



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y DE PARÁMETROS DE ALERTA
TEMPRANA DE TERREMOTOS PARA LA ZONA DE IQUIQUE, NORTE
DE CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA

GIANINA ELISA MENESES PROVOSTE

PROFESOR GUÍA:
SERGIO RUIZ TAPIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAIME CAMPOS MUÑOZ
FELIPE LEYTON FLOREZ

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE: Magíster en Ciencias, Mención Geofísica
POR: Gianina Elisa Meneses Provoste
FECHA: 01/04/2014
PROFESOR GUIA: Sergio Ruiz Tapia

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y DE PARÁMETROS DE ALERTA TEMPRANA DE TERREMOTOS PARA LA ZONA DE IQUIQUE, NORTE DE CHILE

El presente trabajo estudia las características sísmicas del norte de Chile y la factibilidad de implementar un sistema de alerta temprana. La región de estudio se ubica alrededor de la ciudad de Iquique, zona localizada dentro de una laguna sísmica que no presenta un terremoto importante desde 1877 (M_W 8.8).

Esta tesis se divide en dos objetivos principales: el análisis de la sismicidad reciente ocurrida en la zona y la determinación de parámetros de alerta temprana de terremotos. Para esto se utilizan registros provenientes de una red sismológica temporal desplegada en la región con una alta densidad de estaciones. Con estos datos se obtuvieron hipocentros, magnitudes (M_L y M_W) y un subconjunto de mecanismos focales para un total de 366 eventos registrados por 27 estaciones en el periodo comprendido entre Enero de 2011 y Mayo de 2013.

Un 87% de los eventos analizados presenta profundidades por sobre 60 km, lo que muestra el predominio de terremotos intraplaca de profundidad intermedia en la zona. Sus mecanismos reflejan un cambio norte-sur desde un régimen extensivo a uno localmente compresivo alrededor de los 21.5° S, latitud que coincide con una variación en la profundidad de este tipo de eventos, situación que podría reflejar una perturbación local en la geometría de la placa subductada.

Los parámetros de alerta temprana son obtenidos a partir de porciones iniciales de la fase P para registros desde magnitudes M_W 4.0 determinadas en este trabajo, en conjunto con 13 eventos de magnitudes M_W sobre 6.0 ocurridos dentro y alrededor de la zona de estudio. Estos corresponden al periodo característico (τ_c), el pick de desplazamiento (PD), el pick de velocidad (PV) y la integral de la velocidad al cuadrado ($IV2$), para los cuales es evaluada su correlación con la magnitud final M_W obtenida. El escalamiento entre la magnitud y los parámetros basados en la amplitud y la energía liberada muestran mejores resultados que aquellos basados en el contenido de frecuencia de la señal.

En el marco de una posible implementación de un sistema de alerta temprana para el cálculo de la magnitud en tiempo real en el norte de Chile, es el pick de desplazamiento (PD) el que muestra la mejor correlación con la magnitud, cuya precisión es mejorada a medida que aumenta la ventana de observación situada en los primeros segundos a partir de la llegada de la onda P.

“Paz sobre la constelación cantante de las aguas
Entrechocadas como los hombros de la multitud
Paz en el mar a las olas de buena voluntad
Paz sobre la lápida de los naufragios
Paz sobre los tambores del orgullo y las pupilas tenebrosas
Y si yo soy el traductor de las olas
Paz también sobre mí...”

Extracto de “Monumento al mar” (V. Huidobro)

*A mis padres
A mi familia
A los amigos presentes y en la lejanía cercana
A mi lobo...*

Agradecimientos

En primer lugar me refiero a mis más cercanos, a mi familia. Les agradezco a mis papás, hermana, sobrinos, abue, tías, tíos, primas y primos, por su firme compañía y apoyo a pesar de mis prolongadas ausencias.

A los amigos, que nunca sentí lejos porque hicieron el valioso y constante trabajo de recordármelo. Gracias Jaime, Alma, Andrés, Viviana, Natu y Natalia que soportaron hasta el final. A los que no están cerca ahora, gracias de todas maneras por ser parte más que importante en muchos momentos.

En el plano profesional quiero agradecer en primer lugar a mi profesor guía, Sergio Ruiz, que fue fundamental en el desarrollo de este trabajo. Su apoyo, consejos y carácter cercano, características muy valoradas desde la perspectiva de un alumno, fueron impulsores para continuar hasta el final. Muchas gracias a Monika Sobiesiak por entregarme el fruto de su trabajo, los datos sísmicos que dieron origen a esta Tesis, además de su amistad. Asimismo quiero expresar mi gratitud a Raúl Madariaga, por sus comentarios siempre tan certeros, por el tiempo dedicado y finalmente por su paciencia y confianza. Agradezco enormemente a Jaime Campos por integrarme al Departamento de Geofísica, incluso antes de comenzar el programa de Magister. Por ponerme a prueba innumerables veces, por enseñarme a tomar todas las oportunidades sin miedo y por las palabras de apoyo en los momentos más difíciles.

Sin duda hay muchas personas que fueron parte de este proceso durante los últimos años. Anne Lemoine, que fue tan amigable y acogedora en mi primera experiencia fuera de Chile, María, Christos y Susanne, mi apoyo a 12.000 km, y todos los integrantes del Centro Sismológico que aprendí a conocer en los dos años que fui parte de este, en especial Héctor Massone que me enseñó sus técnicas para el tratamiento de datos desde el primer día que pisé el DGF, y Luis Alvear que se transformó en un excelente amigo.

Por último, aunque en el fondo es lo primero, te doy las gracias a ti mi lobo compañero por ser parte de todo esto, sin ti nada hubiera sido posible.

Tabla de contenido

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de contenido	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
1. Introducción	1
1.1. Contexto general	1
1.2. La región de estudio	4
1.2.1. Escenario tectónico	4
1.2.2. Revisión de la sismicidad en la región	5
1.3. Objetivos	8
1.4. Estructura de la tesis	9
2. Base de datos para en norte de Chile	11
2.1. Introducción	11
2.2. Origen y características de los datos	11
2.3. Herramientas para el tratamiento de datos sísmicos	15
2.3.1. Seismic Analysis Code (SAC)	15
2.3.2. Software FilterPicker	15
2.3.3. Qmerge	16
2.4. Método	16
2.5. Resultados y comentarios	18
3. Localización de eventos sísmicos	19
3.1. Introducción	19
3.2. El problema de localización de terremotos	20
3.2.1. Métodos lineales de localización	20
3.2.2. Métodos de localización probabilística	21
3.3. Softwares útiles en el proceso de localización	22
3.3.1. SeisGram2K	22
3.3.2. El programa de localización NonLinLoc	22

3.4.	Creación de catálogos sísmicos	24
3.5.	Resultados	26
3.5.1.	Localización de la base de datos exhaustiva	26
3.5.2.	Localización de la base de datos principal	26
3.6.	Discusión y conclusiones	35
4.	Cálculo de magnitud local, magnitud de momento y mecanismos focales	36
4.1.	Introducción	36
4.2.	Magnitud local	37
4.2.1.	Escala empírica de magnitud local	37
4.2.2.	Cálculo de la magnitud local para la base de datos principal	38
4.2.3.	Comparación con magnitudes obtenidas por el Centro Sismológico	40
4.3.	Magnitud de momento	41
4.3.1.	Energía de deformación y momento sísmico	41
4.3.2.	Análisis espectral	42
4.3.3.	Cálculo de la magnitud de momento para la base de datos principal	43
4.3.4.	Comparación de M_W con la magnitud local	49
4.4.	Mecanismos focales	50
4.4.1.	Geometría de una falla para un modelo de fuente puntual	50
4.4.2.	Método de polaridades de la primera llegada	51
4.4.3.	FOCMEC: programa para la determinación de mecanismos focales	52
4.4.4.	Cálculo de mecanismos focales para la base de datos principal	53
4.4.5.	Resultados y discusión	54
5.	Parámetros de alerta temprana de terremotos para la zona de Iquique, norte de Chile	60
5.1.	Introducción	60
5.2.	Parámetros de alerta temprana analizados	61
5.2.1.	Periodo característico (τ_c)	61
5.2.2.	Peak de desplazamiento (PD) y su variación en velocidad (PV)	62
5.2.3.	Integral de la velocidad al cuadrado ($IV2$)	63
5.3.	Características de los datos utilizados	63
5.3.1.	Base de datos principal	64
5.3.2.	Eventos grandes	64
5.4.	Distintos procedimientos en el tratamiento de señales	66
5.4.1.	Periodo característico τ_c	66
5.4.2.	Peak de desplazamiento PD y velocidad PV	68
5.4.3.	Integral de la velocidad al cuadrado $IV2$	68
5.5.	Resultados	72
5.5.1.	Correlación entre magnitud y los parámetros τ_c , PD e $IV2$	72
5.5.2.	Ajuste diferenciado por tipo de eventos	80
5.5.3.	Variaciones del parámetro PD	84
5.6.	Discusión y conclusiones	88
6.	Conclusiones generales	90
	Referencias	92

A. Programas	98
A.1. Programa CALCML.py	98
A.2. Programa CALCMW.py	101
A.3. Programa CALCFM.py	106
A.4. Programa CALCTC.py	109
A.5. Programa CALCPD.py	114
A.6. Programa CALCIV2.py	118
B. Catálogo base de datos principal	123

Índice de tablas

2.1.	Descripción de Parámetros FilterPicker.	16
2.2.	Parámetros FilterPicker utilizados para los dos tipos de bases de datos creadas. . .	18
4.1.	Características del instrumento Wood-Anderson	39
4.2.	Información de los 3 eventos ejemplo en el cálculo de M_W	48
5.1.	Detalle sobre 13 eventos de magnitudes superiores a 6.0 para el periodo 2007-2012	64
5.2.	Valores de los coeficientes de ajuste lineal entre $\log(\tau_c)$ y magnitud	74
5.3.	Valores de los coeficientes de ajuste lineal entre $\log(PD)$ y magnitud	75
5.4.	Valores de los coeficientes de ajuste lineal entre $\log(IV2)$ y magnitud	80
5.5.	Valores de los coeficientes de ajuste lineal para τ_c , PD e $IV2$ para un análisis por tipo de terremotos	84
5.6.	Coefficientes para el ajuste entre magnitud y PDPS.	85
5.7.	Coefficientes para el ajuste entre magnitud y PGD.	87
5.8.	Coefficientes para el ajuste entre la magnitud y PV	87

Índice de figuras

1.1.	Sismicidad en Chile durante el año 2013	2
1.2.	Tipo de sismos en la zona de subducción chilena	3
1.3.	Rasgos morfotectónicos de la zona de estudio.	4
1.4.	Laguna sísmica del norte de Chile.	6
1.5.	Eventos del catálogo NEIC 1973-2014 diferenciados por magnitud	7
1.6.	Mecanismos focales para eventos importantes ocurridos en el periodo 1973-2014 para el norte de Chile (catálogo CMT)	8
2.1.	Distribución de la red de monitoreo del proyecto IPOC.	12
2.2.	Distribución de estaciones sismológicas para la red local ILN.	13
2.3.	Conjunto de estaciones utilizadas pertenecientes a diferentes redes sismológicas.	14
2.4.	Picks detectados por el programa FilterPicker en un día de sismicidad para los parámetros de la base de datos exhaustiva.	17
3.1.	Modelo de velocidades utilizado. Corresponde al modelo obtenido a partir de los datos del terremoto de Antofagasta 1995.	25
3.2.	25 días de sismicidad y sus respectivos errores en el espacio usando NonLinLoc como herramienta de localización.	27
3.3.	Histogramas con la localización NonLinLoc de eventos sísmicos ocurridos durante los primeros 25 días de Octubre de 2011.	28
3.4.	Histograma con el número de estaciones usadas para la localización por evento para base de datos exhaustiva.	28
3.5.	Comparación entre localizaciones probabilística y la correspondiente al Centro Sismológico Nacional para eventos ocurridos durante Octubre de 2011.	29
3.6.	Hipocentros de un total de 366 eventos ocurridos en el periodo Enero de 2011 y Mayo de 2013. Errores en el espacio para localización de eventos importantes ocurridos en el periodo de estudio.	30
3.7.	Histogramas con datos de la localización NonLinLoc de eventos sísmicos ocurridos entre Enero de 2011 y Mayo de 2013.	31
3.8.	Histograma con el número de estaciones usadas para la localización por evento para la base de datos principal.	31
3.9.	Comparación entre localizaciones probabilística y la correspondiente al Centro Sismológico Nacional para eventos importantes en el periodo que comprende este estudio.	32
3.10.	Imagen 3D norte-sur de la sismicidad y errores representados por el elipsoide de 68% de confianza.	33

3.11. Imagen 3D este-oeste de la sismicidad y errores representados por el elipsoide de 68 % de confianza.	33
3.12. Distintos tipos de eventos y su función densidad de probabilidad para la base de datos principal.	34
4.1. Valores empíricos de la curva de atenuación para el sur de California para el cálculo de la magnitud local	38
4.2. Ajuste lineal entre las magnitudes locales obtenidas y las determinadas por el Centro Sismológico Nacional	40
4.3. Análisis espectral de un evento de magnitud M_L inferior a 4.0	46
4.4. Análisis espectral de un evento de magnitud M_L 4.6	47
4.5. Análisis espectral de un evento de magnitud M_L superior a 5.0	48
4.6. Componentes E-W saturadas para 2 eventos magnitud M_W 5.4 y 6.0 respectivamente	49
4.7. Correlación entre magnitudes de momento y local	50
4.8. Parámetros que describen la geometría de una falla.	51
4.9. Patrón de radiación para la onda P debido a una fuente puntual representada por dos pares de fuerzas	52
4.10. Coeficiente de confiabilidad de 3 esferas focales características de la base de datos principal	54
4.11. 138 mecanismos focales obtenidos para la base de datos principal	55
4.12. Mecanismo <i>strike-slip</i> del evento de Cartagena 2014	56
4.13. Grado de confiabilidad de los mecanismos obtenidos y su carácter compresional o extensional	57
4.14. Sección de corte en Torno a la zona de Iquique	58
5.1. Ubicación de los eventos grandes con respecto a la localización de la base de datos principal	65
5.2. 3 componentes en velocidad para registros que representan dos tipos de eventos característicos en la región	67
5.3. Módulo cuadrado del desplazamiento y la velocidad necesarios en el cálculo de τ_c , para dos eventos característicos	69
5.4. Ejemplo de módulo del desplazamiento para las formas de onda correspondientes a dos eventos característicos	70
5.5. Ejemplo de módulo de la velocidad al cuadrado para las formas de onda correspondientes a dos eventos característicos	71
5.6. Correlación entre el parámetro τ_c y la magnitud para 345 eventos	74
5.7. Correlación entre el parámetro PD y la magnitud para 345 eventos	75
5.8. 2 eventos M_W 5.8 con extremas diferencias en el valor de PD calculado	77
5.9. Módulo del desplazamiento para registro cercano al terremoto 7.7 de Tocopilla	78
5.10. Correlación entre el parámetro $IV2$ y la magnitud para 345 eventos	79
5.11. Comportamiento de τ_c según el tipo de evento	81
5.12. Comportamiento de PD según el tipo de evento	82
5.13. Comportamiento de $IV2$ según el tipo de evento	83
5.14. Ajuste diferenciado por tipo de evento entre la magnitud y PD calculado para toda la fase P (PDPS)	85
5.15. Relación entre PD y PDPS	85

5.16. Ajuste diferenciado por tipo de evento entre la magnitud y <i>PD</i> calculado para la totalidad del registro (PGD).	86
5.17. Relación entre PGD y PD	86
5.18. Ajuste diferenciado por tipo de evento entre la magnitud y <i>PV</i> calculado para una ventana de 4 segundos.	87

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto general

Chile se encuentra ubicado en una zona de subducción donde se produce la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana y es uno de los lugares más activos sísmicamente en el mundo. Es en este escenario donde tiene lugar el terremoto de mayor magnitud del que se tiene registro (Valdivia, $M_w = 9.5$ [Barrientos & Ward, 1990]), y donde se produce en promedio un evento de magnitud superior a 8.0 cada 10 años [Madariaga, 1998]. Esta alta tasa de sismicidad queda reflejada en la figura (1.1), donde se observan más de 5000 sismos ocurridos durante el año 2013.

La subducción chilena presenta terremotos a distintas profundidades: superficiales (menos de 70 km), intermedios (70-300 km) y profundos (sobre 300 km) (rangos según Stein & Wysession [2009]) y pueden producirse en el interior de las placas (intraplaca) o en el contacto entre estas (interplaca). Los primeros corresponden a: sismos superficiales en la placa de Nazca, resultado de la flexión de la placa antes de subductar, sismos superficiales en la placa Sudamericana, que se producen debido a los esfuerzos a los que está sometida, y sismos de profundidad intermedia, que ocurren específicamente en la placa subductada.

Los denominados terremotos de contacto o tipo *thrust* (falla inversa de bajo ángulo), son terremotos interplaca que se producen como resultado de la liberación de los esfuerzos acumulados en la interfase acoplada (ver figura 1.2).

La sismicidad en Chile es mayoritariamente del tipo interplaca tipo *thrust* e intraplaca de profundidad intermedia [Madariaga, 1998]. Los primeros son predominantes en la región y representan un peligro para la población por ser terremotos de grandes magnitudes capaces de generar grandes tsunamis como el terremoto del Maule 2010 o Valdivia 1960. Sin embargo hay que tener en cuenta que los terremotos de profundidad intermedia han sido los más destructivos (por ejemplo Chillán 1939 [Astroza *et al.* , 2005]).

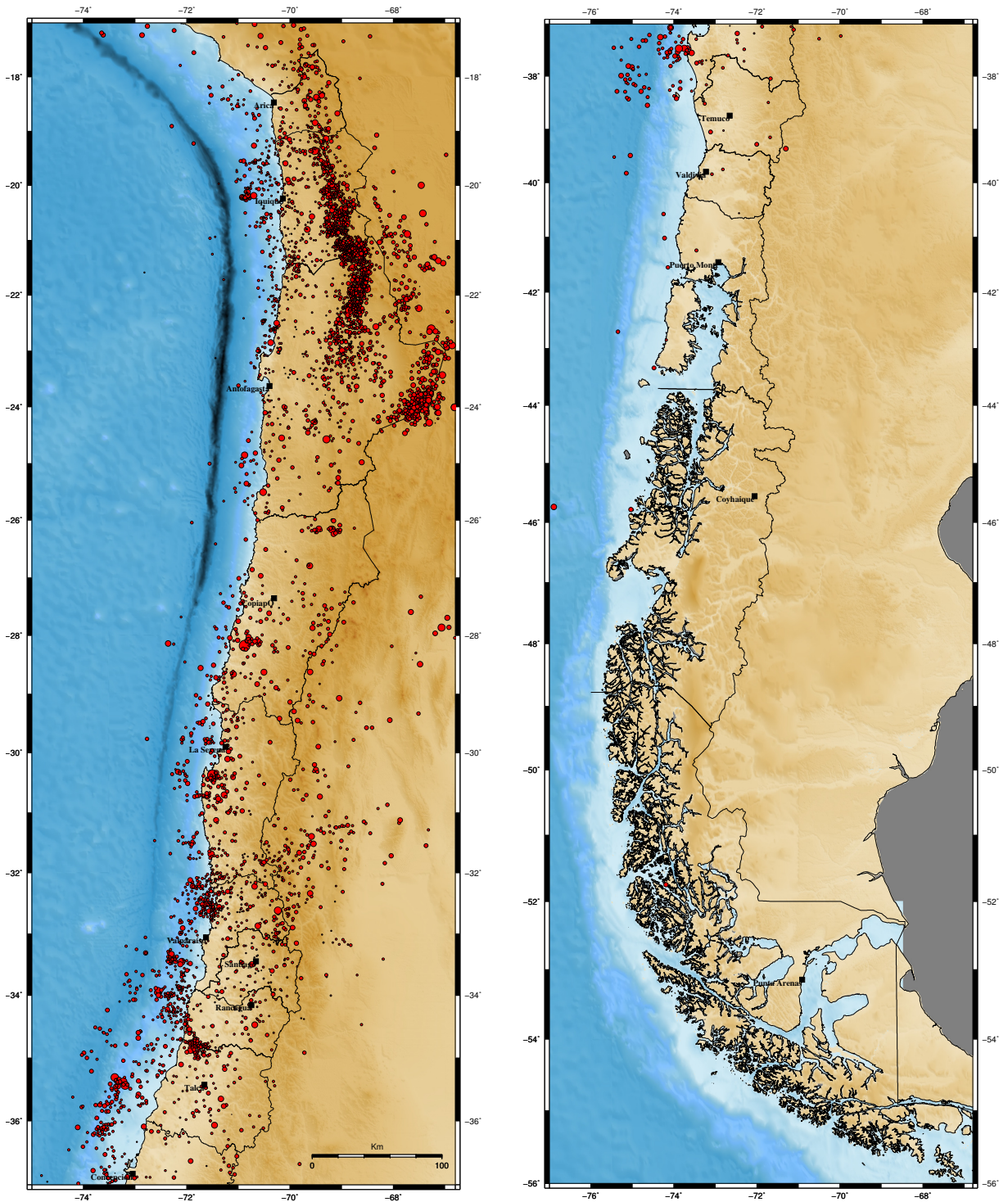


Figura 1.1: Sismicidad ocurrida a lo largo de todo Chile durante el año 2013 obtenida a partir del catálogo del Centro Sismológico Nacional. El tamaño de los círculos rojos que representan los terremotos, muestra la magnitud relativa entre cada evento.

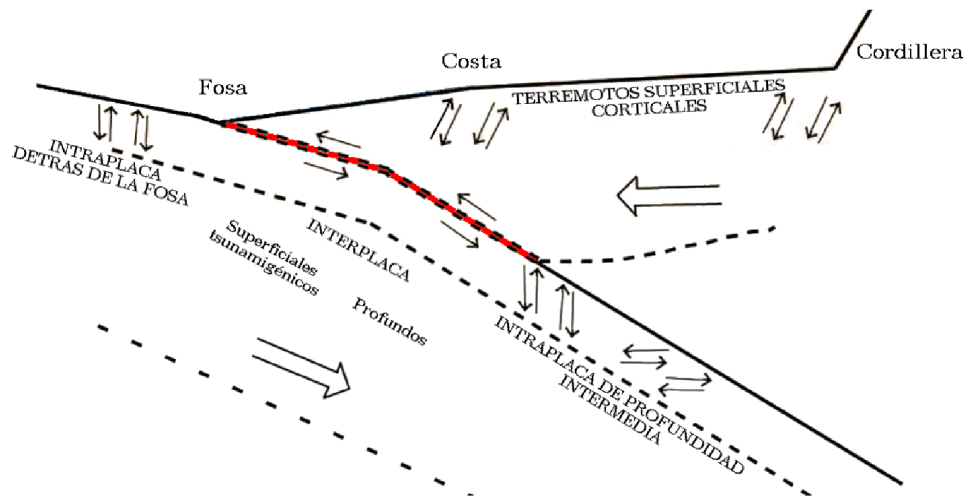


Figura 1.2: Esquema que muestra el perfil de una zona de subducción tipo chilena y el tipo de terremotos producidos en esta. Se indica la ubicación de sismos intraplaca superficiales y de profundidad intermedia e interplaca tipo thrust. La zona marcada en rojo representa la interfase de contacto entre placas, superficie donde se generan los terremotos más dañinos para la población. Figura modificada de Ruiz, S. y Madariaga, R. (2012).

Utilizando información histórica y datos sísmicos, trabajos como los de Kelleher [1972]; Kausel [1986]; Comte & Pardo [1991] identifican distintas zonas en la subducción chilena donde no se han presentado mega terremotos en el transcurso de varias décadas. Estas extensas áreas son denominadas como lagunas sísmicas, es decir, lugares probables para la ocurrencia de un futuro gran terremoto. Según este punto de vista, el norte de Chile es una laguna sísmica aparentemente madura teniendo en cuenta que el último terremoto de subducción importante ocurrido en la zona data de 1877 (M_W 8.9) [Kausel, 1986; Comte & Pardo, 1991].

Dada la alta probabilidad de ocurrencia de un gran terremoto en la zona norte, esta tesis se enmarca en el análisis de la sismicidad de la región correspondiente al *gap* sísmico del norte de Chile. Una de las ventajas que se tomó en cuenta para comenzar esta investigación fue la existencia de datos de excelente calidad provenientes de una red sismológica temporal con una alta densidad de estaciones. Esta última, llamada *Iquique Local Network* (ILN), es parte de un proyecto que ha mantenido instrumentos sísmicos en la región desde el año 2006 (*Integrated Plate boundary Observatory Chile* (IPOC)) y está ubicada específicamente en los alrededores de Iquique.

De esta manera, los datos utilizados en este trabajo pertenecen al periodo comprendido entre Enero de 2011 y Mayo de 2013 en el cual la red ILN se mantuvo activa. En base a estos, que corresponden a registros continuos de un día de duración, se relocaliza la sismicidad de la zona y se determinan algunas de sus características como sus mecanismos y magnitudes local y de momento, siendo esta última utilizada para estudiar el comportamiento de los principales parámetros de alerta temprana de terremotos.

1.2. La región de estudio

1.2.1. Escenario tectónico

La laguna o *gap* sísmico del norte de Chile (18° y 23° S), ubicada en los Andes Centrales (ver figura (1.3)), se encuentra dominada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana a una actual velocidad de convergencia aproximada de 6.3 cm/a de dirección 79° N E [Kendrick *et al.*, 2003]. Una velocidad un tanto mayor de 6.8 cm/a ha sido determinada por Vigny *et al.* [2009] como promedio en los Andes Centrales.

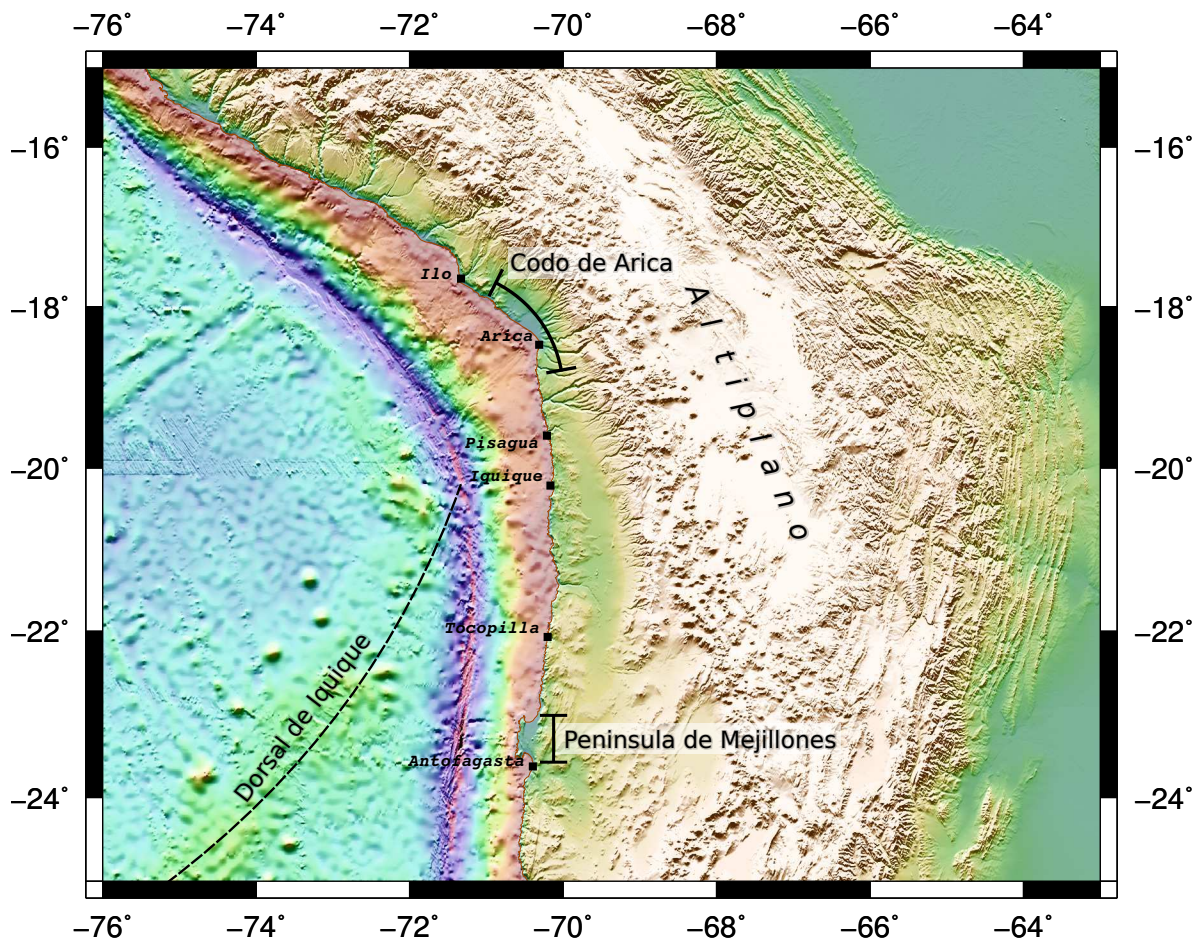


Figura 1.3: Rasgos morfoestructurales de la región de estudio. El codo de Arica y la península de Mejillones se muestran como grandes estructuras que delimitan la zona denominada como *gap* sísmico en norte de Chile. Otras estructuras como la dorsal de Iquique, entre otras alturas y depresiones batimétricas, se observan en la placa de Nazca. El ensanchamiento de los Andes y la presencia del Altiplano son claras características de la zona de estudio.

La morfología de la región está caracterizada por la presencia del Altiplano, una cuenca intermontana elevada ubicada en la cordillera de los Andes de anómalo grosor cortical. Este engrosamiento anómalo (hasta 10 km) que el acortamiento en la zona no es capaz de explicar por completo, podría deberse al fenómeno de *underplating* o adherencia de material tectónicamente erodado del margen continental [Baby *et al.* , 1997].

La litósfera oceánica subductada en este margen erosivo se caracteriza por tener una edad de aproximadamente 48 Ma [Müller *et al.* , 1997], la más antigua a lo largo de la costa chilena. Una dorsal (*ridge*) asísmica denominada como dorsal de Iquique subducta bajo el continente, fenómeno que a diferencia de lo que ocurre producto de la subducción de las dorsales de Nazca (al norte) y Juan Fernández (al sur), no está asociado a subducción plana o *flat slab* y por ende ausencia de volcanismo.

La zona se encuentra delimitada por dos grandes estructuras. La primera, en el límite sur, corresponde a la península de Mejillones, una planicie elevada que se presenta como una anomalía en la costa chilena. En el límite norte está el codo de Arica, lugar donde se produce un cambio en la dirección de convergencia de NNE a NW. Ambas estructuras geológicas han sido consideradas por algunos autores como posibles barreras sísmicas para mega terremotos de contacto [Chlieh *et al.* , 2004; Loveless *et al.* , 2010; Victor *et al.* , 2011; Metois *et al.* , 2012].

Estudios recientes sobre el acoplamiento intersísmico en la región corroboran la hipótesis de que la zona norte de Chile posee un elevado potencial sísmico, sin embargo, existen diferencias en los resultados obtenidos. [Chlieh *et al.* , 2011; Béjar-Pizarro *et al.* , 2013] determinan un alto índice de acoplamiento sísmico (ISC) para toda la zona norte, decreciendo ligeramente frente a las costas de Iquique y Arica. Métois *et al.* [2013] propone una segmentación del acoplamiento en la región, determinando zonas de bajo ISC coincidentes con las zonas de Iquique y Mejillones.

1.2.2. Revisión de la sismicidad en la región

Parte de la costa Pacífico de América del Sur, específicamente entre los 15° y 24°, es considerada como una gran laguna sísmica [Kelleher, 1972; Nishenko, 1985; Comte & Pardo, 1991] (ver figura (1.4)). Para la zona correspondiente al sur de Perú, se tiene registro de la ocurrencia de numerosos terremotos tsunamigénicos, a diferencia de lo que se sabe para el norte de Chile, donde existe solo un registro histórico con datos concluyentes.

Con un tiempo de recurrencia de 130 años promedio, varios mega terremotos *thrust* sobre magnitud 8.4 venían azotando las costas peruanas antes del último registrado en 1868 de magnitud M_W 8.8 [Dorbath *et al.* , 1990], el cual habría causado una ruptura que se extendió entre los 16.5° S y los 19° S [Kausel, 1986]. Desde entonces otros eventos de menor magnitud han ocurrido en la zona, siendo el último el terremoto de Arequipa de 2001 que alcanzó una magnitud de 8.4.

Entre el codo de Arica y hasta la península de Mejillones, territorio chileno inmerso en el *gap* sísmico, el último mega terremoto de subducción del que se tiene registro ocurre en 1877 rompiendo la zona delimitada entre los 19° S y 22.5° S y alcanzando una magnitud de M_W 8.9 [Kausel, 1986; Comte & Pardo, 1991]. A partir de entonces, el único terremoto *thrust* de magnitud $M_W >$

7.5 en la zona tiene lugar en Tocopilla en el año 2007, el cual rompe un área confinada a la parte más profunda de la zona sismogénica (35 - 50 km) que parte en la costa 25 km al sur de Tocopilla y se propaga al sur y al norte (hasta la península de Mejillones) con un largo total de 150 km [Delouis *et al.* , 2009; Peyrat *et al.* , 2010]. Esta situación deja en evidencia la baja contribución de este terremoto en la ruptura del gap sísmico del norte de Chile, conservándose hasta el momento el potencial riesgo sísmico en la región.

Al sur de la gran ruptura de 1877, tuvo lugar el terremoto de subducción de Antofagasta en 1995 (M_W 8.1) con epicentro en la parte sur de la península de Mejillones y profundidad de 36 km a partir del cual rompe cerca de 180 km hacia el sur [Ruegg *et al.* , 1996]. Dicha ruptura se extiende entre 10 y 50 km de profundidad a lo largo de la zona sismogénica, a diferencia del evento de 2007 que no sube más allá de los 35 km.

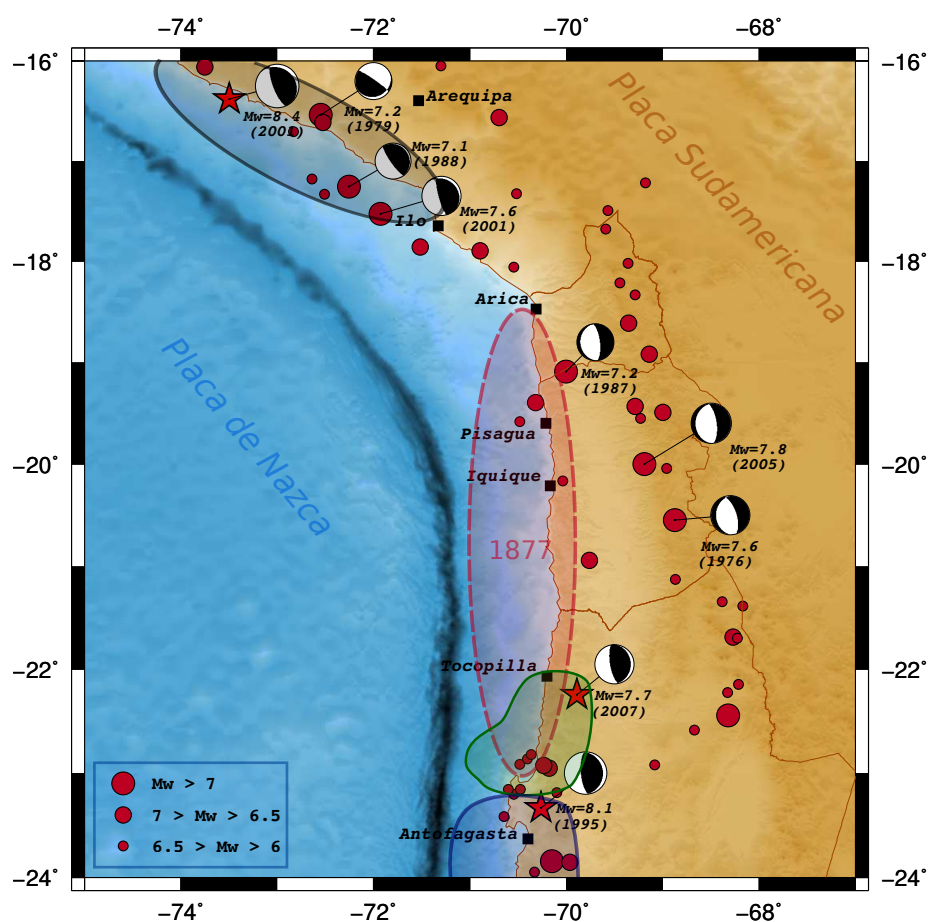


Figura 1.4: Sismicidad característica de la región. Los círculos rojos representan los eventos sobre magnitud 6.0 obtenidos a partir del catálogo NEIC (1973-2014). Se indican los mecanismos focales para eventos sobre magnitud 7.0 (catálogo CMT 1976-2014). Las estrellas corresponden a los epicentros de los últimos terremotos ocurridos dentro y en los límites de la laguna sísmica. Los contornos segmentados (terremoto histórico) y continuos (terremoto reciente), corresponden a ubicaciones aproximadas de las áreas de ruptura para los terremotos de 1877, M_W 8.9 (rojo), 2007 M_W 7.7 (verde), 2001 M_W 8.4 (negro) y 1995 M_W 8.1 (azul).

La alta sismicidad, propia del área de estudio, es expuesta en la figura (1.5). Específicamente se muestran todos los eventos sobre magnitud 4.5 registrados por USGS desde Enero de 1973 hasta Enero de 2014. Se observa una alta sismicidad intraplaca registrada de forma continua en la dirección NS en contraste con los terremotos interplaca que muestran una segmentación, con las latitudes aproximadas de 20° S y 23° S como las zonas donde existe una mayor concentración. Asimismo es posible notar como cambia la dirección norte-sur de la sismicidad, que sigue la curvatura de la fosa.

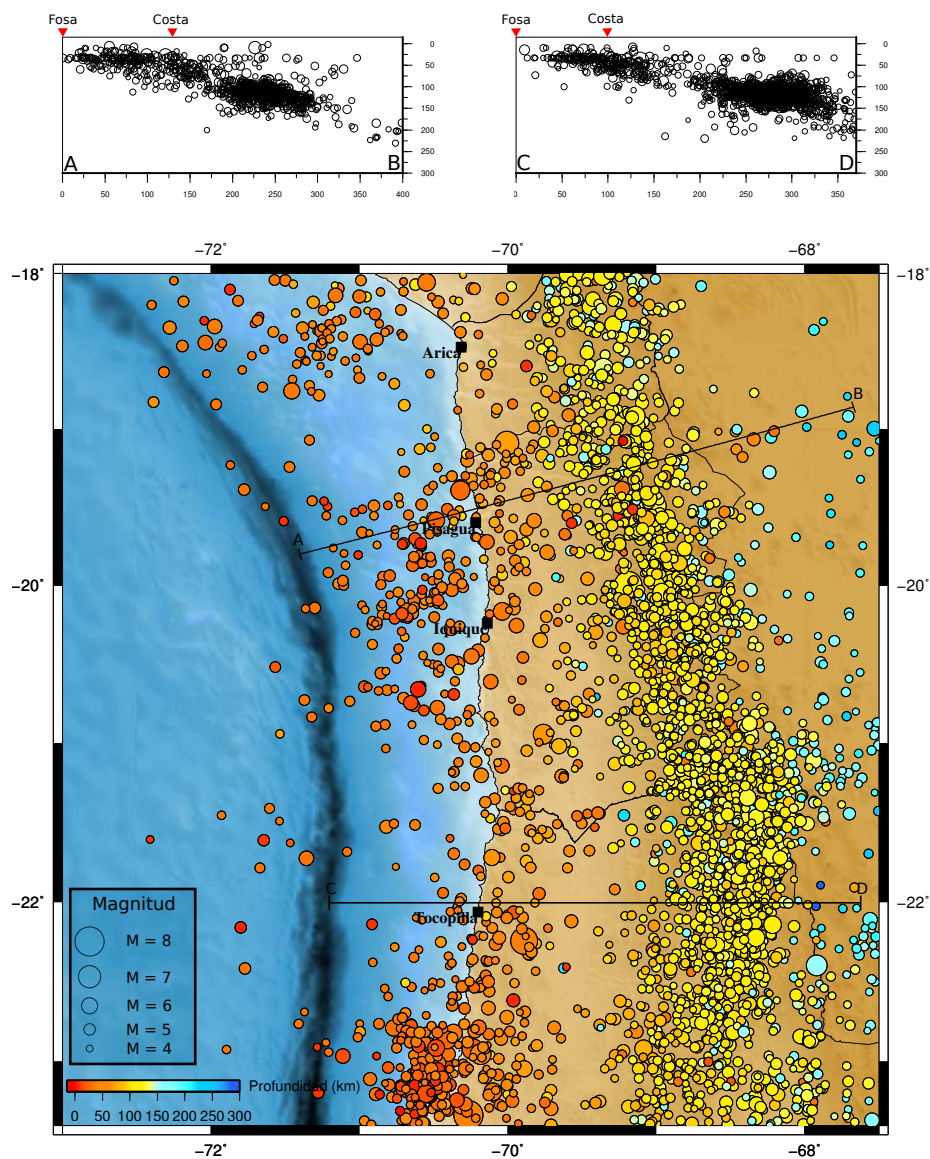


Figura 1.5: (Abajo) sismicidad en planta el norte de Chile (catálogo NEIC 1973-2014) representada por círculos diferenciados por profundidad (color) y magnitud (tamaño). Perfiles AB y CD corresponden a líneas que se encuentran a la altura de las ciudades de Pisagua y Tocopilla con una extensión de 400 y 370 km respectivamente. (Arriba) sismicidad vista en corte para los perfiles mencionados. Ambos tienen un ancho de 115 km por lado.

Mecanismos focales de terremotos ocurridos en la región obtenidos a partir del catálogo CMT (desde 1976 hasta enero de 2014) [Dziewonski *et al.*, 1981; Ekström *et al.*, 2012] se muestran en la figura 1.6. En su mayoría corresponden a eventos de mecanismo inverso para la zona de contacto y de fallamiento normal para terremotos intraplaca.

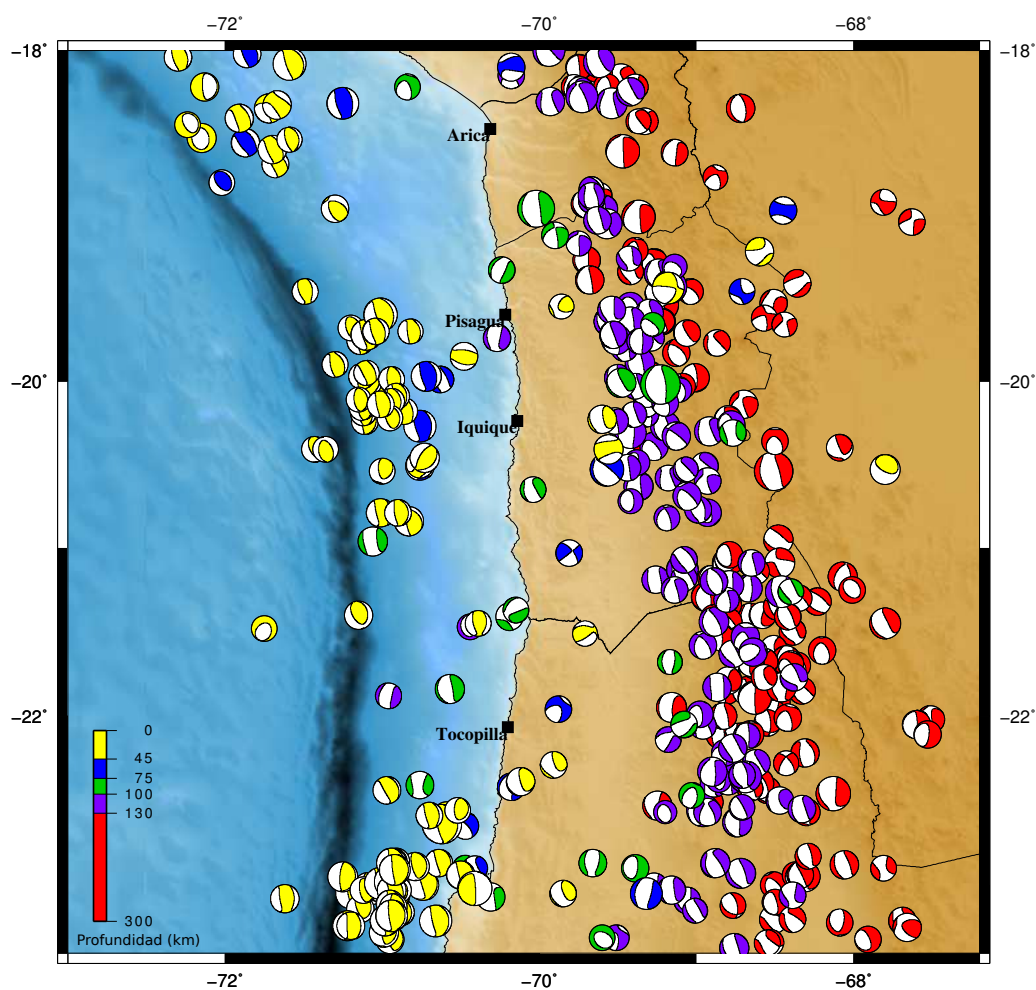


Figura 1.6: Mecanismos focales obtenidos del catálogo CMT entre los años 1976-2014. La escala en la esquina inferior izquierda muestra diferencias por profundidad en distintos colores para el rango 0-300 km.

1.3. Objetivos

En virtud de todos los antecedentes anteriormente expuestos, queda de manifiesto que el norte de Chile resulta un escenario ideal para el estudio del ciclo sísmico en una zona de subducción y que debe mantenerse en constante monitoreo si lo que interesa es comprender los mecanismos que dan origen a los terremotos. Por este motivo es de suma importancia realizar estudios sísmicos, geodésicos y geológicos que en conjunto permitan determinar características sísmicas y tectónicas claves para evaluar de forma precisa el riesgo sísmico de la región.

En consecuencia, la principal motivación de esta tesis es contribuir a la comprensión del comportamiento sísmico de la zona entregando información precisa en relación a los distintos tipos de sismos que ocurren en la región, junto con sus mecanismos, tamaño y distribución. Asimismo, utilizar esta información para evaluar la posibilidad de construir un sistema de alerta temprana en Chile tomando como punto de partida la zona de estudio.

Con el fin de poder replicar en un futuro los procedimientos seguidos en la presente investigación, se automatizarán múltiples procesos que incluyen la creación de la base de datos y su posterior localización, el cálculo de magnitudes (M_L , M_W), mecanismos, y el cálculo de parámetros de alerta temprana de terremotos.

Finalmente, los resultados obtenidos serán parte de un análisis que busca correlacionar la magnitud con dichos parámetros calculados a partir de la porción inicial de la fase P, con el objeto de que sean incorporados al estudio de la sismicidad en tiempo real que se realiza en el Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile.

1.4. Estructura de la tesis

El presente trabajo está dividido en 6 partes, siendo la primera este capítulo introductorio o **primer capítulo**.

El **segundo capítulo** entrega información sobre la nueva red sismológica ubicada en los alrededores de Iquique, que se suma a las pre-existentes utilizadas para la creación de catálogos de la sismicidad local, junto a características del tipo de datos empleados. Por otra parte, se explica en detalle el procedimiento y herramientas clave en la construcción de una base de datos, a partir de subrutinas creadas para incrementar la eficiencia de los procesos.

Los temas que motivan esta tesis serán desarrollados en los siguientes 3 capítulos.

El **tercer capítulo** describe a fondo el método de localización utilizado explicando qué lo diferencia de métodos ampliamente usados como los lineales. Además se detallan los procedimientos para una localización probabilística para dos tipos diferentes de bases de datos, una enfocada en mostrar las características de la sismicidad en la región y otra contruida con el fin de obtener datos de calidad en un periodo de tiempo más largo. Finalmente se muestran los resultados obtenidos, errores asociados y una comparación entre estos y localizaciones correspondientes a un catálogo local pre-existente.

En el **cuarto capítulo** se realiza un análisis de la sismicidad obtenida para un periodo de casi 3 años a partir de 2011. Para tal efecto se calculan magnitudes M_L y M_W para todo el catálogo y se obtienen mecanismos focales para un subconjunto del total de eventos, resultados y procedimientos que se muestran en detalle. Para el cálculo de ambas magnitudes se exponen dos métodos capaces de funcionar automáticamente mediante la ejecución de rutinas Python (creadas para tales efectos) para una base de datos con las características que corresponden a la obtenida para este trabajo. Los resultados son comparados entre sí y con las magnitudes entregadas por el Centro Sismológico Nacional. Finalmente, se discuten las características de la sismicidad en base al tipo de mecanismos

de falla obtenidos.

Durante el **quinto capítulo** se encuentran relaciones entre la magnitud y cuatro parámetros de alerta temprana de terremotos para el norte de Chile. Parte del análisis de los resultados obtenidos involucra comparaciones entre estos últimos y los resultados de trabajos previos. Asimismo, se estudia el comportamiento para distintas variaciones de los parámetros originales en velocidad y desplazamiento además de la influencia que la porción temprana de la fase analizada tiene sobre la calidad y la coherencia de los resultados.

Por último, el **sexto capítulo** corresponde a una conclusión general que resume los resultados obtenidos en cada capítulo, entregando una visión general de la sismicidad de la zona y evaluando la posibilidad de implementar un sistema de alerta temprana en el norte de Chile.

Capítulo 2

Base de datos para en norte de Chile

2.1. Introducción

Parte clave de este trabajo fue la creación de un método eficiente para la manipulación de datos sísmicos. De esta manera, procesos que van desde la recolección y posterior organización de los datos, hasta la creación de un catálogo sísmico, han sido automatizados utilizando *Python* como lenguaje de programación y una herramienta especial para trabajar con datos sismológicos, parte de este último, llamada *Obspy*.

Los registros utilizados fueron datos obtenidos en tiempo continuo con una tasa de 100 muestras por segundo. Sobre estos últimos se utilizó un sistema de pick automático llamado FilterPicker [Lomax *et al.*, 2012] con el fin de detectar la sismicidad de la región.

Como resultado se obtuvo una base de datos de casi tres años de eventos almacenados individualmente en registros en formato MSEED con una duración de 180 segundos cada uno.

Durante el presente capítulo se explicará el procedimiento para obtener dos bases de datos de distintas características. La primera, de ahora en adelante **base de datos exhaustiva**, intenta recopilar toda la información existente detectando la mayor cantidad de eventos que sea posible, sin incluir una gran cantidad de falsos registros.

La segunda, llamada en adelante como **base de datos principal**, se caracteriza por incluir solo eventos de magnitudes moderadas a grandes ($M_L > 4.0$) y registrados por una gran cantidad de estaciones, lo que permite abarcar una mayor ventana de tiempo para el estudio de la sismicidad local.

2.2. Origen y características de los datos

La zona de estudio analizada en este trabajo, región del norte de Chile comprendida entre los 18.5° S y los 23° S, ha sido monitoreada desde el año 2006 por un arreglo de instrumentos capaces de detectar un amplio rango de señales asociadas a procesos de deformación, tales como: sismómetros banda ancha y acelerómetros, GPS continuos, sensores magneto-telúricos, inclinómetros e incluso *creepmeters*. Dicha red forma parte del proyecto IPOC (Integrated Plate Boundary Observatory Chile) compuesto por instituciones y científicos provenientes de Europa y Sudamérica, grupo de investigación cuyo fin es estudiar terremotos y deformación en el margen chileno, particularmente en el gap sísmico latente en la zona norte (Figura 2.1).

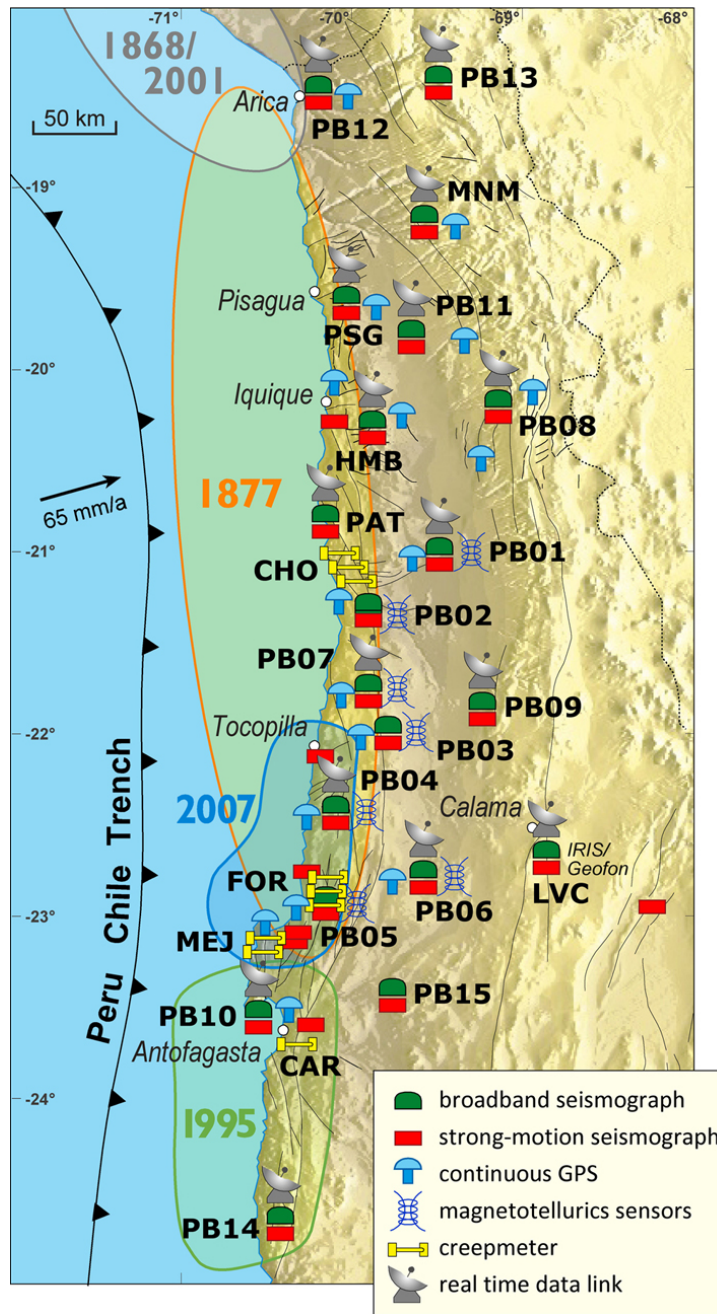


Figura 2.1: Distribución de la red de monitoreo perteneciente al proyecto IPOC. Además se muestran las áreas de ruptura calculadas para los terremotos de 1995, 2001 y 2007, y estimadas para los terremotos de 1868 y 1877. Figura disponible en la página del proyecto: <http://www.ipoc-network.org/>

A partir del año 2010, una nueva red parte del mismo proyecto, instalada específicamente en los alrededores de Iquique, vino a densificar la red pre-existente, momento en el que se produjo una oportunidad única para estudiar la zona con mayor precisión. Dicha red, llamada *Iquique Local Network (ILN)*, se compone de 4 estaciones de periodo corto y 16 estaciones banda ancha con un espaciamento entre ellas de 25 km en promedio (Figura 2.2), característica que apunta a la detección de eventos en un gran rango de magnitudes.

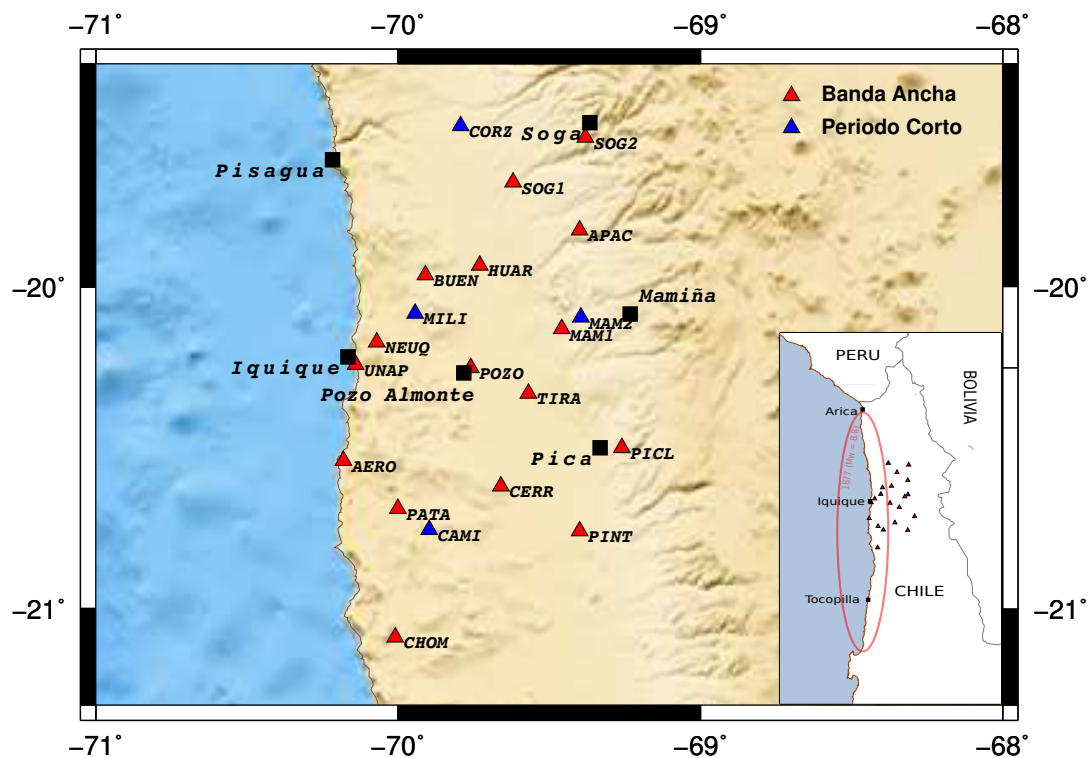


Figura 2.2: Totalidad de las estaciones sismológicas de la red ILN dispuestas en los alrededores de Iquique. Se muestran diferenciadas por tipo: banda ancha (azul) y periodo corto (rojo). El sub-mapa a la derecha ubica a la red local en el contexto sísmico de la zona. La ruptura del terremoto de 1877 se muestra como una línea continua de color rojo junto al grupo de estaciones.

Para este estudio se utilizaron las estaciones sismológicas banda ancha de la red ILN, compuestas por instrumentos Guralp que incluyen un sismómetro CMG-3ESPC con respuesta plana a la velocidad del suelo de 60s - 50 Hz y un digitalizador CMG-DM24 S3. A estas últimas se suman 11 estaciones sismológicas banda ancha de otras redes. Una de ellas (GO01) pertenece a la *Red Sismológica Nacional de Chile (C)* y corresponde a un sismómetro Nanometrics Trillium (240s - 35 Hz) y digitalizador Quanterra 330. Las restantes son parte de la red CX del proyecto IPOC y en su mayoría se componen de sensores Streckeisen STS-2 (120s - 10Hz) y digitalizadores Q330. Se utilizó un total de 27 estaciones pertenecientes a las diferentes redes mencionadas, cuya ubicación se muestra en la figura (2.3).

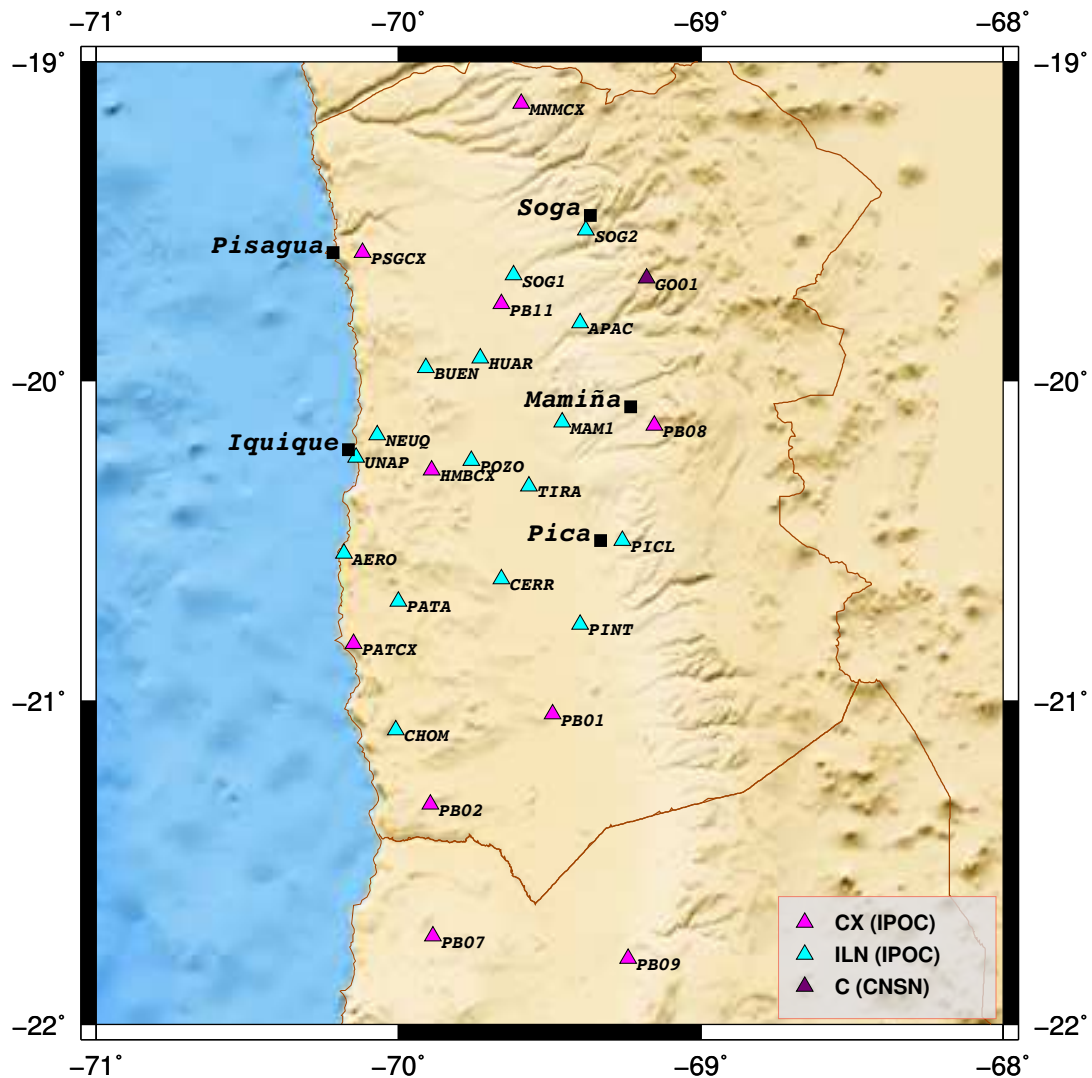


Figura 2.3: Disposición de las 27 estaciones sismológicas utilizadas en este trabajo. El color indicado en la leyenda indica la red (ILN, CX y C) a la que pertenecen.

Uno de los principales objetivos de esta investigación es construir un catálogo sísmico para un periodo de tiempo provisto de localizaciones confiables para la zona de estudio. Para esto se necesita obtener registros de eventos individuales a partir de formas de onda que almacenan 24 horas de información.

Dichos eventos serán detectados automáticamente o basados en un catálogo pre-existente (en este caso el catálogo de sismicidad local del *Centro Sismológico Nacional*), dependiendo de si se quiere obtener una base de datos para un rango de magnitudes amplio (**exhaustiva**), o solo para eventos de magnitudes importantes (**principal**) respectivamente.

Con el objeto de utilizar la mayor cantidad de estaciones disponibles y obtener resultados homogéneos, los datos utilizados corresponden a los registrados entre Enero de 2011 y Mayo de 2013, periodo en que la red ILN ha estado activa. De esta manera se pretende obtener localizaciones mucho más precisas que permitan interpretar de mejor manera la sismicidad local de la región.

2.3. Herramientas para el tratamiento de datos sísmicos

Los procedimientos previos a la creación de un catálogo incluyen el uso de variadas herramientas útiles en el manejo de datos sísmicos y a continuación se detallan las características más importantes de las principales.

2.3.1. Seismic Analysis Code (SAC)

El programa Seismic Analysis Code (SAC) [Goldstein *et al.* , 2003; Goldstein & Snoke, 2005], que fue desarrollado inicialmente para analizar datos en series de tiempo, hoy en día incluye especialmente funciones que apuntan al manejo de datos sísmicos, por lo cual se transforma en uno de los más usados por la comunidad científica. Como programa incluye entre otras funcionalidades la posibilidad de realizar operaciones aritméticas, transformadas de Fourier, filtros, interpolación, correlación y *picking* de fases sísmicas. Como formato de datos se caracteriza por contener toda la información de la señal e incluso la localización del evento y la estación almacenada en una variable llamada *header* .

La existencia de subrutinas que permiten la interacción del programa con lenguajes como *Matlab*, *Python*, *GMT* e incluso programas de *picking* automático hace que sus capacidades se multipliquen.

2.3.2. Software FilterPicker

FilterPicker es un programa creado por Anthony Lomax para detectar fases en registros continuos de estaciones banda ancha, que es capaz de funcionar en tiempo real [Lomax *et al.* , 2012]. Como características principales se pueden mencionar su capacidad para anular la detección excesiva de llegadas para eventos grandes además de la entrega de incertezas, polaridades y amplitudes correspondientes a las fases detectadas.

Su algoritmo está basado en los *pickers* de Allen [Allen, 1978, 1982] y Baer-Kradolfer [Baer & Kradolfer, 1987], los cuales utilizan el algoritmo STA/LTA. Este último se basa en la evaluación de la razón entre el promedio a corto plazo (STA) y el promedio a largo plazo (LTA) de cierta función característica de la señal, resultado que declarará la detección cuando sobrepase cierto valor umbral, que para este *picker*, varía dinámicamente. La función característica usada por estos algoritmos combina a la señal con su derivada evaluada en distintas muestras, lo que permite detectar cambios para altas frecuencias (ondas de cuerpo).

A partir de la señal original, el programa genera un conjunto de series de tiempo tratadas por diferentes filtros pasa-banda predefinidos. La función característica es determinada para cada una de estas bandas de frecuencia, y un pick es declarado cuando la integral del máximo de las funciones características calculadas en una ventana de tiempo definida previamente, supera cierto valor dado anteriormente como condición.

Los parámetros que permiten el accionar de FilterPicker son descritos en la tabla (2.1).

Parámetros	Descripción
T_{filter} (<i>FilterWindow</i>)	Valor en segundos que determina que tan atrás en el tiempo son examinadas las muestras previas.
T_{long} (<i>LongTermWindow</i>)	Tiempo involucrado en el cálculo de la constante de decaimiento, que a su vez determina el valor promedio acumulativo de cierto parámetro estadístico de la señal.
S_1 (<i>Threshold 1</i>)	Valor que debe sobrepasar la función característica resumen para que sea declarado un gatillo.
S_2 (<i>Threshold 1</i>)	Segundo valor umbral que al ser sobrepasado por la integral de la función característica resumen en una ventana predefinida, un gatillo es declarado como evento.
T_{up} (<i>TUpEvent</i>)	Duración en segundos de la ventana donde un gatillo es validado como pick.

Tabla 2.1: Descripción de los 5 parámetros utilizados por FilterPicker.

2.3.3. Qmerge

Creado por Doug Neuhauser del Laboratorio Sismológico de la Universidad de Berkeley, el programa *qmerge* realiza operaciones de unión y extracción para archivos de datos en formato MiniSEED, SEED, Steim binario y Adebahr DRM. Es importante destacar que *qmerge* solo será capaz de manipular archivos que contengan datos de un solo *stream*.

En el proceso de unir datos es capaz de ignorar intervalos superpuestos de datos. La funcionalidad de extraer datos especificando una ventana de tiempo es la que será utilizada en este trabajo.

2.4. Método

A continuación se detalla el procedimiento para obtener una base de datos con eventos de 3 minutos de duración a partir de formas de onda continuas:

1. Conversión de datos en formato MSEED continuos a formato SAC mediante la subrutina *beforecut.py*. Este es el formato de entrada utilizado por FilterPicker.
2. Detección automática de la onda primaria mediante el comando *picker_func_test*, parte de FilterPicker. Todo esto es llevado a cabo por medio del script *execFP.py*.
3. (*Optativo*) Creación de archivos que contienen solamente los *pick* detectados para eventos de interés dados por un catálogo pre-existente, mediante el script *FindOnePick.py*.
4. Separación de datos continuos en eventos individuales mediante el uso de *cutmseed.py*, que trabaja en base a *qmerge*. Se obtienen registros con 60 y 120 segundos antes y después de la fase P automáticamente detectada.

Todas las subrutinas mencionadas en los puntos anteriores (en detalle en el apéndice A) han sido creadas durante este trabajo utilizando Python como lenguaje de programación y tienen como objetivo la automatización de los procesos que permiten el manejo de un número significativo de datos de manera sencilla.

El punto número 3 será o no descartado dependiendo si se quiere obtener una base de datos exhaustiva o una base de datos principal. Esta última es creada en base a un gran conjunto de localizaciones realizadas en el periodo de estudio por el Centro Sismológico Nacional.

Previamente a la detección automática de fases, se deben escoger los parámetros apropiados necesarios para el funcionamiento de FilterPicker.

En el primer caso (BD exhaustiva) han sido utilizados los mismos parámetros que para la red sísmológica de Irpinia (ISNet) [Vassallo *et al.*, 2012] situada al sur de Italia, por tener un arreglo similar al utilizado por la red local de Iquique, y por la sensibilidad de estos a magnitudes más bajas. Un ejemplo de la aplicación de estos parámetros sobre el registro de un día completo se ven la figura (2.4).

Diferentes parámetros han sido adaptados para detectar eventos de mayor magnitud ocurridos en la zona de estudio (BD principal). Con estos se obtiene un menor número de falsas primeras llegadas y funciona perfectamente encontrando la totalidad de eventos de magnitudes moderadas a altas evitando *picking* excesivo. Los parámetros para ambos casos son resumidos en la tabla 2.2.

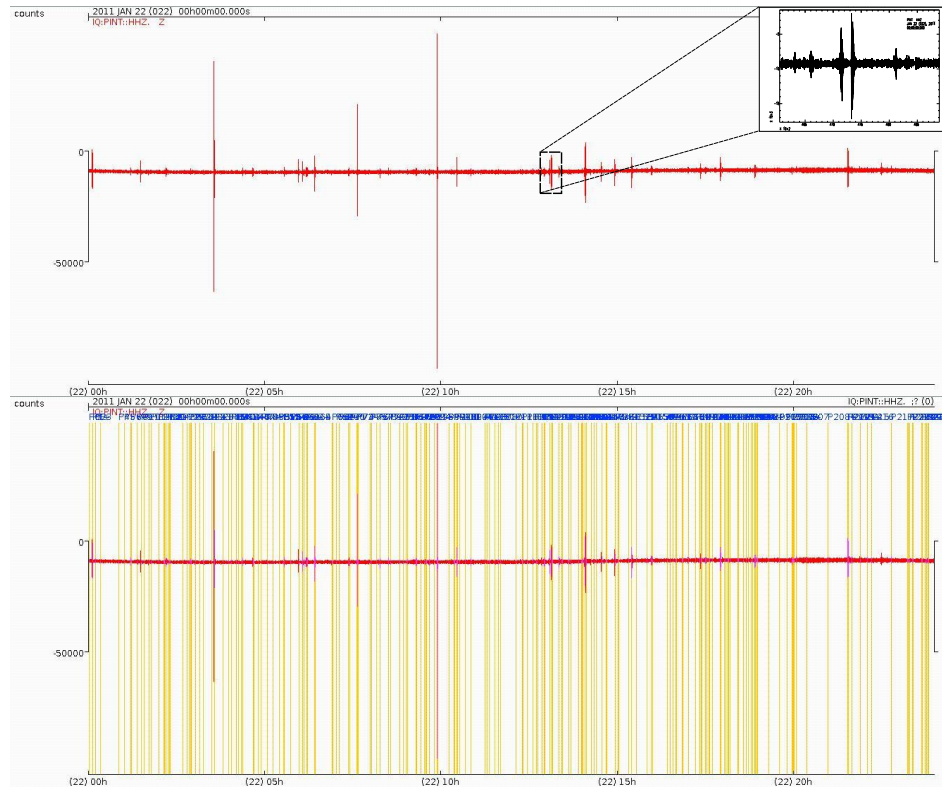


Figura 2.4: En la figura se muestra (arriba) un día normal de sismicidad para la zona de estudio. El registro corresponde a la componente vertical de la estación PINT ubicada al sureste de la red. Ninguno de los eventos supera la magnitud 4.0. Una ventana de 47 minutos de duración se observa en la esquina superior derecha. (Abajo) se distinguen como líneas amarillas sobre el registro (en rojo) los picks detectados automáticamente por FilterPicker que representan la llegada de un evento y que corresponden a los parámetros utilizados en la creación de la base de datos exhaustiva. Ambas imágenes han sido obtenidas a partir de SeisGram2K, programa desarrollado por Anthony Lomax.

Parámetros	B.D. Exhaustiva	B.D. Principal
T_{filter}	1.08	4
T_{long}	15	10
S_1	9.36	15
S_2	9.21	15
T_{up}	0.49	0.5

Tabla 2.2: Parámetros FilterPicker usados para identificar toda la sismicidad ocurrida en 25 días (base de datos exhaustiva) o durante cerca de 3 años (base de datos principal).

Con el objeto de automatizar procesos y detectar fases para distintos registros continuos de manera secuencial (paso N° 2), se utiliza el comando *picker_func_test* que trabaja sobre datos en formato SAC y funciona en base parámetros predefinidos

$$picker_func_test \text{ archivo_sac } \text{ archivo_pick}$$

Donde *archivo_sac* es un registro continuo de duración 24 horas en formato SAC para cierta estación y de componente vertical. Por otra parte *archivo_pick* es el nombre del archivo de salida que contiene los *picks* detectados.

Finalizado el paso N° 4, es posible agrupar las formas de onda pertenecientes a un mismo evento en carpetas de nombre *aammdd_hhmm* (año-mes-día-hora-minuto) mediante el código Python *makeDB.py* (ver apéndice A).

2.5. Resultados y comentarios

El primer conjunto de datos obtenido corresponde a la base de datos **exhaustiva**, construída a partir de todos los *picks* detectados por FilterPicker (se ignora el paso N° 3 del procedimiento). Durante los 25 primeros días de Octubre de 2011 se detectó en promedio un número cercano a 200 fases P por día, de las cuales alrededor de la mitad corresponden efectivamente a señales sísmicas. Sin embargo, luego de agrupar dichas fases en grupos correspondientes a eventos sísmicos, muchos de ellos resultan tener magnitudes muy pequeñas y son registrados por menos de 4 estaciones.

El segundo grupo, que conforma la base de datos contruida a partir del catálogo perteneciente al Centro Sismológico Nacional denominada base de datos **principal**, contiene eventos entre Enero de 2011 y Mayo de 2013.

A partir de este catálogo local, que contiene localizaciones de 476 eventos ocurridos durante el periodo de estudio, se crea una base de datos con igual número de eventos, pero conteniendo además de las estaciones utilizadas por la agencia nacional (redes CX y C), las estaciones de la red sismológica ILN. De esta manera se suman 20 estaciones a las usadas hasta el momento en la contrucción de catálogos para la zona, lo que significaría una mejora en la calidad de las localizaciones que serán usadas durante esta investigación.

Capítulo 3

Localización de eventos sísmicos

3.1. Introducción

La localización de un terremoto consiste en encontrar la posición espacial y tiempo de ocurrencia de la liberación de energía correspondiente a un evento sísmico. Tal determinación resulta de vital importancia debido a que representa el punto de partida de un análisis más completo de la fuente, que incluye la determinación de parámetros como la magnitud o el momento. Además permite realizar estudios sobre peligro sísmico, sismicidad característica de una zona e incluso estimaciones de la distribución en el cambio de estrés y deformación en la cercanía a un evento.

Para localizar terremotos se resuelve un problema inverso [Stein & Wysession, 2009], es decir, se tienen observaciones que indican que hubo liberación de energía sísmica en algún lugar en un tiempo anterior, y en base a estas se encuentra la ubicación del origen de tales señales. Este proceso consiste básicamente en encontrar la menor diferencia entre tiempos de llegada de señales sísmicas observadas por estaciones sismológicas, y tiempos de llegada calculados teóricamente suponiendo distintas fuentes, lo que hace imprescindible contar con un buen modelo para las velocidades de ondas que viajan a través del medio.

De esta manera, un factor importante a considerar es el método de localización, el cuál idealmente debe admitir un modelo de velocidades realista, por lo tanto de alta complejidad, y la forma en que este entrega las incertezas en tiempo y espacio, lo que va a permitir decidir si la solución es aceptable.

Este capítulo entrega información sobre el proceso de localización utilizado. Se detallan los pasos para obtener localizaciones no-lineales de búsqueda directa para las bases de datos utilizadas, además de resultados tras distintos análisis que involucran la sismicidad obtenida por el Centro Sismológico Nacional para la zona, una comparación entre esta última y los resultados obtenidos para esta investigación, análisis de errores en tiempo y espacio, localizaciones datos que intentan reflejar toda la sismicidad ocurrida durante 25 días, y finalmente la revisión de algunos eventos importantes que se han registrado en la zona.

3.2. El problema de localización de terremotos

El problema básicamente involucra la comparación entre tiempos de llegada observados y tiempos de llegada calculados suponiendo una fuente (hipocentro) junto con un modelo de velocidades para el medio. Estos últimos son resultado de un problema directo determinado por la siguiente relación [Stein & Wysession, 2009],

$$d = A(m), \quad (3.1)$$

,donde el vector que representa al modelo de hipocentro propuesto m se relaciona con el vector de datos observados d mediante la función no-lineal A .

Con el objetivo de encontrar un modelo a partir del cual se obtengan los valores observados, lo primero es proponer un hipocentro inicial (m_0), que al no entregar valores que se ajusten a los observados mediante (3.1), sea modificado en un Δm convirtiéndose en,

$$m = m_0 + \Delta m$$

A partir de este punto, el problema puede ser resuelto mediante dos tipos de métodos que serán descritos a continuación.

3.2.1. Métodos lineales de localización

A modo de linealizar el problema antes descrito, este tipo de método expresa los datos observados como una expansión de Taylor en torno al modelo inicial, conservando solo los términos lineales [Stein & Wysession, 2009]. A partir de esta expresión para d , la diferencia entre los tiempos de llegada observados y los obtenidos para el modelo inicial, en términos de sus componentes, puede escribirse como,

$$\Delta d_i^0 \approx \sum_j \left. \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \right|_{m^0} \Delta m_j^0 \quad (3.2)$$

, o de manera más simplificada,

$$\Delta d = G\Delta m, \quad (3.3)$$

donde G es una matriz cuyos elementos son las derivadas parciales de la ecuación (3.2). Luego la incógnita es el cambio en el modelo Δm con respecto al modelo inicial que multiplicado por la matriz G entregue el cambio requerido en los datos Δd .

Con el objeto de resolver este problema inverso sobredeterminado se intenta encontrar el mejor hipocentro que lo resuelva. Para esto, es necesario minimizar la función que representa el error de la predicción o *misfit*, dada por

$$\chi^2 = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \left(\Delta d_i - \sum_j G_{ij} \Delta m_j \right)^2, \quad (3.4)$$

donde σ_i representa los errores de los datos observados dados por la desviación estándar. Dicha minimización de la función, que corresponde a llevar a cero sus derivadas parciales con respecto al cambio en los parámetros del modelo, entrega una solución para Δm que será correcta solo para el caso en que el modelo inicial sea cercano al modelo real, situación en la cual la aproximación lineal de la función que predice los datos es válida. Para contrarrestar la posibilidad de que no sea el caso, se dará solución al problema iterando el método descrito anteriormente, encontrando una nueva matriz de derivadas parciales en cada paso expandiendo la función que predice los datos en torno al nuevo modelo, hasta que solo se produzcan pequeños cambios en este.

Los métodos lineales entregan un hipocentro único con incertezas estimadas linealmente dadas por distribuciones normales. Comúnmente estas soluciones no representan a la real solución cuando los datos son insuficientes, se tienen datos muy aislados de la media (*outliers*) o cuando el modelo de velocidades tiene complejidades. A pesar de esto último, este tipo de método tiene la ventaja de ser poco demandante computacionalmente, característica importante si lo que se busca es rapidez.

3.2.2. Métodos de localización probabilística

Para este tipo de métodos llamados de inversión probabilística, el análogo a la función *misfit* usada por los métodos lineales, es la función densidad de probabilidad (*pdf*) [Lomax *et al.*, 2000]. Esta última resulta de una combinación de las incertezas que describen a los datos observados $p(d)$, al modelo $p(m)$ y a la relación entre estos últimos $F(d, m)$ y se escribe como

$$Q(d, m) = k \frac{p(d) F(d, m) p(m)}{\mu(d, m)}, \quad (3.5)$$

donde k es un factor de normalización y $\mu(d, m)$, llamado distribución homogénea, son las mínimas restricciones sobre los parámetros del modelo m , impuestas por el problema directo.

La integral de la relación anterior en el espacio de los datos, llamada pdf marginal posterior, está dada por

$$Q(m) = kp(m) \int_D \frac{p(d) F(d, m)}{\mu(d, m)} dd, \quad (3.6)$$

y describe la incerteza en la localización de m .

La integral de (3.6) es llamada la función de *verosimilitud* $L(m)$ [Lomax *et al.*, 2009], y es una medida de cuan bien el modelo explica los datos observados. Con ciertas suposiciones y simplificaciones se llega a la expresión

$$L(x) = \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_i \frac{[T_i^o - T_i^c(x)]^2}{\sigma_i^2} \right), \quad (3.7)$$

donde T_i^o y T_i^c son los tiempos de llegada observados y los tiempos de viaje calculados para la observación i y la cordenada espacial x respectivamente, y σ_i es la desviación estándar correspondiente a las incertezas.

Finalmente, la expresión resultante del producto entre la función de *verosimilitud* y la parte espacial de la incerteza definida para el modelo $p(m)$ se toma como la función objetivo, útil para realizar la inversión mediante algoritmos de búsqueda directa, los que pueden entregar más de una solución óptima localmente.

3.3. Softwares útiles en el proceso de localización

Para determinar los tiempos de llegada de las fases P y S para cada evento y posteriormente llevar a cabo la localización, dos programas fueron utilizados y serán descritos a continuación.

3.3.1. SeisGram2K

El software SeisGram2K es un programa de visualización y análisis de señales sísmicas de una o más componentes desarrollado por Anthony Lomax. Entre sus capacidades se destacan su fácil manejo, y el uso de datos locales o directamente desde internet.

Otras características destacables son que permite la manipulación de datos en varios formatos, tales como SAC (binario y ascii), PEPP, GSE2.1, mini-SEED y SEED, entre otros y el uso de herramientas de análisis como *zoom* interactivo, escalamiento, rotación, análisis espectral, movimiento de partículas en 3D y el *picking* de fases, función que será utilizada en este trabajo para obtener tiempos de llegada en un formato compatible con el programa de localización.

3.3.2. El programa de localización NonLinLoc

El conjunto de programas NonLinLoc [Lomax *et al.* , 2000] es una poderosa herramienta que utiliza métodos de localización probabilística no-lineal de terremotos usando métodos de búsqueda globales y directos. Se caracteriza por admitir modelos de velocidades de alta complejidad, entregar las incertezas en la localización de forma clara y completa, siendo capaz de presentarlas gráficamente en 3 dimensiones.

NonLinLoc entrega como resultado la función *likelihood*, hipocentros óptimos y la función densidad de probabilidad (pdf) en el espacio. La forma de esta última es fundamental para decidir si es posible usar un método lineal (rapidez) o es necesario un método probabilístico (precisión), dada la posibilidad de que exista más de un máximo para una función pdf irregular, producida por cambios abruptos en el modelo de velocidades o localizaciones en el límite de la red, situación que un método lineal no es capaz de resolver.

Algunas características importantes del método son descritas a continuación.

Función likelihood

Una de las funciones objetivo incluídas en NonLinLoc y utilizada en este trabajo, es la llamada *Equal-Differential Time* (EDT) [Zhou, 1994; Font *et al.*, 2004], que a diferencia de la función de mínimos cuadrados de norma L2 (ecuación (3.7)) [Tarantola & Valette, 1982], también incluída, resulta ser más sensible a la presencia de *outliers*, datos observados cuyo residual (diferencia entre observados y calculados) es más grande que el error asignado.

La forma de la función EDT está dada por,

$$L(x) = \left(\sum_{a,b} \frac{1}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}} \cdot \exp \left(- \frac{([T_a^o - T_b^o] - [TT_a^c(x) - TT_b^c(x)])^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right) \right)^N, \quad (3.8)$$

donde T y TT expresan los tiempos de llegada y de viaje respectivamente, σ resume las incertezas de estos últimos (asumidas Gaussianas), los superíndices *o* y *c* se refieren a valores observados y calculados, y finalmente a y b son un par cualquiera de un total de N de observaciones.

Por último, debido a que esta expresión está definida solamente en el espacio, el tiempo origen debe ser calculado analíticamente [Tarantola & Valette, 1982] a partir de la localización correspondiente al máximo de la función.

Métodos de búsqueda: El sampling de importancia Oct-tree

Son varios los métodos de búsqueda directos disponibles para llevar a cabo la inversión en NonLinLoc, y se diferencian principalmente en su eficiencia.

Búsquedas determinísticas y regulares tales como las búsquedas globales exhaustivas [Sambridge & Mosegaard, 2002], entre ellas la llamada *Grid Search*, son capaces de entregar imágenes muy precisas de la función pdf a pesar de su forma irregular, debido a que utilizan un muestreo global y bien distribuido en el espacio. Sin embargo pierden eficiencia al usar muchos parámetros desconocidos, e incluso realizan el proceso 1000 veces más lento que los métodos lineales; de esta manera, no son convenientes si se requiere realizar un análisis para una cantidad considerable de eventos o para una región muy extensa.

Métodos que utilizan muestreo de importancia [Peter Lepage, 1978], realizan una búsqueda que recorre un camino aleatorio en la región de interés, calculando en cada paso la probabilidad para un punto y sus vecinos y decidiendo a partir de esta información la dirección a seguir, siendo capaces de avanzar más allá de mínimos locales si la función pdf no es demasiado complicada. Resulta útil para operar con muchos eventos y resulta ser solamente 10 veces más lento que métodos lineales.

Las técnicas de búsqueda Metropolis-Gibbs y Oct-tree [Lomax *et al.*, 2009], la última usada en el presente trabajo, pertenecen a esta categoría. Dichos métodos siguen un algoritmo de Monte Carlo mejorado en eficiencia tras escoger una densidad de celdas muestreadas que sigue a la función pdf lo más cerca posible, convergiendo a esta luego de ajustar el *sampling* a la información que se tiene a priori sobre el hipocentro $p(m)$ y avanzar en base a la información obtenida en muestras

anteriores.

Con el fin de obtener la función densidad de probabilidad, Oct-tree particularmente dividirá la región de búsqueda en una grilla compuesta de celdas regulares y llevará a cabo un muestreo global, luego seguirá recursivamente subdividiendo y encontrando la celda con la mayor probabilidad, hasta que un criterio entregado por el usuario le ponga fin. Finalmente la recursión convergerá a una estructura en cascada que presentará una mayor densidad de celdas pequeñas en regiones donde el pdf es mayor.

Programas principales

En NonLinLoc, la metodología para localizar uno o más eventos, involucra la ejecución de 3 programas distintos en base a un archivo que contiene todos los parámetros que controlan a cada uno.

El primero es **Vel2Grid**, que realiza una representación del modelo de velocidades en 3D.

En segundo lugar está **Grid2Time** que utilizando la grilla que describe al modelo entregada por *Vel2Grid*, calcula el problema directo, es decir, los tiempos de viaje para cada nodo de la grilla a cada estación, utilizando el esquema descrito de diferencia finita Eikonal [Podvin & Lecomte, 1991]. Además permite el cálculo de los ángulos de salida para cada nodo.

Por último, el programa **NLoc** entrega las localizaciones realizando la inversión mediante métodos de búsqueda directos no-lineales y tomando en cuenta parámetros definidos por el usuario, como el tipo de función objetivo, el tamaño de la grilla y el tipo de búsqueda.

3.4. Creación de catálogos sísmicos

A partir de las bases de datos creadas, ya sea para un análisis de eventos importantes (magnitudes sobre 4.0) denominada como **principal**, o para registros en un amplio rango de magnitudes y un limitado intervalo de tiempo (**exhaustiva**), se obtuvieron catálogos sísmicos siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Determinación manual de las fases P, S y la polaridad de la primera llegada mediante SeisGram2K. El recorrido por cada carpeta que representa un evento, y la ejecución reiterativa de dicho programa tras la detección automática de eventos con más de 4 estaciones (valor determinado por el usuario), es realizado por el script *execSG2K.py*. SeisGram2K genera un archivo para cada evento, que contiene las fases detectadas en cada registro.
- Creación de un archivo *pick* que contenga la información de todos los eventos a localizar en un formato compatible con el programa de localización. El script *gatherpickfiles.py* realiza esta tarea.
- Mediante el programa NonLinLoc se determinan las localizaciones para todos los eventos contenidos en el archivo obtenido en el paso anterior. Este entregará información sobre incertezas, hipocentro más óptimo, y archivos de entrada para un programa que muestra los resultados en forma gráfica.

La rutina Vel2Grid es el primer paso en la localización de los eventos mediante NonLinLoc. En esta instancia es necesario especificar las características de la grilla inicial y entregar los parámetros del modelo de velocidades para la zona.

El modelo que se utilizará en este trabajo corresponde al de [Husen *et al.*, 1999] para el norte de Chile, creado a partir de las réplicas del terremoto de Antofagasta 2005 ($M_w = 8.1$) que fueron registradas por estaciones terrestres y marinas (ver figura 3.1).

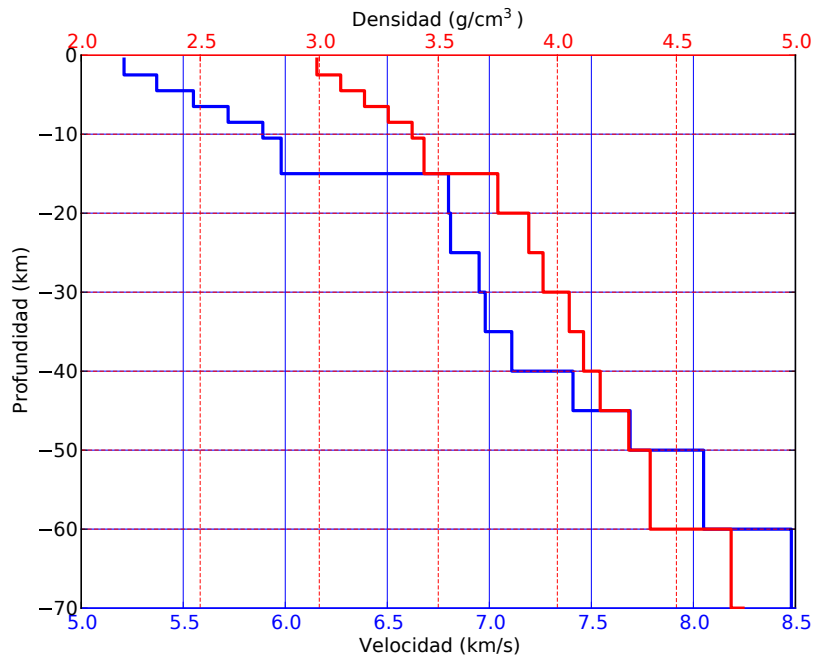


Figura 3.1: Modelo de velocidades obtenido a partir de los registros del terremoto de Antofagasta 1995 (M_w 8.1) [Husen *et al.*, 1999] el cual será utilizado para la zona de estudio. Se muestra la velocidad de la onda P (en azul) y las densidades (en rojo).

Para continuar, es necesario entregar ciertos parámetros útiles como entrada para el programa Grid2Time. Se especifican la resolución del problema directo, la ubicación de las estaciones y la posibilidad de obtener una grilla alternativa que contenga ángulos de salida para cada nodo.

Finalmente, se resolverá el problema inverso a partir de la rutina NLLoc. En este paso se escoge el método de búsqueda (**Oct-Tree** en este caso), se establece la grilla de búsqueda, el método de localización (**función EDT**) y el tipo de errores.

Todos los parámetros antes descritos son declarados en un archivo que se utiliza como entrada en cada uno de los pasos descritos anteriormente.

A partir de los resultados entregados por NonLinLoc en formato ascii para cada evento, se obtiene un catálogo que resume hipocentro y errores en tiempo y espacio por medio del script python *get_loc_list.py* creado con tal propósito.

3.5. Resultados

A continuación se muestran las localizaciones obtenidas para las dos bases de datos localizadas: exhaustiva y principal. Junto con lo anterior, se presentan incertezas y comparaciones entre las localizaciones resultantes y las entregadas por el Centro Sismológico Nacional.

3.5.1. Localización de la base de datos exhaustiva

La palabra exhaustiva se usa para indicar la intención de detectar todos los eventos posibles ocurridos durante un periodo en particular, el que en este caso fue escogido al azar y corresponde a los primeros 25 días de Octubre de 2011, sin embargo hay que tener en cuenta que este procedimiento está sujeto a la posibilidad de que ciertos eventos no puedan ser localizados debido a la baja cantidad de estaciones que lo registran o por la poca claridad del registro.

Para este intervalo de tiempo se detectó 50 o más eventos por día utilizando un número de 20 estaciones, de los cuales por las razones antes mencionadas, solo un promedio diario aproximado de 30 fueron localizados. La cantidad de eventos encontrados para este intervalo de tiempo se reduce finalmente a un número de 621 localizaciones.

Los resultados de la localización probabilística y no-lineal para la zona y sus errores en el espacio se muestran en la figura (3.2).

Los parámetros estadísticos de la localización y la cantidad de estaciones utilizadas se muestran en las figuras (3.3) y (3.4) respectivamente.

En la figura (3.5) se contrastan las localizaciones correspondientes al catálogo del Centro Sismológico Nacional y las obtenidas con NonLinLoc.

3.5.2. Localización de la base de datos principal

Ocupando el total de las estaciones disponibles, un número de 27 para el periodo de estudio, un total de 366 eventos fueron satisfactoriamente localizados. Esta base de datos fue contruida utilizando la información temporal del hipocentro de 476 eventos de magnitudes superiores a 4.0 ocurridos en el periodo y zona de estudio, registrados por el Centro Sismológico Nacional, incluyendo registros de la red ILN además de las estaciones de las redes CX y C utilizadas por el Centro. El catálogo obtenido durante este trabajo y sus errores en el espacio son representados en la figura (3.6).

Histogramas que resumen las estadísticas de la localización se muestran en las figuras (3.7) y (3.8).

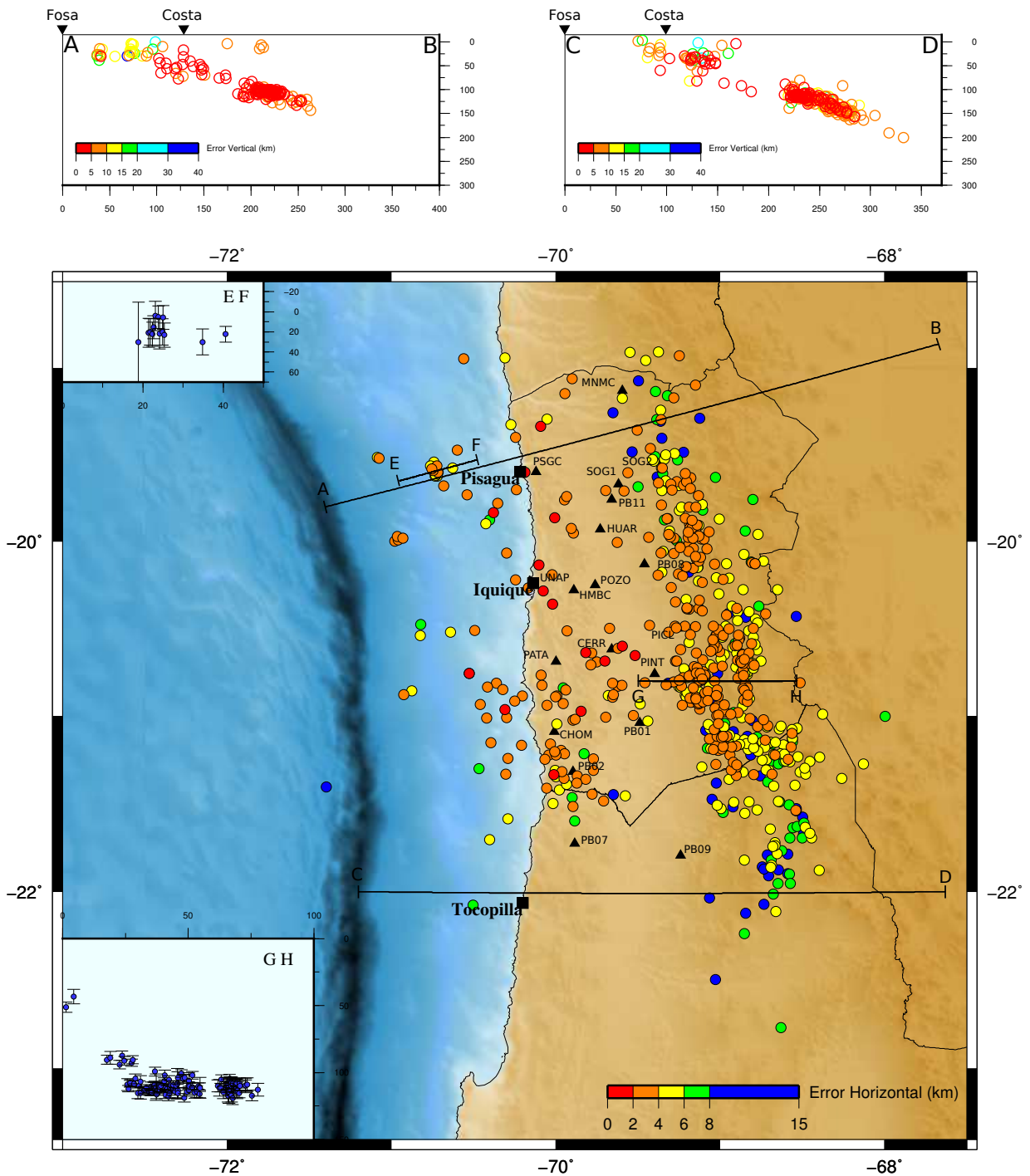


Figura 3.2: Mapa con los 621 eventos localizados para los primeros 25 días de Octubre de 2011. El error horizontal, representado por el promedio de los errores en latitud y longitud, y el error vertical, son diferenciados en colores en una imagen en planta y dos perfiles respectivamente. El perfil EF de 50 km de largo muestra una concentración de eventos y sus respectivos errores frente a las costas de Pisagua (cuadro superior izquierdo). El perfil GH, con el doble del largo de EF, explora un subconjunto de los eventos más profundos (cuadro inferior derecho). Los perfiles AB y CD tienen un ancho de 230 km y un largo de 400 y 370 km respectivamente. EF y GH tienen un ancho de 20 y 40 km respectivamente.

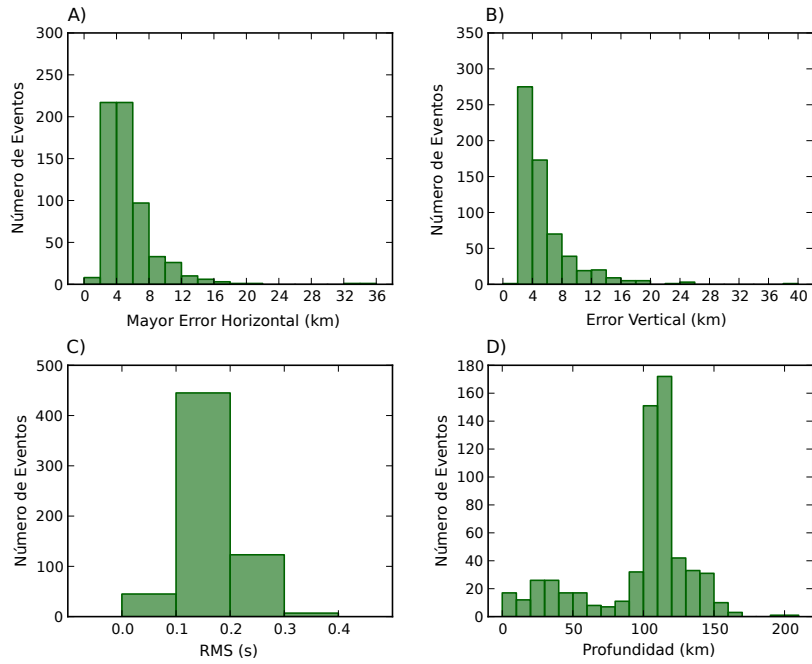


Figura 3.3: Histogramas con datos de la localización de la base de datos exhaustiva. Distribuciones de (a) máximo error horizontal, (b) error vertical, (c) rms y (d) profundidad, para los 621 eventos localizados con NonLinLoc.

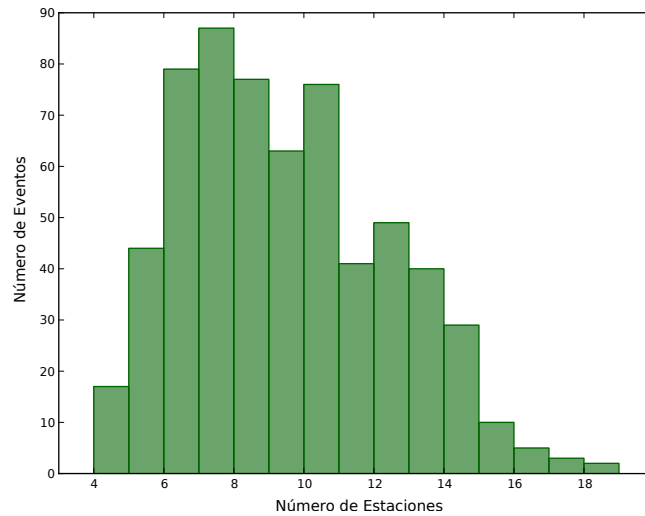


Figura 3.4: Histograma que muestra el número de estaciones utilizadas por cada evento para la base de datos exhaustiva.

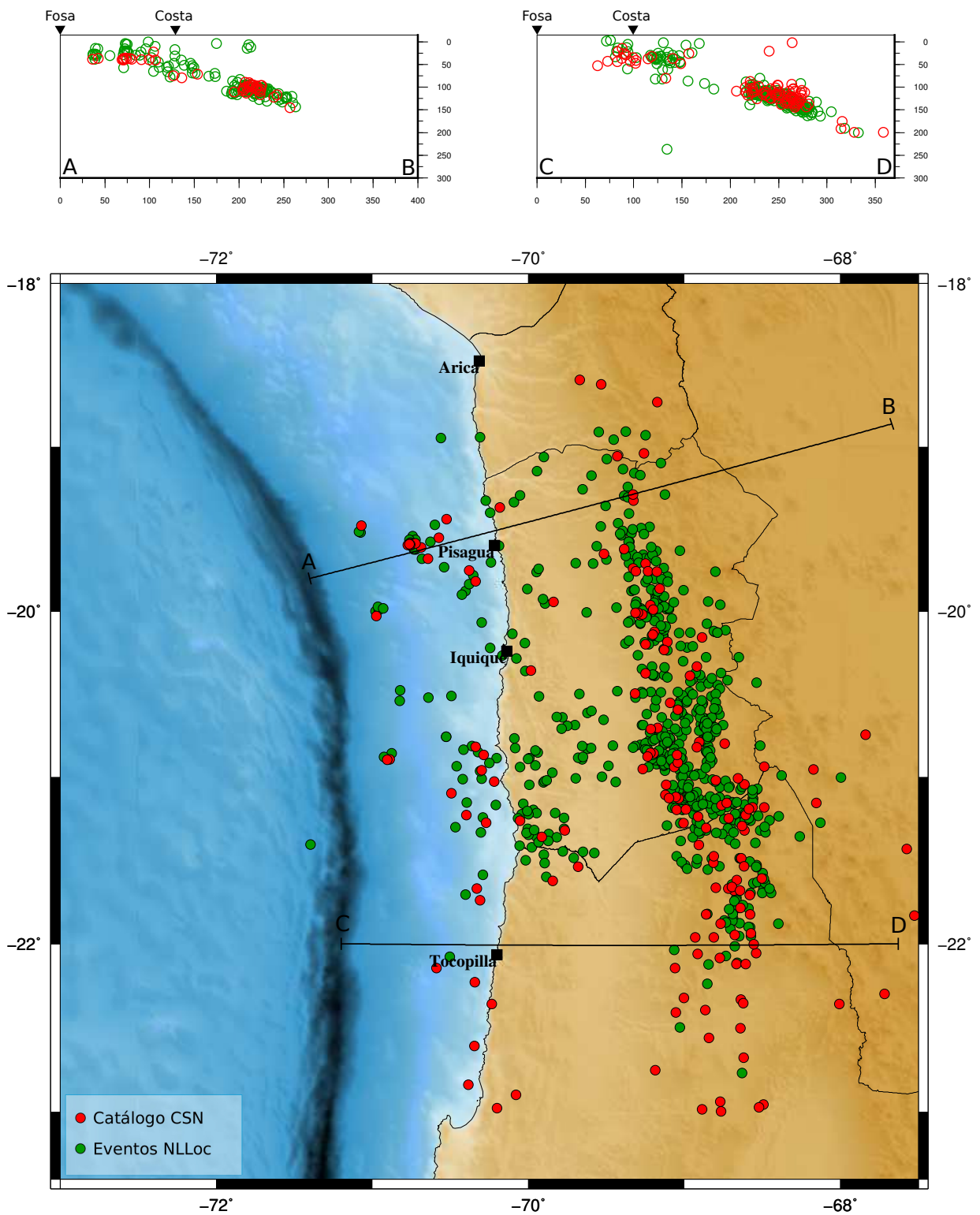


Figura 3.5: Mapa con las localizaciones del Centro Sismológico Nacional (rojo) y probabilística (NonLinLoc) realizada para este trabajo (verde), ambas para eventos sobre magnitud 4.0. Además se muestra la sismicidad en dos perfiles (AB y CD con la misma simbología por color.

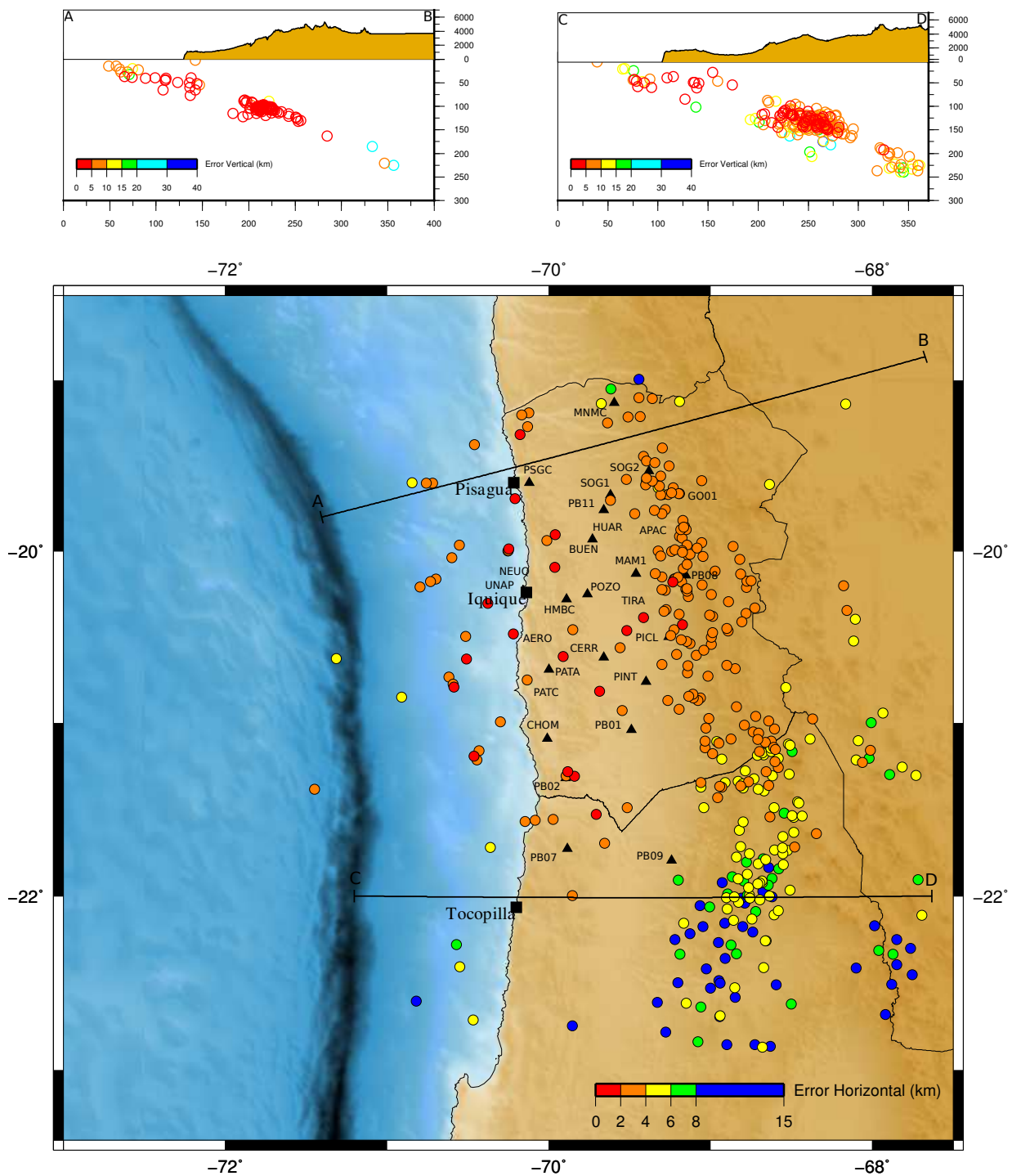


Figura 3.6: Mapa con las localizaciones y sus errores horizontal (planta) y vertical (perfiles) de los 366 eventos encontrados en el periodo Enero 2011 - Mayo 2013. Los perfiles AB y CD tienen las mismas características para ambas bases de datos.

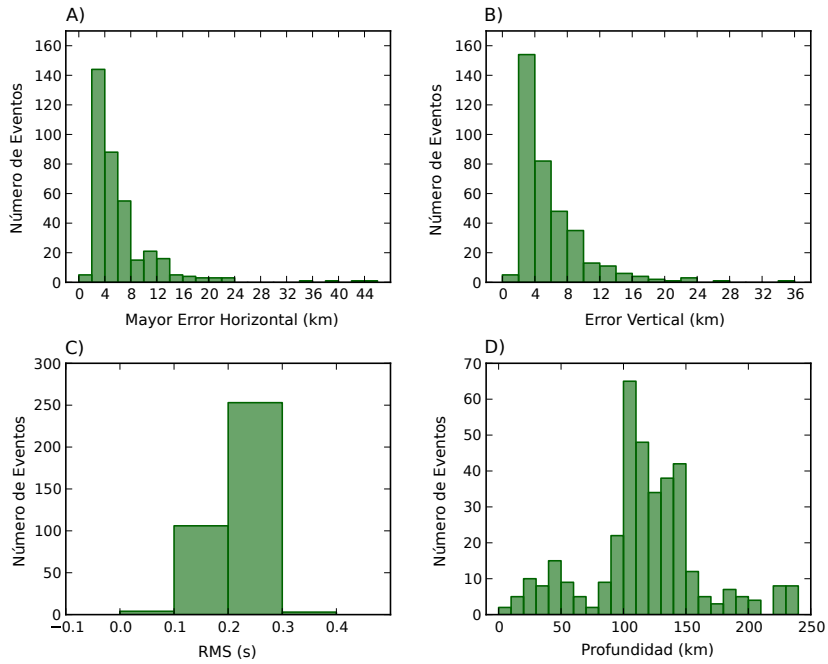


Figura 3.7: Histogramas con la localización NonLinLoc para los 366 eventos ocurridos entre Enero de 2011 y Mayo de 2013. Distribuciones de: (a) máximo error horizontal, (b) error vertical, (c) rms y (d) profundidad.

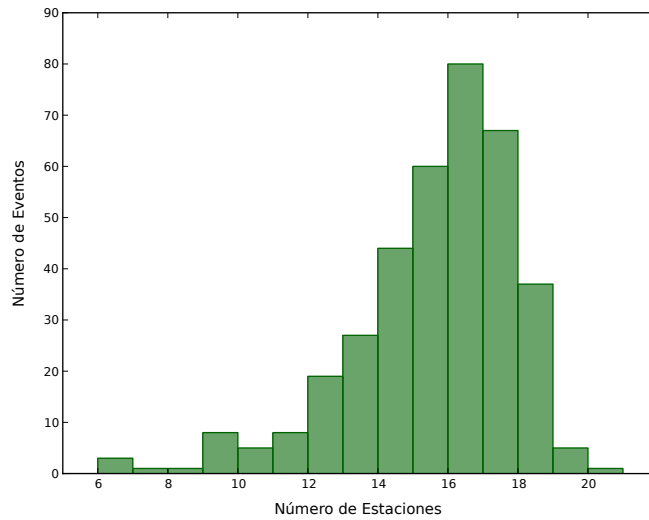


Figura 3.8: Histograma con el número de estaciones utilizadas por cada evento para la base de datos principal.

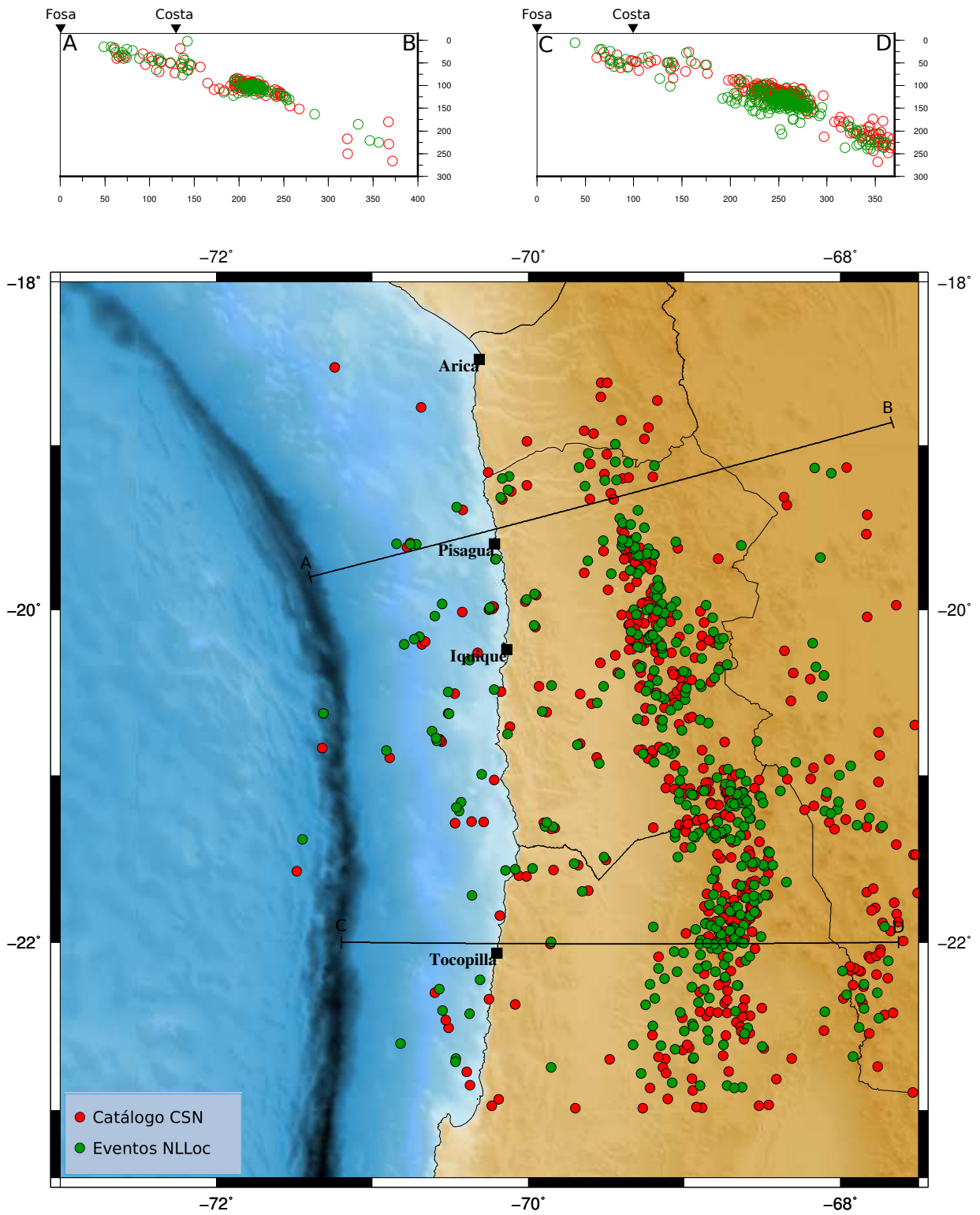


Figura 3.9: Mapa con las localizaciones del Centro Sismológico Nacional (rojo) y probabilística (NonLinLoc) realizada para este trabajo (verde), ambas para eventos sobre magnitud 4.0.

Las siguientes imágenes fueron obtenidas con el programa SeismicityViewer creado por Anthony Lomax, que permite visualizar gran parte de la información sobre las localizaciones Non-LinLoc en 3 dimensiones. Las figuras (3.10) y (3.11) muestran ángulos distintos de la sismicidad junto a su incerteza determinada a partir del elipsoide de 68% de confianza. La figura (3.12) entrega la forma de la función PDF para tres tipos de sismos que representan la sismicidad de la región.

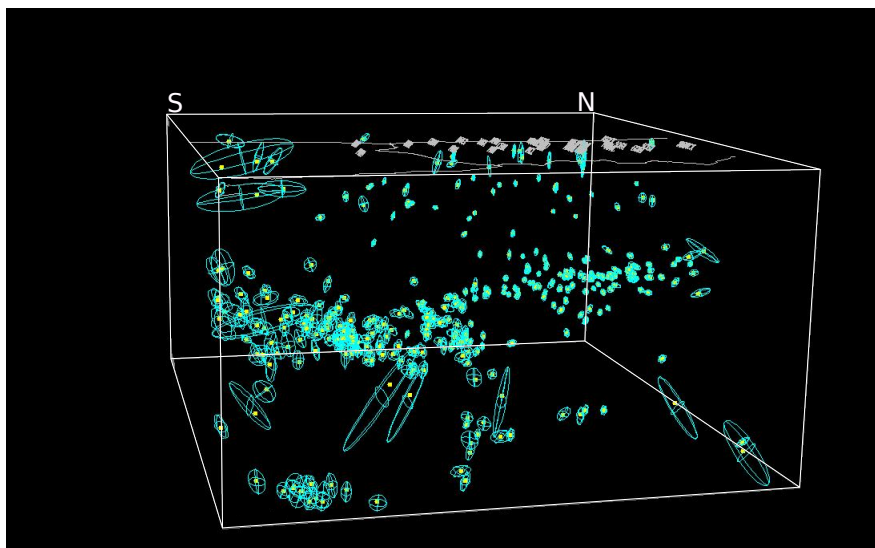


Figura 3.10: Visión de la sismicidad en 3 dimensiones desde un ángulo ubicado al este de la zona de estudio. Los errores son representados por elipsoides de 68% de confianza. La imagen fue creada con el programa SeismicityViewer.

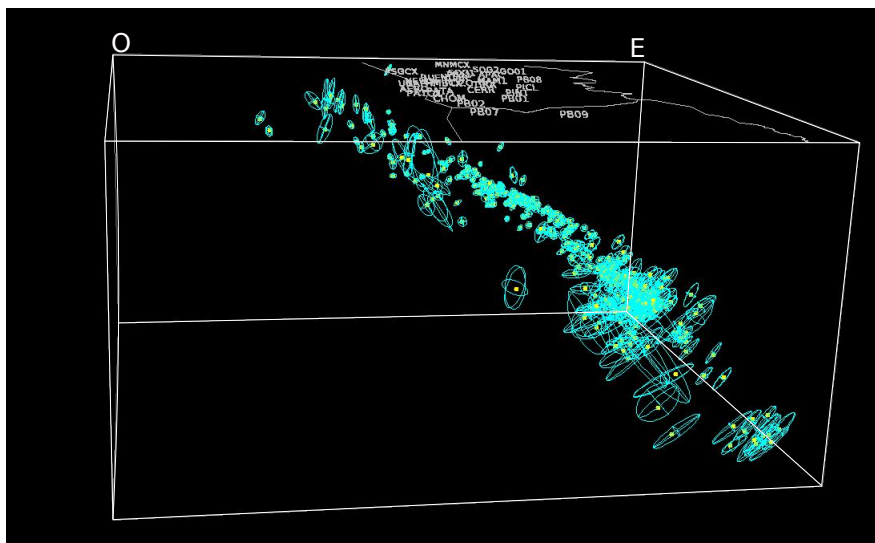


Figura 3.11: La sismicidad y elipsoides de 68% de confianza son representados en 3 dimensiones y vista desde un ángulo ubicado al sur de la zona de estudio.

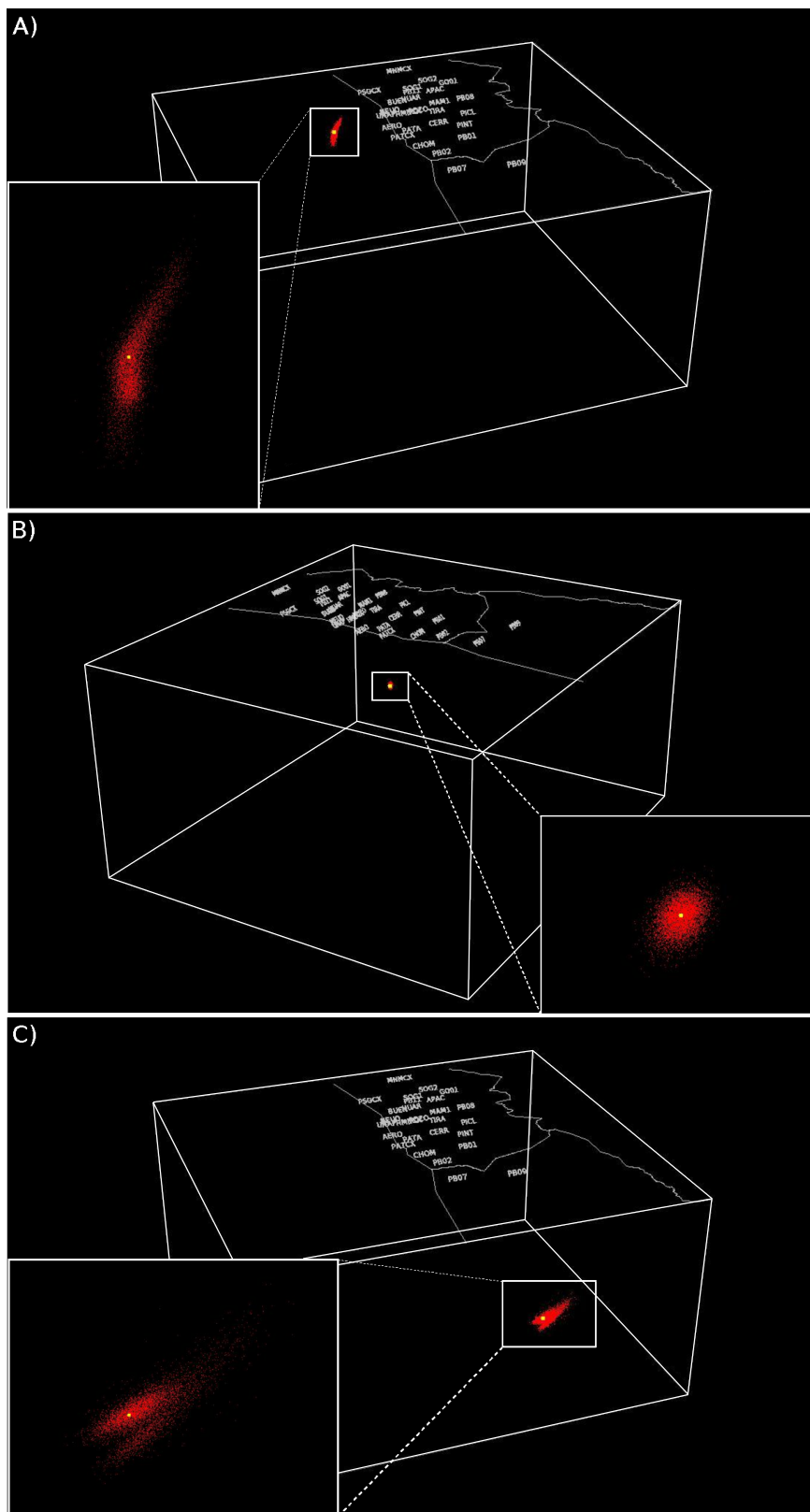


Figura 3.12: 3 eventos ubicados en distintas posiciones con respecto a la red y su función densidad de probabilidad (PDF) asociada (en rojo). La imagen (A) muestra un evento costero, (B) uno ubicado dentro de la red y (C) fuera y al sur de la red de estaciones. Todas las figuras contienen en un sub-cuadro inferior un acercamiento a la función PDF.

3.6. Discusión y conclusiones

De los resultados obtenidos a partir de la localización de la base de datos exhaustiva llama la atención la alta tasa de sismicidad que se observa en la región, la que no quedaba totalmente de manifiesto en catálogos pre-existentes. Se encontró solución a un total de 621 eventos ocurridos en un periodo de tan solo 25 días, siendo estos únicamente una parte de la sismicidad identificada. En una visión general se observa un número predominante de sismos de profundidad por sobre los 100 km en comparación a los del tipo interplaca.

Por otra parte, es claro a partir de la información entregada con respecto a la precisión de las localizaciones obtenidas (ver figuras (3.2), (3.6), (3.3) y (3.7)), que los eventos mejor determinados son aquellos que se encuentran dentro de la red y en una zona de alta densidad de estaciones.

Para las dos bases de datos estudiadas, las incertezas asociadas a los eventos ubicados al sur y al oeste de la red son mayores, aunque el motivo de este fenómeno difiere para ambos casos. En el caso de la base de datos exhaustiva, los errores en la localización son debidos principalmente al bajo número de estaciones utilizado por evento, lo que a su vez tiene relación con el predominio de sismicidad de baja magnitud. Por otro lado, la base de datos principal presenta en su mayoría errores condicionados a la mala cobertura azimutal para eventos costeros y en general para cualquier evento fuera o lejos de la red.

Lo anterior también es corroborado por la localización PDF de cada evento, lo que queda ejemplificado en la figura (3.12) que resume esta información mostrando tres tipos de eventos típicos en el proceso de localización. En esta última se puede ver la relación que existe entre la forma de esta función y la precisión de la solución, que en el caso de eventos bien constreñidos, adoptaría una forma elipsoidal.

Tener una medida de la calidad de las soluciones obtenidas será una ventaja con respecto a catálogos pre-existentes, la que será utilizada como base para caracterizar la sismicidad de la región.

Otro resultado interesante lo muestra la figura (3.10). Esta última junto a la figura (3.11), entregan una visión de la sismicidad en 3 dimensiones incluyendo el elipsoide de 68 % de confianza para cada evento de la base de datos principal. En ella se puede advertir cierta diferencia entre la sismicidad intraplaca de norte a sur. Este cambio coincide con el límite sur de la red ILN cerca de los 21° S, latitud que ha sido mencionada por otros autores [Comte & Suárez, 1995; Sodoudi *et al.*, 2011] como el lugar de transición entre una subducción de bajo ángulo a una más inclinada de sur a norte. Aunque la diferencia podría tener que ver justamente con la disminución en la densidad de estaciones y la posterior baja calidad en la determinación de los hipocentros, es importante considerar que aún tomando en cuenta estas incertezas es posible observar dicho quiebre.

Se puede inferir del análisis realizado para cada una de las bases de datos localizadas (principal y exhaustiva) que el tipo de sismos predominante en la zona corresponden a eventos intraplaca de profundidad intermedia. Esto último se traduce en que el 87 % de los eventos de la base de datos principal y el 81 % de los datos localizados durante los 25 primeros días de Octubre de 2011, tienen profundidades mayores a 60 km. Finalmente, no se observa una cantidad importante de sismos superficiales lo que sugiere que este tipo de eventos no es característico en la región.

Capítulo 4

Cálculo de magnitud local, magnitud de momento y mecanismos focales

4.1. Introducción

Antes de que se utilizaran escalas de magnitud para la clasificación de terremotos, la única manera de medir su tamaño era en base a los daños producidos posteriormente a su ocurrencia, los que debido a que dependen de factores como el momento y el lugar del evento, entregan una medida que no representa necesariamente su tamaño real. Es por esta razón que surge la necesidad de encontrar una cantidad física que los cuantifique.

Los primeros intentos por asignar un tamaño a los terremotos en términos de la energía sísmica liberada en la fuente los realizó Charles F. Richter, cuyos resultados fueron presentados en su trabajo titulado “*An Instrumental Earthquake Magnitude Scale*” [Richter, 1935], en el cual se dio origen al término magnitud. Su idea central al crear una escala conocida actualmente como magnitud local, era lograr establecer diferencias en tamaño entre un evento y otro basándose en la relación directa que existe entre amplitud de la onda y la energía. De esta manera, la magnitud propuesta por Richter, logra proponer un parámetro que representa en promedio el tamaño físico de un terremoto [Kanamori, 1978]. Sin embargo hay que tener en cuenta que este estimador tiene mayor relación con la fuerza del movimiento en el rango de frecuencias de interés para la ingeniería, que con la duración de este o las dimensiones de la fuente [Kanamori & Jennings, 1978].

Otras escalas de magnitud para terremotos como la de ondas superficiales u ondas de cuerpo, junto con la antes mencionada (magnitud local), tienen una característica en común, saturan para terremotos de magnitudes mayores a $M_L \sim 5.5$. Este problema tiene que ver con que dichas escalas empíricas utilizan ondas sísmicas cuyos periodos se encuentran en un rango determinado, y teniendo en cuenta que la amplitud de una onda representa la energía liberada por un volumen de roca de dimensiones comparables con su longitud de onda, estas escalas no serán capaces de determinar la magnitud de terremotos con dimensiones más allá de la máxima longitud de onda utilizada [Kanamori, 1977].

Por lo anterior fue necesaria la introducción del término momento sísmico [Aki, 1967], el que describe de manera directa y total la deformación en la fuente, además de la creación de una escala de magnitudes basada en este parámetro [Kanamori, 1977], cuantificando así la energía liberada durante el proceso de ruptura de mega-terremotos, método que se transforma actualmente en el más confiable para calcular el tamaño de un terremoto.

Otro parámetro importante que permite inferir el régimen de esfuerzos en una región en particular, es la geometría de la fuente, es decir, la orientación y la dirección del deslizamiento de un plano de falla donde se asume que ocurrió movimiento relativo durante un terremoto. Para obtener la solución del plano de falla de un terremoto representada por el mecanismo focal existen variados métodos, todos basados en el patrón de radiación proveniente de la fuente [Stein & Wysession, 2009]. Los más básicos, que asumen un modelo simple de la fuente, incluyen solo las polaridades de las ondas sísmicas primarias o estas últimas junto con las secundarias y los cocientes de amplitud.

En el transcurso de este capítulo se revisará y se darán detalles del procedimiento llevado a cabo para obtener una estimación de las magnitudes local y de momento para datos ocurridos en un periodo cercano a 3 años correspondientes a la base de datos principal y además se determinarán los mecanismos focales para un subconjunto de esta.

4.2. Magnitud local

4.2.1. Escala empírica de magnitud local

La magnitud local de un terremoto es calculada según la escala instrumental de magnitud de terremotos propuesta por [Richter, 1935]. Esta última se basa en la relación directa que hay entre amplitud y energía y su valor está dado por,

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} A_0 \quad (4.1)$$

, donde A es la máxima amplitud en milímetros registrada a cierta distancia del evento por un instrumento determinado y $\log A_0$, con A_0 una amplitud de referencia, es un término que da cuenta del decaimiento de la amplitud con la distancia.

El instrumento específico utilizado corresponde al sismógrafo de torsión y periodo corto Wood-Anderson, que consta esencialmente de una ligera masa de cobre adosada a un alambre sometido a una gran tensión, la cual es capaz de rotar sometida a un amortiguamiento proporcional a la velocidad entregado por dos magnetos [Anderson & Wood, 1925].

La corrección que da cuenta del cambio en la amplitud con la distancia aplicada en la fórmula original determinada por Richter, fue calculada específicamente para la región sur de California (ver figura (4.1)) y fue calibrada asumiendo que la magnitud de un evento registrado a 100 km de distancia epicentral será 3, si la máxima amplitud observada a esa distancia es 1 mm.

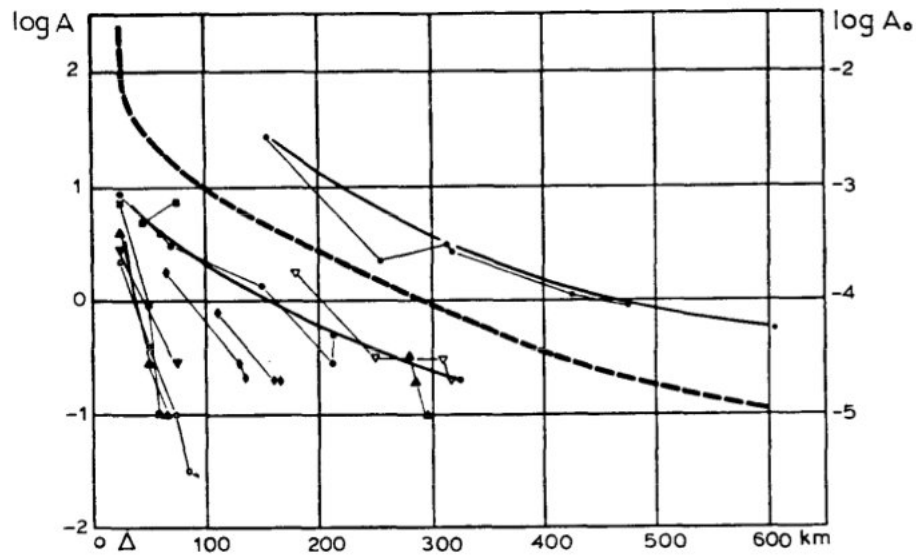


Figura 4.1: En la figura se muestran valores empíricos de la relación $\log_{10}A$ vs. Δ para distintos eventos (líneas continuas) correspondientes al sur de California. La línea segmentada que representa la atenuación local, corresponde a la curva compuesta que pasa por un punto arbitrario correspondiente a la observación de 1 mm de amplitud máxima a 100 km de distancia epicentral. Figura extraída de Richter [1958].

4.2.2. Cálculo de la magnitud local para la base de datos principal

Posteriormente a la localización de la base de datos, la magnitud local fue calculada para la totalidad de los eventos siguiendo los pasos descritos a continuación,

- Ingreso de coordenadas correspondientes a las estaciones y el hipocentro en el “header” de cada forma de onda sincronizada y en formato SAC.
- Corrección instrumental de los registros.
- Cálculo de la magnitud local en base a un procedimiento automático ejecutado por la rutina Python *CALCML*.

El manejo de datos mencionado en los 2 primeros puntos se realizó de manera automática utilizando las rutinas Python *InsertHeader* y *RMresponse* creadas durante el presente trabajo.

Los procedimientos más importantes serán descritos en las siguientes secciones.

Corrección de señales por el instrumento

Una señal en bruto (U) puede ser representada como la convolución en el espacio temporal entre la fuente (S), el medio por donde viajan las ondas (M) y finalmente el instrumento (I) [Oppenheim *et al.*, 1989]. La parte de esta señal que excluye los efectos del instrumento ($S \otimes M$) corresponde al

movimiento sísmico real del suelo, y puede ser determinada de forma sencilla desde el dominio de las frecuencias,

$$S \cdot M = \frac{U}{I} \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) describe de forma general el procedimiento utilizado para remover la respuesta instrumental de una señal, la cual es “dividida” por una función que representa al instrumento en el dominio de frecuencias, resultado que trasladado al dominio del tiempo representa al movimiento sísmico real.

La corrección instrumental de la base de datos principal es llevada a cabo utilizando la función *simulate*, parte del conjunto de herramientas para la manipulación de datos sísmicos en Python (Obspy), la que utiliza características del instrumento tales como: polos, ceros, ganancia y sensibilidad, y entrega el resultado en las unidades físicas que corresponden al tipo de registro, en este caso m/s.

Cálculo de M_L

El procedimiento para determinar la magnitud local corresponde básicamente a obtener la diferencia entre \log_{10} de la amplitud máxima registrada por un instrumento Wood-Anderson ubicado a cierta distancia de la fuente y el valor de la curva de atenuación de la región para esa distancia (ecuación (4.1)).

Según lo anterior, es necesario simular el comportamiento de este tipo de instrumento a partir de registros correspondientes a sismómetros banda ancha, lo que equivale a efectuar una convolución entre la señal corregida por el instrumento y una función que representa al sismómetro de periodo corto. La respuesta del instrumento Wood-Anderson utilizada está determinada por los parámetros señalados en la tabla (4.1).

Respuesta instrumental sismómetro Wood-Anderson			
Polos	Ceros	Ganancia	Sensitividad
(-6.2832 ± 4.7124)	[0,0]	1	2080

Tabla 4.1: Descripción de la respuesta del instrumento periodo corto Wood-Anderson utilizada para el cálculo de la magnitud local. El valor indicado para la sensibilidad, que difiere con el reportado habitualmente, corresponde al obtenido por [Uhrhammer & Collins, 1990].

La amplitud máxima observada será obtenida a partir de las componentes horizontales (simulando la respuesta de un sismómetro Wood-Anderson), y se calculará como la mitad de la distancia entre el máximo y el mínimo de cada registro en milímetros.

Por otra parte, la curva de atenuación utilizada describe la disminución de la amplitud con la distancia de una manera general y no corresponde a una función determinada específicamente para la zona,

$$\log_{10}A_0 = -(\log_{10}(D/100) + 3) \quad (4.3)$$

donde D corresponde a la distancia hipocentral, la cual es más apropiada para las características sísmicas de la región que la distancia epicentral utilizada en la fórmula original.

Finalmente, la magnitud local de un evento será calculada como el promedio del resultado obtenido para las componentes horizontales de todas las estaciones disponibles, utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.3).

Los resultados obtenidos para la base de datos principal se muestran en el apéndice B.

4.2.3. Comparación con magnitudes obtenidas por el Centro Sismológico

En la figura (4.2) se muestra el ajuste lineal entre las magnitudes locales obtenidas por el Centro Sismológico Nacional y las determinadas en este trabajo.

Aunque existe una alta dispersión de los datos, sobre todo para magnitudes menores a 4.5, se observa una buena relación lineal entre ellos.

Para los 3 valores con una magnitud cercana a 3.0 calculada en este trabajo que se encuentran notoriamente alejados del ajuste, se comprueba mediante la concordancia con la magnitud de momento (también obtenida en este trabajo) y junto a la comparación de sus registros con otras señales sísmicas correspondientes a eventos de magnitudes mayores, que los altos valores que fueron determinados por el Centro Sismológico en este caso se encuentran sobre-estimados.

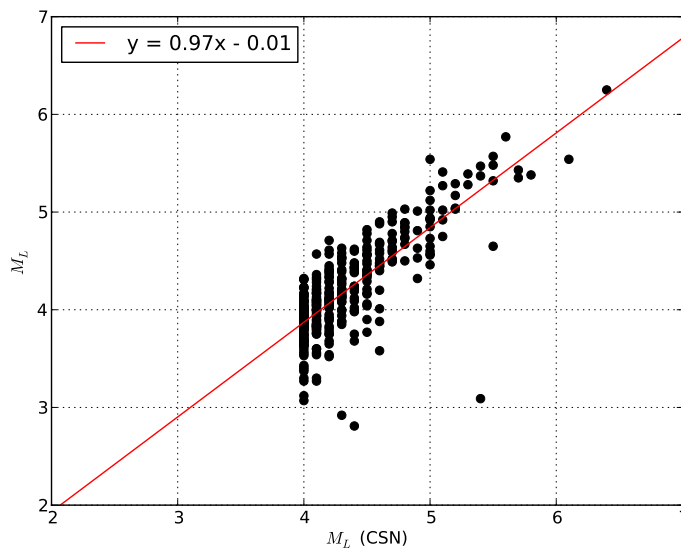


Figura 4.2: Ajuste lineal (línea roja) entre las magnitudes locales obtenidas (M_L) y las determinadas por el Centro Sismológico Nacional (M_L (CSN)).

4.3. Magnitud de momento

4.3.1. Energía de deformación y momento sísmico

La relación propuesta por Gutenberg [1956] entrega una relación entre la energía (en ergs) y la magnitud de un terremoto,

$$\log E = 1.5M - 11.8 \quad (4.4)$$

Por otra parte, según el modelo de relajación de estrés elástico [Knopoff, 1958], es posible expresar la diferencia de energía de deformación elástica (W) asociada a la fase previa y posterior a un evento como,

$$W = \bar{\sigma} \cdot \bar{D} \cdot S \quad (4.5)$$

donde $\bar{\sigma}$ y \bar{D} son el estrés y desplazamiento promedio durante el fallamiento y S el área del plano de falla.

Junto a lo anterior, se tiene que el momento sísmico, medida de la deformación total ocurrida en la fuente durante un terremoto [Kanamori, 1977], está definido como,

$$M_0 = \mu \cdot \bar{D} \cdot S \quad (4.6)$$

Con \bar{D} y S definidas anteriormente y μ el módulo de cizalle. El valor de W puede ser calculado de dos diferentes maneras dependiendo si el cambio en el estrés ($\Delta\sigma$) es total o parcial. Si es total se cumple que $\Delta\sigma = 2\bar{\sigma}$ y usando las ecuaciones (4.5) y (4.6) se obtiene un valor para el cambio de energía en términos de M_0 ,

$$W = W_0 = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0 \quad (4.7)$$

En el caso en que $\Delta\sigma$ sea parcial, es decir, existe un valor inicial (σ_0) y un valor final (σ_1), se tiene,

$$W = W_0 + \sigma_1 \cdot \bar{D} \cdot S \quad (4.8)$$

De la ecuación (4.8) se desprende que W_0 es la mínima estimación de la caída de energía de deformación ocurrida durante un terremoto.

A partir de la relación propuesta por Orowan [1960], que relaciona la energía liberada en ondas sísmicas (E) y la liberada por pérdida friccional (H),

$$W = H + E$$

se obtiene,

$$E = W_0 + (\sigma_1 - \sigma_f) \cdot \bar{D} \cdot S \quad (4.9)$$

con σ_f el estrés friccional durante el fallamiento. Si se cumple la condición de Orowan [1960] ($\sigma_1 = \sigma_f$) se concluye a partir de la ecuación (4.9) que W_0 es igual a la energía sísmica.

Por todo lo anterior, W_0 se convierte en una expresión para la energía. Reemplazando en la ecuación (4.4), se define una nueva escala de magnitud, la magnitud de momento (M_w), dada por,

$$\log W_0 = 1.5M_w + 11.8 \quad (4.10)$$

Si se asume que $\Delta\sigma$ es constante e igual a un valor en el rango $(2-6) \times 10^7$ dina/cm² (válido para magnitudes considerables) y se toma el valor de μ en el rango de $(3-6) \times 10^{11}$ dina/cm² (corteza - manto superior) tenemos que $\Delta\sigma/\mu \sim 10^{-4}$ [Kanamori, 1977], por lo que W_0 según la ecuación (4.7) se expresa simplemente como,

$$W_0 = \frac{M_0}{2 \cdot 10^4} \quad (4.11)$$

Con lo anterior en (4.10), se define la magnitud de momento M_w ,

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.70 \quad (4.12)$$

Finalmente la escala de magnitud de momento en unidades S.I. está dada por:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.07 \quad (4.13)$$

De esta manera, según la ecuación (4.13), para obtener la magnitud de momento de un evento, es necesario conocer el valor de su momento sísmico.

4.3.2. Análisis espectral

Uno de los procedimientos habituales para encontrar el momento sísmico de un registro corresponde al análisis espectral de señales. Asumiendo un modelo de Brune [1970] para la fuente, el espectro para el desplazamiento puede ser expresado de manera simplificada como,

$$d(f) = \frac{M_0}{4\pi\rho\beta^3 \left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} \quad (4.14)$$

con f_0 la frecuencia esquina, ρ la densidad y β la velocidad de las ondas de corte, ambas determinadas en la fuente.

El espectro en desplazamiento registrado a cierta distancia r de la fuente se ve afectado por la expansión geométrica $G(r)$, el patrón de radiación $\langle R_{\theta\phi} \rangle$, la respuesta de la superficie libre F y la atenuación de la amplitud de las ondas con la distancia representada por $A(f, r) = A_0(e^{-\frac{\pi fr}{vQ}})$, donde

Q es el factor de calidad y v es la velocidad promedio de la onda a lo largo de la trayectoria. De esta manera, corrigiendo por los términos antes mencionados resulta,

$$d(f, r) = \frac{M_0 \langle R_{\theta\phi} \rangle F}{4\pi\rho\beta^3 \left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} G(r) e^{\frac{-\pi fr}{vQ}} \quad (4.15)$$

El gráfico con ejes en escala logarítmica de la relación anterior muestra una parte plana hacia las bajas frecuencias y decae como f^{-2} a frecuencias altas. Asumiendo pequeños valores de f en la ecuación (4.15) y denominando al nivel espectral constante a bajas frecuencias como *plateau* (Ω), surge la siguiente relación,

$$\Omega = \frac{M_0 \langle R_{\theta\phi} \rangle F}{4\pi\rho\beta^3} G(r) e^{\frac{-\pi fr}{vQ}} \quad (4.16)$$

Asumiendo un valor de $1/r$ para la expansión geométrica, finalmente de (4.16) se obtiene una expresión para el momento sísmico,

$$M_0 = \frac{4\pi\rho r\beta^3 \Omega}{\langle R_{\theta\phi} \rangle F} e^{\frac{\pi fr}{vQ}} \quad (4.17)$$

4.3.3. Cálculo de la magnitud de momento para la base de datos principal

Los procesos involucrados en el cálculo de la magnitud de momento fueron implementados de manera automática por medio de una rutina Python llamada CALCMW (ver apéndice A). Este programa trabaja en base a registros corregidos por el instrumento organizados en carpetas, cada una representando un evento, y para su funcionamiento son necesarios: el archivo que contiene la información de las primeras llegadas para las fases P y S (dentro de la carpeta de cada evento), el que resume el modelo de velocidades y además un catálogo con los datos de la localización de la base de datos. El procedimiento utilizado puede resumirse en los siguientes pasos,

1. Elección de la fase (P, S) en base a la cual se calculará la magnitud
2. Determinación de las constantes a utilizar
3. Identificación del tiempo de llegada para la fase escogida
4. Tratamiento de las señales previo a la integración
5. Extracción de la ventana útil para el análisis espectral según la fase escogida para la señal en desplazamiento
6. Cálculo del valor promedio del plateau entre frecuencias escogidas según magnitud local del evento
7. Obtención de la magnitud de momento

Según lo descrito en el primer punto, la magnitud de momento será calculada utilizando un análisis espectral de ambas fases: P y S. Según esto es importante recalcar que la velocidad en la expresión del espectro en desplazamiento (ecuación (4.14)) no corresponderá solamente a la de ondas de corte, sino que variará a la de las ondas P según sea el caso.

Una vez escogida la fase que se utilizará para calcular la magnitud de momento, es necesario determinar ciertas constantes involucradas en la relación entre momento sísmico y el valor del espectro a bajas frecuencias (ecuación (4.17)). La densidad y la velocidad dependerán de la profundidad del hipocentro, datos que se especifican en el modelo de velocidades y el catálogo entregados como archivos de entrada al programa, donde esta última además será determinada para la fase correspondiente asumiendo que el medio se comporta como un sólido de Poisson. Otro valor que tiene dependencia con la fase corresponde a la respuesta de la superficie libre, que asumirá un valor constante de 1 o 2 dependiendo si la onda es P o S respectivamente. Para el término que describe el patrón de radiación promedio se asumió el valor estándar de 0.67.

Como se señala en el punto 4, previo a la estimación de las señales en desplazamiento, es necesario eliminar su tendencia lineal y filtrar las bajas frecuencias para evitar la amplificación de estas debido a la integración. Los filtros utilizados se aplican según la magnitud local del evento, donde se utiliza un pasa alto del tipo Butterworth con frecuencias esquina de 0.5 y 0.3 Hz para eventos bajo M_L 4.0 y en el rango de magnitudes [4.0,4.5] respectivamente. Para magnitudes mayores o iguales a 4.5 se utilizó un filtro pasa-banda tipo Butterworth con frecuencias esquina de 0.02 y 20 Hz.

El siguiente paso es determinar la ventana de análisis correspondiente a la fase escogida. En el caso de la fase P, comienza 10 segundos antes de su llegada, y termina 3 segundos antes de la llegada de la onda S. Para esta última se utiliza la señal contenida entre 3 segundos previos y 30 segundos después de su llegada.

El cálculo de la parte plana del espectro de Fourier a bajas frecuencias para cada fase es llevado a cabo evaluando el promedio aritmético de sus valores comprendidos entre dos frecuencias que guardan relación con la magnitud local de los eventos. Para eventos con magnitudes iguales o por sobre 5.0 las frecuencias escogidas son 0.03 y 0.2 Hz, mientras que para eventos menores estas corresponden a 0.8 y 1.2 Hz.

El valor final del *plateau* (Ω) para cada estación se calculará a partir de los valores obtenidos para cada componente según la siguiente expresión,

$$\Omega = \sqrt{\Omega_{ew}^2 + \Omega_{ns}^2 + \Omega_{ud}^2}$$

donde los subíndices *ew* y *ns* representan las componentes horizontales y *ud* la vertical.

Una vez obtenido el *plateau* para cada estación, el cálculo del momento sísmico se realiza en forma directa desde la ecuación (4.17), y la magnitud de momento del evento obtenida de la fase P (M_{wp}) o S (M_{ws}), será calculada como un promedio aritmético de los valores obtenidos para cada estación según la ecuación (4.13). Finalmente, la magnitud de momento correspondiente al evento será determinada como el promedio entre M_{wp} y M_{ws} . Todo el procedimiento descrito anteriormente involucró cantidades expresadas en unidades físicas correspondientes al sistema internacional.

El programa muestra los resultados obtenidos en formato ascii para cada evento, donde se entrega la magnitud obtenida para cada estación junto a la magnitud final del evento, y a modo de imágenes para cada estación, las que contraponen las formas de onda de cada componente y su espectro.

A modo de ejemplo del procedimiento descrito, se mostrará los resultados obtenidos para 3 eventos de distintas magnitudes locales, cada una en un rango distinto, lo que implica una diferencia en el tratamiento de sus señales.

Evento de M_L inferior a 4.0

En general, los eventos de magnitudes locales bajo 4.0 se ven sobre-estimados por la magnitud de momento. Esta diferencia entre magnitudes tiene relación con el rango de frecuencias escogido para calcular el *plateau*, que para este tipo de eventos representó en su mayoría frecuencias bajas inducidas por la integración, efecto que el filtro de frecuencias bajo los 0.5 Hz no fue capaz de remover para la totalidad de los registros. Como un ejemplo de lo anterior, se muestra gráficamente en la figura (4.3) resultados para algunas estaciones de un evento de magnitud M_L 3.6, la información del evento se indica en la tabla (4.2). Esta inconsistencia entre magnitudes para eventos de este tamaño se ve disminuída sobre M_L 3.8.

Evento en el rango $4.0 < M_L < 5.0$

En el caso de eventos en este rango se observa una buena correlación entre las magnitudes local y de momento, sin embargo son múltiples casos en los que el filtro pasa-alto de 0.3 Hz de frecuencia esquina no es suficiente para eliminar la amplificación de bajas frecuencias. Esta situación es resuelta la mayoría de las veces por la correcta elección de las frecuencias de borde para el cálculo del *plateau*. En la figura (4.4) pueden verse los espectros obtenidos para 4 distintas estaciones y ambas fases (P, S) para un evento de magnitud M_L sobre 4.5. Datos sobre el hipocentro y magnitudes se detallan en la tabla (4.2).

Evento de magnitud sobre 5.0

Eventos de este tamaño (detalle en la tabla 4.2) son en su mayoría bien estimados por el cálculo de la magnitud de momento propuesto en este trabajo. Las trazas que muestra la figura (4.5) son representativas de los resultados obtenidos para ambas fases. Se observa que la magnitud obtenida a partir del espectro de la fase S está ligeramente por debajo de la magnitud local y la determinada por el análisis de la fase P, sin embargo estas diferencias son normales considerando factores como la geometría de la fuente y su patrón de radiación asociado.

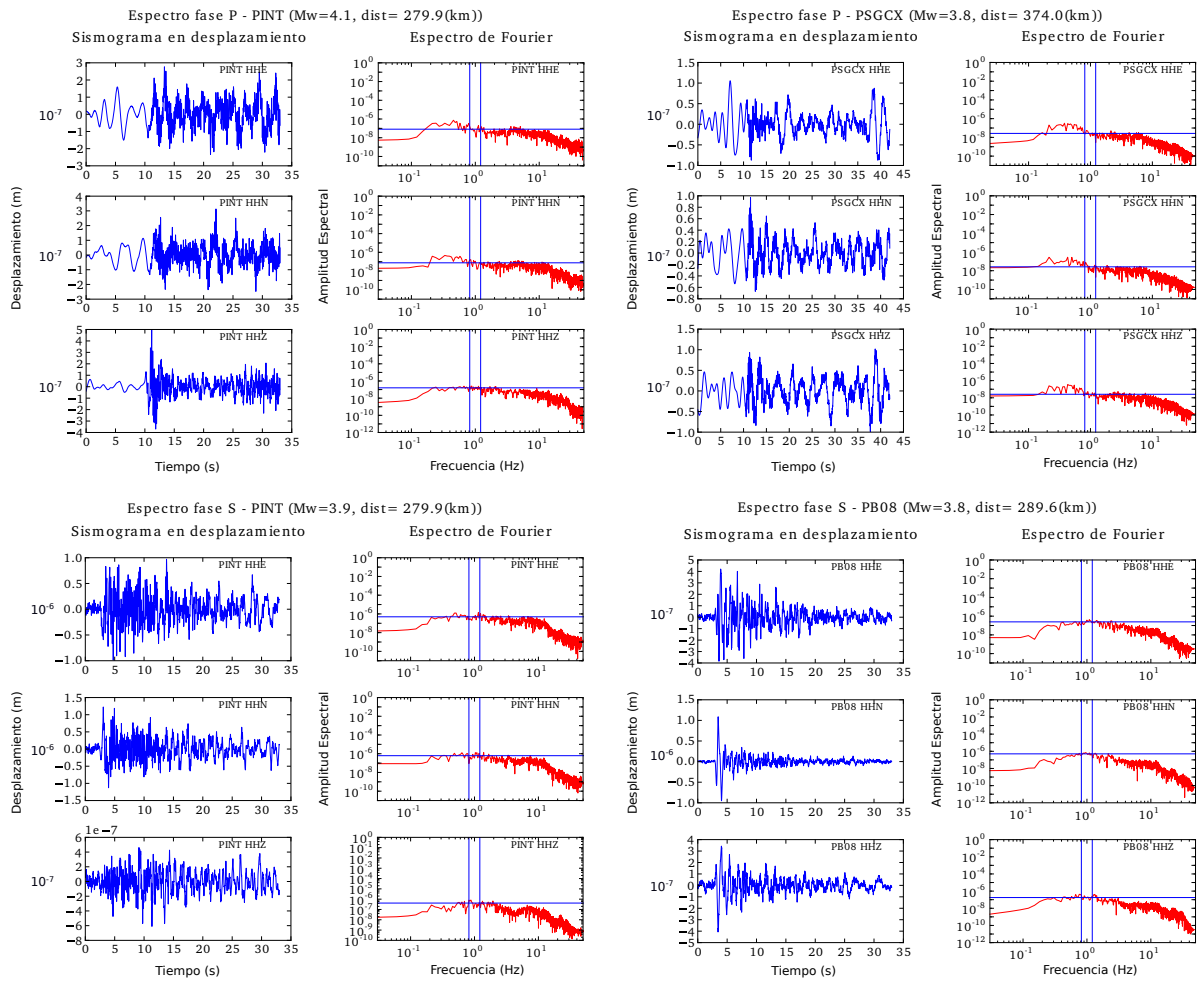


Figura 4.3: Trazas filtradas y corregidas por la tendencia lineal en desplazamiento (azul) y su amplitud espectral (rojo) para un análisis de la fase P (arriba) y S (abajo), para un evento de magnitud M_L de 3.6. Para cada una de las estaciones y sus 3 componentes se muestra solo la ventana de desplazamiento utilizada para el análisis espectral correspondiente a la fase (P o S) aislada. Las líneas verticales azules en la figura que muestra el espectro indica el rango de frecuencia en el que fue calculado el *plateau*, representado por una línea azul horizontal. En cada cuadro, obtenido automáticamente por el programa CALCMW, se señala la estación y la fase analizada junto a la distancia hipocentral y la magnitud obtenida.

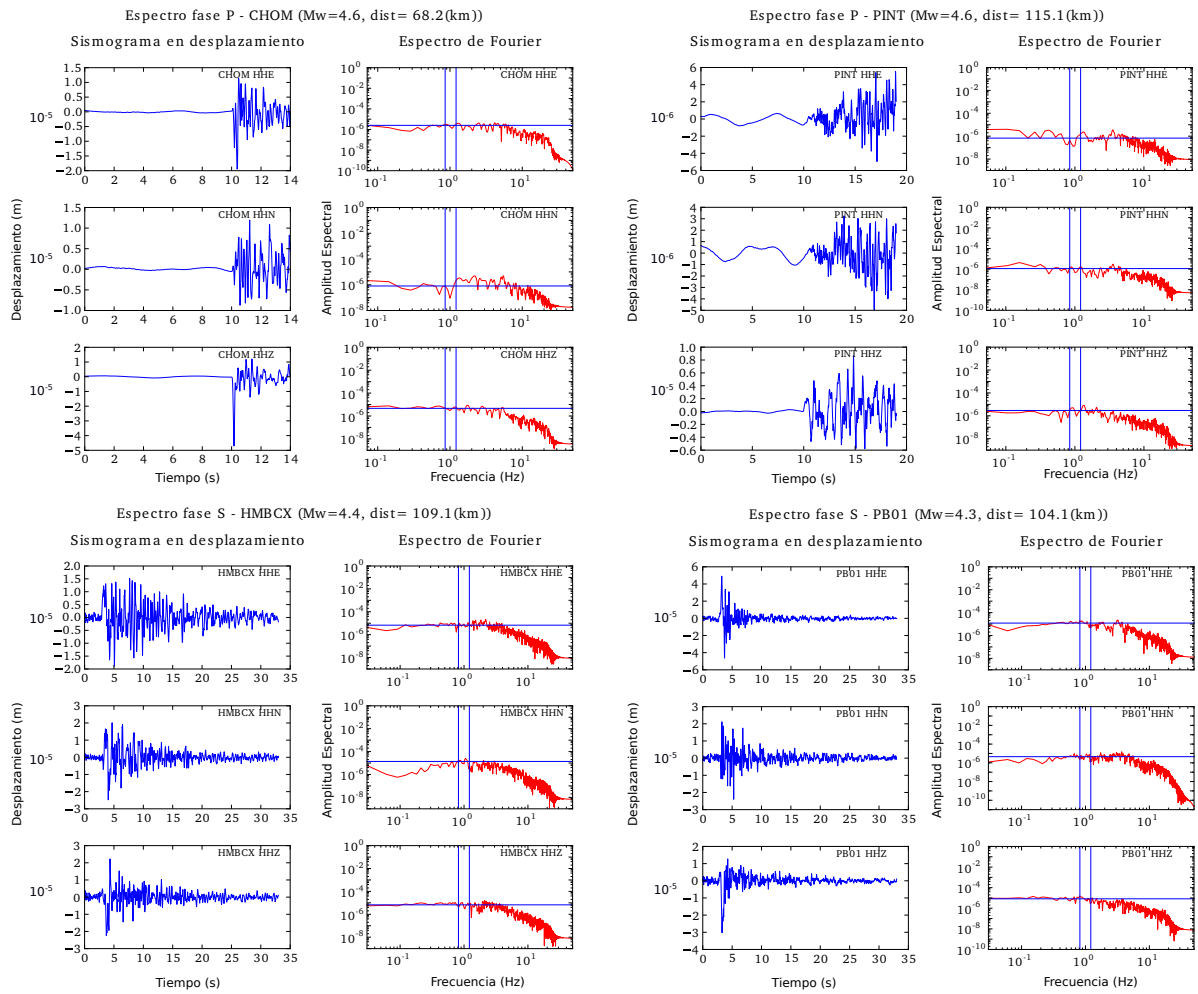


Figura 4.4: Figuras obtenidas a partir del programa CALCMW donde se muestra el análisis espectral de 4 estaciones diferentes para un evento de magnitud M_L 4.6. Trazas en azul corresponden a la ventana de desplazamiento utilizada para obtener el espectro de cada fase aislada (rojo). La figura muestra los registros correspondientes al análisis de la fase P (arriba) y S (abajo), donde las líneas verticales azules representan el rango de frecuencia en el que fue calculado el *plateau* (línea horizontal azul). Se señala la distancia hipocentral y la magnitud de momento obtenida para cada estación.

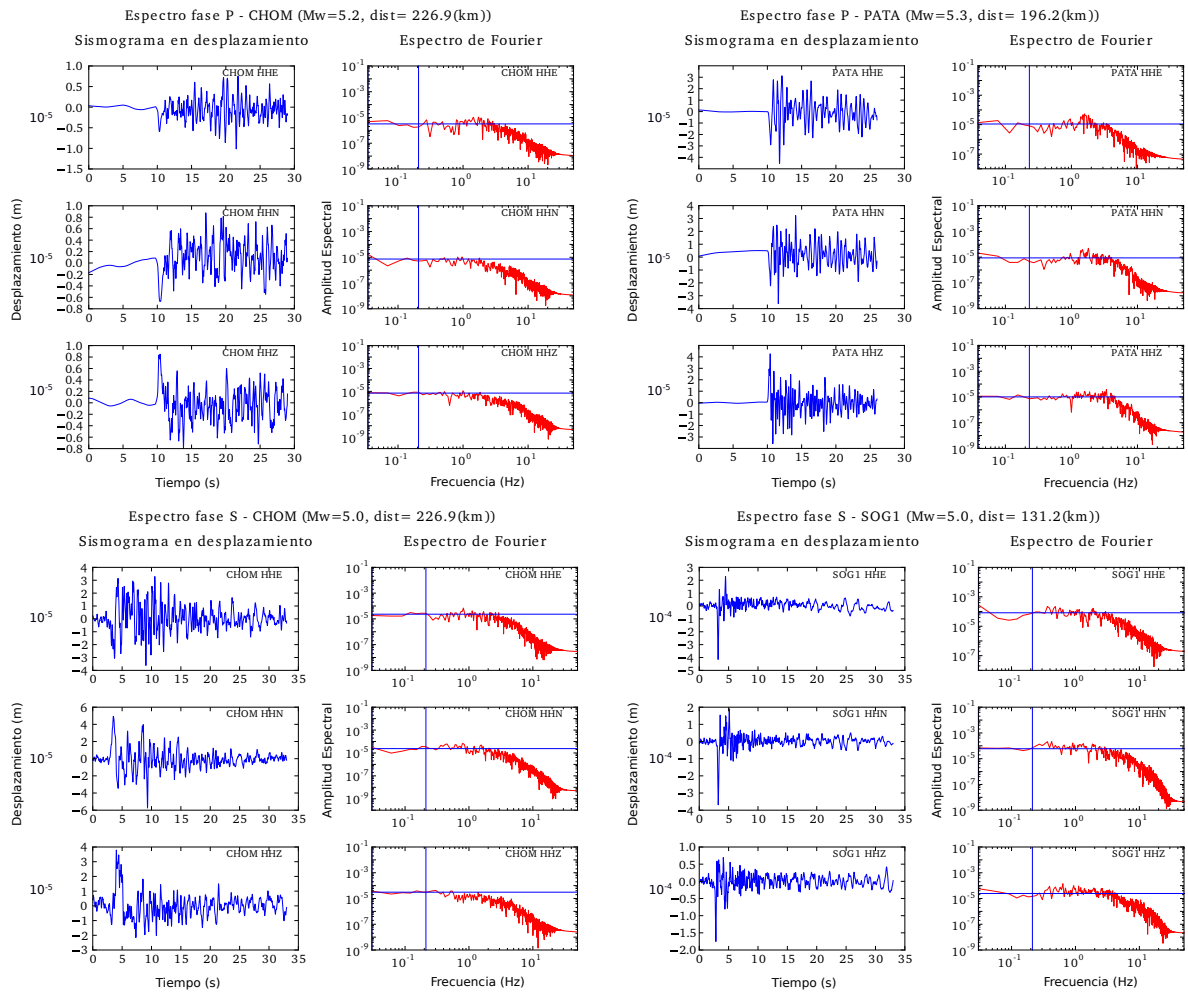


Figura 4.5: Cuatro figuras de salida del programa CALCMW correspondientes al análisis espectral para un evento de magnitud M_L 5.3. Se muestra la ventana de desplazamiento (azul) utilizada para obtener los espectros de ambas fases (P y S) (rojo). Arriba se ubican los registros correspondientes al análisis de la fase P y abajo los de la fase S. La línea vertical azul equivale a la mayor frecuencia del rango para el cual se calculó el *plateau* (línea horizontal azul), la más baja corresponde a 0.03 Hz que se encuentra justo en el límite inferior del eje de frecuencias mostrado en el gráfico. Se indica la distancia hipocentral y la magnitud de momento obtenida para cada estación.

Tiempo origen	Latitud	Longitud	Profundidad	M_L	Nº de estaciones M_{wp}	M_{wp}	Nº de estaciones M_{ws}	M_{ws}
2011/08/03 16:06:07	-21.29	-67.89	223.22	3.6	12	3.9	10	3.9
2011/10/09 00:50:45	-20.99	-70.30	59.97	4.6	14	4.5	14	4.5
2012/04/03 07:25:08	-19.58	-69.05	116.23	5.3	16	5.3	14	5.0

Tabla 4.2: Información de los 3 eventos mostrados a modo de ejemplo para el cálculo de la magnitud de momento.

Registros saturados

Como se mencionó anteriormente, la rutina CALCMW fue implementada para dejar fuera registros saturados. Esto fue realizado mediante una observación netamente empírica sobre las trazas sin ningún tipo de tratamiento previo, que indicaba un valor umbral de cuentas (unidades instrumentales) sobre el cuál se dejaban de registrar las amplitudes del movimiento sísmico.

Este valor corresponde a 4.6×10^6 para todas las estaciones con la excepción de PB11 para la cuál se estimó una cantidad diferente de 8.0×10^6 cuentas.

Estos valores se vieron sobrepasados en su mayoría por eventos de magnitud superior a M_W 6.0, no obstante es importante mencionar que hubo eventos de magnitudes cercanas a 5.5 que presentaron algunas de sus trazas levemente saturadas (ver figura (4.6)).

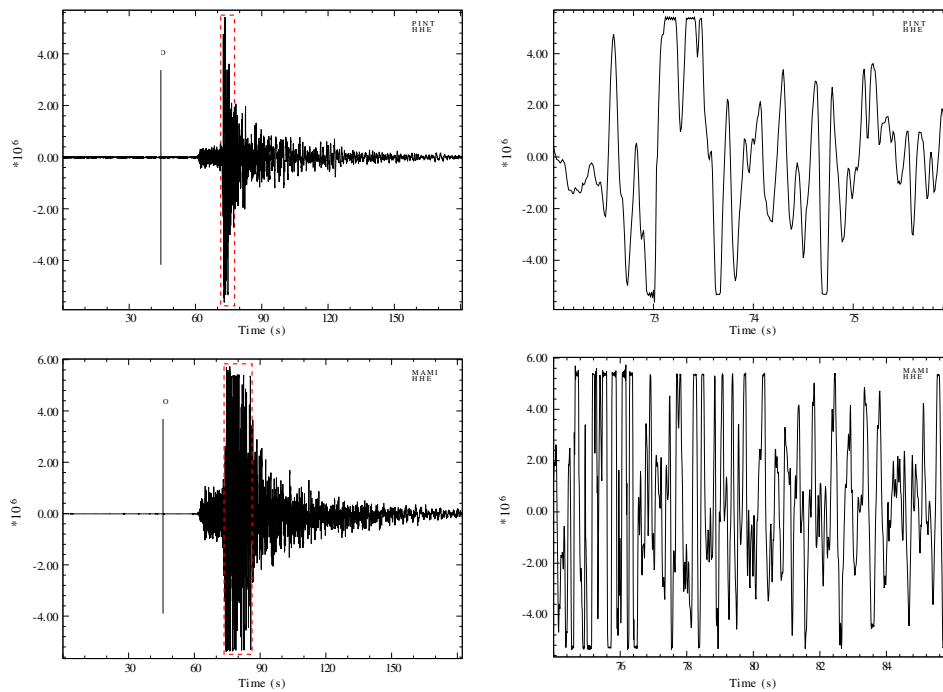


Figura 4.6: Componentes E-W saturadas correspondientes a un evento M_W 5.4 (arriba) y uno de M_W 6.0 (abajo) para las estaciones PINT y MAM1 respectivamente. Ambas trazas se muestran en unidades instrumentales, es decir, no han sido corregidas por el instrumento.

4.3.4. Comparación de M_W con la magnitud local

La figura (4.7) muestra dos análisis distintos de la correlación entre las magnitudes local y de momento. El primero determina la relación para la totalidad de los datos y se caracteriza por una pendiente mayor a uno y un intercepto bajo cero, resultado que proviene de la sobre-estimación por parte de la magnitud de momento de los eventos de magnitudes locales bajo 4.0 principalmente.

El segundo es realizado solo para eventos de M_W superior a 4.5, cuyo resultado muestra un muy buen ajuste lineal de los datos y con una moderada dispersión en torno a este. Los puntos que representan magnitudes por sobre M_W 5.8 muestran la saturación de la magnitud local para eventos de este tamaño.

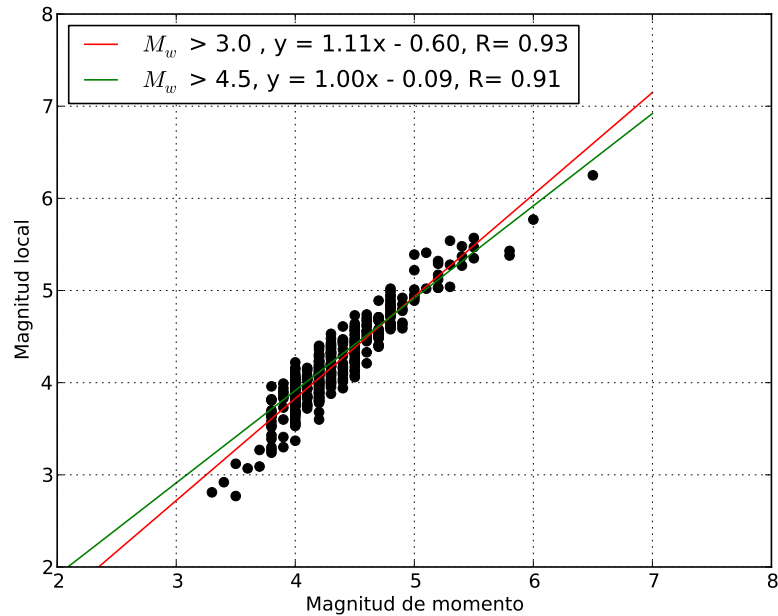


Figura 4.7: Dos ajustes diferenciados por el rango de magnitud analizado que muestran la correlación entre M_W y M_L . El primero (rojo) corresponde al análisis de la totalidad de los datos, a diferencia del que considera solo magnitudes M_W sobre 4.5 (verde), que entrega mejores resultados.

4.4. Mecanismos focales

4.4.1. Geometría de una falla para un modelo de fuente puntual

Asumiendo el modelo más simple de fuente sísmica que corresponde a una dislocación de cizalle puntual, el mecanismo focal del terremoto es representado por 3 parámetros que describen la fractura: *ángulo de rumbo* (strike angle) formado entre la línea de intersección entre el plano de falla y la horizontal y el norte geográfico, el *ángulo de buzamiento* (dip angle), definido como el ángulo entre el plano de falla y la horizontal, y finalmente el *ángulo de deslizamiento* (slip angle, rake), que corresponde a la dirección del deslizamiento a lo largo del plano de falla con respecto al eje orientado a lo largo de la proyección de la falla en superficie [Stein & Wysession, 2009] (ver figura (4.8)).

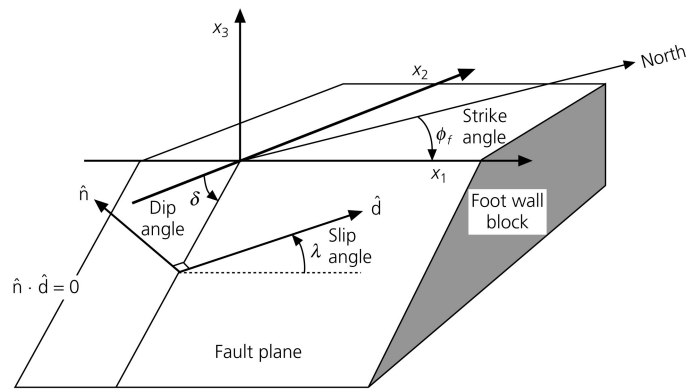


Figura 4.8: En la figura se muestran los 3 ángulos que describen la geometría de una dislocación de cizalle en un sistema coordenado (x_1 , x_2 , x_3) considerado uno de los más comunes. Además se observan el vector normal que define al plano de falla y el vector que representa el deslizamiento entre los bloques colgante (no se muestra) y yacente (figura de Stein y Wysession (2003).)

De acuerdo al ángulo de deslizamiento, las dislocaciones pueden catalogarse básicamente como de rumbo sinistral y dextral ($\lambda = 0^\circ$, $\lambda = 180^\circ$), inversas ($\lambda = -90^\circ$) y normales ($\lambda = 90^\circ$), aunque en la realidad es más probable que sean una combinación de estas formas más simples.

Existen distintos métodos para determinar el mecanismo focal de un terremoto, todos basados en la observación de ondas de cuerpo u ondas superficiales. Los más básicos involucran la determinación de las polaridades de las primeras llegadas de la onda P. Métodos más completos se basan en el análisis de las formas de onda, inversión del tensor de momento y análisis espectral.

4.4.2. Método de polaridades de la primera llegada

Este método para determinar la geometría de una falla utiliza un modelo cinemático de fuente puntual representada por dos pares de fuerzas (doble cupla) y se basa en el patrón de radiación para la onda P, el que consta de dos planos nodales perpendiculares entre sí, definiendo cuatro cuadrantes que contienen polaridades alternadas entre compresión y dilatación (figura (4.9)), y con amplitudes máximas a 45° del plano de fractura y el plano auxiliar [Stein & Wysession, 2009]. Uno de los dos planos nodales corresponde al plano de falla real, aunque no es posible distinguir uno del otro a menos que se hagan consideraciones del tipo geológicas o un estudio de réplicas para la zona.

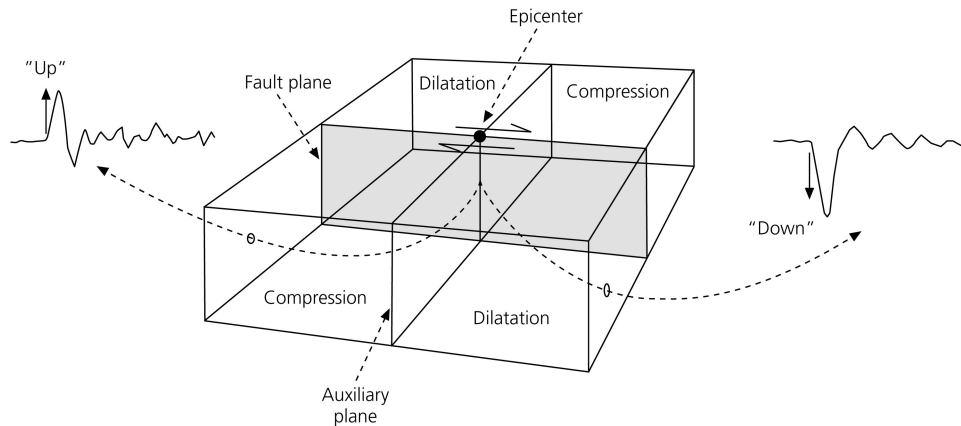


Figura 4.9: Polaridades correspondientes al patrón de radiación de la onda P para una falla de rumbo, alternadas en cuatro cuadrantes entre dilataciones (abajo) y compresiones (arriba) delimitados por dos planos nodales. Uno de estos corresponde al plano de falla, aunque no es posible distinguir uno del otro (figura de Stein y Wysession (2003).)

El procedimiento consiste en utilizar las polaridades de la primera llegada en la componente vertical para un conjunto de sismogramas, idealmente con una buena cobertura azimutal, y llevar estas observaciones a la superficie de una esfera de material homogéneo y de radio infinitesimal centrada en el foco, dado que el patrón de radiación de la onda P entrega desplazamientos en la fuente. Para esto es necesario determinar las trayectorias de los rayos registrados en superficie de vuelta al foco (*ray back-tracing*) donde tendrán una posición determinada por el ángulo de incidencia medido con respecto a la vertical y el azimut de la estación.

Mediante el uso de la ley de Snell que asume un medio elástico, contar con un modelo de velocidades para la zona, y obtener ángulos de incidencia en la fuente (*take-off angles*) trazando. De esta manera, compresiones y dilataciones son representadas sobre una proyección estereográfica del hemisferio inferior de la esfera focal, que permite identificar los planos nodales que determinan la geometría de la falla.

Esta técnica se destaca entre las otras por su sencillez y por utilizar mínima información de los registros, lo que permite utilizar incluso sismogramas saturados, aunque es importante destacar que para obtener una solución bien determinada se debe contar con una buena cobertura azimutal.

4.4.3. FOCMEC: programa para la determinación de mecanismos focales

Este conjunto de programas se basa en la representación de la fuente sísmica como doble cupla, y permiten determinar y mostrar gráficamente el mecanismo focal de la fuente utilizando polaridades (P, SV, SH) y/o la razón entre amplitudes (SV/P, SH/P, SV/SH). La inversión es realizada mediante una búsqueda sistemática de la esfera focal en base a criterios entregados previamente por el usuario con respecto a la cantidad de errores permitidos para declarar una solución como aceptable, tamaño de los pasos y límite de la búsqueda.

Focmec, el principal programa del paquete, recibe un archivo de entrada que contiene polaridades y razón entre amplitudes para un evento, y entrega como resultado dos archivos, el primero (*archivo.lst*) almacena información detallada para cada una de las soluciones aceptables y el segundo (*archivo.out*) muestra las soluciones obtenidas en un formato más simple (una línea por solución) que puede ser utilizado como entrada para otros programas incluidos, como Focplt, que permite visualizar la solución de manera gráfica en una proyección Lambert-Schmidt de igual área de la esfera focal (usualmente del hemisferio inferior), y puede incluir polaridades, planos de falla, ejes de tensión, compresión, superficies nodales y etiquetas entre otras características.

Los parámetros de selección para Focmec y Focplt son ingresados de modo interactivo, o mediante un script creado por el usuario que contenga las especificaciones.

4.4.4. Cálculo de mecanismos focales para la base de datos principal

Con el objeto de determinar los mecanismos de falla de la fuente para la totalidad de los eventos de la base de datos principal, nuevamente se procedió a utilizar una rutina capaz de automatizar los procesos llevados a cabo por el programa FOCMEC (CALCFM.py).

Los datos de entrada utilizados por el programa son 3: las polaridades de la primera llegada, las cuales fueron determinadas manualmente y verificadas en una segunda revisión para el mayor número de estaciones posible por evento, el azimuth y el ángulo de salida para cada estación, siendo estos dos últimos valores obtenidos a partir de los resultados de la localización NonLinLoc. Parte de la configuración de su funcionamiento fue escoger una proyección para la semi-esfera superior debido al carácter local de los datos, descartar los eventos con menos de 5 polaridades, determinar soluciones sin aceptar ninguna polaridad errónea y definir un valor máximo de 100 soluciones aceptables de acuerdo a la distribución de polaridades dada.

Debido a la mala cobertura azimutal en la región de estudio, propia de una zona con las características de Chile, el método utilizado no entrega soluciones únicas y precisas para la totalidad de los eventos. Por este motivo, no se consideraron como válidos los mecanismos ambiguos con respecto al carácter compresional o tensional entregado por el parámetro que indica la dirección de deslizamiento (*rake*) para cada una de las soluciones aceptadas resultantes, de esta manera asegurando la fiabilidad de tal característica para la solución final entregada.

Por otra parte, se asignó un coeficiente de confiabilidad a cada mecanismo con respecto a los parámetros restantes (rumbo y buzamiento), basado en la consistencia de estos entre los múltiples valores entregados para cada una de las posibles soluciones. El criterio para considerar un plano como bien acotado se basa en que esta variación no vaya más allá de $\pm 20^\circ$ de rumbo. El valor de este coeficiente indica el número de planos bien constreñidos en la solución, tomando de esta manera los valores de 0, 1 y 2 dependiendo si: ninguno, solo uno, o ambos planos son considerados como soluciones aceptables.

Como un ejemplo de lo anterior, en la figura (4.10) se muestran 3 soluciones con distintos grados de confiabilidad.

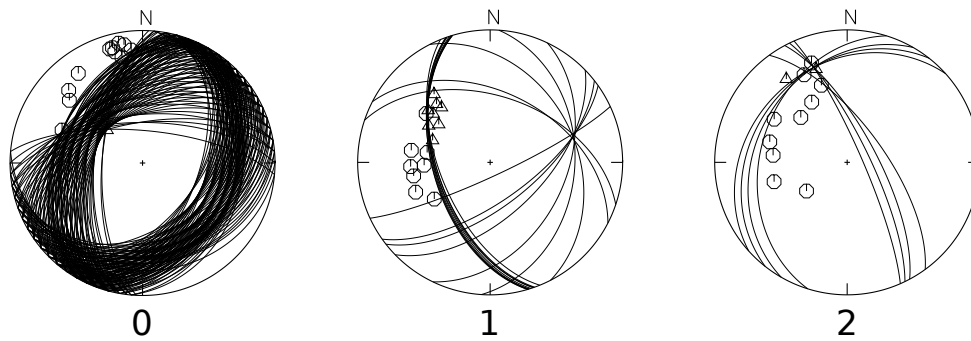


Figura 4.10: Proyecciones del hemisferio superior de la esfera focal obtenidas para 3 eventos distintos de la base de datos principal donde se muestran todas las soluciones obtenidas para un máximo permitido de 100. La primera, con un coeficiente de confiabilidad 0, muestra la variación de ambos planos en más de 45° . Las siguientes, con valores de confiabilidad de 1 y 2, muestran 1 y 2 planos bien acotados respectivamente. Se grafica además las polaridades para las cuales las compresiones son representadas por círculos, y dilataciones por triángulos.

4.4.5. Resultados y discusión

Siguiendo el procedimiento anterior, se obtuvo un total de 138 mecanismos focales, para cada uno de los cuales la totalidad de soluciones obtenidas (de un máximo predefinido de 100) corresponde al mismo tipo de mecanismo: normal o inverso.

En la figura (4.11) se observan las soluciones escogidas para cada evento en un gráfico en planta y dos perfiles. El primero muestra los mecanismos obtenidos diferenciados por profundidad, en la que se puede ver claramente para los eventos de profundidad intermedia, el cambio de norte a sur de un régimen mayoritariamente extensivo a uno compresivo cerca de los 21.5° S de latitud, este último siendo constreñido muy localmente probablemente debido a la poca cantidad de mecanismos obtenidos para esta zona ya más alejada de la red. Esto se condice con las observaciones realizadas tras la localización de la base de datos principal, donde para el mismo tipo de eventos se producía un cambio en sus profundidades hacia el sur, mostrando algo parecido al *hundimiento* de la placa subductada a lo largo del rumbo de la fosa, cuyo comienzo coincide con este conjunto de mecanismos de fallamiento inverso.

Lo anterior indicaría que la variación en el campo de esfuerzos observado sería producto de cambios locales en la flexura de la placa subductada, tal como propone el análisis realizado por Araujo & Suárez [1994] que determina el estado de esfuerzos para parte del norte y centro de Chile utilizando mecanismos focales precisamente determinados para eventos de profundidad intermedia.

De los perfiles norte y sur es posible separar la sismicidad en 3 cúmulos, donde los dos más superficiales muestran un régimen de esfuerzos predominante distinto. Los eventos más superficiales para ambos perfiles muestran mecanismos en su mayoría inversos, mientras que para los de profundidad intermedia son predominantes los mecanismos de fallamiento normal. El volumen mayor del grupo de eventos intermedios para el perfil CD solo indica la diferencia en profundidades para esta zona.

Para los eventos a más de 300 km desde la fosa solo fue posible determinar el mecanismo de una cantidad menor de ellos perteneciente al perfil CD, el cual se destaca por exhibir un mayor número de actividad sísmica de este tipo. Todos ellos coinciden en poseer un mecanismo extensional.

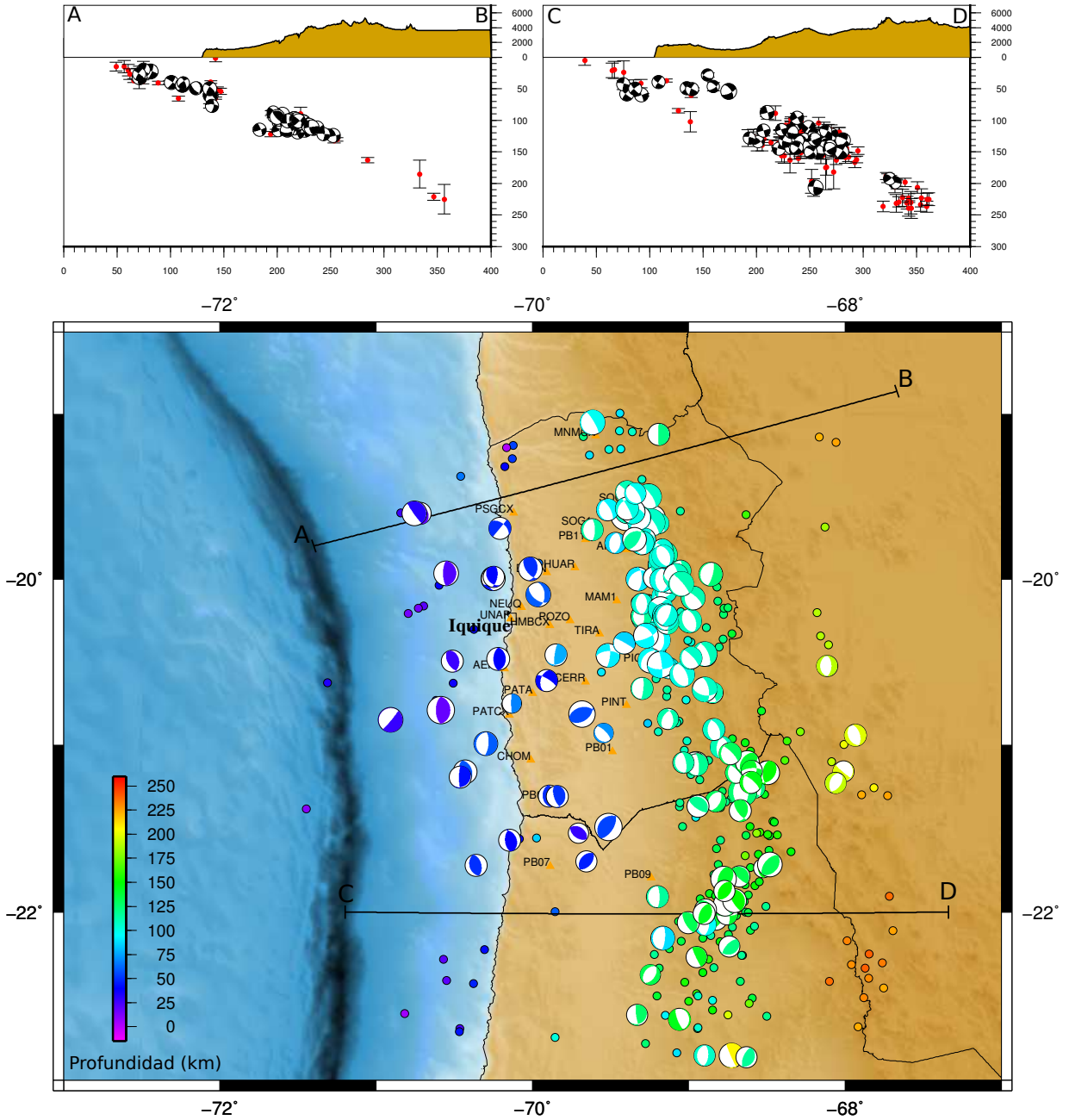


Figura 4.11: Esfera focal en planta y perfiles norte y sur para 138 eventos de la base de datos principal. La imagen en planta indica el caracter compresional o extensional de cada evento junto a su profundidad. Las imagenes en corte muestran la sismicidad a lo largo de los perfiles AB y CD, cada uno con un ancho de 230 km y un largo de 400 km a partir de la fosa. Los círculos rojos representan los eventos sin mecanismo focal disponible y muestran los errores verticales de la localización. Los eventos restantes presentan su mecanismo focal proyectado en el perfil.

De los resultados anteriormente expuestos no es posible inferir características más allá del carácter compresivo o extensivo de cada evento sin tener una medida de la calidad de las soluciones obtenidas. Siguiendo el procedimiento explicado en la sección anterior referido a asignar un coeficiente de confiabilidad a cada solución, se determinaron 29 eventos con ambos planos bien contorneados, los cuales se muestran en la imagen en planta de la figura (4.13) junto a las soluciones con solo un plano acotado (1) y ningún plano acotado (0). Según esta figura la mayoría de las soluciones a profundidades intermedias entre 100 y 125 km al norte de los 21.5° S corresponden a eventos *slab-pull* con planos de falla vertical y horizontal, muy similares al terremoto de Pica 2005 con hipocentro a 98 km de profundidad que resultó tener un plano de falla sub-horizontal [Peyrat *et al.* , 2006]. Sin embargo existe un grupo aislado de eventos ubicado a profundidades cercanas a 100 km bajo la estación PICA, con una solución bien acotada de mecanismo del tipo *strike-slip*. Aunque son eventos extraños, este tipo de mecanismo también se ha observado en otras zonas de Chile, como el sismo de Cartagena 2014 M_W 5.3 (ver figura 4.12). A profundidades más superficiales los eventos presentan en su mayoría mecanismos del tipo *slab-push* con un plano de falla coherente con la zona de contacto, a excepción de dos eventos de fallamiento normal ubicados bajo la costa a profundidades cercanas a 50 km, ambos inmediatamente por debajo de un evento de compresión. De estos dos eventos, el ubicado más al norte presenta una solución bien acotada, que muestra planos paralelos a la fosa con un ángulo de inclinación aproximado de 45°.

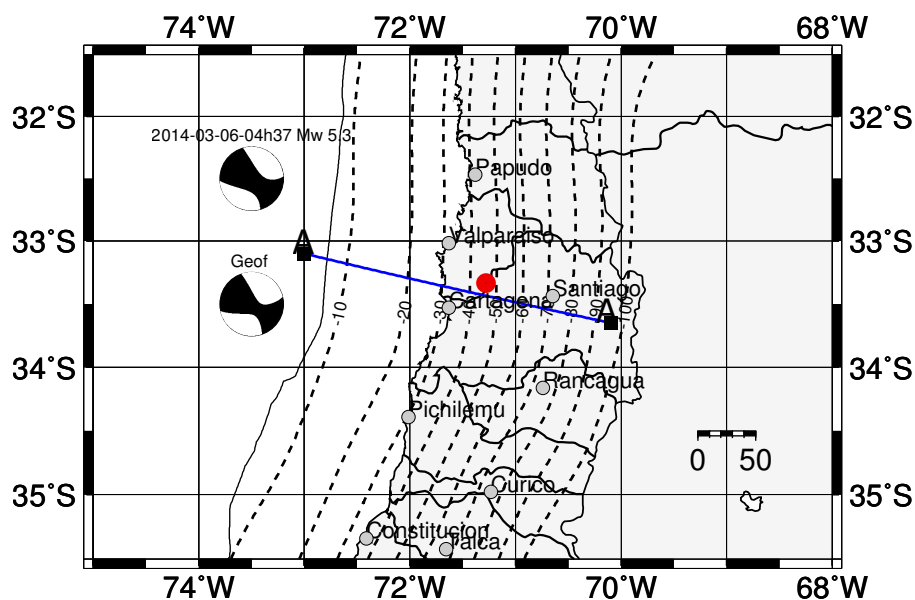


Figura 4.12: Evento de Cartagena (en rojo) ocurrido en 2014 con mecanismo focal del tipo *strike-slip*. Figura de J. Ruiz (obtenida por comunicación interna).

Por otra parte, en la figura (4.13) se muestra la sismicidad ocurrida a lo largo de los perfiles AB y CD con una simbología que permite diferenciar más claramente entre eventos de mecanismo extensional y compresional. Se puede observar en ambos perfiles la diferencia entre el cúmulo más superficial de eventos, que se compone en su mayoría de mecanismos de compresión, y el grupo de eventos a profundidades intermedias, que contiene principalmente mecanismos de extensión.

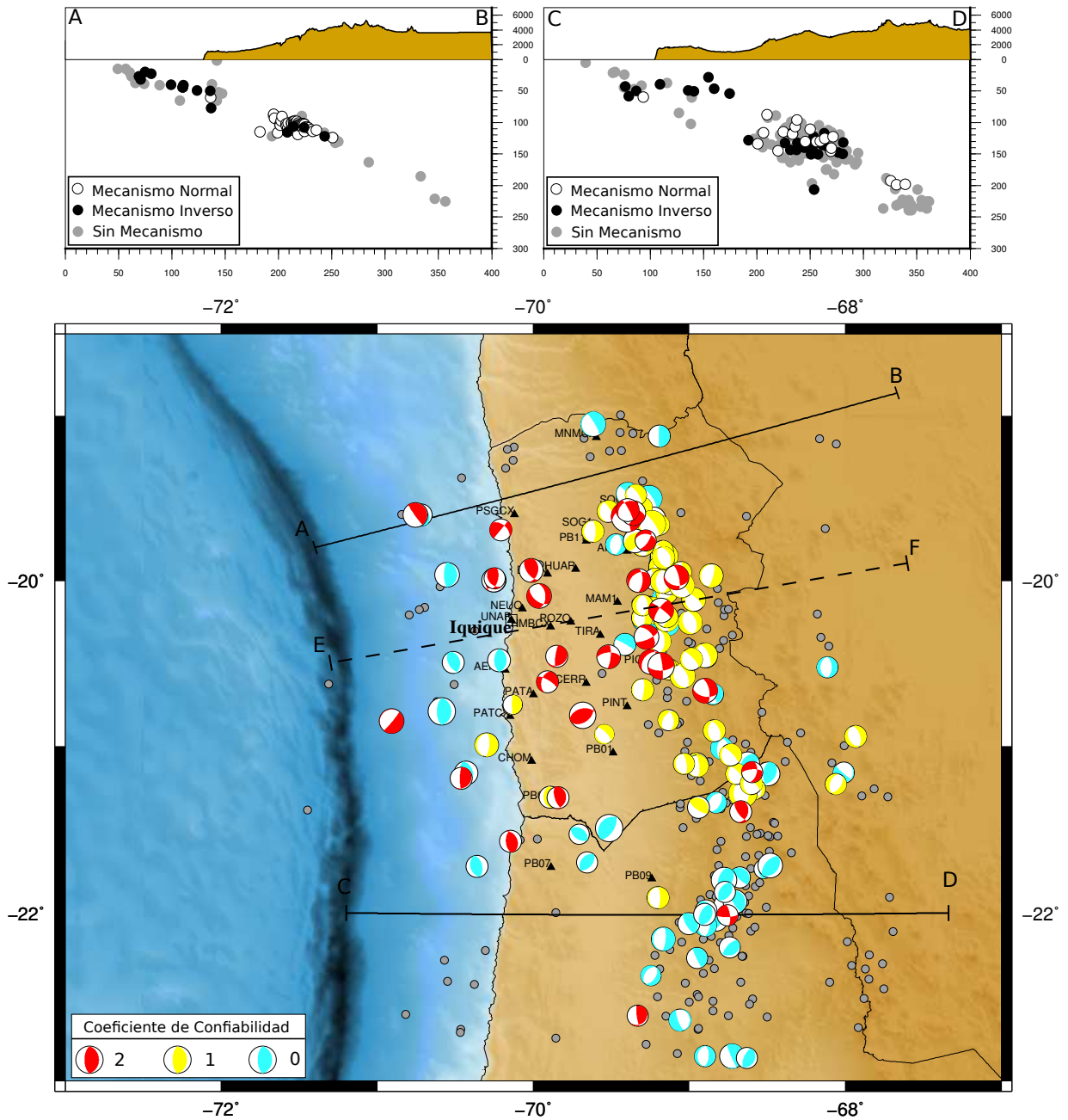


Figura 4.13: Mapa topográfico con el grado de confiabilidad para las soluciones obtenidas (imagen en planta) y representación del carácter compresional o extensional de cada solución (perfiles). Los puntos grises mostrados en cada una de las imágenes representan la sismicidad para la cual no se obtuvo mecanismo. Las características de los perfiles AB y CD son las mismas que para la figura (4.11). La sección en corte del perfil EF y sus características se indican en la figura (4.14).

De esta manera, es posible inferir un rango de profundidades en donde se produciría el cambio de un régimen compresional a extensional en la dirección de la subducción, asociado a la máxima profundidad de la zona de contacto entre placas, para el cual se estima un valor de 60 ± 10 km que coincide con los resultados obtenidos por Comte & Suárez [1995] para la zona. Llama la atención los 3 eventos de mecanismo inverso con profundidades hasta 50 km proyectados en el perfil CD cerca de 150 km desde la fosa, los cuales podrían corresponder a eventos en la placa cabalgante Sudamericana. Asimismo, en el perfil CD es posible identificar el conjunto de eventos compresivos ubicado al sur de los 21.5° S, cuya profundidad y alineación sub-horizontal difiere del grupo de eventos de extensión.

Con el objeto de obtener una visión en detalle de la zona con mayor densidad de estaciones, a la que corresponden la mayoría de las soluciones mejor determinadas para el hipocentro y el mecanismo de la fuente, se crea el perfil EF mostrado por la figura (4.14) que abarca un área de 160 km de ancho y 400 km de largo. Esta figura muestra de manera más clara que los anteriores perfiles la zona de Wadati-Benioff, para la cual nuevamente el cambio en el campo de esfuerzos desde compresional a extensional se produce a profundidades cercanas a 60 km.

Dentro de los primeros 100 km desde la fosa a lo largo del perfil, se observan dos eventos de mecanismo normal situados en el interior de la placa de Nazca entre la fosa y la costa, uno de ellos aproximadamente a 20 km por debajo de la zona de contacto entre placas, la que se asume como delimitada por la ubicación de terremotos del tipo *thrust*. Este tipo de mecanismos fue reportado en el trabajo de Malgrange & Madariaga [1983] para el norte de Chile, sugiriendo una complicada configuración de esfuerzos en la placa subductada que podría indicar la presencia de una doble zona. Otro tipo de eventos que llama la atención corresponde a 2 mecanismos compresivos a profundidades superiores a 65 km ubicados dentro de la placa de Nazca, ambos de magnitudes bajo 4.5, cuyos mecanismos resultan similares a los de eventos interplaca.

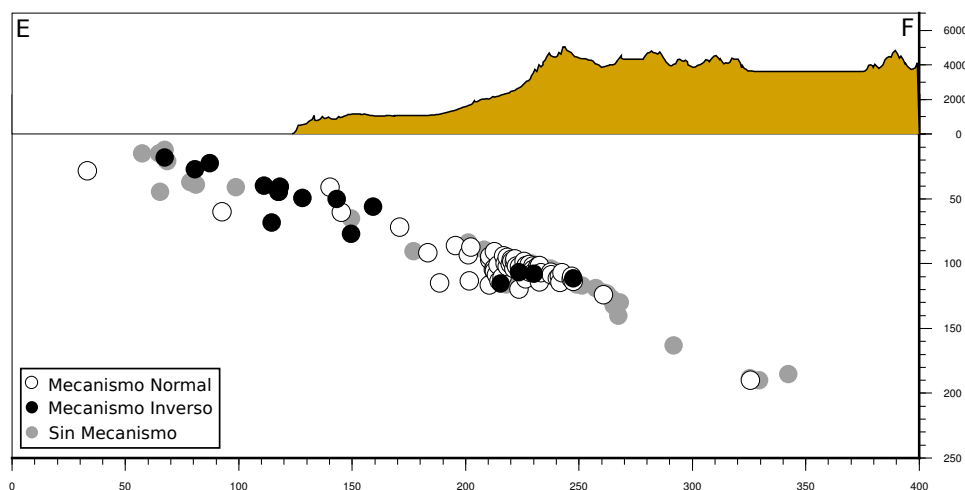


Figura 4.14: Perfil EF de ancho 160 km y largo 400 km ubicado en torno a Iquique mostrado en planta en la figura (4.13). La simbología es la misma utilizada en los perfiles de la figura (4.13).

Como se infiere de lo anteriormente expuesto, es posible comprobar ciertas características del campo de esfuerzos de la zona norte de Chile a partir de localizaciones y mecanismos obtenidos a partir de la sismicidad local. A pesar del importante *gap* de sismicidad entre los 2 principales cúmulos de eventos característicos de la zona, se puede determinar un posible rango para el término de la interfaz de contacto entre placas ubicado cerca de los 160 km desde la fosa a una profundidad de 60 km, el que concuerda con estudios previos. Lo anterior es resultado de la contraposición entre el tipo de mecanismo (compresional o extensional) obtenido para ambos grupos de eventos, los que mostraron un cambio bien definido desde un régimen compresional a uno extensional a lo largo de la dirección de subducción.

Capítulo 5

Parámetros de alerta temprana de terremotos para la zona de Iquique, norte de Chile

5.1. Introducción

El monitoreo sísmico en tiempo real permite hoy en día contar con datos arribando de forma continua a partir de los cuales se puede obtener información sísmica de manera rápida. Lo anterior es esencial para sistemas de alerta temprana de terremotos (sistemas EEW), cuyo objetivo es determinar parámetros como la ubicación hipocentral y la magnitud de un evento pasados pocos segundos tras su ocurrencia, y entregar una alarma confiable en áreas urbanas cercanas a su epicentro antes de que el movimiento más fuerte llegue a una región determinada. Esto apunta fundamentalmente a mitigar los posibles efectos destructivos asociados a un evento de gran tamaño, proporcionando información a nivel personal e institucional que permita tomar medidas de protección. La posibilidad de obtener información certera a partir de los primeros segundos del registro dependerá de la naturaleza determinística de los terremotos, es decir, del hecho de que la magnitud sea controlada por el proceso inicial de la ruptura [Olson & Allen, 2005].

Aunque ya existía el concepto de alerta temprana hace más de 100 años, la aparición de nuevas tecnologías en las últimas décadas permitieron el desarrollo de sistemas de notificación de información confiable sobre parámetros de terremotos en tiempo real, los cuales son la base para la implementación de sistemas de alerta temprana. Estos últimos pueden ser clasificados en dos tipos: sistemas de alarma regional o sistemas de alarma *in situ* [Kanamori, 2005]. El primer tipo utiliza una red local para determinar los parámetros de un terremoto, enviando información a áreas urbanas aledañas, mientras que el segundo tipo tiene la capacidad de determinar parámetros como localización y magnitud de un terremoto antes de que las ondas más destructivas lleguen a un determinado sitio (ondas S y superficiales), entregando una alarma preventiva. Países como Japón, Taiwan, México, EEUU e Italia, que cuentan con modernas redes sísmicas con una alta densidad de estaciones, se encuentran actualmente utilizando sistemas de notificación rápida.

Numerosos trabajos han encontrado relaciones empíricas entre la magnitud y ciertas características obtenidas a partir de porciones tempranas de las fases P o S relacionadas con el contenido de frecuencia y la amplitud.

Ejemplos de estos parámetros son: la frecuencia predominante en la etapa inicial de los registros (y frecuencia característica como variación de este) [Nakamura, 1988; Olson & Allen, 2005; Kanamori, 2005; Wu & Kanamori, 2005a, 2008; Lancieri *et al.*, 2011; Colombelli *et al.*, 2012], el peak de desplazamiento durante los primeros segundos [Wu & Kanamori, 2005b; Wu & Zhao, 2006; Zollo *et al.*, 2006, 2009; Lancieri & Zollo, 2008; Lancieri *et al.*, 2011; Satriano *et al.*, 2011; Colombelli *et al.*, 2012] y el peak de velocidad determinado en un par de segundos iniciales de la señal [Wu & Kanamori, 2005b; Sadeh *et al.*, 2014]. El valor determinado por la integral de la velocidad al cuadrado, que tiene directa relación con la energía radiada en la fuente, también ha sido evaluada por algunos autores [Festa *et al.*, 2008; Lancieri *et al.*, 2011]. En general, la mayoría de los estudios determinan cierto grado de saturación para eventos de gran tamaño [Colombelli *et al.*, 2012], sin embargo algunos resultados declaran observar un buen ajuste en un amplio rango de magnitudes (4-8) [Allen & Kanamori, 2003; Wu & Kanamori, 2005b; Wu & Zhao, 2006; Zollo *et al.*, 2006]. Otros en cambio están en desacuerdo con dicho límite superior ya que tan solo logran observar una correlación hasta magnitudes cercanas a 6.0 [Rydelek *et al.*, 2007].

Durante este capítulo se hará una revisión de la relación empírica entre la magnitud y los parámetros de alerta temprana propuestos en los trabajos anteriores: el periodo característico, el peak de desplazamiento y la integral de la velocidad al cuadrado, todos determinados para porciones tempranas de la fase P de hasta 4 segundos. La base de datos obtenida durante este trabajo será complementada con algunos eventos de mayor tamaño, a modo de llevar a cabo un análisis en un rango mayor de magnitudes. El objetivo será evaluar la posibilidad de implementar un sistema de alarma temprana de terremotos para el norte de Chile, tomando en cuenta las características sísmicas propias de la región.

5.2. Parámetros de alerta temprana analizados

5.2.1. Periodo característico (τ_c)

En un primer intento por cuantificar la magnitud a partir de una porción temprana de la señal, Nakamura [1988] utiliza la relación creciente que existe entre el periodo y la magnitud de una señal sísmica, es decir, rupturas pequeñas radian energía de alta frecuencia comparada con la liberada por grandes rupturas, compuesta por frecuencias bajas principalmente. A partir de esto propone un parámetro denominado *periodo predominante*, cuyo valor es obtenido utilizando la velocidad neta del suelo y una integración recursiva.

Una versión adaptada de este parámetro llamada *periodo característico* (τ_c) es propuesta por Kanamori [2005], la cual a diferencia del periodo predominante, ocupa una ventana fija de la señal en desplazamiento. Este es definido por,

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (5.1)$$

donde r está dado por

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (5.2)$$

con τ_0 el tiempo medido a partir de la onda P para el cual es analizada la señal (generalmente 3 segundos), $u(t)$ el desplazamiento neto del suelo y $\dot{u}(t)$ la velocidad. Finalmente, de las ecuaciones (5.1) y (5.2), el periodo característico se escribe,

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}}$$

A modo de ver la relación entre el parámetro τ_c y la frecuencia, r puede ser escrito nuevamente utilizando el teorema de Parseval,

$$r = \frac{4\pi^2 \int_0^\infty f^2 |\hat{u}(f)|^2 df}{\int_0^\infty |\hat{u}(f)|^2 df} = 4\pi^2 \langle f^2 \rangle$$

con f la frecuencia, \hat{u} el espectro de $u(t)$ y $\langle f^2 \rangle$ el promedio de f^2 ponderado por $|\hat{u}(f)|^2$.

En el trabajo desarrollado por Wu & Kanamori [2005a] se evalúa el comportamiento de este parámetro en una ventana de 3 segundos con el fin de crear un sistema de alerta temprana para Taiwan. Los resultados muestran una alta dispersión que logra ser disminuída descartando registros para amplitudes muy bajas, situación que conduce a la utilización de τ_c en conjunto con un parámetro que mida la amplitud del desplazamiento. De la misma manera, diversos autores han utilizado este parámetro en conjunto con el peak de desplazamiento [Kanamori, 2005; Wu & Kanamori, 2005a,b, 2008; Wang *et al.*, 2009].

5.2.2. Peak de desplazamiento (PD) y su variación en velocidad (PV)

El simple concepto que relaciona el tamaño de un terremoto con la amplitud de una señal es la base para la utilización de ambos parámetros. El peak de desplazamiento (PD) mide el máximo del valor absoluto del desplazamiento en una ventana de τ segundos que comienza con la llegada de la P, y su valor se relaciona de manera inversa con la distancia fuente-receptor [Wu & Kanamori, 2005a]. Su variación en velocidad (PV) representa el máximo peak del valor absoluto de la velocidad registrado en una porción temprana de la señal de la misma manera que PD y su principal ventaja es que no involucra integración.

Wu & Kanamori [2005a] utilizaron el parámetro PD en una ventana de 3 segundos a partir del inicio de la onda P como un método complementario al cálculo de τ_c , útil para entender la dispersión de sus resultados. Los 26 terremotos de Taiwan analizados en este trabajo, caracterizados por tener magnitudes sobre 5.0, distancias epicentrales menores a 30 km y profundidades menores a 35 km, fueron nuevamente utilizados para estudiar los parámetros PD y PV , y su relación con los peak de desplazamiento, velocidad y aceleración sísmica para la señal completa [Wu & Kanamori, 2005b]. Este análisis además utilizó una combinación entre τ_c y PD para determinar el potencial

daño producido por un terremoto. Por su parte, Wu & Zhao [2006] fueron capaces de encontrar una magnitud “*PD*” a partir de eventos del sur de California que concuerda con catálogos pre-existentes hasta $M_W = 6.5$.

Posteriormente, numerosos trabajos han estudiado la relación entre *PD* y la magnitud y su atenuación con la distancia hipocentral [Zollo *et al.* , 2006, 2009; Lancieri & Zollo, 2008; Lancieri *et al.* , 2011]. En su mayoría estos estudios coinciden en utilizar registros cercanos a la fuente en aceleración filtrados en las bajas frecuencias por debajo de los 0.075 Hz. Además muchos de ellos han determinado este parámetro para los inicios de la fase S.

Finalmente Sadeh *et al.* [2014] determina el valor del parámetro *PV* (entre otros) para eventos ocurridos en Israel, concluyendo que los parámetros basados en la amplitud logran correlacionarse de mejor manera que aquellos que tienen que ver con la frecuencia.

5.2.3. Integral de la velocidad al cuadrado (*IV2*)

El parámetro denominado integral de la velocidad al cuadrado (*IV2*) propuesto por Festa *et al.* [2008], es obtenido de porciones iniciales de las fases P y S. Está vinculado directamente con la física de la fuente al basarse en el cálculo de la energía temprana radiada.

Es definido por la siguiente expresión

$$IV2_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} v_i^2(t) dt \quad (5.3)$$

donde el subíndice *i* se refiere a la fase (P o S), t_i corresponde al tiempo en el que llega la fase, Δ es el largo de la ventana donde se realiza el análisis y finalmente v_i es la velocidad de partícula medida en el registro.

Según el trabajo de Festa *et al.* [2008], que utiliza eventos con epicentro en Japón, la correlación con la magnitud resulta un buen ajuste hasta M_W 5.8, determinando el valor de *IV2* para ventanas de 4 segundos para la P y 2 segundos para la S. Lancieri *et al.* [2011] determina un buen ajuste para una ventana de 4 segundos para la totalidad de los datos que corresponden a eventos en el norte de Chile (hasta magnitud M_W 7.7) y corrobora la relación entre energía radiada y magnitud para una ventana que abarca la fase P completa en un rango de magnitudes de 4.0 a 6.0.

5.3. Características de los datos utilizados

Para este análisis se utilizará casi la totalidad de la base de datos principal obtenida en este trabajo para el norte de Chile complementada con una selección de terremotos de magnitudes superiores a 6.0 ocurridos en la zona de estudio desde el año 2007, cuyas localizaciones y magnitudes han sido obtenidas de los catálogos del Centro Sismológico Nacional y USGS respectivamente.

5.3.1. Base de datos principal

Para este estudio se utilizaron los eventos de la base de datos principal cuya magnitud M_W resultó ser superior a 4.0, es decir, 332 eventos en un rango de magnitudes de 4.0 a 6.5, y con profundidades de hasta 240 km, concentrándose la mayoría entre 100 y 120 km.

En total se utilizaron 4983 registros banda ancha (3 componentes por estación) con distancias epicentrales que varían entre 2 y 431 km para un promedio de 15 estaciones por evento.

5.3.2. Eventos grandes

Un total de 13 eventos con magnitudes superiores a 6.0 fueron seleccionados a partir de las localizaciones disponibles en el catálogo del Centro Sismológico Nacional en el periodo 2007-2012 y entre las latitudes 18° S y 23° S y longitudes 68° S y 71° S. Estos eventos fueron agregados a la base de datos a pesar de que algunos se encontraban localizados fuera de la zona específica de estudio. Las magnitudes de tales eventos fueron obtenidas a partir del catálogo USGS. Se utilizó un número de 312 formas de onda (componentes horizontales y vertical por estación) registradas por estaciones banda ancha de la red CX.

Registrados por un promedio de 8 estaciones por evento de un total de 16 estaciones, estos datos incluyen un amplio rango de distancias epicentrales (7 - 700 km) y sus profundidades varían entre 27 y 260 km. Los parámetros y número de estaciones utilizados para cada evento son detallados en la tabla (5.1), y mostrados en forma gráfica en la figura (5.1) junto a la localización y magnitud de todos los eventos de la base de datos principal.

Tiempo origen	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud	N° de estaciones
2007/11/14 15:40:49	-22.314	-70.078	47.7	7.7	11
2007/11/15 15:03:08	-22.867	-70.407	27.0	6.3	11
2007/12/16 08:09:17	-22.962	-70.201	44.7	6.7	08
2008/02/04 17:01:29	-20.275	-70.265	45.6	6.3	05
2008/02/16 14:45:08	-21.470	-68.683	130.1	6.1	05
2008/03/24 20:39:05	-20.196	-69.341	122.5	6.2	05
2009/04/17 02:08:08	-19.679	-70.684	35.7	6.1	07
2009/11/13 03:05:57	-19.511	-70.513	38.7	6.5	08
2009/11/14 19:44:28	-22.872	-67.424	260.8	6.2	08
2010/05/06 02:42:48	-18.315	-70.768	38.8	6.2	08
2010/07/12 00:11:18	-22.354	-68.633	125.3	6.3	07
2011/03/06 12:31:57	-18.309	-69.440	112.4	6.2	11
2012/05/14 10:00:40	-18.115	-70.237	119.6	6.2	10

Tabla 5.1: Hipocentro, magnitud y número de estaciones utilizadas para los 13 eventos de magnitudes sobre 6.0 que complementan a la base de datos principal.

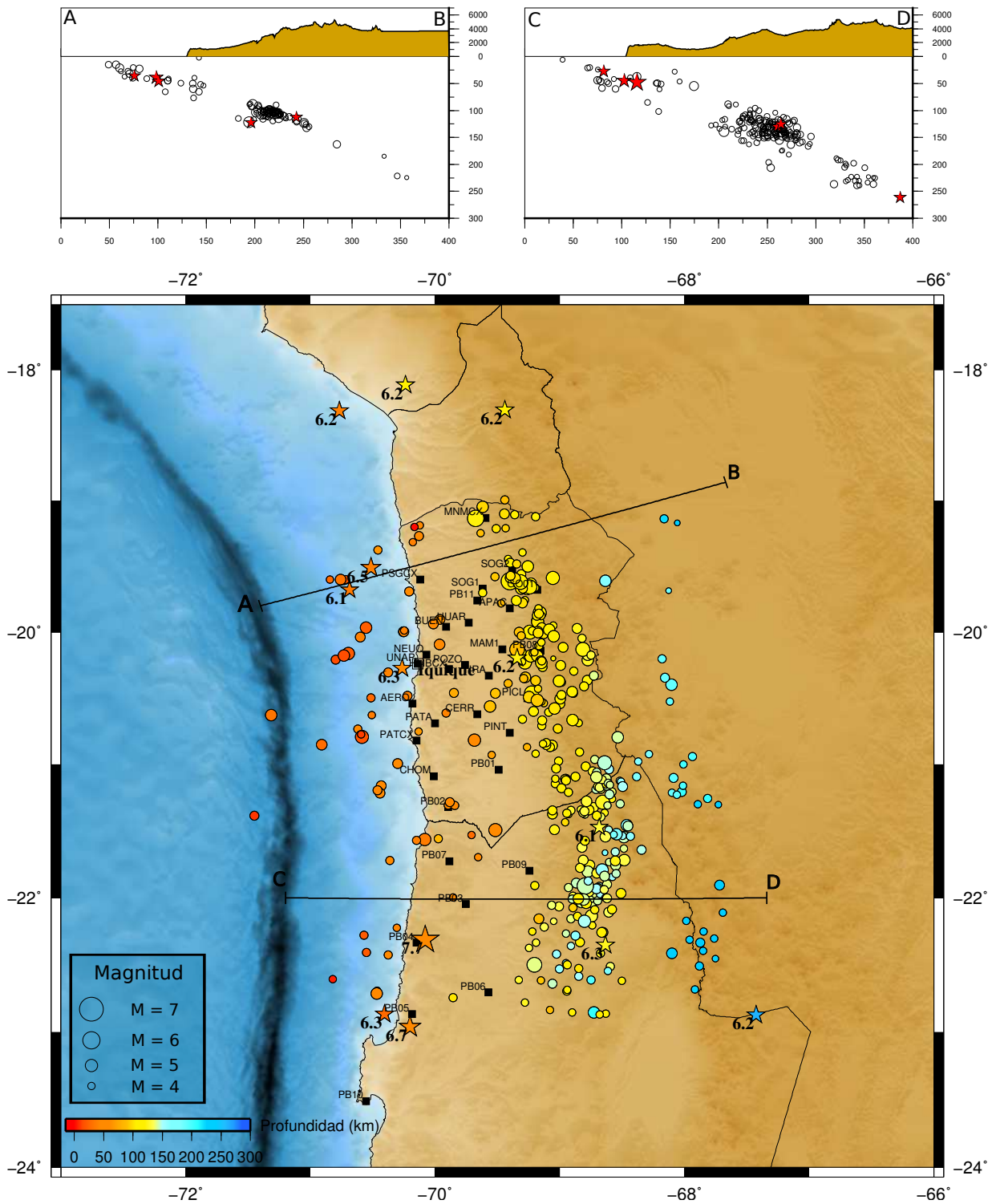


Figura 5.1: Hipocentro de todos los eventos de la base de datos principal (círculos) junto a la ubicación de los eventos de mayor tamaño (estrellas) ocurridos en el periodo 2007-2012 mostrados en planta y 2 perfiles AB y CD con 230 km de ancho cada uno. La magnitud es representada por el tamaño del símbolo.

5.4. Distintos procedimientos en el tratamiento de señales

Todos los procedimientos descritos a continuación han sido automatizados para un arreglo de carpetas (cada una representando un evento) que en su interior contienen registros en formato SAC corregidos por la respuesta instrumental, los cuales serán utilizados en la determinación de cada parámetro. Además se utilizan archivos (presentes en cada carpeta) que contienen la información sobre las llegadas de las ondas P y S en formato NonLinLoc. Ambas llegadas han sido determinadas manualmente para cada evento. Las rutinas Python creadas para automatizar los cálculos de cada parámetro (ver apéndice A), son capaces de diferenciar que fases han sido leídas y calcular el tiempo S-P si es necesario. Es importante destacar que en todos los cálculos involucrados, las cantidades dimensionales están expresadas en unidades internacionales (SI).

Por otra parte, con el objeto de corregir las amplitudes de las formas de onda observadas por efectos de atenuación con la distancia y normalizar las medidas a una distancia hipocentral común para poder comparar los distintos registros obtenidos, la amplitud corregida estará dada por,

$$A_{corr} = \frac{A_{obs} \cdot R}{D}$$

donde R es la distancia hipocentral a la cual se observa la amplitud A_{obs} y D es la distancia hipocentral de referencia, que para este trabajo fue escogida como 1 km.

En lo que sigue, y a modo de ejemplo, se muestran formas de onda procesadas para ser utilizadas en el cálculo de cada parámetro para dos eventos característicos de la zona. El primero corresponde a un terremoto de subducción de profundidad 18 km de $M_W = 5.2$ registrado por la estación PATA ubicada a una distancia hipocentral (DH de ahora en adelante) de 67 km. El segundo, con una magnitud similar de $M_W 5.3$, es un evento intraplaca de profundidad intermedia (107 km) registrado por MAM1 (DH = 111 km). Las tres componentes de cada evento se muestran en la figura (5.2).

5.4.1. Periodo característico τ_c

Previamente a toda estimación, se elimina la tendencia lineal de cada registro (ya corregidos por el instrumento) y se aplica un filtro pasa-alto con una frecuencia esquina de 0.075 Hz. El procedimiento anterior elimina efectos en la tendencia y contenido de frecuencia de la nueva señal introducidos por la integración en el tiempo. El periodo característico es obtenido a partir del cálculo de dos términos: la integral del módulo del desplazamiento al cuadrado (traza integrada) y la integral del módulo de la velocidad al cuadrado, ambas evaluadas en la porción temprana de la onda P en trazas que corresponden al módulo de la suma vectorial de las tres componentes [Lancieri & Zollo, 2008],

$$S = \sqrt{N^2 + E^2 + Z^2}$$

con S la señal en velocidad o desplazamiento y N , E y Z las componentes norte-sur, este-oeste y vertical respectivamente.

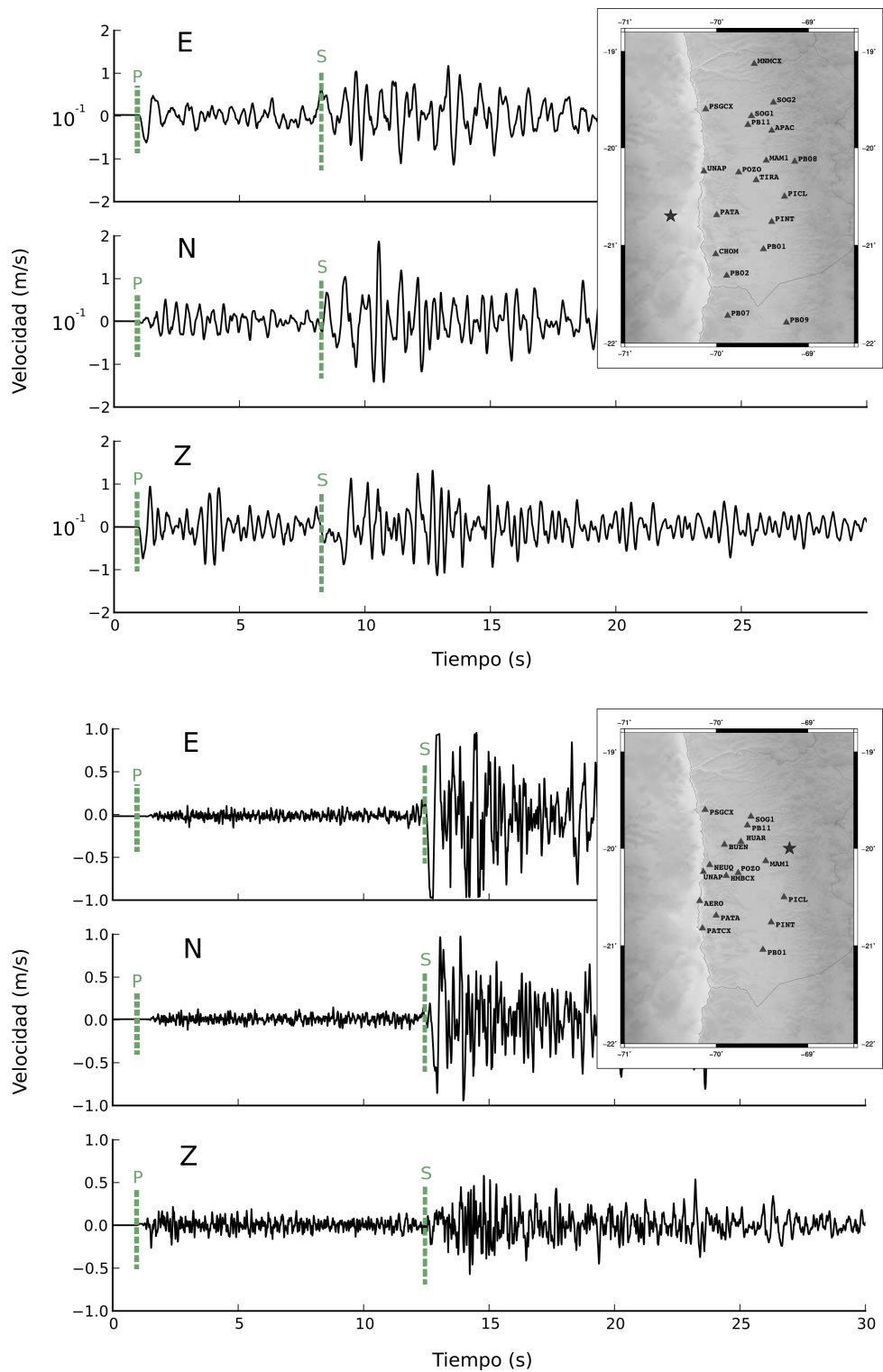


Figura 5.2: Componentes E, N (horizontales) y Z (vertical) para un evento interplaca (arriba) y otro intraplaca de profundidad intermedia (abajo) de M_w 5.2 y 5.3 respectivamente. Las estaciones correspondientes a los registros mostrados son indicadas en la figura. Las trazas se muestran corregidas por el instrumento y por distancia hipocentral, siendo referidas a una distancia de 1 km. Su epicentro (estrella) y ubicación con respecto a la red puede verse en el cuadro superior derecho en ambos casos.

Utilizando las ecuaciones (5.1) y (5.2), la estimación de τ_c es llevada a cabo utilizando ventanas de 2, 3 y 4 segundos. En la figura (5.3) se muestra el módulo al cuadrado de la velocidad y el desplazamiento para los dos eventos característicos. Se observa que la integral toma un valor aproximadamente constante a partir de 3 segundos desde la llegada de la P para ambos eventos, sin embargo no es muy diferente al obtenido para 2 segundos. Debido a la gran variación de la integral en el primer segundo para ambos casos, se ha descartado la utilización de una ventana tan temprana.

5.4.2. Peak de desplazamiento PD y velocidad PV

En el tratamiento previo, las trazas son corregidas por la tendencia lineal y filtradas entre 0.075 y 3 Hz para PD y 0.2 y 20 Hz para PV . Estas formas de onda en velocidad y desplazamiento (integrada) son utilizadas para el cálculo de PV y PD respectivamente una vez que las tres componentes han sido combinadas de la misma forma que en el caso de τ_c para registros corregidos por distancia hipocentral. Los módulos del desplazamiento y la velocidad resultantes, serán utilizados para obtener la máxima amplitud en ventanas a partir de la llegada de la onda P de 0.5, 2 y 4 segundos. A modo de ejemplo, la figura (5.4) muestra el módulo del desplazamiento a partir de la suma vectorial de las tres componentes para los dos eventos característicos.

Se observa que para ambos eventos el peak máximo de desplazamiento se encuentra en el primer segundo a partir de la llegada de la P, aunque antes de los 0.5 segundos solo para el evento interplaca, hecho que sugiere que una ventana de 0.5 segundos podría ser una elección válida para sismos únicamente de este tipo.

5.4.3. Integral de la velocidad al cuadrado $IV2$

Utilizando las mismas trazas corregidas por el instrumento y la tendencia lineal que para los otros parámetros calculados, se obtiene el módulo de la velocidad al cuadrado para la combinación de las tres componentes filtrada entre 0.075 y 10 Hz, rango que entrega los mejores resultados, y corregida por distancia hipocentral referida a una distancia de 1 km. A partir de este resultado se obtiene $IV2$ calculando la integral para ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos a partir de la fase P. La figura (5.5) muestra el módulo de la velocidad al cuadrado y su integral acumulativa para los dos eventos característicos.

Como ya se mencionó para τ_c y como se observa en la figura (5.5), 0.5 segundos es una ventana muy reducida para eventos de profundidad intermedia, no obstante para el cálculo de $IV2$ se utilizará una ventana de dicho tamaño para evaluar su efectividad en eventos interplaca.

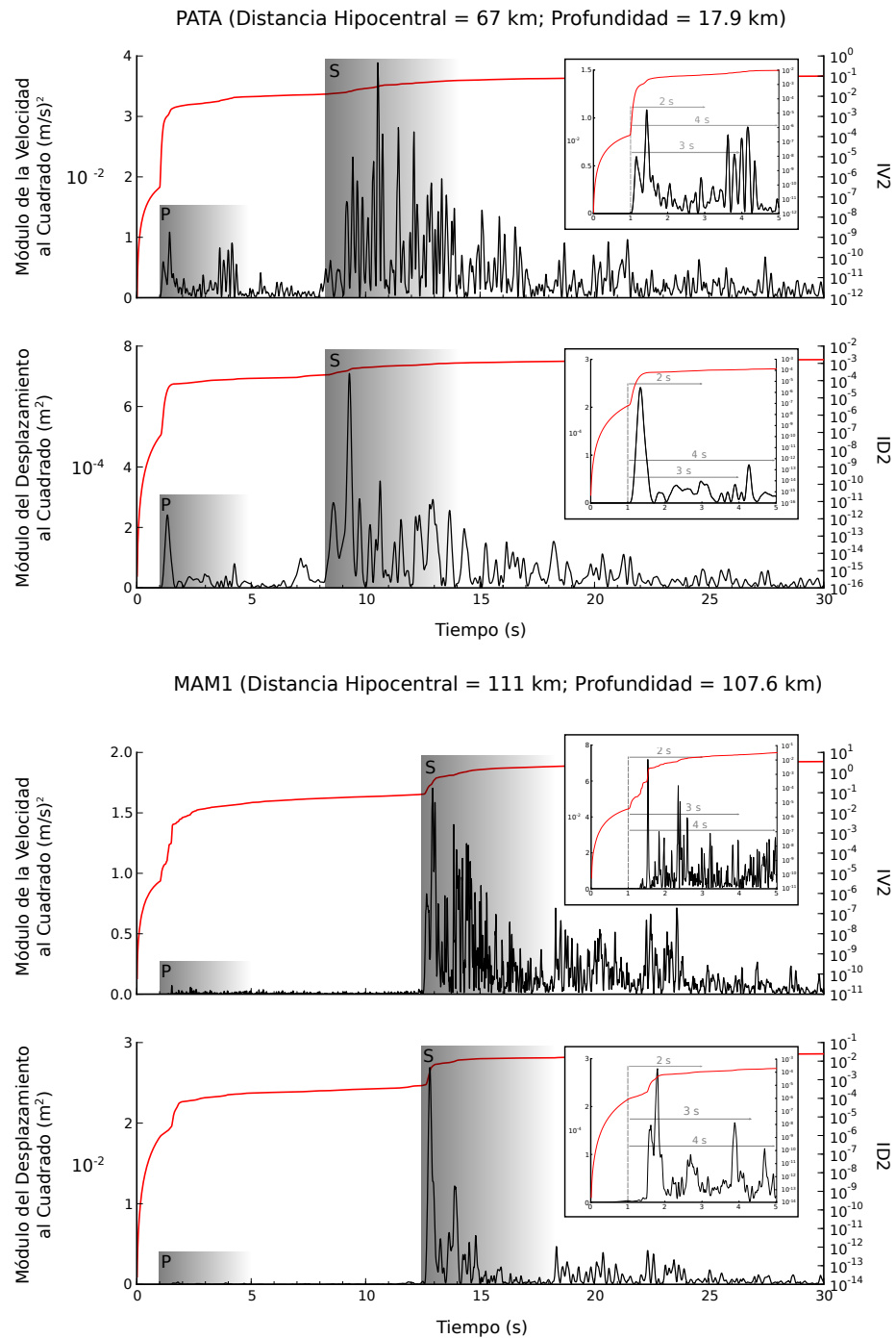


Figura 5.3: Módulo al cuadrado de la velocidad y el desplazamiento para un evento interplaca (arriba) y otro intraplaca de profundidad intermedia (abajo). Cada registro mostrado en la figura equivale a la suma vectorial de sus tres componentes, filtrado en las bajas frecuencias a partir de 0.075 Hz y corregido por distancia hipocentral y referido a una distancia común de 1 km. En la figura se indica la llegada de las fases P y S en gris y la integral acumulativa del módulo de la velocidad (IV2) y el desplazamiento (ID2) como una línea roja. Los recuadros a la derecha muestran un acercamiento a los primeros 4 segundos a partir de la onda P de cada señal y las ventanas utilizadas de 2, 3 y 4 segundos.

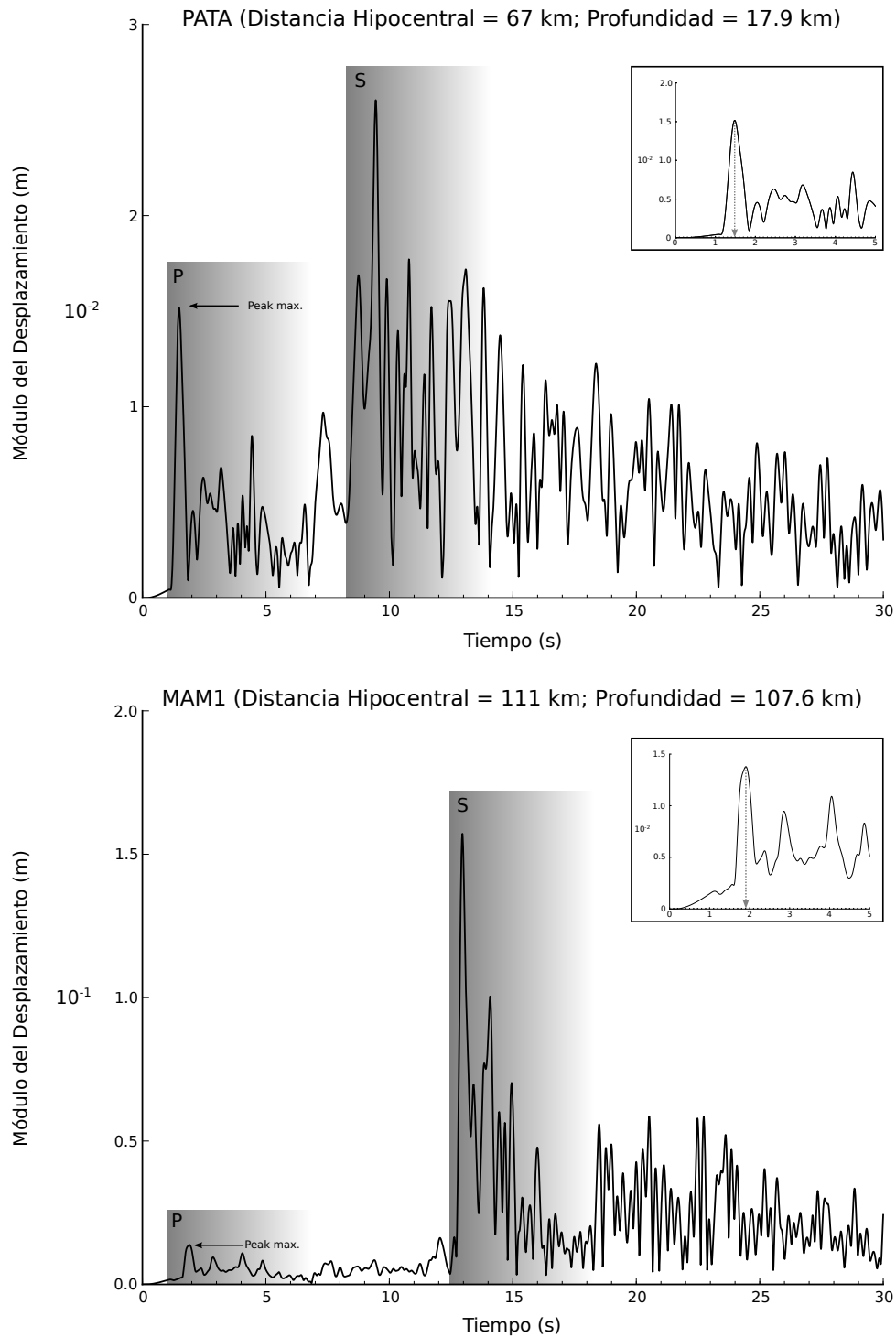


Figura 5.4: Dos eventos característicos y el módulo del desplazamiento calculado a partir de la composición de sus tres componentes filtradas y corregidas por distancia hipocentral referidas a una distancia común de 1 km. En la figura se indica el máximo peak de desplazamiento y la llegada de las ondas P y S (gris). Los recuadros a la derecha muestran los 5 primeros segundos de cada señal donde se indica el tiempo correspondiente al peak máximo.

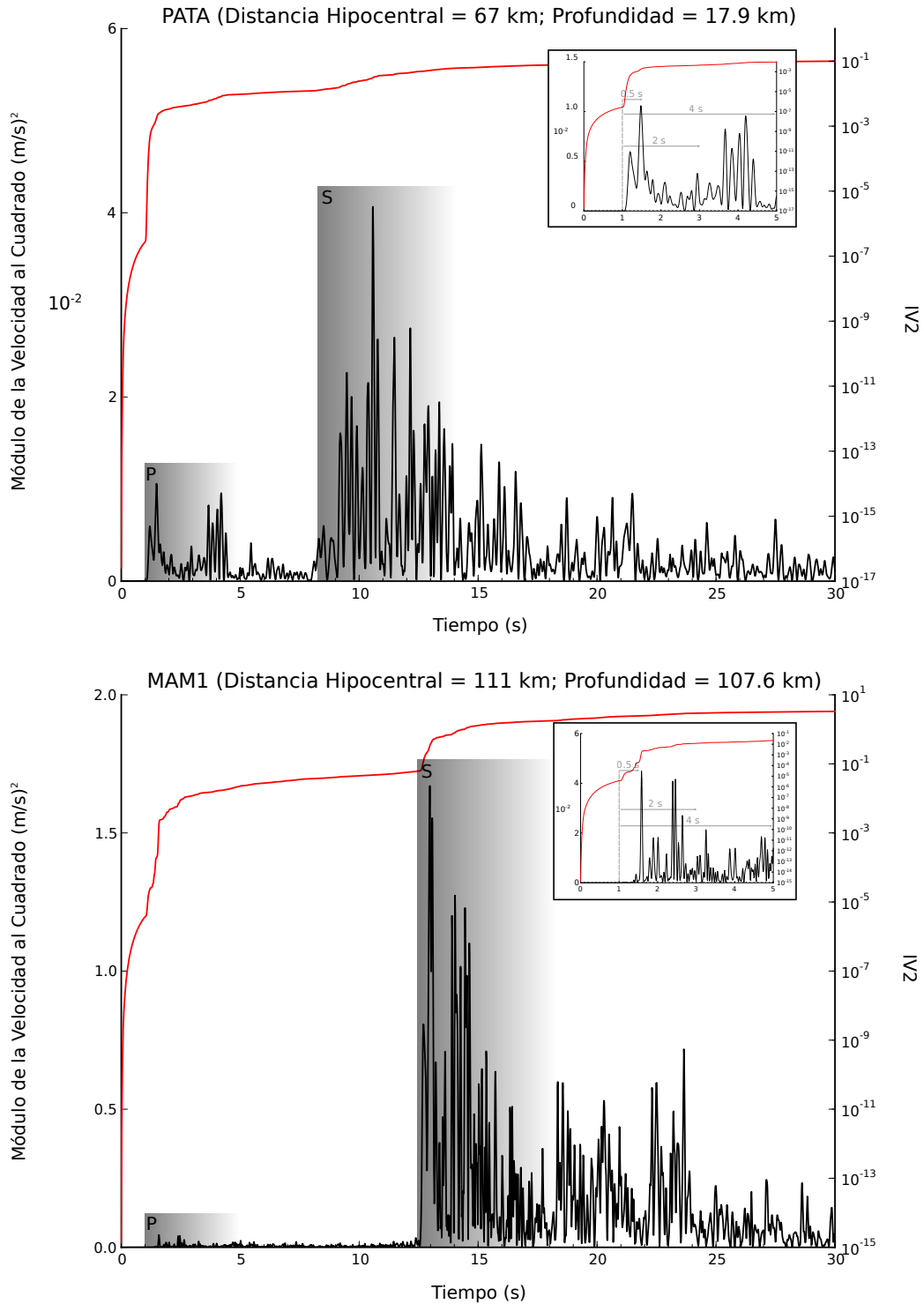


Figura 5.5: Dos eventos característicos y el módulo de la velocidad calculado a partir de la composición de sus tres componentes filtradas y corregidas por distancia hipocentral a una distancia común de 1 km. Además se muestra la integral acumulativa del módulo de la velocidad al cuadrado (IV2) como una línea roja y la llegada de las fases P y S (gris). Los recuadros a la derecha muestran los 5 primeros segundos de cada señal y las ventanas utilizadas de 0.5, 2 y 4 segundos.

5.5. Resultados

Se estimó la correlación entre la magnitud y los parámetros de alerta temprana τ_c , PD e $IV2$. Lo anterior se realizó mediante un análisis de regresión lineal en el cual se utilizaron los valores promedio obtenidos por magnitud. Como una forma de cuantificar la confiabilidad de los resultados, se utiliza la regla empírica que establece que un 95 % de la distribución de datos se encontrará entre ± 1.96 veces el valor del error estándar de estimación (SEE) con respecto a la línea de regresión. De esta manera se establece un intervalo aproximado del 95 % de confianza delimitado por dos líneas paralelas a la línea ajustada. El error utilizado tiene la forma,

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y^{est} - y^{obs})^2}{n - 2}}$$

con y la variable dependiente estimada (est) y observada (obs) y n el número de observaciones.

5.5.1. Correlación entre magnitud y los parámetros τ_c , PD e $IV2$

Periodo característico τ_c

En la figura (5.6) se presenta la relación entre la magnitud y el valor de τ_c obtenido a partir de ventanas de tiempo de 2, 3 y 4 segundos.

Los resultados muestran variaciones prácticamente nulas para las distintas porciones tempranas de la onda P analizadas, situación que quedaba en evidencia tras observar el comportamiento de las integrales acumulativas (módulos de la velocidad y el desplazamiento) para los 2 eventos usados como ejemplo (ver figura (5.3)), que alcanzaban un valor constante a partir de los 2 segundos pasado el inicio de la fase P.

Como resultado de la correlación entre los términos, se observa un incremento aproximadamente lineal de $\log(\tau_c)$ con la magnitud, sin embargo es evidente la alta dispersión hacia magnitudes inferiores. Hacia las altas magnitudes es interesante notar que casi la totalidad de los eventos sobre M_W 6.0 corresponden con un valor de τ_c mayor a 1.

El fenómeno que ocurre a bajas magnitudes puede ser explicado considerando que τ_c es una medida de la frecuencia efectiva presente en la porción inicial de la onda P, la cual se ve afectada por la distancia a la fuente debido a la atenuación de las altas frecuencias. Según lo anterior, es esperable entonces que registros lejanos de eventos de menor tamaño (frecuencias altas atenuadas) sobre estimen el valor de τ_c .

Además de lo anterior es importante observar que el rango de magnitudes afectado corresponde a aproximadamente el 25 % del total de los datos utilizados, por lo que es de esperarse que para este rango exista una mayor probabilidad de encontrar valores atípicos a partir de eventos registrados por estaciones a más de 200 km de distancia hipocentral.

Por otra parte, si bien es cierto que se utilizan las magnitudes obtenidas en este trabajo para un 96 % de los datos, apuntando a obtener resultados más homogéneos, hay que resaltar que éstas

fueron determinadas a partir de un procedimiento automático que podría subestimar o sobre evaluar ciertas magnitudes, lo que explicaría algunos de los valores anómalos fuera del intervalo de confianza. Un ejemplo de esta situación es el evento de magnitud 5.0 ubicado por debajo del intervalo de confianza (figura (5.6)). La magnitud de este evento fue calculada incluyendo 6 (de un total de 15) estaciones con componentes con problemas que condujeron a una sobredimension en su valor, por lo tanto es importante determinar el valor del error en el cálculo de magnitudes para poder interpretar los valores atípicos.

La pendiente promedio de 0.28 obtenida para los ajustes según 2, 3 y 4 segundos (ver tabla (5.2)), es comparable con el valor determinado por Wu & Kanamori [2005a] para registros cercanos a la fuente y con valores de PD sobre 0.1 cm de 12 terremotos magnitud sobre 5.0 ocurridos en Taiwan. El comportamiento de τ_c para un conjunto de 54 terremotos obtenidos de diferentes regiones (Taiwan, Japón y el sur de California) y cuya ventana de análisis tiene una duración de 3 segundos [Wu & Kanamori, 2008], esta en completo acuerdo con los valores determinados para este trabajo. Ambos estudios mencionados utilizan acelerogramas filtrados bajo los 0.075 Hz. Se observa un pequeño cambio en la tendencia lineal como el observado por [Lancieri *et al.*, 2011], estudio que utiliza registros banda ancha filtrados bajo 0.075 Hz de terremotos en la zona norte de Chile, en concordancia con este trabajo.

Máximo peak de desplazamiento PD

Se busca la correlación entre la magnitud y el máximo peak de desplazamiento filtrado entre 0.075 y 3 Hz en ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos iniciadas con la llegada de la fase P. Las rectas que representan el mejor ajuste a los datos corregidos por distancia hipocentral, obtenidas por regresión lineal para los valores promedio por magnitud, se muestran en la figura (5.7). Los coeficientes del ajuste lineal son reportados en la tabla (5.3).

Se observa claramente una mejora en la calidad del ajuste lineal de los datos a medida que la ventana en segundos escogida aumenta, sin embargo, a pesar de que existe una tendencia creciente, la relación lineal no es evidente para todo el rango de magnitudes. En efecto, se puede ver un cambio en el ajuste de los datos a partir de M_W 5.8, que coincide con una menor cantidad de eventos disponibles junto a una disminución en el número de estaciones por evento, lo que podría ser la causa de la alta dispersión observada.

De los resultados obtenidos para la ventana de 0.5 segundos se advierte un quiebre abrupto entre las magnitudes 5.3 y 5.4, el cual no está presente para ventanas de mayor duración. Esta situación podría significar que para eventos mayores a M_W 5.3, el peak de máxima energía para la fase P se encuentra más allá de medio segundo, advirtiendo que esta duración no es un tiempo suficiente para cuantificar la magnitud de eventos importantes.

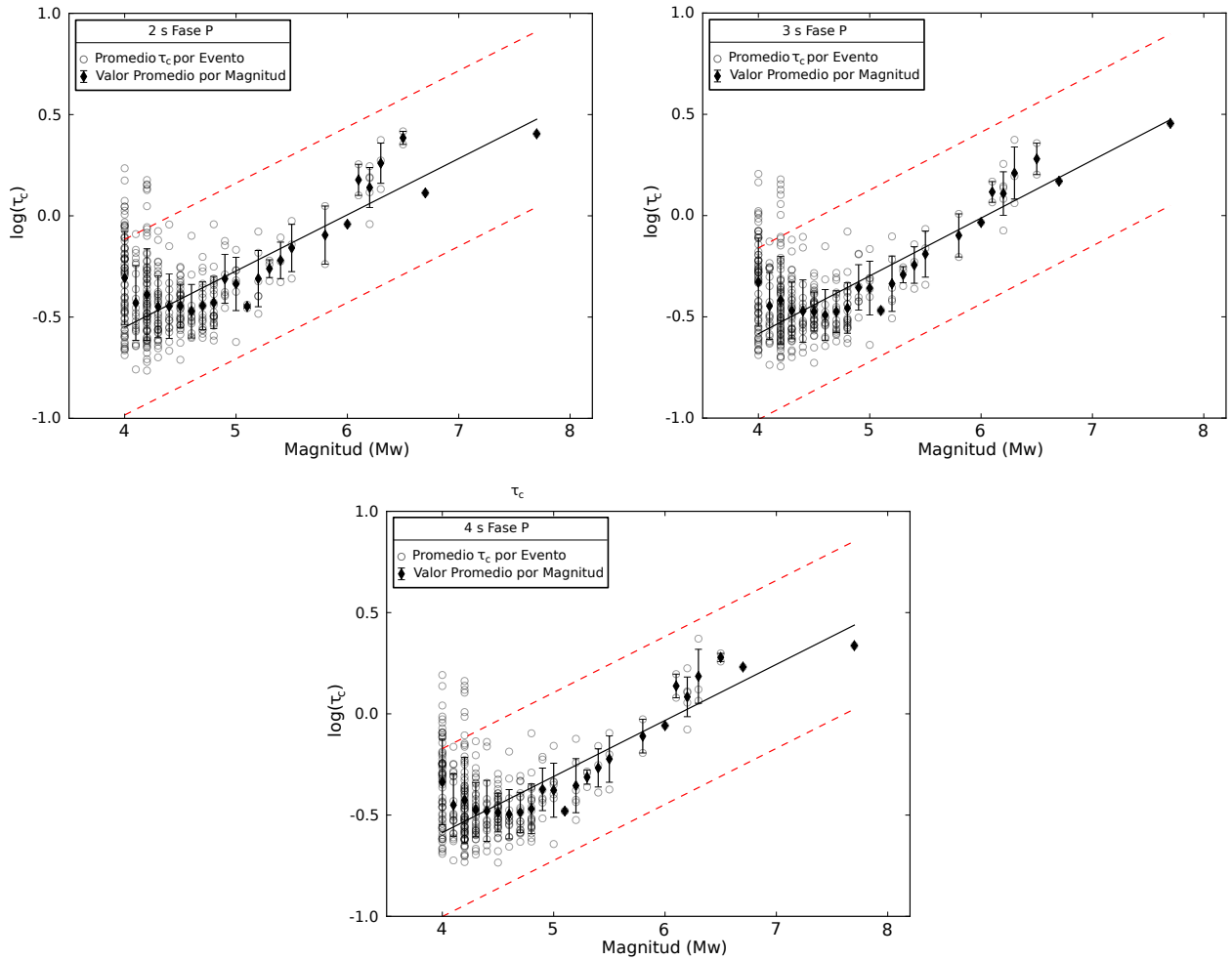


Figura 5.6: Mejor ajuste lineal para 345 eventos entre la magnitud y el logaritmo de τ_c calculado en ventanas de 2, 3 y 4 segundos en la fase inicial de la onda P. La curva obtenida a partir de una regresión lineal se indica como la línea continua (negro) situada entre las 2 líneas segmentadas (rojo) que delimitan en primera aproximación un intervalo del 95 % de confianza. Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de τ_c por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

Coeficientes Regresión τ_c			
Ventana de tiempo (s)	A	B	R
2	0.28	-1.66	0.42
3	0.29	-1.73	0.43
4	0.28	-1.69	0.42

Tabla 5.2: Valores de los coeficientes correspondientes al ajuste lineal entre el periodo característico y la magnitud del tipo $\log(\tau_c) = AM_w + B$ para porciones de la onda P de 2, 3 y 4 segundos. Además se indica el valor del coeficiente de correlación R en cada ajuste para la totalidad de los datos.

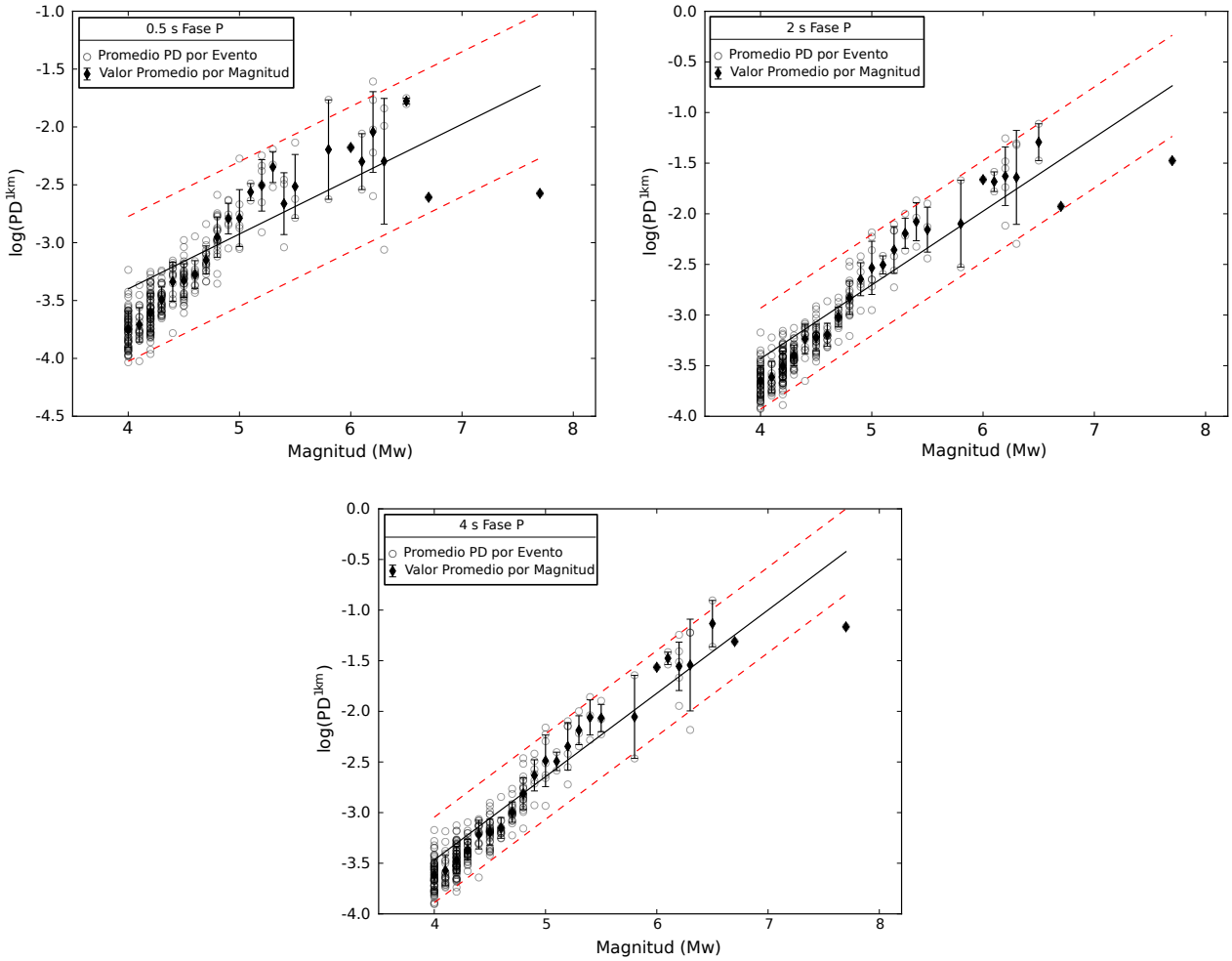


Figura 5.7: Mejor ajuste lineal para 345 eventos entre la magnitud y el logaritmo de la máxima amplitud del desplazamiento en ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos a partir de la llegada de la onda P. La curva obtenida se indica como una línea continua (negro) situada entre las 2 líneas segmentadas (rojo) que delimitan en primera aproximación un intervalo del 95% de confianza. Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de PD por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

Coeficientes Regresión PD			
Ventana de tiempo (s)	A	B	R
0.5	0.47	-5.30	0.88
2	0.73	-6.34	0.93
4	0.82	-6.76	0.95

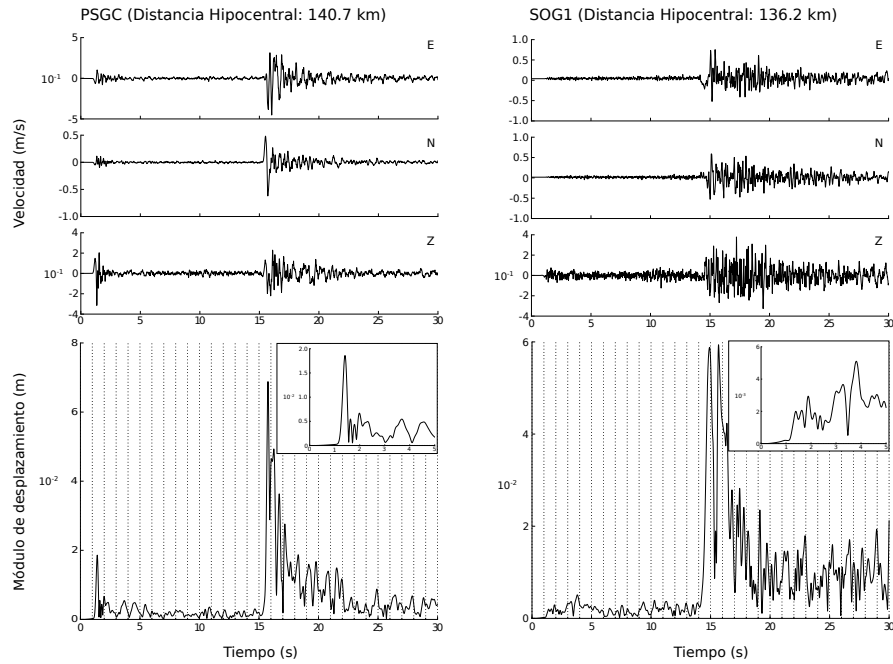
Tabla 5.3: Valores de los coeficientes correspondientes al ajuste lineal entre el máximo peak de desplazamiento y la magnitud del tipo $\log(PD) = AM_w + B$ para porciones de la onda P de 0.5, 2 y 4 segundos. Además se indica el valor del coeficiente de correlación R en cada ajuste para la totalidad de los datos.

La dispersión para todo el conjunto de datos analizados tiene principalmente que ver con factores como cobertura azimutal, número de estaciones utilizadas, preponderancia de estaciones lejanas en el cálculo y posibles errores instrumentales. No obstante, las diferencias que se observan entre los eventos del catálogo principal y los 13 eventos de magnitudes mayores seleccionados, se explica por la cantidad de estaciones utilizadas por evento para estos últimos, que difieren sustancialmente con respecto a las disponibles para el catálogo creado en este estudio, además de el número de eventos disponibles para magnitudes por sobre 5.5.

Por este motivo es interesante analizar algunos casos particulares. El primero corresponde a dos eventos de magnitudes M_W 5.8. Ambos resultan ser de profundidades superiores a 100 km, y con epicentros en los extremos, al norte (evento A) y al sur (evento B) de la red. El alto valor de PD , que coincide con la tendencia observada a menores magnitudes, corresponde al evento B, cuyos registros muestran una llegada clara e impulsiva de la onda P en su mayoría. Los registros del evento A muestran una onda P disminuída, casi imperceptible en algunas ocasiones, con excepción del registro de la estación PSGCX ubicada al sur-este, la que entrega un valor para PD tan alto como el otro correspondiente a esta magnitud. Estaciones lejanas (más de 200 km) presentan valores disminuídos y muy fuera de la media en ambos casos, lo que demuestra que la atenuación es un factor importante a considerar, aunque no es el único. Esto queda demostrado al observar las trazas de dos estaciones a la misma distancia del evento de bajo PD , las cuales presentan grandes diferencias. Lo anterior sugiere que otro aspecto que afecta la homogeneidad de los datos tiene que ver con el patrón de radiación para la onda P, situación que puede ser resuelta en cierta medida procurando una buena cobertura azimutal en la región de estudio.

En la figura (5.8) se muestran las 3 componentes y el módulo del desplazamiento para dos estaciones por cada evento mencionado en el ejemplo anterior. Los registros han sido corregidos por distancia hipocentral y normalizados a una distancia de 1 km. Para el caso del evento A, la traza de la estación SOG1 representa el tipo de registros predominantes para este evento. La excepción está dada por el registro de PSGC, que probablemente debido a su ubicación se encuentra fuera de la zona nodal. Para el evento B se muestra una estación cercana (PB01) y la más lejana (MNMC), que demuestran el carácter impulsivo de la fase P percibido en la totalidad de los registros, además de el efecto de la distancia a la fuente en la amplitud de la señal.

Evento A



Evento B

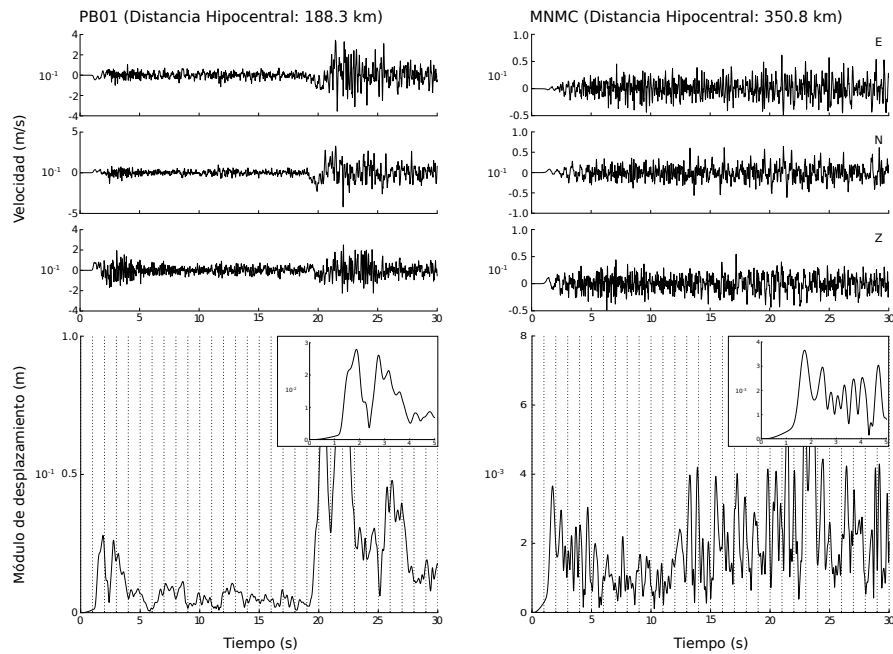


Figura 5.8: Tres componentes en velocidad y módulo del desplazamiento junto a un zoom de los 4 segundos iniciales de este último, para un par de estaciones por evento. (Arriba) Evento que entrega un anormal bajo valor para *PD*. La mayoría de los registros para este evento coinciden con una onda P imperceptible como la que se muestra para la estación SOG1. (Abajo) Estación cercana y lejana para el evento que presenta una P impulsiva coincidente con un valor esperado para *PD*.

Otro valor anómalo de PD surge para la magnitud M_W 6.3 que a diferencia del ejemplo anterior, corresponde a un terremoto interplaca de 27 km de profundidad. Este evento se caracteriza por formas de onda con una P disminuída y por incluir 3 estaciones de un total de 11, a distancias hipocentrales mayores a 300 km. Los otros dos valores de PD para la magnitud 6.3, provienen de dos terremotos de distinto tipo (intraplaca e interplaca), donde solamente uno de ellos es registrado por una estación a más de 300 km. Cabe destacar que el valor de τ_c es superior a la unidad para el evento 6.3 con valor anómalo de PD , indicando de antemano que podría tratarse de un evento sobre magnitud 6.0, y que el valor entregado por PD podría estar subestimado.

La saturación del evento interplaca M_W 7.7 es clara para todas las ventanas de análisis. Para el evento interplaca M_W 7.7 se utilizó un total de 11 estaciones de las cuales 4 están situadas a más de 200 km de distancia hipocentral y 4 de ellas a menos de 100 km. La saturación de PD para esta magnitud tiene que ver con la aparición tardía del peak de desplazamiento. En la figura (5.9) se muestra el módulo del desplazamiento, corregido por distancia y referido a 1 km, para la estación PB06 que se encuentra a 82 km de distancia hipocentral. En ella se ve claramente que el máximo peak de desplazamiento detectado para la ventana de 4 segundos corresponde solamente a un máximo local, donde el verdadero se encuentra alrededor de los 7 segundos.

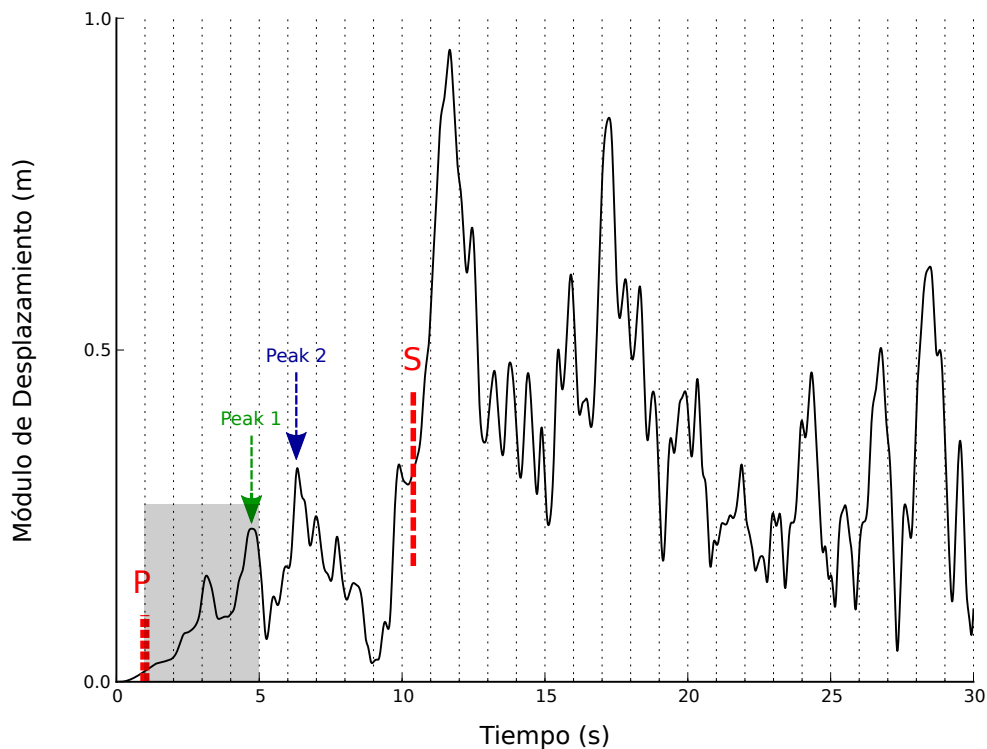


Figura 5.9: Módulo del desplazamiento corregido por distancia y normalizado a 1 km para la estación PB06 ubicada a 82 km de distancia hipocentral del terremoto 7.7 de Tocopilla. En la figura se muestran el máximo peak detectado en una ventana de 4 segundos (peak 1), y el verdadero máximo peak de desplazamiento (peak 2). La ventana de análisis de 4 segundos es representada como un cuadro sombreado.

Integral de la velocidad al cuadrado IV_2

Para la integral del módulo de la velocidad al cuadrado ocurre el mismo fenómeno a bajas magnitudes que para τ_c . Los datos muestran una alta dispersión, aunque a diferencia de este último, este parámetro sí muestra una tendencia lineal creciente en este rango (ver figura (5.10)). El ajuste mencionado ocurre hasta magnitudes de 5.8, no presentando una correlación clara más allá de este valor.

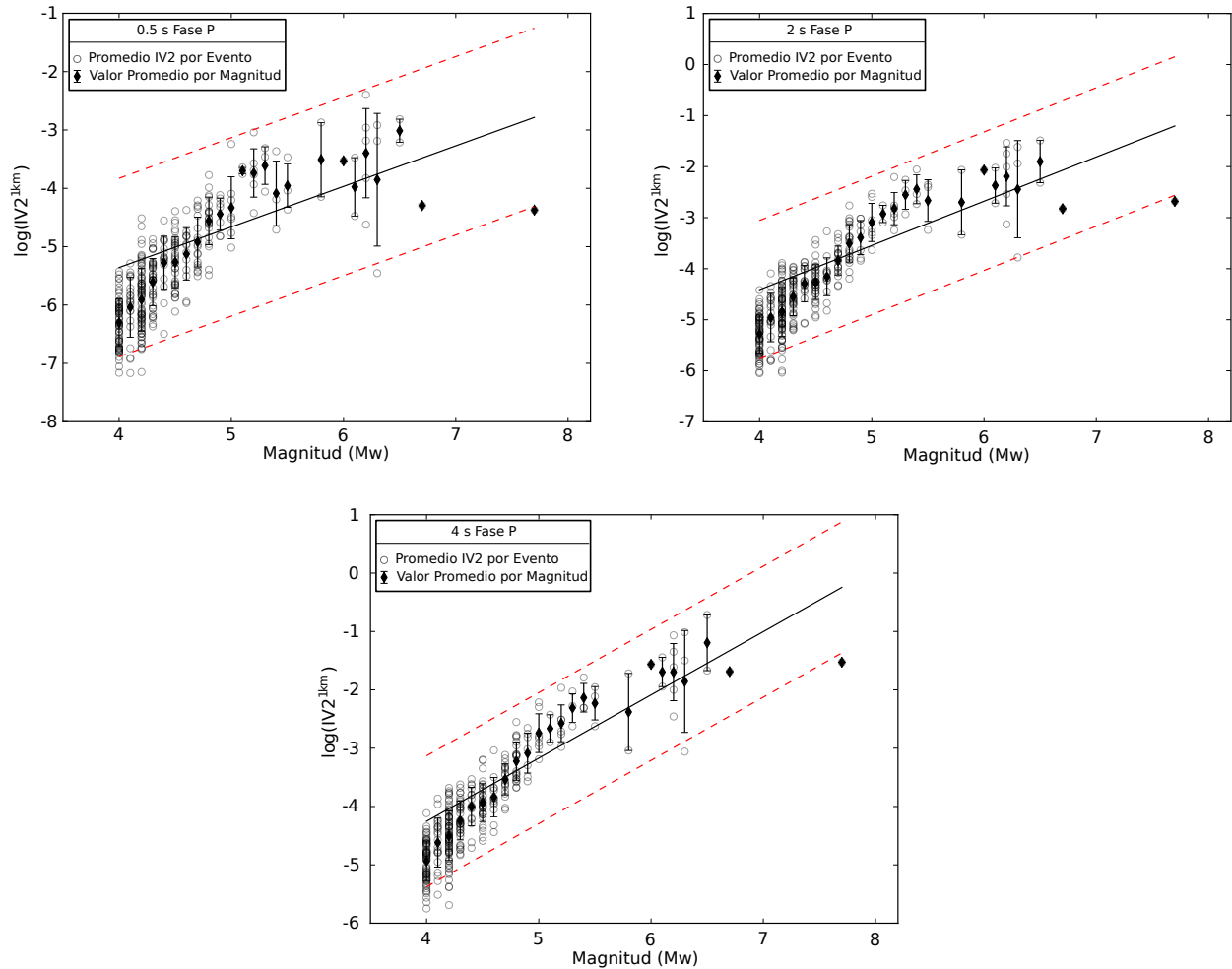


Figura 5.10: Mejor ajuste lineal para 345 eventos entre la magnitud y el logaritmo de IV_2 calculado en ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos en la fase inicial de la onda P. La curva obtenida a partir de una regresión lineal se indica como la línea continua (negro) entre las 2 líneas segmentadas (rojo) que delimitan en primera aproximación un intervalo del 95% de confianza. Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de IV_2 por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

Coeficientes Regresión <i>IV2</i>			
Ventana de tiempo (s)	A	B	R
0.5	0.70	-8.14	0.78
2	0.87	-7.88	0.84
4	1.08	-8.59	0.88

Tabla 5.4: Valores de los coeficientes correspondientes al ajuste lineal entre la integral de la velocidad al cuadrado y la magnitud del tipo $\log(IV2) = AM_w + B$ para porciones de la onda P de 0.5, 2 y 4 segundos. Además se indica el valor del coeficiente de correlación R en cada ajuste para la totalidad de los datos.

5.5.2. Ajuste diferenciado por tipo de eventos

La zona de estudio se caracteriza por presentar principalmente dos tipos de eventos: interplaca e intraplaca de profundidad intermedia. Su disposición en la zona de subducción hace que existan grandes diferencias entre ellos con respecto a azimuth y atenuación principalmente, características determinantes en el cálculo de los parámetros de alerta temprana. Por este motivo, es interesante realizar un análisis que estime dichos parámetros y su correlación con la magnitud, separando entre los dos tipos de eventos característicos de la región.

Las figuras (5.11), (5.12) y (5.13) muestran el análisis propuesto para los parámetros τ_c , *PD* e *IV2* respectivamente. La tabla (5.5) entrega los valores de los coeficientes obtenidos para las distintas regresiones junto al coeficiente de correlación para cada ajuste, resumiendo la información de los 3 parámetros analizados.

Para τ_c se observa una mayor dispersión para los eventos intraplaca de profundidad intermedia de menor magnitud, lo que solo deja de manifiesto el mayor número de eventos de este tipo en la región. La tendencia observada en el análisis previo se mantiene, aunque se observa un leve incremento en los valores para los eventos interplaca con respecto a los intraplaca.

Los resultados obtenidos para *PD* muestran una notable mejora en la correlación con respecto al análisis que incluye la totalidad de los datos. Incluso para la ventana de 0.5 segundos es posible observar un incremento lineal del parámetro con la magnitud hasta M_w 6.5, principalmente para eventos intraplaca. El error asociado a la correlación para eventos situados en el contacto entre placas se mantiene con respecto al análisis previo, probablemente debido a la baja cantidad de eventos de este tipo en la zona con respecto a los de profundidades intermedias.

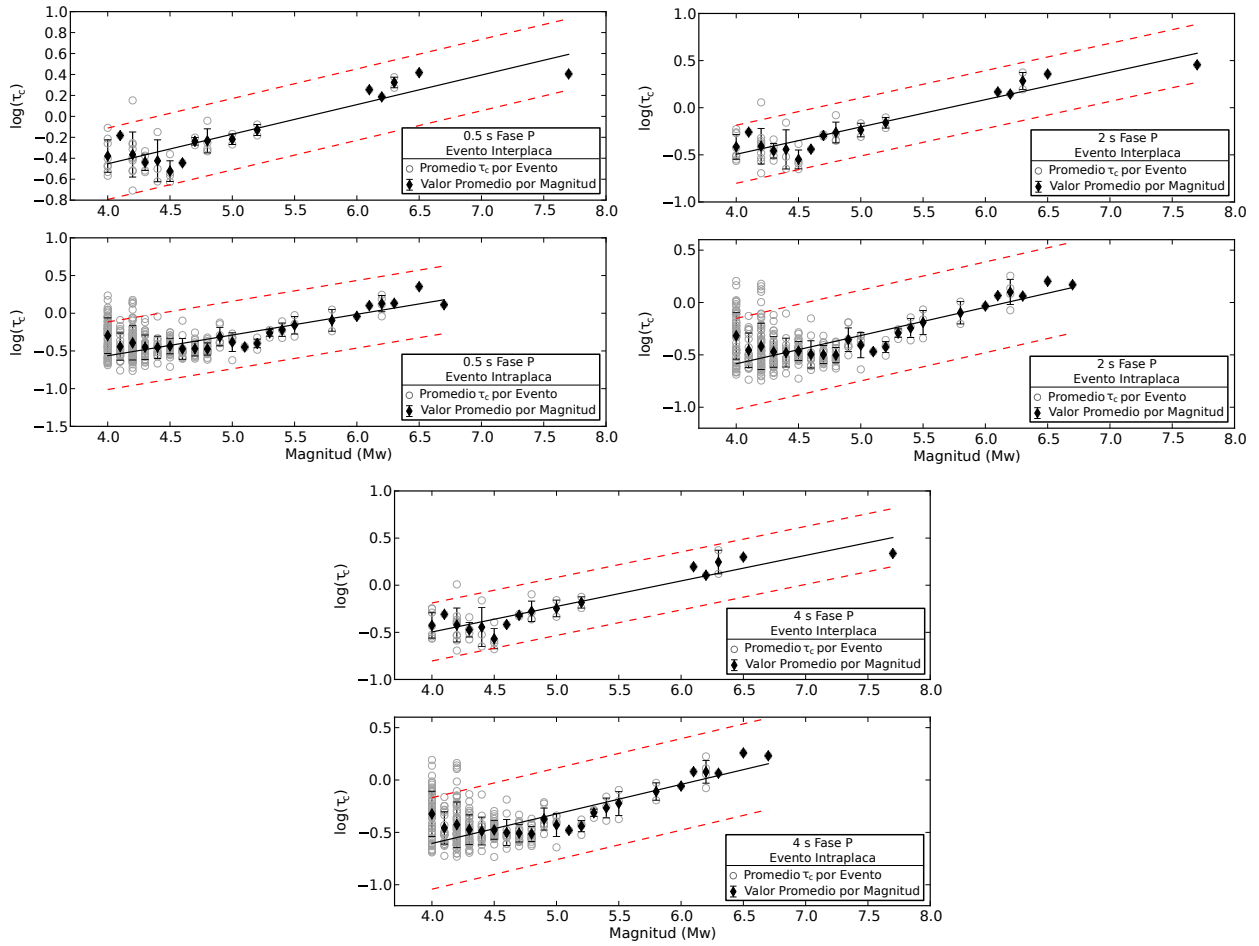


Figura 5.11: Mejor ajuste lineal de $\log(\tau_c)$ y la magnitud para los datos analizados separados entre eventos interplaca (arriba) e intraplaca (abajo). El parámetro es calculado en ventanas de 2, 3 y 4 segundos en la fase inicial de la onda P. Como en las figuras anteriores, se muestran la curva mejor ajustada (negro) y el intervalo de 95 % de confianza (rojo). Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de τ_c por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

En el caso de los eventos considerados como intraplaca, el error disminuye a medida que la ventana crece. De este modo, para la ventana de 4 segundos, la estimación de la magnitud dada por la línea de regresión tendría un error máximo de ± 0.3 según el intervalo del 95 % de confianza dado. Excluyendo un par de eventos anómalos (M_W 5.8, 6.2) que ya fueron analizados previamente, el coeficiente de correlación hasta M_W 6.7 tomaría el alto valor de 0.95.

El error máximo en la magnitud para los eventos interplaca resulta un tanto más alto (± 0.6 para 4 s), probablemente debido a la baja cantidad de terremotos involucrados en el análisis, sin embargo estos resultados se encuentran en concordancia con los trabajos de Zollo *et al.* [2006] y Wu & Zhao [2006]. El primero analiza una ventana de 2 segundos para 207 terremotos (M_W 4 - 7.4) ocurridos en la cuenca mediterránea registrados por acelerómetros a distancias epicentrales menores de 50 km. El segundo utiliza 25 eventos al sur de California (M_W 4 - 7) con distancias epicentrales menores a 120 km, para una ventana de 3 segundos.

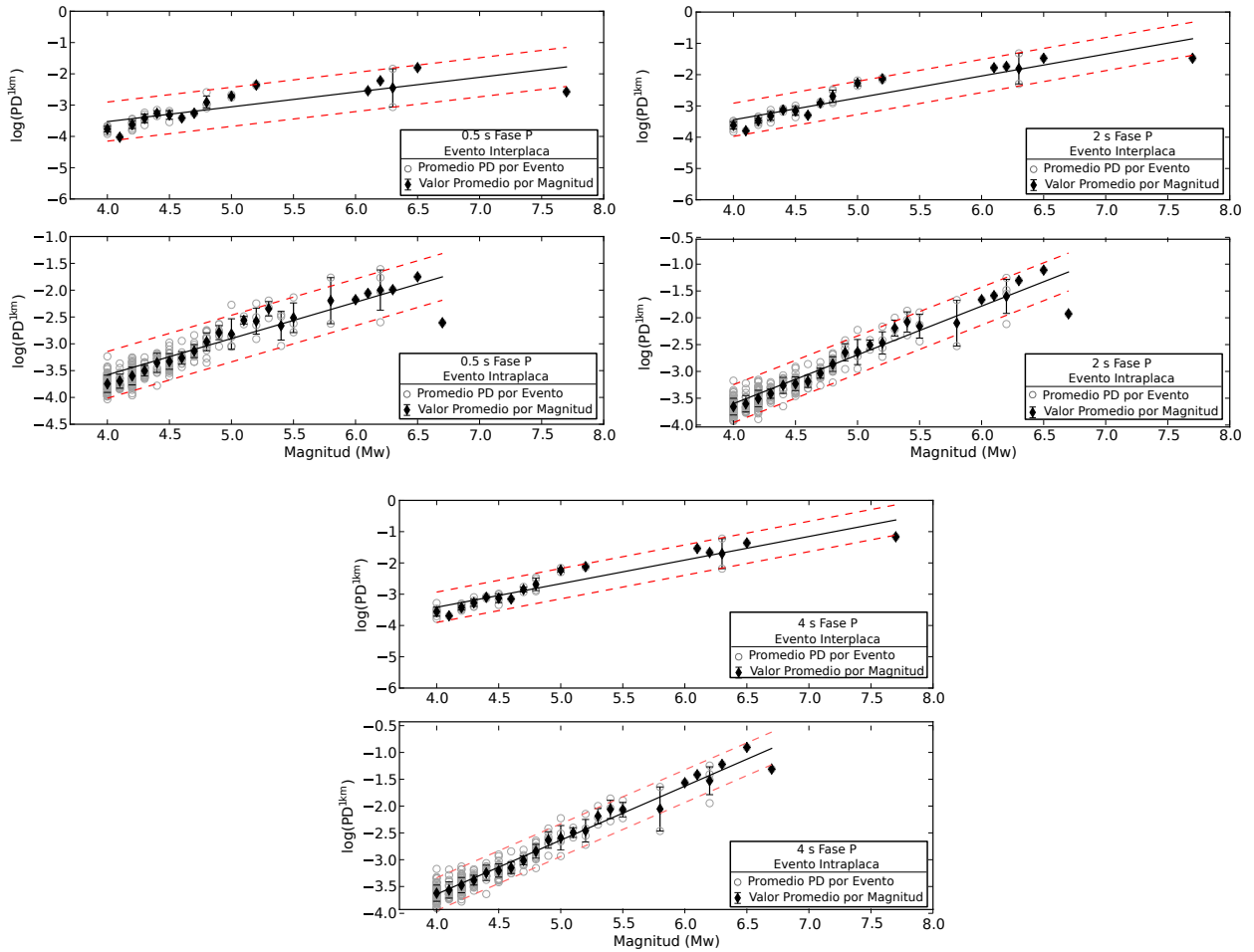


Figura 5.12: Mejor ajuste lineal de $\log(PD)$ y la magnitud para los datos analizados separados entre eventos interplaca (arriba) e intraplaca (abajo). El parámetro es calculado en ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos en la fase inicial de la onda P. Como en las figuras anteriores, se muestran la curva mejor ajustada (negro) y el intervalo de 95 % de confianza (rojo). Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de PD por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

El parámetro $IV2$ no muestra una correlación tan clara para los eventos interplaca tipo *thrust*, sobre todo porque la baja cantidad de eventos parte del análisis muestra una alta dispersión. Sin embargo la situación es distinta para eventos a profundidades intermedias, donde la tendencia lineal es claramente creciente hasta magnitudes M_W 6.5. Nuevamente los eventos fuera del intervalo de confianza desajustan un tanto la tendencia hacia magnitudes mayores, no obstante el grado de correlación es alto es a partir de la ventana de 2 segundos. La estimación del máximo error en la magnitud para la ventana de 4 segundos (el más bajo) entrega un valor de ± 0.6 , resultado que corresponde al doble del error obtenido para el mejor ajuste de PD .

Para terremotos interplaca, el valor de la pendiente para el mejor ajuste obtenido ($A = 1.44$) está en concordancia con el modelo teórico que relaciona energía radiada y magnitud con un factor de escalamiento de 1.5 [Hanks & Kanamori, 1979].

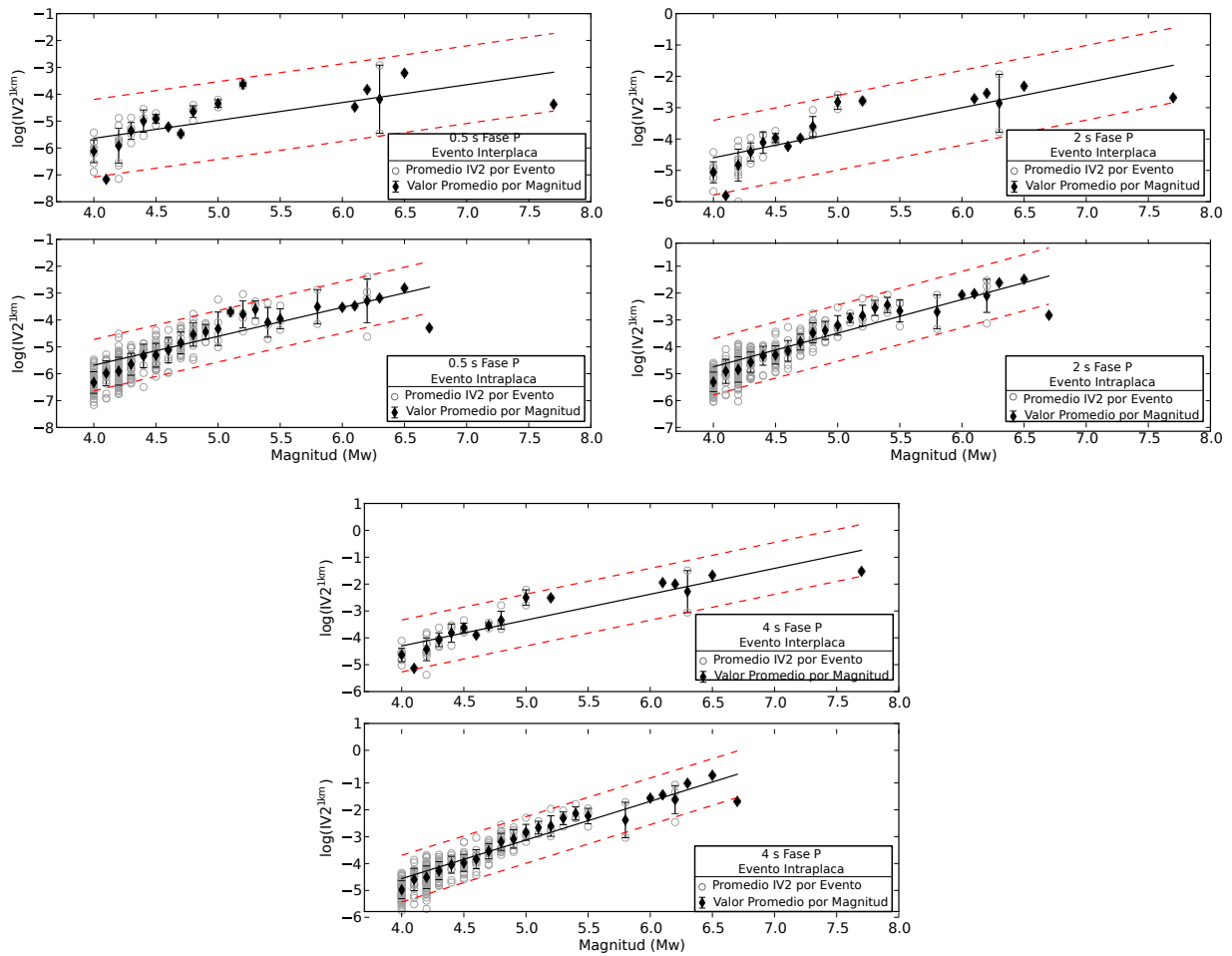


Figura 5.13: Mejor ajuste lineal de $\log(IV2)$ y la magnitud para los datos analizados separados entre eventos interplaca (arriba) e intraplaca (abajo). El parámetro es calculado en ventanas de 0.5, 2 y 4 segundos en la fase inicial de la onda P. Como en las figuras anteriores, se muestran la curva mejor ajustada (negro) y el intervalo de 95% de confianza (rojo). Los círculos grises y diamantes negros representan los valores del logaritmo de $IV2$ por evento y el promedio de estos valores por magnitud respectivamente.

Coeficientes Regresión						
Análisis por tipo de evento						
Parámetro	Eventos interplaca			Eventos intraplaca		
	A	B	R	A	B	R
τ_c						
2 [s] - P	0.28	-1.58	0.79	0.27	-1.66	0.27
3 [s] - P	0.29	-1.65	0.83	0.27	-1.66	0.27
4 [s] - P	0.27	-1.58	0.81	0.28	-1.73	0.27
<i>PD</i>						
0.5 [s] - P	0.47	-5.42	0.82	0.68	-6.29	0.91
2 [s] - P	0.70	-6.24	0.92	0.91	-7.24	0.94
4 [s] - P	0.75	-6.43	0.94	1.01	-7.67	0.95
<i>IV2</i>						
0.5 [s] - P	0.66	-8.30	0.68	1.08	-9.99	0.83
2 [s] - P	0.80	-7.78	0.79	1.25	-9.75	0.87
4 [s] - P	0.96	-8.15	0.87	1.44	-10.31	0.90

Tabla 5.5: Valores de los coeficientes correspondientes al ajuste lineal para el análisis que separa eventos interplaca de intraplaca. Los parámetros τ_c , *PD* e *IV2* son evaluados para diferentes ventanas de tiempo. Además se indica el valor del coeficiente de correlación R en cada ajuste para la totalidad de los datos.

5.5.3. Variaciones del parámetro *PD*

Peak de desplazamiento

Como se puede inferir de los resultados para el análisis que separa la totalidad de los datos en eventos interplaca e intraplaca, el peak máximo de desplazamiento para una ventana de 4 segundos presenta una muy buena correlación con la magnitud, en particular para eventos a profundidades intermedias que corresponden a la mayoría de los datos.

Partiendo de esta base se pondrán en contraposición los resultados obtenidos a partir del análisis de los primeros 4 segundos de la fase P y el máximo desplazamiento calculado en ventanas de tiempo de mayor duración.

Para tal efecto, en primer lugar se analizará el comportamiento de *PD* acotado entre las primeras llegadas de las fases P y S, parámetro que será denominado de ahora en adelante como PDPS. A continuación se determinará el máximo del desplazamiento para la totalidad del registro, llamado peak de desplazamiento sísmico (PGD). Se utilizan los mismos registros que para análisis previos del parámetro *PD*.

La figura (5.14) muestra la correlación entre el peak de desplazamiento obtenido desde la fase P completa (PDPS) para eventos interplaca e intraplaca. Las principales diferencias con respecto al análisis para 4 segundos, se producen para los eventos de contacto, que muestran un mejor ajuste y un incremento en la pendiente que acerca las relaciones obtenidas para ambos tipos de eventos. La figura (5.15), que muestra el grado de correlación que existe entre *PD* calculado para 2 y 4 segundos y la fase P completa, deja de manifiesto el hecho de que 4 segundos es el tiempo en que ocurre el peak de desplazamiento para casi la totalidad de los eventos. Es interesante notar que la correlación para 2 segundos también representa un buen ajuste, lo que para efectos de alerta temprana es un resultado importante.

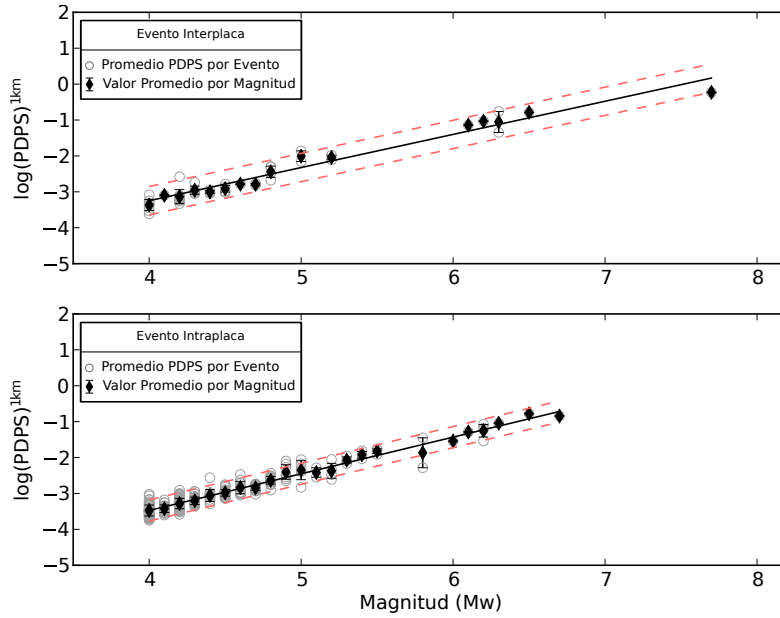


Figura 5.14: Ajuste diferenciado por tipo de evento entre el peak de desplazamiento y la magnitud para la fase P completa (PDPS).

Coeficientes Regresión PDPS					
Eventos interplaca			Eventos intraplaca		
A	B	R	A	B	R
0.92	-6.94	0.97	1.02	-7.56	0.96

Tabla 5.6: Coeficientes para el ajuste entre magnitud y el peak de desplazamiento obtenido de la fase P completa. Además se indica el coeficiente de correlación R en cada ajuste y para la totalidad de los datos.

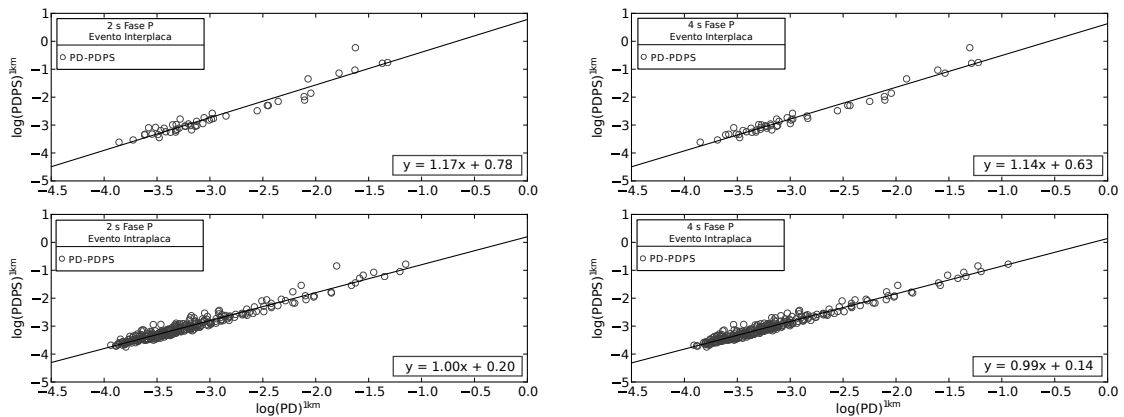


Figura 5.15: Relación entre PDPS y PD calculado en ventanas de 2 y 4 segundos. El coeficiente de correlación para eventos interplaca e intraplaca es 0.97 (ventana de 2 segundos) y 0.98 (ventana de 4 segundos) para ambos tipos de evento.

Por otra parte, es interesante obtener la relación entre el máximo desplazamiento obtenido para porciones tempranas de la onda P y el peak de movimiento sísmico en desplazamiento. En la figura (5.16), a pesar de que la dispersión de los datos es mayor que para el análisis de PDPS, de igual forma se observa una clara correlación mostrada por una tendencia lineal creciente para ambos tipos de evento.

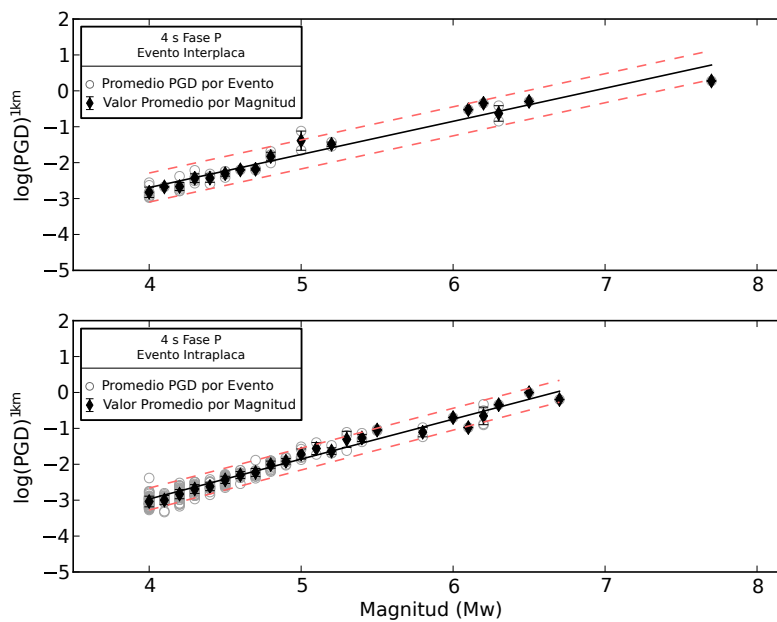


Figura 5.16: Ajuste diferenciado por tipo de evento entre el peak de desplazamiento y la magnitud para la totalidad del registro (PGD).

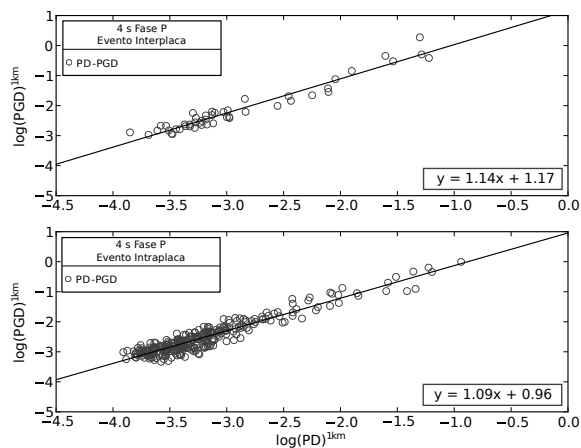


Figura 5.17: Relación entre PGD y PD calculado para una ventana de 4 segundos diferenciado por tipo de eventos. El coeficiente de correlación R para eventos del tipo interplaca e intraplaca es de 0.97 y 0.95 respectivamente.

Coeficientes Regresión PGD					
Eventos interplaca			Eventos intraplaca		
A	B	R	A	B	R
0.92	-6.38	0.97	1.11	-7.41	0.97

Tabla 5.7: Coeficientes para el ajuste entre magnitud y PGD.

Peak de velocidad

La versión de *PD* en velocidad (*PV*), al no involucrar mayor tratamiento de las señales, resulta de interés para un sistema de alerta temprana. Esta muestra también un ajuste lineal caracterizado por los coeficientes entregados en la tabla (5.8). El resultado de la correlación para trazas filtradas entre 0.2 y 20 Hz y corregidas por la distancia a la fuente, se muestra en la figura (5.18), donde los ajustes para terremotos interplaca e intraplaca indican un error máximo de ± 0.9 y ± 0.6 respectivamente, valores que superan a los obtenidos para el ajuste de *PD*.

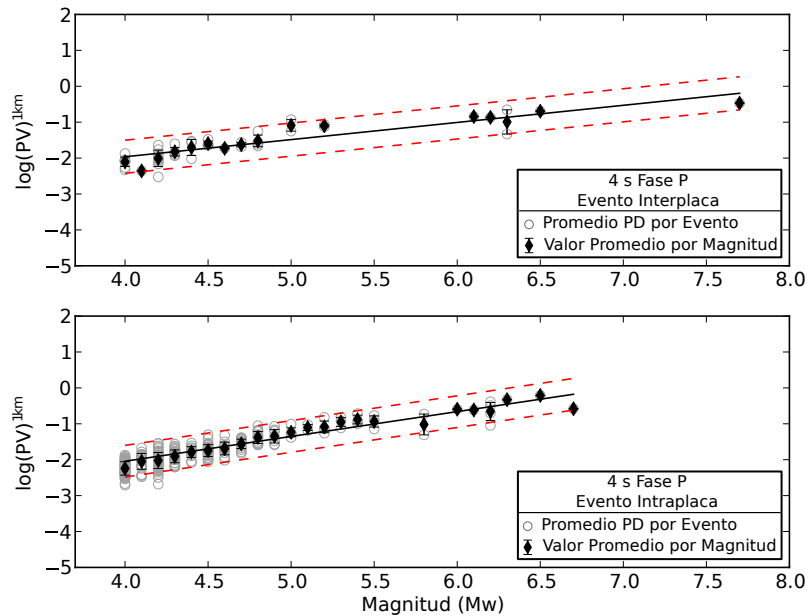


Figura 5.18: Ajuste entre el peak de velocidad y la magnitud para una ventana de 4 segundos. Los registros han sido filtrados entre 0.2 y 20 Hz.

Coeficientes Regresión PV (4s)					
Eventos interplaca			Eventos intraplaca		
A	B	R	A	B	R
0.48	-3.87	0.88	0.69	-4.81	0.89

Tabla 5.8: Coeficientes correspondientes al ajuste entre magnitud y el peak de velocidad.

5.6. Discusión y conclusiones

Chile es un país que se mantiene continuamente bajo la amenaza de un posible mega-terremoto. Luego del devastador evento M_W 8.8 del Maule 2010, que liberó gran parte de los esfuerzos acumulados en una zona considerada como de alto potencial sísmico, se produjeron múltiples cambios tanto en la red sismológica como en el organismo local encargado de monitorear sísmicamente la región, sin embargo aún no se cuenta con un sistema de alerta temprana que entregue información certera en un rango de segundos. Por este motivo, y sobre todo porque se espera que la densidad de la red sismológica sea incrementada en los próximos años, es de suma importancia comenzar a evaluar la posibilidad de implementar este tipo de sistemas en la región realizando estudios a lo largo de todo Chile, teniendo en cuenta que los resultados podrían variar dependiendo del territorio y sus características.

El presente trabajo analiza 4 parámetros de alerta temprana de terremotos propuestos en investigaciones anteriores para la determinación de la magnitud en tiempo real: el periodo característico (τ_c), el máximo peak de desplazamiento (PD), el máximo peak de velocidad (PV) y la integral de la velocidad al cuadrado ($IV2$). Cada uno de ellos fue determinado en una porción temprana de la fase P en registros banda ancha corregidos por el instrumento y por distancia al hipocentro.

Al observar los resultados obtenidos tras el análisis de estos parámetros de alerta temprana para la totalidad de los datos, es el peak de desplazamiento el mejor correlacionado con la magnitud. Para este queda de manifiesto que utilizando porciones de la fase P por sobre 0.5 segundos, la relación creciente con la magnitud es clara hasta M_W 6.5 para 2 segundos y hasta M_W 6.7 para 4 segundos, saturando para el evento de mayor magnitud disponible (M_W 7.7) en ambos casos. El error máximo estimado a partir del intervalo de %95 de confianza corresponde a ± 0.5 para la magnitud PD , valor considerado alto en términos de alerta temprana.

Para el caso del parámetro $IV2$ que tiene directa relación con la energía, se hace evidente una diferencia en la relación lineal entre eventos por debajo y por sobre la magnitud 5.8. Estos últimos, aunque con una dispersión mayor, muestran una tendencia caracterizada por un crecimiento más lento que los anteriores, lo que puede explicarse tomando en cuenta la complejidad de la ruptura de terremotos de gran tamaño, la cuál no estaría siendo representada en su totalidad por una ventana que contiene tan solo algunos segundos del inicio de la onda P. En un análisis previo por parte de Lancieri *et al.* [2011] realizado para registros del terremoto de Tocopilla y sus réplicas, también es posible inferir un quiebre alrededor de esta magnitud para este parámetro calculado en los 2 primeros segundos de la onda P. Cabe destacar el comportamiento del parámetro τ_c para eventos por sobre M_W 6.0, el cual les atribuye un valor por sobre la unidad.

En consecuencia de los resultados obtenidos surge la idea de caracterizar por separado los dos grupos de eventos característicos de la región: interplaca e intraplaca de profundidad intermedia. Según este análisis se hace menos evidente la diferencia entre eventos de mayor y menor magnitud, mostrando en general una mejor correlación en ambos casos con respecto a los resultados obtenidos de la totalidad de los datos, y coincidiendo en la saturación de los eventos sobre 6.7.

Las mayores diferencias se producen para PD , que para eventos intraplaca es capaz de determinar la magnitud para una ventana de 4 segundos con una precisión de ± 0.3 incluyendo dos valores

anómalos (analizados en la sección (5.5.1)), los cuales, al ser eliminados o corregidos admitiendo solo estaciones cercanas, hacen descender el error a ± 0.2 . En contraste, para el tipo de eventos interplaca el error obtenido es el doble, observándose además una menor pendiente que para los eventos más profundos. Es importante destacar la mínima diferencia que se produce entre los resultados para ventanas de 2 y 4 segundos para ambos tipos de eventos, resultado importante para efectos de alerta temprana. De la misma manera que ocurre con *PD*, *IV2* muestra un muy buen ajuste para eventos de profundidad intermedia en contraposición con eventos interplaca, aunque no se alcanza la precisión que entrega el peak de desplazamiento. Un resultado muy interesante que resulta del análisis de τ_c tiene que ver con el valor de este parámetro para eventos mayores a M_W 6.0, el cual es superior a 1 para todo tipo de eventos, incluso a partir de 0.5 segundos de la llegada de la fase P, sugiriendo su posible utilización a modo de confirmación de cierto valor previamente encontrado por otro parámetro.

Finalmente, la correlación con la magnitud obtenida para el máximo desplazamiento ocurrido en la fase P completa (PDPS), la cuál muestra un muy buen ajuste para la totalidad de los datos, deja en evidencia la mayor dependencia de eventos interplaca con la porción inicial de la fase P analizada con respecto a los eventos más profundos. Lo anterior se infiere del cambio abrupto en el ajuste lineal para este grupo de eventos al pasar de una ventana de 4 segundos a una de mayor duración, a diferencia de los eventos más profundos que no sufren mayor variación.

Capítulo 6

Conclusiones generales

A lo largo de este trabajo se analizó la sismicidad de la región de estudio desde dos perspectivas diferentes. La primera incluye la determinación de hipocentros, el cálculo de magnitudes locales y de momento para la base de datos principal, y mecanismos focales para un subconjunto de ellos. El segundo enfoque tiene como objetivo el análisis de la correlación entre parámetros de alerta temprana de terremotos y su magnitud final.

En este trabajo predominaron los eventos intraplaca de profundidad intermedia con respecto a eventos interplaca tipo *thrust*, donde tan solo un 10 % de los datos corresponden a sismos interplaca. Para los eventos intraplaca de profundidad intermedia se observa un cambio a partir de los 21.5° S que se manifiesta al observar las localizaciones, como un hundimiento de la placa subductada en la dirección norte-sur, y por parte de los mecanismos de fallamiento, como una alteración local compresiva en el campo de esfuerzos de la región que en general es representado por mecanismos de extensión.

Mediante la caracterización de cada evento según corresponda al tipo compresional o extensional, fue posible determinar un rango en el cual se produciría el cambio entre un régimen de compresión propio de la zona de acoplamiento y un régimen de extensión que caracteriza a los eventos intraplaca de profundidad intermedia. Según los resultados, la profundidad a la que ocurre este fenómeno corresponde a 60 ± 10 km, valor que coincide con estudios anteriores en la región. De los mecanismos focales obtenidos con soluciones bien acotadas, algunos corresponden al tipo *strike-slip*, y aunque resultan extraños, este tipo de eventos ha sido observado a lo largo de la subducción chilena, específicamente en la zona central. Otro tipo de eventos de interés, son aquellos que poseen mecanismos de fallamiento normal ubicados en el interior de la placa bajo la zona de acoplamiento, que según estudios previos podrían indicar la existencia de una doble zona sísmica.

Con referencia al análisis de los parámetros de alerta temprana analizados a partir de la porción temprana de la fase P, se observa una mejor correlación con la magnitud para los parámetros que utilizan la amplitud con respecto a los basados en el contenido de frecuencia de la ventana analizada. En particular, *PD* es el parámetro que obtiene el mejor ajuste, mostrando una tendencia lineal y creciente en un amplio rango de magnitudes, tanto para el análisis que incluye la totalidad de los eventos, como para el que los diferencia por tipo.

Resulta fundamental para efectos de entregar una magnitud en tiempo real, el hecho de que los resultados obtenidos para ventanas de 2 y 4 segundos a partir de la llegada de la onda P sean similares, sumándose a lo anterior el buen ajuste obtenido para la variación del pick de desplazamiento en velocidad (PV), parámetro que a diferencia de PD no involucra la integración de los registros. Los resultados muestran la saturación de eventos de magnitudes M_W por sobre 6.5, los que necesitarían una ventana de mayor duración para entregar un valor representativo de los procesos ocurridos en la fuente. Esta hipótesis se ve confirmada por el excelente ajuste que se obtiene para la totalidad de los datos en el análisis de PD utilizando la fase P completa, sobre todo para eventos interplaca.

El hecho de que el valor de la magnitud de un mega-terremoto sea subestimado a partir del cálculo de parámetros dentro de una ventana de pocos segundos al inicio de la onda P, crea un *trade-off* entre el poco tiempo disponible para entregar una estimación de la magnitud y la gran ventana de tiempo necesaria para obtener información confiable. Según esto, el procedimiento más razonable sería declarar una alerta tras sobrepasar cierto valor umbral determinado por el parámetro utilizado, mejorando el resultado a medida que estaciones más lejanas estén disponibles.

Por otra parte, se observaron diferentes resultados prácticos para el procesamiento de datos en tiempo real al estudiar los primeros segundos de la onda P para el cálculo de parámetros de alerta temprana:

- Reducción del tiempo de estimación de la magnitud.
- Obtención de información sobre el tamaño de un evento antes de que instrumentos del tipo banda ancha saturen, como ocurre para magnitudes por sobre M_W 5.5 en la zona epicentral.
- La posibilidad de implementar sistemas del tipo “shutdown” antes de la llegada de la onda S.

Finalmente, se concluye que es factible el uso de un sistema de alerta temprana en el Norte de Chile y se recomienda incluir el uso de magnitudes preliminares provenientes de parámetros de alerta temprana al sistema de información en tiempo real del Centro Sismológico Nacional. Asimismo, se sugiere instrumentar adecuadamente el resto del país para poder contar con un sistema de alerta temprana que reduzca los actuales tiempos de estimación de la magnitud de terremotos.

Referencias

- Aki, Keiiti. 1967. Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, **72**(4), 1217–1231.
- Allen, Rex. 1982. Automatic phase pickers: their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**(6B), S225–S242.
- Allen, Rex V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68**(5), 1521–1532.
- Allen, Richard M, & Kanamori, Hiroo. 2003. The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, **300**(5620), 786–789.
- Anderson, JA, & Wood, Harry Oscar. 1925. Description and theory of the torsion seismometer. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **15**(1), 1–72.
- Araujo, Mario, & Suárez, Gerardo. 1994. Geometry and state of stress of the subducted Nazca plate beneath central Chile and Argentina: Evidence from teleseismic data. *Geophysical Journal International*, **116**(2), 283–303.
- Astroza, Maximiliano, Sandoval, Marcelo, & Kausel, Edgar. 2005. Estudio comparativo de los efectos de los sismos chilenos de subducción del tipo intraplaca de profundidad intermedia. *Jornadas de Sismología e ingeniería Antisísmica*.
- Baby, Patrice, Rochat, Philippe, Mascle, Georges, & Hérail, Gérard. 1997. Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes. *Geology*, **25**(10), 883–886.
- Baer, M, & Kradolfer, U. 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**(4), 1437–1445.
- Barrientos, Sergio E, & Ward, Steven N. 1990. The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation. *Geophysical Journal International*, **103**(3), 589–598.
- Béjar-Pizarro, Marta, Socquet, Anne, Armijo, Rolando, Carrizo, Daniel, Genrich, Jeff, & Simons, Mark. 2013. Andean structural control on interseismic coupling in the North Chile subduction zone. *Nature Geoscience*.
- Brune, James N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, **75**(26), 4997–5009.

- Chlieh, M, De Chabaliér, JB, Ruegg, JC, Armijo, R, Dmowska, R, Campos, J, & Feigl, KL. 2004. Crustal deformation and fault slip during the seismic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations. *Geophysical Journal International*, **158**(2), 695–711.
- Chlieh, Mohamed, Perfettini, Hugo, Tavera, Hernando, Avouac, Jean-Philippe, Remy, Dominique, Nocquet, Jean-Mathieu, Rolandone, Frédérique, Bondoux, Francis, Gabalda, Germinal, & Bonvalot, Sylvain. 2011. Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **116**(B12).
- Colombelli, Simona, Zollo, Aldo, Festa, Gaetano, & Kanamori, Hiroo. 2012. Early magnitude and potential damage zone estimates for the great Mw 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, **39**(22).
- Comte, Diana, & Pardo, Mario. 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, **4**(1), 23–44.
- Comte, Diana, & Suárez, Gerardo. 1995. Stress distribution and geometry of the subducting Nazca plate in northern Chile using teleseismically recorded earthquakes. *Geophysical Journal International*, **122**(2), 419–440.
- Delouis, Bertrand, Pardo, Mario, Legrand, Denis, & Monfret, Tony. 2009. The Mw 7.7 Tocopilla earthquake of 14 November 2007 at the southern edge of the northern Chile seismic gap: Rupture in the deep part of the coupled plate interface. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(1), 87–94.
- Dorbath, Louis, Cisternas, A, & Dorbath, Catherine. 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(3), 551–576.
- Dziewonski, AM, Chou, T-A, & Woodhouse, JH. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **86**(B4), 2825–2852.
- Ekström, G, Nettles, M, & Dziewoński, AM. 2012. The global CMT project 2004–2010: centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **200**, 1–9.
- Festa, Gaetano, Zollo, Aldo, & Lancieri, Maria. 2008. Earthquake magnitude estimation from early radiated energy. *Geophysical Research Letters*, **35**(22).
- Font, Yvonne, Kao, Honn, Lallemand, Serge, Liu, Char-Shine, & Chiao, Ling-Yun. 2004. Hypocentre determination offshore of eastern Taiwan using the Maximum Intersection method. *Geophysical Journal International*, **158**(2), 655–675.
- Goldstein, P, & Snoke, A. 2005. SAC availability for the IRIS community. *Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter*, **7**.
- Goldstein, Peter, Dodge, Doug, Firpo, Mike, & Minner, Lee. 2003. SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. *The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, **81**, 1613–1620.
- Gutenberg, Beno. 1956. The energy of earthquakes. *Quarterly Journal of the Geological Society*, **112**(1-4), 1–14.

- Hanks, Thomas C, & Kanamori, Hiroo. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **84**(B5), 2348–2350.
- Husen, S, Kissling, E, Flueh, E, & Asch, G. 1999. Accurate hypocentre determination in the seismogenic zone of the subducting Nazca Plate in northern Chile using a combined on-/offshore network. *Geophysical Journal International*, **138**(3), 687–701.
- Kanamori, Hiroo. 1977. The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, **82**(20), 2981–2987.
- Kanamori, Hiroo. 1978. Quantification of earthquakes. *Nature*, **271**(5644), 411–414.
- Kanamori, Hiroo. 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **33**, 195–214.
- Kanamori, Hiroo, & Jennings, Paul C. 1978. Determination of local magnitude, ML, from strong-motion accelerograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68**(2), 471–485.
- Kausel, E. 1986. Los terremotos de agosto de 1868 y mayo de 1877 que afectaron el sur del Perú y norte de Chile. *Boletín de la Academia Chilena de Ciencias*, **3**, 8–14.
- Kelleher, John A. 1972. Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *Journal of Geophysical Research*, **77**(11), 2087–2103.
- Kendrick, Eric, Bevis, Michael, Smalley Jr, Robert, Brooks, Benjamin, Vargas, Rodrigo Barriga, Lauria, Eduardo, & Fortes, Luiz Paulo Souto. 2003. The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, **16**(2), 125–131.
- Knopoff, Leon. 1958. Energy release in earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **1**(1), 44–52.
- Lancieri, M, & Zollo, A. 2008. A Bayesian approach to the real-time estimation of magnitude from the early P and S wave displacement peaks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **113**(B12).
- Lancieri, M, Fuenzalida, A, Ruiz, S, & Madariaga, R. 2011. Magnitude scaling of early-warning parameters for the Mw 7.8 Tocopilla, Chile, earthquake and its aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**(2), 447–463.
- Lomax, Anthony, Virieux, Jean, Volant, Philippe, & Berge-Thierry, Catherine. 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models. *Pages 101–134 of: Advances in seismic event location*. Springer.
- Lomax, Anthony, Michelini, Alberto, Curtis, Andrew, Scientific, ALomax, & Mouans-Sartoux, France. 2009. Earthquake location, direct, global-search methods. *Encyclopedia of complexity and system science*, 2449–2473.
- Lomax, Anthony, Satriano, Claudio, & Vassallo, Maurizio. 2012. Automatic picker developments and optimization: FilterPicker—a robust, broadband picker for real-time seismic monitoring and earthquake early warning. *Seismological Research Letters*, **83**(3), 531–540.

- Loveless, JP, Pritchard, ME, & Kukowski, N. 2010. Testing mechanisms of subduction zone segmentation and seismogenesis with slip distributions from recent Andean earthquakes. *Tectonophysics*, **495**(1), 15–33.
- Madariaga, Raúl. 1998. Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, 221.
- Malgrange, M, & Madariaga, R. 1983. Complex distribution of large thrust and normal fault earthquakes in the Chilean subduction zone. *Geophysical Journal International*, **73**(2), 489–505.
- Metois, Marianne, Socquet, Anne, & Vigny, C. 2012. Interseismic coupling, segmentation and mechanical behavior of the central Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **117**(B3).
- Métois, Marianne, Socquet, Anne, Vigny, Christophe, Carrizo, Daniel, Peyrat, S, Delorme, A, Mau-reira, E, Valderas-Bermejo, M-C, & Ortega, I. 2013. Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, **194**(3), 1283–1294.
- Müller, R Dietmar, Roest, Walter R, Royer, Jean-Yves, Gahagan, Lisa M, & Sclater, John G. 1997. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **102**(B2), 3211–3214.
- Nakamura, Yutaka. 1988. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). *Pages 673–678 of: Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 7.
- Nishenko, Stuart P. 1985. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **90**(B5), 3589–3615.
- Olson, Erik L, & Allen, Richard M. 2005. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, **438**(7065), 212–215.
- Oppenheim, Alan V, Schafer, Ronald W, Buck, John R, *et al.* . 1989. *Discrete-time signal processing*. Vol. 2. Prentice-hall Englewood Cliffs.
- Orowan, E. 1960. Mechanism of seismic faulting. *Geological Society of America Memoirs*, **79**, 323–346.
- Peter Lepage, G. 1978. A new algorithm for adaptive multidimensional integration. *Journal of Computational Physics*, **27**(2), 192–203.
- Peyrat, S, Campos, J, De Chabalier, JB, Perez, A, Bonvalot, S, Bouin, M-P, Legrand, D, Nercessian, Alexandre, Charade, Olivier, Patau, G, *et al.* . 2006. Tarapacá intermediate-depth earthquake (Mw 7.7, 2005, northern Chile): A slab-pull event with horizontal fault plane constrained from seismologic and geodetic observations. *Geophysical research letters*, **33**(22).
- Peyrat, S, Madariaga, R, Buforn, E, Campos, J, Asch, G, & Vilotte, JP. 2010. Kinematic rupture process of the 2007 Tocopilla earthquake and its main aftershocks from teleseismic and strong-motion data. *Geophysical Journal International*, **182**(3), 1411–1430.

- Podvin, Pascal, & Lecomte, Isabelle. 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophysical Journal International*, **105**(1), 271–284.
- Richter, Charles F. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am*, **25**(1), 1–32.
- Richter, Charles F. 1958. *Elementary Seismology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, Calif., 578 pp.
- Ruegg, JC, Campos, J, Armijo, R, Barrientos, S, Briole, P, Thiele, R, Arancibia, M, Canuta, J, Duquesnoy, T, Chang, M, *et al.* . 1996. The Mw= 8.1 Antofagasta (North Chile) earthquake of July 30, 1995: first results from teleseismic and geodetic data. *Geophysical Research Letters*, **23**(9), 917–920.
- Rydelek, Paul, Wu, Changjiang, & Horiuchi, Shigeki. 2007. Comment on “Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records” by Aldo Zollo, Maria Lancieri, and Stefan Nielsen. *Geophys. Res. Lett*, **34**, L20302.
- Sadeh, M, Ziv, A, & Wust-Bloch, H. 2014. Real-time magnitude proxies for earthquake early warning in Israel. *Geophysical Journal International*, **196**(2), 939–950.
- Sambridge, Malcolm, & Mosegaard, Klaus. 2002. Monte Carlo methods in geophysical inverse problems. *Reviews of Geophysics*, **40**(3), 3–1.
- Satriano, Claudio, Wu, Yih-Min, Zollo, Aldo, & Kanamori, Hiroo. 2011. Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(2), 106–118.
- Soudoudi, F, Yuan, X, Asch, G, & Kind, R. 2011. High-resolution image of the geometry and thickness of the subducting Nazca lithosphere beneath northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **116**(B4).
- Stein, Seth, & Wysession, Michael. 2009. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Wiley.com.
- Tarantola, Albert, & Valette, Bernard. 1982. Inverse problems= quest for information. *J. geophys*, **50**(3), 150–170.
- Uhrhammer, Robert A, & Collins, Eric R. 1990. Synthesis of Wood-Anderson seismograms from broadband digital records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(3), 702–716.
- Vassallo, Maurizio, Satriano, Claudio, & Lomax, Anthony. 2012. Automatic picker developments and optimization: a strategy for improving the performances of automatic phase pickers. *Seismological Research Letters*, **83**(3), 541–554.
- Victor, P, Sobiesiak, M, Glodny, J, Nielsen, SN, & Oncken, O. 2011. Long-term persistence of subduction earthquake segment boundaries: Evidence from Mejillones Peninsula, northern Chile. *Journal of Geophysical Research*, **116**(B2), B02402.

- Vigny, Christophe, Rudloff, Alain, Ruegg, Jean-Claude, Madariaga, Raul, Campos, Jaime, & Alvarez, Manuel. 2009. Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **175**(1), 86–95.
- Wang, Weitao, Ni, Sidao, Chen, Yong, & Kanamori, Hiroo. 2009. Magnitude estimation for early warning applications using the initial part of P waves: A case study on the 2008 Wenchuan sequence. *Geophysical Research Letters*, **36**(16).
- Wu, Yih-Min, & Kanamori, Hiroo. 2005a. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(1), 347–353.
- Wu, Yih-Min, & Kanamori, Hiroo. 2005b. Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(3), 1181–1185.
- Wu, Yih-Min, & Kanamori, Hiroo. 2008. Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals. *Sensors*, **8**(1), 1–9.
- Wu, Yih-Min, & Zhao, Li. 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, **33**(16).
- Zhou, Hua-wei. 1994. Rapid three-dimensional hypocentral determination using a master station method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, **99**(B8), 15439–15455.
- Zollo, Aldo, Lancieri, Maria, & Nielsen, Stefan. 2006. Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records. *Geophysical Research Letters*, **33**(23).
- Zollo, ALDO, Iannaccone, GIOVANNI, Lancieri, M, Cantore, L, Convertito, V, Emolo, A, Festa, G, Gallovič, F, Vassallo, M, Martino, C, *et al.* . 2009. Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation. *Geophysical research letters*, **36**(5).

Apéndice A

Programas

A.1. Programa CALCML.py

```
#!/usr/bin/env python

# Calcula la magnitud local convirtiendo archivos *.deco (sin la respuesta instrumental) a
# WoodAnderson.
# Solo se necesitan carpetas con archivos SAC .deco en su interior y un catalogo de eventos
# localizados (variable "catalogfile") que contenga en su interior las siguientes variables:
# yyyy mm dd hh mm ss.ssss lat lon dep RMS Dx Dy Dz.

# Este script a diferencia del 2, crea un catalogo completo incluyendo magnitud.
# IMPORTANTE: el numero de eventos del catalogo debe ser igual al numero de carpetas con eventos
# en el directorio actual
# Entrega como output archivos evento_magprom.mag que en su interior contienen detalle del
# calculo de la magnitud para cada componente de cada estacion.

import re,os,numpy,subprocess,math,glob,scipy
from obspy.core.util.geodetics import gps2DistAzimuth

# TRANSFORMANDO A WOOD ANDERSON
def watrans(pathdir):
    os.chdir(pathdir)
    listdeco = sorted(glob.glob('*.deco'))

    # Loop sobre cada archivo SAC existente en la carpeta actual
    for deco in listdeco:

        name=deco.split('.')[1]
        comp=deco.split('.')[3]
        print 'Transformando_a_Wood_Anderson_el_archivo_'+deco
        if comp=='HHE'or comp=='HHN':
            from obspy import read
            st = read(deco)
            st2 = st.copy()
            tr = st2[0]
            wa = {'poles':[complex(-6.2832,-4.7124),complex(-6.2832,4.7124)],
                'zeros':[complex(0,0)],'gain':1,'sensitivity':2080}

            tr.simulate(paz_simulate=wa)
            tr.write(deco+'wa',format='SAC')
        else:
            print 'Este_archivo_SAC_tiene_componente_'+comp
           +'_y_no_sera_transformado_a_wood_anderson'

#CALCULANDO MAGNITUD A ARCHIVOS *.DECOWA

def magnitud(pathdir,pro):
    splpath = pathdir.split('/')
    evento = splpath[-2]
```

```

os.chdir(pathdir)
listwa = sorted(glob.glob('*.*decowa'))
listmag = []
for wa in listwa:
    estac = wa.split('.')[1]
    compo = wa.split('.')[3]
    from obspy import read
    st = read(wa)
    st2 = st.copy()
    tr = st2[0]
    sachdr = tr.stats.sac
    depmax = float(max(abs(tr.data)))
    depmin = float(min(abs(tr.data)))
    diste = float(sachdr.dist)
    dist = math.sqrt(diste**2 + (float(pro))**2)
    amp = (depmax+depmin)/2*1000*dist/100
    log = math.log10(amp)
    Ml= log + 3
    listmag.append(estac+'_'+compo+'_'+str(Ml))
suma = 0
for i in range(0,len(listmag)):
    suma = suma + float(listmag[i].split()[2])
global prom
prom = '%.2f' % (suma/len(listmag))
filemag = open(path+evento+'_'+str(prom)+'_mag','w')
for elem in listmag:
    print >> filemag,elem
filemag.close()

path=os.getcwd()+ '/'

#Definir archivos utiles en el proceso
catfile=raw_input("Nombre_del_catalogo:\n")

year=raw_input("Introduce_el_aGNo_de_los_datos_que_estAs_leyendo:\n")

#Entrar a cada carpeta y ejecutar las funciones
cmd = 'rm_catalogoyMAG.dat_*mag'
os.system(cmd)

#Abriendo archivo output nuevo
output=open("catalogoyMAG.dat","a")

lineaheader = 'yyyy_mm_dd_hh_mm_ss.ssss_ lat_ lon_ depth_ mag_ Dh_ Dz_ RMS_ label'
print >> output, lineaheader

i=0
catalogo = open(catfile,'r')
listadir = sorted(glob.glob(year[2:4]+'*/'))
for linea in catalogo.readlines():
    print linea
    spl=linea.split()[0:]
    namedir=listadir[i]
    i=i+1
    yr=spl[0]
    mo=spl[1]
    dy=spl[2]
    hr=spl[3]
    mi=spl[4]
    se=spl[5]
    lat=spl[6]
    lon=spl[7]
    pro=spl[8]
    rms=spl[9]
    Dx=float(spl[10])
    Dy=float(spl[11])
    eh=str((Dx+Dy)/2)
    ez=spl[12]
    ID=str(i)

```

```
pathdir=path+namedir
watrans(pathdir)
magnitud(pathdir,pro)
lineacomp= yr+'_' +mo+'_' +dy+'_' +hr+'_' +mi+'_' +se+'_' +lat+'_' +lon+'_' +pro+'_' +str(prom)+
'_' +eh+'_' +ez+'_' +rms+'_' +ID
print >> output, lineacomp
catalogo.close()
output.close()
```

A.2. Programa CALCMW.py

```
#!/usr/bin/env python

# Este programa entrega como resultado la magnitud de momento para tantos eventos como carpetas
# haya, que es su interior contengan:
#
# 1- Archivos .deco que corresponden al registro en velocidad (para estaciones banda ancha)
#    corregido por el instrumento.
# 2- Archivo .pick que contiene el tiempo de la fase P y S para cada estacion en formato
#    NonLinLoc.
#
# El resultado se muestra en un archivo ascii con el detalle de ls magnitudes obtenidas para cada
# estacion ademas de figuras para cada estacion en formato jpg.
#
# El archivo que contiene los pick debe tene el mismo nombre que la carpeta, y su terminacion
# debe ser .pick
#
# IMPORTANTE: para funcionar necesita archivos modelo.dat y catalogo.dat en la misma carpeta
# donde se encuentra el programa.
# Los formatos de estos son para modelo.dat (vs(km/s) prof_techo(km) prof_fondo(km)
# densidad(g/cm**3)) y catalogo.dat(yyyy mm dd hh mm ss lat lon prof magloc...).
# De los ultimos solo se utilizara prof y magloc.

from pylab import *
from obspy.core import read
from matplotlib.font_manager import FontProperties
import re,os,time,datetime,glob,subprocess, numpy, commands
from obspy import UTCDateTime

# Funcion plateau calcula un valor promedio del plateau en bajas frecuencias para valores en un
# rango de frecuencias dado.
def plateau(pathdir,opcion,prof,magloc):

    if int(opcion) == 1:
        espec = 'P'
        F = 1                                #free surface response
    elif int(opcion) == 2:
        espec = 'S'
        F = 2                                #free surface response

    os.chdir(pathdir)
    namedir = pathdir.split('/')[-1]
    namepickfile = namedir+'.pick'
    norepsta = []                             #lista nombres estaciones no repetidos
    for deco in sort(glob.glob('*.*deco')):
        if deco.split('.')[1] not in norepsta:
            norepsta.append(deco.split('.')[1])

    #CAMBIAR valores de acuerdo a la zona y profundidad del sismo
    #SI unitsi
    #Ocupando modelo de velocidades
    #vs = 0
    #rho = 0
    mod = open(path+modelo,'r')
    for linemod in mod:
        if linemod[0] != '#':
            if prof >= float(linemod.split()[1]) and prof < float(linemod.split()[2]):
                vs = float(linemod.split()[0])*1000
                rho = float(linemod.split()[3])*1000

    mod.close()
    print 'Evento_de_magnitud_local_'+str(magloc)+'_y_profundidad_'+str(prof)
    print 'Constantes_usadas_para_este_evento_son_vs='+str(vs)+'_y_rho='+str(rho)+'\n'

    #vs = 4800 #S velocity
    vp = vs*math.sqrt(3) #P velocity
    #rho = 3400 #density
    Rad = 0.67 #Average radiation pattern
    mwlist = []
    output = open('Mwfinal_'+espec+'.dat','w')
```

```

# Loop sobre cada estacion
for sta in norepsta:
    print '-----'
    print '\nTrabajando_en_la_estacion_' + sta + '\n'
    listdeco = sort(glob.glob('*'+sta+'*deco'))
    namedecofile = listdeco[0]
    from obspy.core import read
    st = read(namedecofile)
    tr = st[0]
    sachdr = tr.stats.sac
    diste = sachdr.dist
    dist = math.sqrt(diste**2 + prof**2)
    print 'Distancia_hipocentral:_' + str(dist)
    linepick = ''
    pick = open(namepickfile, 'r')
    fechas = 0
    fechap = 0
    for line in pick:
        if len(line) > 10:
            if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'P':
                yyyy = int(line.split()[6][0:4])
                mm = int(line.split()[6][4:6])
                dd = int(line.split()[6][6:8])
                hhp = int(line.split()[7][0:2])
                mmp = int(line.split()[7][2:4])
                ssp = int(float(line.split()[8]))
                msp = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
                fechap = datetime.datetime(yyyy, mm, dd, hhp, mmp, ssp, msp)
            if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'S':
                yyyy = int(line.split()[6][0:4])
                mm = int(line.split()[6][4:6])
                dd = int(line.split()[6][6:8])
                hhs = int(line.split()[7][0:2])
                mms = int(line.split()[7][2:4])
                sss = int(float(line.split()[8]))
                mss = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
                fechas = datetime.datetime(yyyy, mm, dd, hhs, mms, sss, mss)
            if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == espec:
                linepick = line.rstrip()
    if fechas == 0 or fechap == 0:
        spdif = 0
    else:
        spdifpre = fechas - fechap
        spdif = spdifpre.seconds
    pick.close()

# Entrar solo en la estacion que tenga lectura de la fase
if len(linepick) == 0:
    print 'La_estacion_' + sta + '_no_sera_utilizada, _la_fase_' + espec
    + '_no_ha_sido_leida_para_esta_estacion\n'
else:
    yyyy = int(linepick.split()[6][0:4])
    mm = int(linepick.split()[6][4:6])
    dd = int(linepick.split()[6][6:8])
    hh = int(linepick.split()[7][0:2])
    mi = int(linepick.split()[7][2:4])
    se = int(float(linepick.split()[8]))
    mse = int(modf(float(linepick.split()[8]))[0]*10**6)
    fecha = datetime.datetime(yyyy, mm, dd, hh, mi, se, mse)
    listsac = sort(glob.glob('*'+sta+'*.SAC'))
    listdeco = []
    for sacfile in listsac:
        from obspy.core import read
        stbrut = read(sacfile)
        stbrut2 = stbrut.copy()
        trbrut = stbrut2[0]
        trbrut.detrend()

# ELIMINANDO trazas saturadas
# Cambiar valores dependiendo el tipo de estaciones
# Excepcion sobre PB11 que ocupa un Q330HR

```

```

if sta == 'PB11':
    clip = 8*(10**6)
else:
    clip = 4.6*(10**6)
print max(abs(trbrut.data))
if float(max(abs(trbrut.data))) >= clip:
    print '\nLa_estacion_' + sta + '_componente_'
    + sacfile.split('.')[3] + '_esta_saturada\n'
else:
    print '\nLa_estacion_' + sta + '_componente_'
    + sacfile.split('.')[3] + '_no_esta_saturada\n'
    listdeco.append(sacfile+'.deco')

LFPlist = []
if len(listdeco) == 3:
    fig = figure()
    for deco in listdeco:
        from obspy.core import read
        st = read(deco)
        st2 = st.copy()
        tr = st2[0]

        # QUITAR LINEA BASE
        tr.detrend()
        if magloc < 4:
            tr.filter('highpass', freq = 0.5)
        elif magloc >= 4 and magloc < 4.5:
            tr.filter('highpass', freq = 0.3)
        elif magloc >= 4.5:
            tr.filter('bandpass', freqmin=0.02, freqmax=20)
        tr.integrate()
        trint = tr.copy()
        trint.write(deco+'.int', format='SAC')

        # CORTAR
        t0 = tr.stats.starttime

        # CAMBIAR variables deltaleft o deltaright si se estima
        # necesario
        if int(opcion) == 1:
            deltaleft = 10
            if spdif == 0:
                deltaright = 5
            else:
                deltaright = spdif - 3
        elif int(opcion) == 2:
            deltaleft = 3
            deltaright = 30
        ti = UTCDateTime(fecha) - deltaleft
        tf = UTCDateTime(fecha) + deltaright
        tr.trim(ti,tf)
        sismograma=tr.data #en desplazamiento (m)
        npts = tr.stats.npts
        dt = tr.stats.delta
        df = 1/(float(npts)*dt)
        # CAMBIAR rango frecuencias
        if magloc < 5:
            frec1 = 0.8
            frec2 = 1.2
        elif magloc >= 5:
            frec1 = 0.03
            frec2 = 0.2

        # Frecuencia mas cercana a frec1
        i = 1
        while True:
            mult = df * i
            if mult > frec1:
                break
            i = i+1
        frec1 = mult

```

```

# Frecuencia mas cercana a frec2
i = 1
while True:
    mult = df * i
    if mult > frec2:
        break
    i = i+1
frec2 = mult
fny = df*float(npts)/2
time = []
j = 0
for i in range(0,npts):
    time.append(j)
    j = j + dt
frec = arange(0,npts*df,df)
if len(frec) is not npts:
    frec = frec[0:npts]

# Encontrando el indice que corresponde a frec1 y frec2
ind1 = nonzero(frec==frec1)[0][0]
ind2 = nonzero(frec==frec2)[0][0]

# Espectro de Fourier
fourieramp=abs(fft(sismograma)*dt)

evalplateau = []
for i in range(ind1,ind2+1):
    evalplateau.append(fourieramp[i])

# Calcula promedio
suma = 0
for elem in evalplateau:
    suma = suma + elem
mo = suma/len(evalplateau)
print 'LFP_para_' + sta + '_', componente_' + deco.split('.')[3] +
':_' + str(mo)
LFPlist.append(mo)
moarr = []
for i in range(0, len(frec)):
    moarr.append(mo)
index = listdeco.index(deco)
if index == 0:
    titl1 = 'Sismograma_en_desplazamiento'
    titler = 'Espectro_de_Fourier'
    indr = (index + 1)*2
    indl = indr-1
    s1=subplot('32'+str(indr))
    loglog(frec, fourieramp, 'r', frec, moarr, 'b', frec1)
    axvline(x=frec1)
    axvline(x=frec2)
    xlim(df, fny)
    s1.annotate(sta+'_' + deco.split('.')[3],
xy=(0.65,0.9),
xycoords='axes_fraction', fontsize=10)
    title(titler)
    s2 = subplot('32'+str(indl))
    plot(time, sismograma, 'b')
    s2.annotate(sta+'_' + deco.split('.')[3],
xy=(0.65,0.9),
xycoords='axes_fraction', fontsize=10)
    title(titl1)
else:
    indr = (index + 1)*2
    indl = indr-1
    s1=subplot('32'+str(indr))
    loglog(frec, fourieramp, 'r', frec, moarr, 'b', frec1)
    axvline(x=frec1)
    axvline(x=frec2)
    xlim(df, fny)
    s1.annotate(sta+'_' + deco.split('.')[3],
xy=(0.65,0.9),

```

```

xycoords='axes_fraction', fontsize=10)
s2 = subplot('32'+str(indl))
plot(time, sismograma, 'b')
s2.annotate(sta+'_' + deco.split('.')[3],
xy=(0.65, 0.9),
xycoords='axes_fraction', fontsize=10)

sumlfp = 0
for lfp in LFPlist:
    sumlfp = sumlfp + float(lfp)**2
if int(opcion) == 1:
    vel = vp
elif int(opcion) == 2:
    vel = vs
const = (4*math.pi*(float(vel))**3*float(rho))/(float(F)*float(Rad))
Mo = const*float(dist)*1000*math.sqrt(sumlfp)
print 'Mo_para_la_estacion_' + sta + '_es_igual_a:_' + str(Mo)
Mw = '%.1f' % ((log10(Mo) - 9.1)/1.5)
print 'Mw_para_la_estacion_' + sta + '_es_igual_a:_' + Mw
mwlist.append(Mw)
print >> output, sta+'_' + Mw
dis = '%.1f' % (dist)
    # Guardar grafico para cada estacion
titulo = 'Espectro_fase_' + espec + '_-' + sta + '_' + Mw + str(Mw)
+',_dist=_' + dis + ' (km) '
fig.text(0.5, 0.95, titulo, horizontalalignment='center',
fontproperties=FontProperties(size=14))
savefig(namedir+'_' + sta + '_' + espec + '.pdf')
close(fig)

# Calcular promedio Mw entre todas las estaciones, final para el evento
if mwlist == []:
    print 'Este_evento_no_tiene_lecturas_para_la_fase_S\n'
else:
    promw = 0
    for mw in mwlist:
        promw = promw + float(mw)
    mwfin = '%.1f' % (promw/len(mwlist))
    print >> output, 'Mw_promedio_' + mwfin
    print >> final, namedir+'_' + mwfin
    output.close()
    os.chdir(path)

# Usar funcion plateau en un arreglo de directorios del tipo yymdd_hhmm
agno=raw_input("Introduce_el_aGNo_de_los_datos_que_estAs_leyendo_(yyyy):\n")
decatalogo = 'catalogo.dat'
catalogo= raw_input('Nombre_del_catalogo_[catalogo.dat]:\n')
catalogo = catalogo or 'catalogo.dat'
modelo=raw_input("Ingresa_nombre_del_archivo_modelo_de_velocidades_[modelo.dat]:\n")
modelo = modelo or 'modelo.dat'
opcion=raw_input("Elige_opcion._Espectro_onda_P_[1]_o_espectro_onda_S_[2]:\n")
year=agno[2:4]
path=os.getcwd()+ '/'
if int(opcion) == 1:
    espec = 'P'
elif int(opcion) == 2:
    espec = 'S'
final = open(path+'ResultadosMw_'+espec+'_evento.dat', 'w')
listadir = sort(glob.glob(year+'*/'))
i=0
cat = open(catalogo, 'r')
for catline in cat:
    dire = listadir[i]
    print '-----'
    print '\n-----Calculando_Mw_para_evento_correspondiente_al_directorio:_' + dire + '-----\n'
    prof = float(catline.split()[8])
    magloc = float(catline.split()[9])
    namedir = dire.split('/')[0]
    pathdir=path+namedir
    plateau(pathdir, opcion, prof, magloc)
    i = i + 1
final.close()

```


A.3. Programa CALCFM.py

```
#!/usr/bin/env python

# Este script sirve para calcular mecanismos focales en pdf para eventos localizados
# con NonLinLoc.
# Se necesitan archivos *.hyp de salida del programa NonLinLoc para cada evento y un
# catalogo que por lo menos tenga al principio:
# " yyyy mm dd hh mm ss.ss ..."
# IMPORTANTE: lista de archivos en el catalogo deben ser los mismos que para archivos
# *.hyp.
# Cambiar VARIABLES FOCMEC y FOCPLT para obtener resultados diferentes. Cambiar nombre
# de la variable catalogfile por el nombre del catalogo a usar.
# Archivos de salida: *.dat (input focmec), focmec_*.out y focmec_*.lst (output focmec),
# focplt_*.out y focplt_*.lst (output focplt), *.junk (funcionamiento ultimo programa que
# corrio), *.sh (scripts input para focmec focplt), *.pdf (solucion mecanismo focal
# grafica) y *.sgf (archivos que fueron convertidos a pdf)

import re,os,time,datetime,glob,subprocess

catalogfile = raw_input('Nombre_del_catalogo?\n')

with open(catalogfile,'r') as catfichero:
    i = 0
    for linea in catfichero:
        header = linea.rstrip()
        print 'Creando_el_archivo_para_el_evento:_' + header
        yyyy = linea.split('_')[0]
        mm = linea.split('_')[1]
        dd = linea.split('_')[2]
        hh = linea.split('_')[3]
        mimi = linea.split('_')[4]
        arch = open(yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.dat','w')
        print >> arch,header
        filehyplist = sorted(glob.glob('*.hyp'))
        nrolin = 1
        with open(filehyplist[i],'r') as hypfichero:
            for linea2 in hypfichero:
                if nrolin > 16 and len(linea2.split()) > 1:
                    term4 = linea2.split()[4]
                    term15 = int(float(linea2.split()[15]))
                    if term4 == 'P' and term15 > 0:
                        sta = linea2.split()[0]
                        polpre = linea2.split()[5]
                        pol = polpre.upper()
                        azs = linea2.split()[22]
                        azsf = '%.2f' % (float(azs))
                        anr = linea2.split()[24]
                        anrf = '%.2f' % (float(anr))
                        if int(float(azs)) >= 0 and
                           int(float(azs)) < 10:
                            azs = '_' + azsf
                        elif int(float(azs)) >= 10 and
                             int(float(azs)) < 100:
                            azs = '_' + azsf
                        else:
                            azs = azsf
                        if int(float(anr)) >= 0 and
                           int(float(anr)) < 10:
                            anr = '_' + anrf
                        elif int(float(anr)) >= 10 and
                             int(float(anr)) < 100:
                            anr = '_' + anrf
                        else:
                            anr = anrf
                    if len(sta) > 4:
                        sta = sta[0:4]
                    if pol == '?':
                        pol = '_'
                    infolin = sta+'_' + azs+'_' + anr+pol+'_' + term4
```

```

                                print >> arch, infolin
                                nrolin += 1
                                arch.close()
#Definir respuestas para archivo que ejecuta focmec
focmec_output = 'focmec_' + yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.out'
comment = 'semi-esfera_superior'
focmec_input = yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.dat'
fmfichero = open('focmec_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sh','w')
print >> fmfichero, '#!/bin/csh_f\nif_(-f_a.junk)_\rm_a.junk\nfocmec_<<_EOT_>_a.junk'
print >> fmfichero, focmec_output
print >> fmfichero, comment
print >> fmfichero, focmec_input
print >> fmfichero, '_____correct_file_[y]'
print >> fmfichero, '_____relative_weighting_[n]'
print >> fmfichero, '_____allowed_P_polarity_errors_[0]'
print >> fmfichero, '1_____exit_after_this_many_acceptable_solutions_[100]'
print >> fmfichero, '_____minimum_B_trend_[0]'
print >> fmfichero, '_____B_increment_[5]'
print >> fmfichero, '_____maximum_B_trend_[355]'
print >> fmfichero, '_____min_B_plunge_[0]'
print >> fmfichero, '_____increment_[5]'
print >> fmfichero, '_____maximum_[90]'
print >> fmfichero, '_____minimum_A_angle_[0]'
print >> fmfichero, '_____increment_[5]'
print >> fmfichero, '_____maximum_[85]'
print >> fmfichero, 'EOT'
print >> fmfichero, 'mv_focmec.lst_focmec_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.lst'
fmfichero.close()
cmd = 'chmod_a+x_focmec_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sh'
os.system(cmd)
pwd=os.getcwd()
subprocess.call([pwd+'focmec_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sh'],shell=True)

#Definir respuestas para archivo que ejecuta focplt
comment = 'primera_prueba'
focmec_polarity = yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.dat'
titlepl = 'Projsup_evento_'+yyyy[2:4]+'/' +mm+'/' +dd+'_' +hh+':' +mimi
plfichero = open('plot_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sh','w')
print >> plfichero, '#!/bin/csh_f\nif_(-f_a.junk)_\rm_a.junk\nfocplt_<<_EOT_>_a.junk'
print >> plfichero, 'y_____Upper_hemisphere_projection?_[N]'
print >> plfichero, 'y_____Plot_polarities_and/or_ratio_data?'
print >> plfichero, focmec_polarity
print >> plfichero, 'y_____Desired_file?_[Y]'
print >> plfichero, 'y_____Plot_impulsive_P_polarities?_[Y]'
print >> plfichero, '0.25_____Size_for_impulsive_P_polarities_[0.25]'
print >> plfichero, '1_____linewidth_for_impulsive_P_polarities_[1]'
print >> plfichero, '2_____linewidth_for_circle_outline_[2]'
print >> plfichero, 'y_____Add_a_title?_[Y]'
print >> plfichero, titlepl
print >> plfichero, '2_____linewidth_for_title_[2]'
print >> plfichero, 'n_____Include_time_&_file_name?_[Y]'
print >> plfichero, 'n_____Add_more_data_to_plot?_[N]'
print >> plfichero, 'y_____Plot_focal_mechanism_solutions?_[Y]'
print >> plfichero, 'n_____Print/display_solution_summaries?_[N]'
print >> plfichero, 'n_____Plot_P,_T_and_B_axes?_[Y]'
print >> plfichero, 'y_____P_nodal_planes_[Y]'
print >> plfichero, 'n_____Dashed_line?_[N]'
print >> plfichero, '1_____Enter_linewidth_for_solutions_[1]'
print >> plfichero, 'y_____Solutions_on_same_plot_as_data?_[Y]'
print >> plfichero, 'y_____Input_solutions_from_a_file?_[Y]'
print >> plfichero, focmec_output
print >> plfichero, 'y_____Correct_file?_[Y]'
print >> plfichero, 'n_____Plot_time_&_file_name?_[Y]'
print >> plfichero, 'n_____Add_more_solutions_to_same_plot?_[N]'
print >> plfichero, 'n_____Add_a_plot_label?'
print >> plfichero, 'EOT'
print >> plfichero, 'if_($status_!=_0)_exit\nmv_focplt.lst_focplt_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.lst\nmv_temp.sgf'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sgf\nsgftopdf'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi
plfichero.close()
cmd = 'chmod_a+x_plot_'+yyyy[2:4]+mm+dd+hh+mimi+'.sh'

```

```
os.system(cmd)
pwd=os.getcwd()
subprocess.call([pwd+'/plot_'+yyyymmddhhmmi+'.sh'],shell=True)
i += 1
```

A.4. Programa CALCTC.py

```
#!/usr/bin/env python

from pylab import *
from obspy.core import read
from matplotlib.font_manager import FontProperties
import re,os,time,datetime,glob,subprocess,numpy,commands,scipy
from obspy import UTCDateTime

# Funcion TC
def TC(opcion2,opcion,pathdir,prof,magloc,mw):
    os.chdir(pathdir)
    namedir = pathdir.split('/')[ -1]
    namepickfile = namedir+'.pick'
    norepsta = [] #lista nombres estaciones no repetidos
    for deco in sort(glob.glob('*deco')):
        st = read(deco)
        st2 = st.copy()
        tr = st2[0]
        name= tr.stats.station[0:4]
        if name == 'MAMI':
            name = 'MAM1'
        if name == 'SOGA':
            name = 'SOG1'
        if name == 'HMBC':
            name = 'HMBCX'
        if name == 'MNNC':
            name = 'MNNCX'
        if name == 'PATC':
            name = 'PATCX'
        if name == 'PSGC':
            name = 'PSGCX'
        if name not in norepsta:
            norepsta.append(name)

    #CAMBIAR valores de acuerdo a la zona y profundidad del sismo
    #SI unitsi
    #Ocupando modelo de velocidades
    #vs = 0
    #rho = 0
    print 'Evento_de_magnitud_local_'+str(magloc)+'_y_profundidad_'+str(prof)
    mwlist = []
    logTClist = []
    logTClistbajo = []
    fileout = open('TC.dat','w')
    print >> fileout, namedir
    print >> fileout, 'Mw_sta_dist_TC_log(TC)_'

    # Loop sobre cada estacion
    for sta in norepsta:
        print '-----'
        print '\nTrabajando en la estacion_'+sta+'\n'
        listdeco = sort(glob.glob('*'+sta+'*deco'))
        namedecofile = listdeco[0]
        st = read(namedecofile)
        tr = st[0]
        sachdr = tr.stats.sac
        diste = float(sachdr.dist)
        dist = math.sqrt(diste**2 + (float(prof))**2)
        dis = '%.1f' % (dist)
        print 'Distancia_hipocentral:_'+str(dis)
        linepick = ''
        pick = open(namepickfile,'r')
        fechas = 0
        fechap = 0
        for line in pick:
            if len(line) > 10:
                if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'P':
                    yyyy = int(line.split()[6][0:4])
```

```

mm = int(line.split()[6][4:6])
dd = int(line.split()[6][6:8])
hhp = int(line.split()[7][0:2])
mmp = int(line.split()[7][2:4])
ssp = int(float(line.split()[8]))
msp = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
fechap = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhp,mmp,ssp,msp)
if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'S':
    yyyy = int(line.split()[6][0:4])
    mm = int(line.split()[6][4:6])
    dd = int(line.split()[6][6:8])
    hhs = int(line.split()[7][0:2])
    mms = int(line.split()[7][2:4])
    sss = int(float(line.split()[8]))
    mss = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
    fechas = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhs,mms,sss,mss)
if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == espec:
    linepick = line.rstrip()
if fechas == 0 or fechap == 0:
    spdif = 0
else:
    spdifpre = fechas - fechap
    spdif = spdifpre.seconds
pick.close()

# Entrar solo en la estacion que tenga lectura de la fase
if len(linepick) == 0:
    print 'La_estacion_'+sta+'_no_sera_utilizada,_la_fase_'+espec
    +'_o_s_no_ha_sido_leida_para_esta_estacion\n'
else:
    yyyy = int(linepick.split()[6][0:4])
    mm = int(linepick.split()[6][4:6])
    dd = int(linepick.split()[6][6:8])
    hh = int(linepick.split()[7][0:2])
    mi = int(linepick.split()[7][2:4])
    se = int(float(linepick.split()[8]))
    mse = int(modf(float(linepick.split()[8]))[0]*10**6)
    fecha = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hh,mi,se,mse)
    listsac = sort(glob.glob('*'+sta+'*SAC'))
    listdeco = []
    for sacfile in listsac:
        stbrut = read(sacfile)
        stbrut2 = stbrut.copy()
        trbrut = stbrut2[0]
        trbrut.detrend()

        # ELIMINANDO trazas saturadas
        # Cambiar valores dependiendo el tipo de estaciones
        # Excepcion sobre PB11 que ocupa un Q330HR
        if sta == 'PB11':
            clip = 8*(10**6)
        else:
            clip = 4.6*(10**6)
        if int(opcion) == 2:
            if float(max(abs(trbrut.data))) >= clip:
                print '\nLa_estacion_'+sta+'_componente_'
                +sacfile.split('.')[3]+'_esta_saturada\n'
            else:
                print '\nLa_estacion_'+sta+'_componente_'
                +sacfile.split('.')[3]
                +'_NO_esta_saturada\n'
                listdeco.append(sacfile+'.deco')
        if int(opcion) == 1:
            listdeco.append(sacfile+'.deco')
if len(listdeco) != 3:
    print '\nLa_estacion_'+sta+'_tiene_algunas_componentes'
    +saturadas_y_no_sera_utilizada\n'
    else:
        deco1 = listdeco[0]
        deco2 = listdeco[1]
        deco3 = listdeco[2]

```

```

st1 = read(deco1)
st1des = st1.copy()
st1vel = st1.copy()
tr1des = st1des[0]
tr1vel = st1vel[0]
st2 = read(deco2)
st2des = st2.copy()
st2vel = st2.copy()
tr2des = st2des[0]
tr2vel = st2vel[0]
st3 = read(deco3)
st3des = st3.copy()
st3vel = st3.copy()
tr3des = st3des[0]
tr3vel = st3vel[0]

# TRATAMIENTO CADA COMPONENTE
tr1des.detrend()
tr2des.detrend()
tr3des.detrend()
tr1vel.detrend()
tr2vel.detrend()
tr3vel.detrend()

# FILTRO TRAZAS EN DESPLAZAMIENTO
tr1des.filter('highpass',freq=0.075)
tr2des.filter('highpass',freq=0.075)
tr3des.filter('highpass',freq=0.075)

# CONVIERTO TRAZAS *DES ANTES EN VELOCIDAD Y FILTRADAS,
# AHORA A DESPLAZAMIENTO
tr1des.integrate()
tr2des.integrate()
tr3des.integrate()

# CAMBIAR variable deltaright si se estima necesario
if int(opcion2) == 0:
    deltaright = 0.5
elif int(opcion2) == 1:
    deltaright = 1
elif int(opcion2) == 2:
    deltaright = 2
elif int(opcion2) == 3:
    deltaright = 3
elif int(opcion2) == 4:
    deltaright = 4

# TIEMPOS CORTE ventana
ti = UTCDateTime(fecha)
tf = UTCDateTime(fecha) + deltaright

# CORTAR ventana
tr1des.trim(ti,tf)
tr2des.trim(ti,tf)
tr3des.trim(ti,tf)
tr1vel.trim(ti,tf)
tr2vel.trim(ti,tf)
tr3vel.trim(ti,tf)

# DATOS TRAZAS CORTADAS ventana
tr1desdatacut = tr1des.data
tr2desdatacut = tr2des.data
tr3desdatacut = tr3des.data
tr1veldatacut = tr1vel.data
tr2veldatacut = tr2vel.data
tr3veldatacut = tr3vel.data
dt = tr1des.stats.delta

# COMBINACION COMPONENTES
minides = min(len(tr1desdatacut),len(tr2desdatacut),
len(tr3desdatacut))

```

```

trdesdata = []
for i in range(0,minides):
    trdesdata.append(sqrt(trdesdatacut[i]**2 +
        tr2desdatacut[i]**2 + tr3desdatacut[i]**2))
minivel = min(len(trlveldatacut),len(tr2veldatacut),
len(tr3veldatacut))
trveldata = []
for i in range(0,minivel):
    trveldata.append(sqrt(trlveldatacut[i]**2 +
tr2veldatacut[i]**2 + tr3veldatacut[i]**2))

# CUADRADOS DES Y VEL
trdesdata2 = [d**2 for d in trdesdata]
trveldata2 = [v**2 for v in trveldata]

# VECTOR TIEMPO
timedes = []
j = 0
for i in range(0,len(trdesdata2)):
    timedes.append(j)
    j = j + dt
timevel = []
k = 0
for i in range(0,len(trveldata2)):
    timevel.append(k)
    k = k + dt

# INTEGRALES
Iu2 = scipy.integrate.trapz(trdesdata2,timedes)
Iv2 = scipy.integrate.trapz(trveldata2,timevel)

# PERIODO CARACTERISTICO
tc = 2*math.pi*sqrt(Iu2/Iv2)
logtc = log10(tc)
logTClist.append(logtc)
if diste < 100:
    logTClistbajo.append(logtc)
print >> fileout, str(mw) + '_' + sta + '_' + str(dist) + '_' +
str(tc) + '_' + str(logtc)

sumal = 0
for elem in logTClist:
    sumal = sumal + elem
if sumal != 0 :
    logTCprom = sumal/len(logTClist)
    desvest1 = numpy.std(logTClist)
    if len(logTClistbajo) > 0:
        suma21 = 0
        for elem in logTClistbajo:
            suma21 = suma21 + elem
        logTCprombajo = suma21/len(logTClistbajo)
        desvestbajol = numpy.std(logTClistbajo)
    else:
        logTCprombajo = '-'
        desvestbajol = '-'
    print >> fileout, 'label-Mw-prof-logTCprom-std-logTCprom(<100)-std'
    print >> fileout, 'FINAL_' + str(mw) + '_' + str(prof) + '_' + str(logTCprom) + '_' +
str(desvest1) + '_' + str(logTCprombajo) + '_' + str(desvestbajol)
else:
    print '\nEste_evento_tiene_todas_sus_trazas_saturadas\n'

# Usar funcion PD en un arreglo de directorios del tipo yymmdd_hhmm
catalogo= raw_input('Nombre_del_catalogo_con_TODAS_las_magnitudes_[catalogo.dat]:\n')
catalogo = catalogo or 'catalogo.dat'
opcion2=raw_input("Elige_opcion._Ventana_0.5_seg_[0],_1_seg_[1],_2_seg_[2],_3_seg_[3]
#####o_4_seg_[4]:\n")
opcion=raw_input("Elige_opcion._Espectro_onda_P_[1]_o_espectro_onda_S_[2]:\n")
if int(opcion) == 1:
    espec = 'P'
elif int(opcion) == 2:
    espec = 'S'
path=os.getcwd()+ '/'

```

```

listadir = sorted(glob.glob('?????_????/'))
i=0
cat = open(catalogo,'r')
for catline in cat:
    dire = listadir[i]
    print '-----'
    print '\n-----Calculando_Tc_para_evento_correspondiente_al_directorio:_' + dire + '-----\n'
    prof = float(catline.split()[8])
    magloc = float(catline.split()[9])
    mw = float(catline.split()[12])
    namedir = dire.split('/')[0]
    pathdir=path+namedir
    TC(opcion2,opcion,pathdir,prof,magloc,mw)
    i = i + 1

```


A.5. Programa CALCPD.py

```
#!/usr/bin/env python

from pylab import *
from obspy.core import read
from matplotlib.font_manager import FontProperties
import re,os,time,datetime,glob,subprocess,numpy,commands,scipy
from obspy import UTCDateTime

# Funcion PD
def PD(opcion2,opcion,pathdir,prof,magloc,mw):
    os.chdir(pathdir)
    namedir = pathdir.split('/')[-1]
    namepickfile = namedir+'.pick'
    norepsta = [] #lista nombres estaciones no repetidos
    for deco in sort(glob.glob('*deco')):
        st = read(deco)
        st2 = st.copy()
        tr = st2[0]
        name= tr.stats.station[0:4]
        if name == 'MAMI':
            name = 'MAM1'
        if name == 'SOGA':
            name = 'SOG1'
        if name == 'HMBC':
            name = 'HMBCX'
        if name == 'MNNC':
            name = 'MNNCX'
        if name == 'PATC':
            name = 'PATCX'
        if name == 'PSGC':
            name = 'PSGCX'
        if name not in norepsta:
            norepsta.append(name)

    #CAMBIAR valores de acuerdo a la zona y profundidad del sismo
    #SI unitsi
    #Ocupando modelo de velocidades
    #vs = 0
    #rho = 0
    print 'Evento_de_magnitud_local_'+str(magloc)+'_y_profundidad_'+str(prof)
    mwlist = []
    logPDlist = []
    logPDlistbajo = []
    fileout = open('PD.dat','w')
    print >> fileout, namedir
    print >> fileout, 'Mw_sta_dist_PD_log(PD)'

    # Loop sobre cada estacion
    for sta in norepsta:
        print '-----'
        print '\nTrabajando en la estacion_'+sta+'\n'
        listdeco = sort(glob.glob('*'+sta+'*deco'))
        namedecofile = listdeco[0]
        st = read(namedecofile)
        tr = st[0]
        sachdr = tr.stats.sac
        diste = float(sachdr.dist)
        dist = math.sqrt(diste**2 + (float(prof))**2)
        dis = '%.1f' % (dist)
        print 'Distancia_hipocentral:_'+str(dist)
        linepick = ''
        pick = open(namepickfile,'r')
        fechas = 0
        fechap = 0
        for line in pick:
            if len(line) > 10:
                if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'P':
                    yyyy = int(line.split()[6][0:4])
```

```

mm = int(line.split()[6][4:6])
dd = int(line.split()[6][6:8])
hhp = int(line.split()[7][0:2])
mmp = int(line.split()[7][2:4])
ssp = int(float(line.split()[8]))
msp = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
fechap = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhp,mmp,ssp,msp)
if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'S':
    yyyy = int(line.split()[6][0:4])
    mm = int(line.split()[6][4:6])
    dd = int(line.split()[6][6:8])
    hhs = int(line.split()[7][0:2])
    mms = int(line.split()[7][2:4])
    sss = int(float(line.split()[8]))
    mss = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
    fechas = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhs,mms,sss,mss)
if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == espec:
    linepick = line.rstrip()
if fechas == 0 or fechap == 0:
    spdif = 0
else:
    spdifpre = fechas - fechap
    spdif = spdifpre.seconds
pick.close()

# Entrar solo en la estacion que tenga lectura de la fase
if len(linepick) == 0:
    print 'La_estacion_'+sta+'_no_sera_utilizada, la_fase_'+espec
    +'_no_ha_sido_leida_para_esta_estacion\n'
else:
    yyyy = int(linepick.split()[6][0:4])
    mm = int(linepick.split()[6][4:6])
    dd = int(linepick.split()[6][6:8])
    hh = int(linepick.split()[7][0:2])
    mi = int(linepick.split()[7][2:4])
    se = int(float(linepick.split()[8]))
    mse = int(modf(float(linepick.split()[8]))[0]*10**6)
    fecha = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hh,mi,se,mse)
    listsac = sort(glob.glob('*'+sta+'*SAC'))
    listdeco = []
    for sacfile in listsac:
        stbrut = read(sacfile)
        stbrut2 = stbrut.copy()
        trbrut = stbrut2[0]
        trbrut.detrend()

        # ELIMINANDO trazas saturadas
        # Cambiar valores dependiendo el tipo de estaciones
        # Excepcion sobre PB11 que ocupa un Q330HR
        if sta == 'PB11':
            clip = 8*(10**6)
        else:
            clip = 4.6*(10**6)
        if int(opcion) == 2:
            if float(max(abs(trbrut.data))) >= clip:
                print '\nLa_estacion_'+sta+'_componente_'
                +sacfile.split('.')[3]+'_esta_saturada\n'
            else:
                print '\nLa_estacion_'+sta+'_componente_'
                +sacfile.split('.')[3]
                +'_NO_esta_saturada\n'
                listdeco.append(sacfile+'.deco')
        if int(opcion) == 1:
            listdeco.append(sacfile+'.deco')
    if len(listdeco) != 3:
        print '\nLa_estacion_'+sta+'_tiene_algunas_componentes'
        +saturadas_y_no_sera_utilizada\n'
    else:
        deco1 = listdeco[0]
        deco2 = listdeco[1]
        deco3 = listdeco[2]

```

```

st1 = read(deco1)
st1a = st1.copy()
tr1 = st1a[0]
st2 = read(deco2)
st2a = st2.copy()
tr2 = st2a[0]
st3 = read(deco3)
st3a = st3.copy()
tr3 = st3a[0]

# TRATAMIENTO CADA COMPONENTE
tr1.detrend()
tr2.detrend()
tr3.detrend()
tr1.filter('bandpass',freqmin=0.075,freqmax=3)
tr2.filter('bandpass',freqmin=0.075,freqmax=3)
tr3.filter('bandpass',freqmin=0.075,freqmax=3)
tr1.integrate()
trint1 = tr1.copy()
trint1.write(deco1+'.PDint',format='SAC')
tr2.integrate()
trint2 = tr2.copy()
trint2.write(deco2+'.PDint',format='SAC')
tr3.integrate()
trint3 = tr3.copy()
trint3.write(deco3+'.PDint',format='SAC')
tr1data = tr1.data
tr2data = tr2.data
tr3data = tr3.data
mini = min(len(tr1data),len(tr2data),len(tr3data))
modsuma = []
for i in range(0,mini):
    modsuma.append(sqrt(tr1data[i]**2 + tr2data[i]**2
        + tr3data[i]**2 ))
dt = tr1.stats.delta
npts = tr1.stats.npts

#TIEMPOS TRAZA SISMOGRAMA
time = []
j = 0
for i in range(0,mini):
    time.append(j)
    j = j + dt

#CAMBIAR variable deltaright si se estima necesario
if int(opcion2) == 0:
    deltaright = 0.5
elif int(opcion2) == 1:
    deltaright = 1
elif int(opcion2) == 2:
    deltaright = 2
elif int(opcion2) == 4:
    deltaright = 4

#TIEMPOS CORTE TRAZA PD
ti = UTCDateTime(fecha)
tf = UTCDateTime(fecha) + deltaright

#CORTAR
tr1.trim(ti,tf)
tr2.trim(ti,tf)
tr3.trim(ti,tf)

#DATOS TRAZAS CORTADAS
tr1datacut = tr1.data
tr2datacut = tr2.data
tr3datacut = tr3.data

#DATOS MODULO SUMA VECTORIAL
mini2 = min(len(tr1datacut),len(tr2datacut),
len(tr3datacut))

```

```

modsuma2 = []
for i in range(0,mini2):
    modsuma2.append(sqrt(tr1datacut[i]**2 +
        tr2datacut[i]**2 + tr3datacut[i]**2))
pd = max(modsuma2)*(dist/1)
logpd = log10(pd)
logPDlist.append(logpd)
if diste < 100:
    logPDlistbajo.append(logpd)
print >> fileout, str(mw) + '_' + str(dist) + '_' +
str(pd) + '_' + str(logpd)

suma = 0
for elem in logPDlist:
    suma = suma + elem
if suma != 0:
    logPDprom = suma/len(logPDlist)
    desvest = numpy.std(logPDlist)
    if len(logPDlistbajo) > 0:
        suma2 = 0
        for elem in logPDlistbajo:
            suma2 = suma2 + elem
        logPDprombajo = suma2/len(logPDlistbajo)
        desvestbajo = numpy.std(logPDlistbajo)
    else:
        logPDprombajo = ''
        desvestbajo = ''
print >> fileout, 'label-Mw-prof-logPDprom-std-logPDprom(<100)-std'
print >> fileout, 'FINAL_' + str(mw) + '_' + str(prof) + '_' + str(logPDprom) + '_' +
str(desvest) + '_' + str(logPDprombajo) + '_' + str(desvestbajo)

else:
    print '\nEste_evento_tiene_todas_sus_trazas_saturadas\n'

# Usar funcion PD en un arreglo de directorios del tipo yymdd_hhmm
catalogo= raw_input('Nombre_del_catalogo_con_TODAS_las_magnitudes_[catalogo.dat]:\n')
catalogo = catalogo or 'catalogo.dat'

opcion2=raw_input("Elige_opcion._Ventana_0.5_seg_[0],_1_seg_[1],_2_seg_[2]_o_4_seg_[4]:\n")

opcion=raw_input("Elige_opcion._Espectro_onda_P_[1]_o_espectro_onda_S_[2]:\n")
if int(opcion) == 1:
    espec = 'P'
elif int(opcion) == 2:
    espec = 'S'
path=os.getcwd()+ '/'
listadir = sorted(glob.glob('?????_????/'))
i=0
cat = open(catalogo,'r')
for catline in cat:
    dire = listadir[i]
    print '-----'
    print '\n----Calculando_PD_para_evento_correspondiente_al_directorio:_' + dire + '----\n'
    prof = float(catline.split()[8])
    magloc = float(catline.split()[9])
    mw = float(catline.split()[12])
    namedir = dire.split('/')[0]
    pathdir=path+namedir
    PD(opcion2,opcion,pathdir,prof,magloc,mw)
    i = i + 1

```

A.6. Programa CALCIV2.py

```
#!/usr/bin/env python

from pylab import *
from obspy.core import read
from matplotlib.font_manager import FontProperties
import re,os,time,datetime,glob,subprocess,numpy,commands,scipy
from obspy import UTCDateTime

# Funcion iv2
def iv2(opcion2,opcion,opcion3,opcion4,pathdir,prof,magloc,mw):
    os.chdir(pathdir)
    namedir = pathdir.split('/')[-1]
    namepickfile = namedir+'.pick'
    norepsta = [] #lista nombres estaciones no repetidos
    for deco in sort(glob.glob('*deco')):
        st = read(deco)
        st2 = st.copy()
        tr = st2[0]
        name= tr.stats.station[0:4]
        if name == 'MAMI':
            name = 'MAM1'
        if name == 'SOGA':
            name = 'SOG1'
        if name == 'HMBC':
            name = 'HMBCX'
        if name == 'MNNC':
            name = 'MNNCX'
        if name == 'PATC':
            name = 'PATCX'
        if name == 'PSGC':
            name = 'PSGCX'
        if name not in norepsta:
            norepsta.append(name)

    #CAMBIAR valores de acuerdo a la zona y profundidad del sismo
    #SI unitsi
    #Ocupando modelo de velocidades
    #vs = 0
    #rho = 0
    print 'Evento_de_magnitud_local_'+str(magloc)+'_y_profundidad_'+str(prof)
    mwlist = []
    logIV2list = []
    logIV2listbajo = []
    fileout = open('IV2.dat','w')
    print >> fileout, namedir
    print >> fileout, 'Mw_sta_dist_IV2-E_IV2-N_IV2-Z_IV2prom_log(IV2prom)'

    # Loop sobre cada estacion
    for sta in norepsta:
        print '-----'
        print '\nTrabajando en la estacion_'+sta+'\n'
        listdeco = sort(glob.glob('*'+sta+'*deco'))
        namedecofile = listdeco[0]
        st = read(namedecofile)
        tr = st[0]
        sachdr = tr.stats.sac
        diste = float(sachdr.dist)
        dist = math.sqrt(diste**2 + (float(prof))**2)
        dis = '%.1f' % (dist)
        print 'Distancia_hipocentral:_'+str(dis)
        linepick = ''
        pick = open(namepickfile,'r')
        fechas = 0
        fechap = 0
        for line in pick:
            if len(line) > 10:
                if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'P':
                    yyyy = int(line.split()[6][0:4])
```

```

        mm = int(line.split()[6][4:6])
        dd = int(line.split()[6][6:8])
        hhp = int(line.split()[7][0:2])
        mmp = int(line.split()[7][2:4])
        ssp = int(float(line.split()[8]))
        msp = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
        fechap = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhp,mmp,ssp,msp)
if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'S':
        yyyy = int(line.split()[6][0:4])
        mm = int(line.split()[6][4:6])
        dd = int(line.split()[6][6:8])
        hhs = int(line.split()[7][0:2])
        mms = int(line.split()[7][2:4])
        sss = int(float(line.split()[8]))
        mss = int(modf(float(line.split()[8]))[0]*10**6)
        fechas = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hhs,mms,sss,mss)
if espec == 'ALL':
        if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == 'P':
            linepick = line.rstrip()
else:
        if line.split()[0] == sta and line.split()[4] == espec:
            linepick = line.rstrip()
if fechas == 0 or fechap == 0:
        spdif = 0
else:
        spdifpre = fechas - fechap
        spdif = spdifpre.seconds
pick.close()

# Entrar solo en la estacion que tenga lectura de la fase
if len(linepick) == 0:
    if espec == 'ALL':
        print 'La_estacion_' + sta + '_no_será_utilizada, la_fase_P_'
        'no_ha_sido_leída_para_esta_estacion\n'
else:
        print 'La_estacion_' + sta + '_no_será_utilizada, la_fase_' +
        espec + '_no_ha_sido_leída_para_esta_estacion\n'
else:
    yyyy = int(linepick.split()[6][0:4])
    mm = int(linepick.split()[6][4:6])
    dd = int(linepick.split()[6][6:8])
    hh = int(linepick.split()[7][0:2])
    mi = int(linepick.split()[7][2:4])
    se = int(float(linepick.split()[8]))
    mse = int(modf(float(linepick.split()[8]))[0]*10**6)
    fecha = datetime.datetime(yyyy,mm,dd,hh,mi,se,mse)
    listsac = sort(glob.glob('*'+sta+'*SAC'))
    listdeco = []
    for sacfile in listsac:
        stbrut = read(sacfile)
        stbrut2 = stbrut.copy()
        trbrut = stbrut2[0]
        trbrut.detrend()

        # ELIMINANDO trazas saturadas
        # Cambiar valores dependiendo el tipo de estaciones
        # Excepcion sobre PB11 que ocupa un Q330HR
        if sta == 'PB11':
            clip = 8*(10**6)
        else:
            clip = 4.6*(10**6)
        if int(opcion2) == 1 or int(opcion2) == 2:
            if int(opcion) == 2:
                if float(max(abs(trbrut.data))) >= clip:
                    print '\nLa_estacion_' + sta
                    '+' componente' +
                    sacfile.split('.')[3]
                    + '_esta_saturada\n'
                else:
                    print '\nLa_estacion_' + sta

```

```

        +'_componente_'
        +sacfile.split('.')[3]
        +'_no_esta_saturada\n'
        listdeco.append(sacfile+'.deco')
    if int(opcion) == 1:
        listdeco.append(sacfile+'.deco')
elif int(opcion2) == 3:
    if float(max(abs(trbrut.data))) >= clip:
        print '\nLa_estacion_' + sta + '_componente_'
        + sacfile.split('.')[3] + '_esta_saturada\n'
    else:
        listdeco.append(sacfile+'.deco')

IV2list = []
if len(listdeco) != 3:
    print '\nLa_estacion_' + sta + '_tiene_algunas_componentes'
    + 'saturadas_y_no_sera_utilizada\n'
else:
    fig1 = figure(1)
    fig2 = figure(2)
    fig3 = figure(3)
    for deco in listdeco:
        st = read(deco)
        st2 = st.copy()
        st3 = st.copy()
        trini = st3[0]
        tr = st2[0]

        #TRATAMIENTO TRAZA A CALCULAR IV2
        tr.detrend()
        if int(opcion3) == 1:
            tr.filter('bandpass', freqmin=0.2,
                    freqmax=20)
        t0 = tr.stats.starttime

        # CAMBIAR variable deltaright si es necesario
        if int(opcion2) == 1:
            if spdif == 0:
                spdif = 4
                print 'La_fase_P_o_S_no_fue_leida'
                + 'para_la_estacion_'
                + sta + '_SPDIF_=4.\n'
            if int(opcion) == 1:
                deltaright = spdif - 1
            elif int(opcion) == 2:
                deltaright = 20
        elif int(opcion2) == 2:
            if int(opcion4) == 0:
                deltaright = 0.5
            if int(opcion4) == 2:
                deltaright = 2
            if int(opcion4) == 4:
                deltaright = 4
            if int(opcion4) == 8:
                deltaright = 8

        #TIEMPOS CORTE TRAZA IV2
        if int(opcion2) == 1 or int(opcion2) == 2:
            ti = UTCDateTime(fecha)
            tf = UTCDateTime(fecha) + deltaright
        elif int(opcion2) == 3:
            ti = UTCDateTime(fecha) - 3
            tf = UTCDateTime(fecha) + 100

        #TIEMPOS TRAZA SISMOGRAMA
        tisis = UTCDateTime(fechap) - 3
        tfsis = UTCDateTime(fechap) + spdif + 25

        #CORTAR
        tr.trim(ti,tf)
        trini.trim(tisis,tfsis)

```

```

#DATOS TRAZAS CORTADAS
trinidata = trini.data*(dist/1)
trdata = tr.data*(dist/1)

#VELOCIDADES AL CUADRADO
v2 = [x**2 for x in trdata]
v2sis = [x**2 for x in trinidata]
npts = tr.stats.npts
dt = tr.stats.delta
time = []
j = 0
for i in range(0, npts):
    time.append(j)
    j = j + dt
nptssis = trini.stats.npts
timesis = []
k = 0
for l in range(0, nptssis):
    timesis.append(k)
    k = k + dt

#CALCULO IV2 Y NORMALIZACION (cambiar aqui si
# es necesario)
Iv2 = scipy.integrate.trapz(v2,time)
IV2list.append(Iv2)
tp = UTCDateTime(fechap)-tisis
ts = UTCDateTime(fechas)-tisis

suma = 0
for elem in IV2list:
    suma = suma + elem
IV2prom = suma/len(IV2list)
logIV2list.append(log10(IV2prom))
if diste < 100:
    logIV2listbajo.append(log10(IV2prom))
print >> fileout, str(mw) + '_' + sta + '_' + str(dist) + '_'
+str(IV2list[0]) + '_' + str(IV2list[1]) + '_' + str(IV2list[2]) +
'_' + str(IV2prom) + '_' + str(log10(IV2prom))

suma = 0
for elem in logIV2list:
    suma = suma + elem
if suma != 0:
    logIV2prom = suma/len(logIV2list)
    desvest = numpy.std(logIV2list)

    if len(logIV2listbajo) > 0:
        suma2 = 0
        for elem in logIV2listbajo:
            suma2 = suma2 + elem
        logIV2prombajo = suma2/len(logIV2listbajo)
        desvestbajo = numpy.std(logIV2listbajo)
    else:
        logIV2prombajo = ''
        desvestbajo = ''
    print >> fileout, 'label-Mw-prof-logIV2prom-std-logIV2prom(<100)-std'
    print >> fileout, 'FINAL_' + str(mw) + '_' + str(profile) + '_' + str(logIV2prom) + '_'
+str(desvest) + '_' + str(logIV2prombajo) + '_' + str(desvestbajo)

else:
    print '\nEste_evento_tiene_todas_sus_trazas_saturadas\n'

#Usar funcion iv2 en un arreglo de directorios del tipo yymmdd_hhmm
catalogo= raw_input('Nombre_del_catalogo_con_TODAS_las_magnitudes_[catalogo.dat]:\n')
catalogo = catalogo or 'catalogo.dat'

opcion2=raw_input("Elige_opcion._Fase_completa_[1],_fase_parcial_[2]_o_registro_completo_[3]:\n")
opcion3=raw_input("Elige_opcion._Filtrar_[1]_o_no_filtrar_[2]:\n")

if int(opcion2) == 1 or int(opcion2) == 2:
    opcion4 = raw_input("Elige_ventana:_0.5_s_[0],_2_s_[2],_4_s_[4]_u_8_s_[8]:\n")

opcion=raw_input("Elige_opcion._Espectro_onda_P_[1]_o_espectro_onda_S_[2]:\n")

```



```

        if int(opcion) == 1:
            espec = 'P'
        elif int(opcion) == 2:
            espec = 'S'
elif int(opcion2) == 3:
    opcion = 0
    espec = 'ALL'
path=os.getcwd()+ '/'
listadir = sort(glob.glob('?????_????/'))
i=0
cat = open(catalogo,'r')
for catline in cat:
    dire = listadir[i]
    print '-----'
    print '\n-----Calculando_IV2_para_evento_correspondiente_al_directorio:_'+dire+'-----\n'
    prof = float(catline.split()[8])
    magloc = float(catline.split()[9])
    mw = float(catline.split()[12])
    namedir = dire.split('/')[0]
    pathdir=path+namedir
    iv2(opcion2,opcion,opcion3,opcion4,pathdir,prof,magloc,mw)
    i = i + 1

```

Apéndice B

Catálogo base de datos principal

Tiempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz	RMS
2011/01/01 05:56:3.3	-22.488	-68.949	162.925	3.53	4.1	3.9	4.0	-	-	-	12.2931	20.437	0.271191
2011/01/06 01:43:12.5	-20.4827	-70.2195	39.8147	4.61	4.4	4.4	4.4	0.00	35.00	90.00	1.91749	2.35156	0.224268
2011/01/10 02:43:16.7	-22.281	-70.5708	21.002	3.94	4.0	4.2	4.1	-	-	-	7.8817	11.2535	0.209612
2011/01/10 09:54:33.7	-19.1021	-69.4426	100.542	4.56	4.6	4.6	4.6	-	-	-	2.95756	2.6499	0.105086
2011/01/11 13:49:40.1	-22.3734	-69.2477	133.511	3.85	3.9	3.9	3.9	215.00	40.00	-90.00	27.2941	15.1759	0.163443
2011/01/18 15:00:19.3	-20.5243	-68.1161	189.888	3.99	4.0	4.1	4.0	180.00	35.00	-90.00	5.35081	6.82483	0.218229
2011/01/18 19:24:14.8	-21.3763	-68.7989	137.433	3.80	4.0	3.9	4.0	-	-	-	4.80915	6.97568	0.220167
2011/01/18 21:30:47.2	-19.1348	-69.6757	121.868	5.38	6.1	5.5	5.8	-	-	-	4.20932	4.13506	0.197951
2011/01/19 01:06:58.1	-20.6601	-69.2997	113.289	4.40	4.2	4.2	4.2	185.00	10.00	-90.00	2.20508	2.64297	0.175077
2011/01/19 05:24:57.0	-22.6943	-68.944	121.745	3.68	4.1	4.2	4.2	-	-	-	8.0659	9.9062	0.286333
2011/01/19 21:13:43.0	-22.4537	-67.7523	222.979	3.07	3.8	3.4	3.6	-	-	-	9.70324	14.2701	0.300306
2011/01/20 11:02:53.7	-19.6282	-69.2307	107.896	4.51	4.7	4.6	4.7	307.18	38.29	47.00	2.59617	2.91153	0.164394
2011/01/20 15:27:40.4	-21.7368	-68.5235	147.482	3.70	3.8	3.9	3.8	0.00	45.00	90.00	4.52397	6.27948	0.248416
2011/01/21 12:02:40.5	-21.3224	-68.7306	125.912	4.35	4.7	4.3	4.5	-	-	-	4.32346	5.42243	0.233998
2011/01/23 16:02:42.9	-19.965	-70.5535	22.3501	4.58	4.9	4.6	4.8	0.00	20.00	90.00	2.17509	7.86696	0.263211
2011/01/25 14:03:39.9	-22.5097	-67.8815	230.577	3.75	4.3	3.9	4.1	-	-	-	8.25095	9.89249	0.286181
2011/01/28 22:19:56.0	-22.6123	-68.7503	196.506	3.90	4.3	4.1	4.2	-	-	-	16.8637	18.8013	0.204803
2011/02/01 07:30:46.3	-19.2145	-69.5109	101.768	3.83	4.2	4.0	4.1	-	-	-	3.17035	2.85528	0.194072
2011/02/01 20:13:37.3	-20.5444	-68.995	103.729	4.38	4.3	4.3	4.3	-	-	-	2.18685	2.44885	0.165486
2011/02/01 23:38:46.6	-20.7078	-69.143	114.269	4.30	4.3	4.2	4.2	-	-	-	2.35375	2.23353	0.162708
2011/02/03 12:59:55.8	-20.3682	-69.1947	95.2725	4.74	4.6	4.6	4.6	180.00	40.00	-90.00	2.08703	2.39923	0.176112
2011/02/10 12:45:50.5	-21.3414	-68.765	120.642	4.24	4.5	4.5	4.5	-	-	-	3.57499	4.53685	0.194657
2011/02/14 21:56:44.9	-20.0015	-69.2411	107.651	5.54	5.4	5.3	5.3	-	-	-	2.2223	2.3441	0.161178
2011/02/15 10:05:40.9	-22.1756	-69.0476	134.981	3.09	3.8	3.6	3.7	-	-	-	14.3776	8.28646	0.264892
2011/02/15 22:36:57.3	-22.3031	-67.7629	233.519	3.30	4.0	3.7	3.9	-	-	-	11.6626	10.5084	0.27608
2011/02/16 08:16:44.6	-20.1978	-69.0518	107.896	2.81	3.4	3.2	3.3	-	-	-	2.52218	3.11339	0.190623
2011/02/16 09:37:6.5	-21.2047	-68.0204	205.575	3.88	4.5	4.1	4.3	-	-	-	7.07236	9.43473	0.182133
2011/02/16 13:51:23.9	-22.782	-69.2785	125.912	3.88	3.8	4.2	4.0	-	-	-	14.2475	11.4262	0.25431
2011/02/16 22:30:14.4	-20.1632	-69.2245	103.729	4.13	4.2	4.1	4.2	-	-	-	2.08269	2.50318	0.157938
2011/02/18 14:28:50.3	-19.9132	-69.1927	105.445	4.13	4.1	4.1	4.1	351.75	43.96	-22.18	2.41729	2.61997	0.186184
2011/02/19 07:22:24.4	-21.8908	-68.8672	144.541	4.45	4.6	4.5	4.5	-	-	-	7.70209	12.307	0.280504
2011/02/19 17:25:35.7	-21.372	-68.93	119.907	3.82	4.0	4.1	4.0	-	-	-	3.99464	4.63047	0.196253
2011/02/27 11:45:59.7	-20.2522	-68.9944	109.612	4.56	4.6	4.6	4.6	340.00	50.00	-90.00	2.57072	3.45214	0.18204
2011/02/28 20:45:42.1	-20.4586	-69.2254	108.876	5.48	5.6	5.3	5.4	-	-	-	2.06766	2.41339	0.188442
2011/03/05 09:38:50.2	-20.2293	-69.2791	103.239	5.03	5.3	5.1	5.2	340.00	80.00	-90.00	2.08107	2.53719	0.168646
2011/03/05 14:37:29.5	-21.6972	-69.6545	46.6167	3.99	4.1	4.0	4.0	40.00	50.00	90.00	3.75381	6.5016	0.297506
2011/03/09 19:47:45.0	-21.9231	-68.6792	137.433	3.98	4.2	4.2	4.2	-	-	-	4.80613	4.947	0.285058
2011/03/19 08:34:59.6	-22.1342	-68.7456	131.55	4.95	5.0	5.1	5.0	-	-	-	5.08806	6.9803	0.285747
2011/03/19 09:12:41.2	-20.1808	-69.2334	102.258	5.02	5.2	4.9	5.1	320.00	75.00	-90.00	1.96568	2.54724	0.152384
2011/03/23 02:57:37.5	-20.209	-70.7969	14.9966	4.01	4.5	4.3	4.4	-	-	-	3.39496	6.65389	0.212601
2011/03/27 11:54:28.5	-21.1608	-70.4323	58.1372	4.39	4.5	4.5	4.5	165.00	50.00	90.00	2.56802	1.95451	0.170053
2011/03/29 11:49:35.3	-20.0932	-69.9641	60.1594	4.89	4.7	4.7	4.7	356.27	46.03	-54.04	1.27286	1.94442	0.146878
2011/03/31 21:28:56.8	-20.0483	-68.8201	126.28	3.94	4.3	4.2	4.2	-	-	-	2.19823	2.96801	0.16876
2011/04/01 14:50:54.5	-21.5461	-68.4844	144.173	4.73	4.9	4.7	4.8	-	-	-	4.16432	4.72695	0.196875
2011/04/02 10:59:38.9	-19.6125	-69.4023	105.935	5.77	6.0	5.9	6.0	249.16	40.26	-5.93	2.86146	3.31183	0.167134

Tiempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz	RMS
2011/04/02 14:43:9.2	-22.606	-70.8191	5.55957	3.83	3.7	4.0	3.9	-	-	-	10.0567	7.64374	0.183333
2011/04/05 04:18:48.4	-19.5902	-69.3972	108.386	4.31	4.4	4.5	4.5	325.00	60.00	-90.00	4.19812	3.18944	0.170396
2011/04/05 10:52:15.3	-21.5369	-68.4959	155.449	3.76	4.0	4.0	4.0	-	-	-	4.23385	5.503	0.175883
2011/04/08 22:09:19.4	-21.1017	-68.0875	191.849	4.07	4.5	4.2	4.3	-	-	-	5.21561	6.85758	0.189535
2011/04/09 05:31:36.3	-22.3149	-67.9597	229.106	3.52	3.8	3.8	3.8	-	-	-	6.11138	8.17261	0.204693
2011/04/09 11:59:29.7	-20.4621	-69.5178	91.657	4.57	4.6	4.5	4.5	266.69	58.68	-16.48	1.64015	2.24047	0.154963
2011/04/12 21:57:15.1	-22.746	-69.8554	102.136	4.02	4.0	4.5	4.2	-	-	-	9.64017	15.9745	0.186722
2011/04/13 13:05:37.0	-21.734	-68.6048	141.845	3.74	4.1	4.0	4.0	-	-	-	5.69299	5.81518	0.281044
2011/04/14 23:12:42.7	-20.4289	-69.1737	100.052	3.81	3.9	3.8	3.8	-	-	-	1.90695	2.41648	0.167762
2011/04/16 00:25:15.4	-21.3716	-69.0599	120.642	4.50	4.6	4.6	4.6	-	-	-	4.7923	5.39598	0.204014
2011/04/20 12:46:58.3	-22.6131	-69.3297	128.118	3.75	3.9	4.1	4.0	172.24	80.34	74.78	11.124	13.1498	0.201951
2011/04/20 21:55:45.2	-21.1221	-68.5195	147.237	3.68	3.8	3.9	3.8	-	-	-	5.54888	7.08768	0.275757
2011/04/27 16:14:0.7	-20.3626	-68.7795	122.235	4.32	4.5	4.5	4.5	-	-	-	3.37251	3.58892	0.220991
2011/05/01 21:53:20.4	-20.921	-68.2864	177.387	3.58	3.8	0.0	3.8	-	-	-	16.9296	22.5615	0.061051
2011/05/06 23:30:33.9	-22.1088	-68.6061	135.472	4.23	4.5	4.5	4.5	-	-	-	5.44345	5.28958	0.275878
2011/05/07 15:29:12.8	-21.6633	-68.6388	174.936	2.77	3.5	0.0	3.5	-	-	-	32.1885	34.6424	0.120225
2011/05/11 02:30:4.0	-20.2125	-68.7767	127.015	4.80	5.1	4.8	4.9	-	-	-	2.69706	3.35891	0.168874
2011/05/16 10:58:30.3	-22.5119	-68.5953	136.452	4.01	4.1	4.2	4.2	-	-	-	10.1861	13.1957	0.285085
2011/05/19 23:01:34.8	-22.6395	-69.0593	144.786	4.17	4.3	4.3	4.3	358.02	15.79	-71.32	7.63856	3.39054	0.29021
2011/05/20 21:57:2.9	-21.2578	-68.5807	122.358	3.67	4.0	4.0	4.0	344.29	37.70	-64.96	3.4806	4.08538	0.176554
2011/05/21 23:45:16.3	-19.8539	-69.1605	114.269	5.12	5.2	5.1	5.2	325.00	80.00	-90.00	2.93051	3.44143	0.206945
2011/05/23 09:29:51.3	-22.5457	-68.6153	173.955	3.65	4.0	4.0	4.0	-	-	-	15.2475	12.7406	0.288824
2011/05/24 09:35:29.9	-21.186	-68.672	136.452	4.04	4.4	4.3	4.3	-	-	-	4.92179	4.80227	0.251801
2011/05/27 18:57:12.6	-21.1439	-69.0352	114.024	4.15	4.1	4.1	4.1	-	-	-	2.74539	2.70074	0.169728
2011/05/31 21:12:22.3	-22.6941	-70.4646	24.1885	3.77	3.9	4.2	4.0	-	-	-	29.1869	17.9178	0.0822917
2011/06/01 00:14:37.3	-21.7558	-68.76	124.809	4.38	4.5	4.6	4.5	-	-	-	5.47387	4.7944	0.242547
2011/06/02 19:34:31.8	-22.3357	-69.1898	129.834	3.68	4.1	4.0	4.0	-	-	-	7.56841	5.14018	0.181194
2011/06/08 03:55:55.3	-21.523	-68.5463	163.415	4.63	4.9	4.7	4.8	-	-	-	6.06156	6.38926	0.232505
2011/06/12 23:24:49.0	-21.2149	-70.4428	46.6167	4.70	4.6	4.6	4.6	-	-	-	2.71803	4.1915	0.219922
2011/06/14 06:10:14.9	-21.4337	-68.9558	98.7041	3.79	3.9	4.0	4.0	-	-	-	3.62894	3.92673	0.217192
2011/06/15 14:01:32.2	-22.616	-69.1511	92.3311	3.30	3.7	3.9	3.8	-	-	-	5.14625	5.71762	0.235501
2011/06/15 19:32:53.0	-19.9224	-69.1757	103.239	5.01	5.1	4.9	5.0	180.00	40.00	-90.00	2.36921	2.63806	0.203886
2011/06/18 12:27:58.5	-22.0376	-68.8276	140.374	4.21	4.4	4.5	4.5	30.00	45.00	90.00	5.91961	4.13177	0.214147
2011/06/18 16:16:19.6	-19.2484	-69.6364	88.7769	3.85	4.0	3.9	4.0	-	-	-	3.58563	3.65276	0.231631
2011/06/18 21:18:41.5	-19.5599	-69.3085	119.417	4.37	4.3	4.3	4.3	180.15	22.27	-62.73	3.15843	3.19959	0.192907
2011/06/20 16:35:59.3	-21.9948	-68.7605	138.903	6.25	6.5	6.5	6.5	-	-	-	5.00325	5.56036	0.239672
2011/06/20 20:33:51.3	-21.9137	-68.6832	147.728	3.88	4.3	4.1	4.2	-	-	-	4.26903	5.10679	0.239525
2011/06/20 23:24:50.3	-22.0219	-68.6955	142.335	3.89	4.2	4.2	4.2	-	-	-	5.91318	6.91608	0.2476
2011/06/24 22:13:57.2	-22.2254	-70.3082	41.8369	3.63	3.7	3.9	3.8	-	-	-	15.019	6.56844	0.170847
2011/06/27 00:56:38.8	-22.4139	-68.1008	236.46	4.57	4.8	4.5	4.7	-	-	-	10.0896	8.41804	0.293582
2011/07/03 02:19:53.8	-20.225	-69.3016	116.475	4.16	4.0	4.0	4.0	180.00	20.00	-90.00	2.08964	2.35053	0.160601
2011/07/03 08:38:0.9	-21.9026	-68.8291	143.561	3.75	4.2	3.9	4.0	-	-	-	5.89459	4.88761	0.252032
2011/07/05 10:30:17.7	-19.6098	-68.6346	162.925	4.63	5.0	4.8	4.9	-	-	-	4.21916	4.288	0.20955
2011/07/05 20:17:1.8	-21.9951	-68.7719	147.237	3.84	4.1	4.2	4.2	-	-	-	6.33817	5.05546	0.219364
2011/07/08 01:22:38.6	-20.3806	-68.9876	105.2	4.14	4.2	4.1	4.2	-	-	-	2.99934	3.18084	0.234878
2011/07/08 21:22:3.8	-21.2132	-68.0992	188.417	3.43	3.8	3.7	3.8	-	-	-	4.65369	5.72325	0.17128
2011/07/11 21:04:23.0	-19.446	-69.4151	104.955	4.00	4.1	4.0	4.0	-	-	-	2.89947	2.36841	0.19111
2011/07/12 06:24:34.3	-21.999	-69.8548	60.5884	4.04	3.9	4.2	4.0	-	-	-	3.66037	3.04479	0.221249
2011/07/13 03:17:23.8	-21.5282	-68.5669	181.799	3.24	4.2	3.3	3.8	-	-	-	20.1741	26.7031	0.0846908
2011/07/13 09:50:22.1	-20.0386	-70.5992	39.0181	4.28	4.6	4.4	4.5	-	-	-	2.16568	3.33325	0.190369
2011/07/13 15:02:0.2	-19.8207	-69.1706	102.994	4.02	3.9	4.0	4.0	180.87	27.99	-43.22	2.65091	3.0828	0.199266
2011/07/15 14:55:31.3	-21.2834	-68.6573	125.544	5.37	5.4	5.4	5.4	180.00	35.00	-90.00	3.65276	4.26502	0.239832
2011/07/19 23:31:24.4	-21.1877	-68.7106	144.664	3.86	4.1	4.1	4.1	-	-	-	5.16908	4.14938	0.196116
2011/07/23 22:45:21.2	-20.1635	-70.6965	20.8794	4.92	5.1	4.9	5.0	-	-	-	2.06457	9.03277	0.166024
2011/07/24 01:54:19.9	-20.1766	-70.73	14.9966	4.71	4.9	4.7	4.8	-	-	-	2.78477	9.62654	0.19191
2011/07/27 03:27:46.4	-21.6214	-68.8229	134.981	4.45	4.8	4.4	4.6	-	-	-	4.6746	4.70104	0.243842
2011/07/28 13:22:26.6	-20.3715	-69.0066	103.729	4.90	4.9	4.8	4.8	-	-	-	2.41114	2.77037	0.218075
2011/07/29 00:13:21.1	-19.4735	-69.3969	110.47	4.45	4.4	4.4	4.4	179.89	7.07	-44.89	3.31269	2.58476	0.199776
2011/07/31 13:14:43.6	-22.5843	-68.8479	151.159	3.78	4.2	4.1	4.2	-	-	-	8.46898	9.44223	0.275697
2011/08/03 16:06:7.8	-21.2997	-67.8933	223.224	3.60	3.9	3.9	3.9	-	-	-	7.17671	6.71672	0.171393
2011/08/06 05:12:12.7	-22.5271	-68.8494	100.665	3.72	4.0	4.2	4.1	-	-	-	5.79726	6.54366	0.274586
2011/08/06 18:08:1.2	-20.5031	-68.996	107.161	4.68	4.7	4.6	4.7	-	-	-	3.09253	3.45892	0.197629
2011/08/09 15:35:59.2	-21.8437	-68.5782	152.752	3.81	4.0	4.1	4.0	-	-	-	6.0076	5.1864	0.23924
2011/08/10 22:59:25.9	-20.1759	-68.7758	132.163	4.52	4.8	4.6	4.7	-	-	-	2.74738	3.40389	0.181009
2011/08/13 23:21:31.5	-21.3057	-69.8937	49.0679	4.17	4.2	4.2	4.2	175.00	40.00	90.00	2.7371	3.82718	0.238712
2011/08/17 12:28:32.8	-21.4895	-68.6075	148.218	3.60	3.9	4.0	4.0	-	-	-	4.13108	4.81379	0.199443
2011/08/17 16:37:22.8	-22.1569	-68.9117	138.413	3.77	4.3	3.9	4.1	-	-	-	10.0351	7.52094	0.228801
2011/08/22 09:46:27.5	-21.5724	-68.7987	121.623	4.00	4.4	4.3	4.3	-	-	-	5.88907	4.18823	0.220425
2011/08/24 14:27:58.4	-19.6624	-69.1927	106.916	3.73	3.9	3.9	3.9	325.00	70.00	-90.00	3.50987	3.21383	0.236073
2011/08/25 11:09:36.6	-20.0233	-69.1399	101.278	4.05	4.1	4.0	4.0	-	-	-	2.15542	2.48864	0.177205

Tiempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
	yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz
2011/08/26 18:56:36.9	-21.3071	-68.618	140.619	3.64	3.9	3.8	3.8	-	-	-	4.30347	4.53803	0.284211
2011/08/29 12:48:27.2	-19.1895	-70.1238	54.2153	4.06	3.9	4.0	4.0	-	-	-	3.47702	5.11387	0.214708
2011/08/31 08:06:2.5	-21.9266	-68.6942	131.55	3.98	4.5	4.2	4.3	-	-	-	4.87528	5.77888	0.26189
2011/09/02 02:09:48.5	-19.1713	-68.0576	224.939	2.92	3.4	0.0	3.4	-	-	-	17.2019	23.2231	0.194318
2011/09/02 21:23:49.4	-21.3624	-68.642	122.113	3.57	4.0	3.9	4.0	-	-	-	3.65375	4.04938	0.204717
2011/09/05 08:32:44.6	-21.0132	-68.7921	110.837	4.21	4.3	4.4	4.3	186.93	55.61	-77.85	2.70305	2.77306	0.188368
2011/09/09 02:33:52.2	-22.4995	-69.2031	139.394	5.35	5.4	5.6	5.5	-	-	-	10.8454	9.28658	0.284098
2011/09/09 16:32:10.4	-21.2775	-68.7864	129.589	4.50	4.7	4.6	4.7	-	-	-	5.6124	3.96717	0.232528
2011/09/11 01:06:42.6	-22.8367	-69.0775	88.8994	3.55	3.9	4.1	4.0	-	-	-	7.4707	11.4836	0.0967581
2011/09/14 08:56:26.9	-21.1668	-68.6979	129.221	4.04	4.1	4.1	4.1	179.42	24.81	-51.92	3.59945	4.95613	0.219753
2011/09/15 06:02:11.1	-20.6857	-68.8472	111.328	4.03	4.0	4.1	4.0	157.18	90.00	80.00	2.50028	2.55716	0.20144
2011/09/16 14:25:2.2	-21.0934	-68.3849	166.356	3.75	4.4	3.8	4.1	-	-	-	5.92462	8.75491	0.181252
2011/09/23 15:01:32.1	-21.129	-68.509	156.184	3.82	4.1	3.9	4.0	-	-	-	4.02848	4.09173	0.187359
2011/09/24 22:54:51.5	-21.1727	-68.679	136.33	4.12	4.4	4.2	4.3	-	-	-	4.24335	4.29846	0.214401
2011/09/30 18:44:46.1	-19.2115	-69.4348	96.1304	3.90	3.9	3.9	3.9	-	-	-	3.1303	2.38098	0.180963
2011/10/01 01:15:25.8	-19.6018	-70.7183	20.144	3.90	4.3	4.2	4.2	325.57	33.23	61.81	2.9774	13.173	0.237204
2011/10/03 05:17:6.8	-19.6014	-70.7564	32.0322	4.58	4.8	4.6	4.7	145.00	85.00	90.00	2.68246	17.752	0.180148
2011/10/04 01:34:14.9	-21.5293	-69.7063	28.2942	3.89	4.0	3.8	3.9	125.00	50.00	90.00	1.9057	3.20774	0.195169
2011/10/04 08:57:52.3	-20.85	-70.9096	28.2329	4.67	4.8	4.5	4.7	220.00	5.00	-90.00	5.13172	11.5013	0.271348
2011/10/05 17:16:54.4	-20.9763	-68.3703	162.067	3.76	4.1	3.9	4.0	-	-	-	3.8341	5.00808	0.284511
2011/10/06 14:56:34.7	-19.6677	-69.2624	107.528	5.03	5.2	5.1	5.2	-	-	-	3.20199	4.40251	0.256061
2011/10/09 00:50:45.6	-20.9932	-70.3003	59.9756	4.60	4.5	4.5	4.5	185.00	20.00	-90.00	2.19879	2.03147	0.170346
2011/10/15 01:59:9.2	-20.7945	-68.5349	141.967	4.61	4.8	4.7	4.8	-	-	-	4.0019	3.62353	0.177662
2011/10/19 15:26:14.0	-20.9979	-68.008	201.653	3.54	3.8	3.7	3.8	-	-	-	6.80391	6.87358	0.26242
2011/10/21 08:25:9.1	-19.671	-69.308	103.729	4.81	4.8	4.7	4.8	325.00	60.00	-90.00	3.06309	4.09303	0.244989
2011/10/21 14:46:49.3	-22.6208	-68.5012	120.274	3.41	3.8	4.0	3.9	-	-	-	7.74686	8.86293	0.246858
2011/10/22 11:02:55.8	-20.1323	-68.8142	123.093	5.04	5.4	5.2	5.3	-	-	-	2.78104	3.99464	0.212236
2011/11/03 12:42:56.7	-20.6286	-70.5086	37.1184	3.94	3.9	3.9	3.9	-	-	-	1.79825	2.91397	0.168025
2011/11/04 18:06:56.5	-19.3962	-69.299	108.386	3.82	4.2	3.9	4.0	-	-	-	3.28748	3.09473	0.211744
2011/11/05 08:41:43.8	-22.0138	-68.7563	139.884	3.85	3.9	4.0	4.0	87.60	75.97	20.91	5.61999	11.1259	0.294521
2011/11/05 11:23:33.8	-20.1503	-69.2995	104.464	3.99	3.9	4.0	4.0	180.00	40.00	-90.00	2.07828	2.53725	0.161088
2011/11/06 06:18:54.4	-22.396	-67.849	230.332	3.27	4.0	3.6	3.8	-	-	-	12.0086	17.6929	0.291784
2011/11/14 13:51:7.9	-21.7864	-68.6752	133.511	3.65	4.0	3.9	4.0	135.00	75.00	90.00	6.81261	5.84825	0.270401
2011/11/23 01:43:46.0	-22.8546	-68.7269	206.556	4.65	4.7	4.9	4.8	156.31	85.08	79.96	10.7401	13.9025	0.257909
2011/11/28 15:38:16.2	-19.3766	-70.459	65.4907	3.94	4.2	4.0	4.1	-	-	-	2.71161	3.66069	0.192579
2011/11/29 03:16:33.2	-20.1017	-69.168	101.523	4.06	4.1	4.1	4.1	248.41	58.23	-47.57	2.39214	3.42734	0.205027
2011/11/29 14:22:52.2	-19.5797	-69.5202	93.189	4.29	4.3	4.2	4.2	180.15	22.27	-62.73	3.58481	2.84956	0.267556
2011/12/03 10:29:43.5	-21.3846	-71.4481	10.5845	4.53	4.4	4.3	4.3	-	-	-	3.96806	4.93337	0.31844
2011/12/06 13:02:21.9	-20.7511	-70.1333	68.0645	3.96	3.9	3.8	3.8	179.56	85.02	84.98	2.05692	2.38602	0.207397
2011/12/06 16:53:4.8	-19.7021	-69.6183	114.759	4.04	4.2	4.1	4.2	180.00	20.00	-90.00	2.77719	3.01753	0.188089
2011/12/09 15:20:17.5	-22.8652	-68.6315	117.333	3.56	3.9	4.1	4.0	202.67	65.10	84.49	11.2491	14.5677	0.247988
2011/12/11 19:01:23.6	-21.9536	-68.7654	130.079	4.36	4.4	4.5	4.5	149.12	80.04	84.92	4.98083	5.95029	0.293584
2011/12/13 10:28:57.8	-22.1399	-68.8591	113.901	3.85	4.0	4.2	4.1	-	-	-	4.98653	4.78061	0.274019
2011/12/13 20:23:59.9	-20.0774	-69.1461	104.219	3.91	4.0	4.0	4.0	55.10	55.61	-77.85	2.51681	4.11492	0.184715
2011/12/15 05:08:13.8	-19.9501	-69.0538	114.514	4.00	4.0	3.9	4.0	180.00	15.00	-90.00	2.65639	2.87805	0.175502
2011/12/15 05:57:46.1	-21.3389	-68.83	130.079	3.80	4.0	3.9	4.0	210.00	35.00	-90.00	5.58405	5.08768	0.268668
2011/12/22 16:41:17.0	-19.5017	-69.2577	107.161	4.92	4.9	4.9	4.9	325.00	70.00	-90.00	3.50551	3.1294	0.23559
2011/12/23 14:59:41.4	-20.5376	-69.1281	96.1304	4.14	4.0	4.1	4.0	356.34	75.06	-84.82	2.20874	2.47549	0.243497
2011/12/26 17:25:40.8	-20.9283	-69.5455	71.6187	3.82	3.9	3.8	3.8	315.00	70.00	-90.00	2.5893	2.66418	0.240585
2011/12/26 22:23:47.1	-20.5253	-69.1471	96.8657	3.99	3.8	4.0	3.9	325.00	80.00	-90.00	2.31297	2.59045	0.178371
2012/01/04 02:39:3.8	-22.086	-68.5802	115.862	4.04	4.4	4.4	4.4	-	-	-	5.55919	8.3861	0.228013
2012/01/04 03:14:1.8	-21.2053	-68.5803	137.065	3.82	4.3	4.0	4.2	-	-	-	4.06191	5.62553	0.23103
2012/01/09 01:14:5.5	-20.4643	-68.892	113.779	3.94	4.1	4.1	4.1	338.05	85.08	-79.96	2.81074	3.69603	0.235736
2012/01/09 07:15:31.8	-21.3948	-68.6694	136.084	4.00	4.2	4.1	4.2	143.93	67.48	62.77	4.01752	6.40876	0.277022
2012/01/10 04:06:17.7	-22.3347	-67.8719	239.401	4.46	4.5	4.3	4.4	-	-	-	7.64311	12.2522	0.288367
2012/01/10 21:52:5.6	-20.1598	-69.2171	100.052	3.99	3.9	4.0	4.0	-	-	-	2.10535	2.44949	0.280203
2012/01/14 02:28:52.3	-20.9751	-69.011	107.896	4.24	4.3	4.2	4.2	-	-	-	3.23713	2.89789	0.203756
2012/01/15 23:51:11.1	-20.3046	-70.3765	40.7952	4.32	4.3	4.3	4.3	-	-	-	1.57324	2.86672	0.188748
2012/01/22 19:51:5.1	-18.9934	-69.4421	89.6348	4.08	4.3	4.2	4.2	-	-	-	9.94365	10.5937	0.205549
2012/01/29 09:38:11.3	-19.6625	-69.1983	106.425	3.87	4.0	4.1	4.0	-	-	-	3.55177	3.29116	0.233106
2012/01/29 16:44:38.1	-21.7566	-68.5532	141.6	4.47	4.6	4.6	4.6	-	-	-	4.72056	9.09092	0.28366
2012/01/29 17:17:35.3	-22.5304	-69.0012	156.062	3.85	4.1	4.2	4.2	-	-	-	13.0784	12.2012	0.232083
2012/02/02 10:56:50.4	-20.8555	-69.0626	114.024	4.49	4.7	4.6	4.7	-	-	-	2.89611	3.28324	0.240034
2012/02/03 00:05:26.7	-19.2706	-70.1299	51.7642	4.20	4.3	4.3	4.3	-	-	-	3.34466	4.40322	0.302351
2012/02/12 17:41:23.4	-21.1592	-68.0115	198.834	3.94	4.0	3.9	4.0	15.09	11.17	-26.30	3.6049	5.427	0.238859
2012/02/13 04:47:54.1	-19.5999	-70.8448	27.0073	3.95	4.0	4.1	4.0	-	-	-	5.04549	8.15673	0.151775
2012/02/14 09:48:0.0	-21.9739	-68.6778	149.688	3.76	4.0	3.9	4.0	-	-	-	10.6396	18.7019	0.269452
2012/02/17 12:30:46.8	-21.1113	-68.9542	117.088	4.41	4.5	4.6	4.5	158.66	75.06	84.82	4.86511	4.42025	0.278322
2012/02/19 01:42:6.8	-21.3031	-67.7293	224.939	3.27	3.9	3.5	3.7	-	-	-	5.63298	9.50179	0.289503
2012/02/21 15:46:23.4	-19.9981	-70.2531	44.4719	4.52	4.5	4.4	4.5	201.29	31.47	70.57	2.01596	3.68743	0.193275

Tempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz	RMS
2012/02/25 19:39:1.8	-21.9223	-68.9288	140.374	3.80	4.1	4.2	4.2	-	-	-	8.56098	9.82778	0.264262
2012/02/28 07:54:11.5	-21.031	-69.0285	110.592	4.28	4.3	4.3	4.3	-	-	-	3.31633	4.0491	0.275487
2012/02/29 15:13:38.5	-20.869	-69.2632	83.6294	3.91	4.0	4.1	4.0	-	-	-	3.19279	2.82726	0.250064
2012/03/03 18:38:33.2	-22.3601	-68.9104	148.218	3.75	3.9	4.1	4.0	-	-	-	9.82831	13.2362	0.171985
2012/03/04 16:27:21.8	-21.5642	-70.0833	37.0571	5.39	5.1	5.0	5.0	-	-	-	2.64001	2.19201	0.260345
2012/03/07 20:13:50.4	-19.9977	-70.2508	44.4106	4.64	4.5	4.5	4.5	180.34	47.85	39.32	2.02916	3.57284	0.236768
2012/03/09 14:18:47.2	-22.8537	-68.9001	106.793	3.54	3.9	4.1	4.0	185.00	30.00	-90.00	9.05008	10.7709	0.16539
2012/03/09 16:12:41.4	-19.0489	-69.6171	97.7236	4.60	4.7	4.8	4.8	176.30	11.17	-63.26	6.03806	5.00676	0.268111
2012/03/09 20:07:38.1	-21.7176	-68.4815	131.917	4.94	4.8	4.8	4.8	40.00	35.00	90.00	3.84194	7.00426	0.273865
2012/03/10 02:26:57.3	-19.6586	-69.2412	106.67	5.28	5.3	5.3	5.3	325.00	75.00	-90.00	3.00183	2.73199	0.25141
2012/03/11 06:18:42.6	-22.2185	-69.1261	134.981	3.80	4.3	4.2	4.2	-	-	-	9.76746	4.1413	0.248624
2012/03/11 09:36:19.9	-19.7562	-69.2801	101.768	3.92	4.0	4.1	4.0	273.45	38.29	-36.20	2.78663	2.4108	0.264514
2012/03/12 23:11:23.6	-19.6692	-69.295	100.788	4.08	4.3	4.3	4.3	-	-	-	4.16536	2.84509	0.264774
2012/03/14 08:40:6.5	-19.3177	-70.177	39.447	3.88	3.9	4.0	4.0	-	-	-	1.87162	2.0896	0.217149
2012/03/18 03:49:42.6	-19.1069	-69.3609	106.916	3.84	4.0	4.2	4.1	-	-	-	3.25924	2.91916	0.278982
2012/03/21 00:06:39.8	-21.9063	-67.7171	236.705	4.06	4.7	4.2	4.5	-	-	-	6.88438	8.59749	0.277489
2012/03/21 02:56:8.9	-19.9647	-69.1449	102.258	4.61	4.6	4.6	4.6	181.00	43.96	-60.48	2.35242	3.06796	0.183157
2012/03/21 19:13:57.3	-21.6327	-68.4867	139.884	3.64	3.8	3.8	3.8	-	-	-	5.029	7.03772	0.273656
2012/03/27 14:46:38.7	-19.63	-69.3238	98.3364	4.41	4.7	4.7	4.7	220.00	85.00	-90.00	4.11487	3.6227	0.251597
2012/04/01 16:39:7.9	-21.3092	-69.8423	50.845	4.17	4.2	4.2	4.2	162.69	65.41	78.99	1.76808	2.49172	0.253081
2012/04/03 07:25:8.5	-19.5881	-69.0548	116.23	5.32	5.3	5.0	5.2	-	-	-	3.24182	2.57753	0.27359
2012/04/03 10:06:54.3	-21.9882	-68.8931	132.04	4.15	4.0	4.4	4.2	141.51	55.15	83.90	7.21104	8.84401	0.266583
2012/04/07 16:40:25.2	-19.2028	-70.1663	2.00537	4.22	4.0	4.0	4.0	-	-	-	2.90916	5.29623	0.285313
2012/04/09 12:47:51.9	-21.1074	-68.9608	117.701	4.00	4.2	4.3	4.2	135.00	50.00	90.00	5.29034	3.96726	0.271872
2012/04/12 03:39:46.5	-22.2071	-68.7399	122.235	3.75	4.1	4.0	4.0	223.54	65.41	78.99	10.0203	16.5493	0.282506
2012/04/16 20:55:24.8	-20.7327	-70.6183	44.4106	4.20	4.2	4.1	4.2	-	-	-	2.61057	4.44289	0.228323
2012/04/18 09:33:0.5	-21.1651	-68.6246	143.438	3.67	4.0	3.9	4.0	-	-	-	4.04382	5.9241	0.247295
2012/04/19 09:06:46.6	-20.1151	-68.9716	111.818	4.47	4.6	4.5	4.5	180.87	27.99	-43.22	3.00031	2.67814	0.262401
2012/04/22 04:08:35.5	-21.166	-68.4957	149.688	4.67	4.6	4.6	4.6	185.16	56.36	71.89	7.17417	6.66254	0.187067
2012/04/26 10:22:5.4	-21.3837	-68.7045	120.765	3.95	4.2	4.4	4.3	-	-	-	4.66793	5.99606	0.265164
2012/04/26 16:45:59.7	-21.7165	-68.813	132.04	4.25	4.4	4.5	4.5	-	-	-	5.62622	7.89766	0.235734
2012/04/27 12:18:15.3	-21.5715	-70.1473	39.2632	4.10	4.3	4.2	4.2	335.93	36.22	72.91	2.71142	1.80636	0.24971
2012/04/29 06:22:25.0	-20.2647	-69.1381	111.818	4.42	4.4	4.4	4.4	206.30	11.17	-63.26	2.93018	3.0627	0.23628
2012/04/30 02:49:0.9	-19.782	-69.4696	87.061	3.89	3.9	4.0	4.0	190.00	40.00	-90.00	3.85539	3.22356	0.258317
2012/05/03 02:38:32.9	-21.1469	-68.6279	112.431	4.08	4.1	4.2	4.2	-	-	-	4.28566	6.21866	0.236009
2012/05/05 11:36:10.5	-21.3454	-68.9108	127.873	3.93	4.1	4.1	4.1	-	-	-	4.18571	3.27747	0.222668
2012/05/05 13:18:12.9	-19.6923	-70.2088	49.313	4.43	4.3	4.3	4.3	39.13	90.00	40.00	1.93465	2.55575	0.222105
2012/05/07 03:02:25.4	-20	-69.3251	90.7378	4.73	4.5	4.5	4.5	232.82	38.29	-47.00	2.0976	2.52203	0.240432
2012/05/10 01:42:8.8	-20.8685	-69.0774	114.514	4.21	4.4	4.4	4.4	-	-	-	2.74236	2.9598	0.256265
2012/05/16 05:11:26.6	-19.7804	-69.3	100.297	4.32	4.5	4.4	4.5	175.59	25.46	-78.30	2.96278	2.51164	0.251608
2012/05/17 23:10:46.1	-22.2521	-69.2201	117.823	3.99	3.8	4.2	4.0	-	-	-	9.46523	4.03573	0.158825
2012/05/18 00:54:14.2	-21.3647	-68.8152	134.369	4.19	4.2	4.3	4.2	-	-	-	3.89313	3.93513	0.27615
2012/05/20 06:44:36.5	-20.1806	-69.1802	102.136	4.99	4.9	4.7	4.8	214.81	71.94	-8.74	2.27023	2.50234	0.252235
2012/05/20 18:26:53.2	-21.1063	-68.6262	140.006	4.32	4.6	4.4	4.5	211.77	46.92	69.25	3.12914	4.4346	0.283816
2012/05/20 19:39:33.9	-20.8548	-69.1077	110.102	4.31	4.3	4.3	4.3	-	-	-	2.87252	3.16363	0.268143
2012/05/20 20:39:56.4	-22.2592	-68.6552	127.628	4.33	4.5	4.7	4.6	-	-	-	5.27135	7.60095	0.262944
2012/05/21 03:51:41.1	-22.2689	-68.9506	143.315	3.83	3.9	4.2	4.0	155.00	85.00	90.00	9.01283	10.4552	0.179471
2012/05/21 21:23:49.1	-20.6681	-69.1401	116.23	4.36	4.5	4.3	4.4	-	-	-	2.14752	2.62369	0.248183
2012/05/22 14:47:11.0	-21.3518	-68.8024	131.672	4.12	4.3	4.4	4.3	-	-	-	4.53447	4.02973	0.263547
2012/05/23 16:14:50.2	-19.9038	-69.9603	65.123	4.52	4.5	4.5	4.5	-	-	-	1.17318	1.86721	0.158572
2012/05/26 10:04:46.6	-22.4197	-69.0266	156.062	3.99	4.0	4.3	4.2	-	-	-	9.20636	9.66539	0.209363
2012/05/27 20:01:44.5	-21.8046	-68.7767	140.864	4.85	4.9	4.9	4.9	193.46	51.62	70.72	7.63716	5.42918	0.292351
2012/06/01 17:58:55.9	-21.0517	-68.7366	130.202	4.02	4.3	4.3	4.3	182.86	21.09	-44.01	2.93182	3.50913	0.264239
2012/06/03 11:39:24.9	-21.4574	-68.4614	159.003	4.59	5.1	4.8	4.9	-	-	-	5.38152	8.64185	0.221688
2012/06/03 11:43:44.8	-21.4636	-68.4536	144.786	4.08	4.5	4.5	4.5	-	-	-	5.21511	6.75501	0.263189
2012/06/05 22:38:35.3	-21.036	-68.6055	149.811	3.94	4.6	4.2	4.4	-	-	-	3.28745	4.55626	0.245216
2012/06/10 19:25:52.5	-20.2205	-69.1522	98.0913	4.71	4.7	4.6	4.7	169.98	45.22	-82.95	3.20017	2.73248	0.251199
2012/06/14 11:41:53.5	-21.1135	-68.6617	135.104	4.10	4.3	4.2	4.2	-	-	-	3.74082	5.18176	0.282834
2012/06/15 01:03:57.3	-22.0015	-68.6355	130.079	3.87	4.0	4.0	4.0	-	-	-	5.64356	8.89857	0.24802
2012/06/15 16:04:11.3	-21.9668	-68.5078	118.804	4.22	4.6	4.5	4.5	-	-	-	5.23897	7.62512	0.292229
2012/06/21 16:22:47.6	-20.4923	-69.2453	97.1108	4.88	4.8	4.8	4.8	220.86	37.70	-64.96	2.49331	3.14571	0.277899
2012/06/22 13:03:50.9	-20.8342	-69.1082	111.818	4.13	4.2	4.2	4.2	-	-	-	3.43494	3.54368	0.283697
2012/06/26 14:36:59.6	-20.9624	-68.7201	140.497	4.02	4.3	4.2	4.2	-	-	-	3.50593	4.52366	0.268136
2012/06/30 08:27:10.0	-22.2594	-68.6628	117.333	4.13	4.4	4.5	4.5	-	-	-	5.6381	6.4495	0.219191
2012/07/01 17:44:59.7	-20.6264	-71.313	33.1353	5.02	4.9	4.8	4.8	-	-	-	4.1234	3.87794	0.184546
2012/07/02 17:25:28.8	-22.3332	-68.8391	118.804	4.15	4.2	4.6	4.4	-	-	-	7.78698	6.65297	0.281442
2012/07/04 14:51:40.2	-22.4136	-68.672	126.893	3.80	4.1	4.2	4.2	-	-	-	5.86014	8.07938	0.242688
2012/07/08 09:12:20.6	-20.4965	-70.5146	27.0073	4.23	4.2	4.1	4.2	150.25	55.61	77.85	2.87601	9.16581	0.15579
2012/07/16 06:06:31.8	-19.6844	-68.1279	185.23	3.12	3.5	0.0	3.5	-	-	-	15.3801	22.2166	0.173634
2012/07/17 02:35:34.7	-20.2347	-69.1463	103.239	4.95	4.8	4.8	4.8	355.00	70.00	-90.00	2.4668	2.74311	0.24717

Tiempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz	RMS
2012/07/18 18:24:10.4	-20.7911	-70.5875	17.938	5.29	5.3	5.2	5.2	0.00	30.00	90.00	1.99677	5.55705	0.226545
2012/07/21 06:50:57.4	-22.0748	-68.8957	95.8853	4.08	4.3	4.2	4.2	185.00	30.00	-90.00	4.23569	7.08916	0.296944
2012/07/26 21:41:11.2	-20.8442	-69.1342	113.289	4.01	4.0	4.1	4.0	209.47	48.36	-62.76	2.88679	3.99353	0.237613
2012/07/29 16:39:26.3	-20.7736	-70.5915	12.3003	4.06	4.0	3.9	4.0	-	-	-	2.0841	7.7758	0.181996
2012/07/30 01:47:55.2	-21.5433	-68.6334	134.124	4.48	4.6	4.7	4.7	-	-	-	3.03525	4.065	0.27129
2012/08/04 20:35:9.8	-20.6067	-69.0891	114.759	4.28	4.3	4.2	4.2	-	-	-	2.95664	3.17423	0.270067
2012/08/05 08:27:34.9	-21.1409	-68.6102	142.458	4.11	4.2	4.1	4.2	-	-	-	3.46541	5.10386	0.231
2012/08/07 12:28:38.4	-21.2821	-69.8814	49.2517	4.44	4.4	4.4	4.4	-	-	-	1.89462	1.97074	0.20608
2012/08/10 11:28:34.9	-21.0928	-68.8728	119.907	4.18	4.4	4.2	4.3	-	-	-	2.90877	4.63041	0.237881
2012/08/19 00:17:58.9	-20.3875	-69.4141	85.8354	4.23	4.3	4.2	4.2	164.89	7.07	-44.89	1.86002	3.30747	0.253479
2012/08/20 18:41:41.4	-21.9317	-68.7073	150.424	4.57	4.5	4.5	4.5	150.00	75.00	90.00	5.59334	8.18206	0.255181
2012/08/24 19:08:15.2	-21.8157	-68.7046	127.628	4.17	4.5	4.4	4.5	-	-	-	4.21258	4.3704	0.286015
2012/08/29 12:26:5.2	-19.8743	-69.1507	101.768	4.04	4.1	4.1	4.1	-	-	-	2.15286	2.37783	0.273739
2012/08/31 01:12:15.7	-21.7233	-68.556	123.706	4.21	4.4	4.7	4.6	-	-	-	5.46258	8.04	0.272683
2012/09/04 01:57:38.4	-22.4263	-70.3773	47.2295	3.89	3.9	4.5	4.2	-	-	-	23.0082	11.4361	0.12885
2012/09/05 00:37:44.2	-22.6822	-67.9178	222.733	3.69	4.2	3.8	4.0	-	-	-	9.75244	13.6853	0.230446
2012/09/10 02:14:6.0	-20.4518	-68.8998	109.612	4.71	4.7	4.6	4.7	180.14	26.81	-67.35	2.03288	2.46649	0.26454
2012/09/11 04:25:42.2	-20.6662	-68.8983	107.161	4.84	4.8	4.8	4.8	348.23	63.94	-44.31	3.07465	2.65918	0.233478
2012/09/21 12:17:26.0	-19.6188	-69.3166	104.955	5.47	5.6	5.4	5.5	-	-	-	2.70174	3.13315	0.248145
2012/09/22 04:18:12.8	-22.0415	-68.7877	119.049	4.40	4.6	4.7	4.7	-	-	-	9.1702	6.55272	0.250715
2012/09/23 12:28:31.0	-20.342	-69.2748	94.4146	4.57	4.7	4.6	4.7	321.30	50.14	-22.91	2.40866	3.4165	0.25912
2012/09/24 03:09:4.9	-20.2187	-69.1448	101.768	4.39	4.2	4.3	4.2	205.00	20.00	-90.00	3.23461	2.98974	0.260653
2012/09/25 18:28:16.4	-22.5005	-68.9411	108.509	4.12	4.0	4.4	4.2	-	-	-	9.33967	7.46803	0.184929
2012/09/26 16:11:49.8	-22.6878	-68.9404	105.077	3.78	3.8	4.3	4.0	-	-	-	5.59061	7.45989	0.170796
2012/09/27 16:39:1.5	-19.9971	-69.1759	103.484	4.54	4.7	4.7	4.7	335.00	55.00	-90.00	2.48552	2.17709	0.226426
2012/10/08 01:50:26.1	-21.913	-68.7967	143.806	5.43	5.9	5.8	5.8	-	-	-	6.93492	4.70062	0.243869
2012/10/08 02:54:14.4	-21.8995	-68.6193	138.903	4.00	4.3	4.4	4.3	-	-	-	6.10386	9.85014	0.272325
2012/10/08 05:50:22.2	-21.9382	-68.6447	135.472	4.09	4.2	4.2	4.2	-	-	-	6.91986	7.47537	0.297616
2012/10/14 07:46:49.7	-21.8185	-68.5496	145.276	4.09	4.2	4.2	4.2	-	-	-	5.86946	6.89808	0.274558
2012/10/14 22:31:1.0	-21.1779	-68.9874	114.024	4.34	4.3	4.3	4.3	-	-	-	3.89879	3.97872	0.205662
2012/10/18 02:28:3.5	-21.7758	-68.8398	126.893	4.26	4.3	4.3	4.3	-	-	-	5.85608	6.00158	0.276406
2012/10/21 04:37:4.7	-21.2288	-68.0602	192.216	3.63	4.1	3.9	4.0	36.18	50.73	-77.04	3.72748	4.52005	0.193638
2012/10/22 15:55:30.4	-20.4116	-68.8054	118.681	4.17	4.6	4.3	4.4	-	-	-	2.5407	3.27833	0.259759
2012/10/22 16:42:29.6	-21.2084	-68.9302	120.642	4.03	4.1	4.1	4.1	-	-	-	4.45995	3.90227	0.246643
2012/10/26 18:57:42.8	-20.0183	-69.1269	101.278	4.10	4.1	4.2	4.2	178.47	20.59	-75.65	2.36386	2.70127	0.187748
2012/11/02 09:07:25.7	-21.1925	-70.4624	43.0012	4.41	4.3	4.4	4.3	180.78	80.15	79.85	1.83061	2.27064	0.262786
2012/11/02 21:00:16.1	-20.9063	-68.8399	107.406	4.16	4.2	4.2	4.2	181.71	42.27	-67.37	2.5537	2.88365	0.291009
2012/11/04 19:08:25.5	-20.3969	-68.1049	189.888	4.65	5.0	4.8	4.9	-	-	-	4.34399	8.15322	0.23905
2012/11/05 11:23:31.8	-21.2563	-67.8156	206.556	3.60	4.3	4.0	4.2	-	-	-	4.61707	8.92081	0.284955
2012/11/08 08:24:23.5	-20.4586	-69.8506	77.0112	4.40	4.4	4.3	4.3	187.67	80.34	74.78	2.39595	3.54751	0.251865
2012/11/13 03:11:26.0	-20.5164	-69.1811	93.9243	5.41	5.1	5.1	5.1	353.06	82.56	-29.15	2.5712	2.98146	0.252538
2012/11/16 00:38:6.3	-21.4915	-69.5152	54.4604	5.17	5.3	5.1	5.2	32.12	60.13	84.23	2.08565	3.85074	0.228862
2012/11/20 01:09:49.2	-21.7204	-70.362	50.0483	4.16	4.3	4.2	4.2	165.00	40.00	90.00	4.27764	4.16277	0.213769
2012/11/21 21:05:33.0	-22.1566	-69.1664	87.7964	4.44	4.5	4.5	4.5	185.00	15.00	-90.00	4.92776	6.23997	0.257631
2012/11/24 12:50:20.7	-22.0636	-69.0048	132.04	4.20	4.2	4.4	4.3	150.00	70.00	90.00	6.42946	8.22236	0.202851
2012/11/25 22:51:49.9	-19.591	-69.36	100.052	4.69	4.7	4.6	4.7	284.25	58.68	-16.48	3.2548	2.79962	0.267659
2012/11/27 01:53:44.0	-19.9916	-69.2208	106.67	4.22	4.2	4.2	4.2	160.00	90.00	90.00	2.47559	2.80068	0.226885
2012/12/05 06:32:52.2	-22.2831	-68.8744	159.983	4.18	4.4	4.3	4.3	-	-	-	7.87116	8.20913	0.247775
2012/12/06 20:42:16.1	-22.0118	-68.8093	140.864	4.78	4.9	4.9	4.9	-	-	-	9.60464	9.93709	0.174735
2012/12/07 22:46:31.2	-20.1737	-68.7497	129.957	3.95	4.2	4.1	4.2	-	-	-	2.51108	2.80727	0.175667
2012/12/13 15:16:11.7	-21.0589	-68.7026	144.173	4.08	4.4	4.1	4.2	-	-	-	2.47542	3.44619	0.197326
2012/12/13 17:42:0.1	-20.6132	-69.9102	40.7952	4.36	4.2	4.1	4.2	194.66	43.96	-22.18	1.64882	3.13558	0.200784
2012/12/15 18:55:15.7	-21.1183	-68.9493	118.191	4.33	4.3	4.4	4.3	355.00	75.00	-90.00	3.84693	3.8126	0.262745
2012/12/16 20:39:25.5	-19.7607	-69.3471	115.25	4.61	4.6	4.5	4.5	32.64	61.12	72.81	3.27974	2.37097	0.270245
2012/12/22 00:53:1.0	-22.2515	-67.848	239.401	3.39	4.1	3.6	3.8	-	-	-	8.67368	15.6258	0.26554
2012/12/25 19:59:24.2	-21.1549	-68.5985	140.987	4.01	4.0	4.0	4.0	265.74	69.30	-40.89	3.7127	6.19555	0.286852
2012/12/26 09:46:42.5	-21.0955	-68.7073	138.291	4.62	4.8	4.7	4.8	-	-	-	2.83878	3.67416	0.181715
2012/12/29 06:04:16.6	-19.875	-69.1843	104.464	4.48	4.4	4.3	4.3	335.00	50.00	-90.00	2.30596	2.3867	0.210652
2013/01/01 03:51:13.6	-20.8152	-69.6852	56.115	5.22	5.1	5.0	5.0	56.06	45.86	76.00	1.0837	2.11656	0.194797
2013/01/11 04:18:43.4	-19.1377	-68.1644	221.263	3.83	4.2	4.1	4.2	-	-	-	5.41857	5.51902	0.221555
2013/01/13 21:23:27.9	-20.1321	-69.3429	89.2671	5.57	5.5	5.4	5.5	-	-	-	2.23624	3.0748	0.266684
2013/01/21 17:03:39.9	-21.2249	-68.6023	145.644	4.10	4.4	4.3	4.3	180.87	27.99	-43.22	3.31165	4.72099	0.274148
2013/01/21 23:39:24.0	-19.8603	-69.1659	102.013	4.33	4.3	4.3	4.3	335.00	40.00	-90.00	2.52053	2.54709	0.255309
2013/01/22 17:07:16.6	-20.0282	-69.3077	92.6987	4.31	4.2	4.2	4.2	-	-	-	2.2546	2.54397	0.247857
2013/02/16 04:13:59.4	-19.5727	-69.3957	101.033	4.47	4.4	4.4	4.4	227.35	31.47	-16.74	2.98311	2.4257	0.274682
2013/02/20 02:23:43.6	-21.6396	-68.3459	148.095	4.29	4.6	4.3	4.4	-	-	-	3.60894	6.12867	0.283055
2013/02/21 16:41:51.9	-22.0892	-68.7202	121.255	3.80	4.1	4.2	4.2	-	-	-	7.88384	6.28545	0.259463
2013/02/22 07:41:39.2	-21.7916	-68.659	155.204	4.93	5.1	5.0	5.0	-	-	-	4.20402	6.55268	0.294835
2013/02/23 22:00:45.6	-19.9387	-70.0129	50.0483	4.56	4.4	4.5	4.5	144.13	58.68	60.35	2.77985	2.90456	0.243624
2013/03/02 00:30:22.3	-21.3667	-68.9423	118.313	4.11	4.3	4.1	4.2	125.00	70.00	90.00	3.37108	4.2067	0.274612

Tiempo Origen	Hipocentro			Magnitudes				Mecanismo Focal			Errores		
	yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s	Latitud	Longitud	Profundidad	ml	mwp	mws	mwprom	strike	dip	rake	Dh	Dz
2013/03/02 11:42:3.7	-22.7132	-70.4681	44.2881	4.75	4.7	4.9	4.8	-	-	-	5.20505	6.77733	0.175406
2013/03/03 05:17:21.3	-22.4086	-70.5492	20.144	3.97	4.1	4.2	4.2	-	-	-	5.05794	13.6154	0.101532
2013/03/08 01:12:9.1	-20.3502	-69.2877	90.2476	4.16	4.1	4.1	4.1	-	-	-	2.41259	3.56681	0.272392
2013/03/08 14:37:59.6	-22.0098	-68.9011	143.683	3.85	4.2	4.2	4.2	25.00	35.00	90.00	4.64749	6.19358	0.19754
2013/03/09 01:17:51.0	-22.0056	-68.852	115.985	4.39	4.7	4.6	4.7	-	-	-	4.0079	6.53925	0.285795
2013/03/15 06:31:7.4	-21.4895	-69.0412	124.196	4.53	4.7	4.5	4.6	-	-	-	5.6283	4.93465	0.28397
2013/03/15 17:13:50.3	-19.9862	-70.2477	40.55	4.08	4.0	4.1	4.0	141.03	38.29	47.00	1.61925	3.44046	0.182676
2013/03/18 01:53:8.5	-22.8695	-68.6809	104.097	3.70	4.0	4.0	4.0	-	-	-	4.40214	8.67286	0.190298
2013/03/25 16:18:12.7	-22.1768	-68.8013	149.198	4.89	5.0	4.9	5.0	-	-	-	8.03469	10.9652	0.255649
2013/03/25 20:55:25.8	-20.2943	-68.8887	116.72	4.24	4.3	4.1	4.2	-	-	-	2.61937	3.47831	0.250616
2013/03/26 03:39:20.6	-19.4812	-69.3437	98.3364	4.08	4.1	4.1	4.1	325.00	70.00	-90.00	2.9686	2.54273	0.234397
2013/03/28 07:48:53.7	-20.0065	-69.1738	100.788	4.48	4.5	4.5	4.5	180.00	45.00	-90.00	2.19442	2.46176	0.23588
2013/03/29 17:48:46.4	-20.3304	-68.7251	140.251	4.09	4.6	4.3	4.4	-	-	-	3.19383	3.96187	0.277829
2013/03/31 01:43:38.8	-20.5771	-69.0429	102.013	4.82	4.9	4.8	4.8	335.00	60.00	-90.00	2.8394	2.49542	0.219314
2013/03/31 05:40:13.2	-20.6012	-69.211	112.308	4.63	4.6	4.6	4.6	-	-	-	2.16991	2.85289	0.23317
2013/04/01 09:00:7.5	-20.345	-68.156	188.54	4.11	4.6	4.2	4.4	-	-	-	3.42476	5.39829	0.188435
2013/04/01 18:16:33.5	-19.9817	-69.0839	108.509	4.64	4.8	4.7	4.8	347.09	72.77	-58.43	2.22047	2.50031	0.194442
2013/04/03 06:15:29.0	-19.9714	-68.8612	124.074	4.43	4.5	4.4	4.5	195.00	15.00	-90.00	2.29204	2.68291	0.228204
2013/04/06 08:35:32.3	-20.4759	-68.9873	106.67	4.31	4.4	4.2	4.3	172.38	17.96	-55.73	2.53183	2.90405	0.260104
2013/04/07 23:28:30.6	-21.8752	-68.7721	150.546	4.02	4.1	4.1	4.1	210.02	45.22	82.95	4.73377	7.18989	0.221263
2013/04/18 22:38:43.2	-21.8364	-68.6399	142.825	4.13	4.6	4.4	4.5	-	-	-	8.55573	8.58018	0.271257
2013/04/23 19:37:53.4	-20.729	-69.0168	99.8071	4.28	4.3	4.4	4.3	-	-	-	2.91172	2.66037	0.204693
2013/04/26 01:13:36.0	-21.6566	-68.554	148.218	3.96	4.3	4.1	4.2	-	-	-	4.92813	5.35705	0.167007
2013/04/26 12:14:9.7	-20.0298	-69.0478	111.144	4.78	4.9	4.7	4.8	320.00	80.00	-90.00	2.05593	2.11611	0.214589
2013/04/28 09:37:25.0	-21.5578	-69.9741	84.855	4.18	4.2	4.3	4.2	-	-	-	2.78316	3.26928	0.23792
2013/04/28 17:25:26.1	-21.2967	-68.5147	143.806	3.93	4.3	4.2	4.2	-	-	-	4.03425	7.67184	0.240298
2013/04/30 06:46:9.9	-22.0043	-68.6203	135.472	4.17	4.3	4.3	4.3	-	-	-	10.9136	11.0734	0.270236
2013/04/30 21:01:42.6	-20.9419	-67.9345	198.222	3.88	4.2	4.1	4.2	343.49	55.15	-83.90	4.62641	6.60549	0.274953
2013/05/04 08:46:56.1	-21.3461	-69.0587	119.171	4.10	4.4	4.3	4.3	-	-	-	3.2676	2.6813	0.211581
2013/05/06 11:09:56.9	-21.1058	-69.0342	114.759	4.10	4.0	4.1	4.0	350.00	70.00	-90.00	3.48247	4.03276	0.265272
2013/05/08 08:07:54.5	-22.0553	-69.0656	137.433	3.97	4.3	4.1	4.2	-	-	-	8.02503	5.41629	0.153656
2013/05/09 10:37:33.7	-20.2027	-68.1789	189.52	3.83	4.4	3.9	4.2	-	-	-	3.3987	4.57585	0.168846
2013/05/11 00:53:28.1	-21.9096	-69.2004	116.23	4.05	4.1	4.3	4.2	180.00	15.00	-90.00	7.29401	3.26358	0.170901
2013/05/12 12:51:52.9	-20.9876	-68.6406	146.625	5.27	5.6	5.3	5.4	-	-	-	2.94571	3.81754	0.204358
2013/05/16 06:05:23.1	-22.1727	-67.9869	231.558	3.37	4.3	3.7	4.0	-	-	-	9.6141	14.1504	0.191338
2013/05/17 06:56:58.5	-19.1235	-69.1927	121.745	3.92	4.2	4.2	4.2	0.00	5.00	90.00	5.98196	4.48803	0.280433
2013/05/17 09:34:39.9	-20.9201	-69.1945	107.896	3.93	4.1	4.0	4.0	-	-	-	3.75574	8.66069	0.270295
2013/05/19 05:10:23.5	-21.5385	-68.4337	158.39	4.00	4.4	4.1	4.2	-	-	-	4.18946	6.96873	0.242614
2013/05/21 04:04:48.7	-22.1105	-67.6934	225.185	3.68	4.0	3.9	4.0	-	-	-	5.67622	10.1179	0.216292
2013/05/21 09:39:28.1	-20.1532	-69.2023	99.0718	3.81	3.7	3.8	3.8	-	-	-	2.53478	3.35397	0.137892
2013/05/21 23:10:46.9	-20.5617	-69.5603	90.4927	4.85	4.9	4.8	4.8	-	-	-	3.84162	4.59456	0.271933