0,00	1,26	0,60	3,16
	Ajuste con estaciones con suelo E	0,67	0,77	0,00	0,69	-0,34	2,47
Modelo 7	$M_{wr}=4,5$	1,18	0,70	0,00	1,18	0,30	3,62
	$M_{wr}=5$	1,18	0,70	0,00	1,18	0,30	3,62
	$M_{wr}=6$	1,18	0,70	0,00	1,18	0,30	3,61
	$M_{wr}=7$	1,18	0,70	0,00	1,18	0,30	3,61
Modelo 8	$M_{wr}=4,5$	1,19	0,69	0,00	1,19	0,29	3,57
	$M_{wr}=5$	1,19	0,69	0,00	1,19	0,29	3,56
	$M_{wr}=6$	1,19	0,69	0,00	1,19	0,29	3,55
	$M_{wr}=7$	1,19	0,69	0,00	1,19	0,29	3,55

A modo de recordatorio, el modelo 8 se basa en el funcional desarrollado por Foulser-Piggot y Goda (2015), pero con las modificaciones indicadas en la sección 4.1.1, además se utiliza una M_{wr} de 6, quedando el funcional escogido como se muestra en la ecuación (4.37).

$$\begin{aligned}
\ln(I_A) = & c_1 + c_2(M_w - 6) + (c_3 + c_4 M_w) \ln \left(\sqrt{R^2 + c_5^2} \right) + c_6 \max(h - 30, 0) \\
& + c_7 F_{inter} + c_8 F_{intra} + c_9 \ln \left(\frac{V_{s30}}{1100} \right) \pm \sigma_e
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Este funcional permite estimar la Intensidad de Arias a partir de la magnitud de momento, la distancia a la ruptura, la profundidad focal, la fuente sismogénica y la

velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m]. Las cuatro partes principales de este funcional son el escalamiento de la magnitud, efectos de la profundidad del sismo, tipo de sismo y la respuesta del sitio. A continuación se explica brevemente en que consiste cada uno de los términos que componen este funcional.

Consideraciones analíticas y teóricas sugieren que el logaritmo de la Intensidad de Arias se debe escalar aproximadamente lineal o ligeramente no lineal con la magnitud (Foulser-Piggot y Stafford, 2012). Tras algunas pruebas Foulser-Piggot y Goda (2015) determinaron que el escalamiento lineal entrega mejores resultados, por este motivo se utiliza el término de escalamiento lineal con la magnitud ($M_w - 6$).

El escalamiento por profundidad del sismo se incluye en dos términos, el primero es el efecto por saturación de fuente cercana, que queda representado por la constante c_5 de la ecuación (4.37), el segundo término corresponde a $c_6 \max(h - 30)$, el cual captura la dependencia de la profundidad focal para eventos profundos (Foulser-Piggot y Goda, 2015). El tipo de sismo se incluye en los términos $c_7 F_{inter}$ y $c_8 F_{intra}$. La respuesta del sitio se incorpora en el término $c_9 \ln\left(\frac{V_{s30}}{1100}\right)$, el cual considera una respuesta lineal del sitio y una V_{s30} de referencia para roca de 1100 [m/s].

Los valores obtenidos para las constantes del funcional de la ecuación (4.37), la matriz de covarianza y la matriz de los coeficientes de correlación se muestran en la Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4 respectivamente.

En la Tabla 4.4 se puede ver que la mayoría de los coeficientes de correlación son cercanos a 1 o a -1, aquellos que presentan valores cercanos a 1 tienen una correlación positiva, lo que quiere decir que cuando una de las constantes aumenta la otra también lo hace, en una proporción casi constante. Por otra parte, aquellos que presentan valores cercanos a -1 tienen una correlación negativa, lo que quiere decir que cuando una de las constantes aumenta la otra disminuye, en una proporción casi constante.

Dentro de los resultados obtenidos en la Tabla 4.4 se puede destacar que existe una fuerte correlación entre las constantes asociadas a la magnitud y a la distancia a la ruptura, lo cual concuerda con lo mostrado por otros autores como Fukushima y Tanaka (1990) los cuales muestran que existe una gran correlación entre ambas variables. Por otra parte, se esperaba que la correlación entre ciertas variables fuera considerablemente menor, como por ejemplo entre la constante asociada a la fuente sismogénica y la asociada al tipo de suelo. Cabe mencionar que no se esperaban valores tan cercanos a 1 para la correlación de las constantes, a pesar de que en algunos casos las variables asociadas a estas sí presentan una fuerte correlación según estudios previos, pero no en una proporción tan constante como la obtenida.

Tabla 4.2: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
5,817	2,334	-2,268	-0,011	36,405	0,012	0,138	0,323	-0,647

Tabla 4.3: Matriz de covarianza (Σ) de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
c_1	0,288	0,450	0,088	-0,018	3,059	-0,006	-0,033	0,552	0,067
c_2	0,450	0,794	0,169	-0,031	5,779	-0,011	-0,059	0,961	0,119
c_3	0,088	0,169	0,038	-0,007	1,280	-0,002	-0,012	0,203	0,026
c_4	-0,018	-0,031	-0,007	0,001	-0,223	0,000	0,002	-0,037	-0,005
c_5	3,059	5,779	1,280	-0,223	44,333	-0,079	-0,432	6,936	0,875
c_6	-0,006	-0,011	-0,002	0,000	-0,079	0,000	0,001	-0,013	-0,002
c_7	-0,033	-0,059	-0,012	0,002	-0,432	0,001	0,004	-0,071	-0,009
c_8	0,552	0,961	0,203	-0,037	6,936	-0,013	-0,071	1,167	0,144
c_9	0,067	0,119	0,026	-0,005	0,875	-0,002	-0,009	0,144	0,018

Tabla 4.4: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la Intensidad de Arias.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
c_1	1	0,941	0,846	-0,947	0,856	-0,943	-0,937	0,951	0,934
c_2	0,941	1	0,974	-0,998	0,974	-0,989	-0,996	0,998	0,999
c_3	0,846	0,974	1	-0,971	0,988	-0,965	-0,968	0,967	0,978
c_4	-0,947	-0,998	-0,971	1	-0,968	0,996	0,991	-0,999	-0,997
c_5	0,856	0,974	0,988	-0,968	1	-0,950	-0,978	0,964	0,980
c_6	-0,943	-0,989	-0,965	0,996	-0,950	1	0,975	-0,994	-0,988
c_7	-0,937	-0,996	-0,968	0,991	-0,978	0,975	1	-0,992	-0,996
c_8	0,951	0,998	0,967	-0,999	0,964	-0,994	-0,992	1	0,996
c_9	0,934	0,999	0,978	-0,997	0,980	-0,988	-0,996	0,996	1

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados de las desviaciones estándar (σ) de las constantes atenuadas, las cuales se obtienen a partir de la matriz de covarianza mostrada en la Tabla 4.3.

Como se dice en la sección 4.2, se parte asumiendo una desviación estándar del 50% para cada constante, por lo que se debe verificar si se logra disminuir este porcentaje con el ajuste, para esto se calcula que porcentaje del valor de la constante representa cada desviación estándar, resultado que se muestra en la columna $\%c_i$ de la Tabla 4.5. Al analizar los resultados que se muestran en la Tabla 4.5 se ve que solo tres de nueve aumentan la desviación estándar impuesta inicialmente, mientras que el resto disminuye, y en varios casos de forma considerable.

El resultado más desfavorable de desviación estándar de la Tabla 4.5 corresponde a la constante c_9 , asociada a eventos interplaca, en donde la desviación estándar representa el 334,1% del valor de la constante. Este resultado es bastante más elevado que el 50% inicial impuesto, lo cual podría implicar mayores errores asociados a este tipo de eventos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el valor de $\%c_i$ no entrega información relevante si el valor de c es cercano a 0, como pasa en los casos de c_4 y c_6 .

Cabe mencionar que aquellas constantes con valores cercanos a 0 tienen poco peso en el funcional, por lo que tendría que evaluarse si son realmente necesarios en el modelo.

Tabla 4.5: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la Intensidad de Arias.

	σ^2	σ	$\%c_i$
c_1	0,29	0,54	9,2
c_2	0,79	0,89	38,2
c_3	0,04	0,19	8,6
c_4	0,00	0,03	301,1
c_5	44,33	6,66	18,3
c_6	0,00	0,01	104,4
c_7	0,00	0,07	47,9
c_8	1,17	1,08	334,1
c_9	0,02	0,13	20,7

Con los resultados obtenidos del ajuste se construyen las curvas de atenuación para la Intensidad de Arias, las que se muestran en la Figura 4.1. Se presentan las curvas de atenuación para cuatro diferentes magnitudes de momento, 5, 6, 7 y 8 M_w , haciendo la diferenciación según si el sitio es suelo o roca, separando además para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia, y para diferentes profundidades del hipocentro.

Es necesario aclarar que las líneas verticales mostradas en la Figura 4.1, al igual que en la Figura 4.2 y Figura 4.3, representan el percentil del 5% y 95% de todos los datos utilizados.

En la Figura 4.1 se observa que una mayor distancia a la ruptura implica menores valores de Intensidad de Arias. Una mayor magnitud de momento conlleva mayores valores para la curva de atenuación. Por otra parte, los sismos registrados en sitios con suelo presentan valores de Intensidad de Arias mayores que los sitios con roca para una misma magnitud y distancia a la ruptura. Por último, en las curvas, tanto para sismos interplaca como intraplaca, se ve que una mayor profundidad del hipocentro implica mayores valores de Intensidad de Arias.

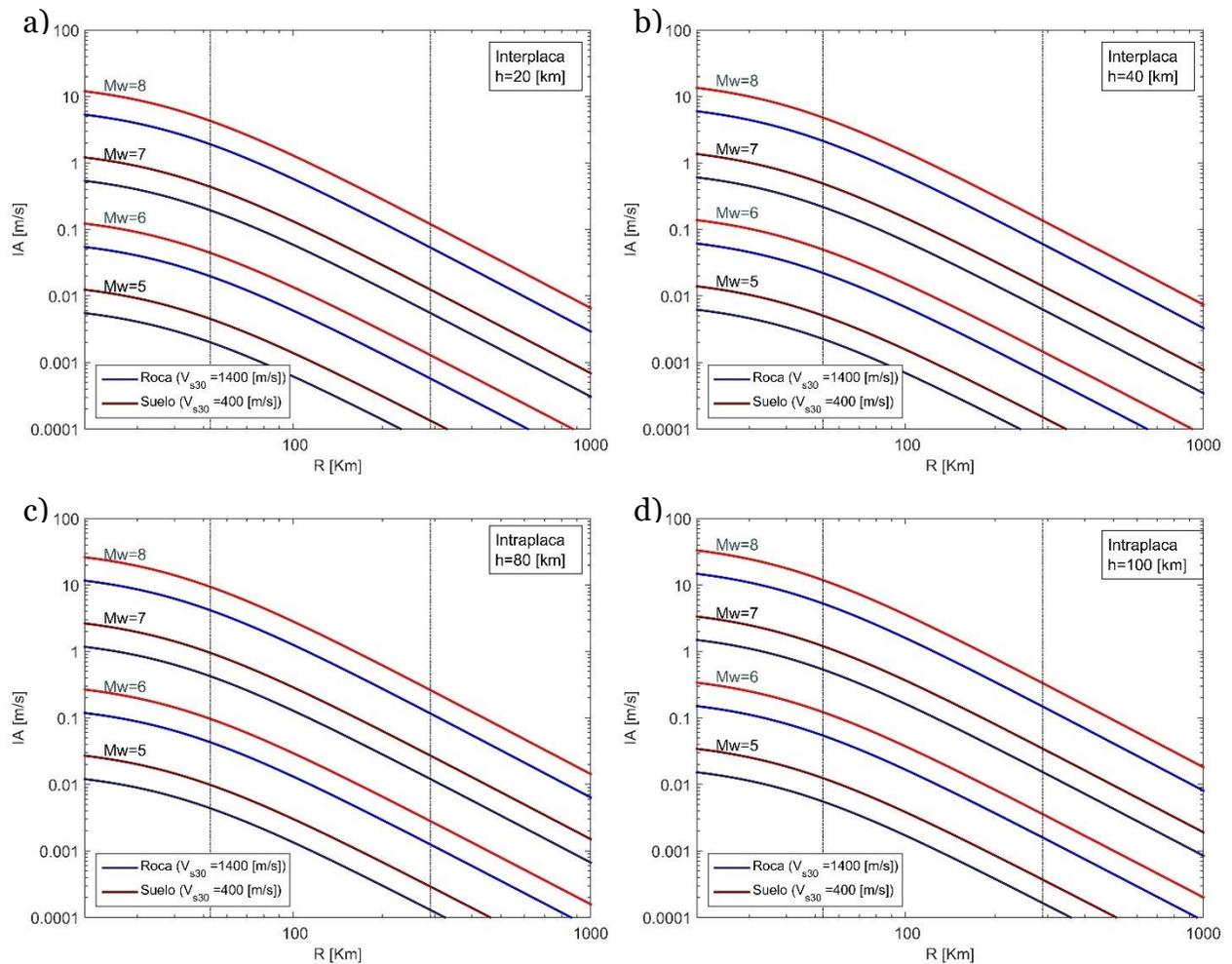


Figura 4.1: Curvas de atenuación obtenidas para la Intensidad de Arias. a) Curva para sismos interplaca tipo thrust con $h=20$ [km]. b) Curva para sismos interplaca tipo thrust con $h=40$ [km]. c) Curva para sismos intraplaca profundidad intermedia con $h=80$ [km]. d) Curva para sismos intraplaca profundidad intermedia con $h=100$ [km].

En la Figura 4.2 se muestran los datos y las curvas de atenuación para sismos interplaca tipo thrust para todo el rango de magnitudes utilizadas. Para las curvas se utiliza una profundidad del hipocentro de 40 [km], elegida arbitrariamente por ser el valor medio de las profundidades de los eventos mostrados en la figura.

Se ve en la Figura 4.2 que existe una gran dispersión de los datos, lo cual justifica las altas desviaciones estándar mostradas en la Tabla 4.1. A pesar de lo anterior se ve que en general las curvas se ajustan de manera adecuada a los eventos utilizados, en especial para sismos de magnitudes inferiores a 6,5, de los cuales se tienen mayor cantidad de registros.

En la Figura 4.2 se ve que las curvas reflejan correctamente los efectos del tipo de suelo en los valores de la Intensidad de Arias. Los datos muestran que para los sitios con roca los valores de Intensidad de Arias son menores que para los sitios con suelo, hecho que se muestra claramente en las curvas.

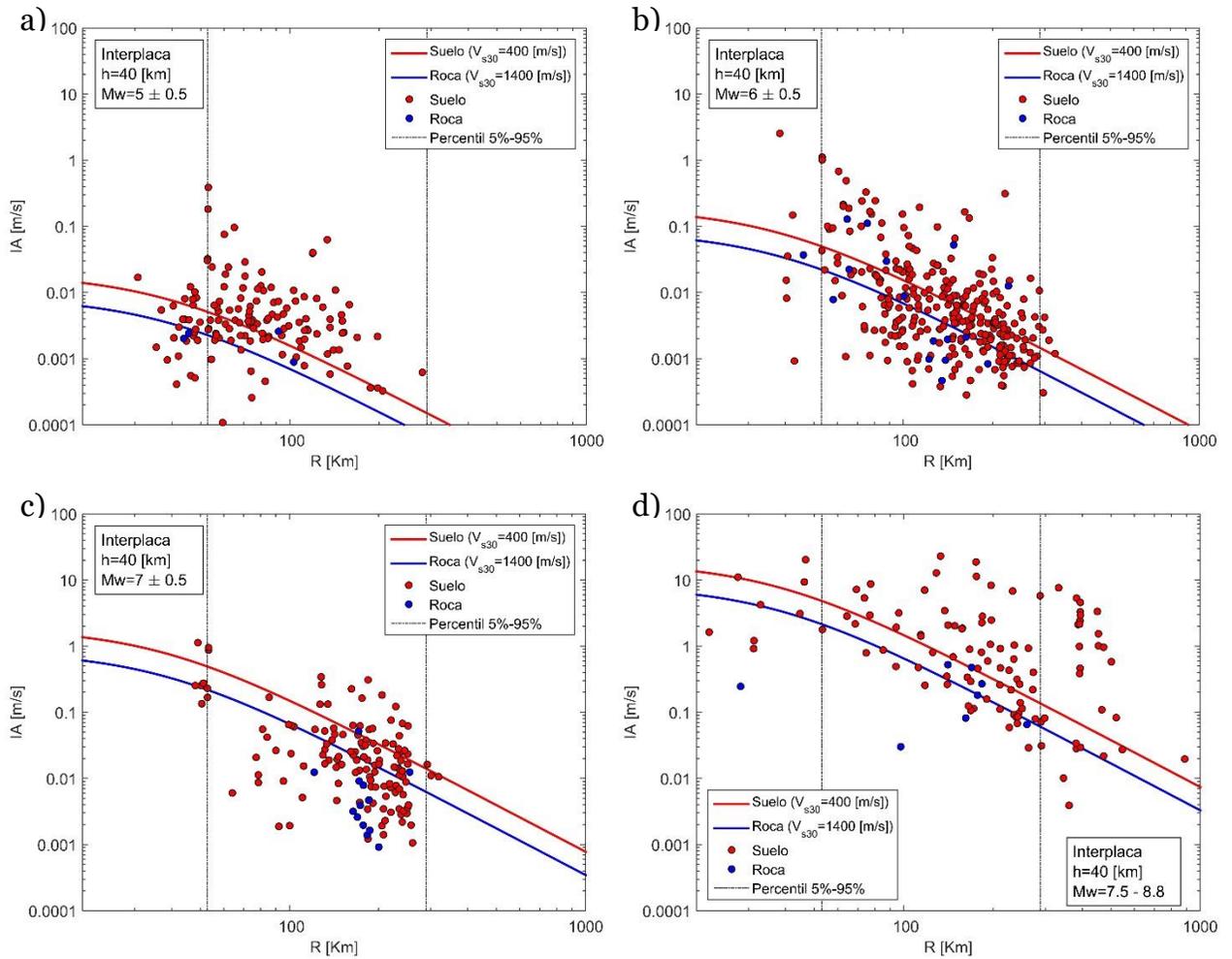


Figura 4.2: Curvas de atenuación de Intensidad de Arias para sismos interplaca tipo thrust ($h=40$ [km]).
 a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

En la Figura 4.3 se muestran los datos y las curvas de atenuación para sismos intraplaca de profundidad intermedia para todo el rango de magnitudes utilizadas. Para las curvas se utiliza una profundidad del hipocentro de 80 [km], elegida arbitrariamente por ser aproximadamente el valor medio de las profundidades de los eventos mostrados en la figura.

Se ve en la Figura 4.3 que, al igual que en la Figura 4.2, existe una gran dispersión de los datos. Para registros con magnitudes mayores a 6,5 M_w no se cuenta con muchos datos para poder realizar un análisis adecuado. Para los registros con magnitudes entre 5,5 y 6,5 M_w se ve un correcto ajuste de las curvas respecto a los datos, sin embargo para magnitudes menores a 5,5 M_w se ve que las curvas subestiman los valores de Intensidad de Arias.

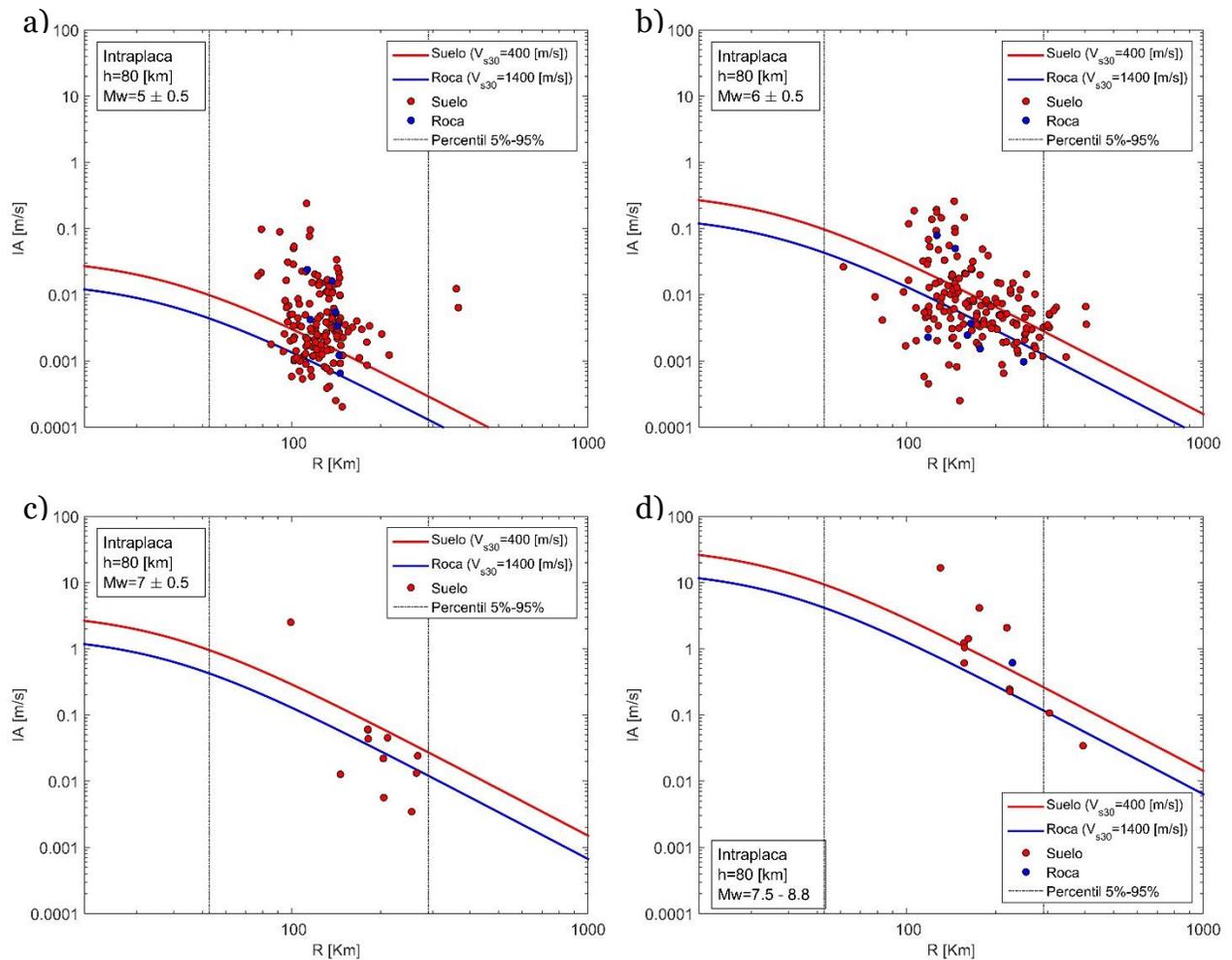


Figura 4.3: Curvas de atenuación de Intensidad de Arias para sismos intraplaca de profundidad intermedia ($h=80$ [km]). a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

En la Figura 4.4 se muestran los residuos (i.e. $\ln(\text{valor medido}) - \ln(\text{valor esperado})$) de las curvas de atenuación para la Intensidad de Arias. Se muestran tres gráficos de residuos versus diferentes parámetros, en el gráfico a) se muestran los residuos versus la magnitud de momento, en el gráfico b) los residuos versus la velocidad de onda de corte, y en el gráfico c) los residuos versus la distancia a la ruptura, realizando en todos la diferenciación por fuente sísmogénica.

Al observar la Figura 4.4 se verifica que no existe ninguna tendencia de los residuos respecto a ninguna de las variables graficadas, lo cual indica que se está considerando correctamente la influencia de la M_w , V_{s30} y R en el funcional.

En la Figura 4.4 a) se ve que los sismos intraplaca presentan los residuos más altos para magnitudes menores a $5,5 M_w$, lo cual concuerda con lo señalado al realizar el análisis de la Figura 4.3. Mientras que para sismos interplaca los residuos más altos se ven para magnitudes entre $5,5$ y $6,5 M_w$.

En la Figura 4.4 b) se observa que eventos registrados en sitios con roca no presentan residuos muy altos, a diferencia de los que se ven en sitios con suelo, tanto para sismos interplaca como intraplaca.

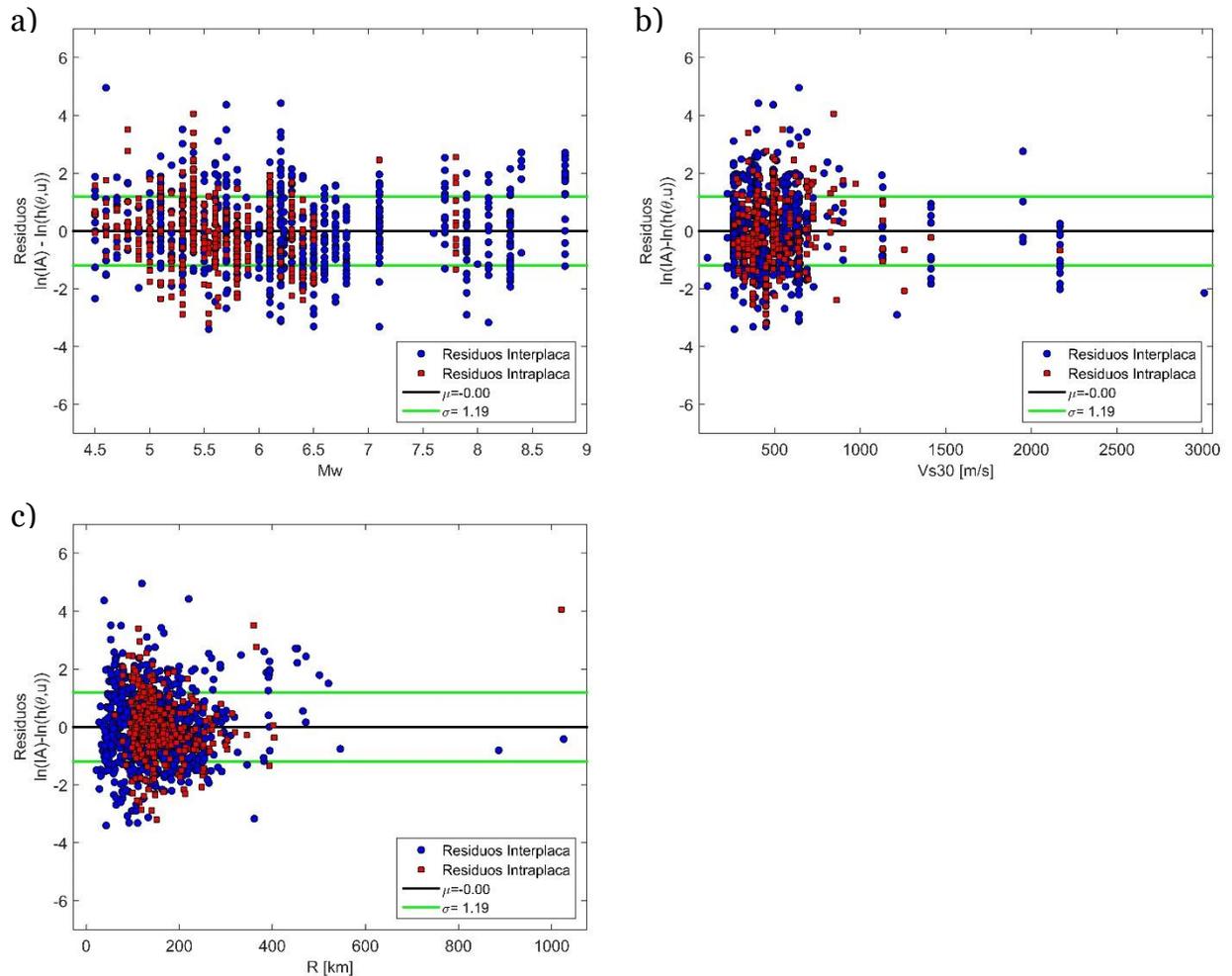


Figura 4.4: Residuos para la curva de atenuación de Intensidad de Arias. a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs V_{s30} . c) Residuos vs R .

En la Figura 4.5 se muestra el histograma de los residuos de la curva de atenuación de Intensidad de Arias. Se observa que el histograma presenta una distribución normal, lo cual se encuentra respaldado por los valores de curtosis y asimetría que son 3,56 y 0,28 respectivamente, los cuales son cercanos a los valores que se tienen en una distribución normal, 3 y 0. Se busca una distribución normal debido a que esto indica que la sobreestimación y subestimación del valor de Intensidad de Arias es similar, lo cual es un indicador de que el ajuste está bien realizado.

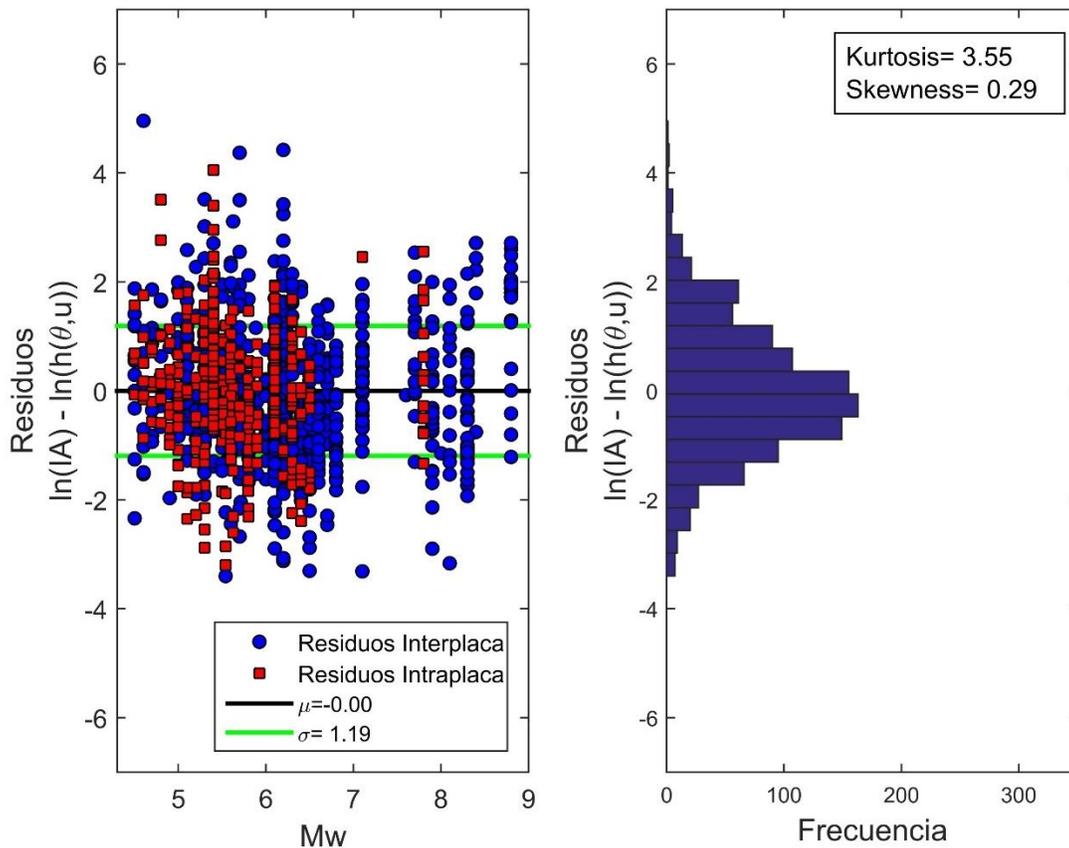


Figura 4.5: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de Intensidad de Arias.

En la Figura 4.6 se muestran las curvas de excedencia del 10% para las curvas de atenuación de la Intensidad de Arias, para sismos interplaca e intraplaca, y para roca y suelo. Se observa que en general las curvas de excedencia están alejadas de las curvas de atenuación, sin embargo esto es completamente razonable producto de la dispersión natural que presenta la Intensidad de Arias, la cual se ve reflejada en las desviaciones estándar obtenidas y los datos observados en la Figura 4.2 y Figura 4.3.

Al observar la Figura 4.6 se ve que las curvas de excedencia para sismos intraplaca (Figura 4.6 c) y d)) presentan diferencias porcentuales más altas que para sismos interplaca (Figura 4.6 a) y b)). Por ejemplo, para sismos intraplaca en suelo y para una magnitud de $7 M_w$ la curva de excedencia es diez veces mayor que la curva de atenuación, mientras que para el mismo caso, pero en sismos interplaca es seis veces mayor. Esta diferencia puede estar provocada por la diferencia en la cantidad de registros interplaca e intraplaca, siendo estos últimos los que se tienen en menor número.

Por otra parte, al comparar los casos de roca y suelo se ve que tanto para el caso de interplaca como intraplaca, la curva de excedencia para roca presenta diferencias mayores con la curva de atenuación que para el caso de suelo. Por ejemplo, en el caso de $7 M_w$ y 100 [km] de distancia a la ruptura para sismos interplaca, la curva de excedencia en roca es aproximadamente siete veces la curva de atenuación, mientras que para suelo es seis veces mayor. Para el mismo caso, pero para sismos intraplaca, la curva de excedencia en roca es aproximadamente doce veces la curva de atenuación, mientras que

para suelo es once veces mayor. Esto puede deberse principalmente a que se tienen más datos para sitios de suelo que sitios rocosos.

Cabe mencionar que, formalmente, la curva de excedencia para un tipo de sismo puede escribirse como $P(IA > IA_{threshold} | R, M_w, V_{s30}, h) = 10\%$, lo que significa que la probabilidad de que la Intensidad de Arias exceda un cierto límite, dada una distancia a la ruptura, magnitud de momento, velocidad de onda de corte y profundidad es de un 10%.

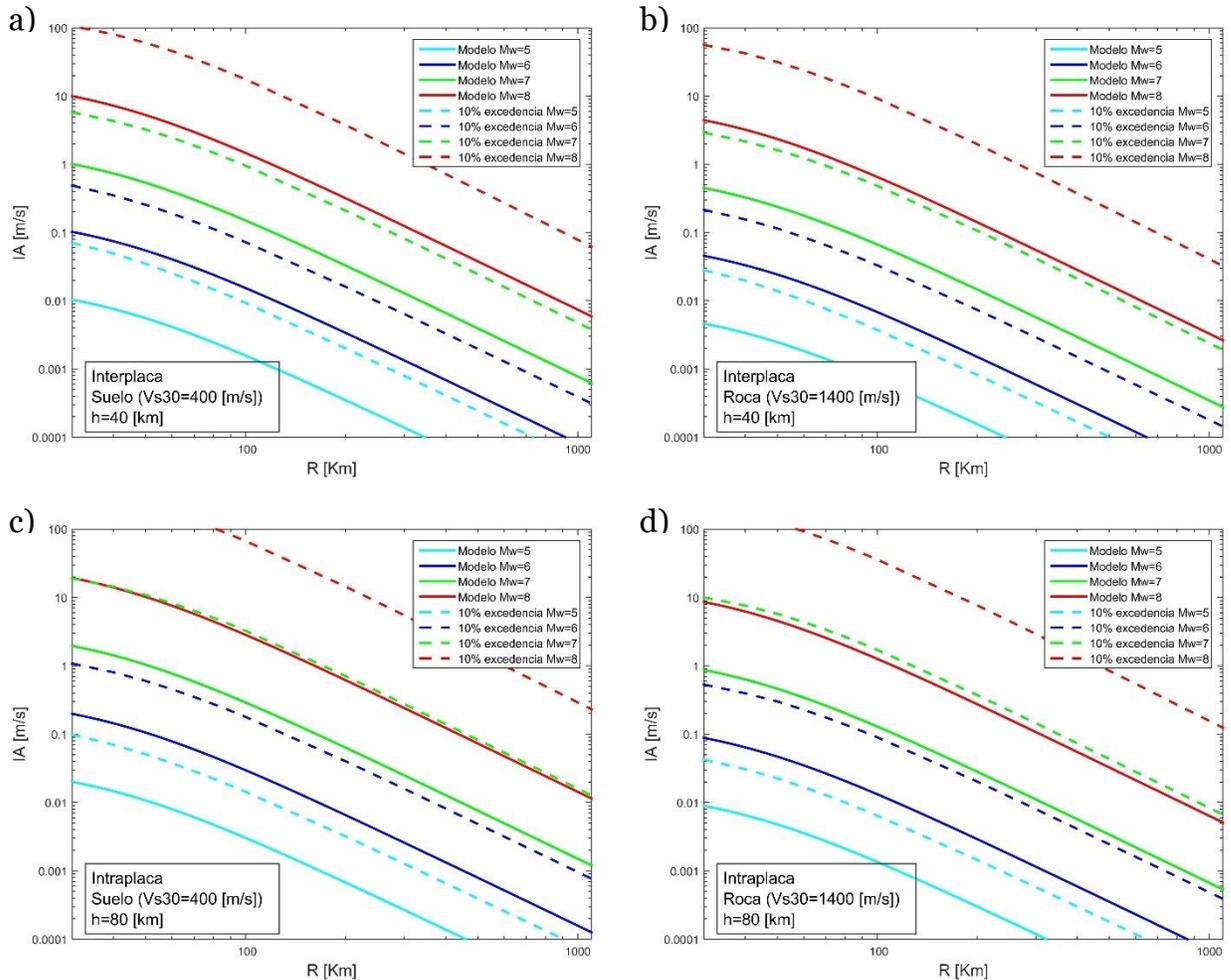


Figura 4.6: Curvas de excedencia del 10% para curvas de atenuación de Intensidad de Arias. a) Sismos interplaca, suelo y $h=40$ [km]. b) Sismos interplaca, roca y $h=40$ [km]. c) Sismos intraplaca, suelo y $h=80$ [km]. d) Sismos intraplaca, roca y $h=80$ [km].

Las constantes que permiten construir las curvas de excedencias graficadas en la Figura 4.6 sin tener que realizar el procedimiento de Monte Carlo descrito en la sección 4.3 se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la Intensidad de Arias.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
8,128	2,312	-2,419	0,009	35,900	0,011	0,206	0,506	-0,635

En la Figura 4.7 se muestra la curva de atenuación obtenida en el presente estudio junto con las obtenidas por otros autores, esto con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con estudios previos. Cabe mencionar que no todas las curvas permiten estimar la Intensidad de Arias como el promedio de las componentes horizontales, sin embargo se hacen las conversiones necesarias de los resultados para poder realizar una comparación adecuada. La forma de calcular la Intensidad de Arias que utiliza cada autor que aparece en la Figura 4.7 se muestra en la Tabla B.1 del Anexo B.

De la Figura 4.7 se observa que en general la curva del presente estudio entrega valores de Intensidad de Arias mayores que el resto de las curvas, con excepción de las desarrolladas por Gómez-Bernal et al. (2012) y Hwang et al. (2004). En cuanto a la forma de las curvas es importante mencionar que las curvas de atenuación desarrolladas en los otros estudios son válidas para distancias a la ruptura diferentes a las del presente estudio, en general bastante más bajas, por lo que la parte de menor pendiente aparece para distancias a la ruptura menores, las cuales no aparecen en el gráfico.

La diferencia en las curvas deja en evidencia que es importante definir el rango de validez de las curvas obtenidas, tanto para la zona en donde es adecuado utilizarlas como el rango de las variables (R , M_w , V_{s30} , h) que es válida la curva, ya que los resultados de Intensidad de Arias varían considerablemente de una zona a otra por los diferentes factores que están presentes en cada zona de estudio.

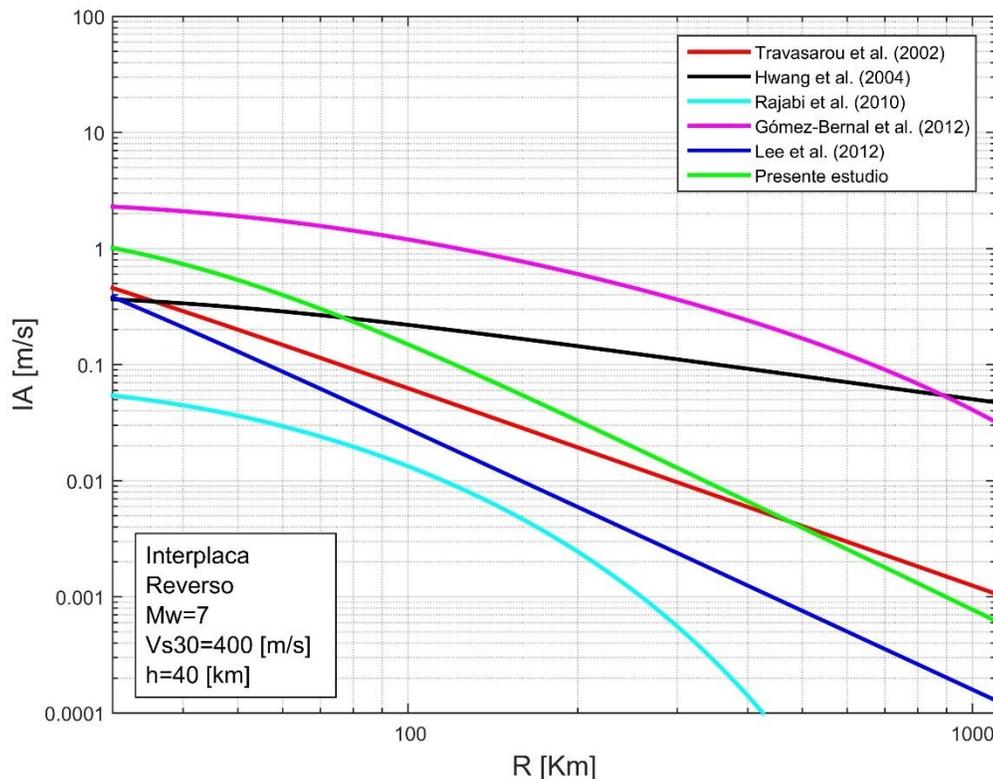


Figura 4.7: Comparación de la curva de atenuación de Intensidad de Arias obtenida en este estudio con la de otros autores.

Con el fin de corroborar que tan significativa es la desviación estándar del error y de las constantes en la curva de excedencia se construyen los gráficos mostrados en la Figura

4.8. En la Figura 4.8 a) se muestran las curvas de excedencia para sismos interplaca en sitios con suelo incluyendo únicamente las desviaciones estándar de las constantes en el cálculo de estas, por otra parte en la Figura 4.8 b) se muestran las mismas curvas, pero ahora incluyendo solamente la desviación estándar del error en el cálculo. A modo de referencia, en la Figura 4.8 c) se muestra la curva de excedencia para las mismas curvas de atenuación, pero considerando las desviaciones estándar de las constantes y del error.

En la Figura 4.8 se puede ver que para las curvas de atenuación con magnitudes inferiores a 8 M_w la desviación estándar del error aporta más a la curva de excedencia que las desviaciones de las constantes, mientras que para la curva de atenuación con 8 M_w ocurre lo contrario. También es posible notar que la influencia de la varianza de las constantes depende de las variables consideradas en las curvas, como la magnitud M_w , mientras que en el caso del gráfico b) la diferencia porcentual observada entre las curvas de atenuación y las curvas de excedencia es más constante.

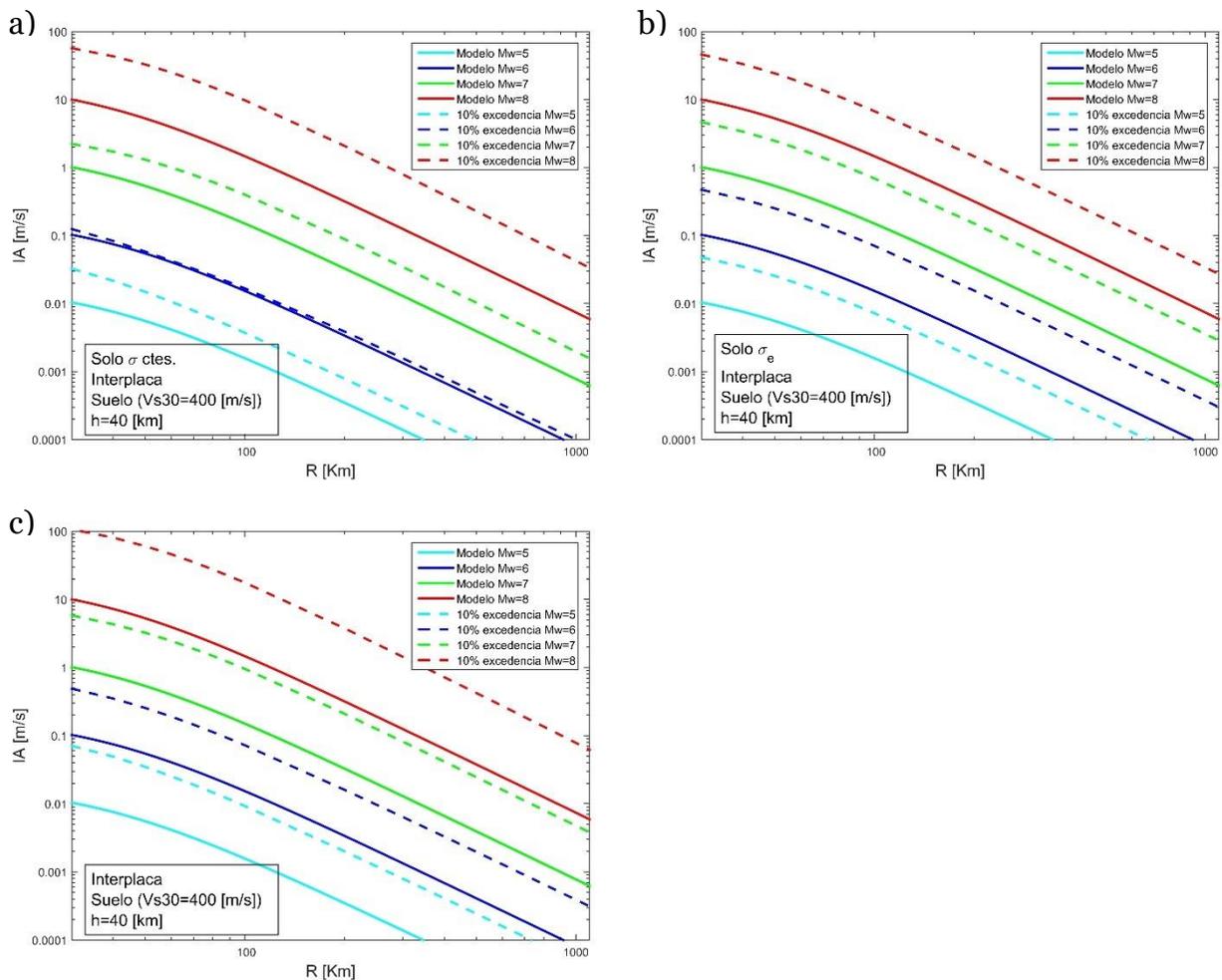


Figura 4.8: Comparación curvas de excedencia para ver el efecto de la desviación estándar de las constantes y del error, para sismos interplaca, sitios con suelo y $h=40$ [km]. a) Curvas de excedencia incluyendo solo la desviación estándar de las constantes. b) Curvas de excedencia incluyendo solo la desviación estándar del error. c) Curvas de excedencia incluyendo tanto las desviaciones estándar de las constantes como las del error.

4.3.2 Resultados de los ajustes para la duración significativa

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos para las curvas de atenuación de la duración significativa. El detalle de los resultados, que incluye las constantes, curvas de atenuación y residuos obtenidos para cada uno de los modelos se encuentra en el Anexo D.2.

En primer lugar, se debe aclarar que debido al modo en que se realiza el ajuste al modelo 2, la desviación estándar del error no se encuentra en unidades de logaritmo natural como en el resto de los resultados, por lo tanto se utiliza la desviación estándar de los residuos para realizar las comparaciones pertinentes.

Al hacer la comparación de los resultados obtenidos cuando se utiliza la duración significativa en intervalos del 5% al 75% versus cuando se utilizan intervalos del 5% al 95%, se ve que en general este último se comporta mejor. La desviación estándar de los residuos es un 27,6% menor para el modelo 1 en el caso de 5%-95% que para el caso 5%-75%, y 26,5% menor para el modelo 2 en el mismo caso, esta es una diferencia notable que debe tenerse en consideración.

Comparando los modelos 1 y 2 se ve que el primero presenta una desviación estándar de los residuos que es un 4,2% menor que la del modelo 2 para el caso 5%-95%, y un 3,3% menor para el caso 5%-75%. Además, la media del modelo 1, para ambos casos, es de 0, mientras que en el modelo 2 la media toma valores que varían entre -0,12 y -0,14. En cuanto a la curtosis, el modelo 2 presenta los valores más cercanos a 3 para el caso 5%-95%, pero no para el caso 5%-75%. Finalmente, la asimetría para el caso de 5%-95% es simétrica para ambos modelos, mientras que para el caso de 5%-75% la asimetría del modelo 1 es notablemente mejor que la del modelo 2, siendo la de este último un 36,4% mayor.

Luego de comparar y analizar los resultados obtenidos para los 2 modelos en estudio, para los casos 5%-75% y 5%-95%, se llega a la conclusión de que el modelo más conveniente para la base de datos utilizada es el modelo 1, utilizando la duración significativa en los intervalos 5%-95%. Para la toma de esta decisión se tienen en cuenta los valores obtenidos para la desviación estándar del error y de los residuos, la curtosis y la asimetría, también se verifica que los residuos no presenten ninguna tendencia, ya que de lo contrario significa que existe algún factor que no se está tomando en cuenta en el modelo, también se toma en consideración que la forma del funcional tenga un sentido físico, de igual modo se verifica que los resultados obtenidos para las constantes tengan coherencia física.

Tabla 4.7: Resultados de los ajustes para las curvas de duración significativa.

Funcional	Notas	Ajuste		Residuos			
		σ_e^a	R^2	μ	σ	Skew	Kurt
Modelo 1 (5%-75%)	-	0,60	0,41	0,00	0,60	-0,55	4,53
Modelo 1 (5%-95%)	-	0,47	0,38	0,00	0,47	-0,35	4,42
Modelo 2 (5%-75%)	$M_{wr}=4,5$	9,77 ⁽¹⁾	0,33	-0,14	0,62	-0,75	4,88
	$M_{wr}=5$	9,77 ⁽¹⁾	0,33	-0,14	0,62	-0,75	4,88
	$M_{wr}=6$	9,77 ⁽¹⁾	0,33	-0,14	0,62	-0,75	4,88
	$M_{wr}=7$	9,77 ⁽¹⁾	0,33	-0,14	0,62	-0,75	4,88
Modelo 2 (5%-95%)	$M_{wr}=4,5$	16,30 ⁽¹⁾	0,29	-0,12	0,49	-0,41	4,21
	$M_{wr}=5$	16,29 ⁽¹⁾	0,29	-0,12	0,49	-0,41	4,20
	$M_{wr}=6$	16,28 ⁽¹⁾	0,28	-0,13	0,49	-0,41	4,19
	$M_{wr}=7$	16,27 ⁽¹⁾	0,28	-0,13	0,49	-0,41	4,18

^a Desviación del error. (1) No está en unidades de logaritmo natural.

A modo de recordatorio, el modelo 1 se basa en el funcional desarrollado por Hernández y Cotton (2000), pero con las modificaciones indicadas en la sección 4.1.2, quedando el funcional escogido como se muestra en la ecuación (4.38).

$$\ln(SD) = c_1 + c_2 \cdot M_w + c_3 \cdot \ln(R) + c_4 \cdot F_{suelo} + c_5 \cdot F_{inter} + c_6 \cdot F_{intra} \pm \sigma_e \quad (4.38)$$

Este funcional permite estimar la duración significativa de un sismo a partir de la magnitud de momento, la distancia a la ruptura, la fuente sismogénica y el tipo de suelo. Las cuatro partes principales de este funcional son el escalamiento de la magnitud, el tipo de sismo, efectos de la proximidad a la falla y el tipo de suelo. A continuación se explica brevemente en que consiste cada uno de los términos que componen este funcional.

El término relacionado al escalamiento de la magnitud es $c_2 \cdot M_w$, el cual se justifica de la siguiente forma, según lo descrito por Hernández y Cotton (2000). La duración del movimiento fuerte se encuentra fuertemente relacionada con la duración de la ruptura, y si se asume una velocidad de ruptura constante, la magnitud de momento es proporcional con el logaritmo del tamaño de la falla, donde la progresión de la ruptura es lineal. Producto de lo anterior se puede derivar una proporcionalidad entre la duración de la ruptura y la magnitud de la forma descrita al inicio del párrafo.

La duración significativa crece con la distancia, esto producto de las diferentes velocidades de propagación de las ondas y a la reflexión y refracción de estas (Hernández y Cotton, 2000). De esta forma se justifica la elección del término $c_3 \cdot \log(R)$ para representar los efectos de la proximidad a la falla.

El tipo de sismo se incluye en los términos que permiten la diferenciación por fuente sismogénica, $c_5 F_{inter}$ y $c_6 F_{intra}$. El tipo de sitio se incorpora al funcional como una variable ficticia de la forma $c_4 \cdot F_{suelo}$.

Los valores obtenidos para las constantes del funcional de la ecuación (4.38), la matriz de covarianza y la matriz de los coeficientes de correlación se muestran en la Tabla 4.8, Tabla 4.9 y Tabla 4.10 respectivamente.

En la Tabla 4.10 se puede ver que los coeficientes de correlación toman valores cercanos a 1, 0, -1 o valores intermedios a estos. Aquellos que presentan valores cercanos a 1 tienen una correlación positiva, lo que quiere decir que cuando una de las constantes aumenta la otra también lo hace, en una proporción casi constante. Por otra parte, aquellos que presentan valores cercanos a -1 tienen una correlación negativa, lo que quiere decir que cuando una de las constantes aumenta la otra disminuye, en una proporción casi constante. Los coeficientes de correlación cercanos a 0 indican que las constantes no poseen una correlación lineal. Finalmente, los coeficientes que se encuentran entre 0 y 1 o entre -1 y 0 tienen una correlación positiva y una correlación negativa respectivamente.

Dentro de los resultados obtenidos en la Tabla 4.10 se puede destacar que existe una baja correlación entre las constantes asociadas la magnitud de momento y a la distancia a la ruptura. Por otra parte, el coeficiente asociado al tipo de suelo tiene en general altos coeficientes de correlación, excepto para el caso de las constantes relacionadas con la distancia a la ruptura y los eventos intraplaca.

Tabla 4.8: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
-1,052	0,173	0,454	0,031	1,081	0,908

Tabla 4.9: Matriz de covarianza de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
c_1	0,027	-0,005	-0,004	0,003	-0,013	0,001
c_2	-0,005	0,004	0,000	-0,001	0,007	0,000
c_3	-0,004	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001
c_4	0,003	-0,001	0,000	0,001	-0,003	0,001
c_5	-0,013	0,007	0,001	-0,003	0,019	-0,011
c_6	0,001	0,000	0,001	0,001	-0,011	0,048

Tabla 4.10: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración significativa.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
c_1	1	-0,456	-0,720	0,779	-0,595	0,034
c_2	-0,456	1	-0,156	-0,856	0,763	0,012
c_3	-0,720	-0,156	1	-0,327	0,264	0,084
c_4	0,779	-0,856	-0,327	1	-0,933	0,167
c_5	-0,595	0,763	0,264	-0,933	1	-0,374
c_6	0,034	0,012	0,084	0,167	-0,374	1

En la Tabla 4.11 se muestran los resultados de las desviaciones estándar (σ) de las constantes atenuadas, las cuales se obtienen a partir de la matriz de covarianza mostrada en la Tabla 4.9.

Como se dice en la sección 4.2 se parte asumiendo una desviación estándar del 50% para cada constante, por lo que se debe verificar si se logra disminuir este porcentaje con el ajuste, para esto se calcula que porcentaje del valor de la constante representa cada desviación estándar, resultado que se muestra en la columna $\%c_i$ de la Tabla 4.11. Al analizar los resultados que se muestran en la Tabla 4.11 se ve que solo uno de seis aumenta la desviación estándar impuesta inicialmente, mientras que el resto disminuye, y en algunos casos de forma considerable.

El resultado más desfavorable de desviación estándar de la Tabla 4.11 corresponde a la constante c_4 asociada al tipo de suelo, en donde la desviación estándar representa el 84,5% del valor de la constante. Este resultado no difiere considerablemente del 50% inicial impuesto. Sin embargo es importante mencionar que el valor de $\%c_i$ no entrega información relevante si el valor de c es cercano a 0, como pasa en este caso. Cabe mencionar que aquellas constantes con valores cercanos a 0 tienen poco peso en el funcional, por lo que tendría que evaluarse si son realmente necesarios en el modelo.

Tabla 4.11: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la duración significativa.

	σ^2	σ	$\%c_i$
c_1	0,027	0,16	15,6
c_2	0,004	0,06	36,0
c_3	0,001	0,03	6,6
c_4	0,001	0,03	84,5
c_5	0,019	0,14	12,7
c_6	0,048	0,22	24,0

Con los resultados obtenidos del ajuste se construyen las curvas de atenuación para la duración significativa para un rango del 5%-95% de la Intensidad de Arias acumulada, las que se muestran en la Figura 4.9. En el gráfico a) y b) se presentan las curvas de atenuación en un gráfico de SD vs R para cuatro diferentes magnitudes de momento, 5, 6, 7 y 8 M_w , haciendo la diferenciación según si el sitio es suelo o roca, separando además para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia. En el gráfico c) y d) se presentan las curvas de atenuación en un gráfico de SD vs M_w para cuatro diferentes distancias a la ruptura, 50, 150, 300 y 500 [km], haciendo la diferenciación según si el sitio es suelo o roca, separando además para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia.

Es necesario aclarar que las líneas verticales mostradas en la Figura 4.9, al igual que de la Figura 4.10 a la Figura 4.13, representan el percentil del 5% y 95% de todos los datos utilizados.

En la Figura 4.9 a) y b) se observa que una mayor distancia a la ruptura implica mayores valores de duración significativa. Una mayor magnitud de momento conlleva mayores valores para la curva de atenuación. Por otra parte, los sismos registrados en sitios con

suelo presentan valores de duración significativa ligeramente mayores que los sitios con roca. Por último, las curvas para sismos intraplaca muestran valores superiores de duración significativa para una misma magnitud, en comparación con los sismos interplaca.

En la Figura 4.9 c) y d) se observa lo mismo que en los gráficos a) y b), pero desde otra perspectiva. Se verifica que una mayor magnitud implica un aumento de la duración significativa, al igual que un aumento de la distancia a la ruptura.

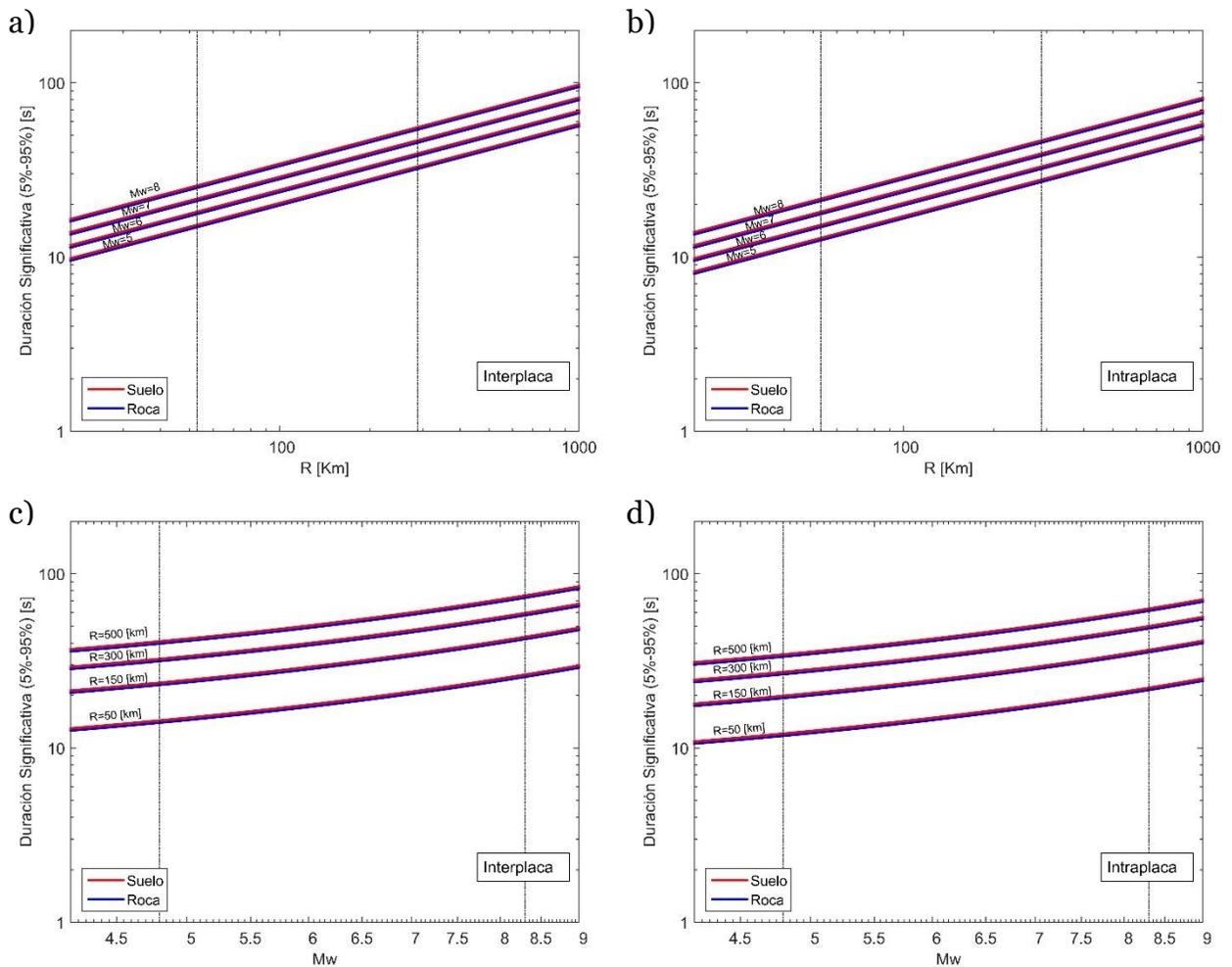


Figura 4.9: Curvas de atenuación obtenidas para la duración significativa (5%-95%). a) Curva SD vs R para sismos interplaca tipo thrust. b) Curva SD vs R para sismos intraplaca de profundidad intermedia. c) Curva SD vs M_w para sismos interplaca tipo thrust. d) Curva SD vs M_w para sismos intraplaca de profundidad intermedia.

En la Figura 4.10 se muestran los datos y las curvas de atenuación de duración significativa, representadas como SD vs R , para sismos interplaca tipo thrust para todo el rango de magnitudes utilizadas. Mientras que en la Figura 4.11 se muestran los datos y las curvas de atenuación, pero representadas como SD vs M_w , para los mismos sismos interplaca tipo thrust y para todo el rango de distancias a la ruptura utilizadas.

Se ve en la Figura 4.10 y Figura 4.11 que existe una dispersión considerable de los datos. A pesar de lo anterior se ve que en general las curvas se ajustan de manera adecuada a los eventos utilizados, para todos los rangos de magnitudes y distancias a la ruptura.

En la Figura 4.10 y Figura 4.11 las curvas para sitios con roca y sitios con suelo no difieren significativamente, por lo que no se puede afirmar si reflejan o no correctamente los efectos del tipo de suelo. Sin embargo se observa que para ambos tipos de sitio las curvas pasan aproximadamente por el centro de los datos, indicando de esta forma un buen ajuste.

Por otra parte, en los datos mostrados en la Figura 4.10 y Figura 4.11 se ve que la duración significativa aumenta a medida que aumenta la distancia a la ruptura y la magnitud de momento, hecho que queda claramente reflejado en las curvas obtenidas.

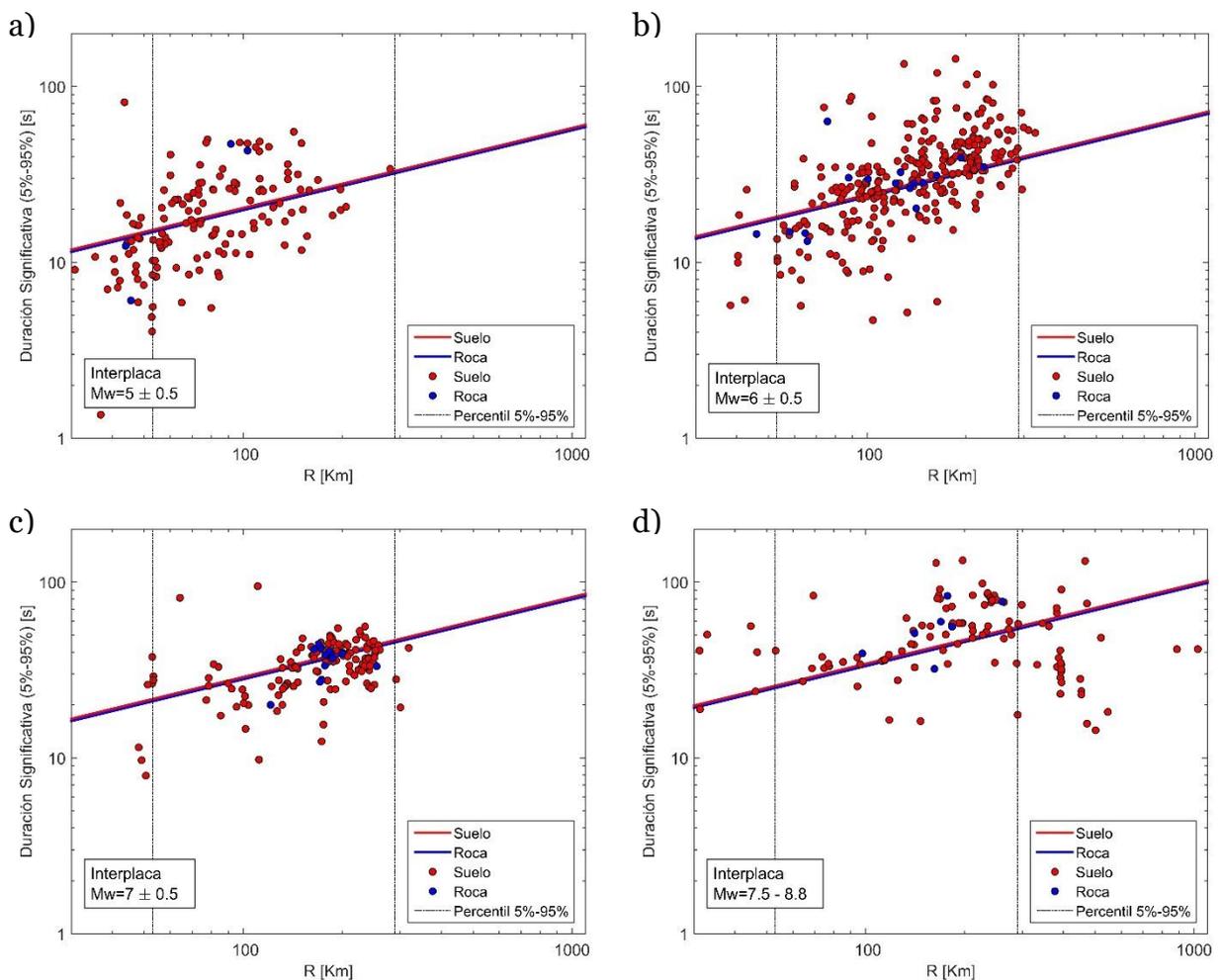


Figura 4.10: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas en curvas de SD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

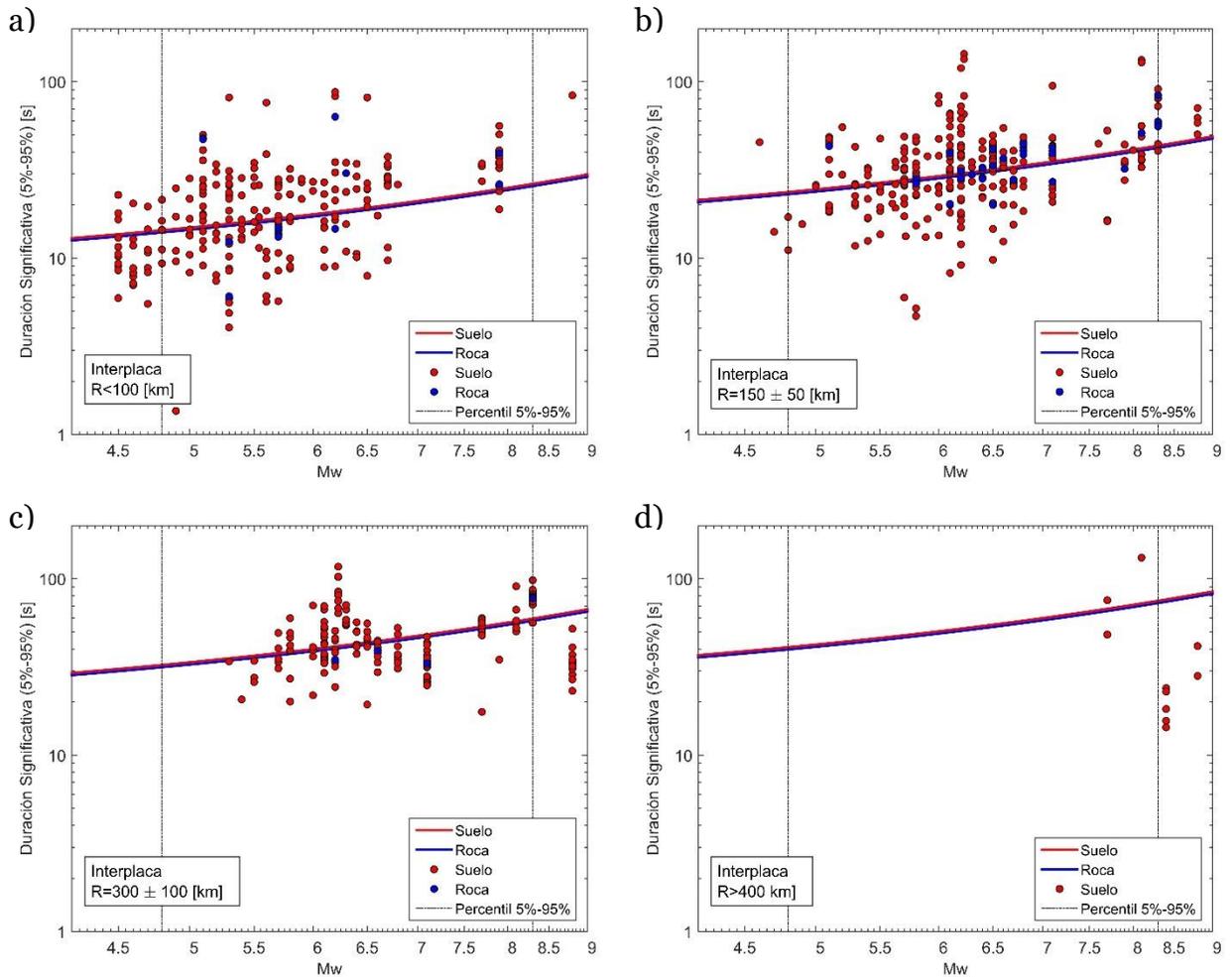


Figura 4.11: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas en curvas de SD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].

En la Figura 4.12 se muestran los datos y las curvas de atenuación de duración significativa, representadas como SD vs R , para sismos intraplaca de profundidad intermedia para todo el rango de magnitudes utilizadas. Mientras que en la Figura 4.13 se muestran los datos y las curvas de atenuación, pero representadas como SD vs M_w , para los mismos sismos intraplaca de profundidad intermedia y para todo el rango de distancias a la ruptura utilizadas.

Se ve en la Figura 4.12 que, al igual que en la Figura 4.13, existe una gran dispersión de los datos, en especial en la Figura 4.12 a). A pesar de lo anterior, para los registros con magnitudes entre 4,5 y 6,5 M_w se ve un correcto ajuste de las curvas respecto a los datos. Por otra parte, para registros con magnitudes mayores a 6,5 M_w no se cuenta con muchos datos para realizar un análisis adecuado.

En la Figura 4.13 b) se ve que la curva de atenuación sobreestima la duración significativa para distancias a la ruptura entre 100 y 200 [km], esto se deduce del hecho que la curva está por sobre una cantidad notable de los datos, quedando una menor cantidad por sobre esta.

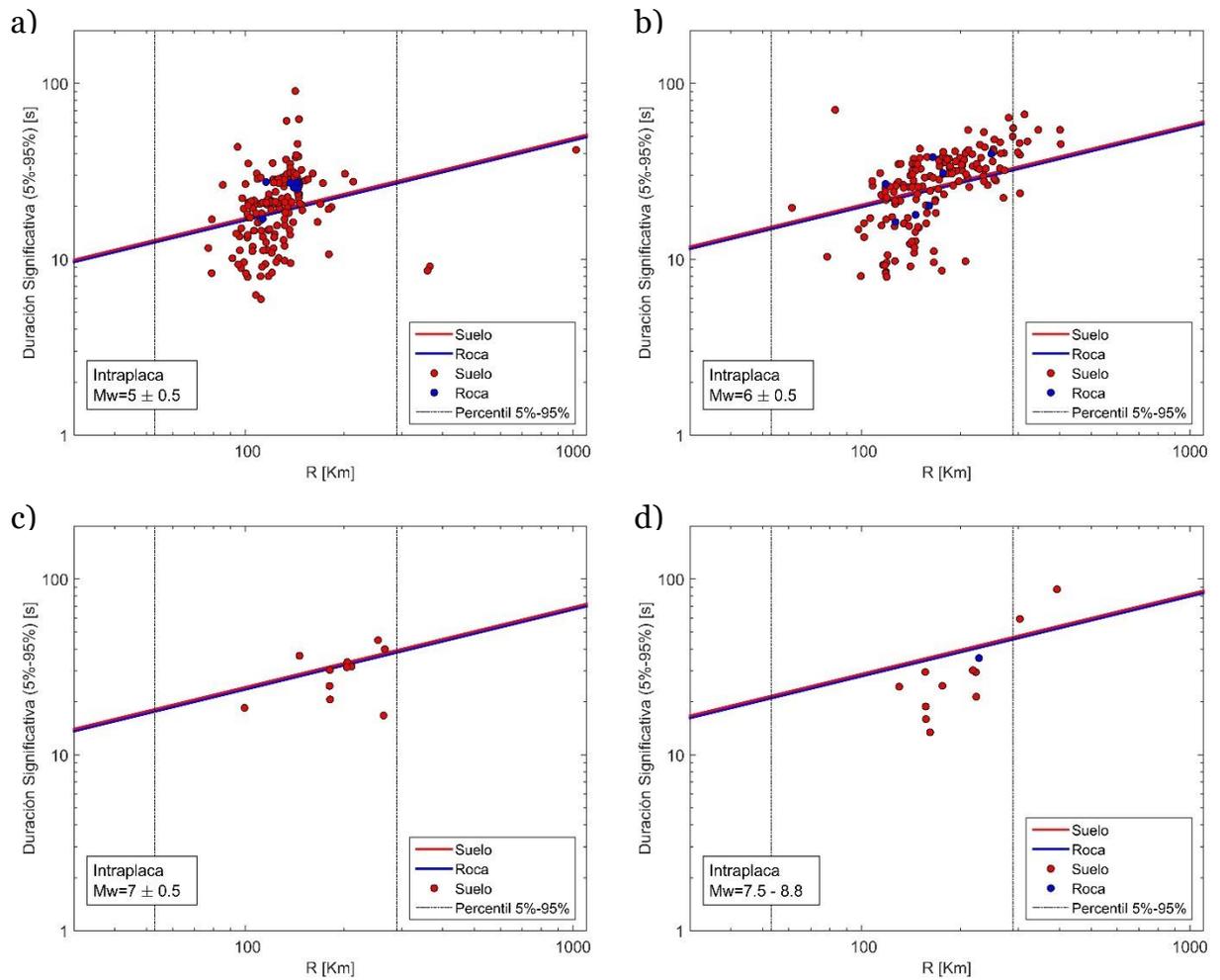


Figura 4.12: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos intraplaca de profundidad intermedia, presentadas en curvas de SD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5 \pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6 \pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7 \pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

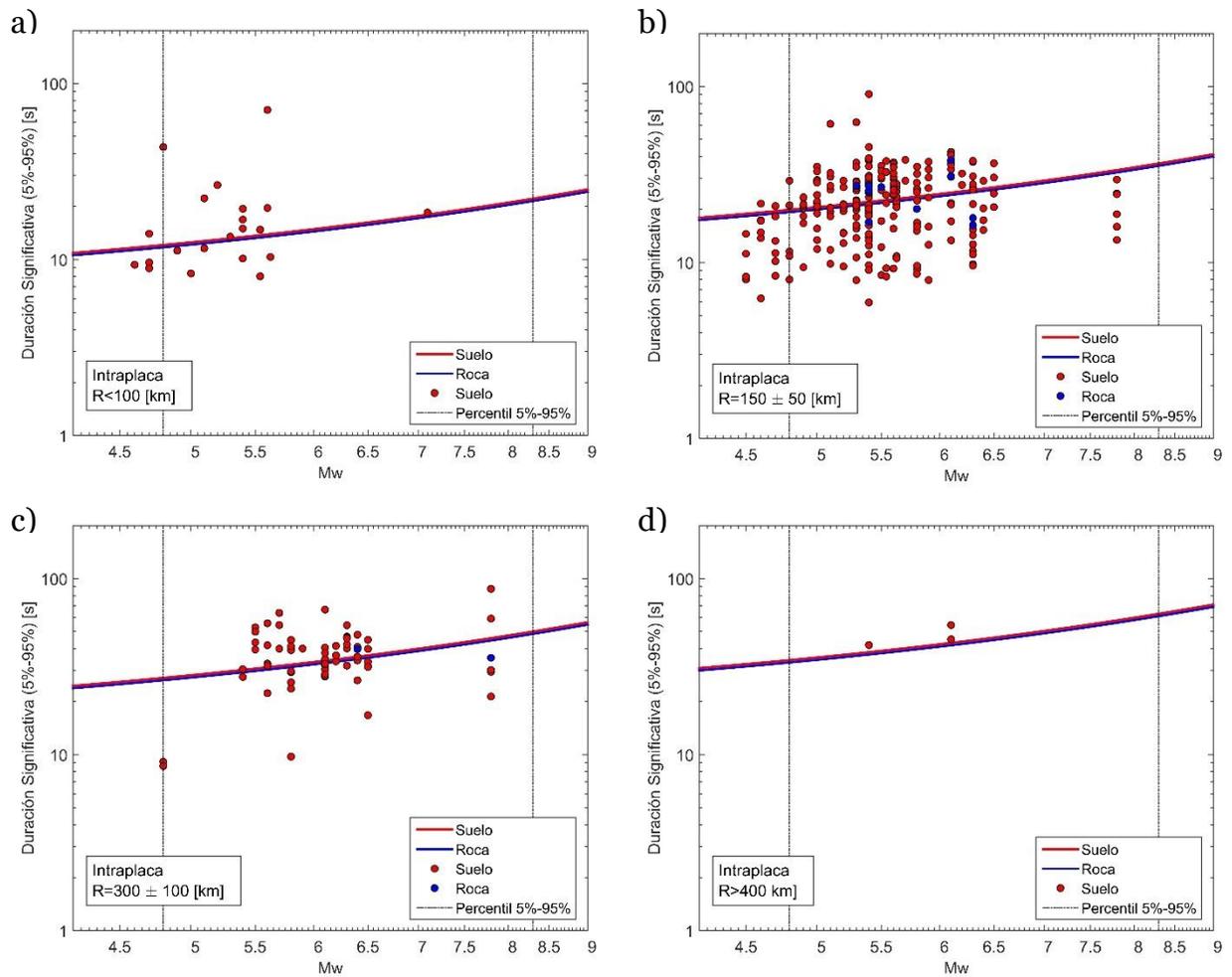


Figura 4.13: Curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%) para sismos intraplaca de profundidad intermedia, presentadas en curvas de SD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R < 100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150 \pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300 \pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R > 400$ [km].

En la Figura 4.14 se muestran los residuos (i.e. $\ln(\text{valor medido}) - \ln(\text{valor esperado})$) de las curvas de atenuación de la duración significativa. Se muestran 3 gráficos de residuos versus diferentes parámetros, en el gráfico a) se muestran los residuos versus la magnitud de momento, en el gráfico b) los residuos versus la velocidad de onda de corte, y en el gráfico c) los residuos versus la distancia a la ruptura, realizando en todos la diferenciación por fuente sísmogénica.

Al observar la Figura 4.14 se verifica que no existe ninguna tendencia de los residuos respecto a ninguna de las variables graficadas, lo cual indica que se está considerando correctamente la influencia de la M_w , R y el tipo de suelo en el funcional.

En la Figura 4.14 c) se ve que los sismos intraplaca presentan los residuos más altos para distancias a la ruptura entre 100 y 200 [km], lo cual concuerda con lo señalado al realizar en análisis de la Figura 4.13 b).

En la Figura 4.14 b) se observa que eventos registrados en sitios con roca no presentan residuos muy altos, en especial para sismos intraplaca. Mientras que los sitios con suelo presentan los residuos más altos.

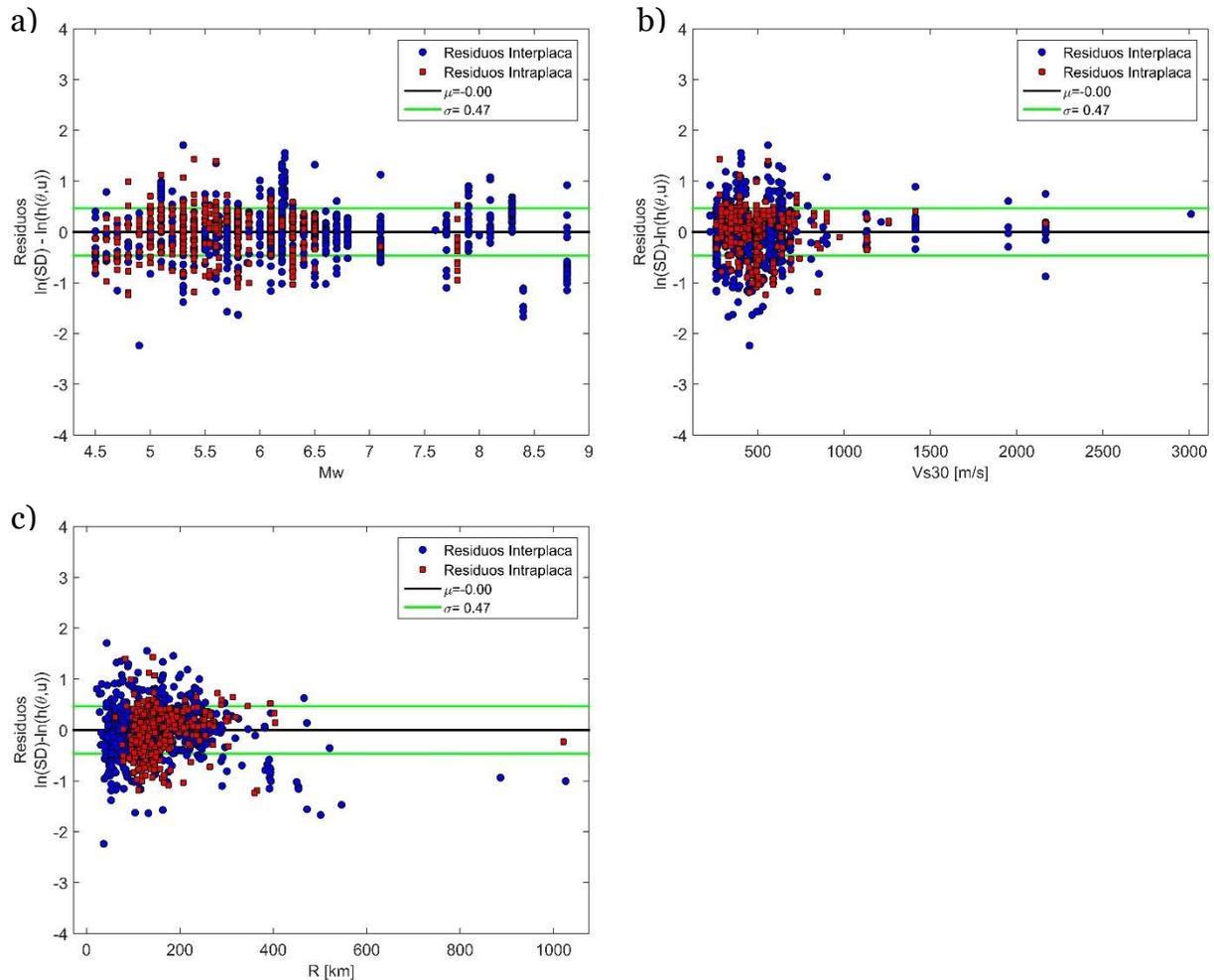


Figura 4.14: Residuos para la curva de atenuación de duración significativa (5%-95%). a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs V_{s30} . c) Residuos vs R .

En la Figura 4.15 se muestra el histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración significativa. Se observa que el histograma presenta una distribución cercana a la normal, pero con una leve concentración de los datos en el centro, lo cual se encuentra respaldado por el valor de la curtosis que es 4,42, el cual en una distribución normal toma un valor de 3. Se busca una distribución normal debido a que esto indica que la sobreestimación y subestimación del valor de duración significativa es similar, lo cual es un indicador de que el ajuste está bien realizado.

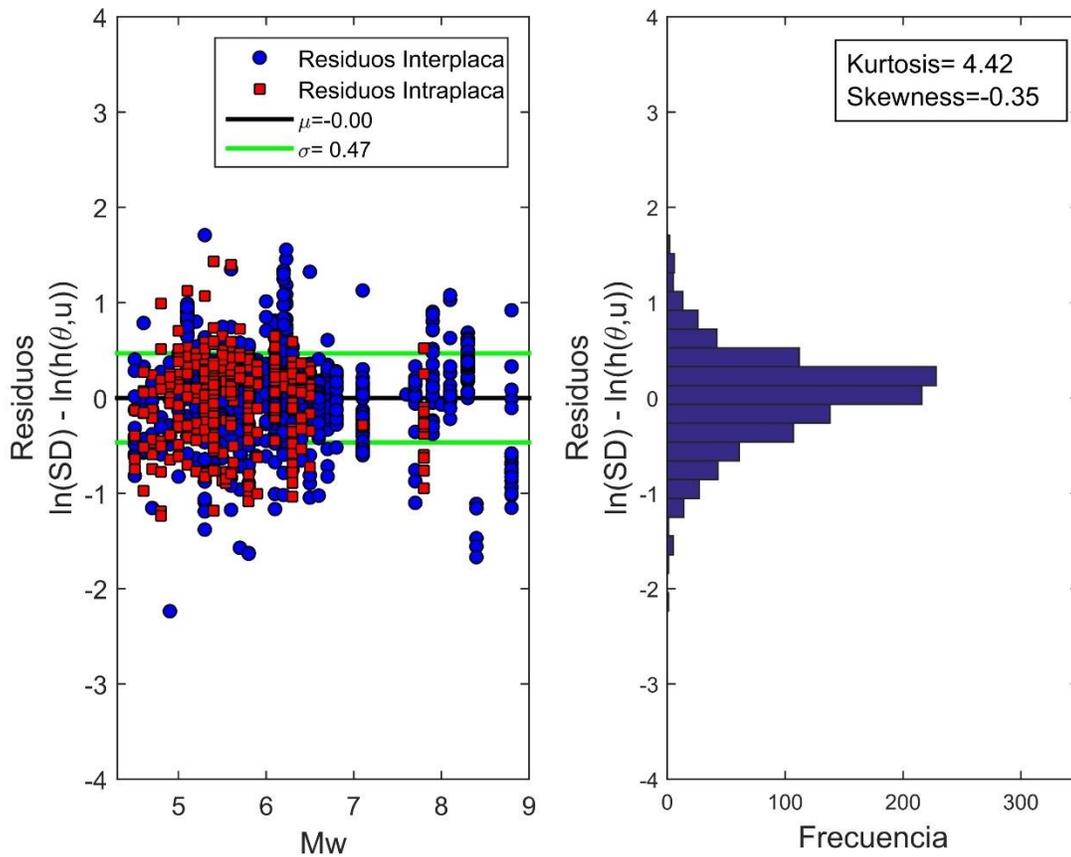


Figura 4.15: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración significativa (5%-95%).

En la Figura 4.16 se muestran las curvas de excedencia del 10% para las curvas de atenuación de la duración significativa, para sismos interplaca e intraplaca, para sitios con suelo. Cabe mencionar que se grafica solo para suelo ya que las curvas son muy similares, sin embargo el mismo gráfico, pero para sitios con roca se encuentra en el Anexo D.4. Se muestran las curvas en gráficos de SD vs R (Figura 4.16 a) y c)) y en gráficos de SD vs M_w (Figura 4.16 b) y d)).

Se observa que en general las curvas de excedencia están bastante alejadas de las curvas de atenuación, lo cual concuerda con la dispersión de los datos de duración observados en los gráficos anteriores.

Al analizar la Figura 4.16 se obtiene que las curvas de excedencia para sismos intraplaca (Figura 4.16 c) y d)) presentan diferencias porcentuales menores con las curvas de atenuación que para sismos interplaca (Figura 4.16 a) y b)). Por ejemplo, para sismos intraplaca y una magnitud de 7 M_w con una distancia a la ruptura de 100 [km], la curva de excedencia es 2,19 veces mayor que la curva de atenuación, mientras que para el mismo caso, pero en sismos interplaca es 2,25 veces mayor.

Cabe mencionar que, formalmente, la curva de excedencia para un tipo de sismo y un tipo de suelo puede escribirse como $P(SD > SD_{threshold} | R, M_w) = 10\%$, lo que significa que la probabilidad de que la duración significativa exceda un cierto límite, dada una distancia a la ruptura y una magnitud de momento es de un 10%.

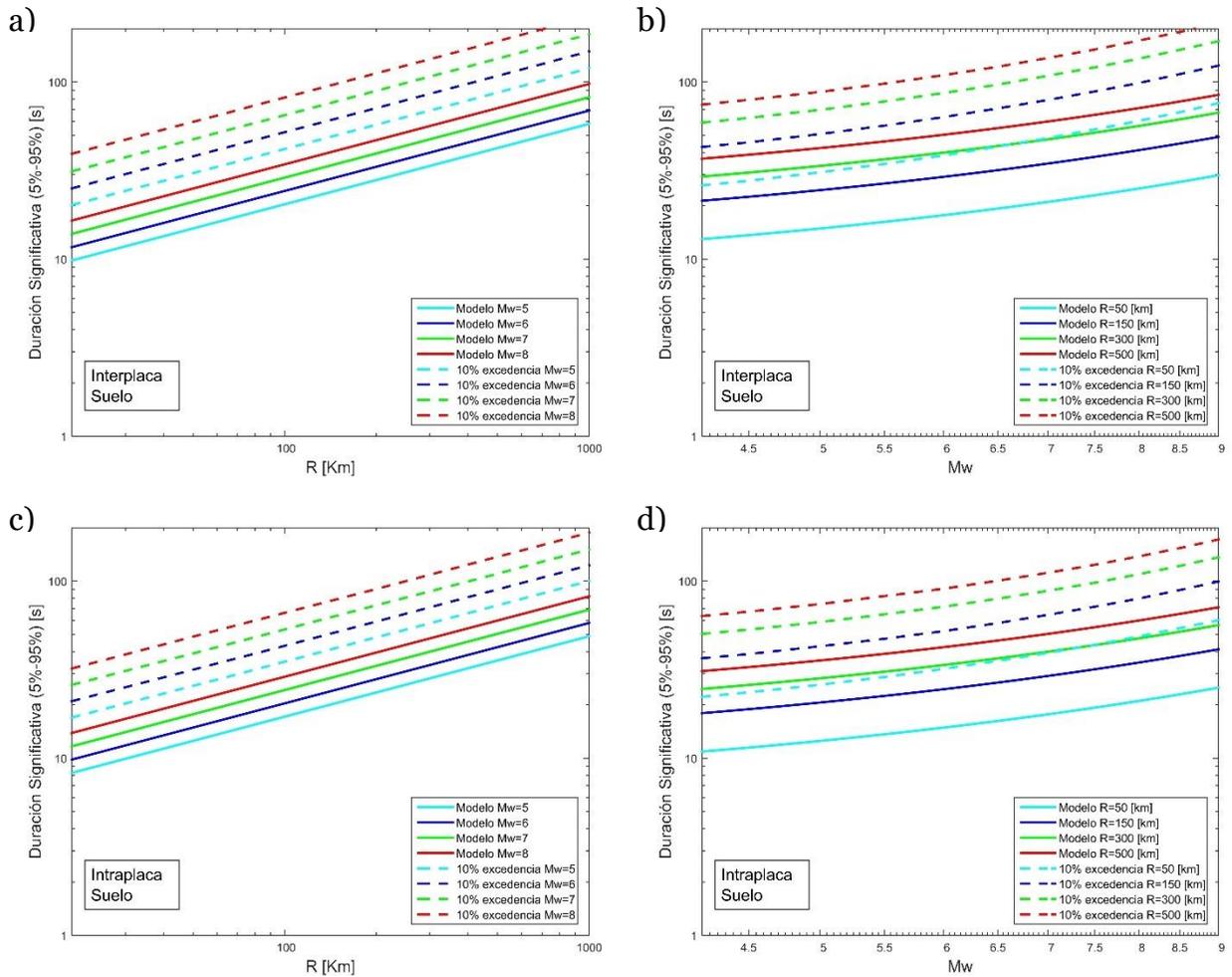


Figura 4.16: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%). a) Curva presentada como SD vs R , sismo interplaca, suelo. b) Curva presentada como SD vs M_w , sismo interplaca, suelo. c) Curva presentada como SD vs R , sismo intraplaca, suelo. d) Curva presentada como SD vs M_w , sismo intraplaca, suelo.

Las constantes que permiten construir las curvas de excedencias graficadas en la Figura 4.16 sin tener que realizar el procedimiento de Monte Carlo descrito en la sección 4.3 se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la duración significativa.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
-0,483	0,220	0,454	0,014	1,051	0,833

En la Figura 4.17 se muestra la curva de atenuación obtenida en el presente estudio para duración significativa (5%-95%) junto con las obtenidas por otros autores (5, Hernandez y Cotton (2000) y Kempton y Stewart (2006), que utilizan la misma forma para calcular la duración.

De la Figura 4.17 se observa que, para todo el rango de distancias a la ruptura graficadas, la curva obtenida en el presente estudio entrega mayores valores de duración que los de

Hernández y Cotton (2000), pero menores que los presentados por Kempton y Stewart (2006) hasta una distancia a la ruptura de aproximadamente 150 [km]. Es importante destacar que las curvas de los otros autores fueron desarrolladas con datos de otros lugares, y que por lo tanto poseen un rango de validez para las distintas variables que influyen en las curvas de atenuación diferente a las presentadas en el presente estudio, lo que influye fuertemente en los resultados. La curva presentada por Hernández y Cotton (2000) es válida para un rango de distancia a la ruptura entre 1 y 109 [km], mientras que la de Kempton y Stewart (2006) es válida entre 0 y 200 [km].

La diferencia en las curvas deja en evidencia que es importante definir el rango de validez de las curvas obtenidas, tanto para la zona en donde es adecuado utilizarlas como el rango de las variables (R , M_w , V_{s30} , h) que es válida la curva, ya que los resultados de duración varían considerablemente de una zona a otra, por los diferentes factores que están presentes en cada zona de estudio.

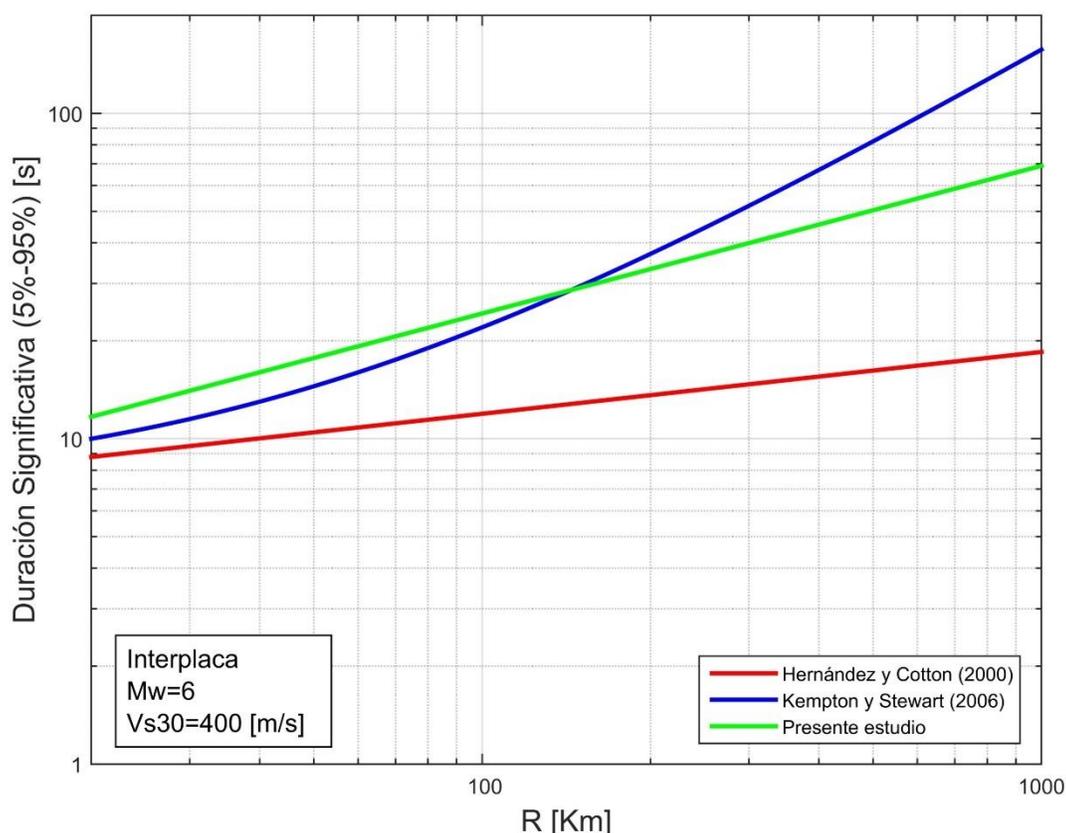


Figura 4.17: Comparación de la curva de atenuación de duración significativa obtenida en este estudio con la de otros autores.

4.3.3 Resultados de los ajustes para la duración entre intervalos

En la Tabla 4.13 se muestran los resultados obtenidos para las curvas de atenuación de la duración entre intervalos. El detalle de los resultados, que incluye las constantes, curvas de atenuación y residuos obtenidos para cada uno de los modelos se encuentra en el Anexo D.3.

Es importante tener en cuenta que, producto de la definición de la duración entre intervalos, varios registros presentan duraciones de 0 segundos, estos registros no se utilizan en el ajuste realizado y mostrado de la Tabla 4.13. En consecuencia de lo anterior, el análisis de los registros con una duración nula se realiza al final de la presente sección. En el ajuste para la duración entre intervalos que utiliza el límite de 0,05g se utilizan 204 registros, mientras que cuando se utiliza el límite de 0,1g se utilizan 107 registros.

Los resultados obtenidos en la Tabla 4.13 para las desviaciones estándar y la media de los ajustes, que consideran el límite de 0,05g, son más favorables que aquellos que consideran el límite de 0,1g. Para el modelo 1 la desviación estándar del error es un 2,75% menor para el caso de 0,05g que para el caso de 0,1g, mientras que para el modelo 2 es un 10,9% menor.

El modelo 1 presenta una desviación estándar ligeramente inferior a la del modelo 2 en el caso de 0,05g. Sin embargo, para el caso del límite de 0,1g la diferencia se hace más notable, siendo la desviación estándar del error del modelo 1 un 8,9% menor que para el modelo 2.

Cabe mencionar que en este caso la curtosis y la asimetría no son buenos indicadores para escoger el funcional óptimo debido a que, producto de la baja cantidad de registros utilizados, los residuos no alcanzan a tener una distribución normal, provocando de este modo los altos valores de curtosis y asimetría observados en la Tabla 4.13.

Luego de comparar y analizar los resultados obtenidos para los 2 modelos en estudio, para los casos con límites de 0,05g y 0,1g, se llega a la conclusión de que el modelo más conveniente para la base de datos utilizada es el modelo 1, utilizando la duración entre intervalos con límite de 0,05g. Para la toma de esta decisión se tienen en cuenta los valores obtenidos para la desviación estándar del error y de los residuos, también se verifica que los residuos no presenten ninguna tendencia, ya que de lo contrario significa que existe algún factor que no se está tomando en cuenta en el modelo, también se toma en cuenta que la forma del funcional tenga un sentido físico, de igual modo se verifica que los resultados obtenidos para las constantes tengan coherencia física.

Tabla 4.13: Resultados de los ajustes para las curvas de duración entre intervalos.

Funcional	Notas	Ajuste		Residuos			
		σ_e	R^2	σ	μ	Kurt	Skew
Modelo 1 (0,05g)	-	1,09	0,66	0,00	1,09	-1,55	7,65
Modelo 1 (0,1g)	-	1,12	0,67	-0,01	1,13	-1,30	5,31
Modelo 2 (0,05g)	$M_{wr}=4,5$	1,10	0,65	-0,01	1,10	-1,65	7,94
	$M_{wr}=5$	1,10	0,65	-0,01	1,10	-1,64	7,91
	$M_{wr}=6$	1,10	0,65	-0,01	1,10	-1,61	7,86
	$M_{wr}=7$	1,10	0,65	0,00	1,10	-1,60	7,84
Modelo 2 (0,1g)	$M_{wr}=4,5$	1,22	0,62	-0,04	1,22	-1,78	6,25
	$M_{wr}=5$	1,21	0,62	-0,03	1,22	-1,78	6,29
	$M_{wr}=6$	1,21	0,62	-0,02	1,21	-1,77	6,33
	$M_{wr}=7$	1,21	0,62	-0,01	1,21	-1,76	6,35

A modo de recordatorio, el modelo 1 se basa en el funcional desarrollado por Bommer *et al.* (2009), pero con las modificaciones indicadas en la sección 4.1.3, quedando el funcional escogido como se muestra en la ecuación (4.39).

$$\ln(BD) = c_1 + c_2 \cdot M_w + c_3 \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + c_4^2}\right) + c_5 \cdot \ln(V_{s30}) + c_6 \cdot F_{inter} \pm \sigma_e \quad (4.39)$$

Este funcional permite estimar la duración entre intervalos a partir de la magnitud de momento, la distancia a la ruptura, la fuente sismogénica y la velocidad de onda de corte promedio de los primeros 30 [m]. Las cuatro partes principales de este funcional son el escalamiento de la magnitud, efectos de la profundidad del sismo, el tipo de sismo y la respuesta del sitio. A continuación se explica brevemente en que consiste cada uno de los términos que componen este funcional.

El escalamiento básico de la duración con respecto a la magnitud se considera lineal (Bommer *et al.*, (2009)), y se incluye en el modelo como $c_2 \cdot M_w$. El escalamiento por profundidad del sismo se incluye en el efecto por saturación de fuente cercana, que queda representado por la constante c_4 de la ecuación (4.39). El tipo de sismo se incluye en el término $c_6 \cdot F_{inter}$. La respuesta del sitio se incorpora en el término $c_9 \ln\left(\frac{V_{s30}}{1100}\right)$, el cual considera una respuesta lineal del sitio.

Los valores obtenidos para las constantes del funcional de la ecuación (4.39), la matriz de covarianza y la matriz de los coeficientes de correlación se muestran en la Tabla 4.14, Tabla 4.15 y Tabla 4.16 respectivamente.

En la Tabla 4.16 se puede ver que los coeficientes de correlación toman valores cercanos a 0 o valores intermedios entre -1 y 0 o 0 y 1. Los coeficientes de correlación cercanos a 0 indican que las constantes no poseen una correlación lineal. Aquellos coeficientes que se encuentran entre 0 y 1 tienen una correlación positiva, lo cual significa que al aumentar una de las constantes la otra también aumenta, mientras que los coeficientes que se encuentran entre -1 y 0 tienen una correlación negativa, lo cual indica que al aumentar una constante, la otra disminuye.

Dentro de los resultados obtenidos en la Tabla 4.16 se puede destacar que en general no se ve ningún coeficiente de correlación que sea cercano a 1 o a -1, lo cual indica que ninguna de las constantes tiene una fuerte correlación entre sí. Por otra parte la correlación más alta se da entre las constantes asociadas a la distancia a la ruptura y a la profundidad del evento, mientras que la más baja se da entre esta última y la constante asociada a la magnitud de momento.

Tabla 4.14: Resultados de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
2,277	1,549	-1,548	110,457	-0,509	0,101

Tabla 4.15: Matriz de covarianza de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
c_1	1,482	0,013	-0,184	10,756	-0,092	0,013
c_2	0,013	0,007	-0,010	-0,073	-0,002	-0,001
c_3	-0,184	-0,010	0,056	-3,621	-0,009	-0,003
c_4	10,756	-0,073	-3,621	528,414	1,853	0,758
c_5	-0,092	-0,002	-0,009	1,853	0,026	0,002
c_6	0,013	-0,001	-0,003	0,758	0,002	0,004

Tabla 4.16: Matriz de coeficientes de correlación de las constantes obtenidas para la curva de atenuación de la duración entre intervalos.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
c_1	1	0,129	-0,641	0,384	-0,464	0,177
c_2	0,129	1	-0,497	-0,039	-0,126	-0,258
c_3	-0,641	-0,497	1	-0,668	-0,238	-0,177
c_4	0,384	-0,039	-0,668	1	0,496	0,535
c_5	-0,464	-0,126	-0,238	0,496	1	0,187
c_6	0,177	-0,258	-0,177	0,535	0,187	1

En la Tabla 4.17 se muestran los resultados de las desviaciones estándar (σ) de las constantes atenuadas, las cuales se obtienen a partir de la matriz de covarianza mostrada en la Tabla 4.15.

Como se dice en la sección 4.2 se parte asumiendo una desviación estándar del 50% para cada constante, por lo que se debe verificar si se logra disminuir este porcentaje con el ajuste. Para esto se calcula que porcentaje del valor de la constante representa cada desviación estándar, resultado que se muestra en la columna $\%c_i$ de la Tabla 4.17. Al analizar los resultados que se muestran en la Tabla 4.17 se ve que en dos de seis casos aumenta la desviación estándar impuesta inicialmente, mientras que el resto disminuye, y en algunos casos de forma considerable.

El resultado más desfavorable de desviación estándar de la Tabla 4.17 corresponde a la constante c_6 asociada al tipo de evento, en donde la desviación estándar representa el 61,2% del valor de la constante. Este resultado no difiere considerablemente del 50% inicial impuesto, aunque de todos modos es importante mencionar que el valor de $\%c_i$ no entrega información relevante si la media es cercana a 0, como pasa en este caso. Cabe mencionar que aquellas constantes con valores cercanos a 0 tienen poco peso en el funcional, por lo que tendría que evaluarse si son realmente necesarios en el modelo.

Tabla 4.17: Desviaciones estándar de las constantes atenuadas para la duración entre intervalos.

	σ^2	σ	$\%c_i$
c_1	1,48	1,22	53,5
c_2	0,01	0,08	5,3
c_3	0,06	0,24	15,2
c_4	528,41	22,99	20,8
c_5	0,03	0,16	31,9
c_6	0,00	0,06	61,2

Con los resultados obtenidos del ajuste se construyen las curvas de atenuación para la duración entre intervalos con un límite de 0,05g del valor de aceleración absoluta, las que se muestran en la Figura 4.18. En el gráfico a) y b) se presentan las curvas de atenuación en un gráfico de BD vs R para cuatro diferentes magnitudes de momento, 5, 6, 7 y 8 M_w , haciendo la diferenciación según si el sitio es suelo o roca, separando además para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia. En el gráfico c) y d) se presentan las curvas de atenuación en un gráfico de BD vs M_w para cuatro diferentes distancias a la ruptura, 50, 150, 300 y 500 [km], haciendo la diferenciación según si el sitio es suelo o roca, separando además para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia.

Es necesario aclarar que las líneas verticales mostradas en la Figura 4.18, al igual que de la Figura 4.19 a la Figura 4.22, representan el percentil del 5% y 95% de todos los datos utilizados.

En la Figura 4.18 a) y b) se observa que una mayor distancia a la ruptura implica menores valores de duración. Una mayor magnitud de momento conlleva mayores valores para la curva de atenuación. Por otra parte, los sismos registrados en sitios con suelo presentan valores de duración mayores que los sitios con roca. Por último, las curvas para sismos intraplaca muestran valores inferiores de duración para una misma M_w , en comparación con los sismos interplaca.

En la Figura 4.18 c) y d) se observa lo mismo de los gráficos a) y b), pero desde otra perspectiva. Se verifica que una mayor magnitud implica un aumento de la duración entre intervalos, mientras que un aumento de la distancia a la ruptura conlleva una disminución de la duración.

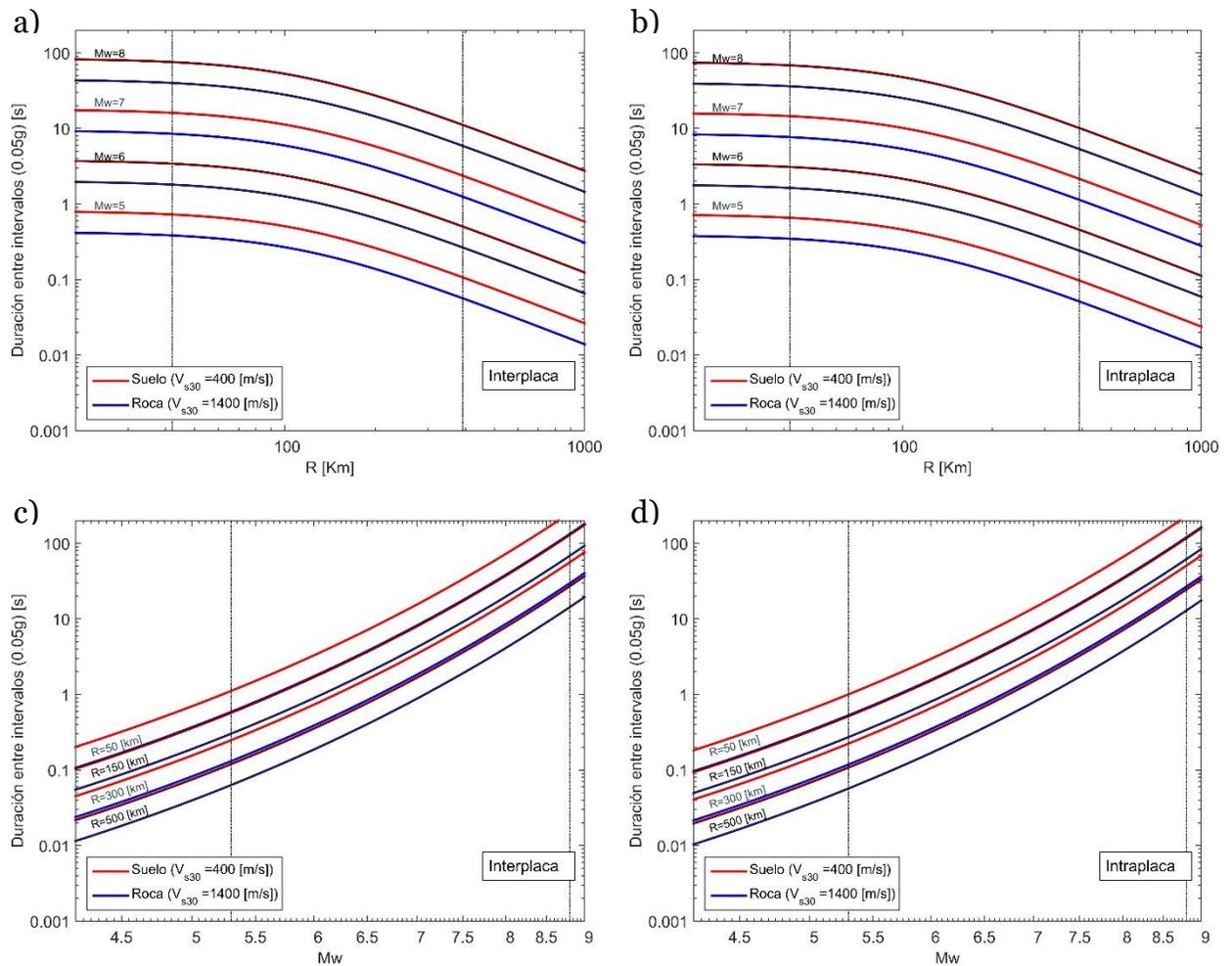


Figura 4.18: Curvas de atenuación obtenidas para la duración entre intervalos (0,05g). a) Curva BD vs R para sismos interplaca tipo thrust. b) Curva BD vs R para sismos intraplaca de profundidad intermedia. c) Curva BD vs M_w para sismos interplaca tipo thrust. d) Curva BD vs M_w para sismos intraplaca de profundidad intermedia.

En la Figura 4.19 se muestran los datos y las curvas de atenuación de duración entre intervalos, representadas como BD vs R , para sismos interplaca tipo thrust para todo el rango de magnitudes utilizadas. Mientras que en la Figura 4.20 se muestran los datos y las curvas de atenuación, pero representadas como BD vs M_w , para los mismos sismos interplaca tipo thrust y para todo el rango de distancias a la ruptura utilizadas.

A pesar de que se cuenta con una cantidad bastante menor de datos en comparación con los otros ajustes realizados, se ve en la Figura 4.19 y Figura 4.20 que sigue existiendo una dispersión en los datos. A pesar de lo anterior se ve que en general las curvas se ajustan de manera adecuada a los eventos utilizados.

En la Figura 4.19 y Figura 4.20 las curvas reflejan correctamente los efectos del tipo suelo en los valores de duración. Los datos muestran que para los sitios con roca los valores de duración son menores que para sitios con suelo, hecho que se evidencia claramente en las curvas. A pesar de lo anterior la Figura 4.19 c) muestra que la curva de

atenuación subestima las duraciones para sitios con roca para eventos con magnitudes superiores a $7,5 M_w$.

Por otra parte, en los datos mostrados en la Figura 4.19 y Figura 4.20 se ve que la duración entre intervalos disminuye a medida que aumenta la distancia a la ruptura y aumenta con la magnitud de momento, hecho que queda claramente reflejado en las curvas obtenidas.

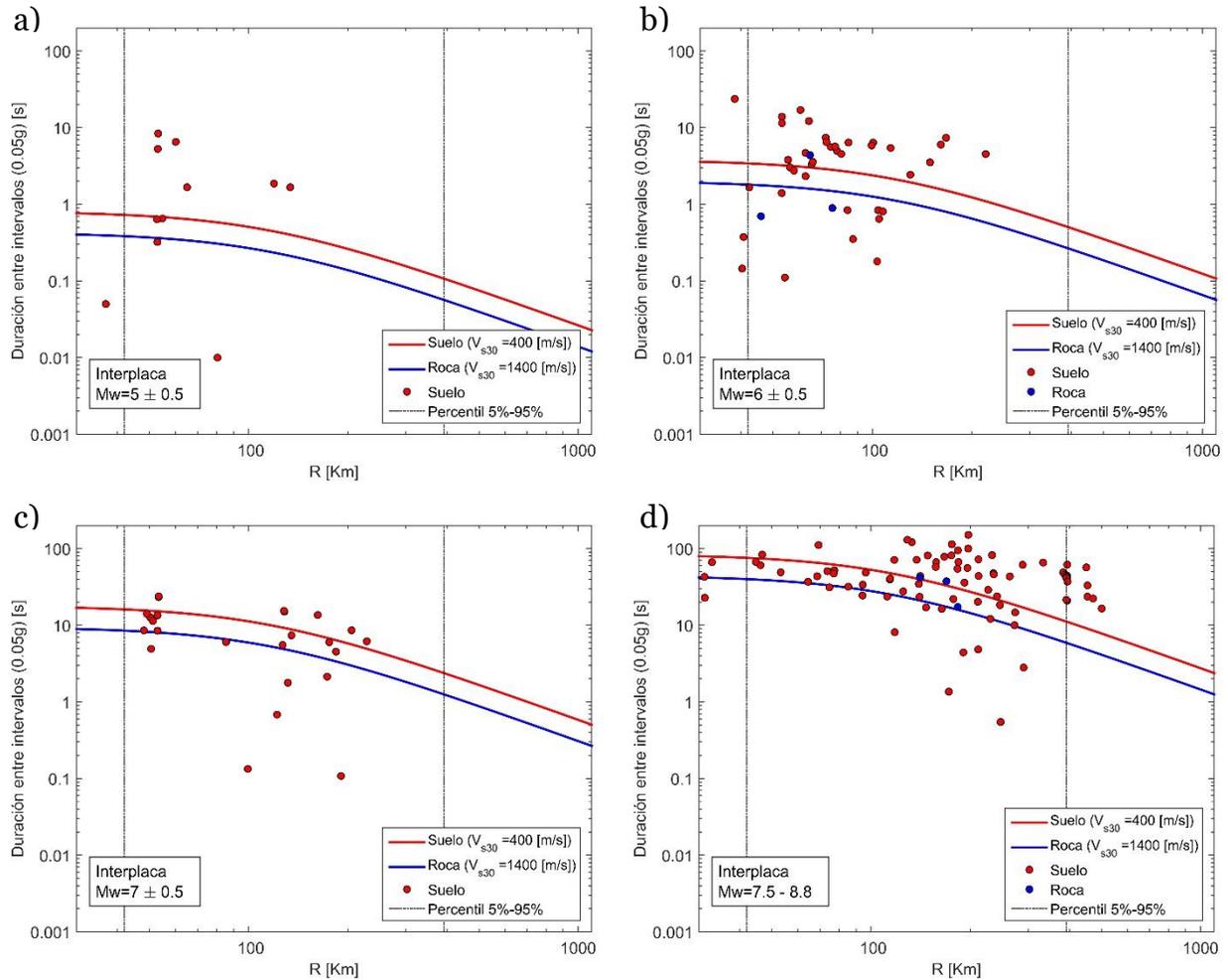


Figura 4.19: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas como BD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5\pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6\pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7\pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

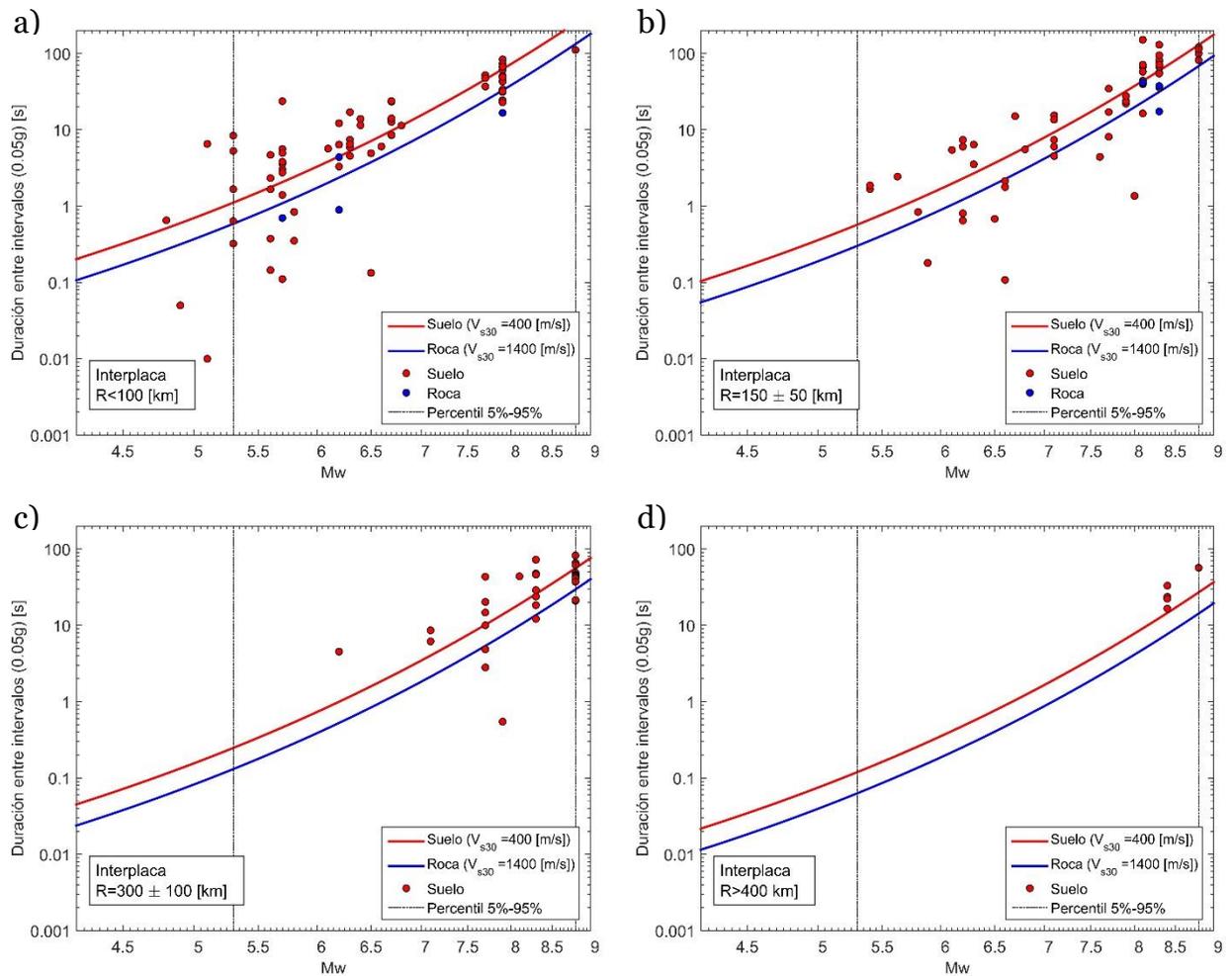


Figura 4.20: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos interplaca tipo thrust, presentadas como BD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].

En la Figura 4.21 se muestran los datos y las curvas de atenuación de duración entre intervalos, representadas como BD vs R , para sismos intraplaca de profundidad intermedia para todo el rango de magnitudes utilizadas. Mientras que en la Figura 4.22 se muestran los datos y las curvas de atenuación, pero representadas como BD vs M_w , para los mismos sismos intraplaca de profundidad intermedia y para todo el rango de distancias a la ruptura utilizadas.

Se ve en la Figura 4.21 que, al igual que en la Figura 4.22, existe una dispersión considerable de los datos. A pesar de lo anterior se ve que las curvas en general se ajustan de manera adecuada a los eventos utilizados.

En la Figura 4.21 b) se ve que la curva de atenuación subestima la duración, esto se deduce del hecho que la curva está por debajo de una cantidad notable de los datos, quedando una mayor cantidad por sobre esta.

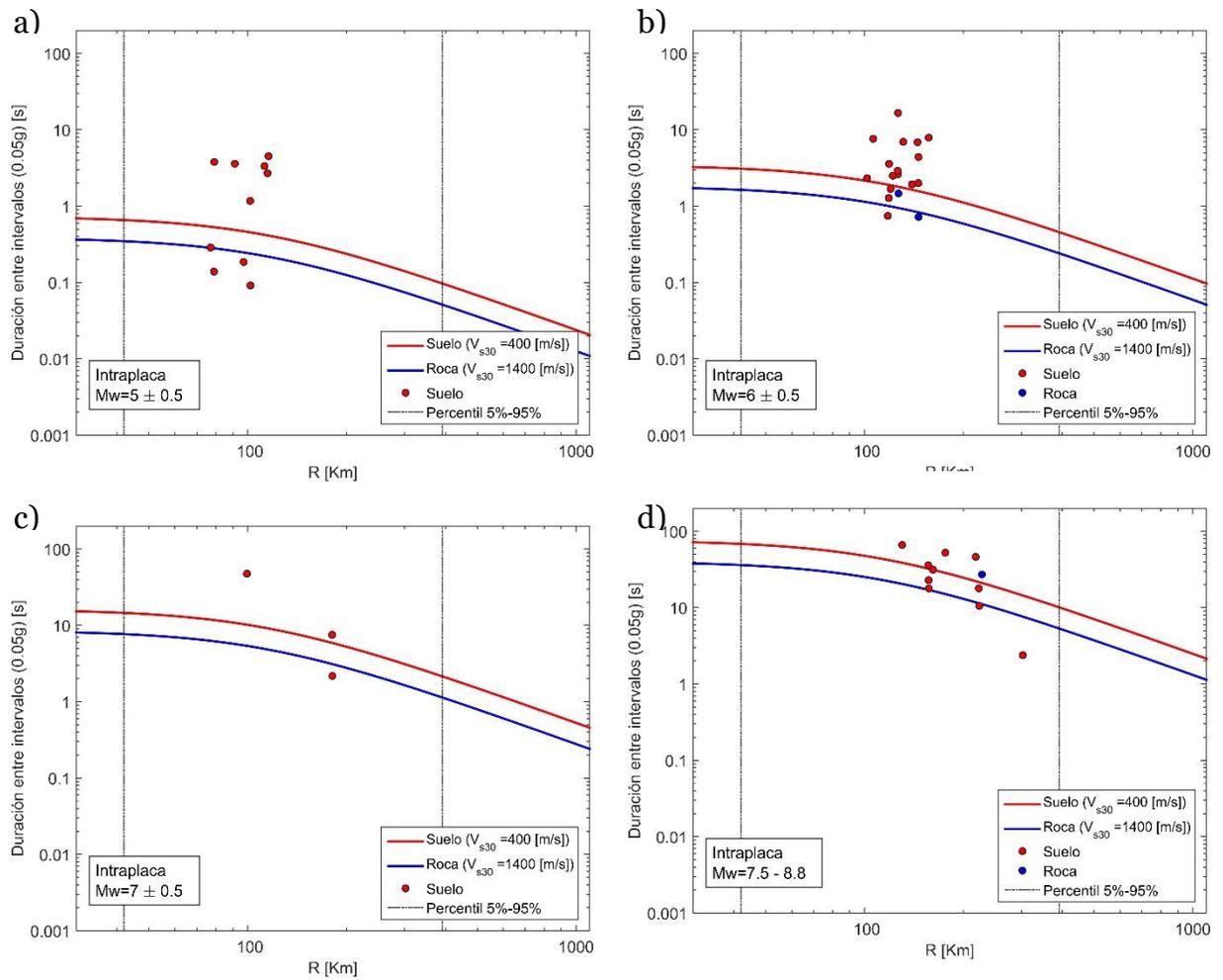


Figura 4.21: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos intraplaca profundidad intermedia, presentadas como BD vs R . a) Curva para $M_w=5$ y datos $M_w=5 \pm 0,5$. b) Curva para $M_w=6$ y datos $M_w=6 \pm 0,5$. c) Curva para $M_w=7$ y datos $M_w=7 \pm 0,5$. d) Curva para $M_w=8$ y datos $M_w=7,5-8,8$.

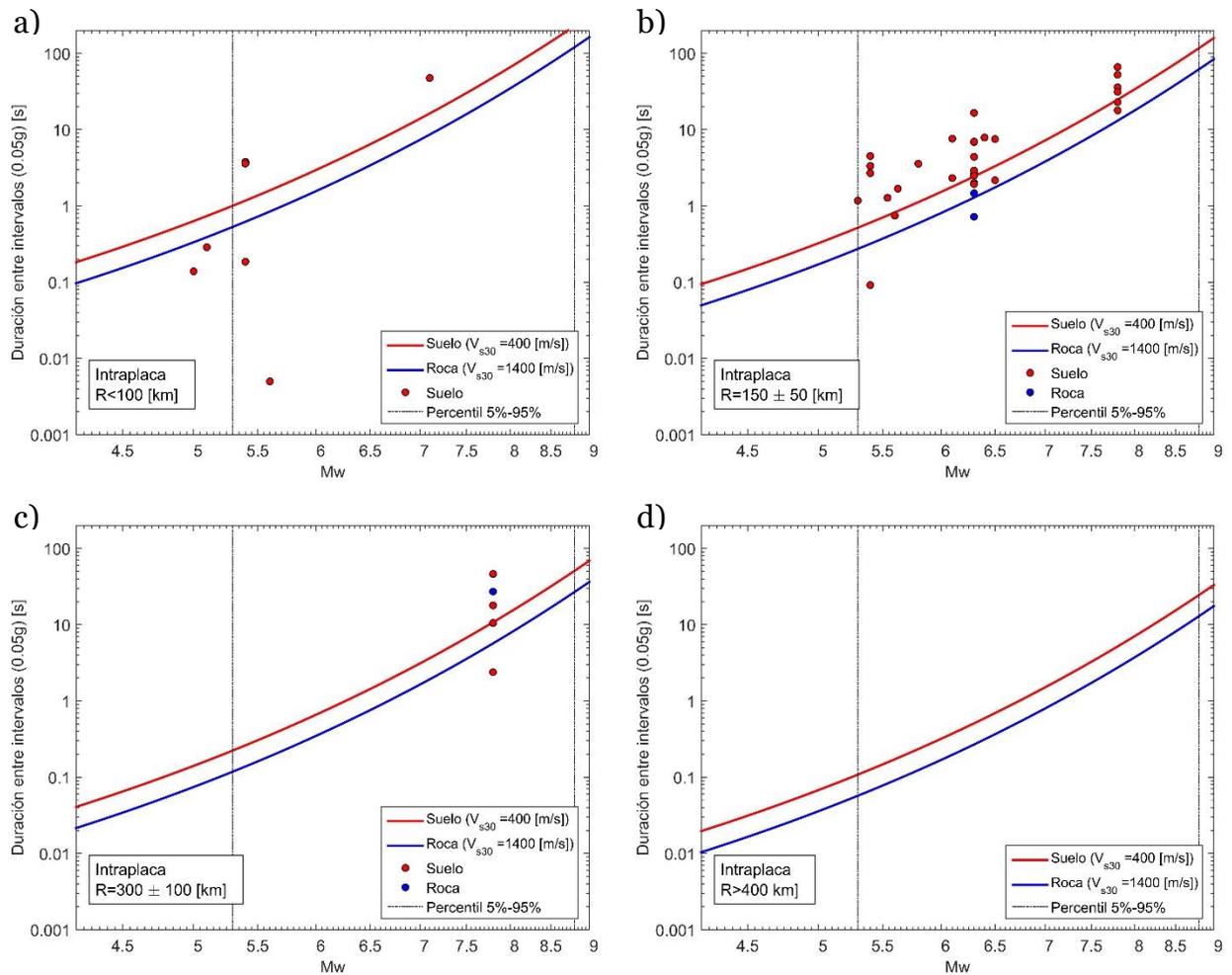


Figura 4.22: Curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sismos intraplaca profundidad intermedia, presentadas como BD vs M_w . a) Curva para $R=50$ [km] y datos $R<100$ [km]. b) Curva para $R=150$ [km] y datos $R=150\pm 50$ [km]. c) Curva para $R=300$ [km] y datos $R=300\pm 100$ [km]. d) Curva para $R=500$ [km] y datos $R>400$ [km].

En la Figura 4.23 se muestran los residuos (i.e. $\ln(\text{valor medido}) - \ln(\text{valor esperado})$) de las curvas de atenuación de la duración entre intervalos. Se muestran 3 gráficos de residuos versus diferentes parámetros, en el gráfico a) se muestran los residuos versus la magnitud de momento, en el gráfico b) los residuos versus la velocidad de onda de corte, y en el gráfico c) los residuos versus la distancia a la ruptura, realizando en todos la diferenciación por fuente sísmogénica.

Al observar la Figura 4.23 se verifica que no existe ninguna tendencia de los residuos respecto a ninguna de las variables graficadas, lo cual indica que se está considerando correctamente la influencia de la M_w , R y el tipo de suelo en el funcional.

En la Figura 4.23 se ve que los sismos interplaca presentan residuos más altos en comparación con los sismos intraplaca. Los sismos interplaca presentan residuos altos para todo el rango de magnitudes, en especial para sismos de magnitudes superiores a $6,5 M_w$, para distancias a la ruptura menores a 300 [km], y para sitios en suelo.

En la Figura 4.23 b) se observa que eventos registrados en sitios con altas velocidades de onda de corte no presentan residuos muy altos, todos tienen valores bajo la desviación estándar.

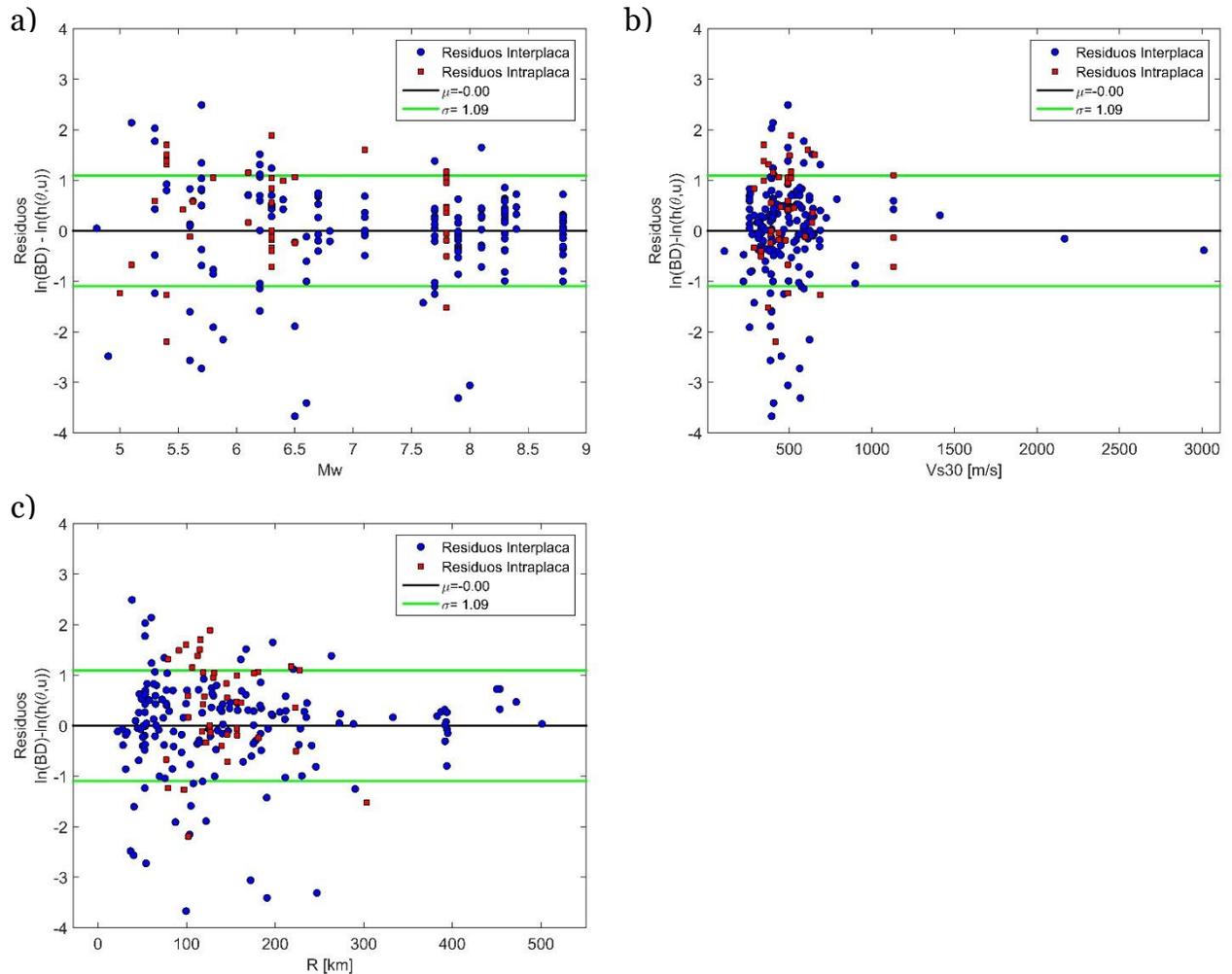


Figura 4.23: Residuos para la curva de atenuación de duración entre intervalos (0,05g). a) Residuos vs M_w . b) Residuos vs V_{s30} . c) Residuos vs R .

En la Figura 4.24 se muestra el histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración entre intervalos. Se observa que el histograma no presenta una distribución normal, lo cual se respalda claramente por los altos valores absolutos de curtosis y asimetría obtenidos, 7,65 y -1,55 respectivamente. La ausencia de una distribución normal de los residuos se atribuye principalmente a la baja cantidad de datos utilizados para realizar el ajuste y a que existen registros que, sí bien no poseen una duración nula, sí tienen duraciones muy cercanas a 0, lo cual provoca residuos más altos de lo observado en el resto de los datos.

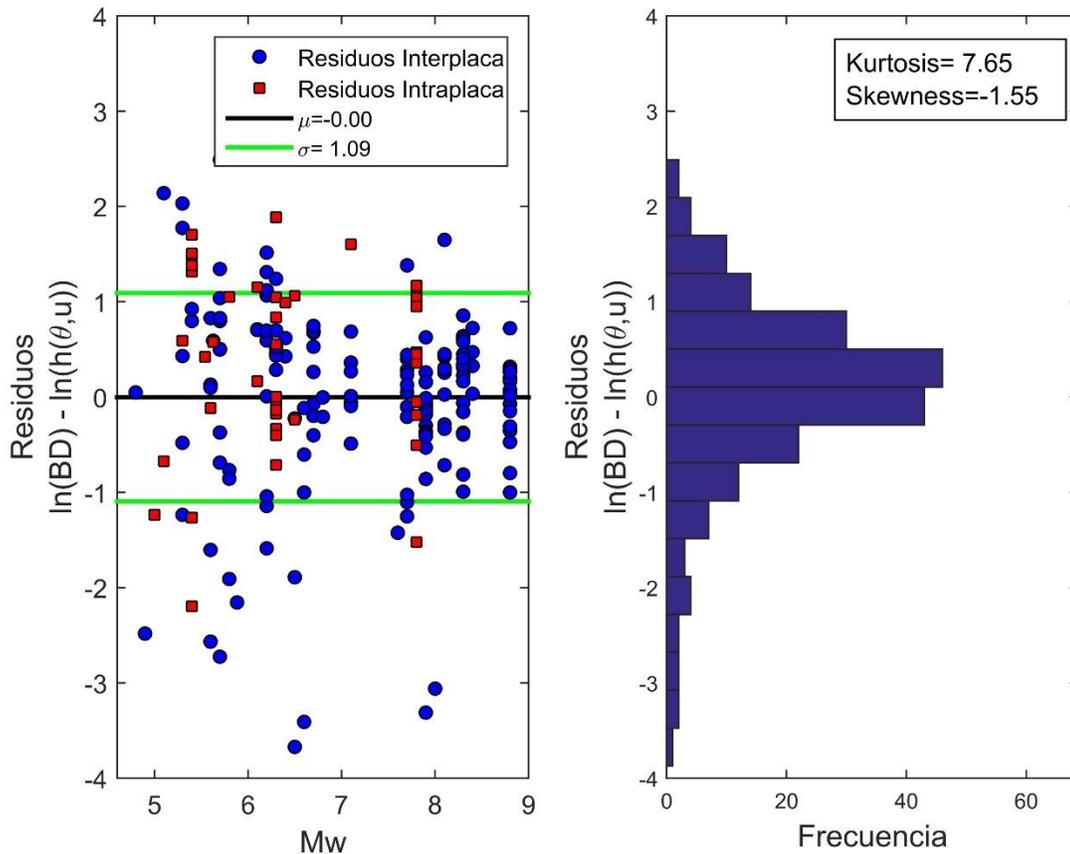


Figura 4.24: Histograma de los residuos de la curva de atenuación de duración entre intervalos (0,05g).

En la Figura 4.25 se muestran las curvas de excedencia del 10%, para las curvas de atenuación de la duración entre intervalos, para sismos interplaca e intraplaca, para sitios con suelo. Se muestran las curvas en gráficos de BD vs R (Figura 4.25 a) y c) y en gráficos de BD vs M_w (Figura 4.25 b) y d)). Cabe mencionar que se grafica solo para suelo ya que los resultados para sitios con roca son similares, los gráficos para este último caso se encuentran en el Anexo D.4.

Se observa que las curvas de excedencia mantienen una diferencia considerable con las curvas de atenuación, lo cual concuerda con la dispersión de los datos de duración observados en los gráficos anteriores y con las desviaciones estándar del error.

Al analizar la Figura 4.25 se obtiene que las curvas de excedencia para sismos intraplaca (Figura 4.25 c) y d)) presentan diferencias porcentuales similares con la curva de atenuación comparando con sismos interplaca (Figura 4.25 a) y b)). Por ejemplo, para una magnitud de $7 M_w$ y una distancia a la ruptura de 100 [km] la curva de excedencia, para ambas fuentes sismogénicas, es 4 veces mayor que la curva de atenuación.

Cabe mencionar que, formalmente, la curva de excedencia para un tipo de sismo puede escribirse como $P(BD > BD_{threshold} | R, M_w, V_{s30}) = 10\%$, lo que significa que la probabilidad de que la duración entre intervalos exceda un cierto límite, dada una distancia a la ruptura, magnitud de momento y velocidad de onda de corte es de un 10%.

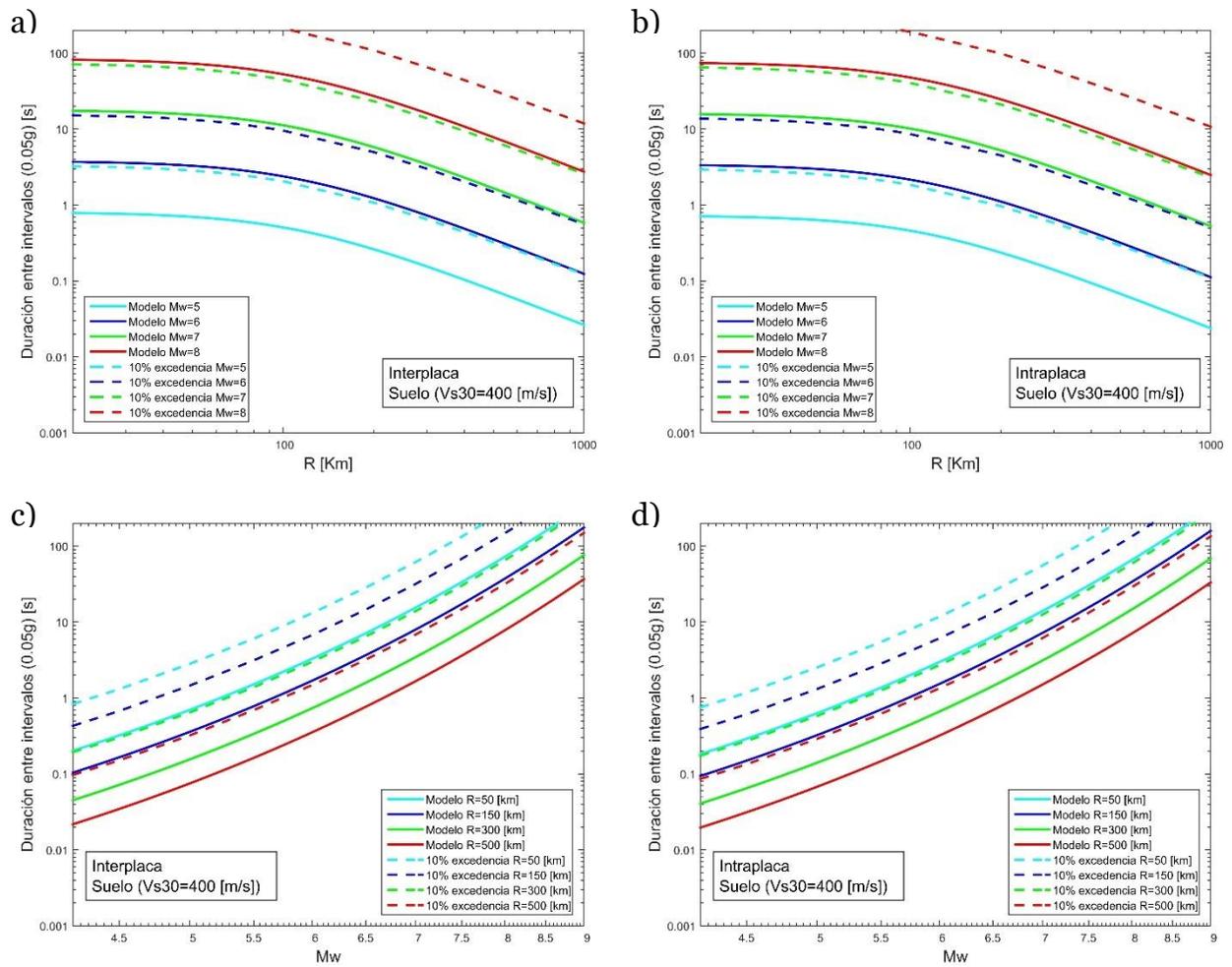


Figura 4.25: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g) para sitios con suelo. a) Curva presentada como BD vs R , sismo interplaca. b) Curva presentada como BD vs M_w , sismo interplaca. c) Curva presentada como BD vs R , sismo intraplaca. d) Curva presentada como BD vs M_w , sismo intraplaca.

Las constantes que permiten construir las curvas de excedencias graficadas en la Figura 4.25 sin tener que realizar el procedimiento de Monte Carlo descrito en la sección 4.3 se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Constantes de la curva de excedencia del 10% para la duración significativa.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
3,384	1,547	-1,479	103,162	-0,523	0,095

En la Figura 4.26 se muestra la curva de atenuación obtenida en el presente estudio para duración entre intervalos (0,05g) junto con las obtenidas por otros autores, Bommer *et al.* (2009) y Lee y Green (2012), que utilizan la misma forma para calcular la duración.

De la Figura 4.26 se observa que, para todo el rango de distancias a la ruptura graficadas, la curva obtenida en el presente estudio entrega menores valores de duración que los de Lee y Green (2012), pero mayores que los presentados por Bommer *et al.* (2009). Es

importante destacar que las curvas de los otros autores fueron desarrolladas con datos de otras zonas, y que por lo tanto poseen un rango de validez para las distintas variables (R , M_w , etc.) diferente a las presentadas en el presente estudio, lo que influye fuertemente en los resultados. La curva presentada por Lee y Green (2012) es válida entre 0,1 y 199,1 [km], mientras que la de Bommer *et al.* (2009) es válida para un rango de distancia a la ruptura menor a 100 [km], lo que explica que se vea una línea recta en lugar de una curva.

La diferencia en las curvas deja en evidencia que es importante definir el rango de validez de las curvas obtenidas, tanto para la zona en donde es válida como el rango de las variables (distancia a la ruptura, magnitud, etc.), ya que los resultados de duración varían considerablemente de una zona a otra, por los diferentes factores que actúan en cada zona en estudio.

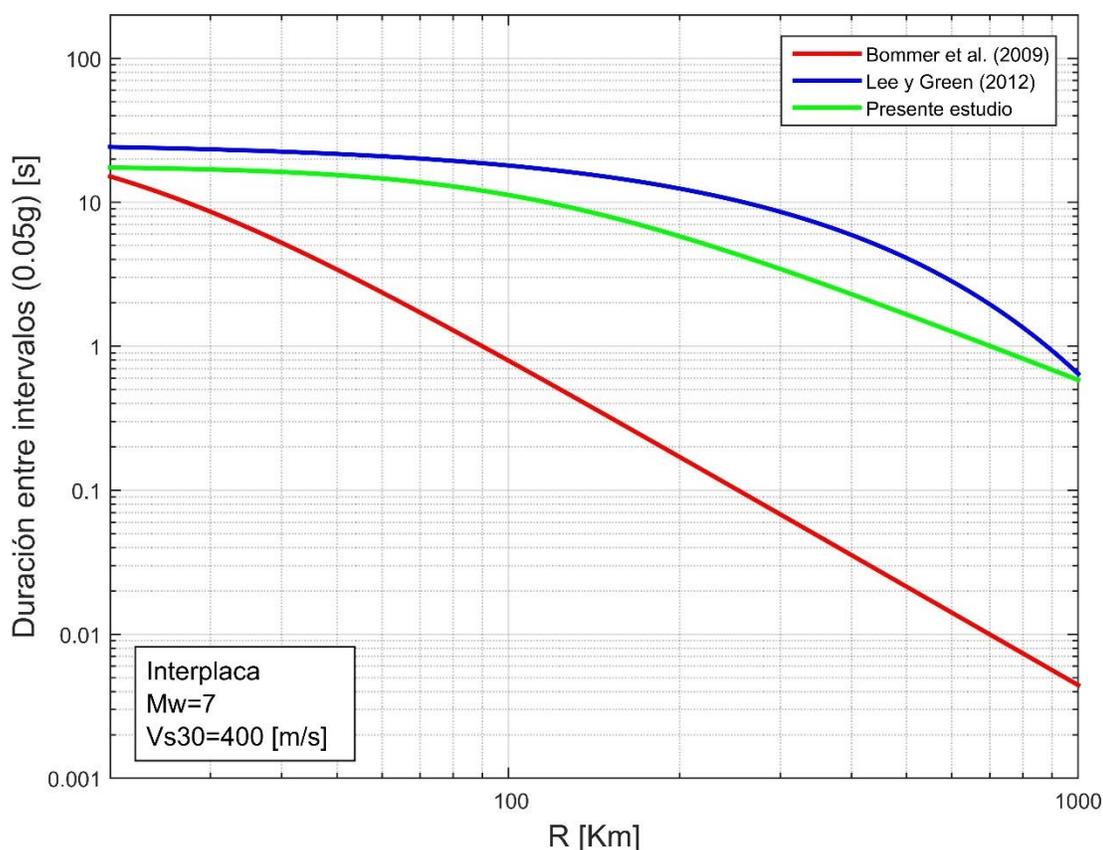


Figura 4.26: Comparación de la curva de atenuación de duración entre intervalos obtenida en este estudio con la de otros autores.

Como ya se dijo anteriormente, el ajuste solo fue realizado para aquellos registros con duraciones mayores a 0, por lo que ahora es necesario incorporar al análisis aquellos registros con duraciones nulas. Para esto se determina una relación entre los valores de duración y algunas variables, más específicamente la magnitud de momento y la distancia a la ruptura, incorporando de esta forma aquellos registros que presentan una duración entre intervalos igual a 0.

Para realizar lo anterior se utiliza un método de clasificación basado en *Support Vector Machine* (SVM), el cual encuentra la mejor forma de separar dos grupos de datos, que en este caso son las duraciones mayores a 0 y las duraciones nulas. Las probabilidades que se obtienen con este método se calculan según lo planteado por Platt (2000).

Como resultado de lo anterior se obtiene la Figura 4.27, en la cual se muestran los datos de duración entre intervalos separados en dos grupos, aquellos que son mayores a 0 y aquellos que poseen una duración nula, en un gráfico de M_w vs R . En la figura se observan líneas negras dispuestas en diagonal, estas representan isolíneas de probabilidad e indican la probabilidad de que en ese punto, a una cierta distancia a la ruptura y magnitud de momento, se tenga una duración mayor a 0 segundos.

Al analizar la Figura 4.27 se obtiene que para sismos de grandes magnitudes y distancias a la ruptura menores a 250 [km] se tiene una probabilidad mayor al 90% de obtener una duración mayor a 0 segundos, y a medida que la magnitud va disminuyendo y la distancia a la ruptura aumenta, esta probabilidad va disminuyendo. Estos resultados son consistentes con los datos de duración observados en el gráfico.

En el método de clasificación utilizado no se incluye el efecto de otras variables que se encuentran presentes en el funcional, como lo son el tipo de sismo y el tipo de suelo. También es necesario tener en cuenta que entre los datos podría diferenciarse un tercer grupo, correspondiente a aquellos que tienen una duración entre intervalos cercana a 0, sin embargo para realizar lo anterior sería necesario establecer un límite para este último grupo, lo cual implica un análisis más profundo de los datos de duración entre intervalos.

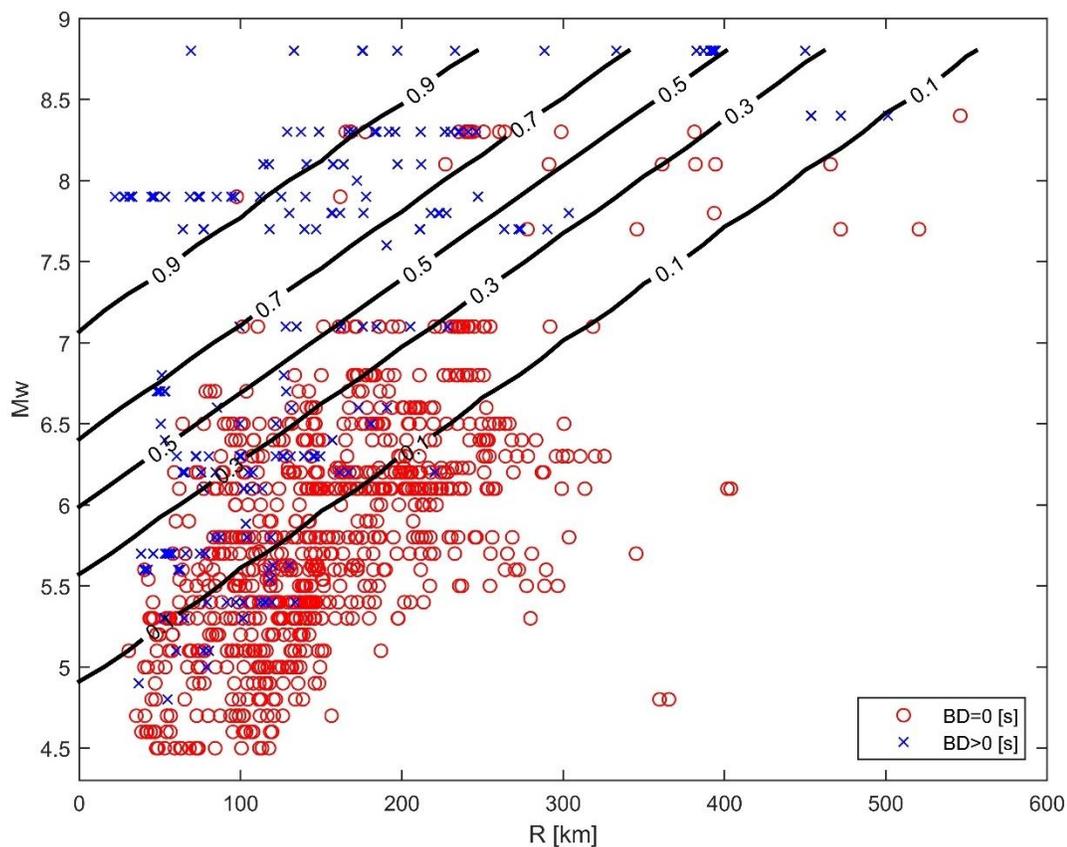


Figura 4.27: Clasificación de duraciones entre intervalos utilizando el límite de 0,05g por medio del método de clasificación basado en *Support Vector Machine* (SVM).

Las líneas negras en la Figura 4.27 que indican la probabilidad de obtener un valor de duración mayor a 0 se pueden aproximar mediante la ecuación de la recta (4.40), donde x representa la distancia a la ruptura R , y representa la magnitud de momento M_w , la pendiente m y el coeficiente de posición n se indican en la Tabla 4.19.

$$y = m \cdot x + n \quad (4.40)$$

Tabla 4.19: Pendientes y coeficientes de posición para las rectas de probabilidad de la Figura 4.27.

Probabilidad	m	n
0,9	0,007	7,1
0,7	0,007	6,4
0,5	0,007	6
0,3	0,007	5,6
0,1	0,007	4,9

La clasificación de duraciones entre intervalos utilizando el límite de 0,1g por medio del método de clasificación SVM se encuentra en el anexo D.3.

4.3.4 Comparación de resultados entre la Intensidad de Arias y la duración significativa

Como se ve en la sección 2.3.2 el cálculo de la duración significativa se realiza a partir de la Intensidad de Arias, por lo tanto se esperaría que los comportamientos de las curvas de atenuación para ambos parámetros sea consistente. A continuación se realiza un análisis comprobando si se cumple lo descrito a partir de lo observado en las curvas de la sección 4.3.1 y 4.3.2, y en caso de no cumplirse se justificará este comportamiento.

Respecto al comportamiento según la variación de la magnitud, se verifica que una mayor magnitud de momento implica un aumento tanto de la Intensidad de Arias como de la duración significativa. Por lo tanto el comportamiento respecto a la magnitud de momento es consistente.

Con respecto al comportamiento según la variación de la distancia a la ruptura, se obtiene que un aumento de la distancia implica una disminución de la Intensidad de Arias, pero conlleva un aumento de la duración significativa. Esto puede explicarse ya que una mayor distancia a la ruptura implica una mayor atenuación de las ondas sísmicas, provocando una menor liberación de energía que en estaciones con distancias a la ruptura menores, lo que lleva finalmente a una Intensidad de Arias más baja. Por otro lado, cuando se realiza el cálculo de la duración significativa no se considera la amplitud con la que llegan las ondas, si no que se calcula respecto a la energía total que llega a la estación de registro, provocando el fenómeno que una mayor distancia a la ruptura conlleva mayores duraciones significativas, esto se explica, según Hernández y Cotton (2000), por las diferentes velocidades de propagación de las ondas y a la reflexión y refracción de estas.

Respecto al comportamiento según el tipo de suelo, se tiene que un aumento de la velocidad de onda de corte implica una disminución tanto de la intensidad de Arias como de la duración significativa. Por lo tanto el comportamiento respecto al tipo de suelo es consistente.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

A partir del trabajo desarrollado, resultados obtenidos y análisis realizado se obtienen las siguientes conclusiones generales.

1. Por primera vez se desarrollan curvas de atenuación para la Intensidad de Arias, duración significativa y duración entre intervalos utilizando una base de datos de sismos chilenos, empleando el método de ajuste Bayesiano. Lo anterior supone un aporte para el estudio de peligro sísmico del país.
2. Se amplía la base de datos de sismos chilenos con respecto a estudios anteriores. Se cuenta con una base de datos de 1117 registros correspondientes a 311 eventos, cuyas fuentes sismogénicas corresponden a interplaca tipo thrust e intraplaca profundidad intermedia en su mayoría, y en menor cantidad corticales, outer-rise e intraplaca profundos.
3. En función de la base de datos utilizada para obtener las curvas de atenuación, se establecen los rangos de validez para su aplicación. En primer lugar solo son válidas para sismos chilenos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia registrados entre la región de Arica y Parinacota y la región de los Ríos. Magnitudes que van desde $4,5 M_w$ hasta $8,8 M_w$, distancias a la ruptura mayores a 22,1 [km] y menores a 1026,01 [km], profundidades del hipocentro desde 9 [km] hasta 197 [km], y V_{s30} que van desde 108 [m/s] hasta 3010 [m/s].
4. Al comparar las curvas obtenidas para cada parámetro sísmico con las de otros autores (ver Figura 4.7, Figura 4.17 y Figura 4.26) se observan diferencias notables entre estas, ya sea en la forma de la curva o en los valores obtenidos. Este hecho da cuenta de la importancia de utilizar una base de datos adecuada para cada zona en estudio y de definir claramente el rango de validez de las curvas en base a los datos utilizados, esto ya que cada lugar presenta diferentes características y factores que influyen en los parámetros sísmicos que se obtienen de los registros.
5. El método de ajuste utilizado presenta algunas ventajas y desventajas respecto a otros métodos comúnmente utilizados. Entre las ventajas se pueden enumerar los siguientes puntos.
 - a. Permite obtener datos de la optimización que no entregan otros ajustes, como la matriz de covarianza y el gradiente. De esta forma es posible realizar análisis que no son posibles de otra forma, como lo es la curva de excedencia calculada.
 - b. Teniendo en cuenta que las curvas de atenuación entregan un valor esperado y no un valor único, el ajuste permite obtener los valores más probables para cada constante, cada una con su distribución de

probabilidad gaussiana de media c_i (Tabla 4.2, Tabla 4.8 y Tabla 4.14) y desviación estándar σ (Tabla 4.5, Tabla 4.11 y Tabla 4.17), lo que permite también obtener la distribución de probabilidad gaussiana para el parámetro en estudio. A partir de lo anterior, al utilizar la curva de atenuación se puede decidir qué intervalo de confianza se le quiere otorgar al resultado de cada parámetro, lo cual varía dependiendo del uso que se le quiera dar.

- c. La programación del método en *Matlab* no significa un gran costo computacional. Sin embargo, se debe entender la teoría que hay detrás del ajuste para poder aplicarla correctamente.

Entre las desventajas del método se pueden mencionar lo siguiente.

- a. Es necesario asumir distribuciones de probabilidad iniciales para las constantes a atenuar, que de no tener los datos o conocimientos necesarios para establecerlas se podría incurrir en un error asociado mayor al real.
6. Se determina que en general la desviación estándar del error es más significativa que las desviaciones de las constantes a la hora de construir las curvas de excedencia. Lo anterior implica que, el error del ajuste influye en mayor medida la variabilidad de los resultados esperados de los parámetros en estudio, que los errores asociados a cada una de las constantes atenuadas.

Con respecto a los resultados obtenidos para la curva de atenuación de Intensidad de Arias se enuncian las siguientes conclusiones.

1. Se presenta una curva de atenuación que permite predecir el promedio de las componentes horizontales de la Intensidad de Arias, calculada a partir de registros de sismos chilenos registrados desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Ríos.
2. Se observa que en general las curvas se ajustan bien a los datos utilizados para obtener las curvas, ya que estas pasan aproximadamente por el centro de la nube de datos. Tras realizar el ajuste se obtiene una desviación estándar del error de 1,19 (en escala logarítmica), lo cual a pesar de ser un valor alto se encuentra dentro de lo esperado por la alta dispersión natural que posee la Intensidad de Arias. Las desviaciones estándar obtenidas para las constantes ajustadas son menores al 50% del valor óptimo de estas en seis de nueve de los casos, donde en los tres casos más desfavorables las constantes tienen valores cercanos a 0.
3. La Intensidad de Arias disminuye con el aumento de la distancia a la ruptura y con el aumento de la velocidad de onda de corte. Además, aumenta con el incremento de la magnitud de momento y la profundidad del hipocentro. Por otro lado, se obtiene que para sismos intraplaca de profundidad intermedia la Intensidad de Arias presenta valores más altos que para sismos interplaca tipo thrust.

4. Las curvas obtenidas reflejan correctamente el efecto del tipo de suelo en los valores de Intensidad de Arias, siendo los sitios con roca los que presentan los residuos más bajos.
5. La curva obtenida subestima los datos de sismos intraplaca de profundidad intermedia para magnitudes inferiores a $5,5 M_w$, pero presenta buenos resultados para magnitudes superiores a $5,5 M_w$. Para el caso de los sismos interplaca, los residuos más altos se observan para los eventos con magnitudes entre $5,5$ y $6,5 M_w$.
6. Los residuos no presentan ninguna tendencia en relación a M_w , V_{s30} o R . Por otra parte, los residuos poseen una distribución normal, la cual se respalda con un valor de curtosis de $3,56$ y un valor de asimetría de $0,28$.

Con respecto a los resultados obtenidos para la curva de atenuación de duración significativa se enuncian las siguientes conclusiones.

1. Se presenta una curva de atenuación que permite predecir la duración significativa, calculada como la media geométrica de las componentes horizontales y utilizando un rango de energía liberada, medida como Intensidad de Arias, del 5% hasta el 95%. Se utilizan registros de sismos chilenos registrados desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Ríos.
2. Se observa que en general las curvas se ajustan bien a los datos utilizados para obtener las curvas, ya que estas pasan aproximadamente por el centro de la nube de datos. Tras realizar el ajuste se obtiene una desviación estándar del error de $0,47$ (en escala logarítmica). Las desviaciones estándar obtenidas para las constantes atenuadas son menores al 50% del valor óptimo de estas en cinco de seis casos, donde en el caso más desfavorable la constante tiene un valor cercano a 0.
3. La duración significativa aumenta con el incremento de la magnitud de momento y de la distancia a la ruptura, pero más significativamente con esta última. Además se tiene que la duración significativa es ligeramente mayor para sitios con suelo que con roca. Por otro lado, se obtiene que para sismos intraplaca de profundidad intermedia la duración presenta valores más bajos que para sismos interplaca tipo thrust.
4. Las curvas obtenidas reflejan de buena forma el comportamiento de los sismos interplaca tipo thrust, ningún gráfico muestra una sobre o sub estimación de los datos. Para el caso de los sismos intraplaca de profundidad intermedia la curva sobreestima los datos de duración significativa para registros con distancias a la ruptura entre 100 y 200 [km].
5. Los residuos no presentan ninguna tendencia en relación a M_w , V_{s30} o R . Por otra parte, los residuos poseen una distribución cercana a la normal, esto ya que los residuos están más concentrados en el centro, lo cual se respalda con un valor de curtosis de $4,42$ y un valor de asimetría de $-0,35$.

6. Dada la naturaleza del cálculo de la Intensidad de Arias y de la duración significativa, se espera que los comportamientos ante la variación de las variables que influyen en las curvas de atenuación sea la misma. Lo anterior se cumple para la magnitud de momento y para la velocidad de onda de corte, sin embargo ante la variación de la distancia a la ruptura ambos parámetros presentan comportamientos opuestos.

Con respecto a los resultados obtenidos para la curva de atenuación de duración entre intervalos se enuncian las siguientes conclusiones.

1. Se presenta una curva de atenuación que permite predecir la duración entre intervalos, calculada como la media geométrica de las componentes horizontales y utilizando un límite de 0,05g de aceleración. Se utilizan registros de sismos chilenos registrados desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Ríos.
2. El ajuste se realiza únicamente con aquellos registros con duraciones entre intervalos mayores a cero. Aquellos registros con duraciones nulas se incorporan al modelo mediante el método de clasificación basado en *Support Vector Machine* (SVM).
3. Se observa que en general las curvas se ajustan bien a los datos utilizados para obtener las curvas, ya que estas pasan aproximadamente por el centro de la nube de datos. Tras realizar el ajuste se obtiene una desviación estándar del error de 1,09 (en escala logarítmica), donde cabe destacar que producto de la baja cantidad de registros que se utilizan en el ajuste y de la presencia de registros con duraciones muy cercanas a 0, no se obtiene una distribución normal de los residuos, lo cual justifica esta alta desviación estándar. Las desviaciones estándar obtenidas para las constantes ajustadas son menores al 50% del valor óptimo de estas en cuatro de seis casos, donde en uno de los dos casos más desfavorables la constante tiene un valor cercanos a 0.
4. La duración entre intervalos disminuye con el aumento de la distancia a la ruptura y con el aumento de la velocidad de onda de corte. Además la duración aumenta significativamente con el aumento de la magnitud. Por otra parte, se obtiene que para sismos intraplaca de profundidad intermedia la duración presenta valores más bajos que para sismos interplaca tipo thrust.
5. Para sismos interplaca tipo thrust la curva refleja de buena manera el comportamiento del suelo, sin embargo para sitios con roca subestima las duraciones de los eventos con magnitudes superiores a $7,5 M_w$. Para el caso de los eventos intraplaca de profundidad intermedia se tiene que la curva subestima la duración de sitios con suelo y eventos con magnitudes entre $5,5$ y $6,5 M_w$.
6. Los residuos no presentan ninguna tendencia en relación a la M_w , V_{s30} o R . Por otra parte, los residuos no presentan una distribución normal, lo que se debe principalmente a la subestimación de algunos datos correspondientes en su

mayoría a sismos interplaca, lo cual se respalda con un valor de curtosis de 7,65 y un valor de asimetría de -1,55.

5.2 Recomendaciones

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos y pensando en futuros trabajos que pudieran realizarse a partir de este, se realizan las siguientes recomendaciones.

1. Producto de la alta sismicidad presente en el país, constantemente están ocurriendo nuevos eventos sísmicos, por lo que es importante contar con una base de datos lo más actualizada y completa posible, ya que al utilizar una mayor cantidad de datos se tiene más información y se reduce el error.

Dentro del marco anterior, es importante incluir en el ajuste de la duración entre intervalos más registros con PGA superiores al límite utilizado para contar con más información para el ajuste.

2. El tipo de suelo de las estaciones de registro es una variable presente en las curvas de atenuación utilizadas. Varios autores han hecho clasificaciones de suelo para las estaciones presentes en el país, pero es importante verificar la credibilidad de los estudios realizados por dichos autores para estar seguros de contar con la clasificación correcta.
3. La mayoría de los métodos de ajuste utilizados por otros autores permite obtener errores inter-evento e intra-evento, junto con los residuos correspondientes a cada caso, sin embargo eso no pudo realizarse en el presente estudio, perdiendo la oportunidad de realizar análisis respecto a estos resultados. Se recomienda para futuros trabajos investigar más sobre estos errores para así poder incorporarlos al método de ajuste utilizado en el presente estudio.
4. Para realizar los ajustes se utilizaron eventos de magnitudes $4,5 M_w$ hasta $8,8 M_w$, sin embargo se recomienda para futuros estudios realizar ajustes de forma independiente para sismos de magnitudes superiores y aquellos de baja magnitud, esto debido a que estos últimos pueden interferir en los ajustes de eventos de mayor importancia provocando una subestimación de los parámetros asociados a estos.
5. Evaluar si son relevantes y/o necesarias en el funcional aquellas constantes cuyo valor óptimo es cercano a 0.
6. Con respecto a la clasificación de duraciones entre intervalos por medio del método de clasificación basado en *Support Vector Machine* se recomienda, en caso de tener una cantidad de datos suficiente, realizar la clasificación separando según fuente sismogénica y tipo de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arango, M., Strasser, F., Bommer, Julian., Boroschek, R., Comte, D. & Tavera, H. (2010). A strong-motion database from the Peru-Chile subduction zone. *Journal of Seismology, Springer Verlag*, 15(1), pp.19-41.
- [2] Arias, A. (1970). A Measure of Earthquake Intensity, R.J. Hansen, ed. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.
- [3] Arroyo, D., & Ordaz, M. (2010). Multivariate Bayesian regression analysis applied to ground-motion prediction equations, part 1: theory and synthetic example. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1551-1567.
- [4] Bastias, N., & Montalva, G. (2015). Chile Strong Ground Motion Flatfile. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES). DOI: 10.17603/DS2N30J.
- [5] Bolt, B. A. (1973, June). Duration of strong ground motion. In *Proceedings, 5 th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1304-1313).
- [6] Bommer, J. J., Stafford, P. J., & Alarcón, J. E. (2009). Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3217-3233.
- [7] Centro Sismológico Nacional (CSN), Catálogo On-line, Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, link: <http://www.sismologia.cl/>.
- [8] Centro Sismológico Nacional (CSN), Sismicidad y Terremotos en Chile, link: http://www.sismologia.cl/pdf/difusion/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf.
- [9] Chile. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2011. Decreto Supremo N°61.
- [10] Contreras, V., & Boroschek, R. (2009). Curvas de Atenuación Espectrales para Sismos Chilenos. *Memoria para optar al título de ingeniero civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [11] Fernández, J. & Pastén, C. (2017). Estudio de efectos de sitio en la región de Coquimbo evidenciados durante el terremoto de illapel 2015. *Memoria para optar al título de ingeniero civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [12] Foulser-Piggott, R., & Goda, K. (2015). Ground-Motion Prediction Models for Arias Intensity and Cumulative Absolute Velocity for Japanese Earthquakes Considering Single-Station Sigma and Within-Event Spatial Correlation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 1903-1918.
- [13] Fuchige, Fundación chilena de geotecnia, <http://www.fuchige.cl/>.

- [14] Fukushima, Y., & Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 757-783.
- [15] Gómez-Bernal, A., Lecea, M. A., & Juárez-García, H. (2012). Empirical attenuation relationship for Arias Intensity in Mexico and their relation with the damage potential. In *Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*.
- [16] Harvard Centroid Moment Tensor (CMT) Project, Global Centroid Moment Tensor Catalog Search, link: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- [17] Hernandez, B., & Cotton, F. (2000). Empirical determination of the ground shaking duration due to an earthquake using strong motion accelerograms for engineering applications. In *Proceedings of twelfth world conference on earthquake engineering, paper* (No. 2254/4).
- [18] Hwang, H., Lin, C. K., Yeh, Y. T., Cheng, S. N., & Chen, K. C. (2004). Attenuation relations of Arias intensity based on the Chi-Chi Taiwan earthquake data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(7), 509-517.
- [19] Idini, B., & Rojas, F. (2016). Curvas de atenuación para terremotos intraplaca e interplaca en la zona de subducción chilena. *Tesis para optar al grado de magister en ingeniería, mención ingeniería sísmica*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [20] Instituto Nacional de Prevención Sísmica (SJA), link: <http://www.isc.ac.uk>.
- [21] Jaynes, E. T. (2003). Probability theory: The logic of science. *Cambridge university press*.
- [22] Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), 469-487.
- [23] Kempton, J. J., & Stewart, J. P. (2006). Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects. *Earthquake spectra*, 22(4), 985-1013.
- [24] Lee, C. T., Hsieh, B. S., Sung, C. H., & Lin, P. S. (2012). Regional Arias intensity attenuation relationship for Taiwan considering V_{s30} . *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 129-142.
- [25] Lee, J., & Green, R. A. (2012). An empirical bracketed duration relation for stable continental regions of North America. *Earthquake and Structures*, 3(1), 1-15.
- [26] Leyton, F., Pastén, C., Montalva, G., Hurtado, G., Leopold, A., Ruiz, S. & Saez, E. (2017). Towards a geophysical characterization of the Chilean strong-motion stations. *16th World Conference on Earthquake Engineering*, paper (No. 4943).

- [27] López, I., & Boroschek, R. (2016). Estudio de la generación de espectros medios condicionales utilizando la base de datos de sismos con magnitud de momento igual o superior a 6.5 en Chile. *Memoria para optar al título de ingeniero civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [28] Ordenes, J., & Boroschek, R. (2017). Actualización de la base de datos para la generación de curvas de predicción de movimiento para sismos chilenos. *Memoria para optar al título de ingeniera civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [29] Platt, J. (2000). Probabilistic outputs for support vector machines and comparisons to regularized likelihood methods. *Advances in large margin classifiers*, 10(3), 61-74.
- [30] Rajabi, A. M., Khamsehchiyan, M., MahdaviFar, M. R., & Del Gaudio, V. (2010). Attenuation relation of Arias intensity for Zagros Mountains region (Iran). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(3), 110-118.
- [31] Registro de Eventos Significativos (EVTDV), Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, link: <http://evtdb.csn.uchile.cl/>.
- [32] Ruz & Vukasovic. Mediciones en terreno de diferentes localidades, link: <http://www.fuchige.cl/>.
- [33] Strong-Motion Virtual Data Center (VDC), Global Component of the Center for Engineering Strong Motion Data, link: <http://www.strongmotioncenter.org/vdc/scripts/event.plx?evt=151>.
- [34] Terremotos de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, link: <http://terremotos.ing.uchile.cl/>.
- [35] Travararou, T., Bray, J. D., & Abrahamson, N. A. (2003). Empirical attenuation relationship for Arias intensity. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(7), 1133-1155.
- [36] Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.
- [37] Unites States Geological Survey (USGS), Search Earthquake Catalog, link: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- [38] Vilches, D., & Boroschek, R. (2016). Características de espectros de respuesta con distintas rotaciones de ejes y representaciones. *Memoria para optar al título de ingeniera civil*. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ANEXO A: INFORMACIÓN DE EVENTOS, ESTACIONES Y REGISTROS

A.1 Caracterización de eventos

A continuación se muestra la distribución de los eventos a lo largo del país, haciendo la diferenciación según diferentes características, como la magnitud de momento y la profundidad del hipocentro.

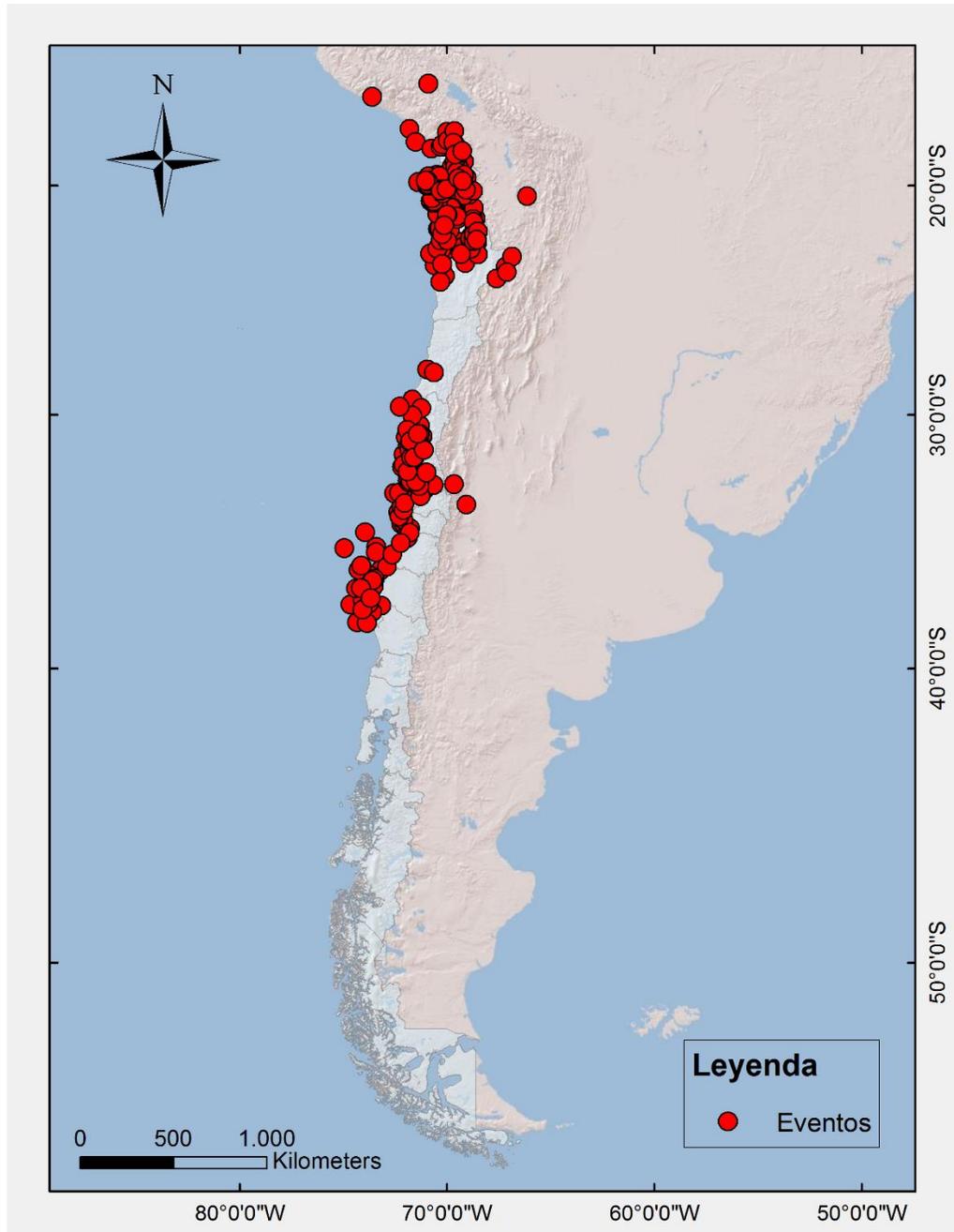


Figura A.1: Distribución de los eventos en Chile.

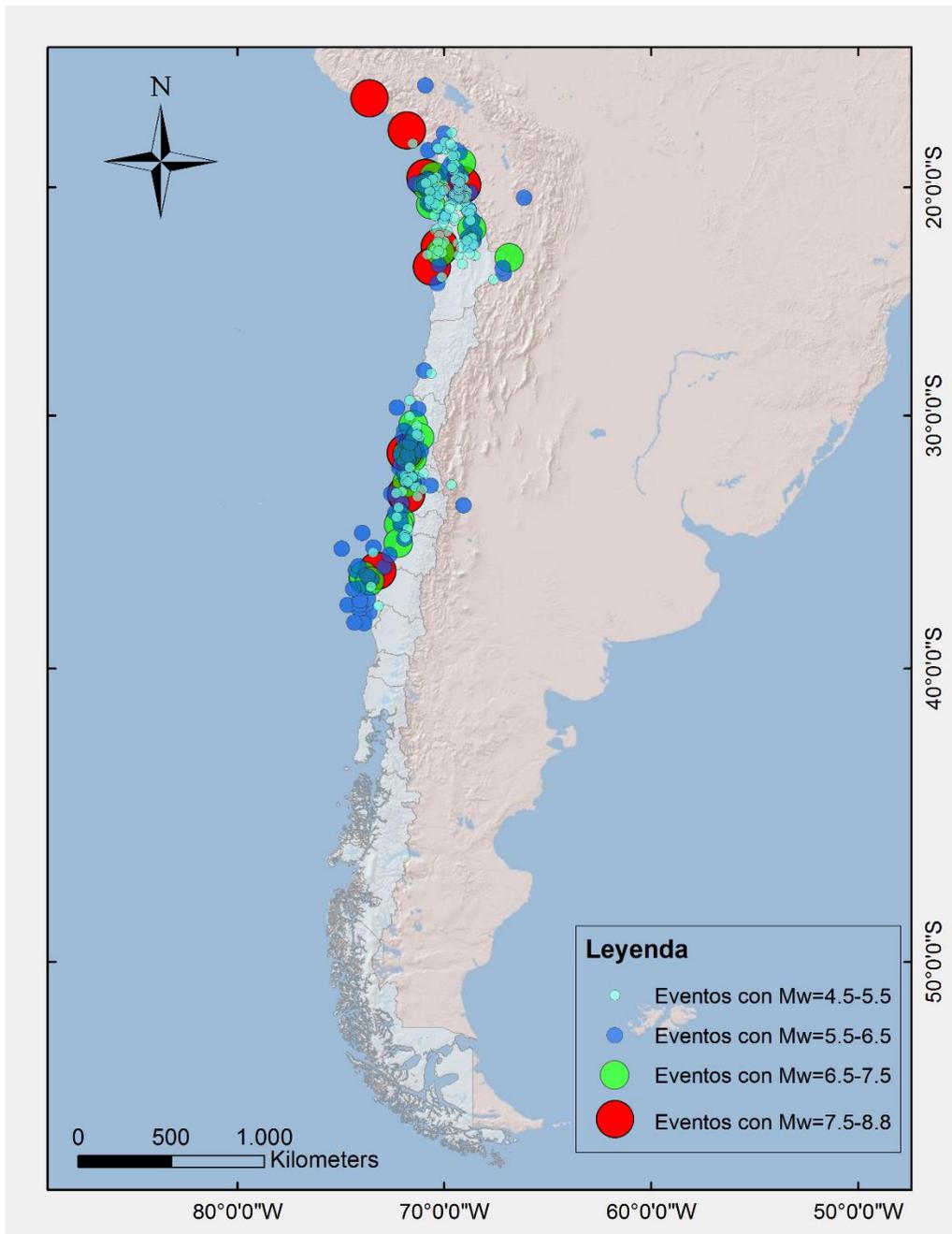


Figura A.2: Distribución de eventos según magnitud.

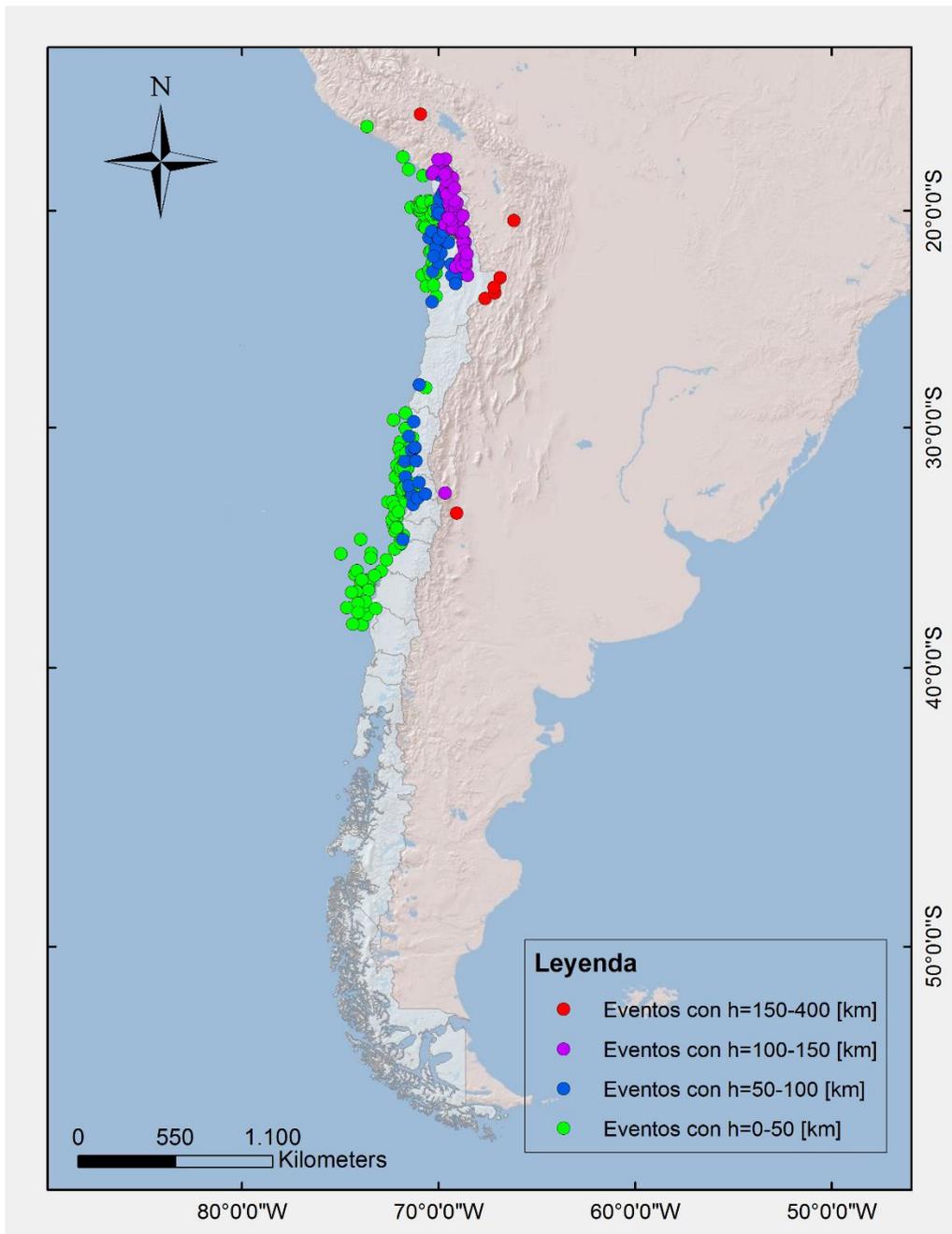


Figura A.3: Distribución de eventos según profundidad.

A.2 Caracterización de estaciones

A continuación se muestra la distribución de las estaciones a lo largo del país, haciendo la diferenciación según tipo de suelo.

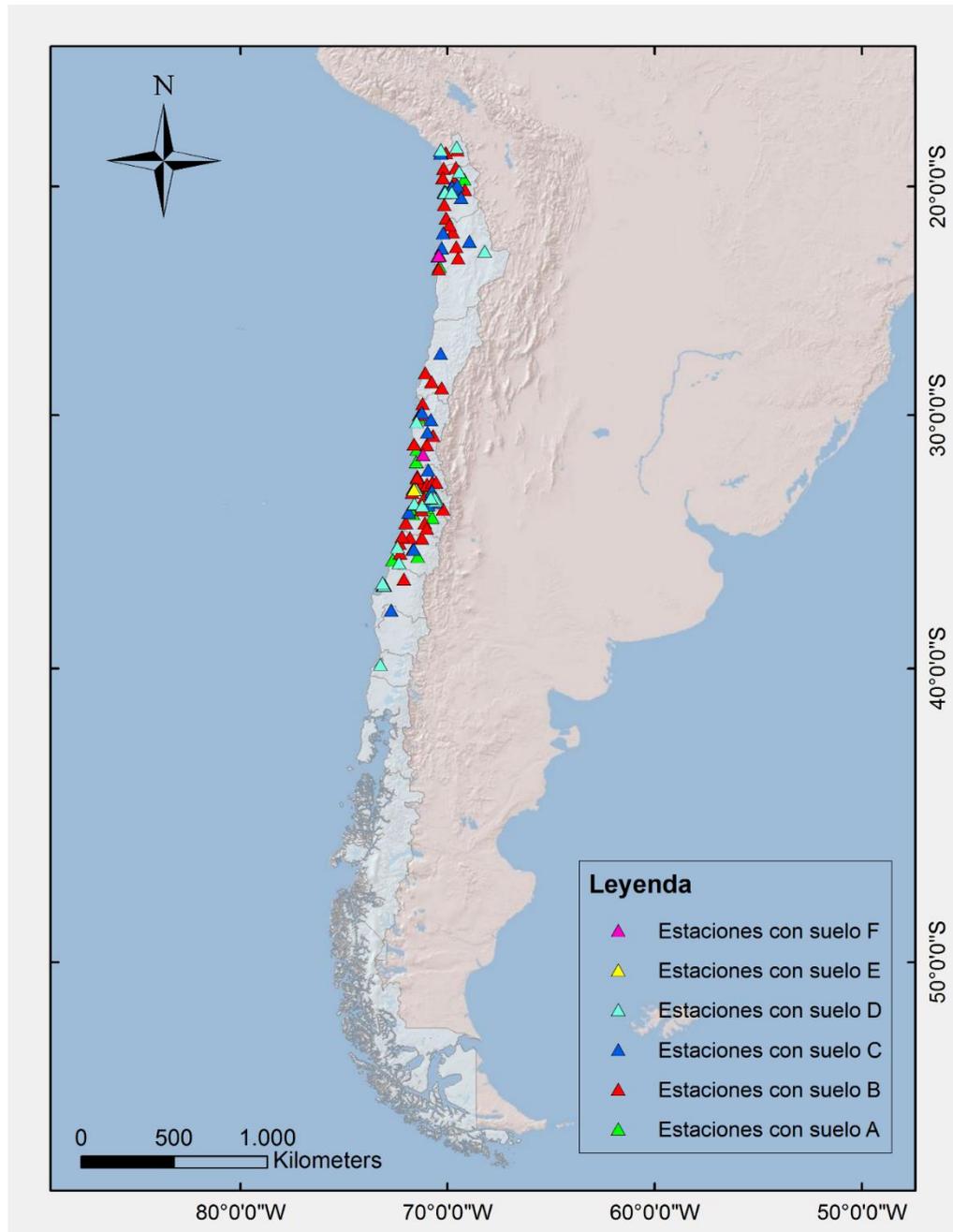


Figura A.4: Distribución de las estaciones según tipo de suelo.

A.3 Caracterización general de los datos

A continuación se muestran gráficos con los datos utilizados y que no fueron mostrados en la sección 3.4, con el fin de tener una mejor noción de la información disponible.

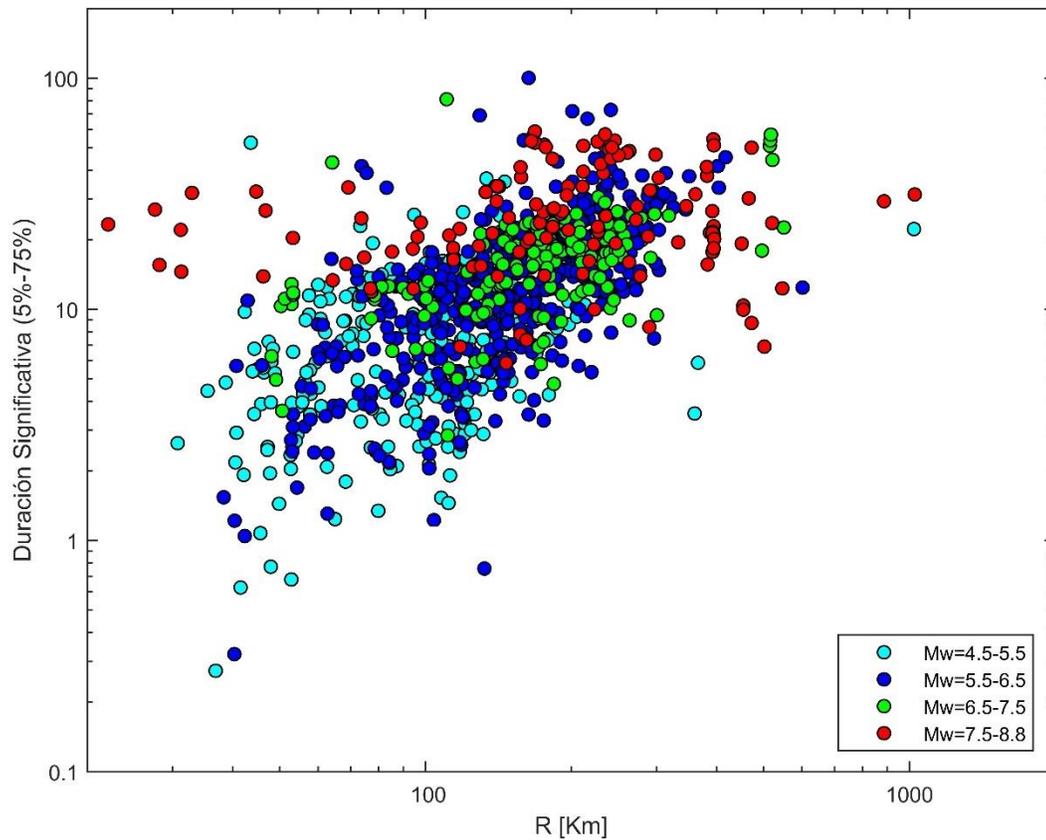


Figura A.5: Duración significativa (5%-75%) vs distancia a la ruptura.

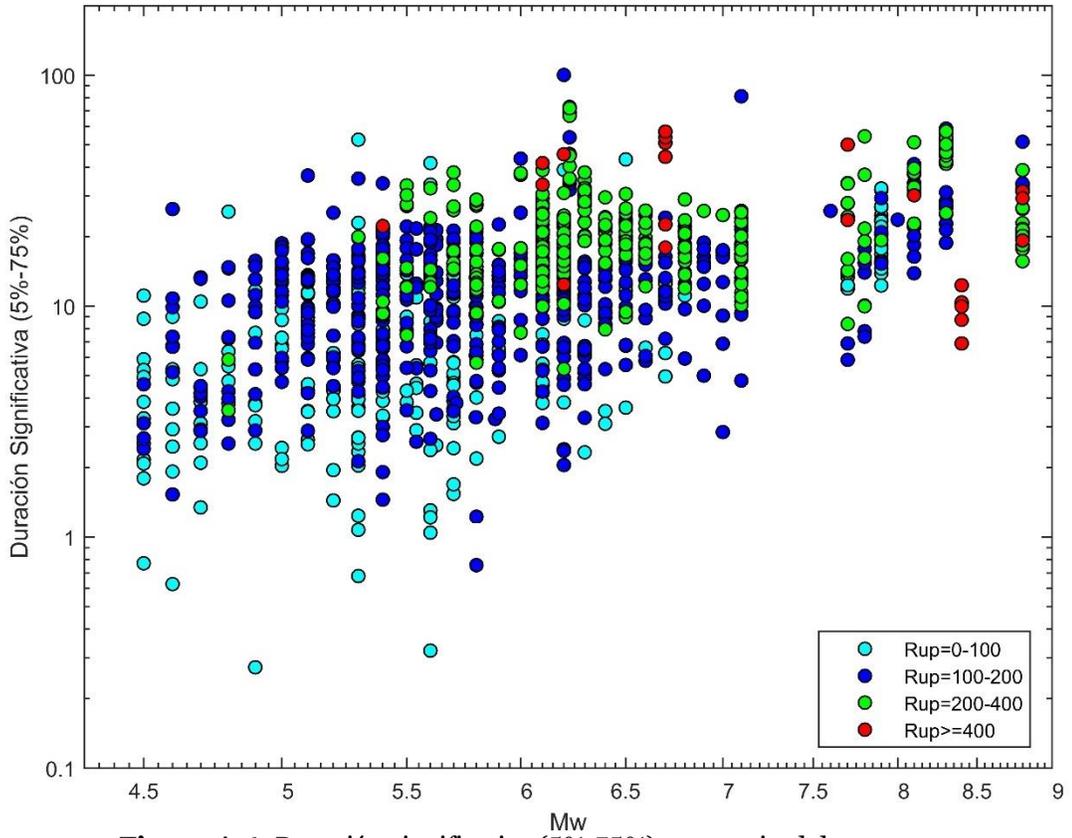


Figura A.6: Duración significativa (5%-75%) vs magnitud de momento.

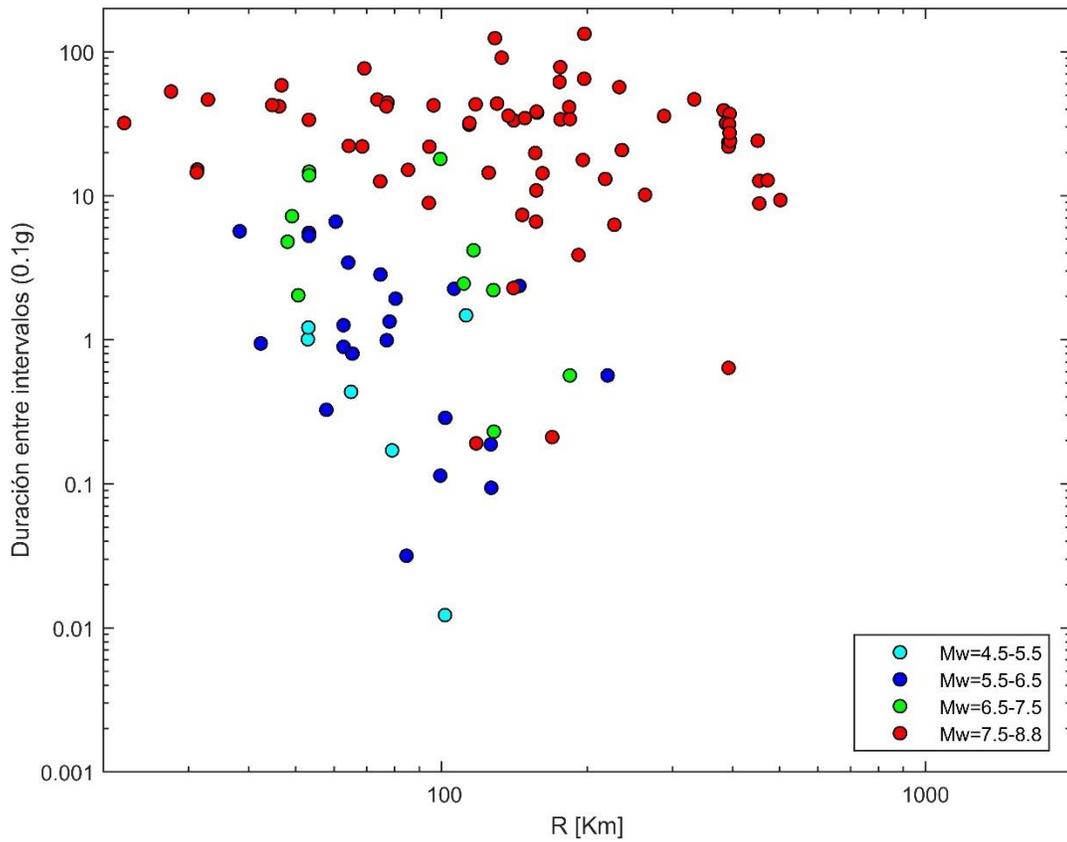


Figura A.7: Duración entre intervalos (0,1g) vs distancia a la ruptura.

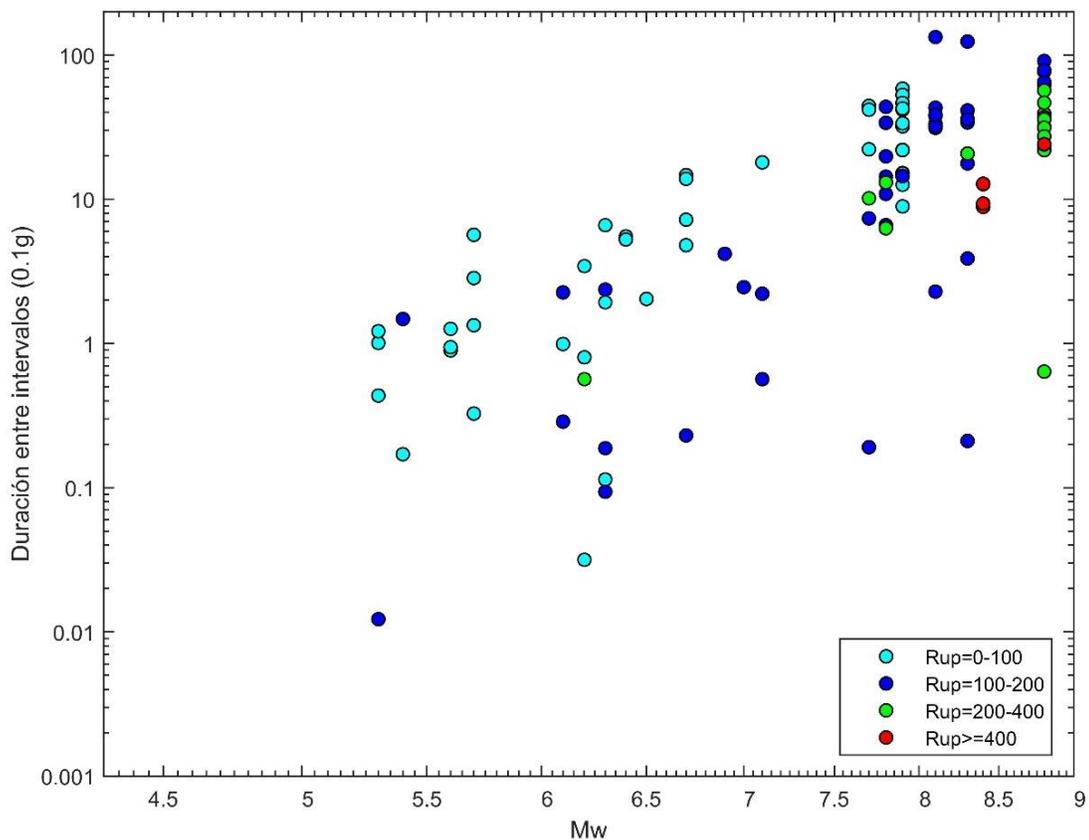


Figura A.8: Duración entre intervalos (0,1g) vs magnitud de momento.

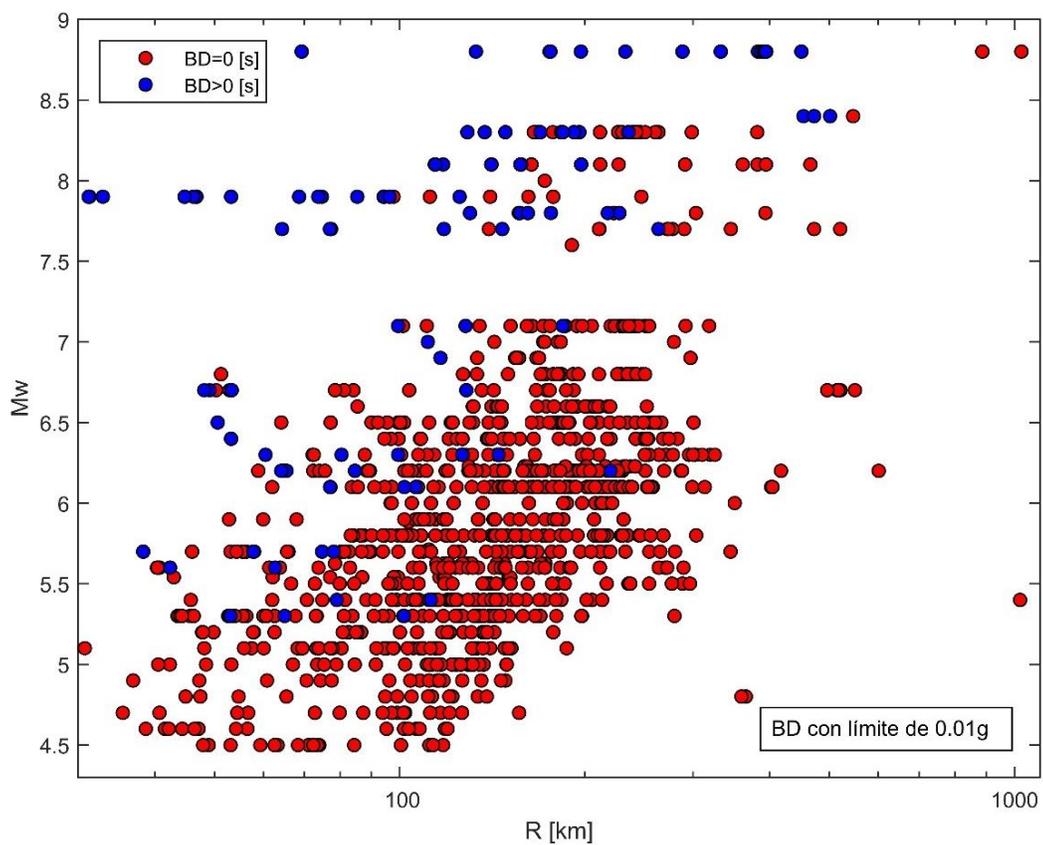


Figura A.9: Magnitud de momento vs distancia a la ruptura para datos de duración entre intervalos (0,1g) separado según si es duración nula o mayor a cero.

ANEXO B: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LOS MODELOS DE ATENUACIÓN UTILIZADOS

En la Tabla B.1, Tabla B.2 y Tabla B.3 se resume la forma que se utilizó originalmente para obtener los modelos de atenuación descritos en la sección 2.4. Se muestra tanto el método de regresión utilizado como los rangos de datos utilizados para cada uno.

Tabla B.1: Resumen características modelos originales de atenuación de Intensidad de Arias.

Paper	Año	Método de regresión	Cálculo de IA	Zona	M_w	R [km]	V_{s30} [m/s]	H [km]	Nº Registros	Nº Sismos	Aplicabilidad en Suelos
Travasarou <i>et al.</i>	2002	Regresión no lineal de efectos aleatorios	Promedio componentes horizontales	Regiones activas de bordes de placas	4,7 - 7,6	0,1 - 250	-	-	1208	75	Suelos tipo B, C y D según clasificación Bray & Rodriguez-Marek (1997)
Hwang <i>et al.</i>	2004	Regresión de dos pasos (Joyner y Boore, 1993)	Suma componentes horizontales	Corticales (Chi-Chi y réplicas, Taiwán)	6,5 - 7,7	-	-	-	1426	4	Suelos tipo B, C, D y E según clasificación Lee <i>et al.</i> (2001)
Rajabi <i>et al.</i>	2010	Regresión de mínimos cuadrados	Máximo componentes horizontales	Subducción (Región de Montañas Zagros, Irán)	5 - 7	5 - 150	-	-	37	35	Sitios clasificados según Vs en 4 categorías
Gómez-Bernal <i>et al.</i>	2012	Regresión de dos pasos	Máximo componentes horizontales	Interplaca, intraplaca y corticales (México)	> 6	20 - 600	-	-	-	17	Suelo tipo B (roca) y C (suelo firme)
Lee <i>et al.</i>	2012	MLE y Modelos de efectos mixtos	Promedio componentes horizontales	Corticales (Taiwán)	3,9 - 7,6	0,3 - 205	130 - 1333	-	6570	62	-
Foulser-Piggot & Goda	2015	Regresión no lineal de efectos aleatorios	Promedio componentes horizontales	Interplaca, intraplaca y corticales (Japón)	> 5	< 300	150 - 1500	< 150	48756	203	-

Tabla B.2: Resumen características modelos originales de atenuación de duración significativa.

Paper	Año	Método de regresión	Cálculo de duración	Zona	M_w	R [km]	H [km]	Nº Registros	Nº Sismos
Hernández & Cotton	2000	Regresión de mínimos cuadrados	Duración significativa (5%-95%)	California e Italia	≤ 6	1 - 109	≤ 30	272	-
Kempton & Stewart	2006	Regresión de efectos aleatorios	Duración significativa (5%-75%; 5%-95%)	Corticales (California, Japón, Turquía y Taiwán)	5 - 7,6	0 - 200	-	1559	73

Tabla B.3: Resumen características modelos originales de atenuación de duración entre intervalos.

Paper	Año	Método de regresión	Cálculo de duración	Zona ^a	M_w	R [km]	V_{s30} [m/s]	Nº Registros	Nº Sismos	Aplicabilidad en Suelos
Bommer <i>et al.</i>	2009	Script en <i>Matlab</i>	Duración entre intervalos (0.025g; 0.05g; 0.1g)	Corticales	4,8 - 7,9	≤ 100	100 - 2000	2406	114	-
Lee & Green	2012	Regresión no lineal de efectos aleatorios y regresión logística	Duración entre intervalos (0.05g)	<i>Stable Continental</i> ⁽¹⁾ (Centro y este de Norte América (CENA))	4,5 - 7,6	0,1 - 199,1	-	620	-	Roca y suelo (según la clasificación McGuire <i>et al.</i> 2001, donde A y B es roca, y C, D y E se consideran suelo)

^a Zona. (1) *Stable Continental*: zonas de corteza continental que no presentan mayor actividad sísmica.

ANEXO C: DEMOSTRACIONES

C.1 Demostración N°1

A continuación se realiza la demostración que permite pasar de la ecuación (4.26) a la ecuación (4.27) en la sección 4.2.

En primer lugar se define L como en la ecuación (C.1),

$$L = \ln(p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})) \quad (\text{C.1})$$

la cual es equivalente a la ecuación (C.2),

$$L = \ln\left(\left(\frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}}\right)^M \exp\left(\frac{-M}{2\sigma_e^2} J(\boldsymbol{\theta})\right)\right) + \ln(p(\boldsymbol{\theta})) \quad (\text{C.2})$$

donde $J(\boldsymbol{\theta})$ se define como en la expresión (C.3).

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i)]^2 \quad (\text{C.3})$$

Al simplificar la ecuación (C.2) se obtiene la expresión (C.4).

$$L = -M \cdot \ln(\sigma_e\sqrt{2\pi}) - \frac{M}{2\sigma_e^2} J(\boldsymbol{\theta}) + \ln(p(\boldsymbol{\theta})) \quad (\text{C.4})$$

Luego, al derivar la ecuación (C.4) con respecto a la desviación del error e igualar a 0, se obtiene la expresión (C.5).

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_e} = 0 \Rightarrow \frac{-M \cdot \sqrt{2\pi}}{\sigma_e\sqrt{2\pi}} + \frac{M \cdot J(\boldsymbol{\theta}) \cdot 2}{2\sigma_e^3} = 0 \quad (\text{C.5})$$

Al simplificar la expresión (C.5) se obtiene la ecuación (C.6),

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_e} = 0 \Rightarrow -1 + \frac{J(\boldsymbol{\theta})}{\sigma_e^2} = 0 \quad (\text{C.6})$$

La cual permite finalmente es posible demostrar lo que se muestra en la ecuación (C.7).

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_e} = 0 \Rightarrow \sigma_e^2 = J(\boldsymbol{\theta}) \quad (\text{C.7})$$

C.2 Demostración N°2

A continuación se realiza la demostración del procedimiento que permite obtener la ecuación (4.28) en la sección 4.2.

En primer lugar se tiene la ecuación (C.8) obtenida en la sección 4.2,

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max - \left(\ln \left(\left(\frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \right)^M \exp \left(-\frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - h(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{u}}_i)]^2 \right) p(\boldsymbol{\theta}) \right) \right) \quad (\text{C.8})$$

donde al reemplazar σ_e con lo obtenido en la ecuación (C.7) y (C.3) se obtiene la expresión (C.9).

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max - \left(\ln \left(\left(\frac{1}{\sqrt{J(\boldsymbol{\theta})} 2\pi} \right)^M \exp \left(-\frac{M}{2} \right) p(\boldsymbol{\theta}) \right) \right) \quad (\text{C.9})$$

Finalmente, al simplificar la ecuación (C.9) se obtiene la expresión deseada (C.10).

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \max - \left(-\frac{M}{2} \ln(J(\boldsymbol{\theta}) \cdot 2\pi) - \frac{M}{2} + \ln(p(\boldsymbol{\theta})) \right) \quad (\text{C.10})$$

ANEXO D: RESULTADOS

D.1 Resultados para modelos de atenuación de Intensidad de Arias

En la Tabla D.1 se muestran los resultados de las constantes obtenidas del ajuste de los 8 modelos estudiados. Por otro lado, desde la Figura D.1 hasta la Figura D.14 se muestran los resultados de las curvas y residuos de los 8 modelos estudiados, sin embargo no se muestran los resultados obtenidos para los modelos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 cuyos ajustes se hicieron solo con un tipo de suelo, esto para no saturar con información.

Tabla D.1: Resultados constantes modelos de atenuación de Intensidad de Arias.

Funcional	Notas	Constantes								
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Modelo 1	Todos los registros	2,14	-2,23	-6,48	40,37	-0,13	0,52	-	-	-
	Estaciones con suelo	2,18	-2,30	-6,32	42,60	-0,12	0,51	-	-	-
	Estaciones con roca	1,78	-3,81	3,48	109,54	0,13	0,27	-	-	-
	Estaciones con suelo B	1,99	-3,14	-0,46	96,41	0,02	0,37	-	-	-
	Estaciones con suelo C	2,19	-2,59	-4,71	68,00	0,00	0,40	-	-	-
	Estaciones con suelo D	2,28	-2,10	-7,98	27,01	0,03	0,37	-	-	-
	Estaciones con suelo E	2,09	-2,03	-8,42	20,44	0,15	0,25	-	-	-
Modelo 2	Todos los registros	2,04	-2,04	-6,67	-0,24	0,61	-	-	-	-
	Estaciones con suelo	2,07	-2,08	-6,66	-0,23	0,61	-	-	-	-
	Estaciones con roca	1,57	-1,60	-6,98	0,13	0,27	-	-	-	-
	Estaciones con suelo B	1,88	-1,98	-6,09	-0,04	0,43	-	-	-	-
	Estaciones con suelo C	2,00	-2,51	-3,99	-0,16	0,48	-	-	-	-
	Estaciones con suelo D	2,19	-2,00	-7,82	0,00	0,40	-	-	-	-
	Estaciones con suelo E	2,01	-2,06	-7,67	0,15	0,25	-	-	-	-
Modelo 3	Todos los registros	-6,09	2,13	-2,33	0,0008	40,04	-0,13	0,53	-	-
	Estaciones con suelo	-6,30	2,17	-2,32	0,0006	39,25	-0,12	0,51	-	-
	Estaciones con roca	-14,17	1,76	0,13	-0,017	47,27	0,14	0,26	-	-
	Estaciones con suelo B	-3,79	1,99	-2,62	0,001	54,67	0,00	0,39	-	-
	Estaciones con suelo C	-7,73	2,18	-1,99	-0,001	38,50	-0,01	0,41	-	-
	Estaciones con suelo D	-4,65	2,29	-2,83	0,002	52,84	0,03	0,37	-	-
	Estaciones con suelo E	-4,47	2,12	-2,84	0,001	60,89	0,15	0,25	-	-
Modelo 4	Todos los registros	-7,03	2,04	-1,97	-0,0001	-0,22	0,62	-	-	-
	Estaciones con suelo	-7,05	2,08	-2,00	0,000	-0,21	0,61	-	-	-
	Estaciones con roca	-13,74	1,61	0,13	-0,013	0,13	0,27	-	-	-
	Estaciones con suelo B	-4,94	1,87	-2,24	0,001	-0,04	0,43	-	-	-
	Estaciones con suelo C	-8,97	2,03	-1,51	-0,002	-0,07	0,46	-	-	-
	Estaciones con suelo D	-6,24	2,16	-2,35	0,002	0,00	0,40	-	-	-
	Estaciones con suelo E	-5,41	1,95	-2,46	0,001	0,15	0,25	-	-	-

		Constantes								
Funcional	Notas	c₁	c₂	c₃	c₄	c₅	c₆	c₇	c₈	c₉
Modelo 5	Todos los registros	2,13	0,01	-0,06	-0,05	-12,70	3,70	-	-	-
	Estaciones con suelo	2,15	0,01	0,18	0,22	-12,98	4,48	-	-	-
	Estaciones con roca	2,01	0,02	0,20	0,20	-13,40	28,02	-	-	-
	Estaciones con suelo B	2,08	0,01	0,18	0,22	-12,55	12,11	-	-	-
	Estaciones con suelo C	2,13	0,01	0,21	0,19	-12,87	10,20	-	-	-
	Estaciones con suelo D	2,32	0,01	0,19	0,21	-13,89	12,05	-	-	-
	Estaciones con suelo E	2,36	0,01	0,16	0,24	-15,29	38,35	-	-	-
Modelo 6	Todos los registros	2,06	0,00	0,00	0,63	-11,99	-	-	-	-
	Estaciones con suelo	2,11	0,01	0,17	0,23	-12,66	-	-	-	-
	Estaciones con roca	1,99	0,02	0,19	0,21	-13,25	-	-	-	-
	Estaciones con suelo B	2,04	0,01	0,17	0,23	-12,24	-	-	-	-
	Estaciones con suelo C	2,08	0,01	0,20	0,20	-12,53	-	-	-	-
	Estaciones con suelo D	2,28	0,01	0,18	0,22	-13,64	-	-	-	-
	Estaciones con suelo E	2,34	0,01	0,16	0,24	-15,17	-	-	-	-
Modelo 7	$M_{wr}=4,5$	3,74	4,67	-15,89	-2,28	-0,62	-0,39	0,39	47,56	-
	$M_{wr}=5$	4,37	4,66	-15,84	-2,28	-0,62	-0,39	0,39	47,23	-
	$M_{wr}=6$	6,09	4,65	-15,79	-2,27	-0,62	-0,39	0,39	46,70	-
	$M_{wr}=7$	8,27	4,65	-15,79	-2,26	-0,62	-0,39	0,39	46,37	-
Modelo 8	$M_{wr}=4,5$	2,48	2,32	-2,31	-0,01	37,68	0,01	0,14	0,32	-0,65
	$M_{wr}=5$	3,56	2,33	-2,29	-0,01	37,02	0,01	0,14	0,32	-0,65
	$M_{wr}=6$	5,82	2,33	-2,27	-0,01	36,41	0,01	0,14	0,32	-0,65
	$M_{wr}=7$	8,12	2,34	-2,26	-0,01	36,13	0,01	0,14	0,32	-0,65

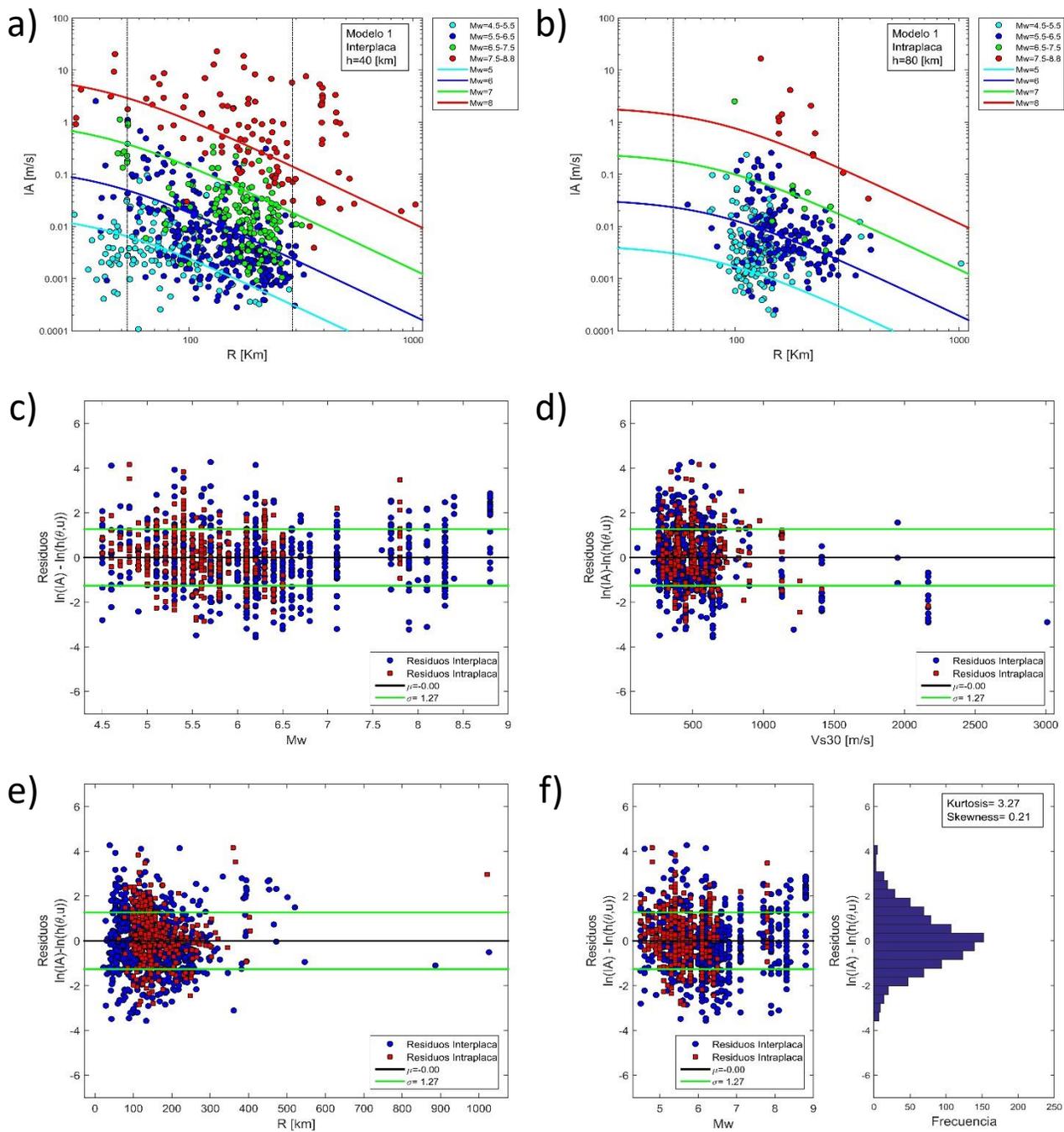


Figura D.1: Resultados curva de atenuación modelo 1 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación sismos interplaca con $h=40$ [km] y datos sismos interplaca. b) Curva de atenuación sismos intraplaca con $h=80$ [km] y datos sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

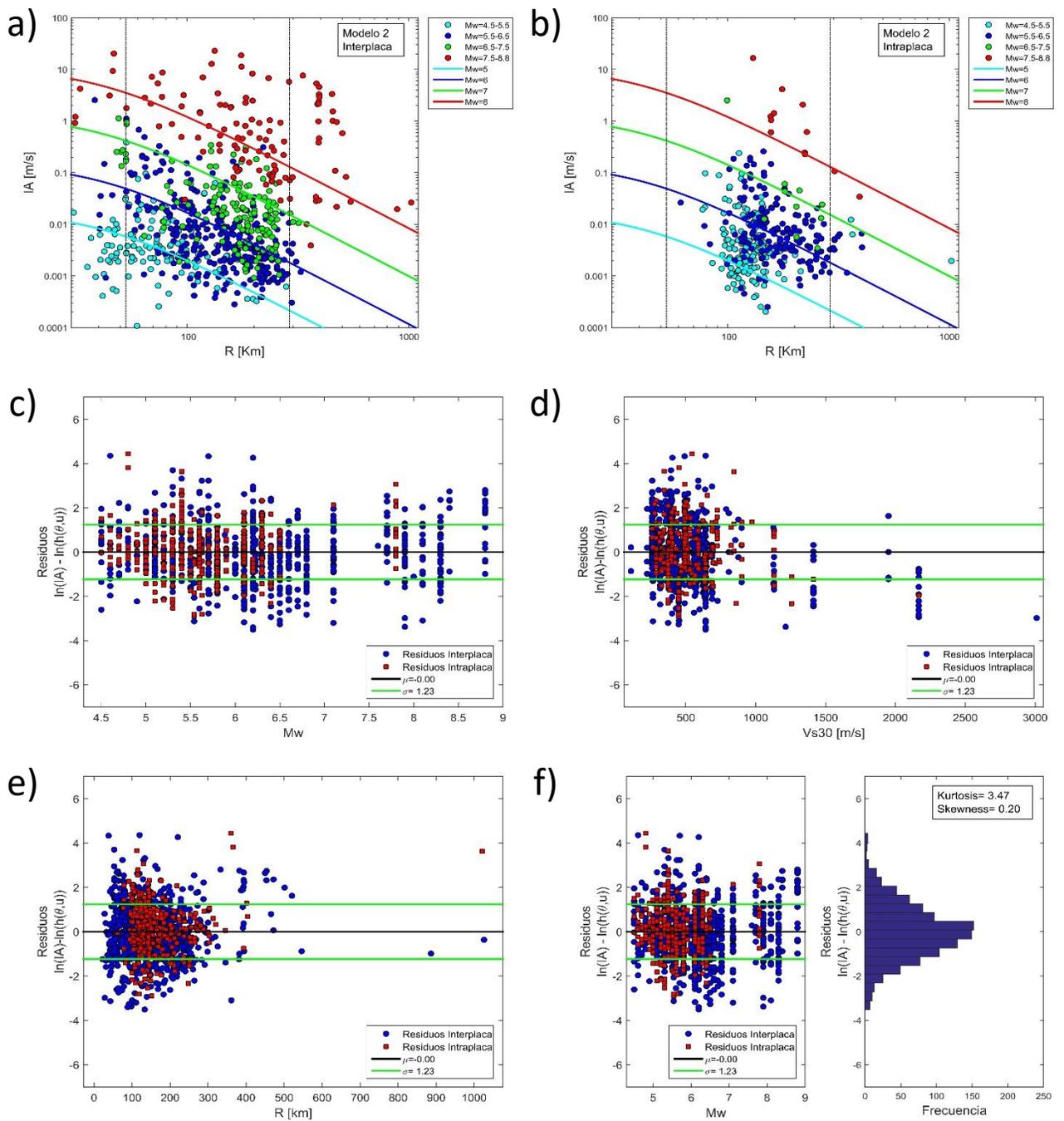


Figura D.2: Resultados curva de atenuación modelo 2 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación y datos de sismos interplaca. b) Curva de atenuación y datos de sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

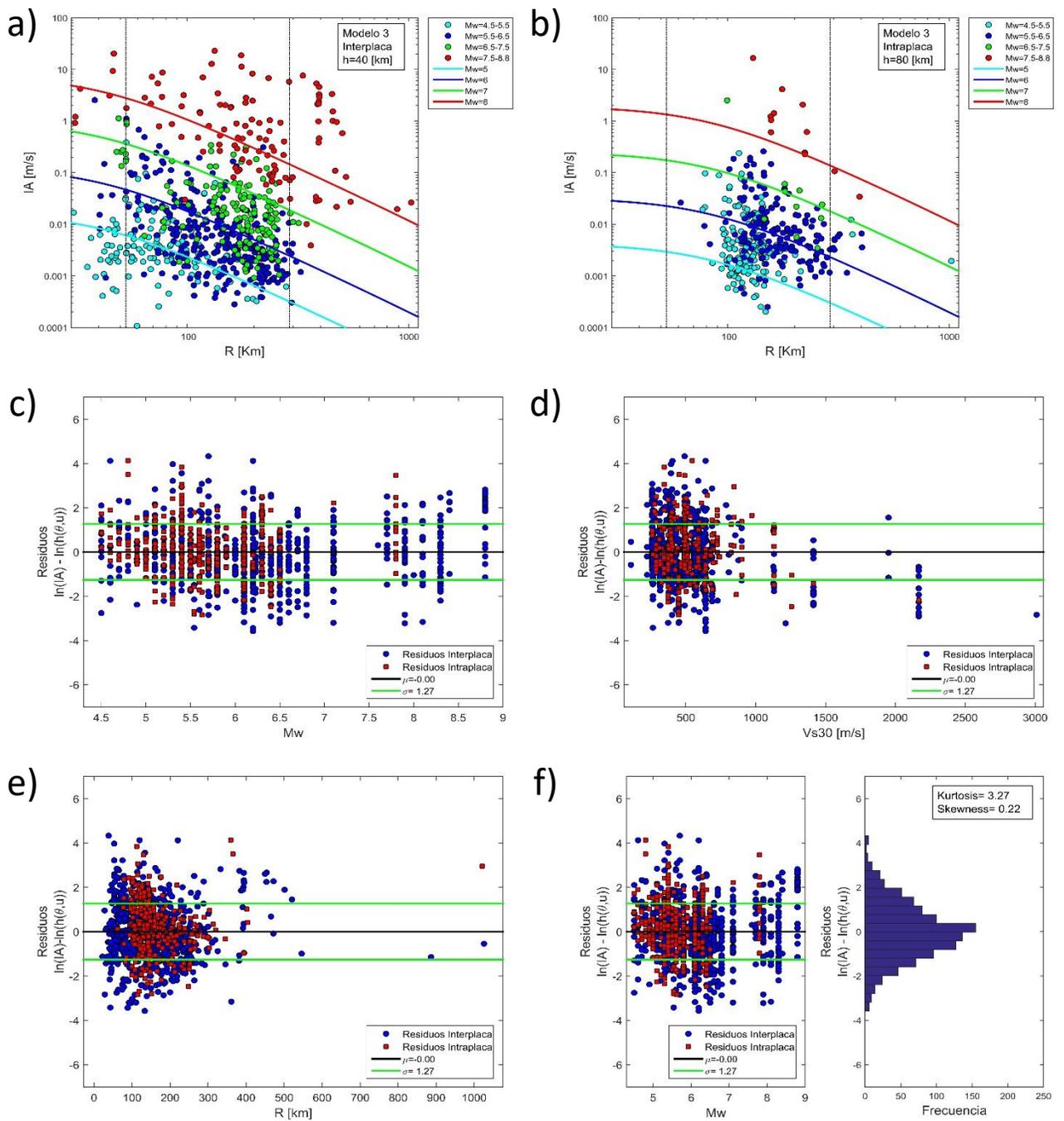


Figura D.3: Resultados curva de atenuación modelo 3 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación sismos interplaca con $h=40$ [km] y datos sismos interplaca. b) Curva de atenuación sismos intraplaca con $h=80$ [km] y datos sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

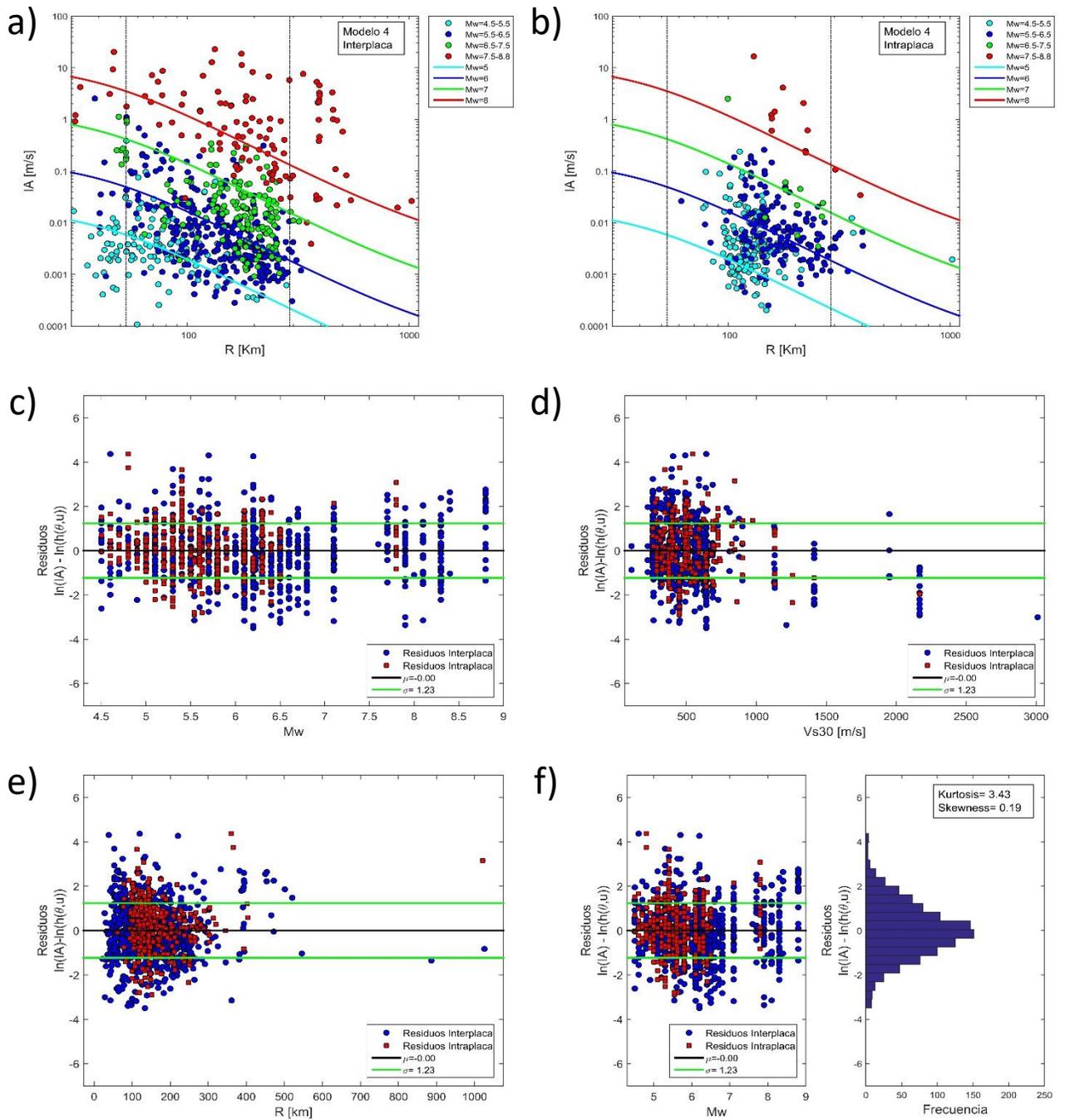


Figura D.4: Resultados curva de atenuación modelo 4 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación y datos de sismos interplaca. b) Curva de atenuación y datos de sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

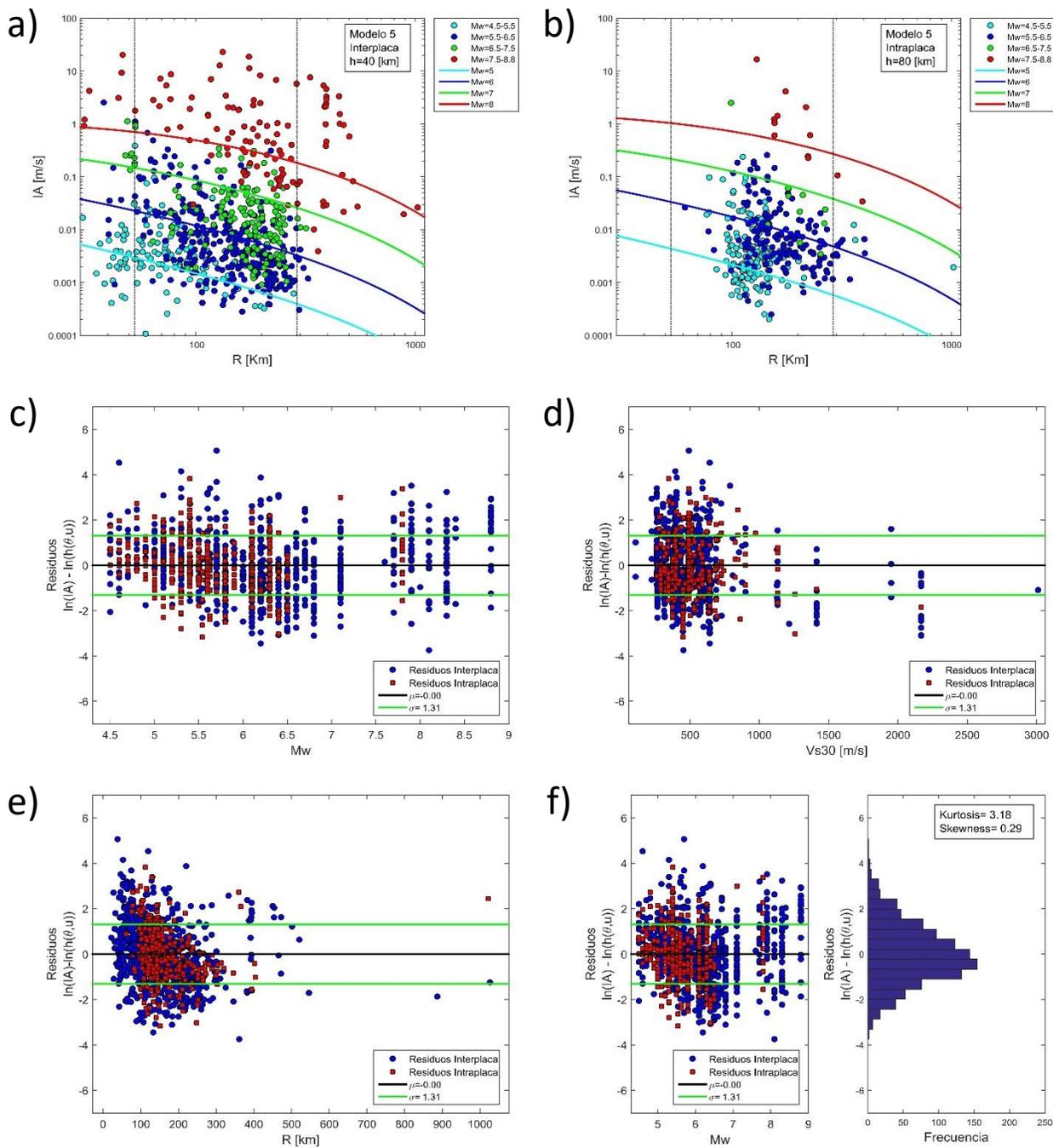


Figura D.5: Resultados curva de atenuación modelo 5 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación sismos interplaca con $h=40$ [km] y datos sismos interplaca. b) Curva de atenuación sismos intraplaca con $h=80$ [km] y datos sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

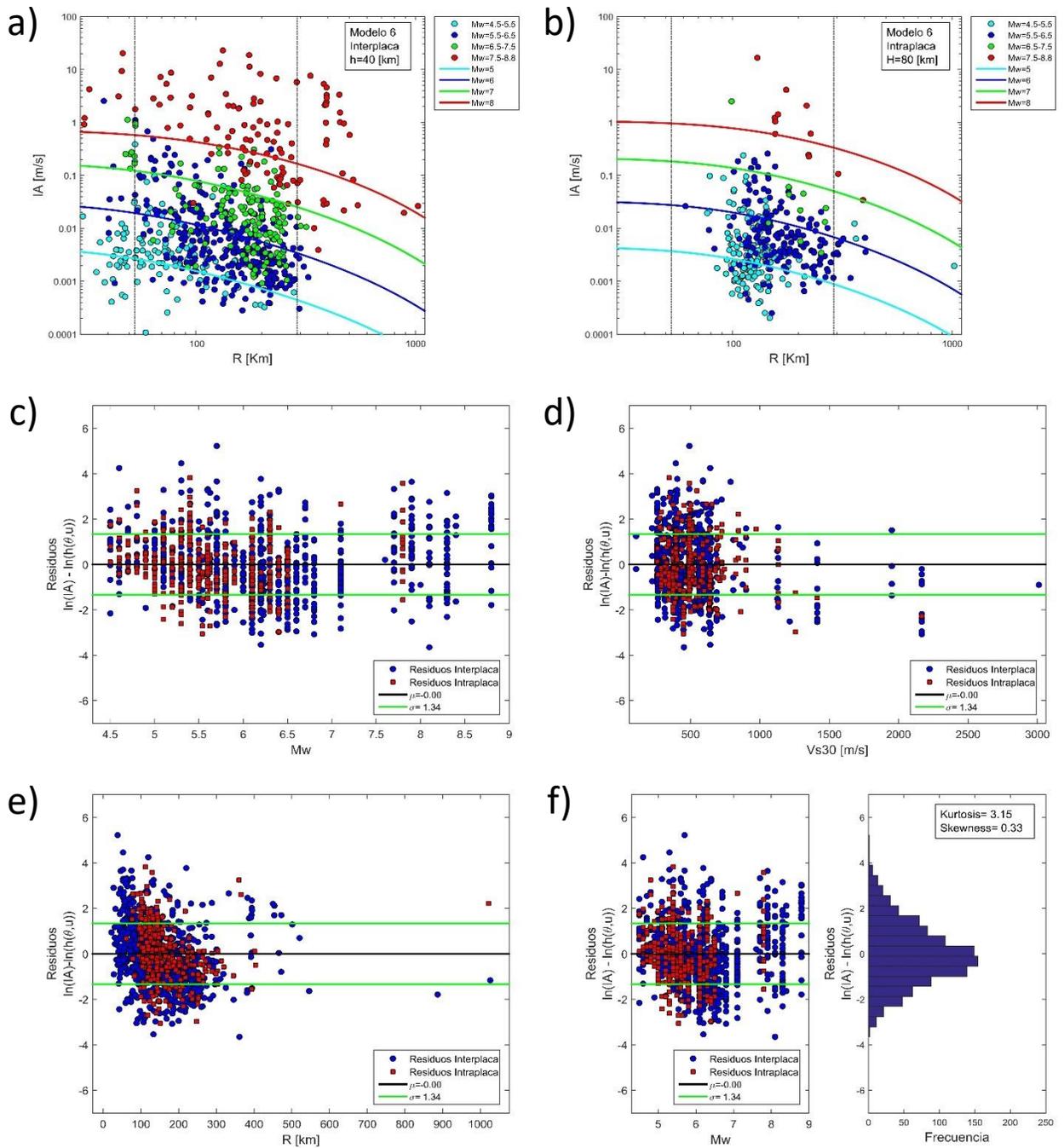


Figura D.6: Resultados curva de atenuación modelo 6 para Intensidad de Arias. a) Curva de atenuación y datos de sismos interplaca. b) Curva de atenuación y datos de sismos intraplaca. c) Residuos vs M_w . d) Residuos vs V_{s30} . e) Residuos vs R . f) Histograma de los residuos.

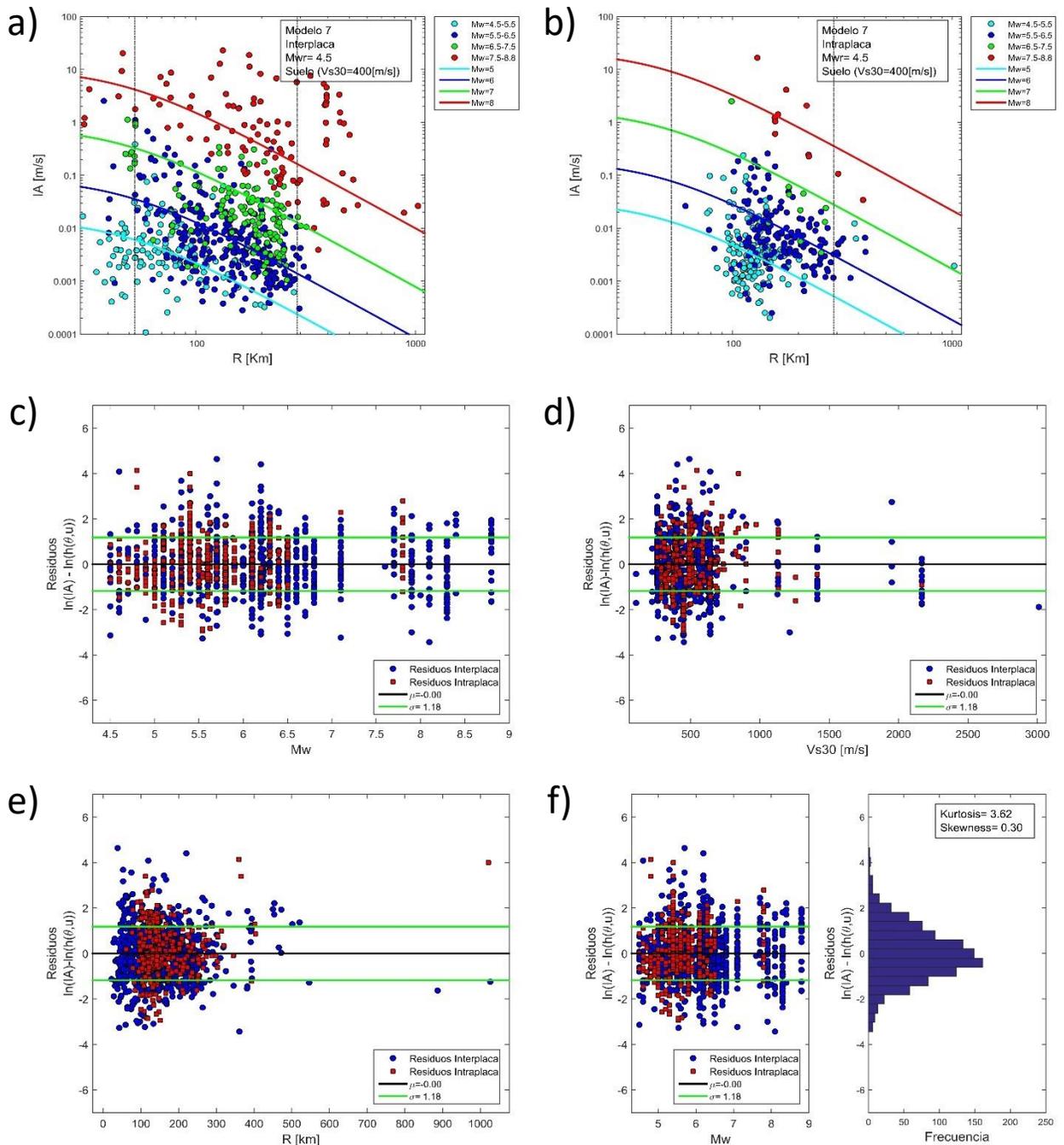


Figura D.7: Resultados curva de atenuación modelo 7 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=4.5$. a) Curva de atenuación sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

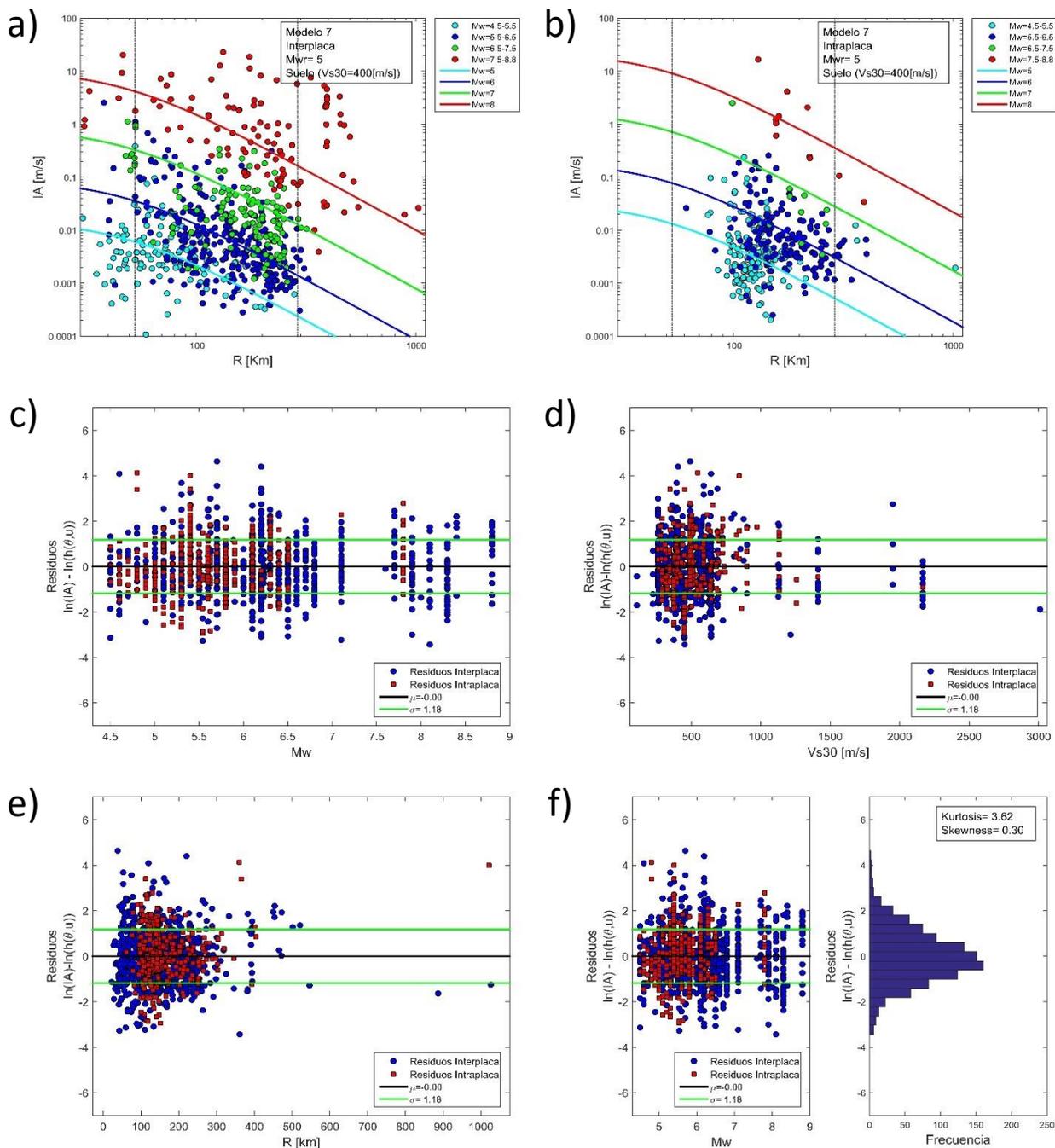


Figura D.8: Resultados curva de atenuación modelo 7 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=5$. a) Curva de atenuación sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

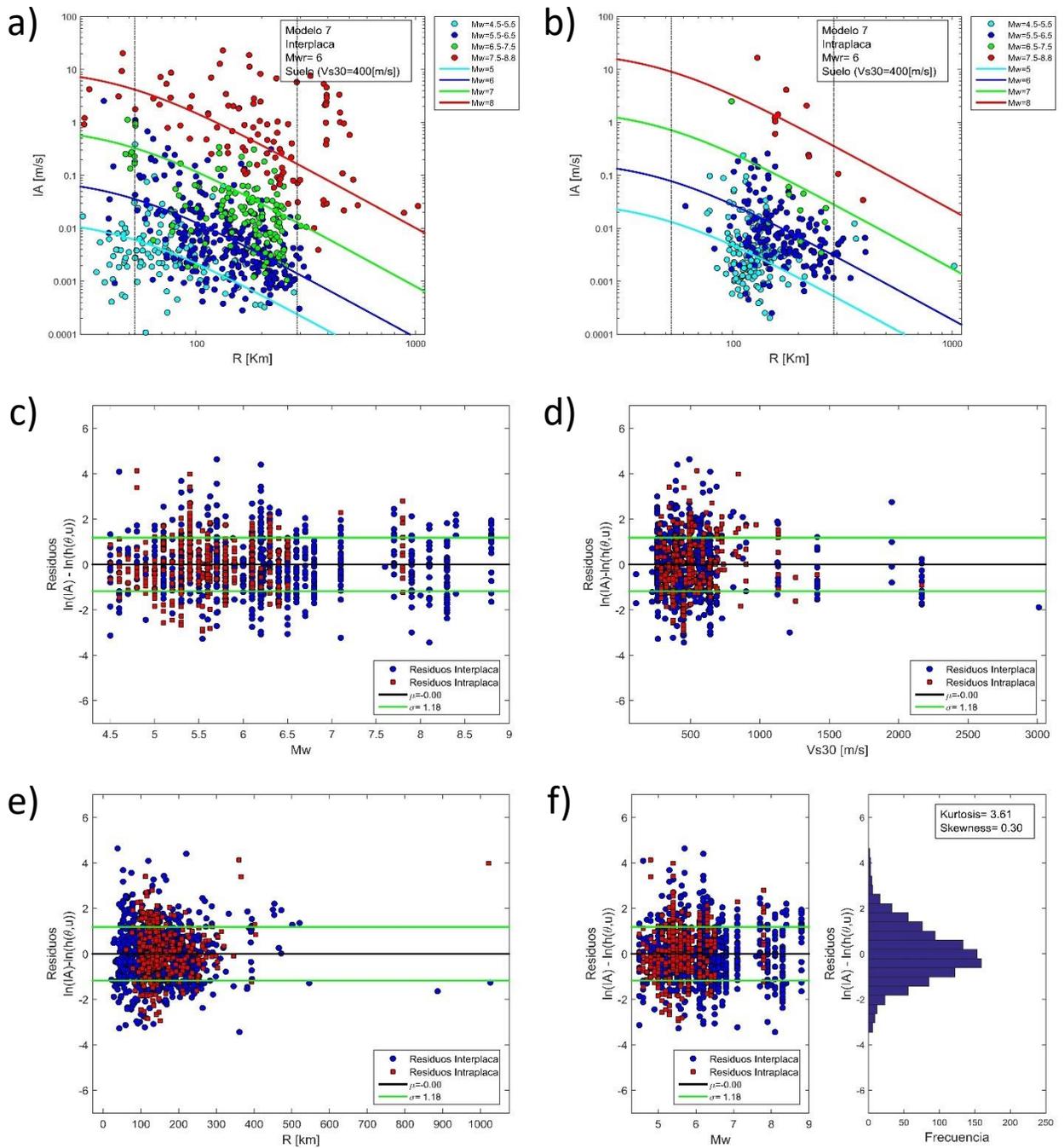


Figura D.9: Resultados curva de atenuación modelo 7 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=6$. a) Curva de atenuación sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

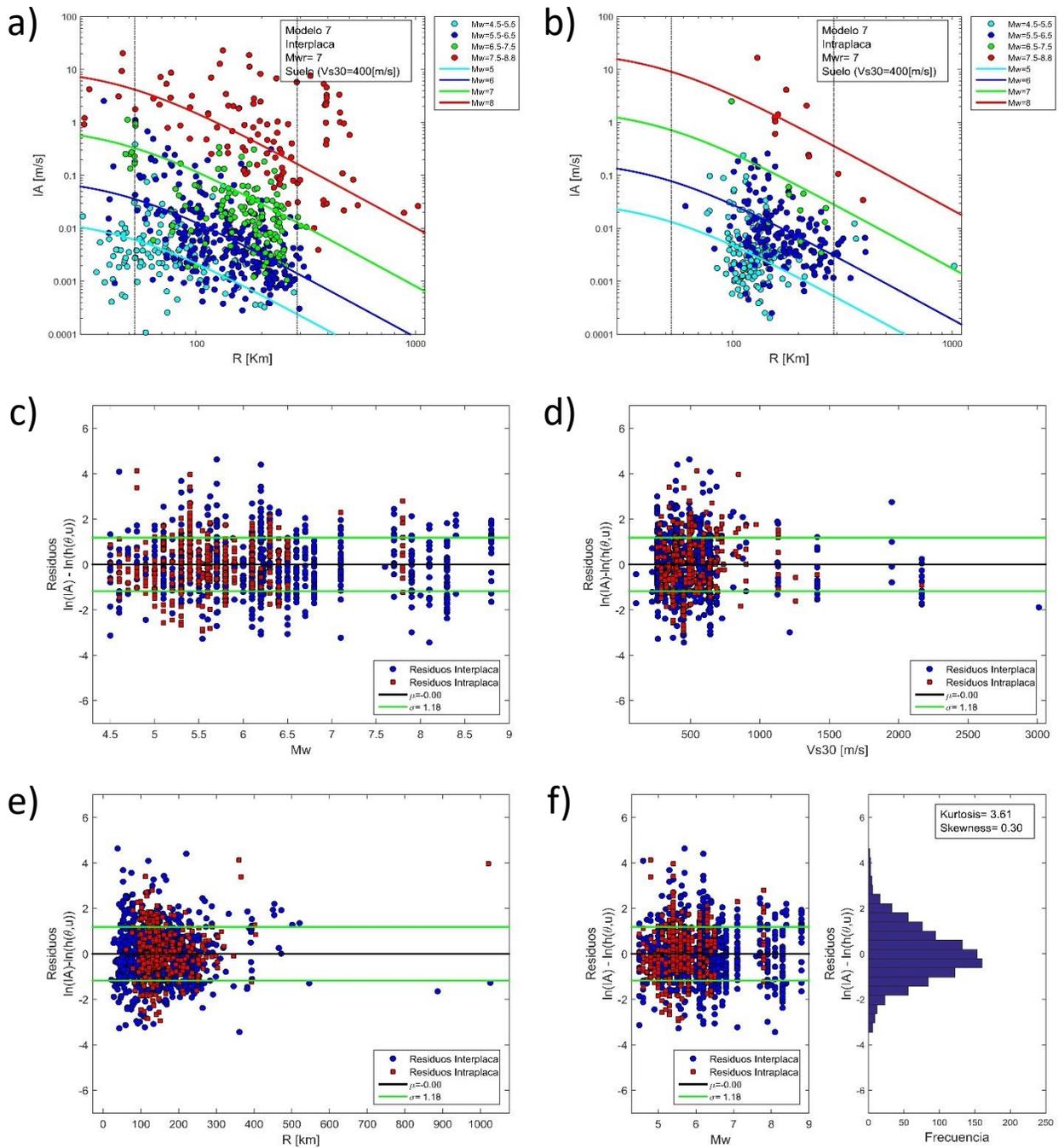


Figura D.10: Resultados curva de atenuación modelo 7 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=7$. a) Curva de atenuación sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

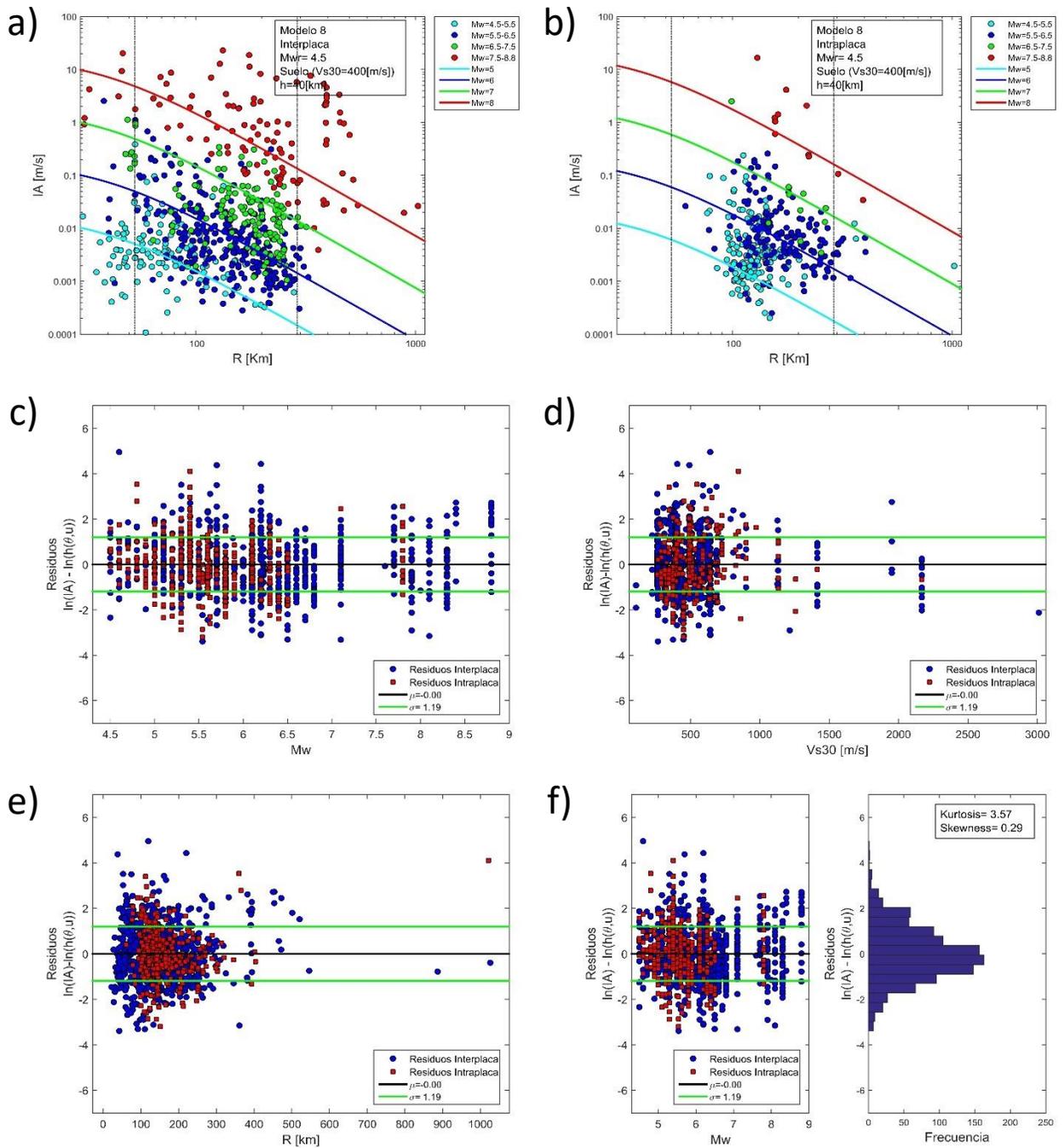


Figura D.11: Resultados curva de atenuación modelo 8 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=4,5$. a) Curva de atenuación sismos interplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=40$ [km], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=80$ [km], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

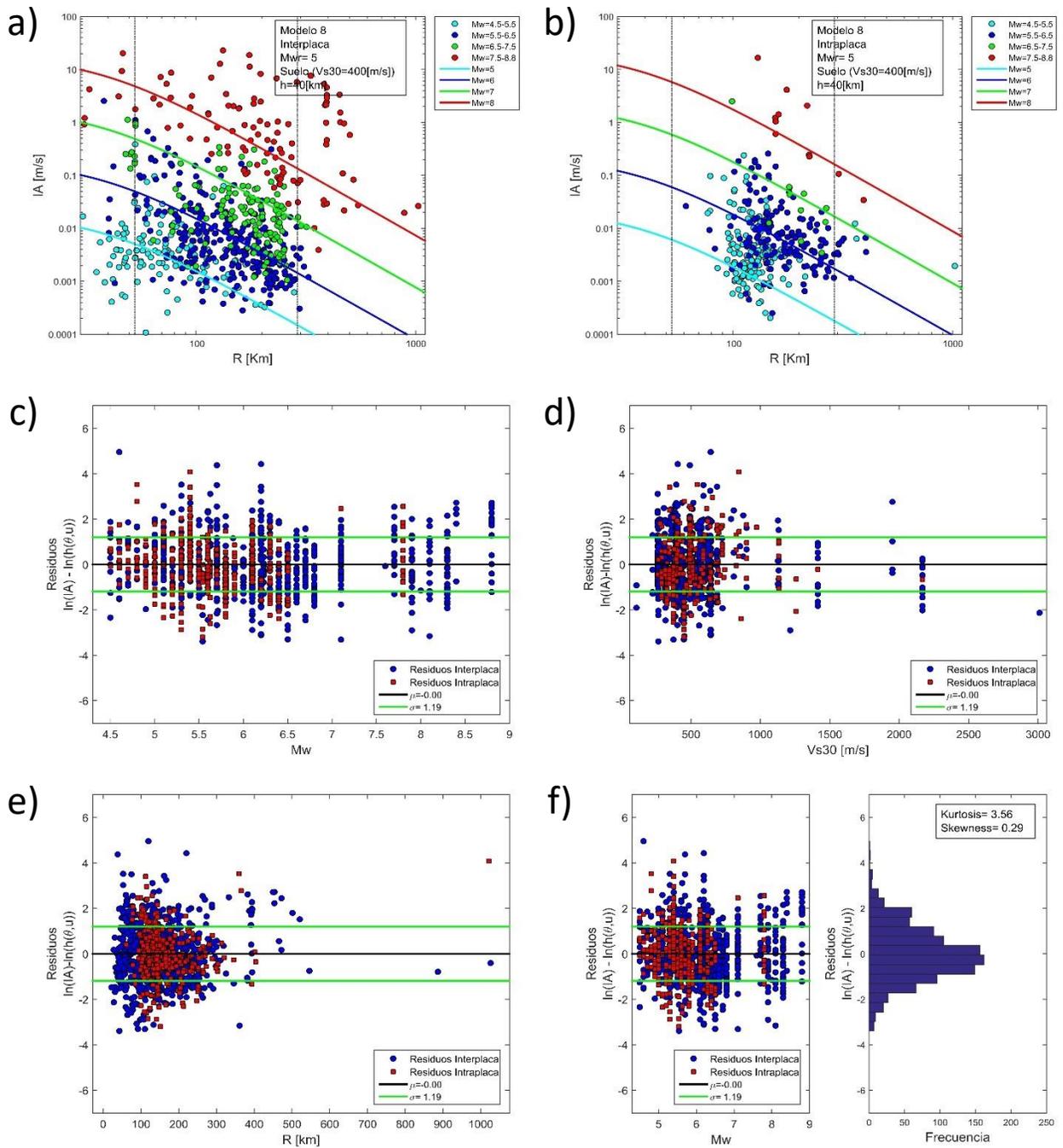


Figura D.12: Resultados curva de atenuación modelo 8 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=5$. a) Curva de atenuación sismos interplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=40$ [km], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=80$ [km], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

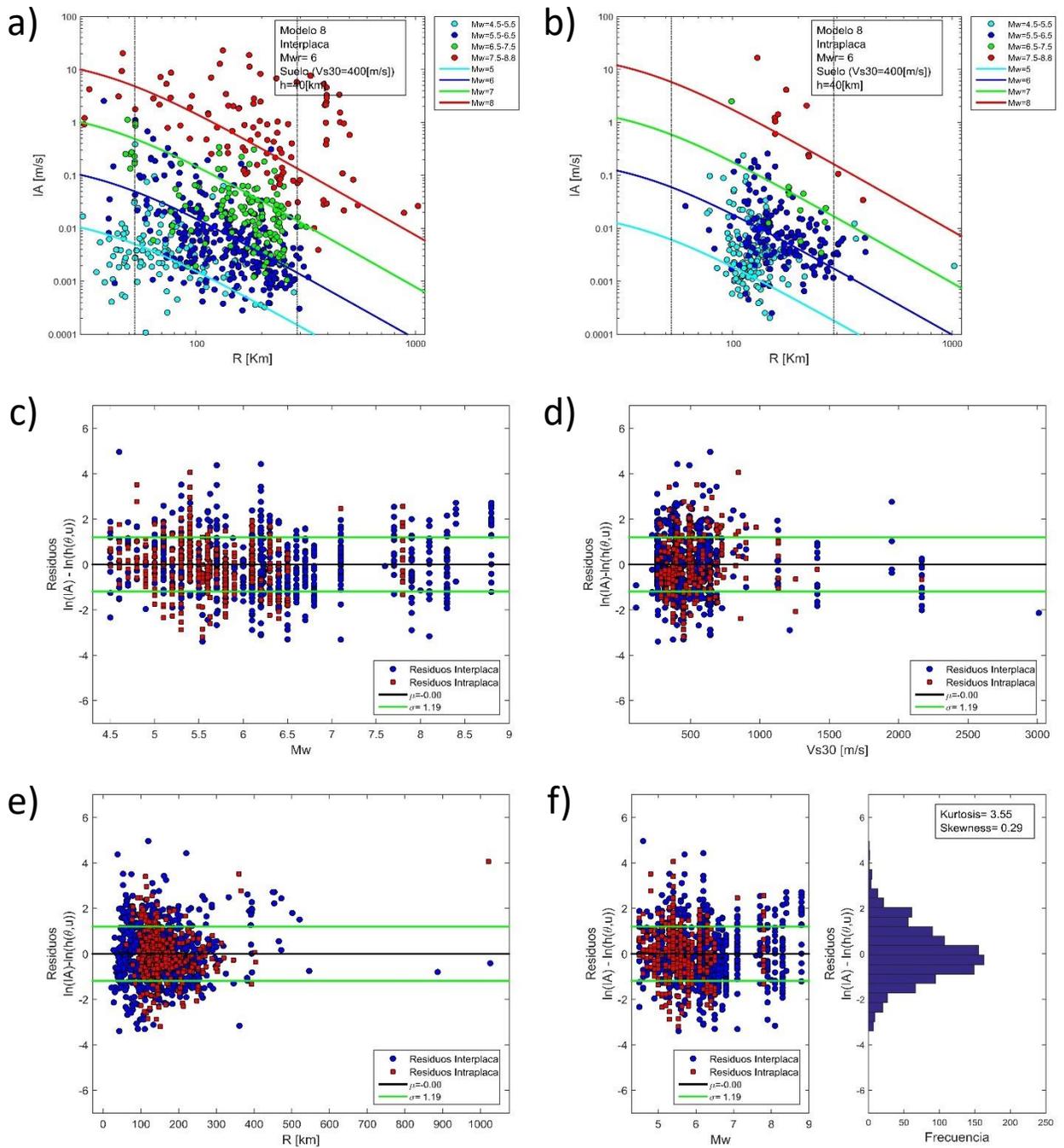


Figura D.13: Resultados curva de atenuación modelo 8 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=6$. a) Curva de atenuación sismos interplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=40$ [km], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=80$ [km], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

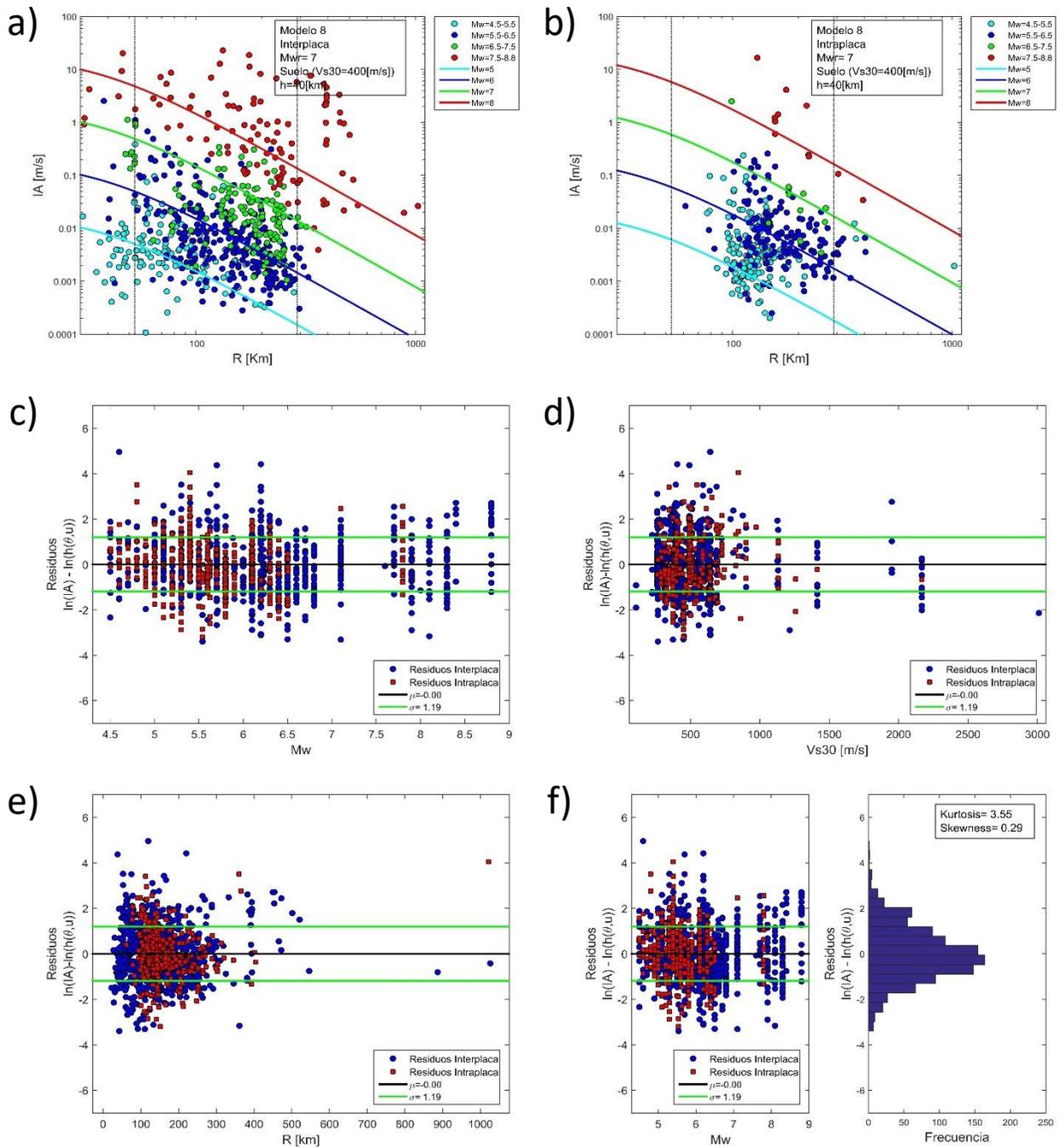


Figura D.14: Resultados curva de atenuación modelo 8 para Intensidad de Arias utilizando $M_{wr}=7$. a) Curva de atenuación sismos interplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=40$ [km], datos de sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación sismos intraplaca, $V_{s30}=400$ [m/s] y $h=80$ [km], datos de sismos intraplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

D.2 Resultados para modelos de atenuación de duración significativa

En la Tabla D.2 se muestran los resultados de las constantes obtenidas del ajuste de los 2 modelos estudiados.

Por otro lado, desde la Figura D.15 hasta la Figura D.24 se muestran los resultados de las curvas y residuos de los 2 modelos estudiados, con intervalos de 5%-75% y 5%-95%. Cabe mencionar que solo se muestran las curvas para sismos interplaca tipo thrust y sitios con suelo, esto con motivo de no saturar con gráficos.

Tabla D.2: Resultados constantes modelos de atenuación de duración significativa.

Funcional	Notas	Constantes						
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
Modelo 1 (5%-75%)	-	-2,34	0,28	0,55	0,03	0,41	0,40	-
Modelo 1 (5%-95%)	-	-1,05	0,17	0,45	0,03	1,08	0,91	-
Modelo 2 (5%-75%)	$M_{wr}=4,5$	8,62	0,14	0,05	2,06	0,001	2,55	1,30
	$M_{wr}=5$	8,69	0,14	0,05	2,06	0,001	2,55	1,30
	$M_{wr}=6$	8,84	0,14	0,05	2,06	0,001	2,55	1,30
	$M_{wr}=7$	8,98	0,14	0,05	2,06	0,001	2,55	1,30
Modelo 2 (5%-95%)	$M_{wr}=4,5$	-4,11	2,50	0,05	4,71	-0,001	1,83	0,36
	$M_{wr}=5$	-3,07	2,54	0,05	4,20	-0,002	1,80	0,34
	$M_{wr}=6$	-0,77	2,59	0,05	3,45	-0,002	1,74	0,31
	$M_{wr}=7$	1,70	2,62	0,05	2,94	-0,002	1,70	0,30

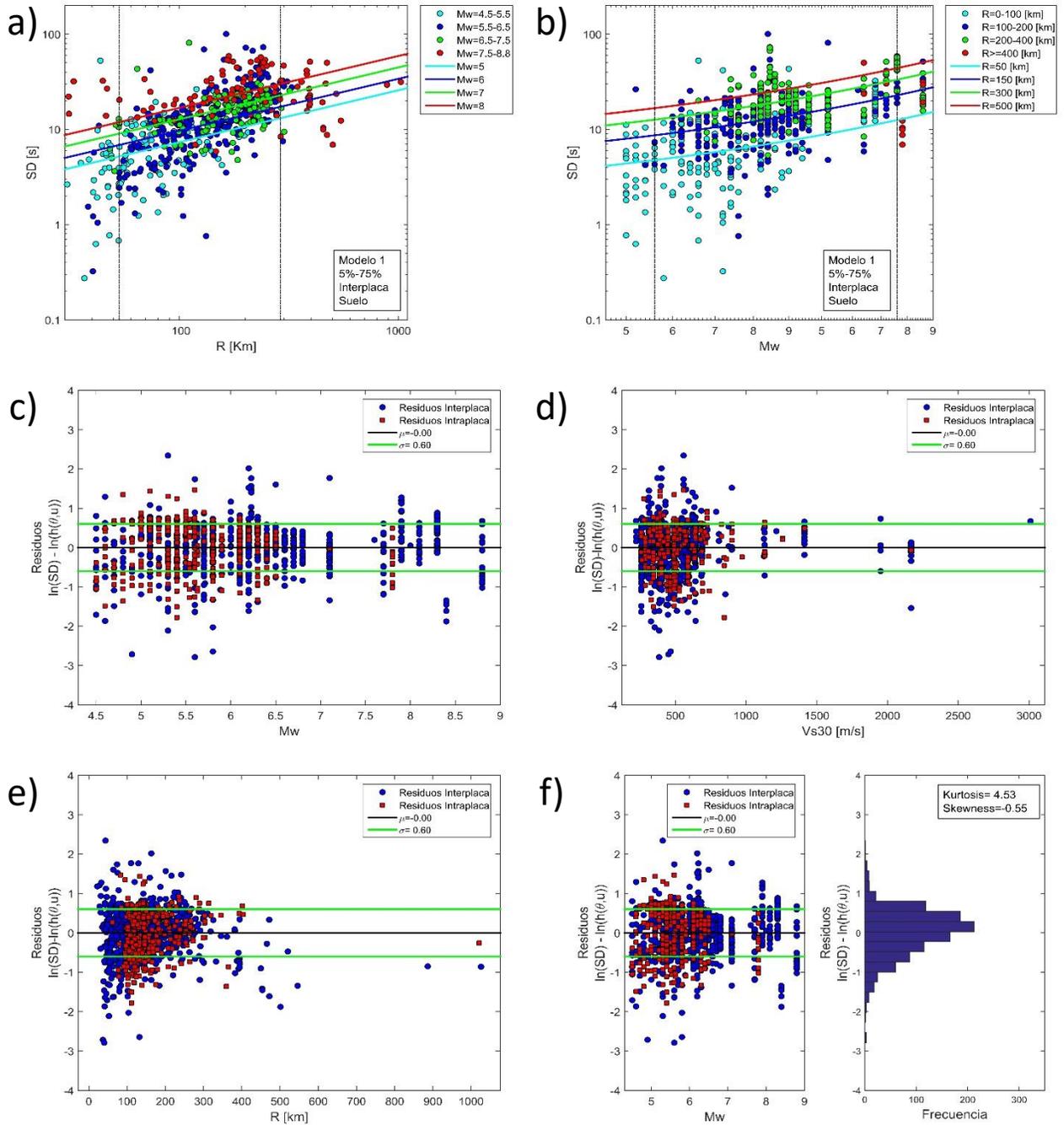


Figura D.15: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración significativa (5%-75%). a) Curva de atenuación SD vs R y datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w y datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

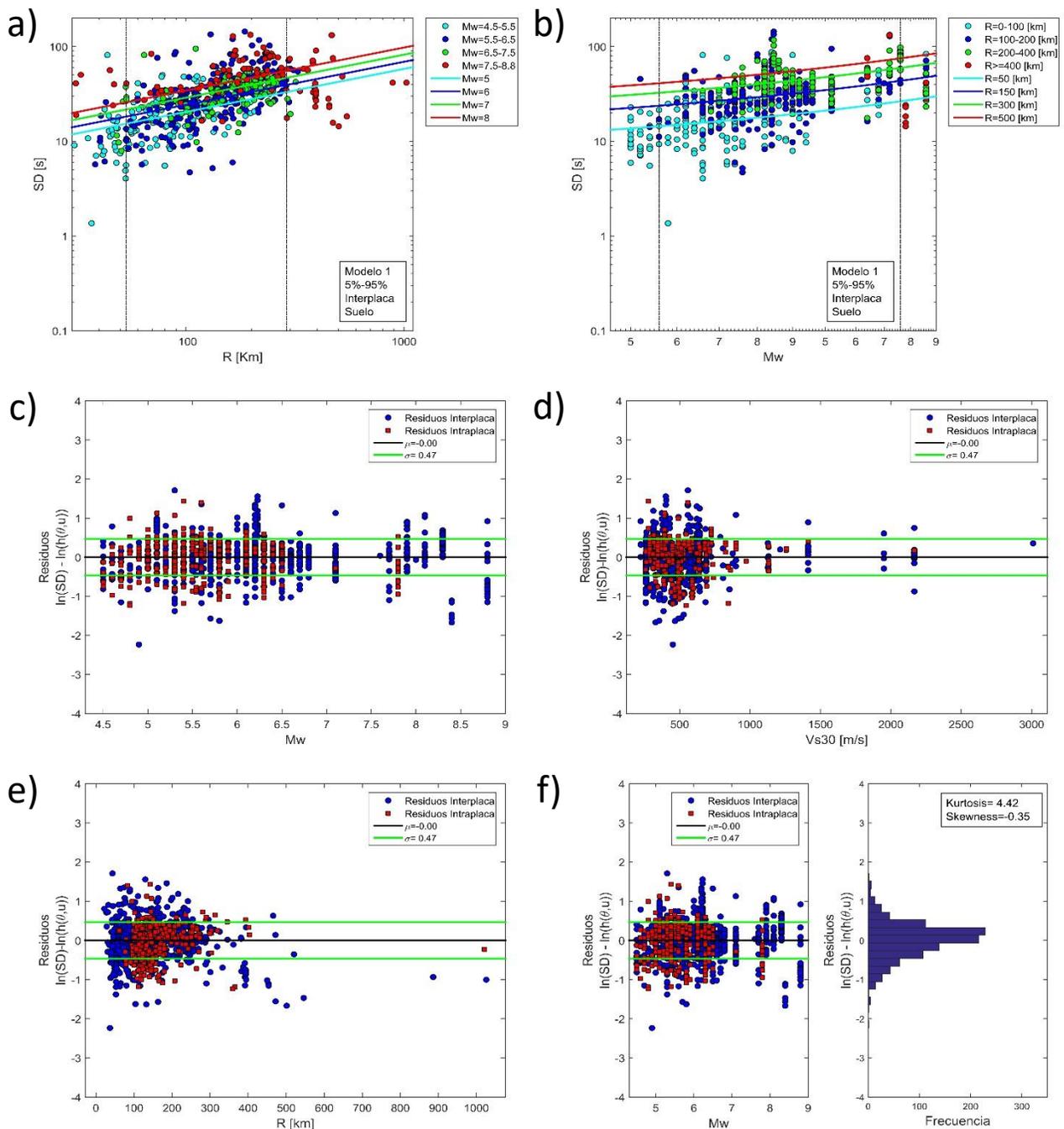


Figura D.16: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración significativa (5%-95%). a) Curva de atenuación SD vs R y datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w y datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

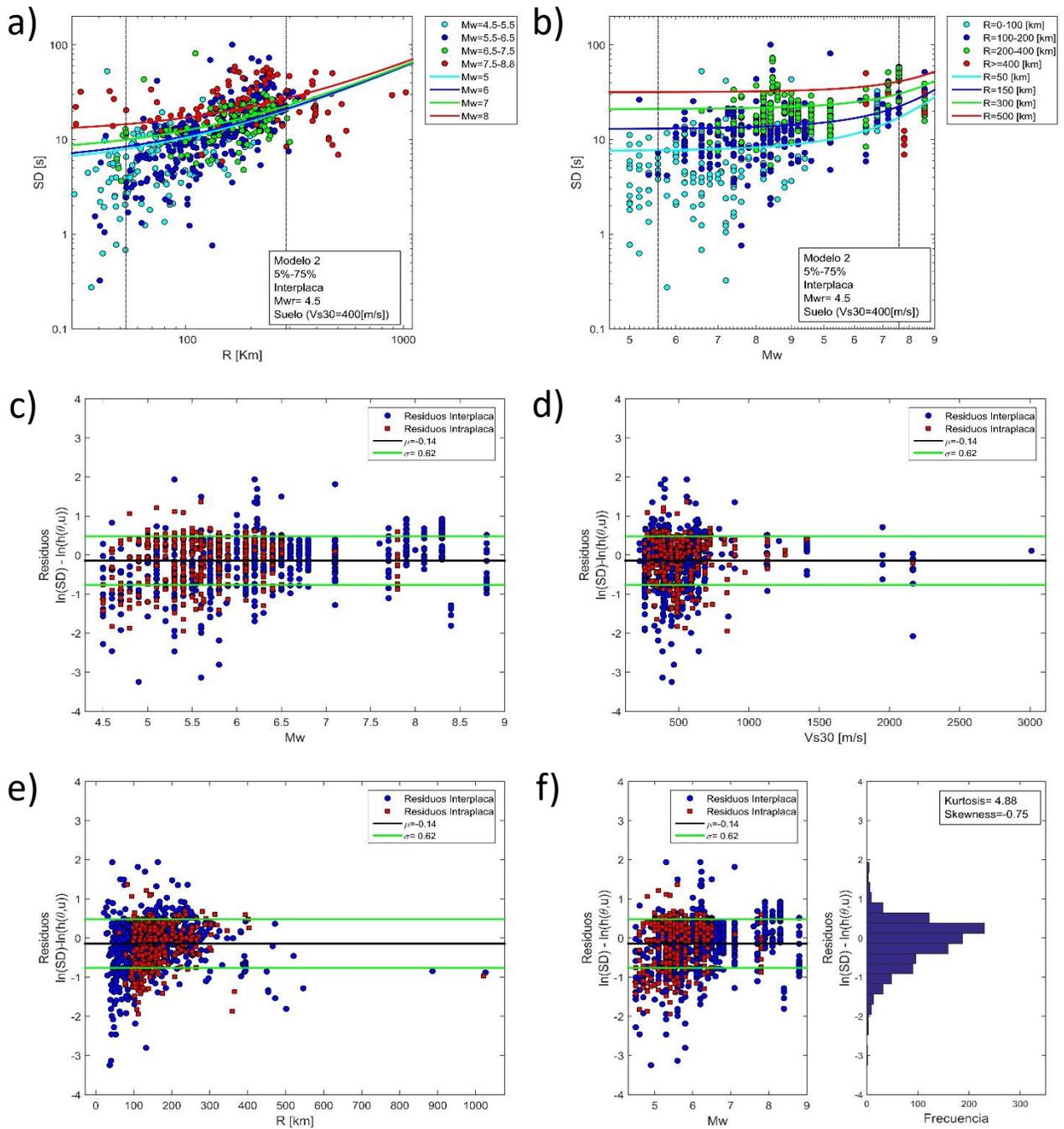


Figura D.17: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-75%) con $M_{w,r}=4,5$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

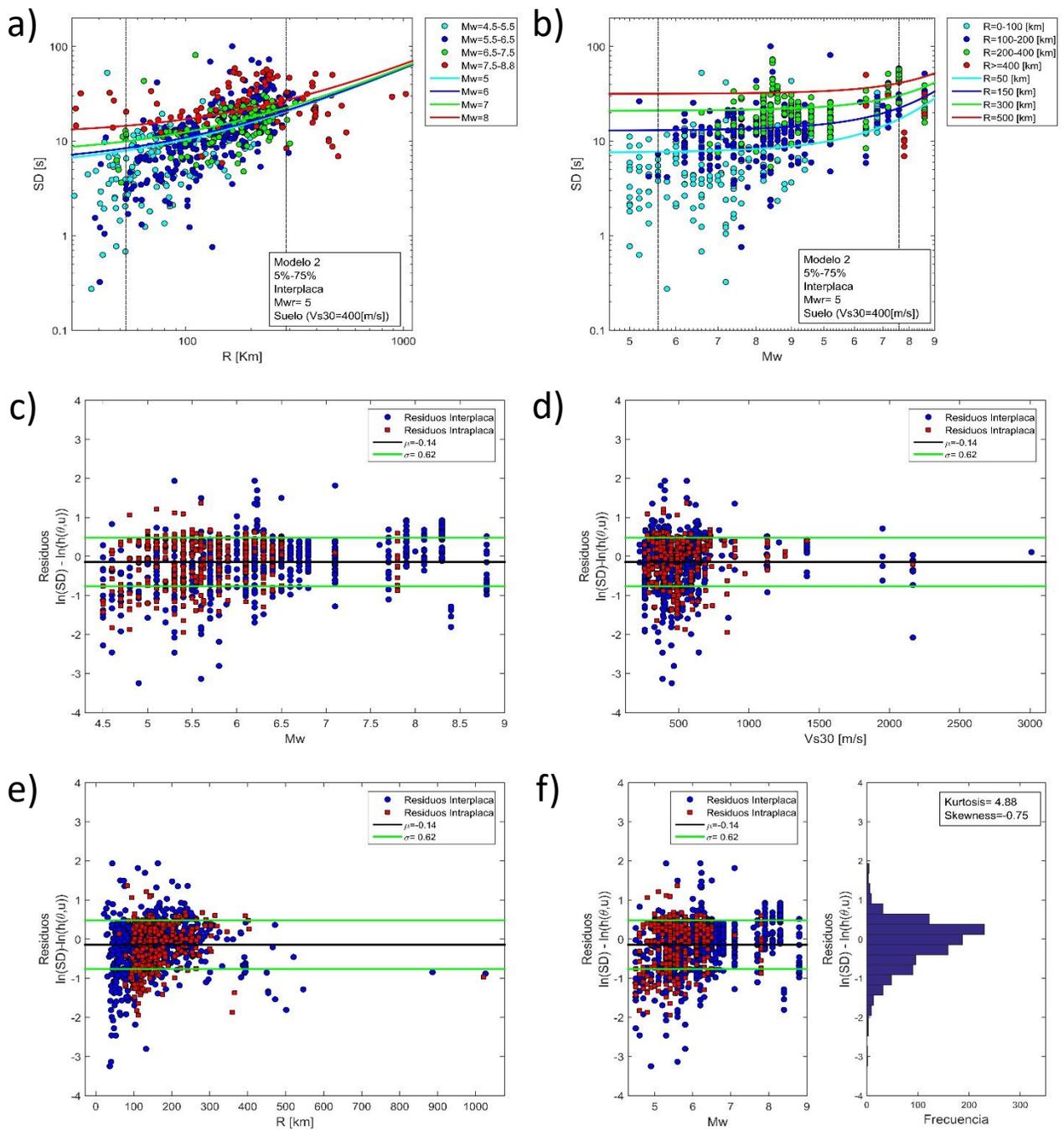


Figura D.18: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-75%) con $M_{wr}=5$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

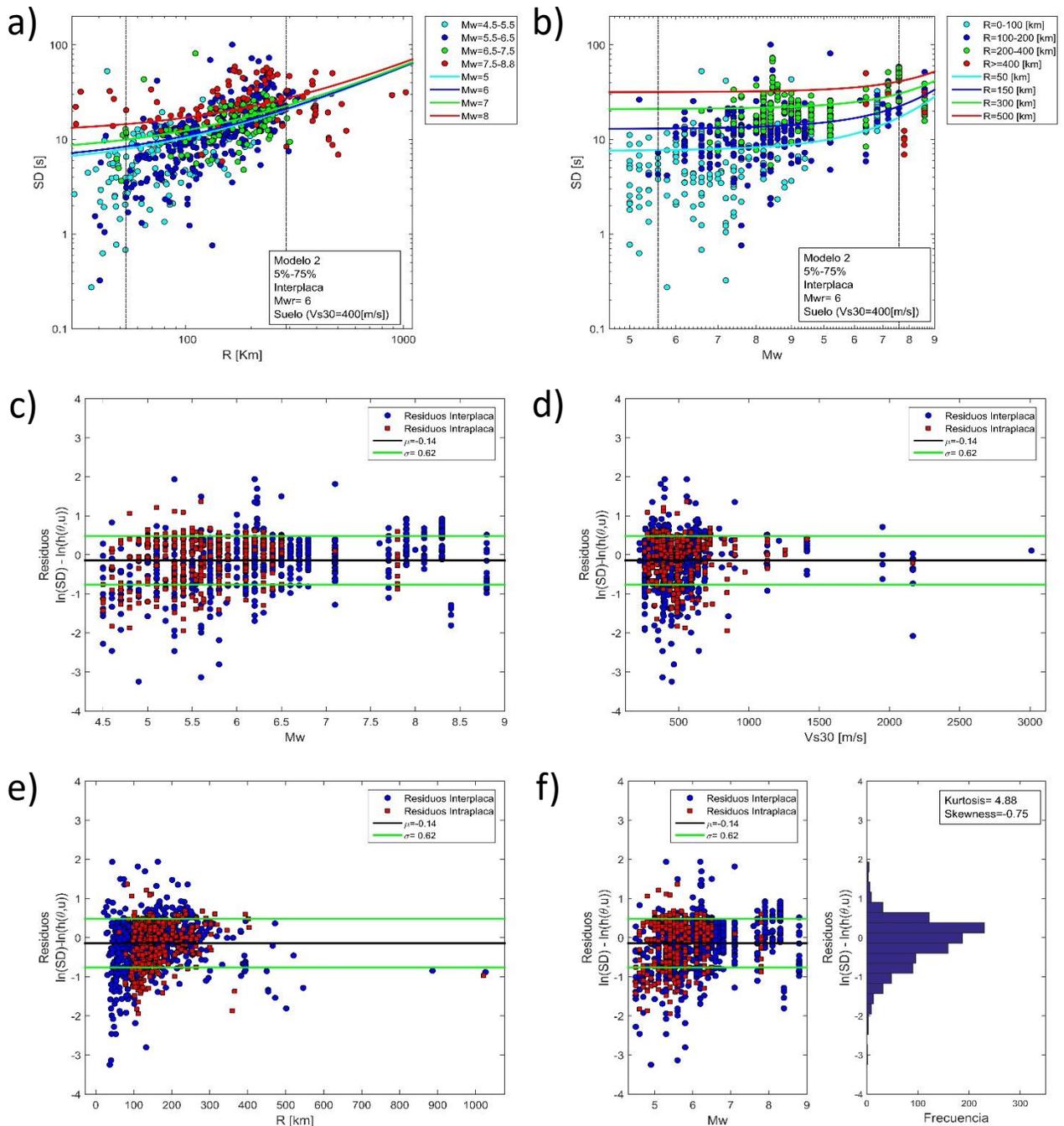


Figura D.19: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-75%) con $M_{wr}=6$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

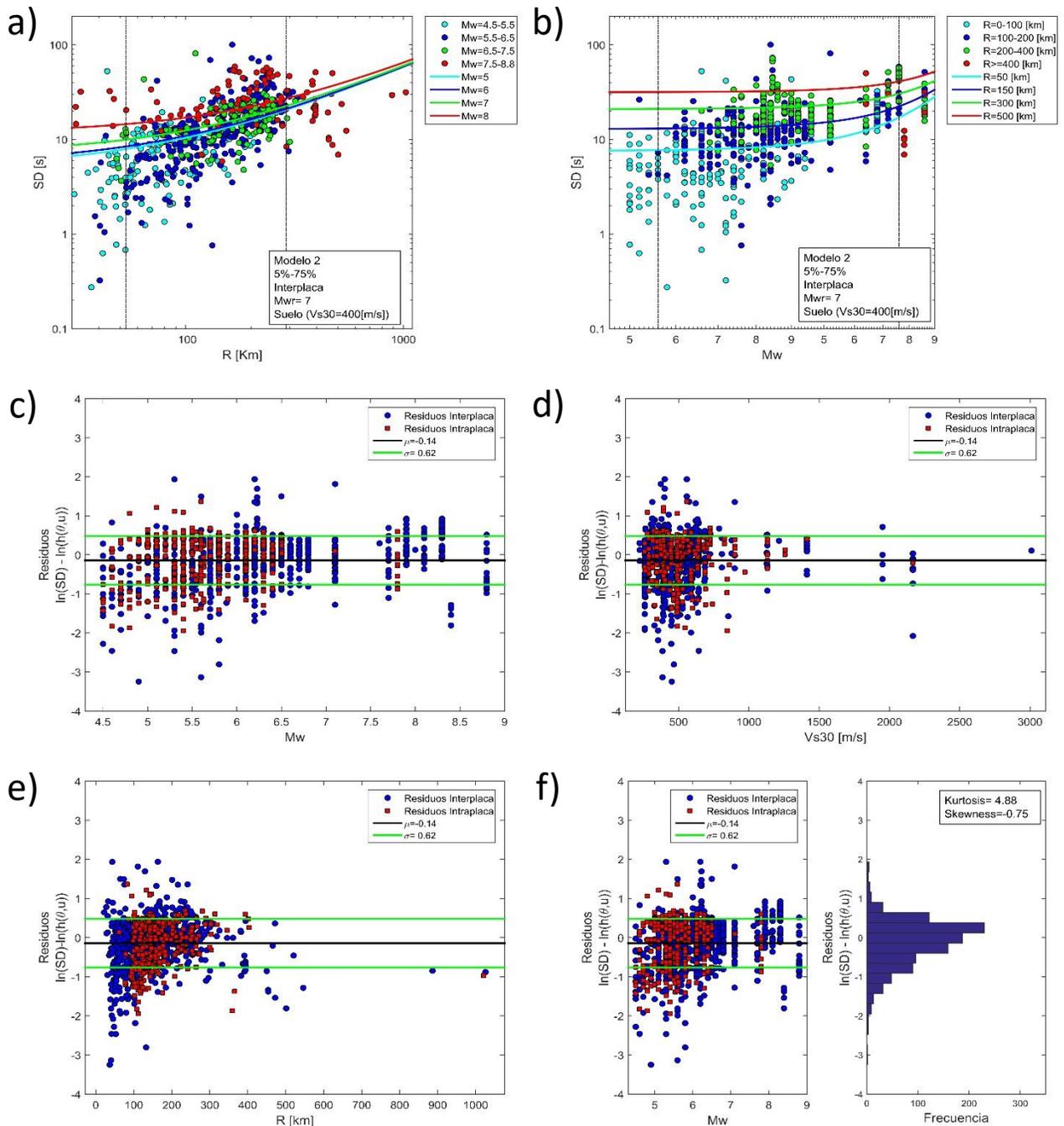


Figura D.20: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-75%) con $M_{wr}=7$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

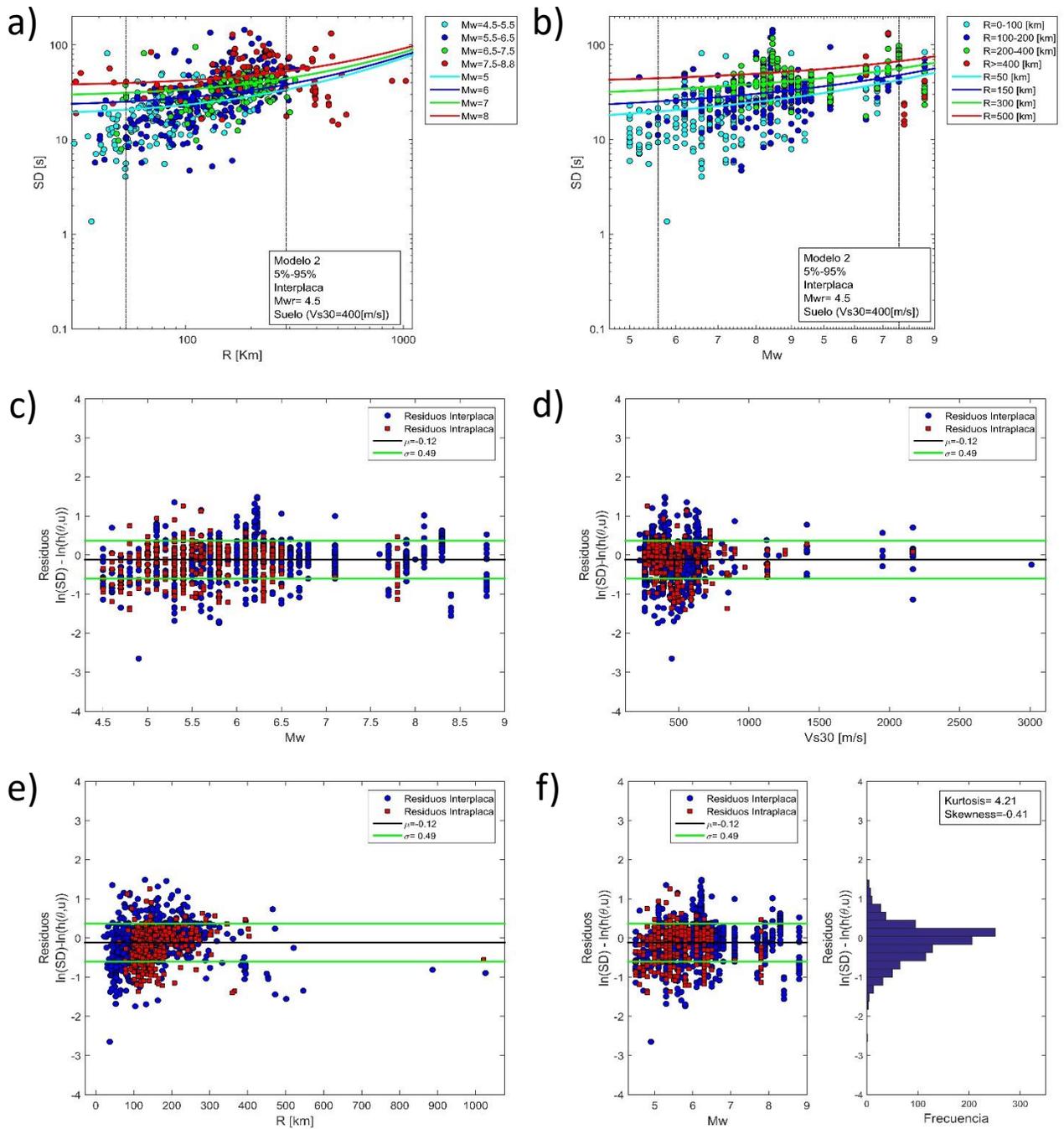


Figura D.21: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-95%) con $M_{w,r}=4,5$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

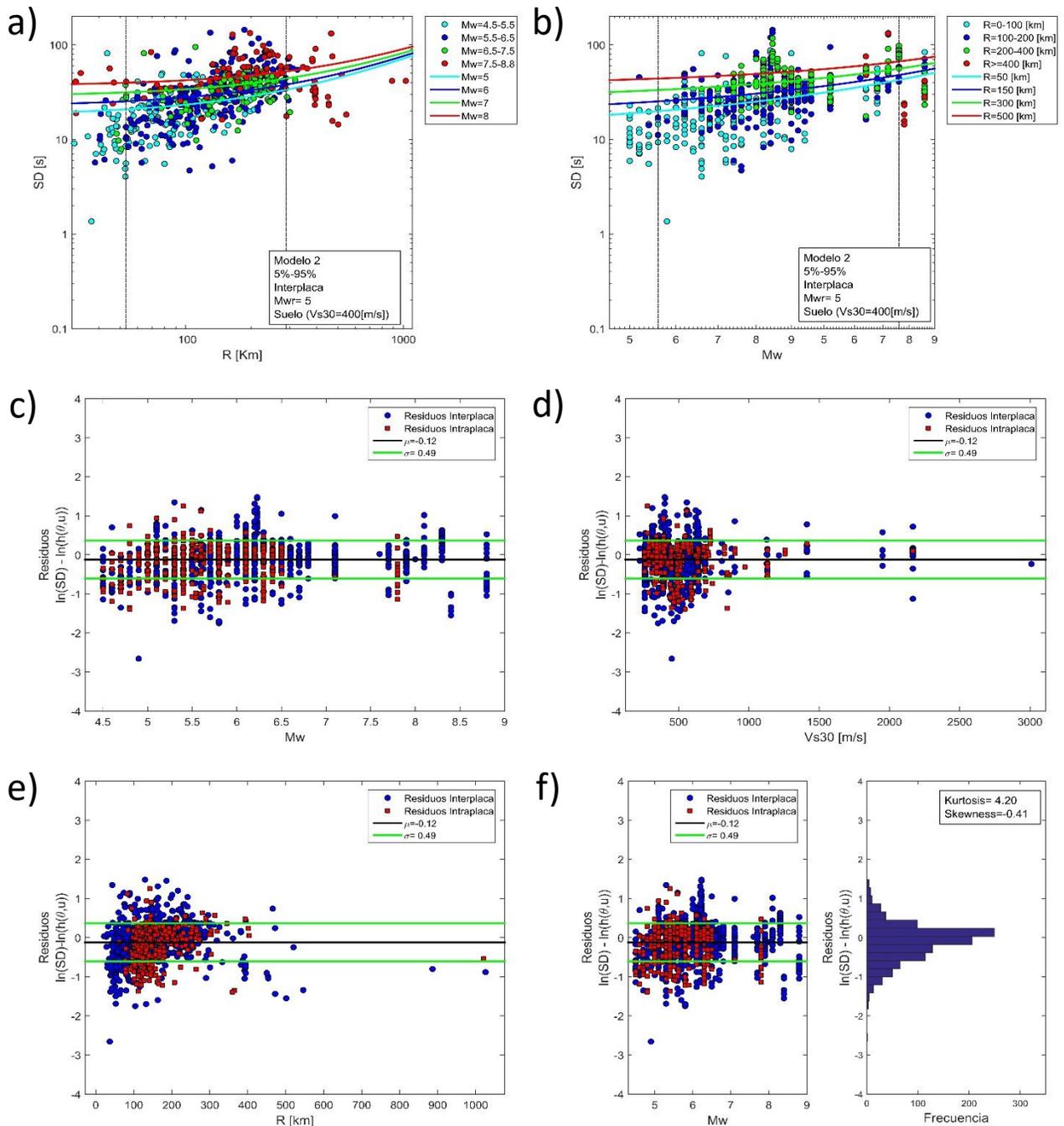


Figura D.22: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-95%) con $M_{wr}=5$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

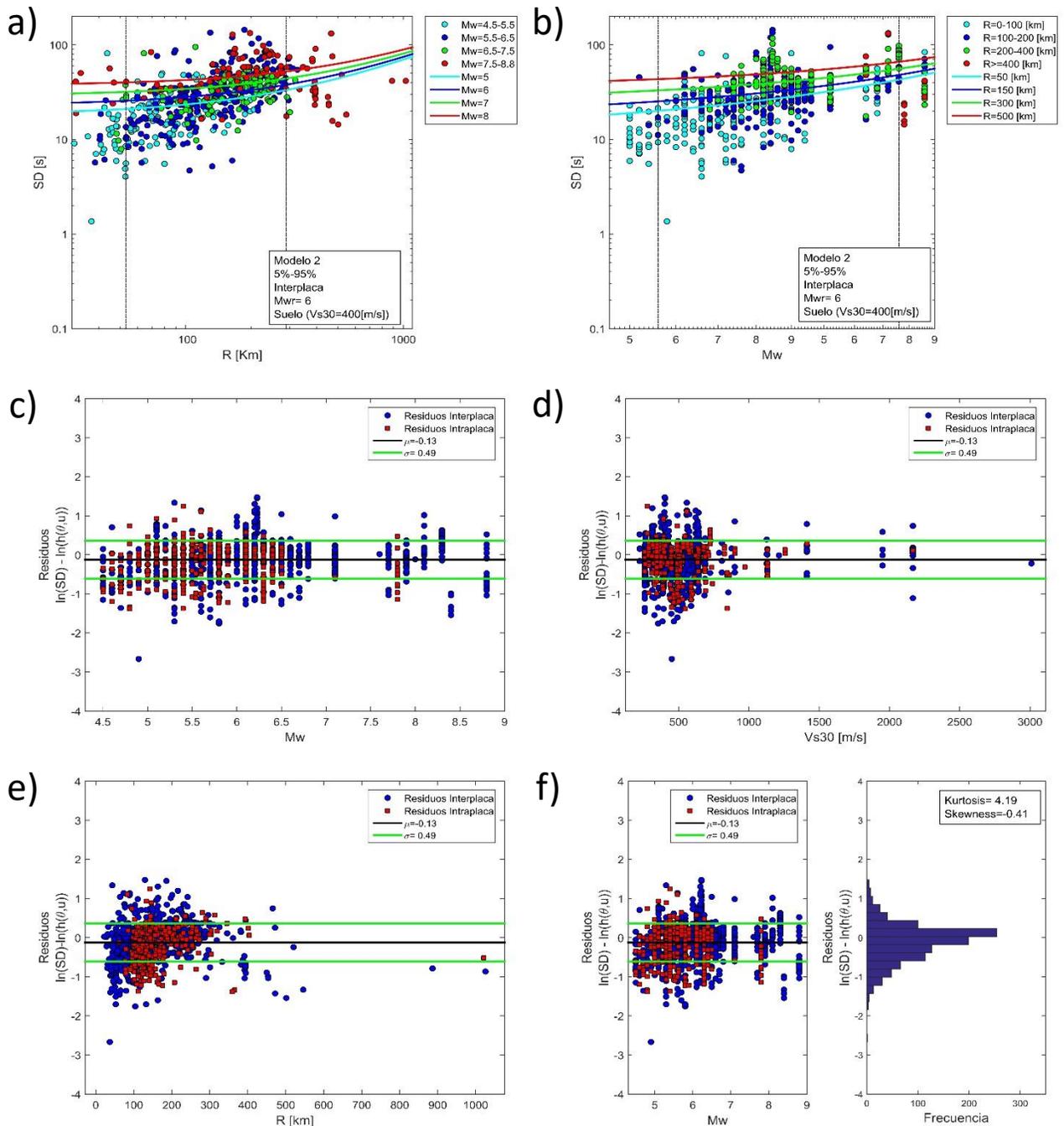


Figura D.23: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-95%) con $M_{w,r}=6$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

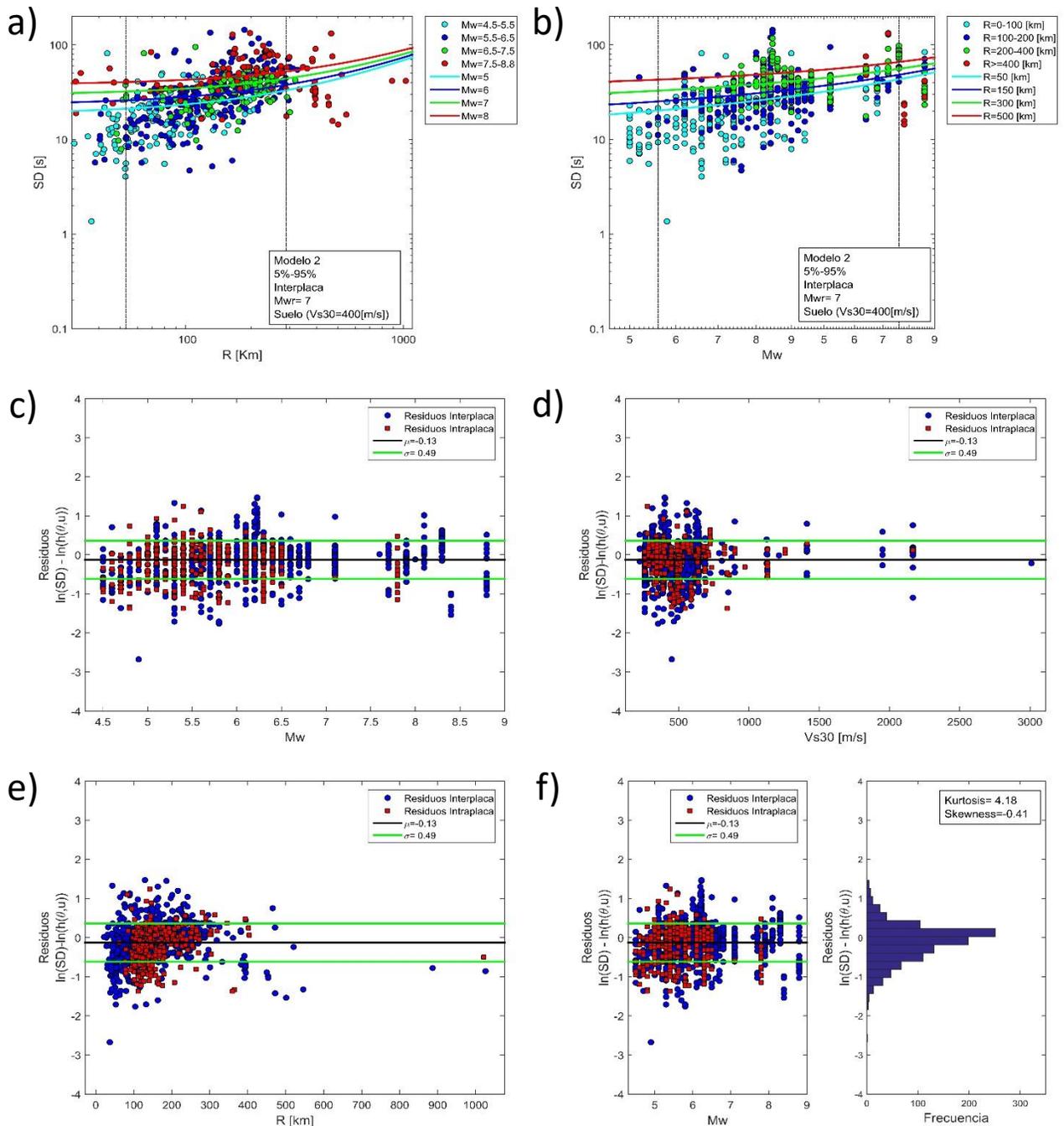


Figura D.24: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración significativa (5%-95%) con $M_{wr}=7$. a) Curva de atenuación SD vs R para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. b) Curva de atenuación SD vs M_w para sismos interplaca y $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca y sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

D.3 Resultados para modelos de atenuación de duración entre intervalos

En la Tabla D.3 se muestran los resultados de las constantes obtenidas del ajuste de los 2 modelos estudiados.

Por otro lado, desde la Figura D.25 hasta la Figura D.34 se muestran los resultados de las curvas y residuos de los 2 modelos estudiados, con los límites de 0,05g y 0,01g. Cabe mencionar que solo se muestran las curvas para sismos interplaca tipo thrust y sitios con suelo, esto con motivo de no saturar con gráficos.

Además en la Tabla D.4 se muestran las pendientes y coeficientes de posición que permiten construir las líneas de probabilidad de la Figura D.35.

Tabla D.3: Resultados constantes modelos de atenuación de duración entre intervalos.

Funcional	Notas	Constantes							
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_1
Modelo 1 (0,05g)	-	2,28	1,55	-1,55	110,46	-0,51	0,10	-	-
Modelo 1 (0,1g)	-	0,57	1,70	-1,10	12,10	-0,98	0,13	-	-
Modelo 2 (0,05g)	$M_{wr}=4,5$	-2,48	1,47	-0,01	0,76	-0,25	0,01	0,77	0,72
	$M_{wr}=5$	-2,07	1,55	-0,01	0,84	-0,32	0,01	0,87	0,82
	$M_{wr}=6$	-1,08	1,65	-0,01	0,83	-0,41	0,01	1,11	1,06
	$M_{wr}=7$	0,02	1,55	-0,01	0,69	-0,32	0,01	1,39	1,32
Modelo 2 (0,1g)	$M_{wr}=4,5$	-3,13	1,05	-0,01	1,03	0,15	0,01	0,68	0,49
	$M_{wr}=5$	-2,91	1,16	-0,01	1,28	0,07	0,01	0,73	0,55
	$M_{wr}=6$	-2,35	1,42	-0,01	1,73	-0,14	0,01	0,86	0,69
	$M_{wr}=7$	-1,59	1,68	-0,01	2,05	-0,38	0,01	1,04	0,88

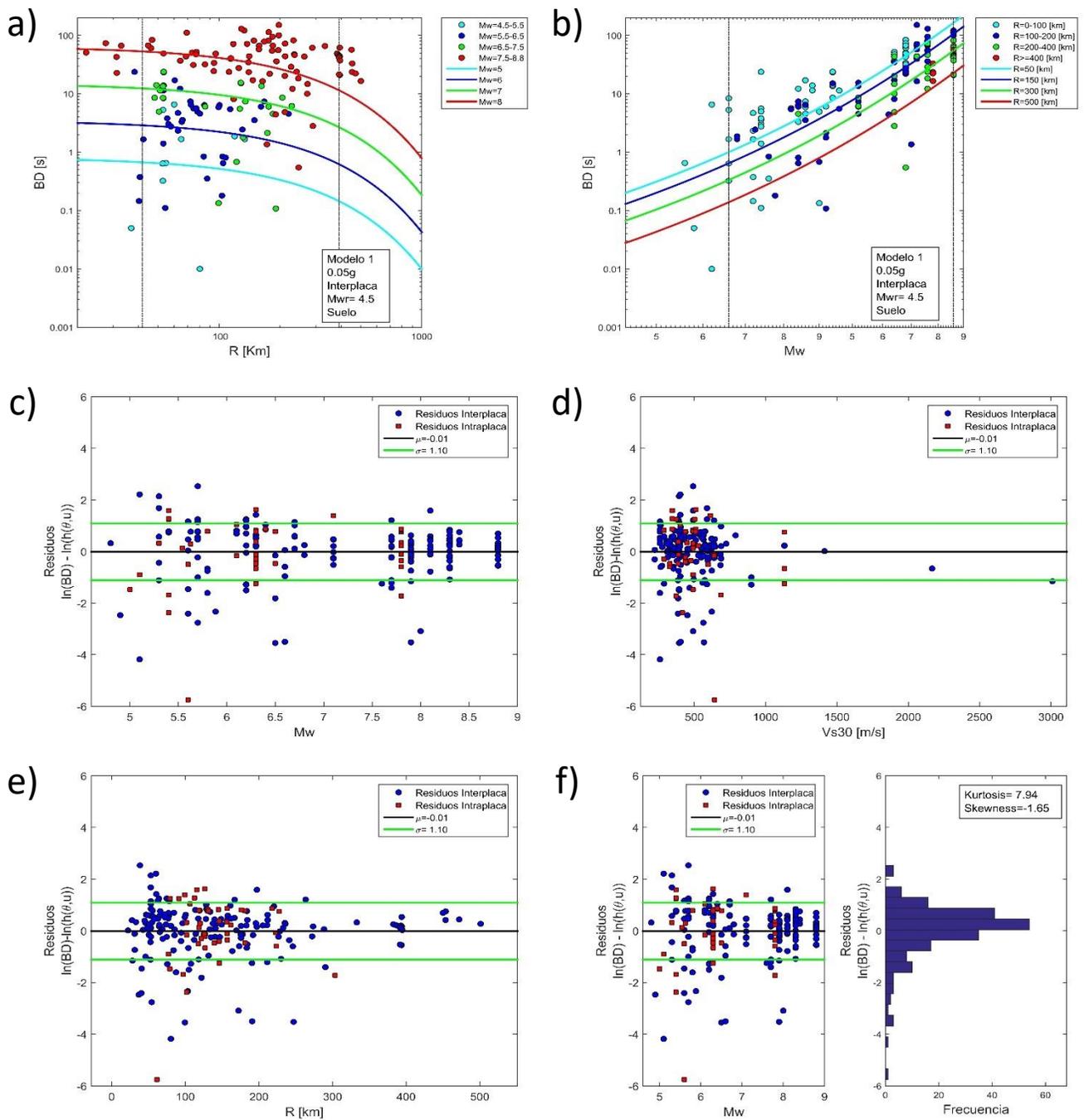


Figura D.25: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,05g) con $M_{wr}=4,5$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

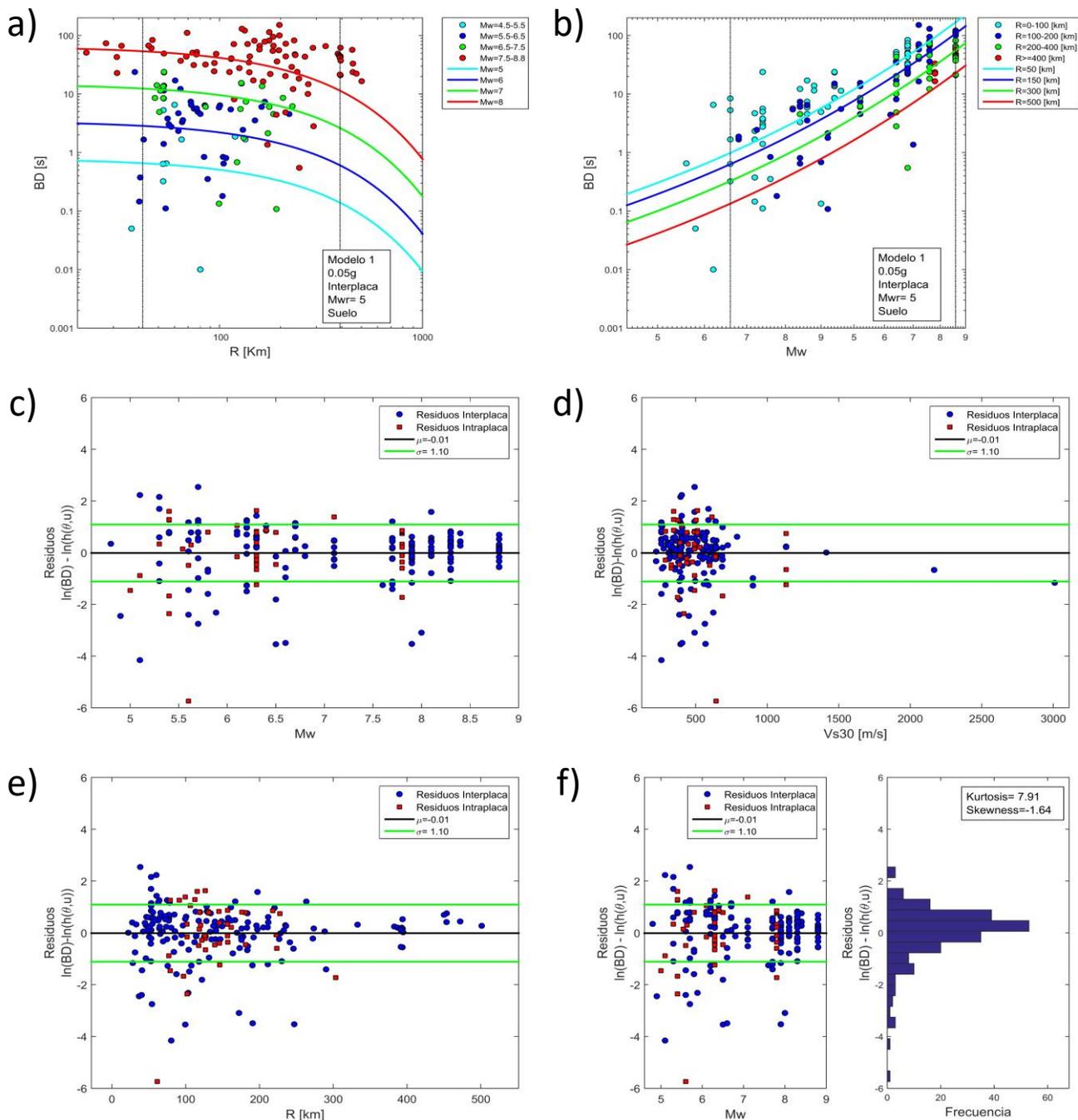


Figura D.26: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,05g) con $M_{wrr}=5$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

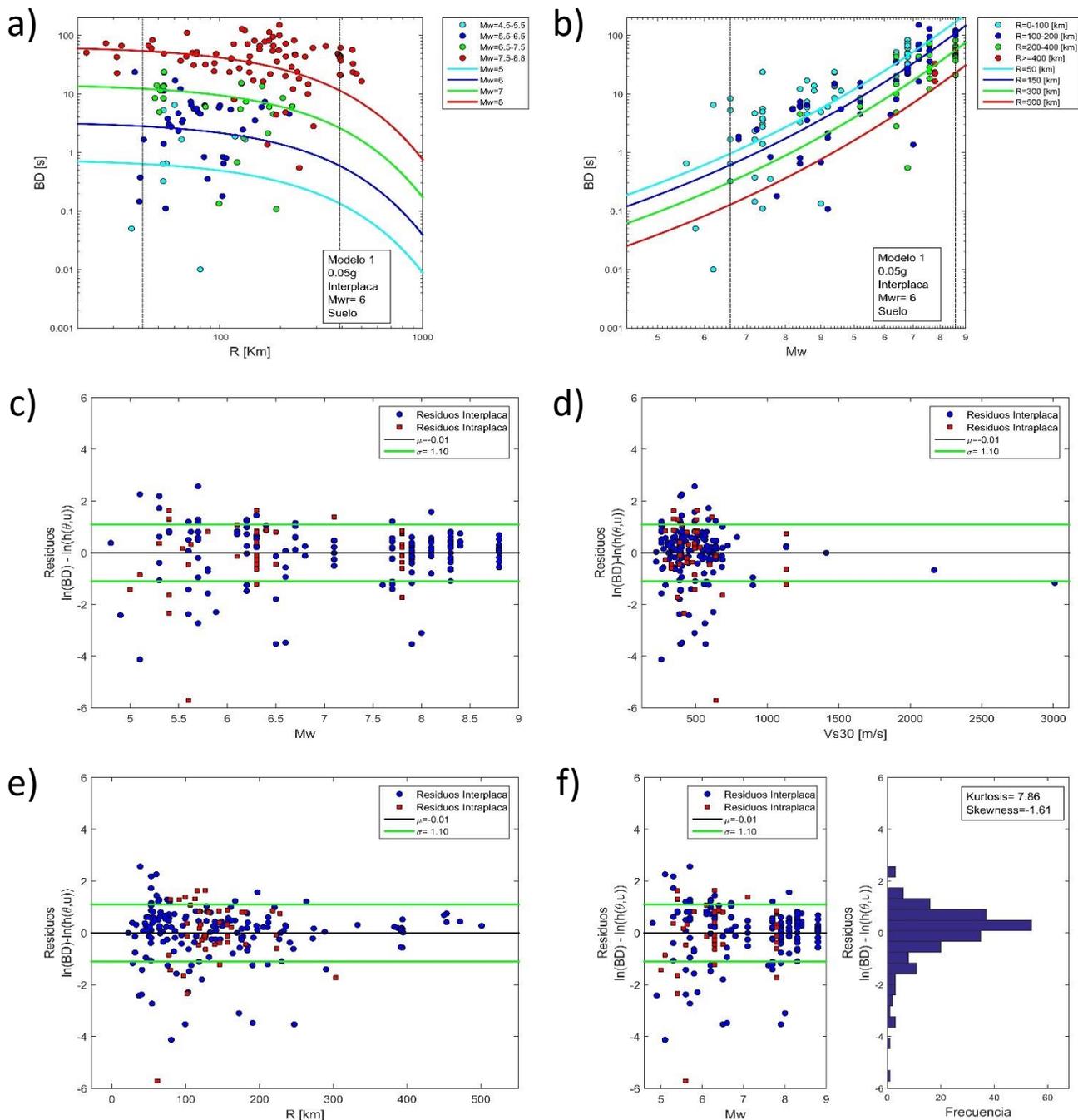


Figura D.27: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,05g) con $M_{wrr}=6$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sismos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sismos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

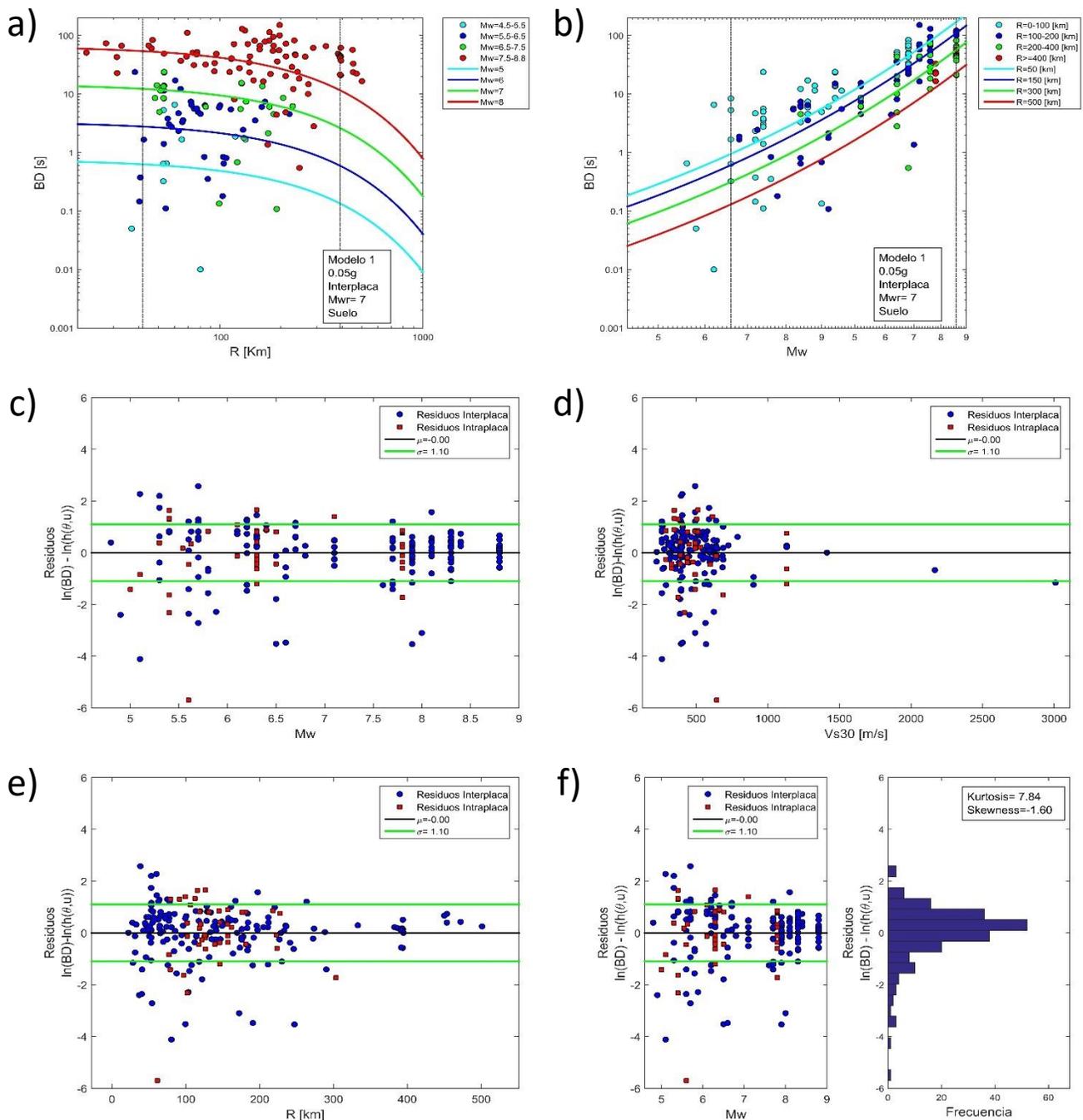


Figura D.28: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,05g) con $M_{wrr}=7$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sismos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sismos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

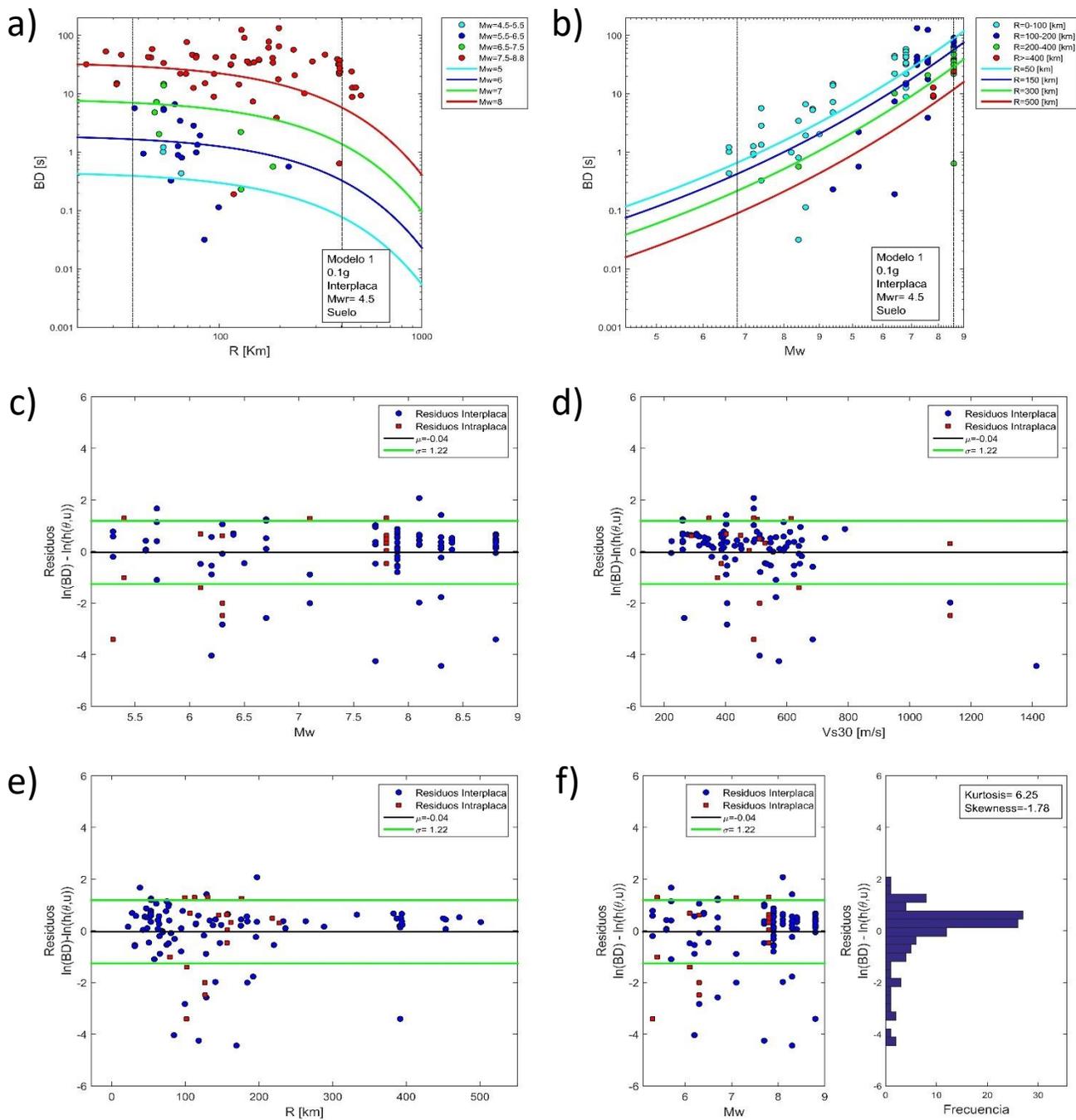


Figura D.29: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,1g) con $M_{wr}=4,5$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

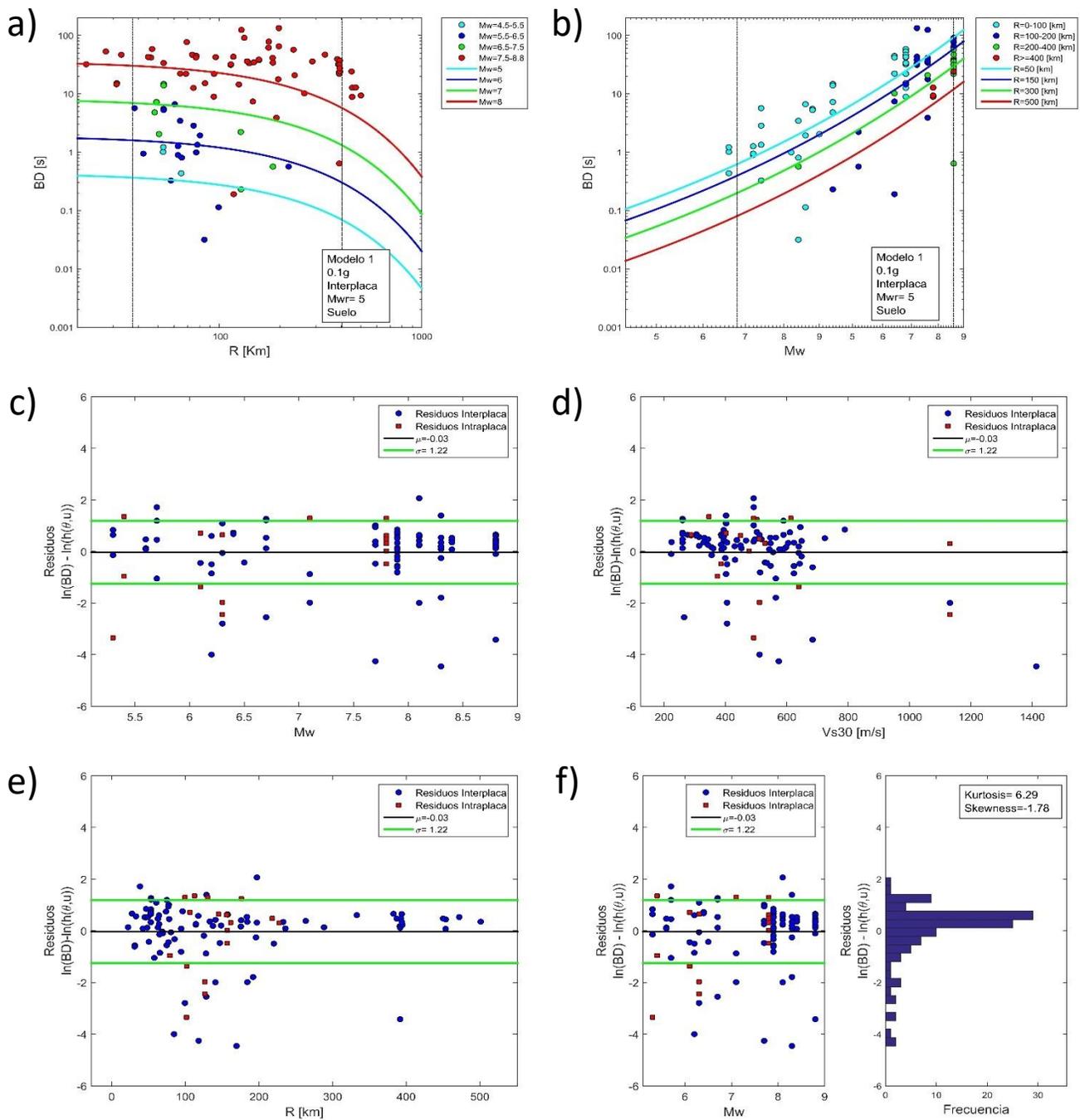


Figura D.30: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,1g) con $M_{wr}=5$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

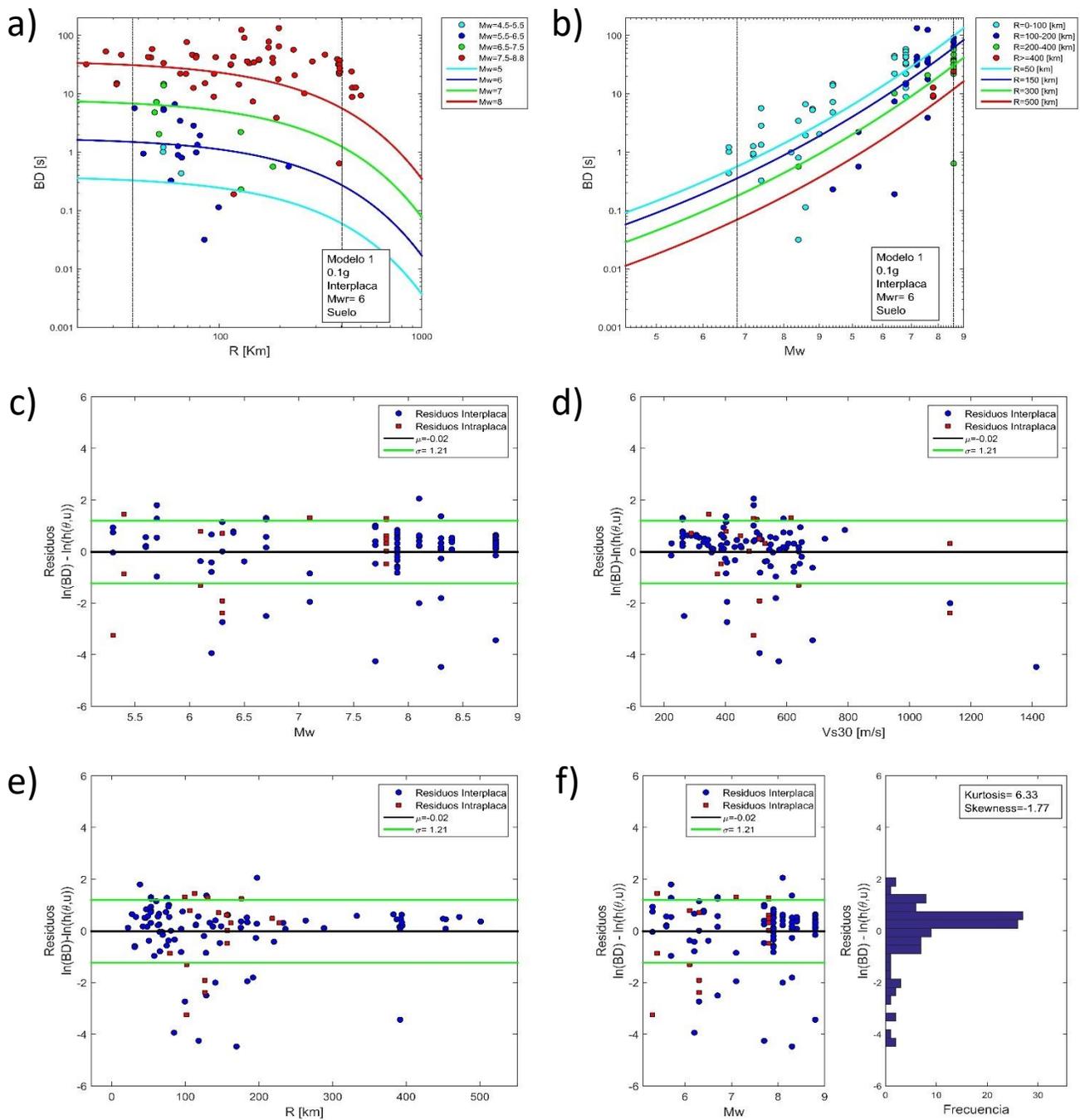


Figura D.31: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,1g) con $M_{wr}=6$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

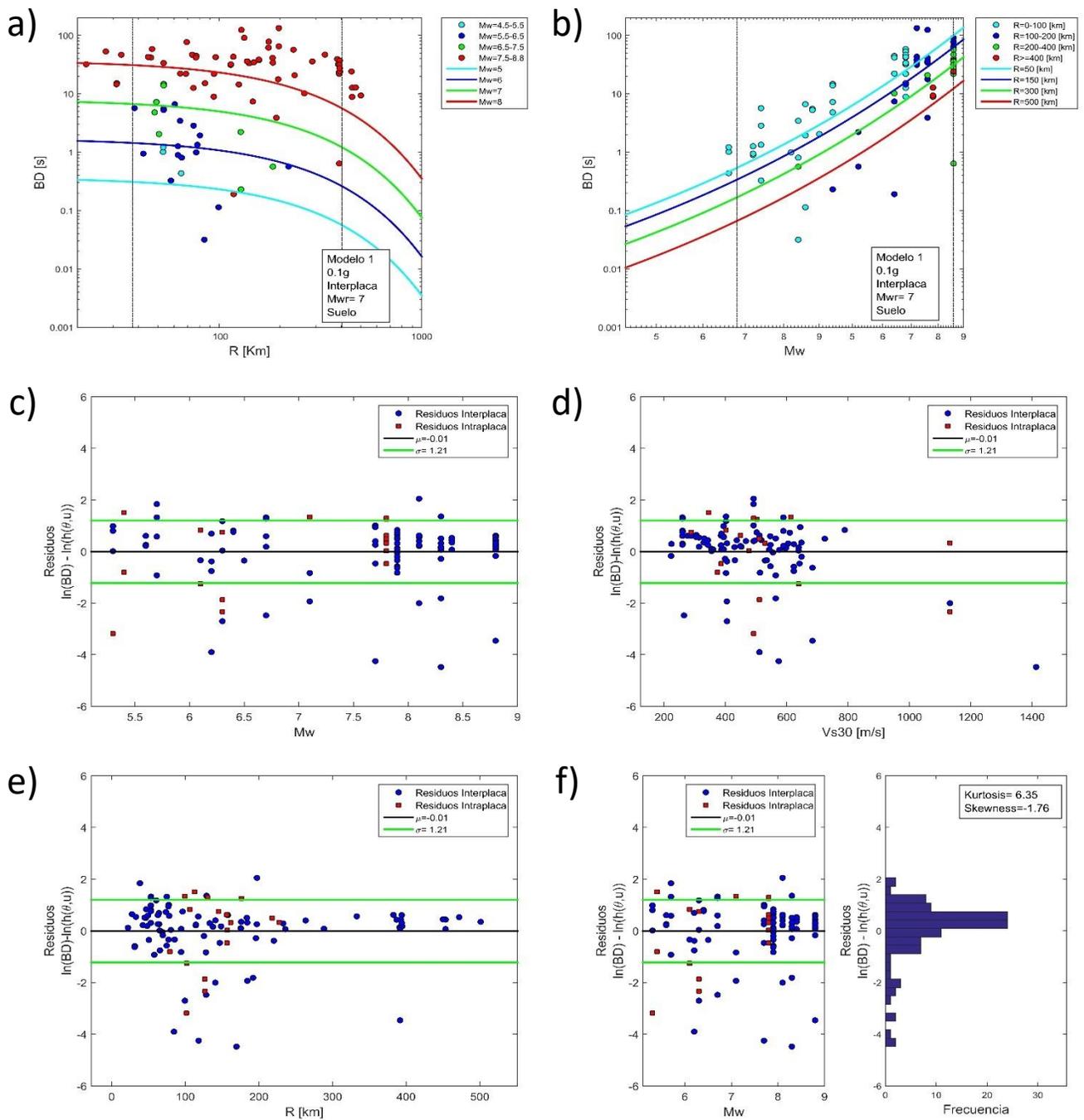


Figura D.32: Resultados curva de atenuación modelo 1 para duración entre intervalos (0,1g) con $M_{wr}=7$. a) Curva de atenuación BD vs R y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w y datos sísmos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

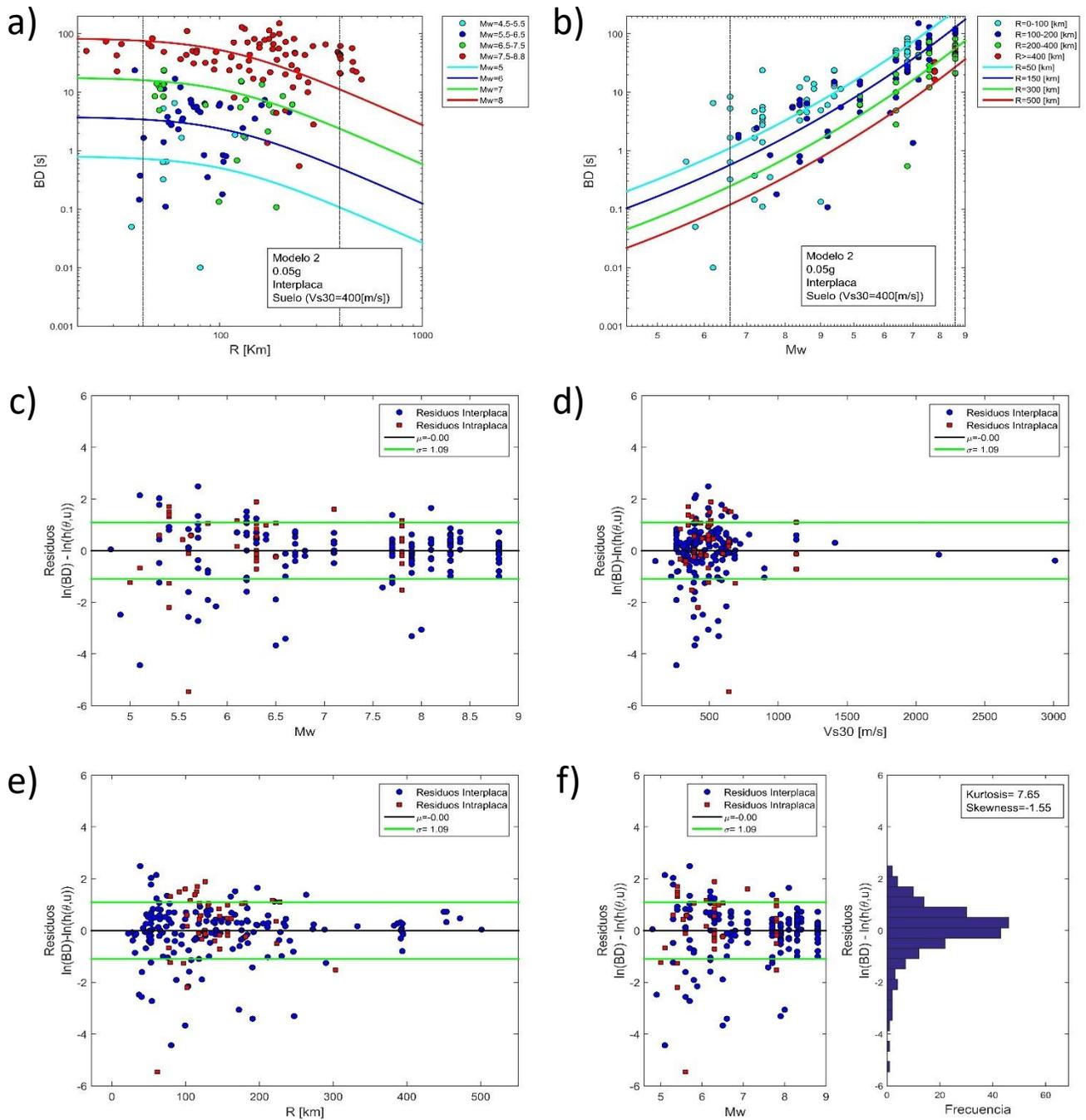


Figura D.33: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración entre intervalos (0,05g). a) Curva de atenuación BD vs R para sismos interplaca con $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w para sismos interplaca con $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

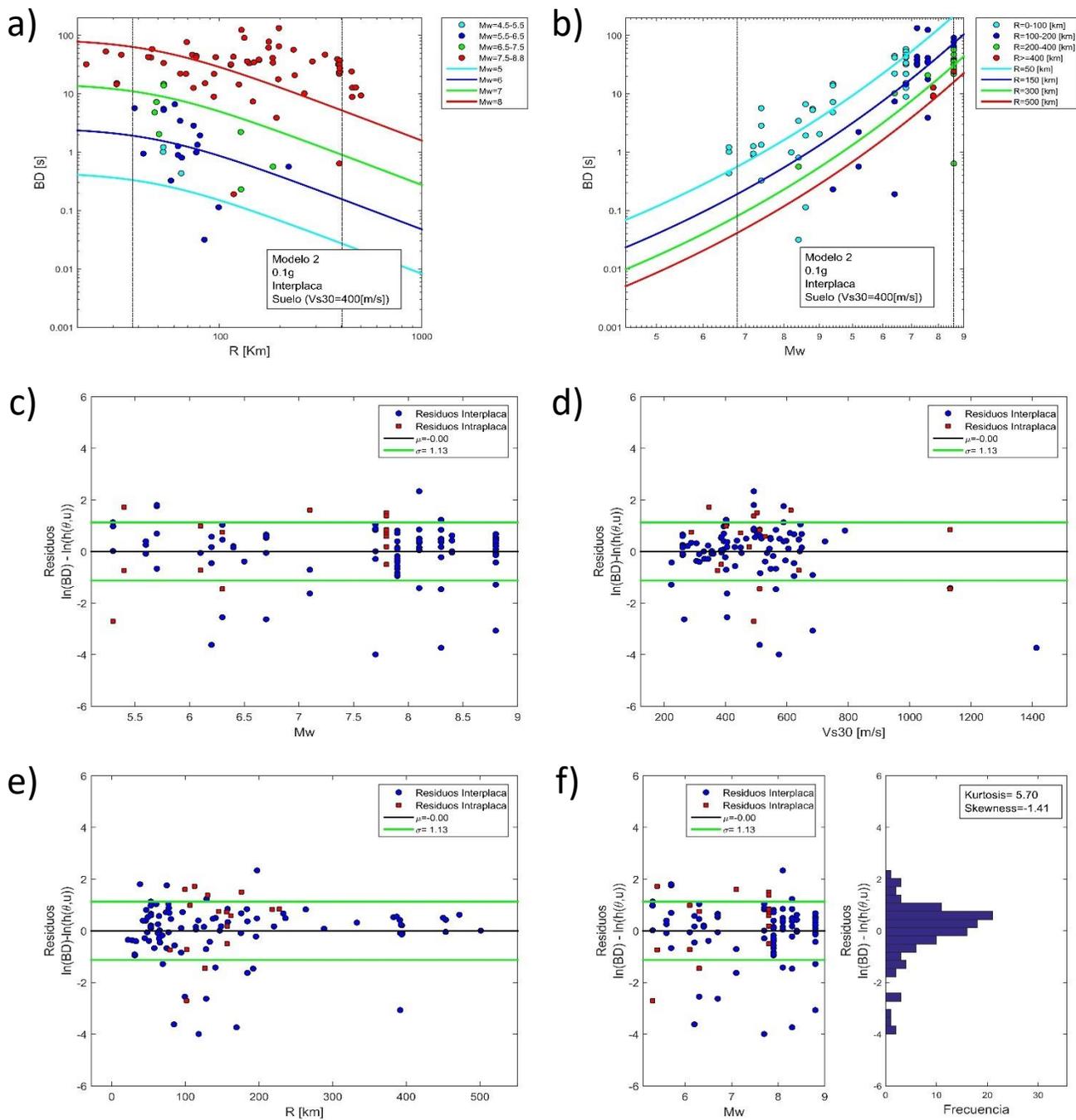


Figura D.34: Resultados curva de atenuación modelo 2 para duración entre intervalos (0,1g). a) Curva de atenuación BD vs R para sismos interplaca con $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca en sitios con suelo. b) Curva de atenuación BD vs M_w para sismos interplaca con $V_{s30}=400$ [m/s], datos sismos interplaca en sitios con suelo. c) Residuos de todos los datos utilizados vs M_w . d) Residuos de todos los datos utilizados vs V_{s30} . e) Residuos de todos los datos utilizados vs R . f) Histograma de los residuos de todos los datos utilizados.

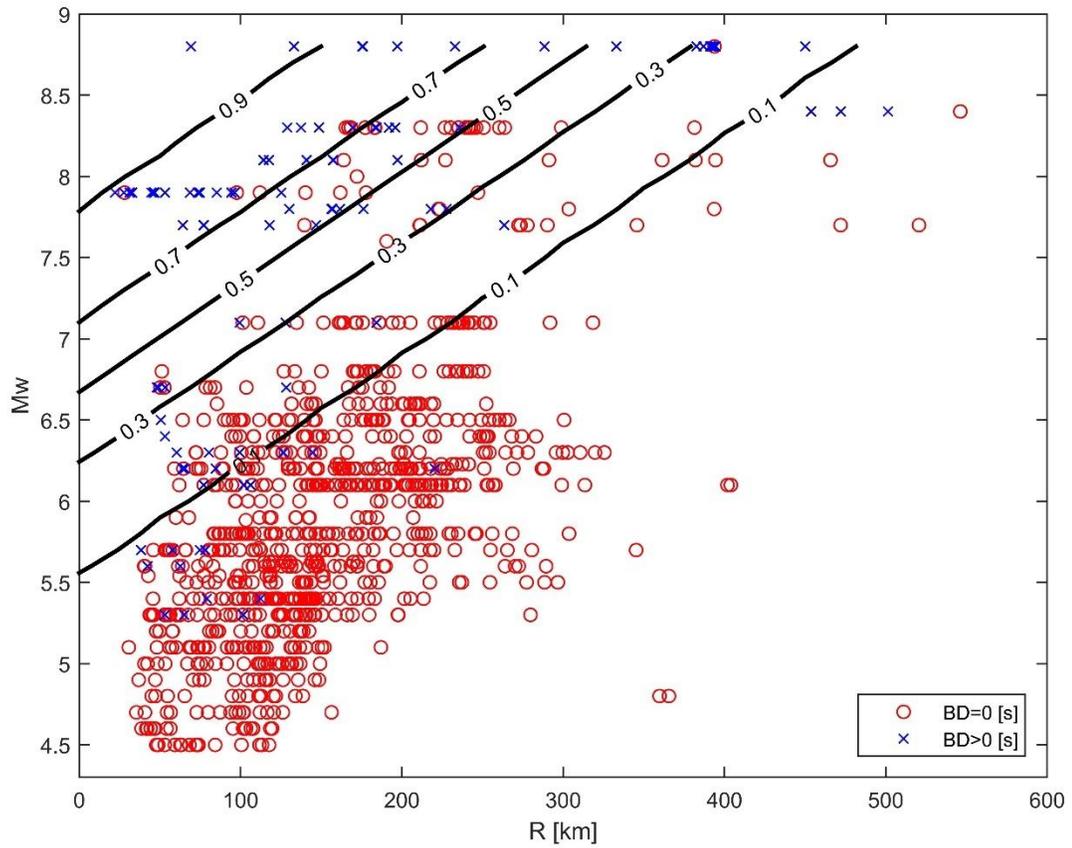


Figura D.35: Clasificación de duraciones entre intervalos utilizando el límite de 0,1g por medio del método de clasificación basado en *Support Vector Machine* (SVM).

Tabla D.4: Pendientes y coeficientes de posición para las rectas de probabilidad de la Figura D.35.

Probabilidad	m	n
0,9	0,007	7,8
0,7	0,007	7,1
0,5	0,007	6,7
0,3	0,007	6,3
0,1	0,007	5,6

D.4 Resultados curvas de excedencia de duración del movimiento fuerte para sitios con roca

En la Figura D.36 y Figura D.37 se muestran las curvas de excedencia para sitios con roca de los funcionales utilizados para la duración significativa y la duración entre intervalos respectivamente.

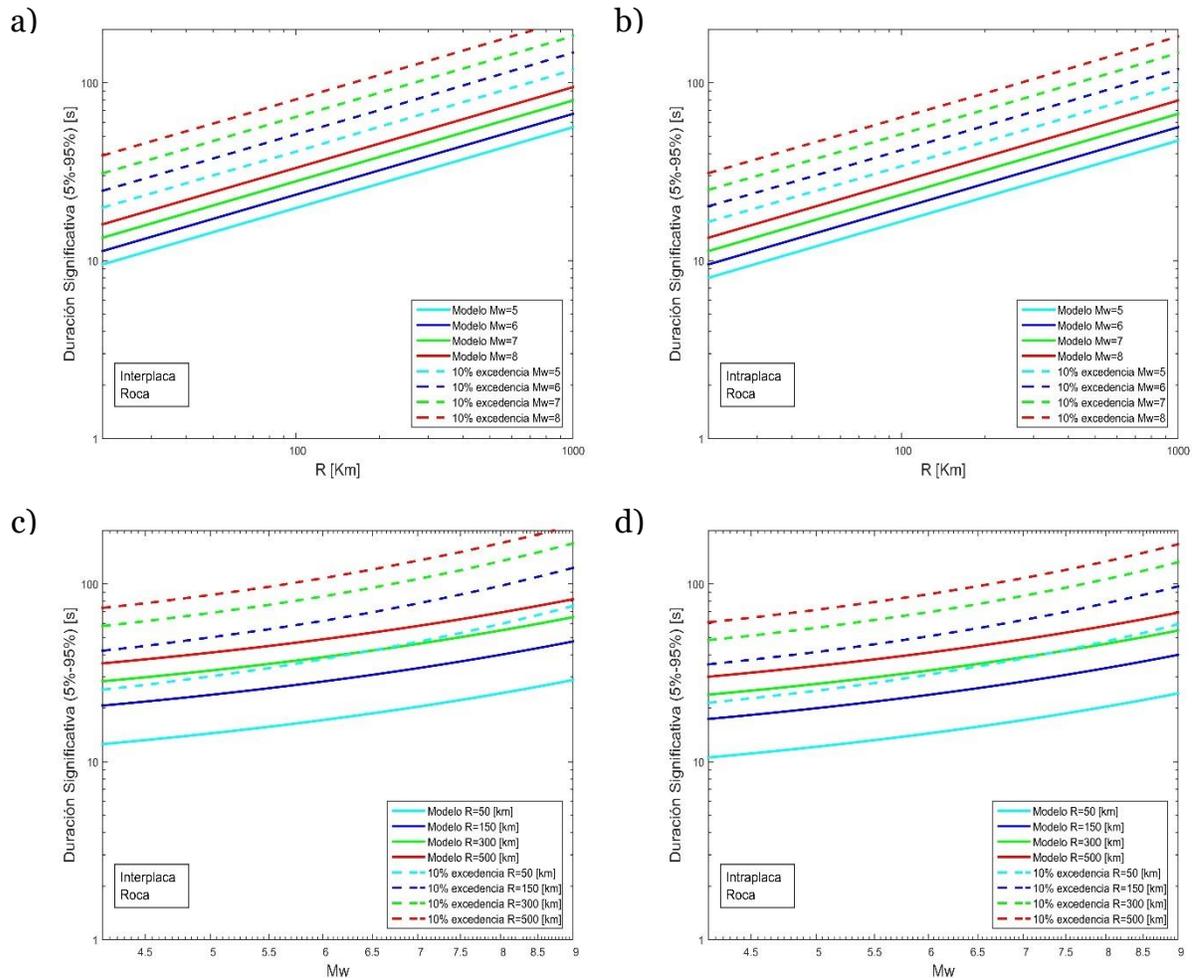


Figura D.36: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración significativa (5%-95%). a) Curva presentada como SD vs R , sismo interplaca, roca. b) Curva presentada como SD vs M_w , sismo interplaca, roca. c) Curva presentada como SD vs R , sismo intraplaca, roca. d) Curva presentada como SD vs M_w , sismo intraplaca, roca.

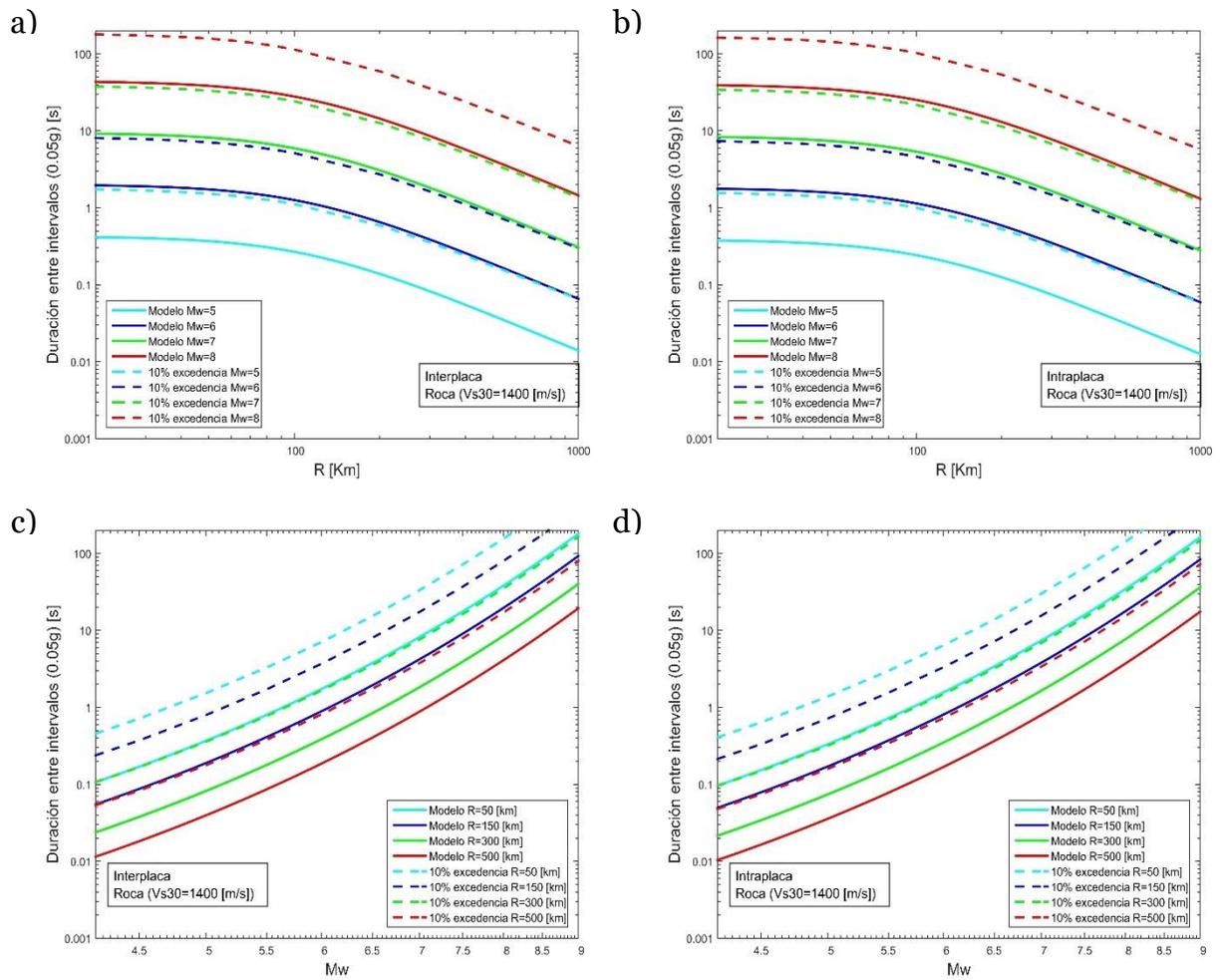


Figura D.37: Curva de excedencia para curvas de atenuación de duración entre intervalos (0,05g). a) Curva presentada como BD vs R, sismo interplaca, roca. b) Curva presentada como BD vs M_w , sismo interplaca, roca. c) Curva presentada como BD vs R, sismo intraplaca, roca. d) Curva presentada como BD vs M_w , sismo intraplaca, roca.