

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**APLICACIONES SISMOLOGICAS DE LA
TRANSFORMADA ONDICULAR**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ

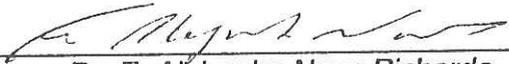
ENSENADA, B. C., DICIEMBRE DEL 2000.

TESIS DEFENDIDA POR
OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



M.C. José G. Acosta Chang

Director del Comité



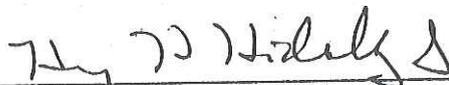
Dr. F. Alejandro Nava Pichardo

Miembro del Comité



Dr. Enrique Gómez Treviño

Miembro del Comité



Dr. Hugo H. Hidalgo Silva

Miembro del Comité



Dr. Raúl R. Castro Escamilla

Jefe del Departamento de
Sismología



Dr. Federico Graef Ziehl

Director de Estudios de Posgrado

8 de diciembre del 2000

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE SISMOLOGÍA

APLICACIONES SISMOLÓGICAS DE LA
TRANSFORMADA ONDICULAR

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ

Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2000

RESUMEN de la tesis de OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ, presentada como requisito parcial, para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en SISMOLOGÍA. Ensenada, Baja California México. Diciembre de 2000.

APLICACIONES SISMOLÓGICAS DE LA TRANSFORMADA ONDICULAR

Resumen aprobado por


M. C. José Guadalupe Acosta Chang
Director de Tesis

Se desarrollaron e implantaron dos aplicaciones sismológicas de la Transformada Ondicular (TO). Se aprovecharon dos propiedades importantes de la TO: 1) la representación simultánea de la energía de una señal a lo largo de dos parámetros que representan al tiempo y a la frecuencia; 2) el fácil discernimiento de la información poco representativa para la formación de la señal. Como primera aplicación, se implantó una técnica de compresión de datos del Perfil Sísmico Vertical Inverso, con una fuente de ondas elásticas resultado de la interacción de una barrena de perforación rotatoria y el medio rocoso que atraviesa. Los parámetros óptimos para llevar a cabo la compresión de señales con TO dependen de manera significativa de la naturaleza de esas señales. En este trabajo se optimizaron los parámetros que controlan los procesos de cálculo de la TO, truncamiento de coeficientes ondiculares y almacenamiento de los datos comprimidos, para el tipo de señales empleadas. La optimización se basó en el balance de: porcentajes de compresión y energía conservada y error de reproducción de la señal en el dominio del tiempo. Cuando se utilizan todos los filtros de la familia de Daubechies, incluyendo la ondícula de Haar, y para un amplio rango de relaciones señal/ruido, la compresión está en el rango de 56 a 66%, con rango del error de reconstrucción entre 10.5 y 13.5%, y porcentajes de energía conservada entre 84 y 68%, respectivamente. La compresión alcanzada es hasta 3 veces mayor que la conseguida con el método ZIP. Se desarrolló un método para la identificación automática del tiempo de arribo de las fases P y S en sismogramas de terremotos, el cual se basa en la aplicación de truncamientos de altura progresiva, hasta aislar los coeficientes asociados a los primeros arribos de las ondas P y S. La TO utilizó cuatro diferentes ondículas para cubrir las posibles formas de onda que adaptaría el primer arribo. Se probaron diferentes combinaciones de valores de truncamiento y escalas en el dominio ondicular para reducir el rango de búsqueda del tiempo de arribo. Se probaron cuatro criterios de selección del tiempo de arribo definitivo y se eligió el de tiempo menor para la onda P, y el de promedio de las cuatro ondículas para la S. El método fue aplicado en 140 sismos de magnitud pequeña, distancias epicentrales menores a 70 km y profundidades focales menores a 17 km, grabados en el valle de Ojos Negros, Baja California. Los resultados tienen residuales menores a una décima de segundo en más del 97% de los registros, para la onda P; y en más del 87% para la onda S, comparados con los tiempos de arribo leídos por cuatro expertos (cinco conjuntos). Los errores tienen un rango similar a la dispersión de los cinco conjuntos de tiempos leídos, aunque el número de coincidencias es bajo.

Palabras clave: Transformada Ondicular, compresión, arribos P y S.

ABSTRACT of the thesis of OSCAR MARIO ROMERO DE LA CRUZ, presented in partial satisfaction of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE in SEISMOLOGY. Ensenada, Baja California México. December 2000.

SEISMOLOGICAL APPLICATIONS OF THE WAVELET TRANSFORM

Two seismological applications of the Wavelet Transform (WT) were developed and implemented in this thesis. Advantage was taken of two important WT properties: 1) energy simultaneous representation along parameters that represent time and frequency; 2) easy discerning of less-important information for the reconstruction of time signals. The first application was a compressing technique for Inverse Vertical Seismic Profile data, recorded using elastic waves coming from a drill-bit perforation. Optimal parameters to accomplish signal compression are strongly dependent on the signal nature. In this work, the parameters controlling WT computations, wavelet coefficients truncation, and data storage, were optimized for the type of analyzed signals. Such optimization was based on the balance of: compression and kept energy ratios, and time domain signal reconstruction error. Using all of the Daubechies filters (including Haar), for a broad range of signal/noise ratios, the accomplished compression is in the 56 to 66% range; the reconstruction error varies between 10.5 and 13.5%; the kept energy ratio varies in the 84 – 68% range. This work's compression achievement is up to 300% higher than ZIP technique.

A method was developed for the automatic picking of P and S-wave arrival time, which is based on the progressively higher truncation of WT coefficients, up to isolate those related to the P and S-wave first arrivals. WT was applied with four different wavelets, in an attempt to cover all possible first arrival waveforms. Different combinations of truncation threshold, and scales, were tested in the wavelet domain in order to shrink the arrival-time searching interval. Four different criteria for the selection of the definitive arrival time were tested; for P-wave the better one was the minimum time among the 4 wavelets, while for S-wave the better one was the average over those wavelets. Method was applied on a 140-earthquakes database, characterized by small magnitudes, epicentral distances lower than 70 Km, and source depths up to 17 Km; all of them recorded in the Ojos Negros valley, Baja California, Mexico. When compared with arrival times picked, on PC screens, by four experts, 97% of the automatically picked P-times have residuals lower than a tenth of a second, as for 87% for the S-wave. Automatically-picked times errors are in the same range that the experts' picked times variation, although the coincidence is much more frequent in the last ones.

Keywords: Wavelet Transform, compression, P and S arrivals.

DEDICATORIA

A mis Padres:

**Sra. María del Refugio de la Cruz Escobedo
y
Sr. Oscar Romero Perales**

A mis hermanos:

Raúl Octavio

Dolores Cecilia

María Teresa

Rosa María

Carlos Iván

Julia Guadalupe

En memoria del Sr. Agustín Romero Perales

AGRADECIMIENTOS

A José G. Acosta Chang, quien fungió como asesor de esta tesis, además por su gran paciencia y aportación de brillantes ideas en el desarrollo de la misma.

A los miembros del comité por sus valiosas aportaciones.

Al Dr. José D. Frez Cárdenas por sus comentarios y sugerencias para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Gerardo Ronquillo quien fungió como asesor de tesis en el Instituto Mexicano del Petróleo.

A Nikolai Kouzoub por sus ideas acerca del tema.

A Susana Álvarez por aguantarme para compartir espacio de trabajo.

A Gustavo Arellano, por su ayuda en la adquisición de los datos.

A mi hermana Maria Teresa por compartir buen tiempo viviendo en Ensenada.

Gracias a mis compañeros de CICESE, gracias por su apoyo moral, especialmente a Jorge y Maria Elena, y muy super especial a Adriana.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado, así mismo al Instituto Mexicano del Petróleo.

CONTENIDO

Página

I.	INTRODUCCIÓN	1
	I.1 Objetivos	3
II.	METODOLOGÍA	9
	II.1 El concepto de <i>Transformada</i>	9
	II.2 Teoría de Ondículas	13
	II.2.1 ¿Qué es una ondícula?	13
	II.2.2 Transformada Ondicular (TO)	15
	II.2.3 Transformada Ondicular Discreta	18
	II.2.4 Filtros ligados a la Transformada Ondicular	20
	II.2.5 Relación de las formas de ondícula y los filtros	23
	II.2.6 Procedimientos numéricos usados por la Transformada Ondicular	28
	II.2.6.1 La descomposición	28
	II.2.6.2 La reconstrucción	32
III.	DATOS	35
	III.1 Señales de barrenación	35
	III.1.1 Información litológica del pozo	40
	III.2 Datos de terremotos	43
IV.	APLICACIONES DE LA TRANSFORMADA ONDICULAR: COMPRESIÓN DE DATOS SÍSMICOS DE BARRENACIÓN	48
	IV.1 Compresión por medio de TO	48
	IV.1.1 Selección de la ondícula y pruebas de tiempo de procesamiento	56
	IV.1.2 Elección del umbral óptimo de truncamiento	58
	IV.1.3 Relaciones de compresión, energía conservada y error	61
	IV.1.4 Almacenamiento de datos comprimidos	65
	IV.2 Resultados	69
	IV.3 Conclusiones	72
	IV.4 Discusiones	74
	IV.5 Recomendaciones	75
V.	APLICACIONES DE LA TRANSFORMADA ONDICULAR: IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE ARRIBOS P Y S EN SISMOGRAMAS DE TERREMOTOS	76
	V.1 Descomposición de un sismograma por TO	77
	V.2 Descripción del esquema general	81
	V.2.1 Identificación de la fase P	84
	V.2.2 Identificación de la fase S	112
	V.3 Discusión	136
	V.4 Conclusiones	137
	V.5 Recomendaciones	138

BIBLIOGRAFÍA	142
APÉNDICE A	146
A.1 Transformada de Fourier (TF)	146
A.2 Transformada de Gabor	148
A.3 Análisis de Multi-Resolución (AMR)	149
APÉNDICE B	153
APÉNDICE C	168

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	Versiones de una función de ondícula contraída, dilatada y desplazada.	15
2	Distribución de los coeficientes ondiculares en el plano tiempo-escala.	20
3	Ondículas de Daubechies-2 y filtros de descomposición y reconstrucción.	24
4	Ondículas de Symmlet-6 y filtros de descomposición y reconstrucción.	24
5	Funciones de escalamiento de ondícula de Haar y espectros de amplitud filtros pasa-bajas y pasa-altas.	25
6	Funciones de escalamiento y de ondícula de Daubechies-5 y espectros de amplitud de filtros pasa-bajas y pasa-altas.	25
7	Producto matricial involucrado en el cálculo de la Transforma Ondicular Directa.	27
8	Producto matricial involucrado en el cálculo de la Transforma Inversa Ondicular.	27
9	Primer paso de la descomposición por Transformada Ondicular.	30
10	Secuencia total de descomposición por Transformada Ondicular.	31
11	Detalle del proceso de reconstrucción aplicada sobre un paso de descomposición por Transformada Ondicular.	33
12	Procedimiento de reconstrucción total de la señal por medio de Transformada Inversa Ondicular.	33
13	Representación de la geometría involucrada en la aplicación de campo de la técnica de <i>PSVI</i> .	37
14	Esquema general del procedimiento de adquisición y procesamiento de datos sísmicos en un <i>PSVI</i> .	39
15	Diagrama de arreglo de geófonos y sensor piloto utilizado en la adquisición de datos.	40
16	Sección modelada utilizando la traza cruda obtenida del sensor piloto, propagada a través del modelo de la figura 13.	42

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
17	Sección sísmica obtenida por correlación cruzada de las trazas de la figura 16 con la traza piloto.	42
18	Mapa geográfico que muestra localizaciones epicentrales en el valle de Ojos Negros.	47
19	Representación gráfica del procedimiento para realizar el procesamiento de compresión por Transformada Ondicular.	51
20	Variación del tiempo de procesamiento para la familias de ondículas de Daubechies y Symmlet.	57
21	Prueba de umbral óptimo. Dependencia del porcentaje de energía conservada y el porcentaje de datos eliminados.	61
22	Razones de compresión y error de reconstrucción, en función de los filtros de la Transformada Ondicular.	62
23	Variación del error de reconstrucción de la sección sísmica.	63
24	Evolución del porcentaje de energía conservada en función de los filtros de Daubechies.	64
25	Error en decibeles en función de la razón de compresión obtenida para diferentes valores de S/R.	66
26	Representación del almacenamiento de datos comprimidos por medio de un arreglo de bitios.	68
27A	Gráfica de secciones normal, reconstruida y diferencia entre estas.	70
27B	Gráfica de secciones normal, reconstruida (y normalizada) y diferencia entre estas.	71
28	Registro del sismo E1430215 de tres componentes.	78
29	Representación de los coeficientes ondiculares en el plano tiempo-escala. Transformada Ondicular aplicada a la componente vertical del sismo E1420215.	79

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
30	Representación de los coeficientes ondiculares en el plano tiempo-escala. Transformada Ondicular aplicada a la componente este-oeste del sismo E1420215.	80
31	Sismograma con amplitudes de onda P de tipo impulsivo donde el máximo no corresponde al primer quiebre.	82
32	Secuencia de coeficientes ondiculares truncados bajo la aplicación sucesiva de umbrales de corte.	86
33	Cálculo de los coeficientes ondiculares y la asignación de sus posiciones en el tiempo.	88
34	Histograma de frecuencias de tiempos extraídos de la Tabla III.	94
35	Arribo P en un sismograma y el plano tiempo-escala para mostrar la fase P.	95
36	Arribos de P leído y calculado con Transformada Ondicular usando el filtro de Daubechies-4 para el evento E1481350.	96
37	Filtros utilizadas como kernel de la TO, aplicados a la base de datos.	97
38	Residuales de tiempo de arribo ($P_{\text{leído}} - P_{\text{calculado}}$) obtenidos al utilizar cuatro diferentes ondículas.	102
39	Combinación de residuales producidos por diferentes ondículas, aplicando los criterios que indican en su encabezado.	107
40	Histogramas representativos de los residuales de onda P después de aplicar los criterios de depuración.	108
41	Diagrama de flujo que representa el cálculo de tiempo de arribo de onda P usando TO.	111
42	Secuencia de coeficientes ondiculares truncados con la aplicación sucesiva de umbrales de corte desde 0.2σ hasta 5σ .	115
43	Posicionamiento de la ventana de búsqueda de los PCDC.	116

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
44	Histograma de frecuencia de los tiempos de ocurrencia de la tabla IX, correspondientes al evento E1580540, ondícula de Daubechies-4.	121
45	Acercamiento de las componentes horizontales del sismograma E1580540 para mostrar los tiempos de arribo de onda S leído y calculado.	123
46	Residuales de tiempo de arribo de onda S ($S_{leído} - S_{calculado}$) para cuatro diferentes ondículas.	126
47	Residuales de los tiempos de arribo de onda S ($S_{leído} - S_{calculado}$), para cada uno de los cuatro criterios de selección.	130
48	Histogramas representativos de los residuales de onda S para los cuatro filtros aplicados y después de aplicar los criterios de depuración.	131
49	Sismograma E1521512, que muestra la presencia de un ruido en forma de tren de alta frecuencia, el cual aparece súbitamente en el paquete de onda S.	134
50	Diagrama de flujo para el procedimiento de cálculo del tiempo de arribo de la onda S.	135
51	Errores en la estimación automática de los tiempos de arribo de onda P por otros letristas	140
52	Errores en la estimación automática de los tiempos de arribo de onda S por otros letristas	141
53	Esquema que ilustra los subespacios de interacción de las funciones de escalamiento y ondícula, así como algunas propiedades del <i>AMR</i> .	152
54	Ejercicio B1.	157
55	Ejercicio B2.	158
56	Ejercicio B3.	159
57	Ejercicio B4.	160

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
58	Componente vertical del evento E1530640 y los coeficientes ondiculares en el plano tiempo-escala. Ejemplo extremadamente ruidoso.	161
59	Ejercicio B5.	165
60	Ejercicio B6.	166
61	Ejercicio B7.	167
62	Gráfica de la variación en los tiempos leído por cuatro lectors de sismogramas, respecto a un lector de referencia. Onda P.	170
63	Gráfica de la variación en los tiempos leído por cuatro lectors de sismogramas, respecto a un lector de referencia. Onda S.	171
64	Agrupamiento de las formas de arribo más abundantes en el catálogo elaborado por los lectors de sismogramas. En la parte superior se muestran los filtros de ondícula seleccionados.	172

Lista de Tablas

Tabla		Página
I	Algunos sismos ocurridos en el Valle de Ojos Negros en el año de 1997.	64
II	Tiempo y amplitud del primer coeficiente diferente de cero en cada una de las escalas para distintos umbrales (evento E1421500).	89
III	Reducción de la Tabla II a los tiempos correspondientes a las primeras NE escalas, de los NU umbrales para el evento E1421500.	92
IV	Valores del histograma mostrado en la figura 34.	94
V	Tiempos de arribo, amplitudes y frecuencias de ocurrencia obtenidos con cuatro ondículas utilizadas (evento E1421500).	98
VI	Valores de tiempo de arribo de onda P leído y calculado para las ondículas utilizadas.	98
VII	Tiempos de arribo de onda P y residuales para cuatro criterios de selección.	104
VIII	Tiempos de arribo de la onda P, calculados según el criterio de tiempo menor.	109
IX	Tiempos de los <i>PCDC</i> resultado de aplicar la etapa (iii) sobre la TO sobre las dos componentes horizontales.	116
X	Vector de tiempos correspondientes a los <i>PCDC</i> de máxima Amplitud entre las cuatro primeras escalas de la tabla VIII.	120
XI	Valores del histograma ilustrado en la figura 44.	121
XII	Tiempos de arribo de onda S utilizando cuatro ondículas como kernel de la TO.	122
XIII	Tiempos de arribo de onda S para cuatro ondículas (base completa)	123
XIV	Tiempos de arribo de onda S, correspondientes a los cuatro criterios de selección de tiempos.	127
XV	Tiempos de arribo de onda S, elegidos por medio del criterio de promedio de las cuatro ondículas.	132

Lista de abreviaturas y simbología

$\uparrow 2$: Proceso de sobremuestreo (inserción de ceros)
$\downarrow 2$: Proceso de submuestreo (diezmado)
σ	: Desviación estándar
\in	: Elemento de
\cup	: Unión
\subset	: Pertenece a
3D	: Tres dimensiones
4D	: Cuatro dimensiones
AMR	: Análisis de Multi-Resolución
C	: Calidad
E-O	: Este-Oeste
ER	: Error de reconstrucción
FAC	: Falla Agua Caliente
FEC	: Filtros de espejo cuadrático
FTH	: Falla Tres Hermanos
h	: Profundidad ó altura
$L^2(\mathbb{R})$: Espacio de Hilbert
LAT	: Latitud
LONG	: Longitud
M	: Magnitud
NE	: Número de escalas
NEM	: Número de escalas máximo
NU	: Número de umbrales
NUM	: Número de umbrales máximo
N-S	: Norte-Sur
PA	: Filtro Pasa-altas
PB	: Filtro Pasa-bajas
PCDC	: Primeros Coeficientes Diferentes de Cero
PEC	: Porcentaje de Energía Conservada
PSV	: Perfil Sísmico Vertical
PSVI	: Perfil Sísmico Vertical Inverso
R	: Conjunto de los números reales
RB	: Razón de compresión (medida en cociente de bytes)
RC	: Razón de compresión
S/R	: Relación Señal-Ruido
TF	: Transformada de Fourier
TFTC	: Transformada de Fourier en Tiempo Corto
TIO	: Transformada Inversa Ondicular
TO	: Transformada Ondicular
VP	: Vector de Posicionamiento
W	: Operador de Transformada Ondicular // Complemento del subespacio V.
Z	: Conjunto de los números enteros

I

INTRODUCCIÓN

En las ciencias observacionales como la Geofísica y en particular en la Sismología, el análisis e interpretación de datos a menudo requiere de la presentación de la información en dominios diferentes al empleado en su captura (o adquisición). Por ejemplo, la transformación hacia el dominio de la frecuencia por medio de la Transformada de Fourier (TF) ha sido un procedimiento muy empleado en estas ciencias. Es necesario incrementar las posibilidades de transformación, para incluir pares de transformadas que amplíen las capacidades de presentación de la información, o que faciliten el manejo simultáneo de varios aspectos de la misma información.

La Transformada Ondicular (TO) presenta algunas ventajas sobre otros tipos de transformadas y de técnicas de filtrado. La mayoría de las transformadas establecen sólo una relación bivariable, por ejemplo amplitud contra frecuencia, como es el caso de la TF, la cual da información acerca de la energía de una componente de frecuencia de la señal por medio del espectro de potencia, pero nunca establece en qué tiempo o parte de la señal está presente esa energía. Por su parte, la TO establece en qué tiempo y con cuánta energía ocurre un evento de cierto contenido de frecuencia. De esta manera se puede eliminar efectos no deseados de una señal, o bien, detectar efectos interesantes que no se puede localizar por medio de algunas otras transformadas.

En la actualidad, existe un acelerado desarrollo de trabajos relacionados con la TO, sobre todo el desarrollo de bases de ondículas e investigación de sus propiedades teóricas (Meyer, 1993; Daubechies, 1993 y Coiflet, 1991, entre otros), así como en sus aplicaciones en variados campos de la ciencia (Mallat, 1989). En el ámbito de la Geofísica, la TO ha tenido numerosas aplicaciones (Kumar y Foufoula-Georgiou, 1997), por ejemplo: estudios de turbulencia atmosférica, determinación de parámetros hidrometeorológicos, reducción de ruido en señales, estudios de oleaje, extracción de ciertas características en señales, y compresión de datos.

En Sismología, la TO ha sido aplicada principalmente a tres problemas: identificación de fases sísmicas, eliminación de ruido en señales, y compresión de datos. Cohen y Chen (1993) muestran su aplicación al proceso de limpiar datos sísmicos (eliminación de ruido), apoyándose en trabajos realizados por Daubechies (1992) y Chun y Jacewitz (1981). Niitsuma *et al.* (1993) utilizan el análisis de TO para la discriminación de ondas de cizalla difractadas. Yomogida (1994) detectó algunas fases de terremotos que no se distinguían en sismogramas. Singh y Dowla (1997) aplican TO para detección de fases P y S en sismogramas de tres componentes. Deigan y Watts (1997) la usan para eliminar las ondas superficiales en registros sísmicos. Beylkin y Vassiliou (1998) hacen uso de la TO para la compresión de datos sísmicos. Saito (1994) utiliza la TO para aplicar simultáneamente compresión y supresión de ruido en datos sísmicos.

I.1 Objetivos

Desarrollar e implantar métodos basados en la TO, para dos aplicaciones en Sismología:

- 1) La compresión de datos sísmicos provenientes de ruido de barrenación, con aplicaciones en Sismología de exploración.
- 2) La detección automática de fases sísmicas en sismogramas de terremotos, específicamente de las ondas P y S.

La optimización de los procesos de adquisición y almacenamiento de datos constituye una de las grandes necesidades en cualquier ámbito de la ciencia. En el área de Geofísica, principalmente en Sismología de Exploración, la adquisición y almacenamiento de datos necesitan un gran espacio de memoria en los dispositivos de grabación o una suficiente cantidad de material de grabación. Una posible solución para aminorar este problema, como alternativa a aumentar la memoria, parte de la idea de aprovechar al máximo el espacio de memoria. Esto se logra utilizando lo que se llama “compresión” de datos.

La compresión de datos puede conseguirse a partir de varios métodos, los que pueden clasificarse, de manera general, en métodos sin pérdida de información y métodos con pérdida. Entre los primeros, los más usuales son los basados en algoritmos que detectan secuencias repetitivas de la unidad mínima de información (el bitio, o *bit* en la literatura inglesa); como ejemplo de ellos, se puede mencionar el algoritmo de Huffman

(Huffman,1952; en Press *et al.*,1992) y el algoritmo de Lempel-Zev-Welsh mejor conocido como método ZIP (Welsh,1984), entre otros. Aunque la conservación de toda la información puede ser muy conveniente en algunas aplicaciones, con ella no se consiguen los niveles de compresión requeridos en Sismología de exploración. Por otra parte, el segundo tipo de métodos basa sus esquemas de compresión en la eliminación de información no relevante contenida en los datos originales, y permite alcanzar altos niveles de compresión (arriba del 70%); el método más prometedor de este tipo está basado en la herramienta matemática conocida como Transformada de Ondícula o Transformada Ondicular, el cual presenta importantes ventajas adicionales a la mera compresión, ya que la eliminación de información no relevante puede ser diseñada de manera que funcione como un filtro para incrementar la relación señal/ruido.

La técnica de compresión de datos utilizada en este trabajo será del tipo calificado *con pérdida de información*. La información eliminada será elegida en el dominio ondicular, en donde es fácil discriminar aquella que no es relevante en la composición de la señal sísmica. Esto es, una vez obtenidos los coeficientes de ondícula, se eliminarán aquellos que, en una cierta posición de frecuencia y tiempo, tengan amplitudes pequeñas respecto a la desviación estándar de todo el conjunto de coeficientes. Se harán pruebas numéricas para determinar la combinación óptima de tipo de ondícula y nivel de truncamiento que produzcan resultados con pérdida mínima de energía y máximo de compresión en los datos. Adicionalmente, se verificará que la eliminación de información no relevante redunde en la eliminación de ruido (mejoramiento de la relación señal/ruido).

La aplicación de la técnica de compresión de datos sísmicos utilizando TO se ha llevado a cabo en los últimos años con mucho éxito, Jericevic y Sitton (1996) han logrado porcentajes de compresión entre 35% y 50 % utilizando como fuente el vibrosismo. Donoho *et al.* (1996) muestran compresiones hasta del 80% para datos unidimensionales; sin embargo, para datos multidimensionales se logra aumentar considerablemente la razón de compresión hasta 100:1, ya que se elimina gran cantidad de ruido no coherente haciendo uso de preapilamiento y postapilamiento, esto es aplicado a datos sísmicos tanto terrestres como marinos con tipo de fuente explosiva.

Las relaciones de compresión que se obtienen por medio de TO dependen de la naturaleza de la señal utilizada; además, la fijación de los parámetros estadísticos para determinar el umbral de corte varía en función de las distintas condiciones geológicas del sitio de exploración (Ergas *et al.*, 1996), los anteriores autores han realizado trabajos sobre datos obtenidos con diferentes tipos de fuente. En este trabajo se pretende aplicar una metodología para comprimir datos provenientes de una fuente distinta a la de tipo explosivo y más parecida a las señales originadas por la fuente del vibrosismo. Para las pruebas de aplicación de la metodología de compresión de señales, se empleará señales digitales obtenidas con perfiles sísmicos en un sitio sujeto a perforación con barrena rotatoria. A las señales grabadas en campo se les agregará ruido aleatorio real de diferentes amplitudes, para investigar los efectos que la relación señal/ruido produce en los criterios de optimización (pérdida mínima de energía y compresión máxima).

Respecto a la identificación de fases sísmicas, se intenta establecer un algoritmo computacional para identificar automáticamente en sismogramas digitales, los tiempos de arribo de ondas P y S, datos primordiales para cálculo de epicentros de terremotos. El criterio de identificación de fases que se desarrolla en este trabajo tiene su fundamento en los cambios esperados en las amplitudes de los coeficientes, en el plano tiempo-escala. Se diseña un procedimiento que busca cambios significativos en la amplitud, simultáneamente a lo largo de los ejes de *tiempo* y *escala*. Para la aplicación de la técnica de detección de fases P y S, se empleará sismogramas digitales de terremotos obtenidos en el valle de Ojos Negros, Baja California (Frez *et al.*, 2000); se seleccionará sismogramas con diversas combinaciones de distancia epicentral, longitud de registro, relación señal/ruido y forma de los paquetes de ondas P y S. La metodología será implantada en PC-compatible, utilizando el ambiente de MATLAB.

Actualmente existen algoritmos para la lectura automática de fases; algunos de ellos se basan en el análisis de las variaciones de un promedio móvil de valores de amplitud, declarando un arribo si el cociente entre un promedio actual y su precedente es mayor que un valor de umbral predeterminado, por ejemplo el descrito por Allen (1982). Allen (1978) logra aplicar una técnica con 0.05 s de error para el 70% de registros de una base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos; su técnica se apoya en una función de tiempo que combina el contenido de energía y el cuadrado de la primera derivada de un sismograma: $E(t) = f(t)^2 + f'(t)^2 + C$; de esta manera logra identificar los cambios abruptos contenidos en la primera derivada de la traza sísmica. También incluye modificaciones apoyándose en el valor absoluto de $f(t)$, sin tomar en cuenta el contenido energético de la

dominio ondicular y sin apoyo de otras herramientas matemáticas, con lo cual se pretende incrementar la precisión de los tiempos y el porcentaje de aciertos, así como disminuir el tiempo de cálculo.

II

METODOLOGÍA

II.1 El concepto de *Transformada*

Con mucha frecuencia, en las áreas de ingeniería y física-matemática, existen pares de funciones relacionadas por una expresión integral de la forma

$$g(\alpha) = \int_a^b f(t)K(\alpha, t)dt. \quad (1)$$

La función $g(\alpha)$ es llamada la Transformada de $f(t)$, a través del kernel $K(\alpha, t)$. Esta operación, denominada Transformada Integral, se describe (Arfken, 1995) como una proyección de la función $f(t)$ (definida en el dominio t), hacia una función $g(\alpha)$ (definida en el dominio α). La interpretación física más frecuentemente usada de la transformada integral (1) y de los dominios t y α , corresponde a la representación de una cierta información en los dominios del tiempo y de la frecuencia, y a las transformaciones que permiten las proyecciones entre ambos dominios.

En general, las transformadas integrales poseen dos propiedades de mucho interés en el análisis e interpretación de señales: 1) algunos procesos de difícil aplicación en un

dominio, pueden ser aplicados en el otro dominio fácilmente, lo cual puede ser aprovechado si las transformadas directa e inversa pueden ser aplicadas de manera ágil, y 2) la visualización de algunas características de la señal puede ser más directa y obvia en el dominio transformado que en el dominio original; ésto permite aislar una característica para su análisis, o eliminarla de la señal para enfatizar otras características de interés. Por ejemplo, la ubicación simultánea en tiempo y frecuencia de la energía contenida en la señal es prácticamente imposible en el dominio del tiempo, pero es muy sencillo en el dominio ondicular. Ambas propiedades son aprovechadas en este trabajo con el empleo de la TO.

Los diferentes tipos de transformadas poseen variaciones en la efectividad con que manejan las dos propiedades descritas antes; la función kernel o núcleo de la transformación es de suma importancia, ya que en gran medida determina las propiedades de la transformación. A continuación se da una descripción sucinta (definición y principales características) de la Transformada Ondicular.

Por medio de la TO los datos pasan del dominio del tiempo al dominio ondicular, donde se genera un número de coeficientes igual al número de datos muestreados de la señal:

$$x(t_i) \xRightarrow{W} X(f_j, t_k)$$

donde $x(t_i)$ son los valores muestra de la señal, y $X(f_j, t_k)$ son los coeficientes generados bajo la transformación (representada por la letra W), ubicados en un plano de tiempo-escala.

Cada coeficiente $X(f_j, t_k)$ representa la contribución de la señal original dentro de una banda de frecuencias y a un cierto tiempo, en función de los parámetros f_j y t_k . El primero controla las bandas de frecuencia en que se descompone la señal y el segundo controla la posición de las ventanas en las que se aplica la ondícula. La representación de las amplitudes de los coeficientes, en un plano definido por esos dos parámetros, constituye lo que se conoce como plano tiempo-escala, el cual forma la base para un análisis de multiresolución, similar al realizado por medio de las distribuciones bidimensionales obtenidas con la Transformada de Fourier de Tiempo Corto. Es decir, la TO proporciona información del contenido energético de una señal a partir de una localización simultánea en tiempo y frecuencia. Una de las aplicaciones del análisis de multiresolución es el tipo de filtrado de eliminación de ruido (conocido como *denoising* en la literatura inglesa), el cual resulta muy útil en secciones sísmicas que presentan problemas de análisis e interpretación espacio-temporal de algunas estructuras geológicas, dificultades debidas al ruido provocado por algunos eventos no deseados, por ejemplo: reflexiones *fantasmas*, difracción de ondas, ondas superficiales, onda de aire, etc. Este tipo de fenómenos sísmicos provoca situaciones engañosas e incluso inidentificables para la interpretación de las secciones sísmicas.

Cuando se eliminan coeficientes que representan montos de energía casi nulos o menores que un cierto umbral, se elimina un considerable número de datos en el dominio ondicular y se dice que el conjunto de datos ha sido truncado.

truncamiento

$$X(f_j, t_k) \Rightarrow X_T(f_j, t_k)$$

Esta reducción del número de datos en el dominio ondicular por medio del truncamiento provoca el efecto llamado “compresión” de datos. Una vez que los datos han sido truncados se puede recuperar la señal con un mínimo número de coeficientes (de aquí el término: “compresión”), regresando al dominio temporal mediante Transformada Inversa Ondicular (TIO)

$$X_T(f_j, t_k) \stackrel{W^{-1}}{\Leftrightarrow} x_R(t_i)$$

$x_R(t_i)$ son los valores muestra recuperados de la señal. Se realiza una comparación entre la señal recuperada $x_R(t_i)$ y la señal no comprimida $x(t_i)$, para establecer el grado de confiabilidad en la recuperación fiel de una señal que ha sido sometida a un proceso de compresión.

Por otra parte, es posible combinar las dos herramientas antes mencionadas: truncamiento de amplitudes en el dominio ondicular y análisis de multiresolución, para resolver problemas que tienen que ver con la variación del contenido energético simultáneamente con el tiempo y la frecuencia. Un ejemplo de aplicación en Sismología es la identificación de fases sísmicas en sismogramas.

deconvolución de ondícula, fase de ondícula, etc., ya que aquí representa un concepto asociado a una función base, capaz de generar formas de onda complejas por medio de sus combinaciones; la aplicación de este concepto ha abierto un nuevo campo en el procesamiento de señales.

Los diversos tipos de ondículas que se maneja en este trabajo son ortogonales y han sido tomados de la literatura existente, proporcionadas por matemáticos (Daubechies, Coiflet, Symmlet, etc.) que las han construido bajo rigurosos trabajos de investigación matemática. Se explicarán los detalles más importantes de este tema, principalmente los que se utilizarán para las aplicaciones que satisfacen los objetivos de este trabajo.

Dependiendo del parámetro de escalamiento a , la función de ondícula $\psi(t)$ se expande o se contrae en el tiempo, lo que causa una correspondiente contracción o dilatación en el dominio de la frecuencia. De acuerdo a la ecuación (2), si se tiene $a > 1$, la función $\psi_{ab}(t)$ es una versión contraída del prototipo de ondícula $\psi(t)$, o sea una de corta duración en el tiempo; mientras que para un $a < 1$; la función es una versión dilatada de la ondícula madre. La variación del parámetro a permite identificar los rasgos de corta o larga duración de la serie de tiempo. Por otra parte, el parámetro b controla el corrimiento aplicado sobre la ondícula, lo cual permite asociar los valores de éste con la ubicación en el tiempo. La figura 1 muestra estas versiones de ondícula contraídas y dilatadas, de acuerdo a los valores que toma el escalar a .

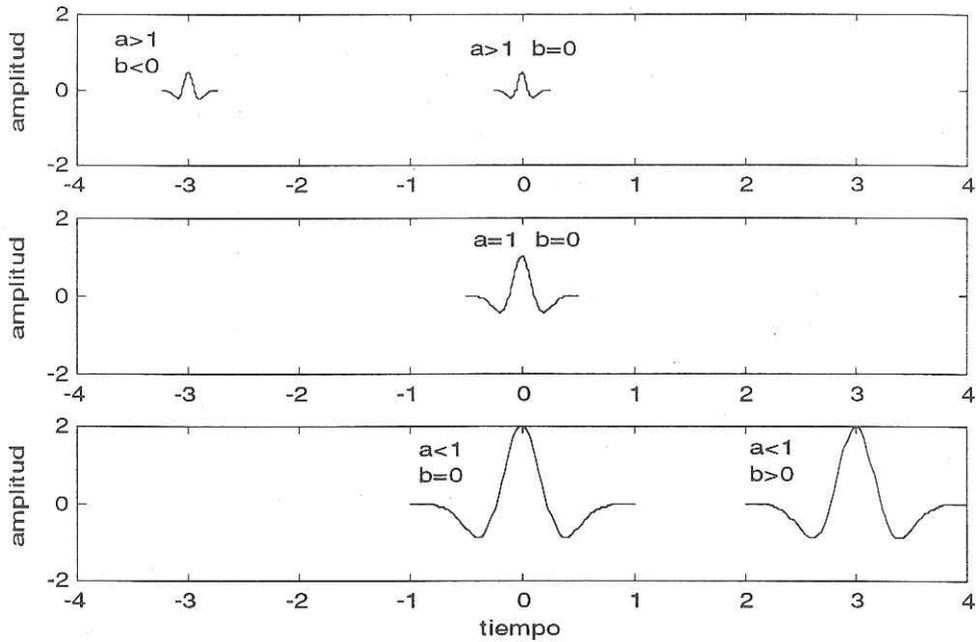


Figura 1. Versiones de la función de ondícula ψ , de acuerdo a los valores que toman los parámetros de escalamiento (a) y corrimiento (b).

Familias de Ondículas

Probablemente las ondículas ortogonales más usadas son las de la familia de Daubechies. Estas ondículas se identifican como ${}_N\Psi$, donde N indica el número de momentos desvanecientes de la ondícula, o el número de veces que la ondícula puede ser derivada; esto se expresa como:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) t^n dt = 0, \quad (3)$$

n toma valores enteros en el intervalo $[0, 2N-1]$.

II.2.2 Transformada Ondicular (TO)

En la sección anterior se definió el término ondícula y se habló de sus características prominentes: escalamiento, dilatación (o contracción) y corrimiento. A partir de esto, se define la TO continua como un producto interno de la señal $f(t)$ y la función expresada mediante (2), esto es

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

donde $a \in \mathbb{R}^+$, $b \in \mathbb{R}$.

Existe una gran cantidad de funciones $\psi(t)$ que podrían ser utilizadas en la TO, pero no todas son apropiadas. Un conjunto de ondículas ortonormales es el más adecuado debido a que satisface

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0; \quad (5)$$

es decir, deben tener media cero, con valores positivos y negativos, los cuales provocan el carácter oscilatorio de la misma. Además, deben satisfacer la condición de admisibilidad; de no ser así, no sería posible la reconstrucción de la señal $f(t)$ (Daubechies, 1992); dicha condición es expresada mediante la ecuación

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (6)$$

La condición de admisibilidad tiene sentido cuando se considera la definición de la Transformada Inversa Ondicular (Daubechies, 1992),

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2} \quad (7)$$

La ecuación (6) implica el tratamiento de funciones con energía finita y $\Psi(0) = 0$, de lo contrario la reconstrucción con (7) no es realizable debido a que $C_{\psi} = \infty$.

El cálculo de la TO por medio de la ecuación (4) se lleva a cabo mediante el uso de una función continua, llamada función de escalamiento $\phi(t)$, y otra (también continua) llamada ondícula “madre” u ondícula “analizante”, $\psi(t)$. En la mayoría de los casos, estas funciones vienen dadas en pares. La teoría matemática construye la ondícula madre $\psi(t)$ a partir de la ondícula de escalamiento $\phi(t)$, esta construcción se realiza bajo condiciones de ortogonalidad y ortonormalidad que son:

$$\int \phi(t) dt = 1 \quad (8)$$

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (9)$$

La ecuación (8) se puede interpretar como una especie de promedio, por lo que se le adjudican características de filtro de baja frecuencia, mientras que la (9) es interpretada como una diferenciación, por lo que se le adjudica el carácter de filtro de alta frecuencia (Cohen y Chen; 1993).

La definición de TO provee un *mapeo* de la señal unidimensional $f(t)$ hacia una función bidimensional $W_f(a,b)$, representable en el plano de resolución tiempo-escala; a y b son los parámetros de escala y tiempo, respectivamente. Esta representación bidimensional se rige bajo el concepto de Análisis de Multi-Resolución (AMR), el cual es descrito en forma breve en el apéndice A.

II.2.3 Transformada Ondicular Discreta

La Transformada Ondicular discreta se consigue mediante la discretización de los parámetros a y b como: $a = a_0^j$ y $b = kb_0 a_0^j$, por lo que (2) se convierte en

$$\psi_{j,k} = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0), \quad (10)$$

donde j y $k \in \mathbb{Z}$.

Los coeficientes calculados por medio de TO se expresan por el producto interno de la función de tiempo y la versión de ondícula representada mediante (10) como

$$d_{j,k} = \frac{1}{a_0^{j/2}} \int f(t) \psi(a_0^{-j}t - kb_0) dt. \quad (11)$$

Entonces se puede expresar cualquier $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ como la superposición

$$f(t) = \sum_j \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t). \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) son las expresiones analíticas que definen al par de transformadas discretas ondulares, directa e inversa, respectivamente. La implantación numérica de ellas se describe detalladamente en la sección II.2.6.

La Figura 2 muestra una representación de los coeficientes de la TO; los rectángulos representan las posiciones de los coeficientes sobre el plano tiempo-escala. Comúnmente, las amplitudes de los coeficientes son expresadas mediante tonalidades de color, y representan una medida del contenido energético de una señal para las diferentes resoluciones de tiempo y escala.

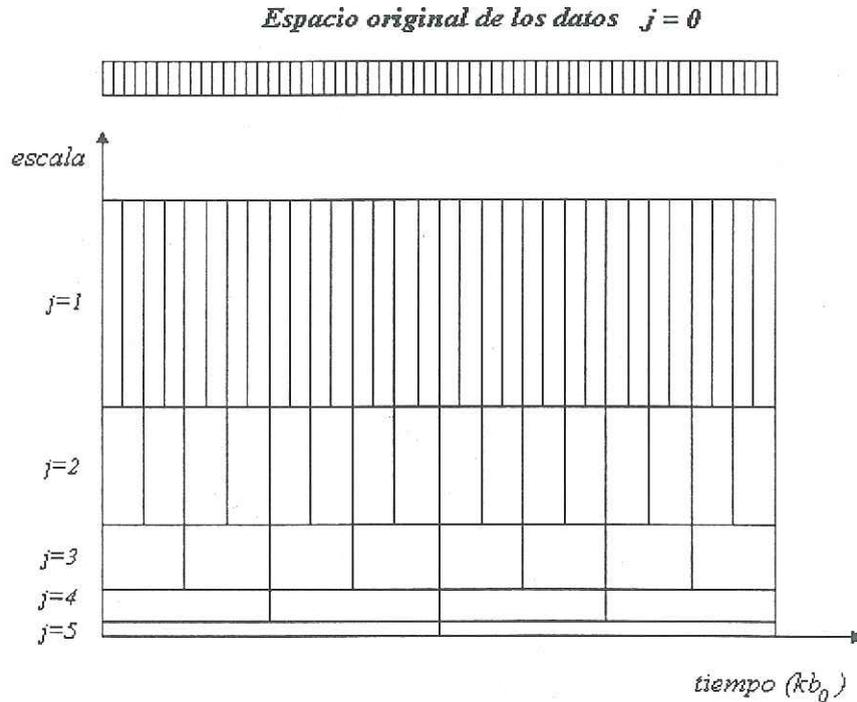


Figura 2 Distribución de los coeficientes ondulares en el plano tiempo escala. En el caso de una serie de $64 (2^6)$ datos, se tienen 64 coeficientes calculados $d_{m,n}$ y distribuidos en la tabla.

II.2.4 Filtros ligados a la Transformada Ondicular

Para explicar el procedimiento de cálculo de la Transformada Discreta Ondicular, primero es necesario hablar de los filtros que están involucrados para llevar a cabo esta transformación. En esta sección se comentará acerca de los filtros que se mencionan en la sección II.2.6, se describirá sus principales características en ambos dominios: tiempo y frecuencia.

Para efectuar los cálculos numéricos no es necesaria la construcción de las funciones de escalamiento $\varphi(t)$ y de ondícula $\psi(t)$ descritas en la sección II.2.2, basta utilizar dos tipos de filtros asociados a las mismas, los cuales, en el dominio de la frecuencia, son versiones de paso bajo y de paso alto. Dichos filtros extraen las características de baja y alta frecuencia de una señal, que en el campo de la Transformada Ondicular reciben el nombre de *generalidades* y *detalles*, respectivamente.

Mallat (1989), creó el algoritmo que produce la descomposición de una señal por medio de TO, así como el algoritmo de reconstrucción de la señal por TIO; éstos son conocidos como *codificadores en doble sub-banda* que utilizan *filtros de espejo cuadrático (FEC)*, llamados de esta forma por mantener una forma de reflejo respecto al valor de la mitad de la frecuencia de Nyquist.

De acuerdo con la existencia de dos funciones que satisfacen las ecuaciones (8) y (9) para la función de escalamiento φ , existe una secuencia $(h_k) \in L^2(\mathbb{R})$ tal que satisface la ecuación de escalamiento

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k). \quad (13)$$

Esta ecuación también recibe el nombre de ecuación funcional o ecuación de refinamiento. En general, existe la secuencia (h_k) para la colección de funciones $\{ \varphi_{j,k} \mid j, k \in \mathbb{Z} \}$, con $\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^j t - k)$.

Al integrar ambos lados de (13) y dividir entre la integral no desvaneciente de φ (ecuación 8), se tiene

$$\sum_k h_k = 1 \quad (14)$$

Esta última ecuación satisface la condición de ortogonalidad de la función de escalamiento en el caso discreto, expresada por (8) en el caso continuo, y no se necesita construir la función de escalamiento misma para aplicar la TO, basta con trabajar directamente con la secuencia h_k , la cual representa un filtro pasa-bajo en el dominio del tiempo.

De la misma forma que se obtuvo la secuencia (h_k) representativa de un filtro pasa-bajo y que satisface (14), se procede a obtener una secuencia (g_k) que representa el filtro pasa-alto. Existe una relación entre la función de ondícula que satisface (9), y una secuencia $(g_k) \in L^2(\mathbb{R})$ tal que

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k) \quad (15)$$

Los coeficientes g_k representan un filtro pasa-alto, por medio de la secuencia:

$$g_k = (-1)^k h_{L-k-1}, \quad (16)$$

donde L representa la longitud de la secuencia (h_k) . Los elementos de (16) satisfacen la condición de ortogonalidad en el caso discreto, expresada por (9) en el caso continuo, de acuerdo a:

$$\sum_k (-1)^k h_k = 0 \quad (17)$$

II.2.5 Relación de las formas de Ondícula y los filtros

La construcción de la función de ondícula $\psi(t)$ se logra con la ayuda de la secuencia de coeficientes g_k de (16); la cual es una inversión en el orden de los coeficientes h_k , con cambios alternantes de signo en los coeficientes impares. La función $\psi(t)$ se construye mediante un proceso iterativo usando la ecuación de refinamiento (15). Del mismo modo, la construcción de la función de escalamiento $\varphi(t)$ se realiza mediante la ecuación de refinamiento (13). De esta forma se puede obtener en forma iterativa las funciones de ondícula y escalamiento con los coeficientes de filtro h_k y g_k .

Con propósito de ilustración de los conceptos definidos antes, en las figuras 3 y 4 se muestra ejemplos de ondículas (Daubechies-2 y Symmlet-4) y los filtros asociados de descomposición (c y d) y reconstrucción (e y f); las ondículas mostradas en (a) y (b) se construyeron con las ecuaciones de refinamiento (13) y (15). Las figuras 5 y 6 muestran las características, en los dominios del tiempo y la frecuencia, de los filtros asociados con las ondículas Haar y Daubechies-5. El número de coeficientes en los filtros de las bases de Daubechies es $2*N$ donde la etiqueta N representa el número de momentos desvanecientes de la ondícula. El caso ilustrado para Daubechies-5 contiene 10 coeficientes. Para las bases de Coiflet el número de coeficientes es de $6*N$ y para las bases de Symmlet se tienen $2*N$ coeficientes. El banco existente de filtros para la familia de Daubechies comprende filtros con valores de N desde 1 hasta 45 (el filtro de Haar es un caso especial de Daubechies-1); para la familia de Coiflet de 1 a 5, y para la de Symmlet de 2 a 45.

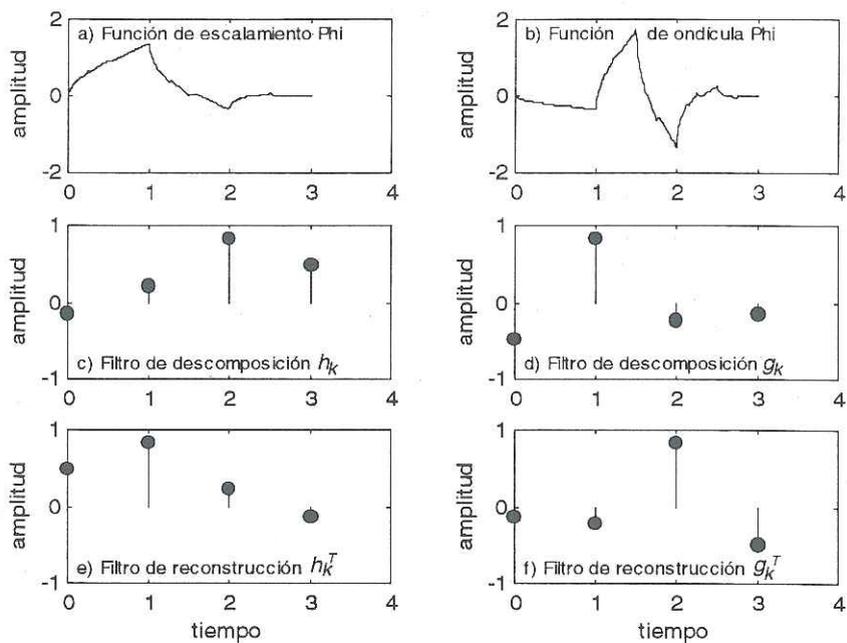


Figura 3. Ondículas de Daubechies-2 y filtros de descomposición y reconstrucción.

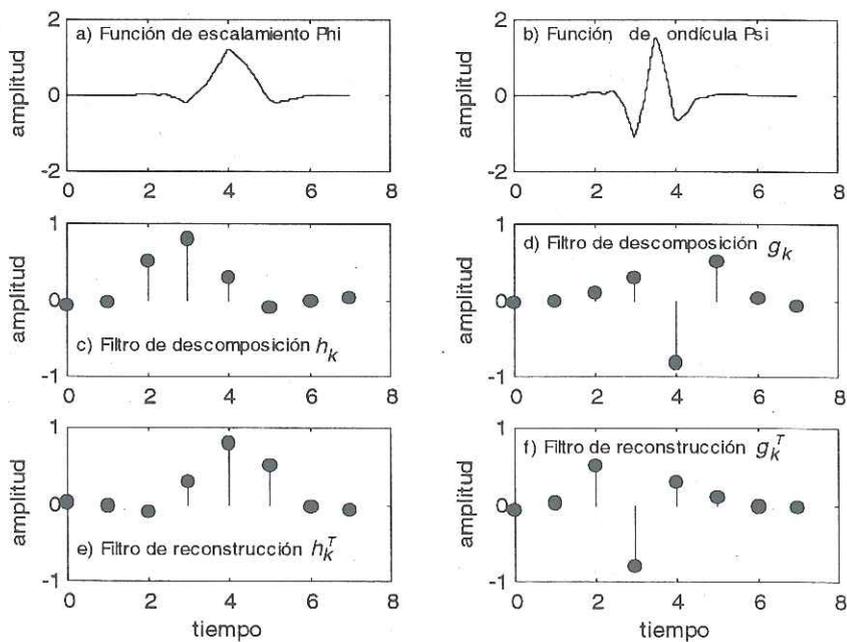


Figura 4. Ondículas de Symmlet-6 y filtros de descomposición y reconstrucción.

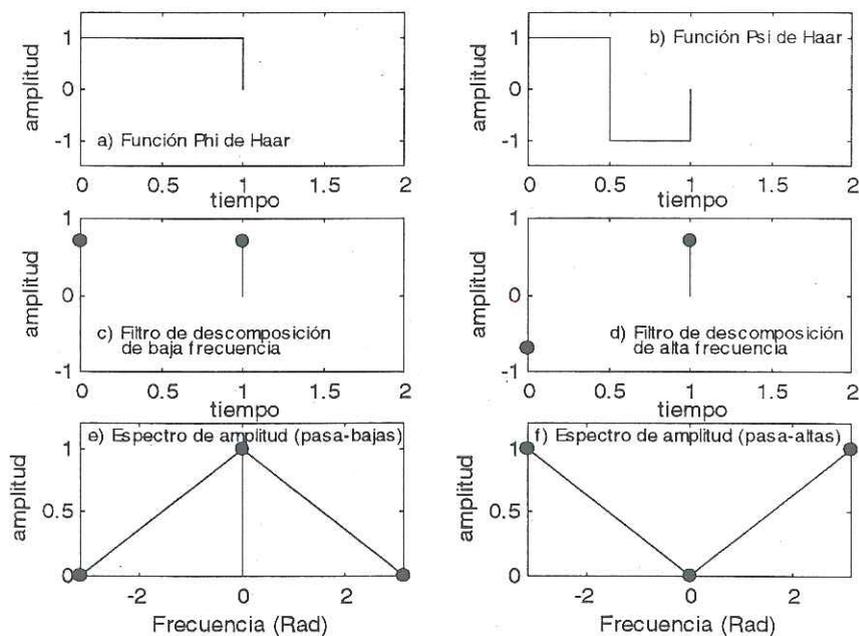


Figura 5. Función de escalamiento y de ondícula de Haar (a y b). Filtros de descomposición de Haar de baja frecuencia y alta frecuencia (c y d), y sus espectros de amplitud (e y f).

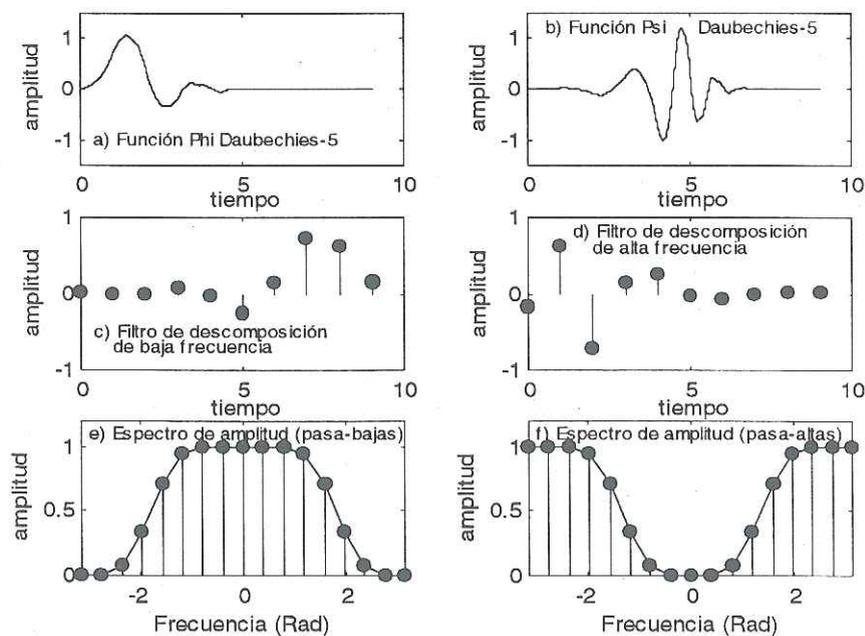


Figura 6. Función de escalamiento y de ondícula de Daubechies-5 (a y b). Filtros de descomposición de Daubechies-5 de baja frecuencia y alta frecuencia (c y d) y sus espectros de amplitud (e y f).

De acuerdo con la ecuación 11, la descomposición de una señal (hacia el dominio tiempo-escala) con TO, se reduce a la aplicación de los filtros de descomposición, como los mostrados en las figuras 3 y 4; la posterior reconstrucción de la señal con TIO (hacia el dominio del tiempo usando la ecuación 12), se lleva a cabo mediante la aplicación de los filtros de reconstrucción, ejemplos de los cuales también se muestran en las figuras 3 y 4. Puede notarse en esas figuras que los filtros de descomposición y reconstrucción son versiones especulares uno del otro (invertidos en el tiempo), lo cual es resultado de las condiciones de ortogonalidad para el caso discreto (ecuaciones 14 y 17). Con esta última propiedad, la aplicación de la TO se puede diseñar por medio del producto de una matriz C con un vector x ; los elementos de la matriz son los coeficientes de los filtros; el vector columna x contiene los datos a transformar, y el vector resultante y representa la secuencia de datos transformados. La matriz que representa al filtro de reconstrucción (transformada inversa) es simplemente la transpuesta de la matriz que representa al filtro de descomposición (transformada directa); en las figuras 7 y 8 se muestran las operaciones como productos matriciales. Press *et al.* (1992) presentan una discusión más detallada de este procedimiento.

II.2.6 Procedimientos numéricos usados por la Transformada Ondicular

II.2.6.1 La descomposición

Como la Transformada de Fourier (TF), la Transformada Ondicular Discreta (TOD) es una rápida operación lineal que actúa sobre un conjunto de datos, transformándolo en un vector numéricamente diferente. Como la TF, la TO también es invertible y biortogonal.

Los procesos de corrimiento y escalamiento son controlados por medio de los parámetros b_0 y a_0 (introducidos en las ecuaciones 10 y 11), respectivamente; este último frecuentemente toma el valor de 2. A continuación se explica el procedimiento de aplicación de la TO sobre un conjunto de datos que representa una señal muestreada.

- i) Se considera un vector de datos S^0 (el cero no representa un exponente, sino el sub-espacio en el cual se encuentran los datos) de longitud M , con intervalo de muestreo Δt .
- ii) En la primera etapa, la TO divide al vector de datos en dos sub-vectores A^1 y D^1 , cada uno de longitud $M/2$ e intervalo de tiempo *submuestreado* $2^1\Delta t$ (“downsampling”). Esto se logra mediante la aplicación de la ecuación 11, primeramente con $j=1$, $a_0=2$, $b=1$, con lo cual se tiene

$$d_{1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f(t) \psi(2^{-1}t - k) dt$$

$$a_{1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f(t) \phi(2^{-1}t - k) dt$$

Los subconjuntos $A^1 = \{ a_{1,k} \}$ y $D^1 = \{ d_{1,k} \}$ son los coeficientes calculados en el primer paso de descomposición, éstos se someten a un proceso de submuestreo para obtener la mitad de la longitud del vector original, entonces $k = 0 \dots M/2$. La figura 9 muestra un esquema de esta etapa.

- iii) El vector D^1 (de longitud $M/2$) se retiene como la primera porción de la TO del vector de datos S^0 , y el proceso de partición se repite sobre A^1 para producir A^2 y D^2 , a su vez submuestreados al intervalo $2^2\Delta t$. En este punto se pierde A^1 , se conserva D^2 , y a partir de A^2 inicia el siguiente paso de la descomposición. El vector D^1 contiene los coeficientes de ondícula correspondientes a las secuencias más altas (desde la mitad de la secuencia de Nyquist hasta la secuencia de Nyquist) contenidas en la señal original S^0 , por lo que ocuparán la escala con el índice menor del plano tiempo-escala; mientras que en A^1 permanecen las secuencias correspondientes desde cero hasta la mitad de la secuencia de Nyquist. Este proceso continúa hasta el J -ésimo paso, según sea el nivel máximo de descomposición de la señal, en el cual se obtienen D^J y A^J . Los elementos de estos últimos subvectores tienen un intervalo de muestreo de $2^J\Delta t$; corresponden a las secuencias más bajas contenidas en la serie original y son almacenados en la escala con índice mayor del plano tiempo-escala. En la figura 10 se muestra un diagrama completo del proceso descrito en esta etapa.

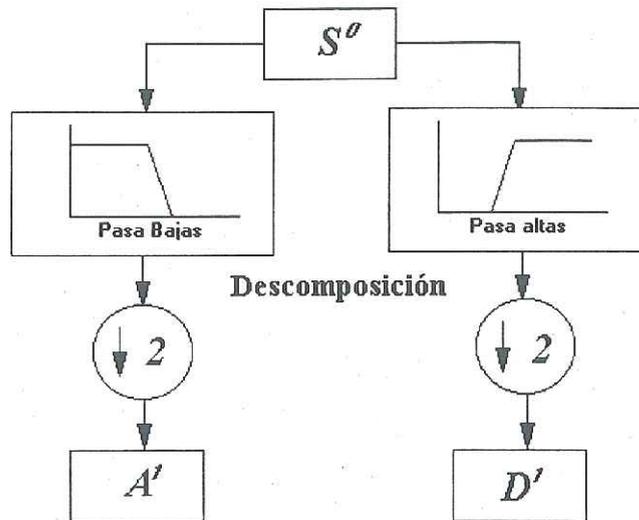


Figura 9. Primer paso de la descomposición por TO: proceso de filtrado y aplicación de submuestreo, para la obtención de las componentes de A^j y D^j .

En el esquema de la figura 10, los términos D^j y A^j representan a los subvectores que contienen los “detalles” y “generalidades”, que resultan de la aplicación de la TO con dos filtros; uno que extrae las componentes de corta duración y el otro las de larga duración. El proceso se completa con la ubicación, en el plano de resolución tiempo-escala, de las componentes extraídas. El valor que se asigna a j , en la ecuación 11, durante el proceso de cálculo de los coeficientes, determina la escala de componentes (corta o larga) que es extraída de la señal original, de tal manera que j se identifica con el subespacio de los datos; debido a esto, j es llamado *nivel* o *escala* de los datos.

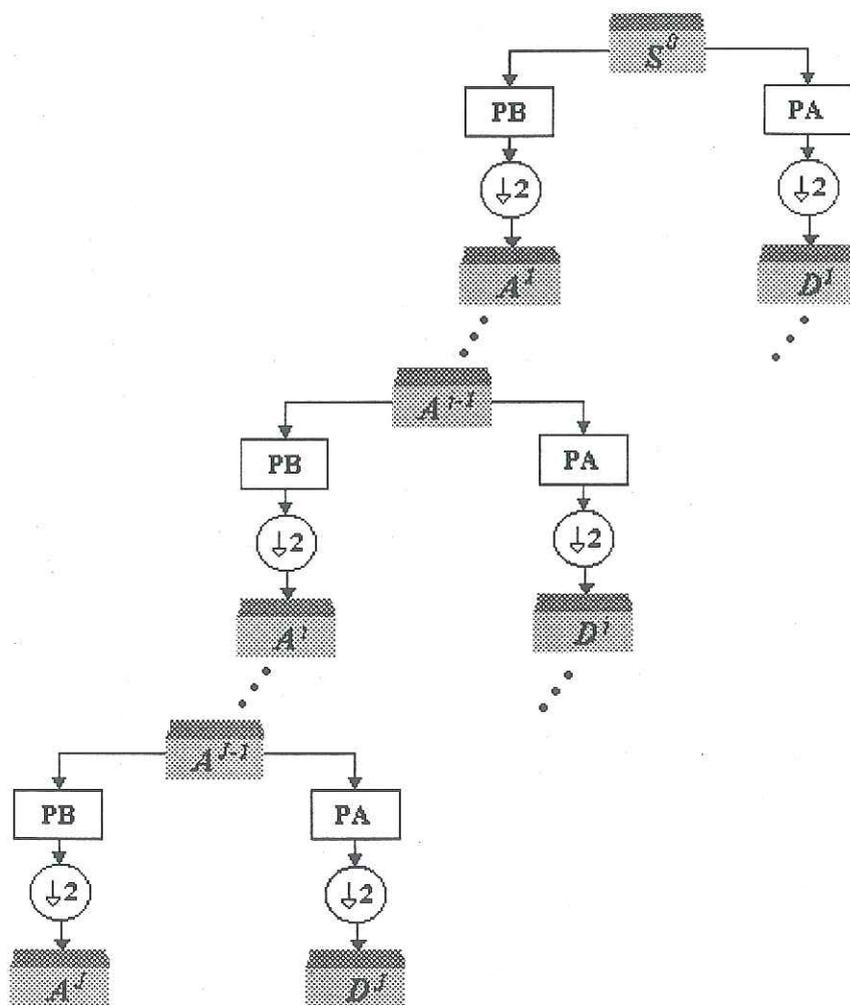


Figura 10. Secuencia total de descomposición por TO. Los datos transformados corresponden a las secuencias D^1, \dots, D^J , incluyendo el bloque de generalidades A^J .

II.2.6.2 La reconstrucción

La reconstrucción de la serie de tiempo a partir de los coeficientes distribuidos en el plano tiempo-escala se consigue con la aplicación de la TIO. Este proceso se describe a continuación:

- i) Se sobremuestra (*up-sampling*) los vectores A^j y D^j ($j = J, \dots, 1$) obtenidos en la transformada directa, para reducir a la mitad el intervalo de muestreo (o aumentar al doble el número de puntos), colocando ceros en los puntos intermedios.
- ii) Se aplica filtros de reconstrucción sobre cada uno de los vectores sobremuestreados. Debido a las condiciones de ortogonalidad (sección 2.2.2) del par de transformadas (directa e inversa) de ondícula, los filtros de reconstrucción son las imágenes especulares de los filtros de descomposición empleados en la transformada directa.
- iii) Se suma los dos vectores sobremuestreados y filtrados.
- iv) Se repite los anteriores tres pasos para cada nivel de descomposición.

La figura 11 muestra, en detalle, el esquema de reconstrucción a partir de los subvectores A^1 y D^1 obtenidos en una descomposición con $j=1$. La figura 12 ilustra el esquema completo de la aplicación de la TIO, sobre los subvectores $A^J, D^J, D^{J-1}, \dots, D^1, \dots, D^1$, resultantes de una descomposición hasta el nivel J .

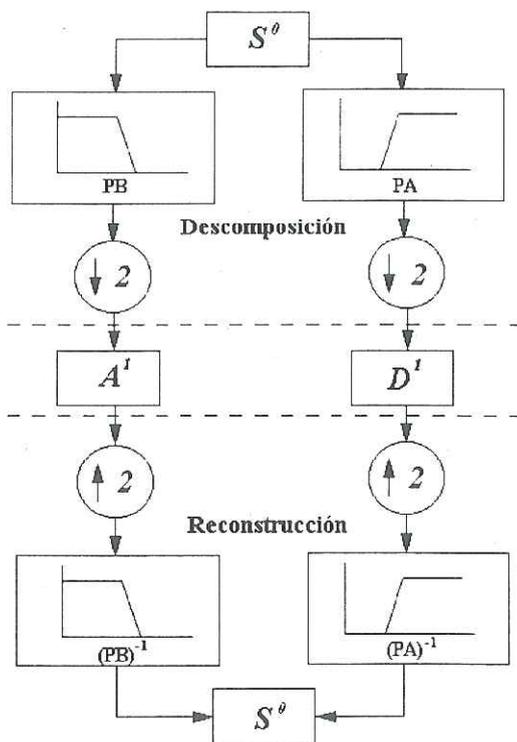


Figura 11. Detalle del proceso de reconstrucción llevado a cabo sobre los subvectores A^j y D^j producidos en una descomposición con $j=1$.

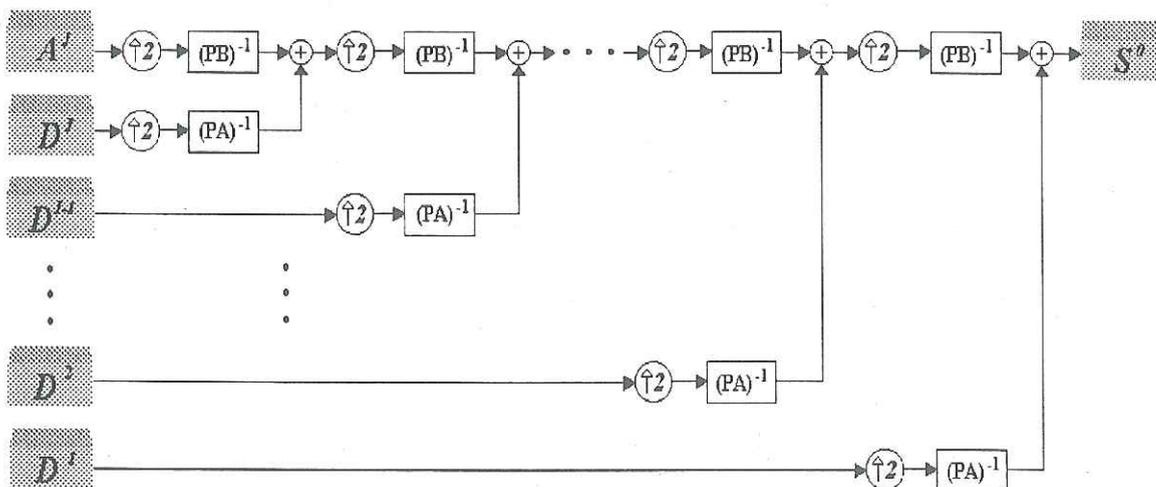


Figura 12. Reconstrucción total de la señal original S^0 , a partir de los bloques de datos $A^j, D^j, D^{j-1}, \dots, D^2$ y D^1 .

La aplicación del filtro pasa-bajo en el proceso de creación de los sub-vectores A^j , previa al submuestreo, elimina la contaminación del fenómeno "alias"; mientras que la aplicación del filtro pasa-altas en la creación de los subvectores D^j , también previa al submuestreo, elimina la contaminación del "alias", aún cuando exista un trastocamiento de las armónicas, lo cual puede ser corregido fácilmente (Strang y Nguyen, 1996).

III

Datos

Las dos aplicaciones sismológicas cubiertas en esta tesis están basadas en dos conjuntos diferentes de datos que en este capítulo se describen con detalle:

- 1) Trazas sísmicas obtenidas mediante el método geofísico Perfil Sísmico Vertical Inverso (PSVI), con una fuente de energía producida por una barrena rotatoria de perforación (ruido sísmico de barrenación).
- 2) Sismogramas digitales de terremotos, en tres componentes, registrados en la región del valle de Ojos Negros, Baja California.

III.1 Señales de barrenación

El método de Perfil Sísmico Vertical (PSV), en su aplicación estándar, utiliza sensores colocados a diferentes profundidades dentro de un pozo vertical, para registrar señales sísmicas originadas en fuentes (preferentemente explosivas) en las cercanías de la superficie. En ese esquema pueden presentarse varios problemas; uno de ellos es la dificultad para posicionar adecuadamente los sensores dentro del pozo, otro es la alteración del medio vecino a la fuente por la repetición de explosiones. Por otro lado, la inversión del esquema fuente-sensores (PSVI) permite el posicionamiento preciso de los sensores a lo largo de un perfil en la superficie, aunque la liberación de la energía a diferentes profundidades puede ser problemático si la fuente empleada es explosiva. Este último

inconveniente de los PSVI puede eliminarse con el empleo del ruido provocado por una barrena de perforación, lo cual crea un esquema formado por una *fente movible* con la profundidad y un arreglo fijo de sensores en superficie, por lo que la técnica se denomina Perfil Sísmico Vertical Inverso.

Rector y Marion (1991) discuten dos trabajos previos: Lutz *et al.* (1972), quienes midieron señales producidas por un barreno colocando sensores en la mesa de apoyo del mismo, y observaron que las amplitudes de las vibraciones estaban correlacionadas con la litología que cortaban en ese momento los dientes del barreno; por ejemplo: fueron observadas amplitudes grandes cuando se atravesaba formaciones rocosas competentes; Deily *et al.* (1968), quienes registraron ruido producido por barrena de perforación y observaron una banda espectral ancha, con una frecuencia dominante tres veces mayor que la de la mesa rotatoria. Rector y Marion (1991) concluyen que las vibraciones producidas en la punta del barreno podrían contener suficiente energía en un ancho de banda amplio, lo cual las califica como una fuente sísmica apropiada para aplicar el método PSVI. Las principales características de esta fuente serían: a) la energía queda distribuida a lo largo del tiempo (semejante a la fuente llamada *Vibrosismo*); ésto es una ventaja en cuanto permite introducir una gran cantidad de energía al medio terrestre, sin llegar a los efectos no lineales en la fuente, sin embargo, requiere de un proceso de correlación para recuperar los arribos reflejados; b) se producen señales a diferentes profundidades debido al avance de la barrena, lo cual permite *observar* la columna estratigráfica con diferentes geometrías fuente-sensores.

Una vez generada la señal, ésta se propaga a través del medio estratigráfico, hasta ser registrada en los geófonos colocados en un perfil horizontal sobre el suelo; así como también se propaga a través del eje metálico de la barrena, hasta ser registrada en un sensor colocado en la boca del pozo. La figura 13 muestra un esquema de la geometría involucrada en la aplicación de este método de adquisición de datos; en la figura se ilustra sólo un sensor sobre el perfil horizontal, situado a la distancia x , así como el sensor de pozo. Los datos que contiene el modelo presentado en la figura 13 son explicados en la siguiente sección.

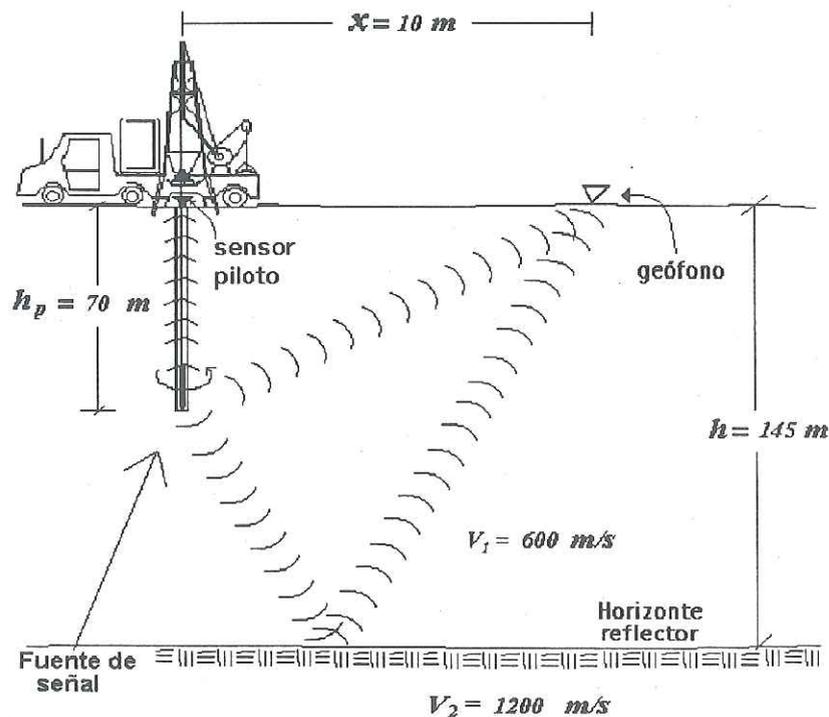


Figura 13. Representación de la geometría involucrada en la aplicación de la técnica PSVI, con una fuente de señales sísmicas constituida por la interacción de la barrena rotatoria de perforación con el material rocoso.

En la figura 14 se muestra el esquema completo de adquisición y procesamiento de datos aplicable sobre las series de ruido originadas en la punta de la barrena de perforación. En esa figura, la etiqueta 1B identifica la opción *directa*, aquella en la cual las señales registradas por los sensores del perfil y por el sensor piloto son almacenadas sin compresión; o bien, son sometidas al proceso de correlación cruzada para la construcción de los sismogramas. La opción de *mínimo almacenamiento* propuesta en esta tesis se inicia en el paso etiquetado como 1 en la misma figura (compresión), para continuar con el almacenamiento de las señales comprimidas; posteriormente se aplicarían los pasos 3 y 4 (reconstrucción y correlación). En cualquiera de las dos opciones, la base de datos inicial está constituida por las series de tiempo registradas en los sensores del perfil más el sensor piloto. El paso con etiqueta 5 en la figura 14, es aplicable en el desarrollo de este trabajo, y tiene como finalidad verificar la funcionalidad del método, pero en la implantación de este metodología en el ambiente de exploración no lo incluye.

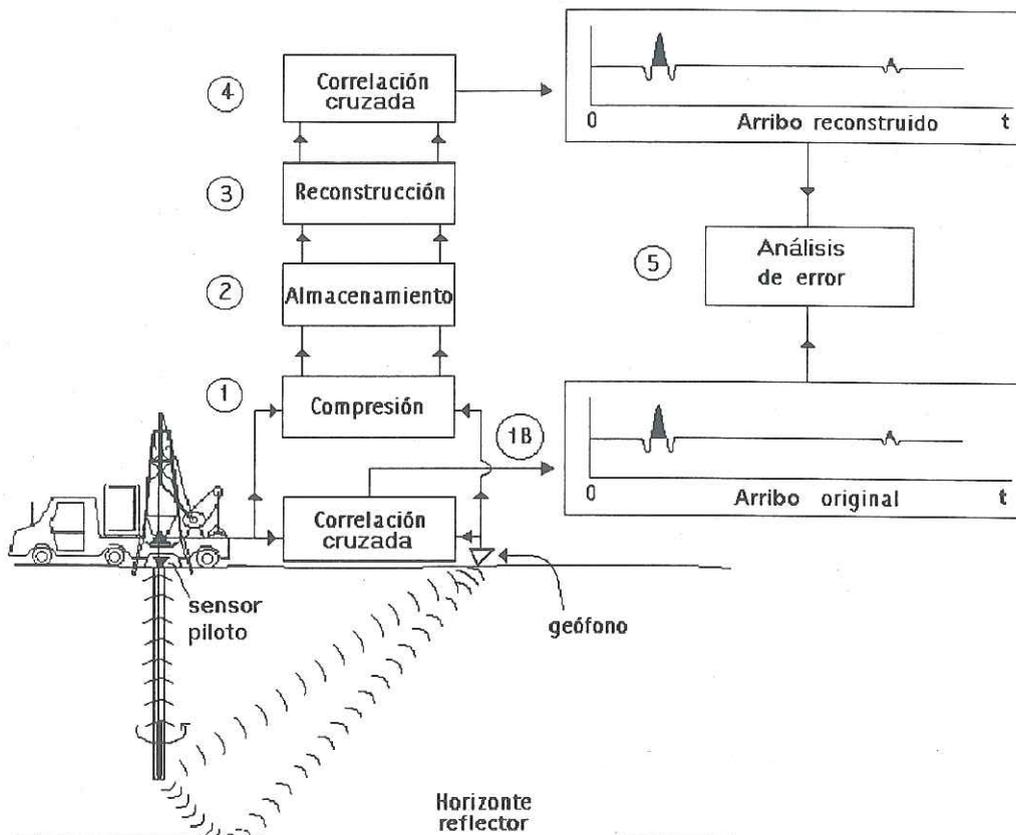


Figura 14. Esquema general de adquisición y procesamiento de datos sísmicos en un PSVI. La etiqueta 1B indica la opción *directa* que lleva al almacenamiento de las señales completas (sin compresión), mientras que la secuencia 1 a 4 representa la opción de *mínimo almacenamiento* desarrollada en esta tesis.

En este trabajo se empleó 24 sensores en el perfil, dispuestos como se ilustra en la figura 15; Los sensores son de tipo Mark L-40 A-2 de componente vertical, con una frecuencia natural de 100 Hz., con respuesta plana hasta 1000 Hz; y con una constante del transductor de 0.22 V/cm/s. La separación entre sensores fue de 10 m; para la grabación de los datos se utilizó un sismógrafo digital EG&G Geometrics, modelo ES-2415F de 24 canales, la longitud de registro de cada canal es de 4.096 segundos y el intervalo de muestreo de 4 ms.

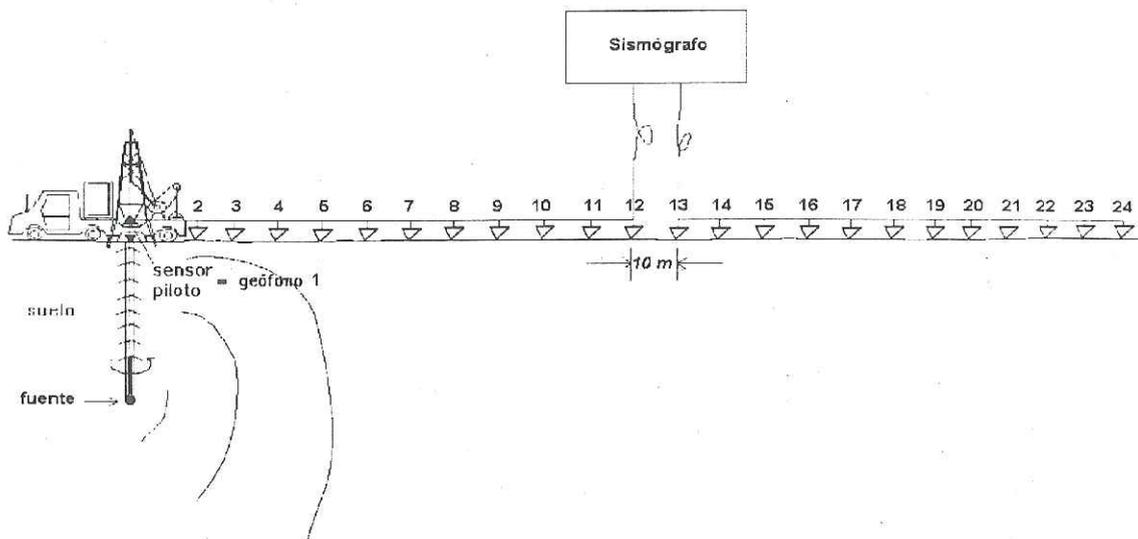


Figura 15. Diagrama del arreglo de los sensores (∇) y sensor piloto (▲) utilizados en la adquisición de datos. El brocal del pozo de perforación se indica con un pequeño círculo (●) en el fondo del pozo.

III.1.1 Información litológica del pozo

La información litológica para el modelo de la figura 13, fue obtenida a partir de un pozo perforado a una profundidad de 150 m y con un diámetro de 5 cm. Existe un estrato grueso de arena débilmente consolidado que sobreyace a una capa de arcilla fina encontrada a 145 m y contrastantemente dura respecto a la primera capa. Esta información resultó de la perforación de un primer pozo; posteriormente se realizó una segunda perforación exactamente en el mismo punto, pero con un diámetro más grande en el tamaño de la boca del pozo (20 cm), y con esta segunda barrenación se llevó a cabo la adquisición de los datos.

La combinación de estratigrafía y geometría del PSVI utilizada no produjo reflejos claros cuando se aplicó el proceso de correlación cruzada de acuerdo al paso 1B del diagrama mostrado en la figura 14. Lo que se propone ahora, es tomar la señal cruda del sensor piloto y realizar su propagación a través del modelo geológico de la figura 13, con el objetivo de estudiar la compresión de unos datos que tienen naturaleza igual a la esperada en perforaciones de barrena rotatoria. Los valores de velocidad establecidos en este modelo para la arena y la arcilla son 600 y 1200 m/s, respectivamente; la profundidad del pozo en el momento de tomar los registros era de 70 m, la velocidad de penetración en el momento fue de 8 m/hr, debido a esta velocidad de perforación, la obtención de alrededor de 15 registros de 4 s cada uno, puede considerarse no afectada en la profundidad.

Una sección sísmica modelada con la propagación de una señal real, se muestra en la figura 16. A esta sección se le agregó un porcentaje de ruido real, tomado de cada una de los geófonos, con un factor de escalamiento de tal forma que la relación $S/R = 2$. La sección sólo muestra 22 trazas (ya que se utilizaron 24 geófonos para la adquisición), se ha excluido la traza piloto y el geófono 24 ya que este último tenía mal funcionamiento.

En la figura 17 se muestra la sección correlacionada con el sensor piloto, en ella se puede apreciar los tiempos de arribo de la onda directa y reflejada. En la figura se ha representado la información hasta 1 s de registro para propósitos de una mejor apreciación.

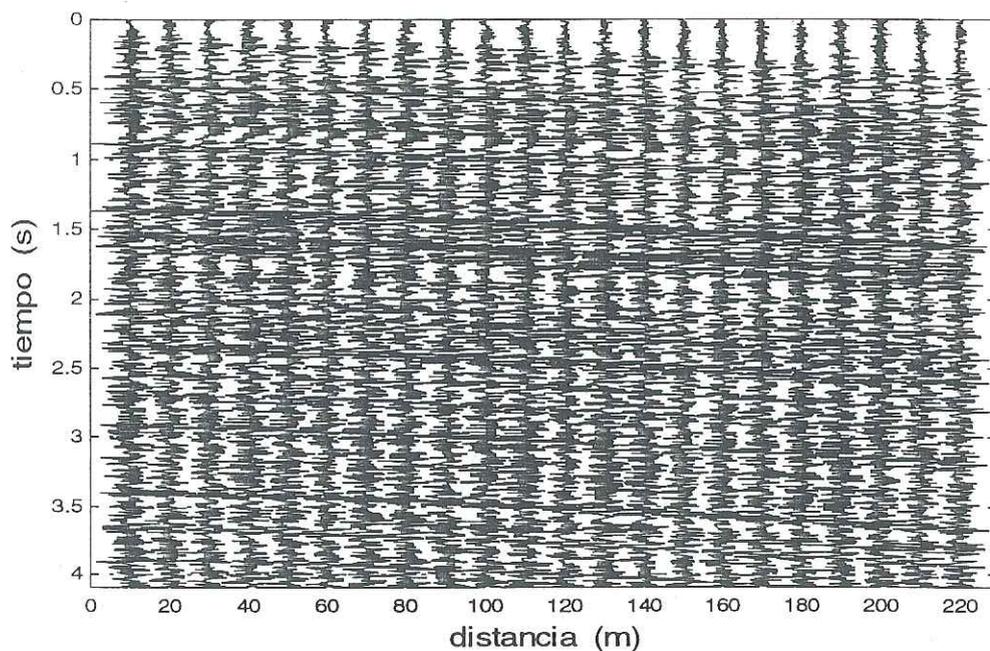


Figura 16. Sección obtenida de la propagación de la señal piloto a través del modelo de la figura 13, con la adición de ruido natural obtenido en cada geófono.

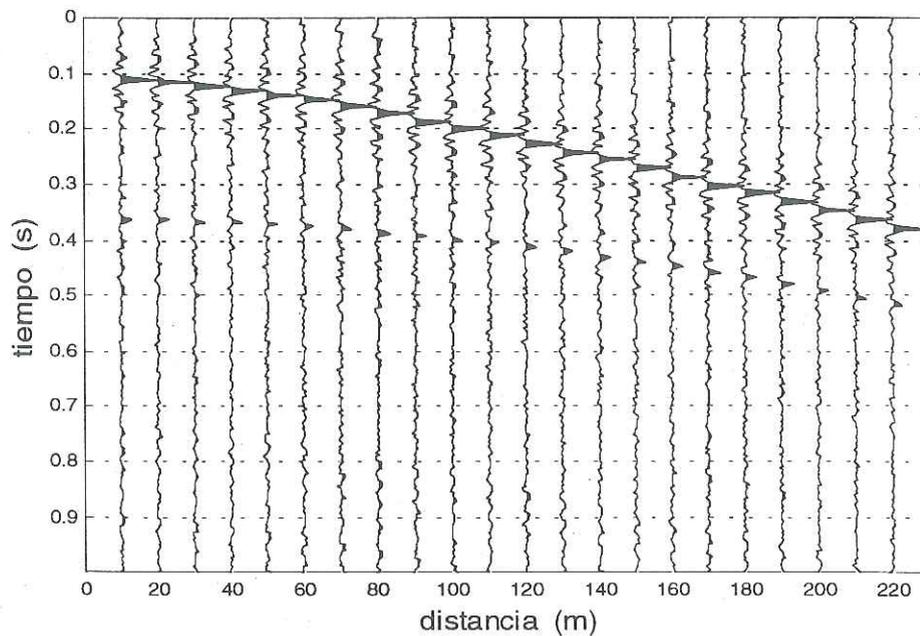


Figura 17. Sección sísmica obtenida por correlación cruzada de las trazas de la fig. 16 con la traza del sensor piloto. Se aprecia el arribo directo en la traza 1 a un tiempo de 0.11 s y el reflejado a 0.37 s.

III.2 Datos de terremotos

Se utilizó una base de datos de sismogramas digitales de tres componentes (N-S, E-O y Vertical), de terremotos registrados en la región del valle de Ojos Negros, Baja California, durante el año de 1997 (Frez *et al.*, 2000). Con esta base de datos se busca probar un algoritmo que permita establecer en forma automática la identificación de arribos de ondas P y S, principales fases para la determinación de hipocentros de terremotos. El algoritmo se prueba con 140 eventos, de variadas localizaciones hipocentrales y variados valores de magnitud. Las grabadoras utilizadas para el registro de los eventos son REF TEK 72A-07; se utilizó sensores de velocidad MARK L22, con respuesta en frecuencia plana de 2 hasta 100 Hz, que registraron a un intervalo de muestreo de 0.005 s. La Tabla I muestra la localizaciones epicentrales (latitud y longitud), magnitudes (M) y profundidades (h) de los terremotos que conforman la base de datos, también se muestra la calidad (C) de estos parámetros calculados por medio de las letras de la A a la D, siendo A el mejor valor y D el peor. También se utilizó los registros de algunos sismos que no tienen localización hipocentral. El nombre de los eventos corresponde a la siguiente descripción: la letra significa la estación donde fueron registrados y el número corresponde al día juliano, la hora y el minuto en que ocurrieron. Los epicentros de la tabla anterior se muestran en la figura 18, las distancias epicentrales son menores a 100 km; la profundidad de estos eventos está en el rango de 3.1 a 19.86 km; el rango de magnitudes es de 0.1 a 2.5 en la escala de Richter.

Los tiempos de arribo contra los cuales se comparan las estimaciones producidas por la metodología desarrollada en este trabajo son el resultado de la lectura independiente de los arribos de P y S de los 140 sismogramas que componen la base de datos, realizada por cuatro personas diferentes: dos lecturas por un sismólogo investigador, otra por un técnico de Sismología (con 20 años de experiencia en lectura de sismogramas), otra por un técnico de Sismología (con 10 años de experiencia), y otra por el autor. El conjunto de tiempos de arribo leídos empleado en el cálculo de los errores (capítulo V) es el producido por el lectorista con mayor experiencia. En el resto de este texto se referirá a este conjunto como *tiempos de arribo leídos*. El análisis de la dispersión de los cinco conjuntos de tiempos leídos se presenta en el apéndice C. Estos valores de dispersión fueron utilizados como referencias en las pruebas de la metodología de detección automática de tiempos de arribo; las gráficas de residuales presentadas en el capítulo V muestran barras horizontales en ± 0.1 segundos, que cubren la mayor parte de la dispersión en los tiempos leídos.

Tabla I. Características de los sismos empleados en este trabajo, ocurridos en el Valle de Ojos Negros en el año de 1997 (Frez *et al.*, 2000).

SISMO	LAT.	LONG.	M	h	C	SISMO	LAT.	LONG.	M	h	C
E1420451	32-04.04	116-19.74	0.3	9.96	C1	E1530350	32-03.67	116-19.27	0.4	9.66	C1
E1421119	31-56.22	116-09.29	0.1	12.78	B1	E1530438	32-01.44	116-17.35	0.4	14.24	B1
E1421137	31-51.16	116-06.30	0.6	18.18	B1	E1530625	31-49.13	116-12.47	0.5	13.41	A1
E1421204	31-51.28	116-05.73	0.2	18.97	B1	E1530637	31-58.91	116-14.36	0.3	15.06	B1
E1421230	31-40.58	115-56.47	1.3	14.68	C1	E1530640	32-00.06	116-17.64	0.2	13.04	C1
E1421250	31-51.92	116-09.90	0.4	14.85	A1	E1530641					
E1421500	31-53.84	116-05.83	0.3	12.54	B1	E1530956	32-00.26	116-17.52	0.4	11.62	A1
E1421504	31-53.62	116-06.32	1.0	13.40	B1	E1531758	31-36.99	115-58.28	1.2	14.45	C1
E1430215	31-46.79	116-10.73	0.8	8.48	B1	E1540642	31-48.34	116-06.01	0.7	14.92	B1
E1430343	31-58.53	116-12.23	0.2	10.67	B1	E1540651	31-56.57	116-13.13	0.8	15.92	B1
E1430410	31-56.39	116-08.61	0.6	16.44	B1	E1540834	31-46.64	116-00.20	1.8	19.86	B1
E1430654	31-55.38	116-10.81	0.7	4.37	B1	E1541024	31-48.28	116-05.92	1.5	14.64	B1

E1430655	31-55.38	116-10.78		4.03	B1	E1541032	31-51.66	116-06.44	1.1	18.30	B1
E1430749	31-42.89	115-57.53	1.4	16.28	C1	E1541228	31-52.91	116-12.47	1.2	17.60	A1
E1431252	31-47.47	116-07.00	0.3	13.63	B1	E1541409	31-51.55	116-05.97	0.4	16.54	B1
E1431347	31-47.04	116-07.06	0.6	15.32	B1	E1541741	31-58.63	116-13.49	0.8	14.24	B1
E1431559	31-46.10	116-08.00	1.1	7.19	C1	E1541819	31-40.94	115-56.29	1.2	13.05	C1
E1431607	32-03.78	116-19.22	0.8	9.50	C1	E1552013	31-58.51	116-17.03	1.3	10.23	A1
E1440810	31-47.34	116-08.42	0.5	12.31	B1	E1560154	31-55.20	116-18.41	0.8	12.69	C1
E1441105	31-51.11	116-05.41	0.4	12.56	B1	E1560156	31-55.00	116-18.20		14.7	B1
E1441623	31-51.13	116-13.32	0.9	14.20	B1	E1560313	31-56.34	116-8.83	1.7	16.34	B1
E1442300	31-47.18	116-21.33	1.2	15.63	C1	E1560320	31-55.00	116-18.11	0.4	14.51	B1
E1450044	32-01.94	116-17.11	0.8	17.93	B1	E1560416	31-55.05	116-18.13	0.4	13.78	B1
E1450309	31-42.32	115-57.07	1.5	14.51	C1	E1560549	31-44.75	116-09.21	0.6	4.21	C1
E1450428	31-58.78	116-14.13	0.2	14.62	B1	E1560912	31-54.92	116-18.23	0.5	13.61	B1
E1450518	31-55.36	116-10.87		4.03	B1	E1560913				15.93	C1
E1450522	31-46.02	116-06.04	1.2	15.91	B1	E1560918	31-51.74	116-08.59	0.3	12.18	C1
E1450613	31-42.12	115-57.16	1.0	14.51	C1	E1561234	31-55.00	116-18.34	0.7	12.97	C1
E1450637	31-50.57	116-09.04	0.6	12.77	B1	E1561300	31-54.78	116-18.40	0.3	12.25	C1
E1450651	31-52.70	116-05.09	0.5	14.68	B1	E1561326	31-55.18	116-17.79	0.6	12.92	B1
E1450716	31-52.10	116-12.19	0.4	10.25	B1	E1561443	31-59.98	116-19.18	0.4	24.43	C1
E1450837	31-45.03	116-10.15	0.5	15.16	B1	E1561831	32-03.79	116-19.71	0.4	10.50	C1
E1451004	31-53.64	116-06.07	0.6	13.47	B1	E1562346	32-04.45	116-21.12	0.8	16.77	C1
E1460240	31-44.58	116-08.82	1.3	4.38	B1	E1562351	31-55.07	116-18.89	1.0	14.98	B1
E1460929	32-05.89	116-23.97	0.4	17.93	C1	E1570446	32-4.79	116-24.99	0.8	7.42	C1
E1461349	31-58.80	116-07.20	2.5	17.02	B1	E1570603	31-51.74	116-22.37	0.9	8.52	C1
E1461853	31-53.70	116-06.23	1.5	12.49	B1	E1570734	31-56.23	116-13.87	1.0	17.56	B1
E1470144	32-05.04	116-23.50	0.4	11.85	C1	E1571554	31-55.74	116-18.86	0.8	10.93	B1
E1471305	31-57.07	116-10.65	0.8	5.69	A1	E1571639	31-55.06	116-19.48	0.4	12.78	B1
E1471421	31-52.02	116-09.89	2.2	14.32	B1	E1571650	31-55.05	116-18.01	1.5	12.94	B1
E1471522	32-00.65	116-17.00	0.1	10.57	C1	E1571656	31-57.85	116-17.44	0.8	13.66	B1
E1471524	32-03.78	116-18.96	0.2	8.84	C1	E1572017	31-53.04	116-09.27	0.6	13.12	A1
E1471708	32-00.84	116-16.83	0.4	10.16	B1	E1580024	31-44.98	116-08.63	1.0	3.10	C1
E1480340	31-48.72	116-07.00	0.6	16.92	C1	E1580540	32-00.60	116-15.43	0.9	10.44	B1
E1480609	31-58.02	116-16.08	0.1	12.97	B1	E1580606	31-51.33	116-13.35	0.6	14.41	B1
E1481218	31-51.49	116-06.45	0.8	16.74	B1	E1580732	31-47.56	116-07.17	0.9	14.34	C1
E1481223	31-51.49	116-06.57	0.3	17.46	B1	E1581038	32-09.74	116-02.96	1.5	19.80	C1
E1481238	31-51.54	116-06.78	0.4	17.49	B1	E1581500	31-49.92	116-10.32	0.5	11.25	B1
E1481251	31-51.50	116-06.78	0.3	17.69	B1	E1581519					
E1481350	31-55.77	116-09.01	0.6	12.36	B1	E1581520	31-55.00	116-18.04	1.4	13.29	B1
E1481737	32-01.01	116-11.53	0.4	14.01	C1	E1581546	31-54.96	116-17.99	1.0	13.45	B1
E1481742	31-55.25	116-10.76	1.5	4.41	B1	E1581920	31-55.00	116-18.13	0.9	13.56	B1
E1490348	31-59.58	116-14.33	0.2	12.54	B1	E1581925	31-54.96	116-18.13	0.9	13.68	B1
E1490834	31-56.79	116-13.43	0.6	16.51	A1	E1582007	31-44.79	116-08.94	0.9	4.14	C1
E1491620	32-04.56	116-22.95	0.2	3.79	C1	E1582103	31-55.00	116-18.07	1.5	13.25	B1
E1491746	31-53.19	116-09.43	0.3	12.49	B1	E1582133	31-52.18	116-17.97	1.3	13.42	B1
E1500840	31-44.53	116-08.11	1.4	4.98	C1	E1590305	31-56.16	116-09.23	0.6	12.99	B1

E1500937	31-58.01	116-10.71	0.2	17.15	B1	E1590415	31-56.35	116-09.00	0.9	16.02	B1
E1501412	31-53.24	116-09.36	0.1	12.30	B1	E1590520	31-55.06	116-18.23	0.4	12.54	C1
E1510223	31-56.34	116-13.30	1.0	15.85	A1	E1590812	31-55.00	116-18.09	0.5	13.49	B1
E1510540	31-59.13	116-13.35	0.2	14.00	B1	E1590823	31-55.00	116-18.15	0.3	13.70	B1
E1511031	31-44.10	116-09.06	1.9	6.07	C1	E1590831	31-55.00	116-18.00	0.6	13.06	B1
E1512209	31-47.84	116-09.73	1.0	6.74	B1	E1590921	31-55.00	116-18.04	1.7	13.23	B1
E1520153	31-42.76	116-11.89	1.9	11.48	C1	E1590931	31-54.96	116-18.16	0.3	13.42	B1
E1520354	31-55.28	116-10.08	0.4	15.47	B1	E1590952	31-51.62	116-21.35	0.4	4.17	C1
E1520650	31-46.86	116-08.24	0.9	2.75	B1	E1590953	31 55.00	116 18.17		13.63	B1
E1521512	31-44.37	116-08.84	0.8	4.19	C1	E1591004	31-55.04	116-18.15	1.3	13.57	B1
E1521951	31-51.66	116-06.07	0.7	18.39	B1	E1591147	31-55.00	116-18.23	1.3	13.65	B1
E1530217	32-00.10	116-17.62	0.4	10.96	B1	E1591222	31-52.17	116-09.66	0.9	14.47	B1
E1530218	31 50.28	116-08.89		17.74	B1	E1591509	31-55.00	116-18.19	0.6	13.36	B1
						E1591525	32-02.43	116-17.13	0	9.58	B1

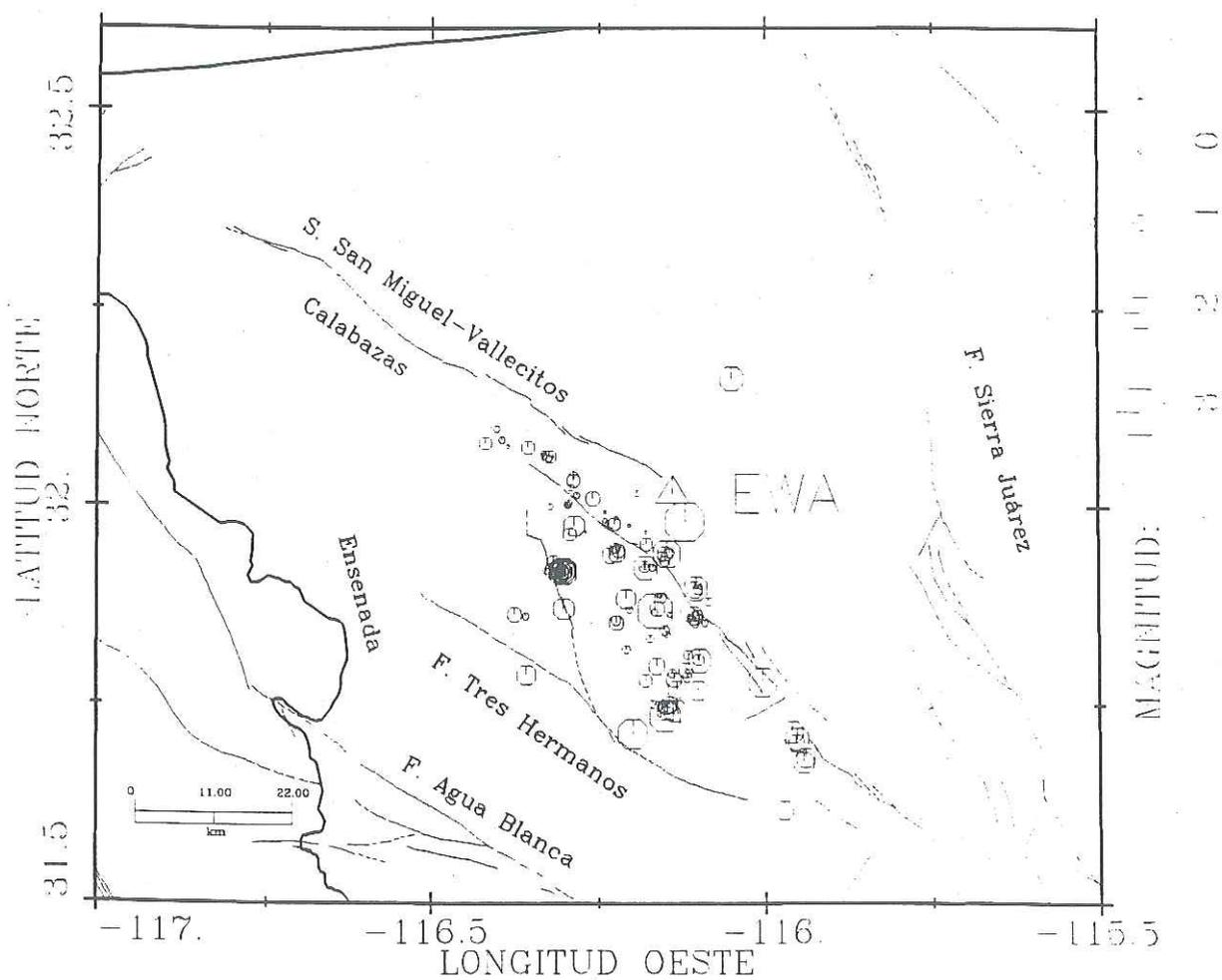


Figura 18. Localizaciones epicentrales de la base de datos empleada; se utilizó los registros obtenidos en la estación EWA. (FTH: Falla Tres Hermanos, FAC: Falla Agua Caliente).

IV

Aplicaciones de la Transformada Ondicular: Compresión de datos sísmicos de barrenación

En este capítulo y en el siguiente se describe con detalle las dos aplicaciones de la TO, aplicables en el procesamiento de datos sísmicos, que se desarrolló en esta tesis: la compresión de datos de perfiles sísmicos verticales inversos e identificación de fases sísmicas en sismogramas de terremotos.

IV.1 Compresión por medio de T0

Los procesos de compresión de datos tienen como objetivo la minimización del espacio de almacenamiento de la información, ya sea en cintas magnéticas, discos compactos o discos duros, etc. En este trabajo se utiliza un método de compresión del tipo *con pérdida de información* (véase capítulo I), basado en la TO, que permite aplicar simultáneamente la compresión y la eliminación de ruido (denoising).

Primeramente se dará una visión global del procedimiento mediante el cual se realiza la compresión de señales sísmicas de ruido de perforación, mediante la aplicación de la TO. Los detalles de cada paso se abordarán en las secciones siguientes.

- i.* Aplicar la TO a una serie de datos.
- ii.* En el dominio transformado, establecer un umbral de truncamiento, para separar la información representativa de la no significativa.
- iii.* Poner en cero las amplitudes de los coeficientes de ondícula que se encuentren por debajo del nivel de umbral establecido.
- iv.* Comprimir mediante la remoción de ceros

El paso *iv* completa el proceso de compresión propiamente, y sería el último implantado en un programa de aplicación en el sitio de adquisición de datos. Los siguientes dos pasos serían implantados en el lugar de recuperación y procesamiento de la información.

- v.* Inflar el conjunto de coeficientes remanentes con ceros
- vi.* Aplicar la TIO, para obtener una reconstrucción, en el dominio del tiempo, de una versión aproximada de la serie de datos original.

En este trabajo, para analizar la calidad de la señal resultante, se aplica el siguiente paso adicional:

- vii.* Realizar una comparación de la serie reconstruida y la original.

Este procedimiento es ilustrado en la figura 19. En (a) se muestra una señal sísmica original en el dominio del tiempo. En (b) se muestra su representación en el dominio ondicular por medio de las amplitudes de los coeficientes para todas las escalas. Cabe

mencionar que en esta figura los coeficientes ondulares están distribuidos en el eje de las abscisas sin orden alguno, no están distribuidos en el plano tiempo escala, esto es sólo para ilustrar el efecto de compresión. Con base en un parámetro estadístico de esas amplitudes se define un umbral de truncamiento h . En (c) se ilustra el efecto de aplicar el truncamiento sobre la serie (b); nótese como han sobrevivido las amplitudes más significantes, mientras todas las amplitudes menores que el umbral han sido puestas en cero. En (d) se muestra la serie que será almacenada, en la cual se ha eliminado todos los elementos con amplitudes iguales a cero; también se guarda un pequeño vector, cuyos bitios indican las posiciones verdaderas de los elementos diferentes de cero. Por último, en (e) se muestra la serie de tiempo reconstruida, mediante la TIO aplicada a la señal ilustrada en (c). El análisis de error se efectúa por medio de la comparación de las series original (a) y reconstruida (e). Se puede notar que el espacio ocupado por la señal truncada (d) es mucho menor que el espacio de la señal original (b). El término *espacio* se refiere a la longitud de una señal (en octetos *-bytes-*, por ejemplo) en cualquiera de los dominios.

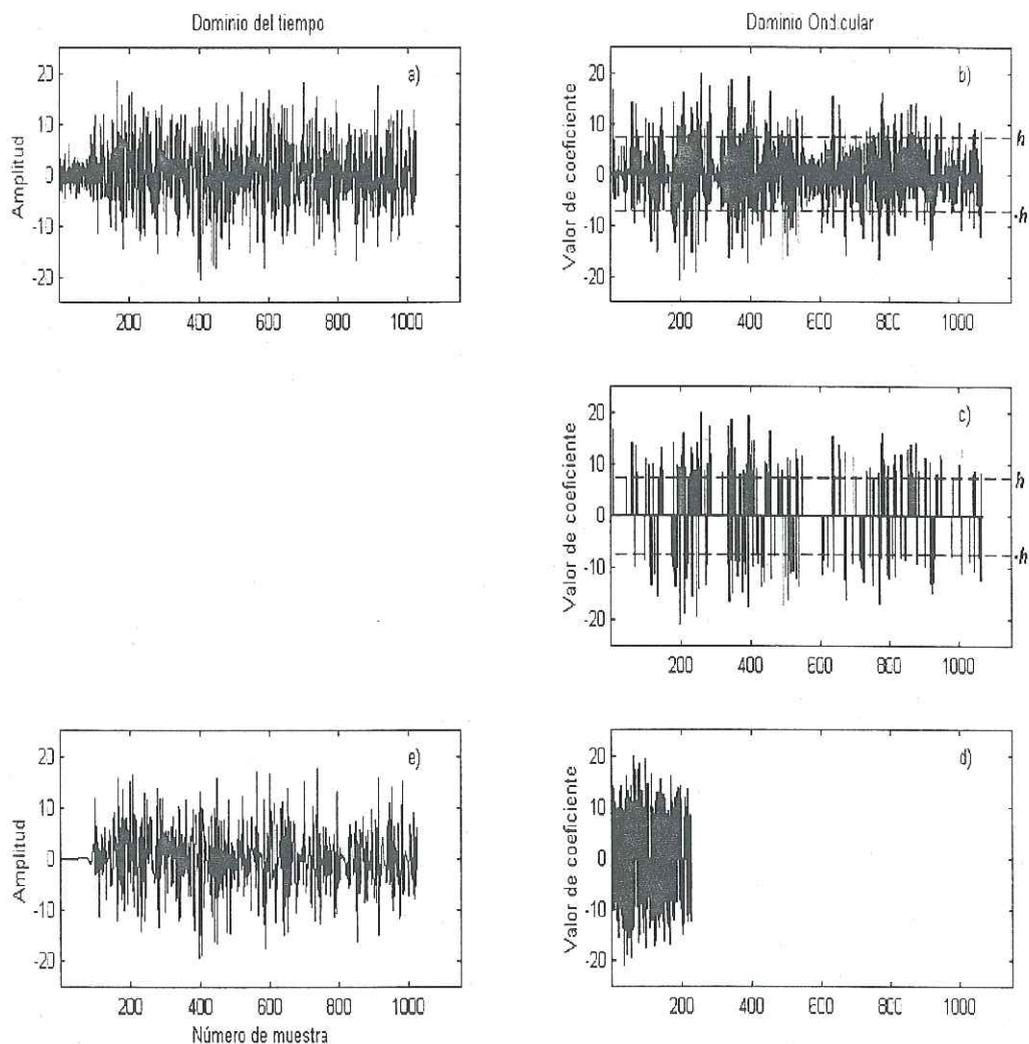


Figura 19. Representación gráfica del procedimiento para realizar el proceso de compresión por TO. Las series mostradas en (a) y (e) están en el dominio del tiempo y representan a las señales original y reconstruida, respectivamente. Las gráficas (b), (c) y (d) muestran la distribución de los coeficientes en el dominio ondicular, para todas las escalas, y representan las series original, truncada y comprimida, respectivamente.

La aplicación de la TO a la solución del problema de compresión no es un proceso automático, ya que sus particularidades dependen fuertemente del tipo de señal involucrada, del rango de compresión deseado, del nivel de error aceptable y del tipo de ondícula empleado en las transformaciones. El esfuerzo principal en este tópico de la tesis estuvo encaminado a conseguir una implantación óptima de la metodología para el tipo de señales sísmicas de interés en este trabajo. Ésto se consiguió con el análisis de pruebas numéricas para la optimización de los parámetros que controlan la conversión al dominio ondicular, el truncamiento de información y la reconstrucción de la señal.

A continuación se describe las pruebas numéricas llevadas a cabo para conseguir la optimización e implantación de este método de compresión. El esquema de presentación de las pruebas es el siguiente:

- 1) Selección de la ondícula. Se busca el tipo de ondícula que mejor se acople al tipo de datos empleados. Se pone especial atención al tiempo empleado en el cálculo de la TO para diferentes ondículas y números de coeficientes de los filtros ondiculares.
- 2) Elección del umbral de truncamiento óptimo. Se define el procedimiento para seleccionar el nivel de amplitud máxima de los coeficientes ondiculares que serán eliminados en el proceso de truncamiento.
- 3) Razón de compresión. Se estima los rangos de compresión obtenidos con diferentes combinaciones de: número de coeficientes en los filtros de ondícula, niveles de truncamiento y relación señal/ruido.

- 4) Porcentaje de energía conservada. Se evalúa la cantidad relativa de energía que es conservada en la señal troncada y reconstruida, para diferentes combinaciones de filtros utilizados en la TO, niveles de truncamiento y relación señal/ruido.
- 5) Relaciones de compresión, energía conservada y error. Se busca la combinación óptima de estos tres criterios, que maximice la energía conservada y el nivel de compresión, y que minimize el error de reconstrucción de la información.
- 6) Almacenamiento de los datos comprimidos. Se elige el proceso óptimo para guardar la información comprimida.

Antes de describir las pruebas numéricas para realizar la compresión, se define tres conceptos que serán de gran utilidad para el entendimiento de estos ejercicios

Razón de compresión

El parámetro *razón de compresión*, expresado como porcentaje, se define como el cociente entre el número de datos que se elimina (número de ceros introducidos) y el número total de datos de la señal antes de trincar, ésto es:

$$RC = \frac{\# \text{ de datos eliminados}}{\# \text{ total de datos}} \times 100 \quad (18)$$

Una segunda definición de la razón de compresión se describe desde el punto de vista de la relación de los tamaños de los archivos que ocupan el espacio de memoria, o sea, el cociente del número de octetos eliminados entre el tamaño en octetos del archivo original

$$RB = \frac{\# \text{ de octetos eliminados}}{\# \text{ de octetos del archivo original}} \times 100 \quad (19)$$

Porcentaje de energía conservada

La calificación de la fidelidad en la reproducción de la señal que ha sido truncada (comprimida) y reconstruida, se hace por medio de una medida de la cantidad de energía conservada. Las propiedades de simetría de los operadores de las transformadas ondulares directa e inversa, aseguran que no habrá cambios en la fase de las señales originales y reconstruidas (Strang & Nguyen, 1996); por tanto, es posible calificar la fidelidad mediante el empleo de la razón de energía que es conservada en la señal reconstruida, entre la energía en la señal original. Esta razón, expresada como porcentaje, se denominará Porcentaje de Energía Conservada (PEC) y es evaluada mediante la siguiente expresión:

$$PEC = \frac{\text{energía de la señal truncada}}{\text{energía de la señal no truncada}} \times 100 \quad (20)$$

Error de reconstrucción

La eliminación de coeficientes en el dominio ondicular (truncamiento) produce, por supuesto, la eliminación de algunos rasgos en la señal llevada al dominio del tiempo; aunque la elección de un adecuado umbral de truncamiento permite reducir el tamaño de la serie de tiempo sin afectar seriamente los rasgos principales de la señal. Por ello, es necesario estimar las diferencias existentes entre las señales original y reconstruida, en el dominio del tiempo. Se utiliza el error relativo definido como:

$$ER = \frac{1}{M \times S_{max}} \sum (S_i - S_i^R) \quad (21)$$

donde M = número de muestras de la serie de tiempo,

s_i = amplitud de la muestra i en la serie original

s_i^R = amplitud de la muestra i en la serie reconstruida

s_{max} = amplitud máxima de la serie original.

Para la ecuación (21), se decidió normalizar los residuales $(s_i - s_i^R)$ a la amplitud máxima (s_{max}) de la serie de tiempo por las siguientes razones: a) interesan más los errores cometidos en la reproducción de las amplitudes mayores de la serie de tiempo; o sea que interesa más conservar los rasgos fuertes que los pequeños de la serie; b) existen amplitudes pequeñas en la serie de tiempo que son llevadas a cero (o a niveles próximos a cero) como resultado del truncamiento de coeficientes en el dominio ondicular; ésto ocasionaría errores absolutos puntuales cercanos al 100% en la reconstrucción de esas amplitudes si se empleara la amplitud original S_i como divisor en (21); pero en realidad, no interesa conservar estos rasgos (amplitudes) pequeños, por lo que no se quiere que sus errores grandes influyeran fuertemente al valor promedio del error.

IV.1.1 Selección de la ondícula y pruebas de tiempo de procesamiento

Como primer criterio de selección se siguió el del tiempo de cómputo empleado para comprimir una sección sísmica sintética. Resulta importante la rapidez en el procesamiento, ya que la aplicación real de esta metodología (por ejemplo, en la exploración petrolera) se haría casi en *tiempo real*, en el mismo terreno donde se realice la adquisición de datos. La sección sintética de prueba contiene 32 trazas de 8192 puntos cada una, más una traza piloto de la misma longitud. Se decidió probar con las familias completas de Daubechies y de Symmlet debido a que estas ondículas son las más empleadas en el campo de la TO. La figura 20 muestra la variación del tiempo de procesamiento para comprimir la sección de prueba, como función del número de coeficientes del filtro de ondícula obtenido de acuerdo a $2*N$, donde N representa el número de momentos desvanecientes de la ondícula utilizada como kernel de la transformación.

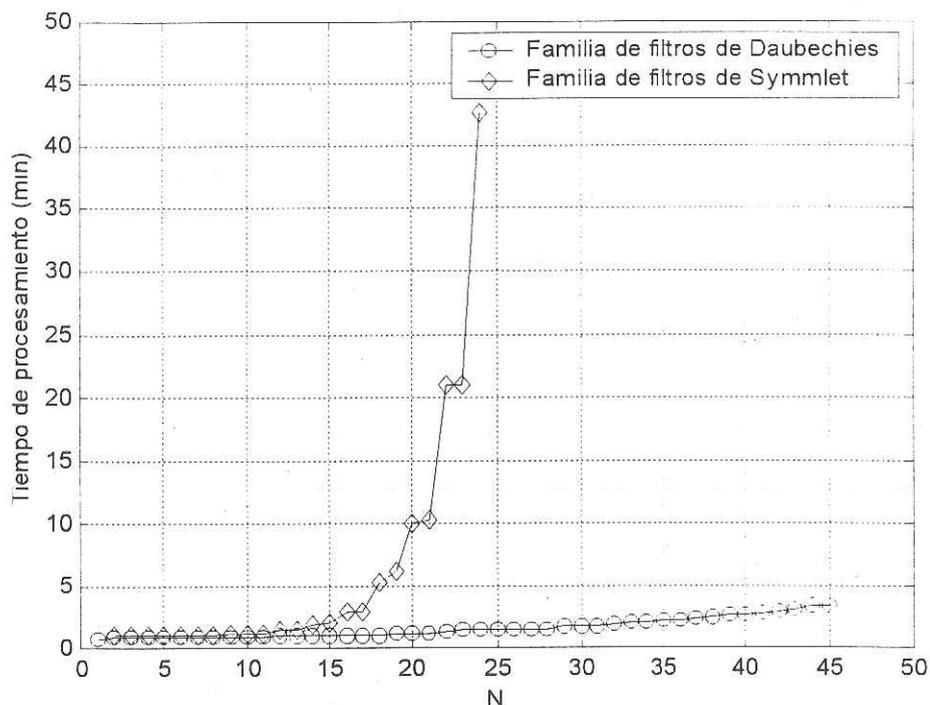


Figura 20. Variación del tiempo de procesamiento, en función de N , para las familias de ondículas de Daubechies y Symmlet. Se comprimió una sección sísmica sintética, consistente en 32 trazas de 8192 puntos cada una, más una traza piloto.

En esta gráfica se observa que los filtros de Symmlet presentan un fuerte incremento en el tiempo de procesamiento, sobre todo a partir del filtro con $N=16$; a partir de $N=25$ se produce inestabilidad numérica en la aplicación estos filtros, tal como lo han reportado otros autores (Mistry *et al.*, 1997), por lo que la curva de tiempo de procesamiento para esta familia se detiene en $N=24$; posiblemente la inestabilidad se produce por la propagación catastrófica de error debido a la gran cantidad de operaciones. Por otro lado, los filtros de Daubechies emplean tiempos de cómputo que permanecen menores a los 5 minutos, para todas las longitudes de filtros; esta duración resultaría aceptable en el trabajo de campo, ya que sería posible realizar la compresión de una sección sísmica antes de empezar la

adquisición de otra. Esta prueba fué realizada en una PC compatible, de 233 MHz de velocidad de procesamiento.

Con base en los resultados de esta prueba, fué seleccionada la familia de ondículas de Daubechies para la aplicación del procedimiento de compresión de señales sísmicas con TO. Ahora se determinará la longitud óptima de los filtros con los cuales se obtendrá las transformadas directa e inversa. La evolución del tiempo de cómputo en función de la longitud de los filtros no es un buen criterio para seleccionar la longitud óptima, ya que para la familia de Daubechies ese tiempo no se incrementa significativamente (desde el punto de vista de operación de campo). En cambio, es posible que la longitud de los filtros tenga un efecto apreciable en la calidad de la compresión (energía conservada y razón de compresión); por tanto, se discutirá a continuación las pruebas numéricas que permiten conocer las interacciones entre los parámetros: longitud de filtro, energía conservada, error en la reconstrucción, razón de compresión y relación señal/ruido en las trazas sísmicas originales.

IV.1.2 Elección del umbral óptimo de truncamiento

El proceso de truncamiento que lleva a la compresión de una señal, se realiza en el dominio ondicular. Se le puede visualizar fácilmente con ayuda de la figura 19, donde se muestra un ejemplo de señal transformada al dominio ondicular (b); en este dominio se indica, con líneas horizontales, la posición del umbral de truncamiento, con una altura

arbitraria h . Todos los coeficientes con amplitudes menores o iguales que h serán eliminados (puestos iguales a cero), mientras que los coeficientes con amplitudes mayores que la altura del umbral h serán conservados intactos. El valor de h queda expresado por medio de algún parámetro estadístico del conjunto de amplitudes de los coeficientes, como la media, la desviación estándar, la raíz media cuadrática, etc. En ocasiones puede fijarse el umbral considerando otros parámetros estadísticos de mayor grado de complejidad, como lo hace Donoho (1992) en sus pruebas de eliminación de ruido en señales conocidas. En este trabajo se ha elegido expresar el umbral en términos de la desviación estándar (σ) de las amplitudes de los coeficientes en el dominio ondicular; esto es, se calcula la desviación estándar de todos los coeficientes, de todas las escalas, de cada traza sísmica, y se obtiene el promedio de las desviaciones estándar de los coeficientes por traza; por último, se le asigna a h un valor igual a un número de veces la σ , $h = u\sigma$.

A partir de la definición de umbral de truncamiento, es posible prever que existe una relación directa entre la altura del umbral (h) y el número de datos que se elimina (número de ceros introducidos); mientras que existe una relación inversa con el porcentaje de energía conservada de la señal. De acuerdo con esto, en la elección de h debería de mantenerse un equilibrio entre la mayor cantidad de datos eliminados y la menor cantidad de energía perdida. Las pruebas en esta sección están encaminadas a buscar un posible punto de equilibrio entre ambas tendencias, que lleve a la elección del valor óptimo del umbral de corte.

Se utilizó los datos de la sección sísmica ilustrada en la figura 16, que tiene una relación señal/ruido de 2. La TO se aplicó utilizando todos los filtros de la familia de Daubechies incluyendo el caso especial de la ondícula de Haar. Para cada longitud de filtro se realizaron 25 ejercicios de compresión del mismo conjunto de datos, aplicando en cada caso un valor diferente para h , desde 0.2σ , hasta 2.5σ . En cada ejercicio se calculó el porcentaje de ceros introducidos (RC) o razón de compresión RB y el porcentaje de energía conservada PEC, por medio de las ecuaciones (18) y (20), respectivamente. La figura 21 condensa los resultados de esta prueba, donde se muestra un par de superficies de variación del PEC y del RB; cada superficie está construida con 25 valores de umbral y 45 valores para el número de coeficientes de filtro.

Como se muestra en la figura 21, los resultados de esta prueba confirman las ideas anticipadas al inicio de esta sección: umbrales bajos dan como resultado bajos porcentajes de ceros (bajas relaciones de compresión) y altos niveles de conservación de energía; mientras que para umbrales mayores, se tiene el comportamiento inverso. Esta prueba permite asegurar que existe un punto de equilibrio entre las tendencias descritas; una línea de cruce de las superficies, el cual ocurre para un rango muy estrecho de valores de h , entre 1.15 y 1.25 desviaciones estándar; el valor central de este intervalo en 1.2σ . En el punto de equilibrio se alcanzan valores del 75% para el PEC y el RB. Es posible que el valor óptimo de h sea diferente para otros tipos de señales o para otras relaciones S/R; sin embargo, el valor de 1.2σ es el adecuado para el tipo de señales de interés en este trabajo.

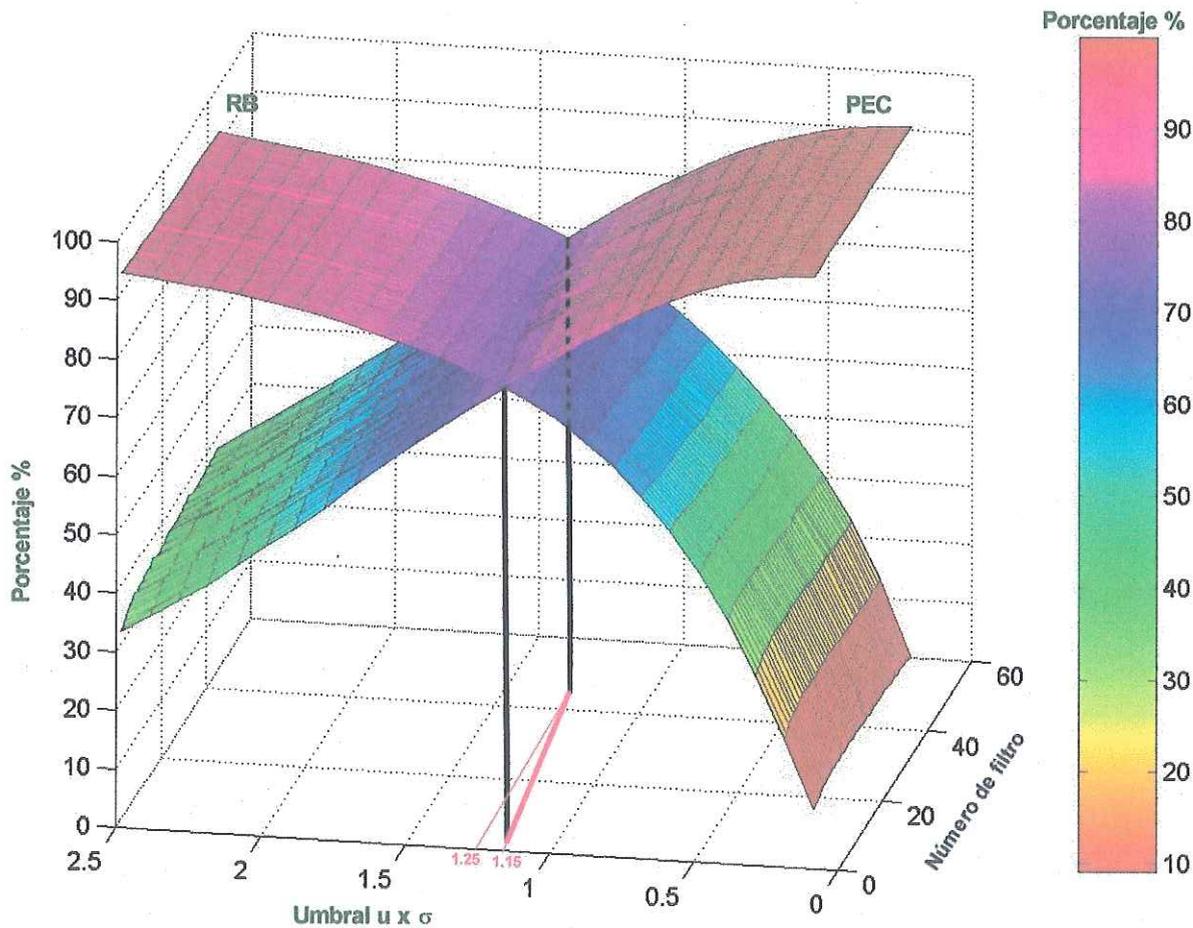


Figura 21. Prueba de umbral. Dependencia del PEC y del porcentaje de datos eliminados (ceros introducidos) en el valor del umbral de truncamiento, representado en fracciones de la desviación estándar. Se empleó una sección sísmica con una relación señal/ruido igual a 2. La TO se aplicó con el filtro Daubechies-14.

IV.1.3 Relaciones de compresión, energía conservada y error

El siguiente conjunto de pruebas tiene como finalidad principal determinar la longitud óptima de los filtros de la TO, en función de los porcentajes de compresión (RB), energía conservada (PEC) y error de reconstrucción (ER). Adicionalmente, se quiere documentar las posibles variaciones de estos parámetros en función de las variaciones en la

relación S/R (0.5, 1.0, 2.0, y 5.0). Se utiliza la misma sección sísmica de la figura 16; se usó los filtros de Daubechies, incluyendo el filtro de Haar, y con el umbral determinado en la sección anterior ($h=1.2\sigma$). Se obtiene 4 curvas, con 45 puntos cada una. En la figura 22 se muestra dichas curvas, cuyas ordenadas indican el valor obtenido de RB (ecuación 19) y el color indica el valor del ER (ecuación 21) en función del número de filtro. Se observa que cuanto mayor es la S/R, mejor es la razón de compresión, y entre mayor es el número de coeficientes empleado, menor es la compresión que se consigue y es ligeramente menor el ER.

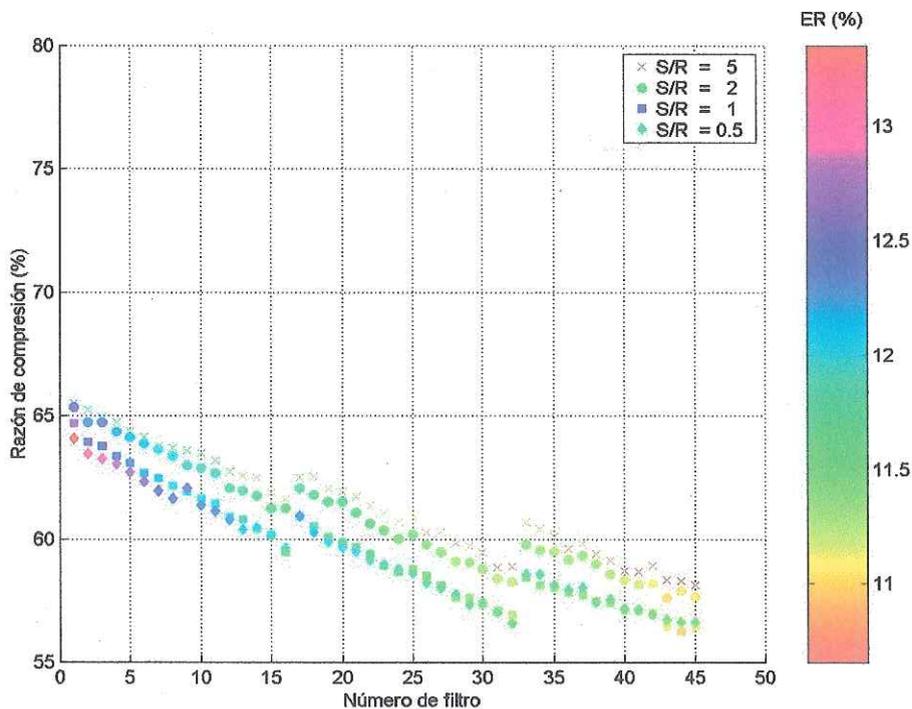


Figura 22. Razones de compresión y error de reconstrucción (ER), en función del número de los filtro de la TO, para cuatro diferentes relaciones S/R. Se empleó la familia de filtros de Daubechies, con un umbral de truncamiento de 1.2σ .

Es importante notar que, en cualquiera de las curvas de la figura 22, la variación del ER (color) es muy poca, o casi nula, para todos los números de coeficientes; sólo se presenta un cambio significativo en el ER al variar la relación S/R. La figura 23 muestra la misma información de la figura 22, con otro sistema de ejes, con la intención de mostrar más claramente la evolución del ER; aquí la gama de colores representa la razón de compresión (RB).

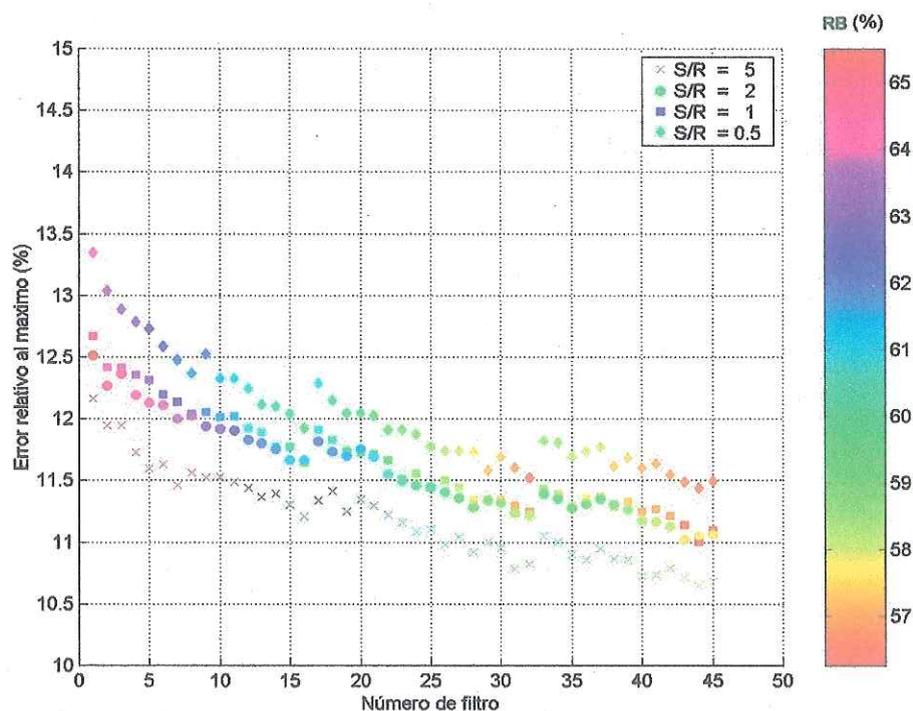


Figura 23. Variación del error de reconstrucción de la sección sísmica, a partir de los coeficientes truncados, en función de la etiqueta de los filtros de la TO. Se utilizó la familia de ondículas de Daubechies, aplicada sobre trazas sísmicas con diferentes S/R.

La evolución del PEC se obtiene de la siguiente manera: cada uno de los cuatro conjuntos de coeficientes truncados es sometido a la TIO para llevarlo al dominio del

tiempo (reconstrucción de la señal); se calcula la energía contenida en la señal reconstruida, así como la energía contenida en la señal original, y se emplea la ecuación (20) para estimar el PEC. La figura 24 muestra las curvas correspondientes a las cuatro relaciones S/R, en función del número de coeficientes de los filtros empleados en el cálculo de la TO, el color representa el valor de la RB.

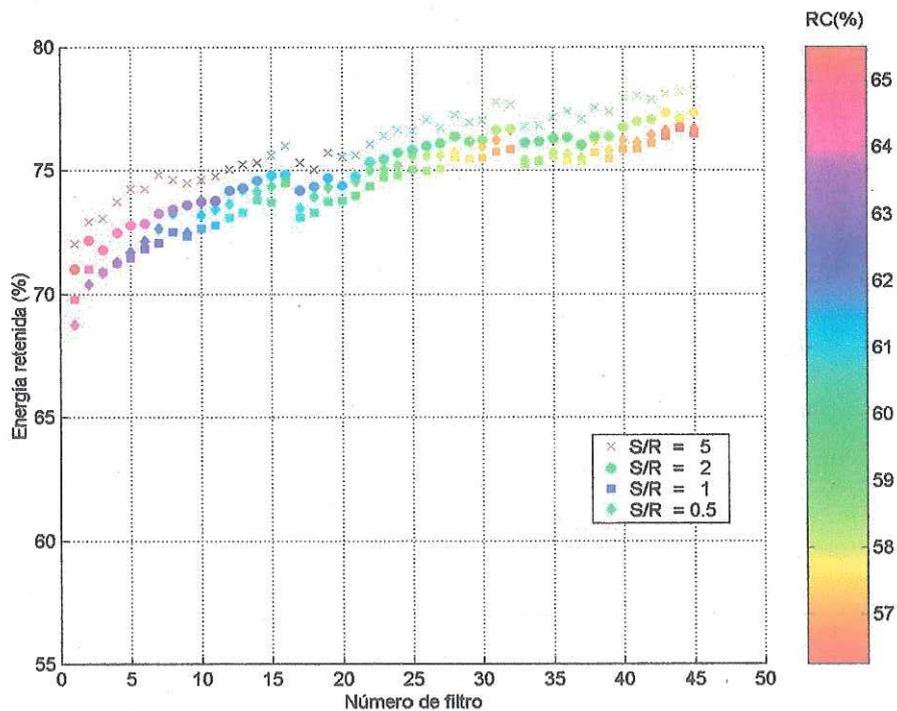


Figura 24. Evolución del porcentaje de energía conservada en función de los filtros de Daubechies empleados en el cálculo de la TO. El color de los puntos indica el valor del porcentaje de compresión. El umbral aplicado es $h=1.2\sigma$.

La gráfica muestra que el PEC se incrementa con el número de coeficientes de los filtros de la TO, inicialmente con una fuerte pendiente (desde 2 hasta 10), y a partir del

filtro 14 el incremento es pequeño, de tal manera que el parámetro de conservación de energía se comporta mas o menos constante a partir del filtro 14 (28 coeficientes) independientemente del valor de la relación S/R. Como conclusión de estas pruebas, se eligió a la familia de filtros de Daubechies, específicamente a partir del filtro de 28 coeficientes, como la base para la aplicación de la TO. El umbral de corte fué elegido como aquel definido por el cruce de las curvas de variación del PEC y el RC (1.2σ).

La figura 25 muestra la relación que existe entre el ER y la razón de compresión. En las abscisas se muestra el porcentaje de ceros introducidos para comprimir la sección. Las ordenadas corresponden al valor $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 20 \log_{10} ER_i$, donde N es el número de trazas que componen a la sección mostrada en la figura 16. Los valores calculados expresan el error en decibeles introducido en la recuperación de la señal, una gráfica de este tipo se puede encontrar en Beylkin y Vassiliou (1998).

IV.1.4 Almacenamiento de los datos comprimidos

En las secciones previas se discutió la manera de llevar a cabo la compresión de una señal por medio de la TO. En este punto, se dispone de un conjunto de coeficientes, en el dominio ondicular, con una gran cantidad (>60%) de elementos iguales a cero; no habría ninguna ganancia si este conjunto de coeficientes se almacenara en disco (u otro medio de almacenamiento) con los elementos cero en las posiciones que les corresponden en el plano tiempo-escala. Para obtener realmente una reducción en la longitud del archivo de

almacenamiento de la señal truncada, es necesario eliminar totalmente los coeficientes cero, y guardar únicamente los diferentes de cero. Durante la reconstrucción de la señal, mediante la TIO, es necesario recuperar el plano tiempo-escala completo; para ello, además de almacenar los coeficientes diferentes de cero, es necesario guardar también un vector de posicionamiento (VP), el cual, de manera lo más compacta posible, contenga indicaciones sobre las posiciones originales de los coeficientes preservados. De esta manera, durante la reconstrucción, un paso previo consiste en colocar los coeficientes no cero en las posiciones indicadas en el VP, y colocar ceros en todas las demás posiciones de tiempo. Ahora se describirá la manera de formar el VP.

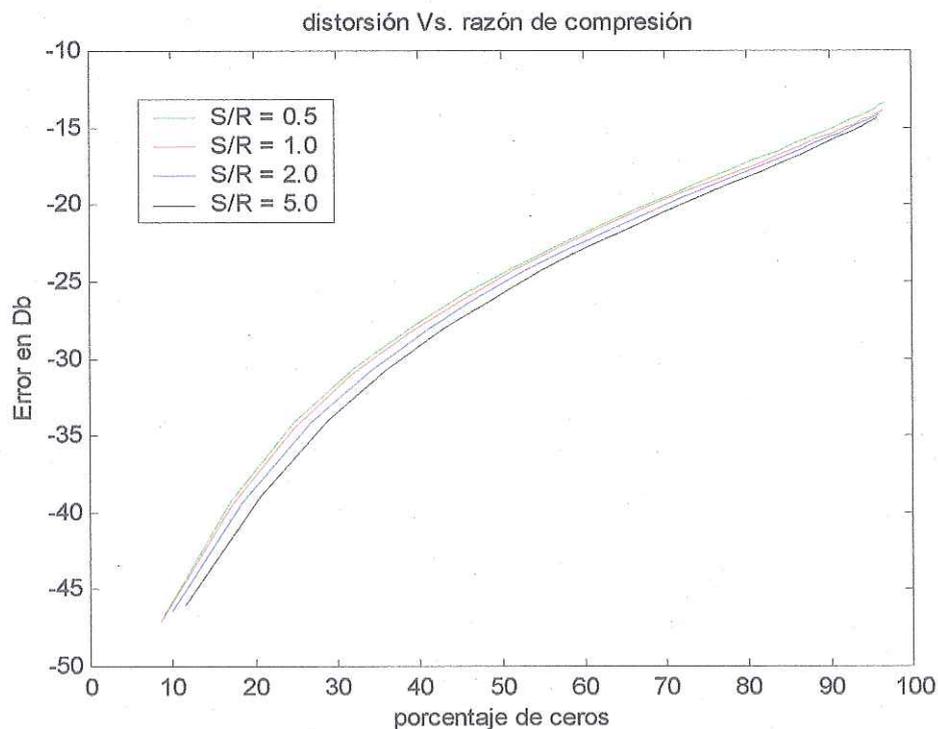


Figura 25. Error en decibelios en función de la razón de compresión obtenido para diferentes valores de relación S/R.

Para la estructura del VP se utiliza un arreglo de bitios agrupados en octetos de tipo entero sin signo. La posición de cada coeficiente es representada por un bitio: se coloca un 1 para un dato que representa información remanente y un 0 para representar la información truncada. De esta manera se puede eliminar todos los ceros que representan la información truncada y se representa la posición original de cada uno de ellos con la unidad mínima de información. El tamaño en octetos del VP es el número de los datos originales dividido entre ocho, por lo que su longitud es mucho menor que la de la señal original

En la figura 26 se ejemplifica la forma de almacenar los datos comprimidos; la representación final de estos datos consta de un arreglo que contiene solamente los datos diferentes de cero, almacenados como enteros de 1 octeto, más el VP que contiene el posicionamiento original de esos datos. Para esta representación se ha usado, como ejemplo, una cantidad de 32 datos en enteros de un octeto, ya que este es el formato en que registra el sismógrafo digital EG&G Geometrics.

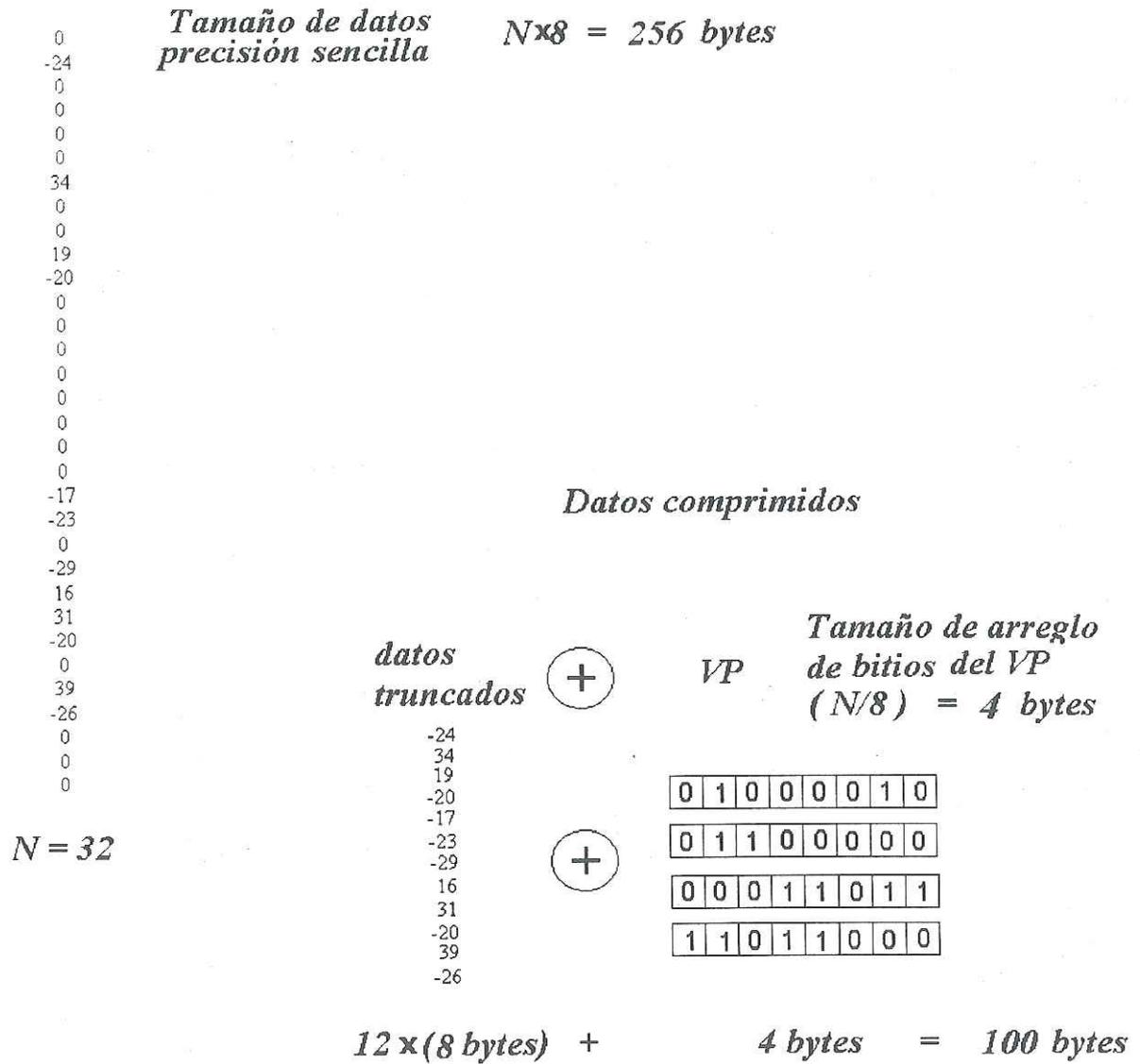


Figura 26. Representación del almacenamiento de datos comprimidos por medio de un arreglo de bits.

IV.2 RESULTADOS

A partir de las pruebas elaboradas en la sección IV.1, se escogió la ondícula de Daubechies-14 para aplicar el método de compresión de señales sísmicas originadas en perforaciones con barrena rotatoria, con umbral de truncamiento de 1.2σ . La figura 27A, muestra tres secciones, que están formadas de 22 trazas de 1024 datos cada una; para esta representación sólo se han graficado 250 puntos por traza. a) Es la sección obtenida por medio de correlación cruzada de la traza piloto con cada una de las trazas mostradas en la figura 16, este proceso es el representado por el trayecto 1b, de la secuencia de procesamiento mostrado en la figura 14. b) Es la sección correlacionada después de haber sido sometida al proceso de truncamiento y reconstrucción con TO (pasos 1,2,3 y 4 de la figura 14); esta sección ha sido recuperada de un archivo de datos comprimidos en 62 % y con un porcentaje de energía retenida del 75 %. c) Representa la diferencia entre las dos secciones anteriores. En la figura 27-B se muestra el mismo resultado, pero las dos primeras secciones se muestran normalizadas respecto a su correspondiente amplitud máxima. Se puede notar que existe diferencia en las amplitudes recuperadas; sin embargo, la apariencia de la sección comprimida y recuperada es prácticamente idéntica a la de la sección original, cuando se grafican ambas normalizadas, lo cual es el procedimiento estándar en Sismología de Exploración.

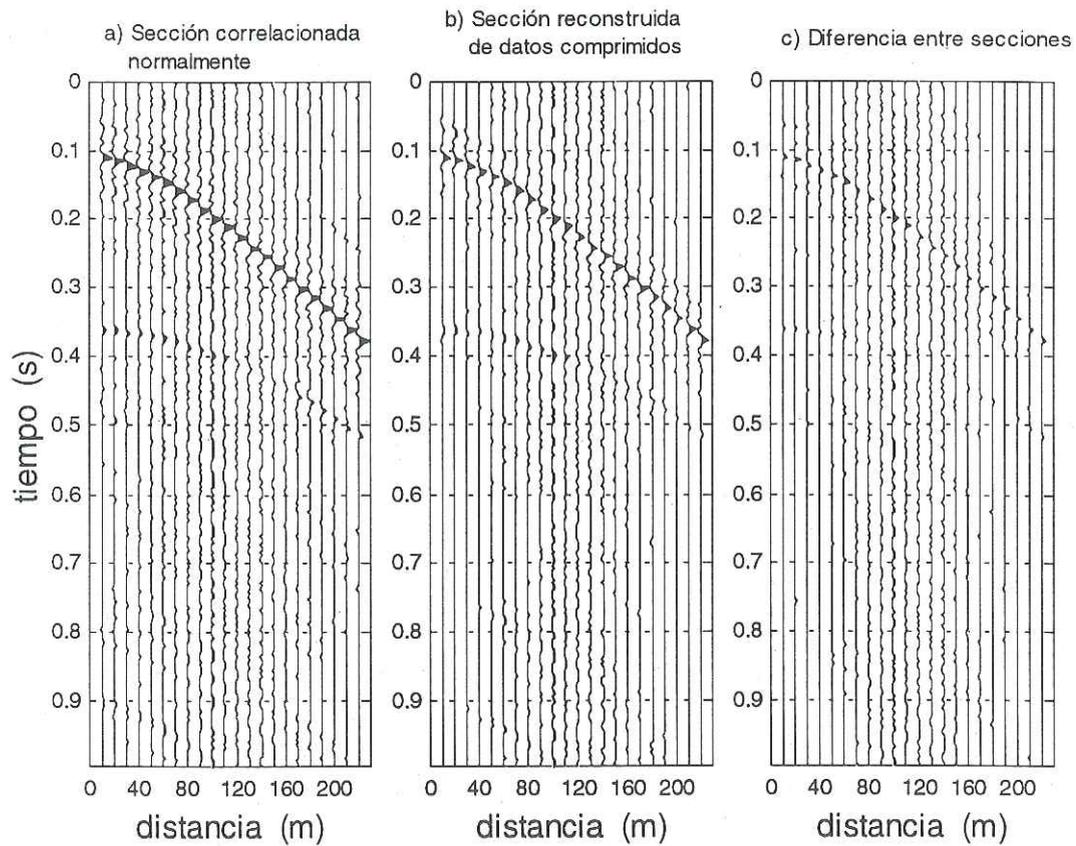


Figura 27A. Gráfica de secciones para observar la diferencia producida entre una sección correlacionada normalmente (a) y otra correlacionada a partir de una reconstrucción del conjunto de datos comprimidos (b). La diferencia entre (a) y (b) se muestra en (c).

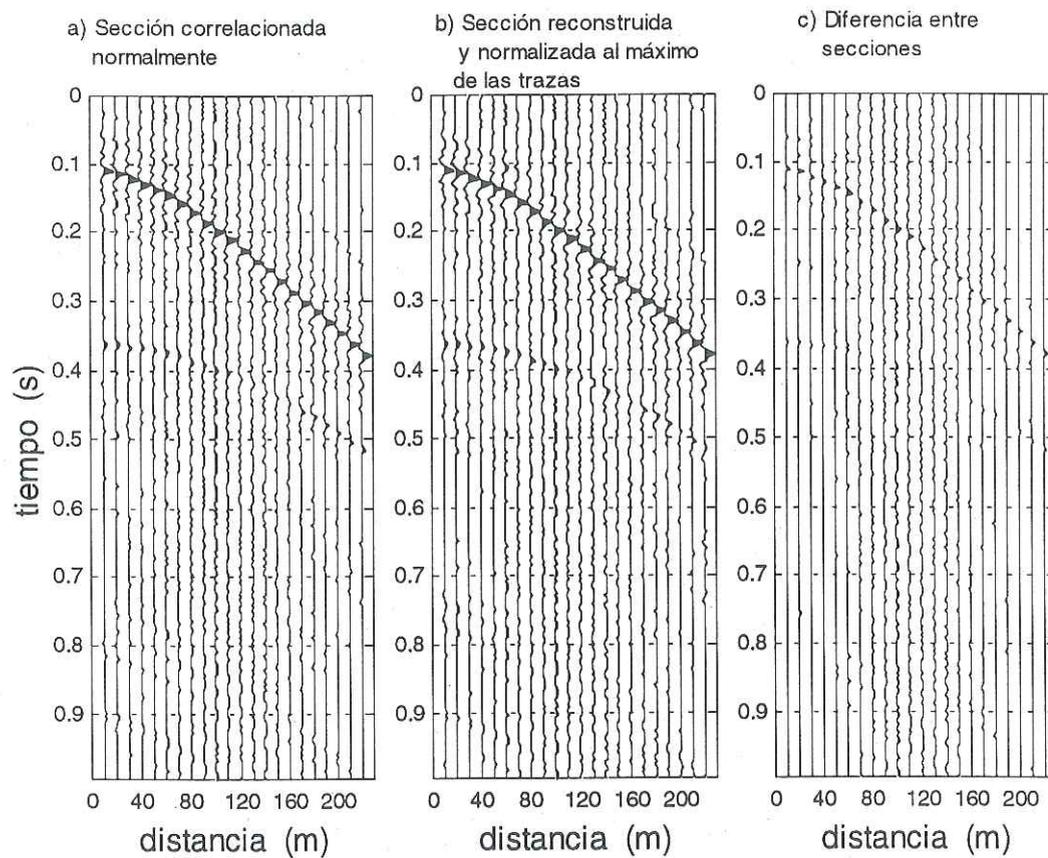


Figura 27B. Sección correlacionada normalmente (a) y otra correlacionada a partir de una reconstrucción de un conjunto de datos comprimidos y normalizada al máximo de sus trazas (b). (c) es la diferencia entre secciones no normalizadas.

IV.3 CONCLUSIONES

Los parámetros óptimos para llevar a cabo la compresión de señales dependen de manera significativa de la naturaleza de las señales. En este trabajo se buscó caracterizar los parámetros óptimos para secciones sísmicas resultantes de un PSVI, con el ruido de barrenación de pozos como fuente sísmica. Existió el problema de falta de reflejos claros en las señales grabadas en campo, por lo que se recurrió a propagar numéricamente la traza sísmica grabada en la barrena de perforación, a través de un modelo estratigráfico conocido. En la naturaleza esto mismo ocurre realmente, ya que la señal generada por la interacción de la barrena con el medio geológico viaja por los estratos, interacciona con las interfases y es registrada en los sensores sobre la superficie. Por ello, se puede considerar que la sección sísmica utilizada en el proceso de determinación de los parámetros óptimos de compresión es la adecuada.

Una vez establecidos los parámetros óptimos, se implantó una técnica de compresión de datos sísmicos provenientes de una fuente de ruido producido por la interacción de una barrena de perforación rotatoria y el medio rocoso que atraviesa. Las conclusiones son:

- El umbral de corte establecido con base en los experimentos numéricos realizados para obtener un equilibrio entre la cantidad de información perdida y la cantidad de energía retenida fué 1.2 veces la desviación estándar de los datos calculada en el dominio ondicular.

- Las razones de compresión alcanzadas aplicando TO sobre el conjunto de datos reales están en el rango de 56 a 66% (ver figura 22) cuando se utilizan todos los filtros de la familia de Daubechies, incluyendo la ondícula de Haar, y para todos los valores de S/R utilizados.
- De acuerdo con la gráfica de la figura 23, los errores obtenidos en la reconstrucción de la sección fluctúan entre 10.5 y 13.5%, lo cual se refleja en la disminución de las amplitudes de la sección b (figura 27-A).
- Los porcentajes de energía conservada en las secciones comprimidas y reconstruidas toman valores de 68 a 84 % para todos los valores de la relación S/R, como se aprecia en las gráficas de la figura 24.
- De la cantidad total de energía perdida, una parte de ésta está indudablemente asociada a las amplitudes de los rasgos dominantes de la sección sísmica; sin embargo, una cantidad importante de ella representa ruido presente en las trazas sísmicas originales, así como rasgos de amplitud pequeña. Esta última porción de energía perdida no representa problema alguno para la integridad de la sección sísmica, e incluso su pérdida puede ser deseable desde el punto de vista de la eliminación de ruido. La parte de energía perdida correspondiente a los rasgos principales (arribos de fases sísmicas) es un compromiso aceptable para los niveles de compresión conseguidos; aún con esta pérdida de energía es posible recuperar la señal sin distorsión o desvanecimiento apreciables, como muestra la figura 27-B. Esta misma conclusión es aplicable a la cantidad total del error de reconstrucción.

- Se comparó esta técnica con un método de compresión del tipo ZIP. Con este último método se comprimó una traza sísmica de la base de datos, guardada originalmente en un archivo con un tamaño de 24579 octetos, que fue comprimido a 19102 octetos, lo cual indica una compresión del 22%. Con el método implantado en este trabajo se consiguió una compresión del 62% para el mismo archivo.

IV.4 Discusiones

- El porcentaje de compresión se incrementa conforme aumenta la relación S/R, lo cual es indicativo de que los algoritmos de truncamiento pueden diferenciar más fácilmente la señal útil del ruido en los casos de alta S/R.
- Es conveniente mencionar que los porcentajes de compresión se verán afectados por el tipo de formato en que sean capturados los datos originales en el campo; los datos utilizados para estas pruebas se adquirieron con un sismógrafo digital con formato de grabación sumamente compacto, que utiliza 1 octeto por dato. Así, los porcentajes de compresión obtenidos en este trabajo se sitúan en la cota mínima posible.
- Los criterios empleados en la elección del umbral de corte y de la longitud de filtro, que en este trabajo estuvieron basados en la intersección de dos superficies (PEC y RB) y en el cambio de pendiente en las curvas (PEC vs. N), (RB vs. N) y (ER vs. N), respectivamente, no son los únicos criterios que pueden aplicarse. En el primer caso, es posible que la formación de una función lineal que combine los parámetros

PEC y RB, de como resultado la identificación de valores máximo o mínimo que identifiquen un valor de umbral que maximice simultáneamente los PEC y RB. En el segundo caso, habría que investigar otros criterios.

IV.5 Recomendaciones

- Como ya se ha mencionado, las relaciones de compresión, porcentajes de energía conservada y error de reconstrucción, dependen del valor de S/R, por lo que es recomendable que en el trabajo de adquisición de datos en el campo se aplique técnicas de arreglos espaciales de los sensores, con el fin de eliminar parte del ruido incoherente o parte de las ondas superficiales.
- En los casos en que el formato de grabación de los datos (en el campo) consista de muestras representadas con tres o cuatro octetos, lo cual es común en los equipos de grabación modernos, sería posible aplicar sobre el paquete comprimido otra técnica de compresión del tipo *sin pérdida de información* (métodos ZIP, algoritmo de Hoffman u otros). Así el conjunto de datos estaría doblemente comprimido.
- No utilizar filtros de Symmlet que contengan más de 34 coeficientes ($N=17$) para realizar la compresión por TO, ya que el tiempo de cálculo crece desmesuradamente, lo que sería una desventaja del método.

V

Aplicaciones de la Transformada Ondicular: Identificación automática de arribos P y S en sismogramas de terremotos

El considerable aumento en el número de registros de terremotos en los centros de información sismológica ha motivado a los sismólogos a desarrollar algoritmos y/o técnicas computacionales con mayor capacidad y velocidad de procesamiento. Entre los procesos que se aplica a los registros de terremotos, se encuentra la lectura de los tiempos de arribo de fases en sismogramas. La identificación de las distintas fases presentes en un sismograma, y la determinación de sus tiempos de arribo, forman una base de datos que permite estimar las propiedades físicas y estructura interna de la tierra.

Para la determinación de hipocentros de terremotos, la tarea básica es la lectura de tiempos de arribos de ondas P y S en sismogramas analógicos o digitales. Esta actividad puede realizarse por inspección visual del sismograma (única opción disponible para registros analógicos); el éxito de esta actividad depende de la habilidad del *lecturista* para identificar los cambios en amplitud y frecuencia de las fases sísmicas. Aún cuando se disponga de sismogramas con alta relación S/R, esta tarea resulta tediosa y agotadora cuando existe una gran cantidad de registros sísmicos.

Por otra parte, sin importar la cantidad de sismogramas cuyos los tiempos de arribo haya que *leer*, la automatización de las localizaciones preliminares en los observatorios

sismológicos requiere de la disponibilidad de un procedimiento automático para la identificación y lectura de fases. En este capítulo se propone procedimientos numéricos para la detección automática de las fases P y S. Se usa la TO y un análisis estadístico sencillo aplicado sobre los coeficientes ondulares para establecer los tiempos de arribo de las fases P y S, de acuerdo con la distribución de los coeficientes en el plano tiempo-escala. Los procedimientos desarrollados son aplicados a una base de datos de sismos locales registrados en el valle de Ojos Negros, en el municipio de Ensenada, B.C., México. Esta base ha sido descrita en el capítulo III.

V.1 Descomposición de un sismograma por TO

Los algoritmos más empleados en la actualidad para la detección de fases sísmicas han sido diseñados en el dominio del tiempo, y se basan en un análisis de las variaciones de las amplitudes a lo largo del sismograma. La utilización del análisis de las variaciones del contenido espectral, a lo largo del tiempo, no resulta sencillo de aplicar en el dominio temporal. En cambio, en el dominio ondular sí es posible, de manera sencilla, la aplicación simultánea del análisis de las variaciones en amplitud y contenido espectral. Ésto se consigue mediante la descomposición del sismograma en un conjunto de coeficientes distribuidos en el plano tiempo-escala.

La figura 28 presenta el sismograma digital E1430215, perteneciente a la base de datos descrita en la sección III.2 (el primer caracter del nombre indica la estación registradora, los números indican el día juliano, la hora y el minuto de registro); se muestran las componentes Vertical, N-S y E-O, a partir de las cuales varios lecturistas

independientes obtuvieron los tiempos de arribo de las fases P y S, 14.950 s y 18.130 s, respectivamente, desde la primera muestra, en pantalla de PC, con ayuda de cursores (resolución de 0.005 s).

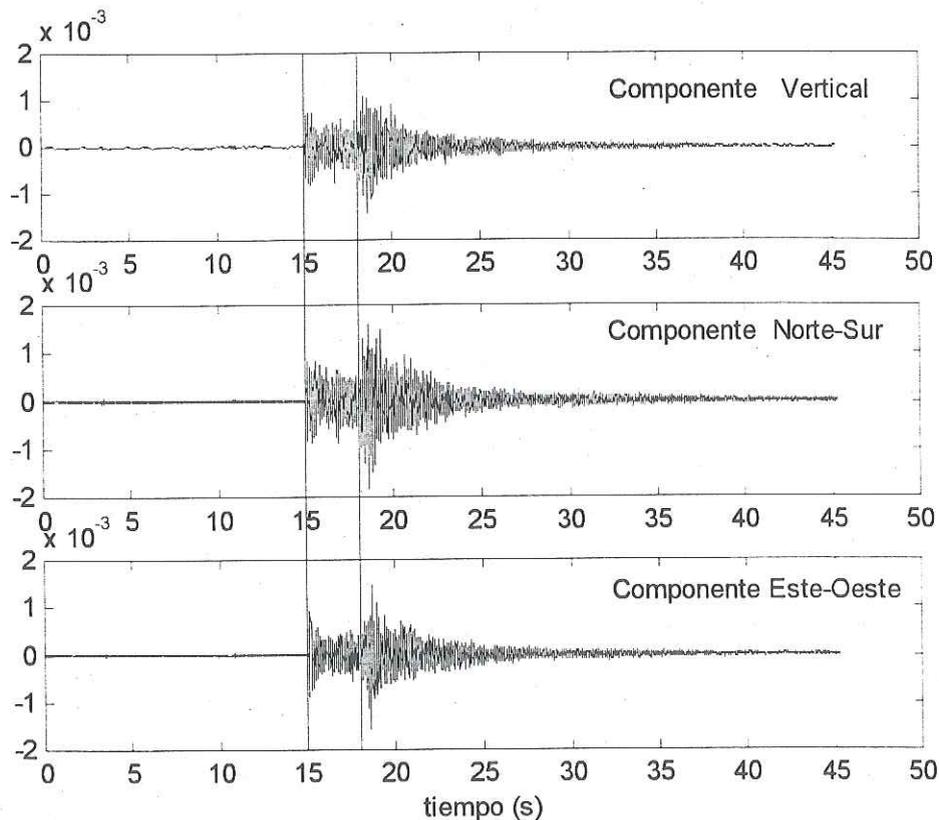


Figura 28. Registro del sismo E1430215 de tres componentes. Las líneas verticales señalan los tiempos de arribo de las fases P y S, leídos por un lectorista independiente, con cursores de resolución de 0.005 s, en pantalla de PC.

La TO aplicada a la componente vertical del sismograma E1430215 se ilustra en la figura 29; para esta ilustración se empleó el filtro de Daubechies-4 como kernel de la transformada. La distribución de los coeficientes ondulares en el plano de tiempo-escala presentan una clara alineación de amplitudes altas (tonos oscuros) en las primeras cinco

escalas (secuencias altas); esa alineación coincide con el inicio de la onda P en la traza sísmica. Se puede notar que antes de la alineación existen coeficientes de amplitud muy pequeña, distribuidos sin orden aparente, los cuales representan al ruido de frecuencia alta contenido en el sismograma. A partir de la escala 6 aparecen algunos coeficientes de amplitud elevada antes de los 15 s, los cuales representan al ruido de frecuencia baja; estos coeficientes no representan problemas en la identificación del arribo de P, ya que, como se discute más adelante, el primer quiebre de la onda P originará altas frecuencias, las cuales se manifiestan en las primeras escalas. Visualmente, la fase P puede ser reconocida con facilidad, ya que presenta (en la mayoría de los casos) un cambio repentino de amplitud, por encima del ruido de fondo presente en el sismograma.

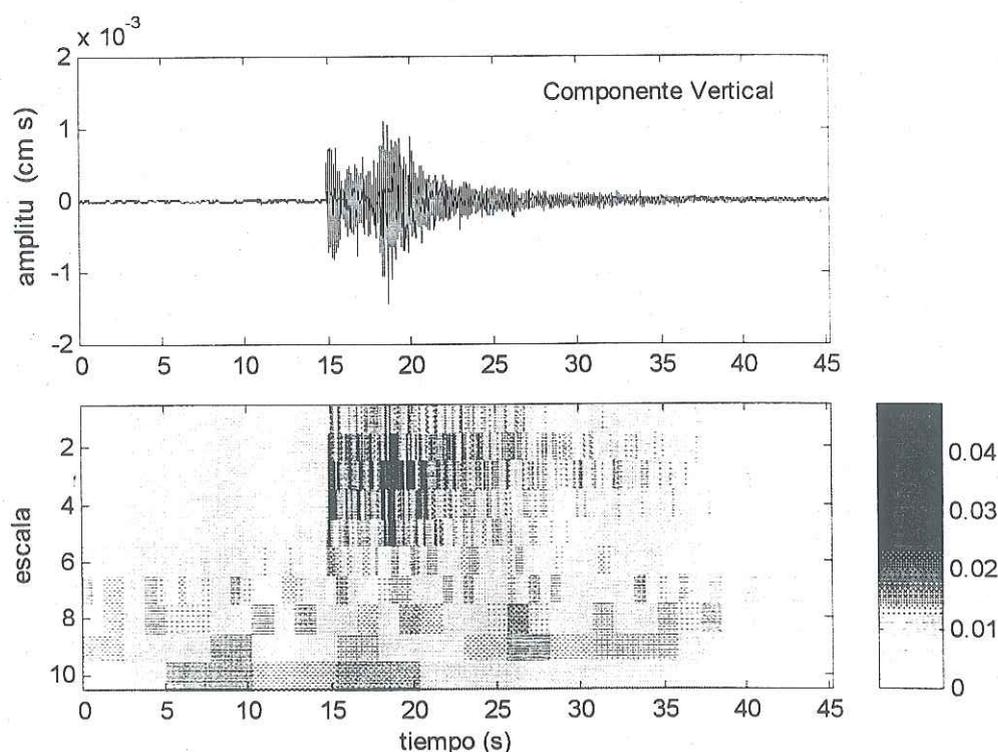


Figura 29. Representación de los coeficientes ondulares en el plano tiempo-escala. Se obtuvieron al aplicar la TO a la componente vertical del sismograma E1430215.

En la figura 29 se aprecia también la aparición de un alineamiento en la posición del arribo de onda S; sin embargo, por cuestiones de polarización, se espera una mejor definición de esta onda en las componentes horizontales de los sismogramas. En la figura 30, se presenta la TO de la componente este-oeste del mismo sismograma E1430215, con el mismo filtro que en la componente vertical. En ella se observa que existe un alineamiento de coeficientes con amplitudes altas (tonos más oscuros) asociado al arribo de la onda S; ese alineamiento presenta menor dispersión horizontal (eje del tiempo) que en el figura 29, lo cual indica que la onda S es identificada con mayor precisión en el tiempo cuando se analizan las componentes horizontales.

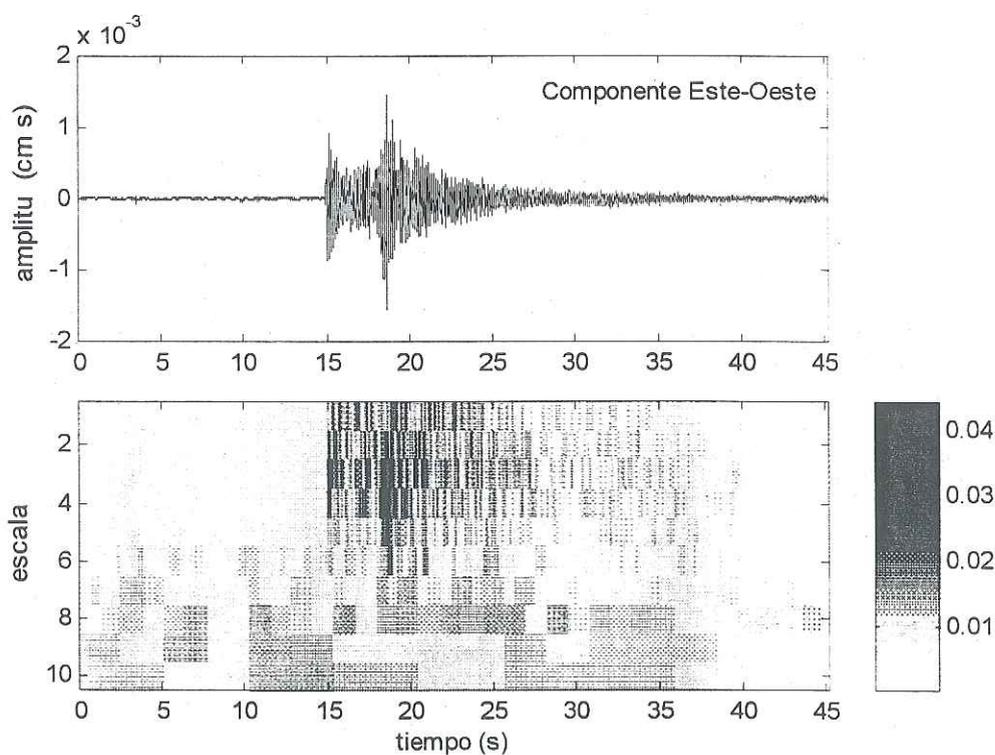


Figura 30. Representación de los coeficientes ondulares en el plano tiempo-escala, al aplicar Transformada Ondicular a la componente este-oeste del sismograma E1430215.

En el plano tiempo-escala de la figura 29 es posible realizar una localización visual del arribo de P, justamente en la posición donde aparecen los coeficientes altos alineados a lo largo de las primeras 5 escalas. Sin embargo, la detección automática del arribo de P requiere de la eliminación de los coeficientes posicionados en tiempos previos al arribo, de tal manera que el primer coeficiente diferente de cero en cada escala, corresponda justamente al tiempo de arribo de la onda P. La identificación automática de la Onda S resulta más problemática, ya que su primer arribo se encuentra inmerso en la coda de la onda P. En las siguientes secciones se describe los procedimientos para la detección automática de los tiempos de arribo de las fases P y S, aplicados sobre la TO de sismogramas digitales de tres componentes.

V.2 Descripción del esquema general

La representación de la TO de un sismograma fué ilustrada en la sección anterior; los algoritmos para la identificación automática actúan sobre los datos contenidos en el plano tiempo-escala. La inspección visual de las representaciones de las trazas sísmicas en ambos dominios (temporal y ondicular) permite ubicar la presencia de las ondas P y S; sin embargo, en el dominio del tiempo las amplitudes máximas para cada tipo de onda no necesariamente están asociados al primer arribo de éstas, de tal manera que un lectorista experimentado, después de identificar el paquete de máximas amplitudes de una fase, retrocede en el tiempo hasta encontrar el primer *quiebre* asociado con el arribo de la fase; en muchos de los casos, ese primer quiebre no presenta amplitudes muy sobresalientes sobre el ruido de fondo, lo que dificulta la implantación de una técnica automática de lectura de tiempos de arribo en ese dominio temporal. Aún cuando los primeros quiebres

no presenten amplitudes grandes, sus primeras derivadas sí son significativas, sobre todo en los casos de arribos *impulsivos*; una derivada de amplitud grande implica componentes de alta frecuencia con amplitud significativa. Por esto último, es de esperarse que en el dominio ondicular los pequeños quiebres asociados a los primeros arribos de las fases sísmicas produzcan coeficientes elevados en las escalas de mayores detalles (corta duración), y sea posible distinguirlos del ruido de fondo por su grande contraste de tono, tal como se aprecia en la figura 31.

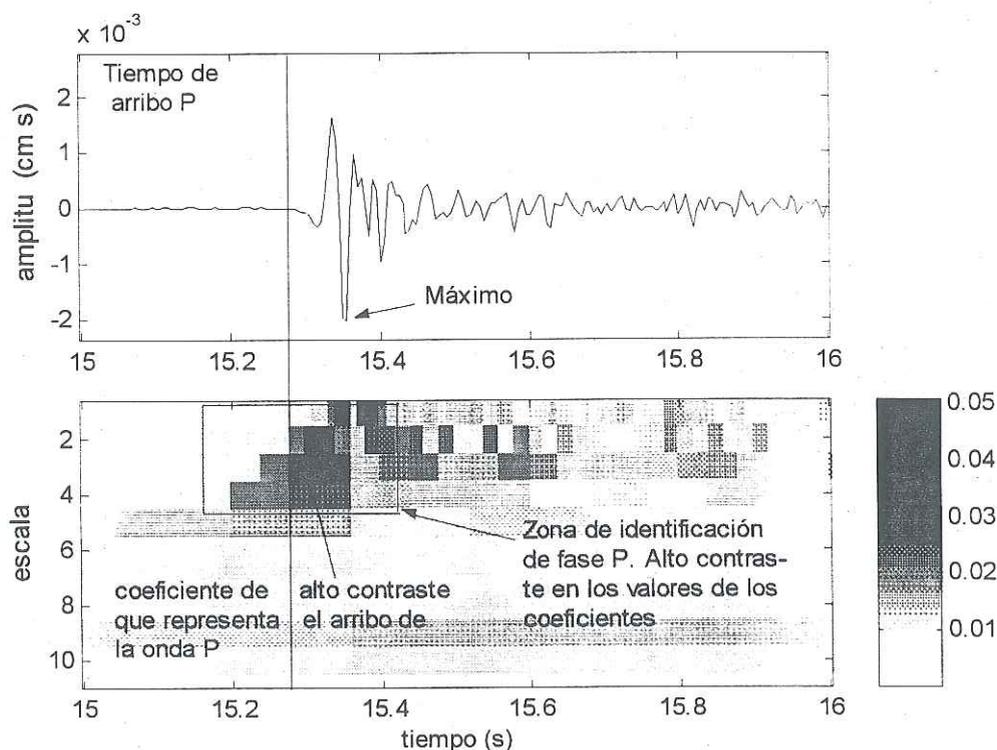


Figura 31. Sismograma con amplitudes de onda P de tipo impulsivo donde el máximo no corresponde al primer quiebre. El plano tiempo-escala identifica el primer quiebre con un coeficiente ondicular muy grande.

La aplicación de un procedimiento de identificación automática de primeros arribos puede, entonces, estar basado en el corte de los coeficientes de amplitudes menores que cierto umbral predeterminado, de tal manera que los coeficientes que forman un

alineamiento de amplitudes grandes persistan y constituyan los *primeros coeficientes diferentes de cero (PCDC)* a lo largo de varias escalas del plano tiempo-escala. El procedimiento que se propone en este trabajo consiste en la prueba de varios umbrales de corte, hasta conseguir aislar el alineamiento de coeficientes altos en las primeras escalas. Un procedimiento de corte de amplitudes bajas, como el propuesto aquí para aplicarse en el dominio ondicular, no funcionaría adecuadamente en el dominio temporal, ya que los quiebres de los primeros arribos también serían eliminados.

El concepto de *umbrales de corte* manejado en esta sección es similar al del proceso de compresión de datos sísmicos, descrito en el capítulo IV: se define un umbral de corte de coeficientes con base en parámetros estadísticos de la señal. Una vez estimada la desviación estándar (σ) de las amplitudes de los coeficientes en cada escala, se aplica sucesivamente umbrales de corte expresados como fracciones de σ , y se analiza las distribuciones resultantes de coeficientes en base a los siguientes criterios:

- 1) Persistencia de coeficientes. Los coeficientes que permanecen en la misma posición del eje del tiempo a lo largo de varios cortes sucesivos (coeficientes que *resisten* varios cortes) son candidatos para el posicionamiento del primer arribo de una fase sísmica.
- 2) Alineamiento de coeficientes. Cuando los *PCDC* que resultan de un corte están posicionados dentro de una ventana estrecha de tiempo (predeterminada) a lo largo de varias escalas, se les considera buenos candidatos para marcar el primer arribo de una fase.

- 3) Amplitud de los coeficientes. Si como resultado de la aplicación de los cortes no se obtiene un alineamiento de los *PCDC* a lo largo de las escalas, se considera que el *PCDC* de mayor amplitud estará asociado al primer arribo,
- 4) Congruencia de los coeficientes. Se pretende identificar a los coeficientes que arrojen resultados (tiempos de arribo) iguales cuando se aplican diferentes filtros en el cálculo de la TO, diferentes componentes (onda S), y diferentes criterios para la selección del coeficiente asociado al primer arribo (mejor alineamiento, mayor frecuencia de ocurrencia, máxima amplitud, promedio, etc.).

Los criterios anteriores, propuestos para ser aplicados a través de un método automático de lectura de tiempos de arribo, son básicamente los mismos que se aplicarían con un método visual sobre la distribución de los coeficientes ondulares en el plano tiempo-escala, pero mediante un análisis estadístico automatizado. A continuación se describe los procedimientos, por medio de etapas, para la detección automática de los tiempos de arribo de la fase P, y posteriormente para la S.

V.2.1 Identificación de la fase P

La identificación de la fase P se basa en el hecho de que el *paquete* de onda P es, por lo general, el primer conjunto de amplitudes altas desde el inicio de la traza sísmica. Entonces, la **primera etapa** en la aplicación de un método automático consiste en el aislamiento de ese primer conjunto de amplitudes elevadas; ésto se consigue mediante la aplicación de cortes en los coeficientes con amplitudes menores que un umbral propuesto. Para asegurar el criterio de persistencia, son aplicados varios umbrales de corte diferentes;

de tal manera que un coeficiente muy alto es resistente a muchos valores de umbral, por lo que su presencia será persistente.

La figura 32 presenta una secuencia de planos tiempo-escala, con coeficientes truncados usando umbrales desde 0.2σ hasta 3σ , aplicados sobre la TO de la componente vertical del sismograma E1421500. En la parte superior derecha de cada recuadro se indica el número de desviaciones estándar usado para el umbral de corte. Los coeficientes son representados por medio de rectángulos de diferente tonalidad según su valor, el tiempo que se asigna a cada coeficiente es el correspondiente al inicio del rectángulo, ya que cada punto del producto interno de la TO tiene asociado el tiempo del punto inicial del operador (ondícula). En esta secuencia se puede observar que la *desaparición* de coeficientes es más rápida en las primeras cuatro escalas del plano tiempo-escala; para los primeros tres valores de umbral se observa la remanencia de unos pocos coeficientes en las primeras cuatro escalas (barras verticales de un tono gris muy tenue antes de 15 s). A partir del cuarto valor de umbral (0.8σ) desaparecen esos coeficientes, y quedan solamente los coeficientes de alto contraste de tono, los cuales son representativos del tiempo de arribo de la fase P (aproximadamente a 15 s). La aplicación sucesiva de umbrales de corte, va introduciendo cada vez mayor número de ceros en los coeficientes de cada escala; cuando se encuentra un coeficiente de un valor muy grande, entonces por mucho que aumente el umbral no será posible llegar a remover este coeficiente, y su posición en el tiempo es una buena opción para declararla tiempo de arribo, por la persistencia del coeficiente a través de los cortes.

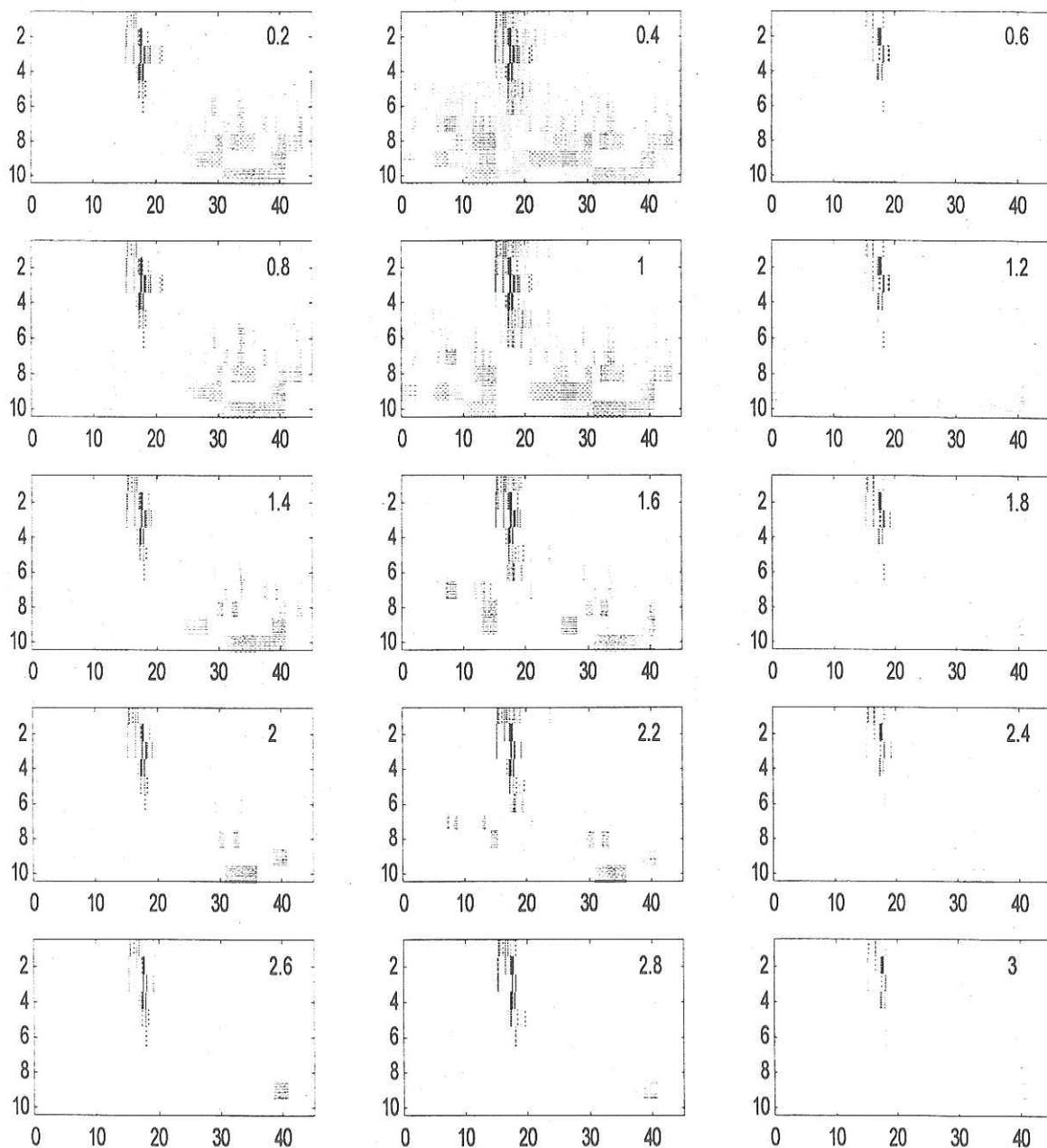


Figura 32. Secuencia de coeficientes ondulares truncados bajo la aplicación sucesiva de umbrales de corte, desde 0.2σ hasta 3.0σ , aplicados sobre la TO de la componente vertical del sismograma E1421500. En la parte superior derecha de cada recuadro se indica el número de desviaciones estándares empleado para el umbral de corte.

En la figura 32 se aprecia que existen varios valores persistentes a través de varias escalas, por lo que es necesario ahora aplicar el segundo criterio establecido arriba: el criterio de alineamiento.

Resulta claro que la cantidad de ruido presente antes del arribo de onda P determinará el rango de valores del umbral de truncamiento, dentro del cual resulta eficiente la búsqueda de esa onda. La determinación del límite mínimo del umbral se basa en el valor de un cociente de desviaciones estándar (σ_1 y σ_2) de dos ventanas del sismograma: una ventana justo al inicio del sismograma, y otra centrada en la parte del sismograma que contiene el máximo de la señal. A partir de un análisis empírico, se asoció el valor mínimo del umbral de corte, a los cocientes σ_1/σ_2 , de la siguiente manera:

Si $\sigma_1/\sigma_2 < 0.2$ el inicio del corte está en 0.2σ

Si $0.2 \leq \sigma_1/\sigma_2 < 0.3$ el inicio del corte está en 0.8σ

Si $0.3 \leq \sigma_1/\sigma_2 < 0.5$ el inicio del corte está en 1.2σ

Si $\sigma_1/\sigma_2 \geq 0.5$ el inicio del corte está en 1.6σ

La **segunda etapa** consiste en la formación de una tabla con los tiempos y amplitudes asociados a cada *PCDC* (uno para cada escala y para todos los umbrales). Como ejemplo, los *PCDC* que aparecen en la figura 32 forman la tabla II, que consiste de 150 elementos (15 umbrales x 10 escalas). Esos valores corresponden a la aplicación de los algoritmos de truncamiento sobre la TO calculada mediante la ondícula Daubechies-4; el mismo procedimiento es repetido para otras tres ondículas, como se detallará más tarde. Todos los valores contenidos en las tablas son mantenidos como arreglos internos en el

programa de cálculo, sin formar realmente archivos de escritura y lectura (para ahorrar tiempo de cómputo). Una marca *** en la tabla indica que fueron eliminados todos los coeficientes de esa escala con el umbral aplicado. La figura 33 muestra un ejemplo gráfico de cómo se calcula los coeficientes correspondientes a una escala y la manera en que se asigna los tiempos de ellos, la ondícula mostrada en esa figura tiene una forma arbitraria, que no representa a ninguna de las cuatro ondículas usadas en este trabajo.

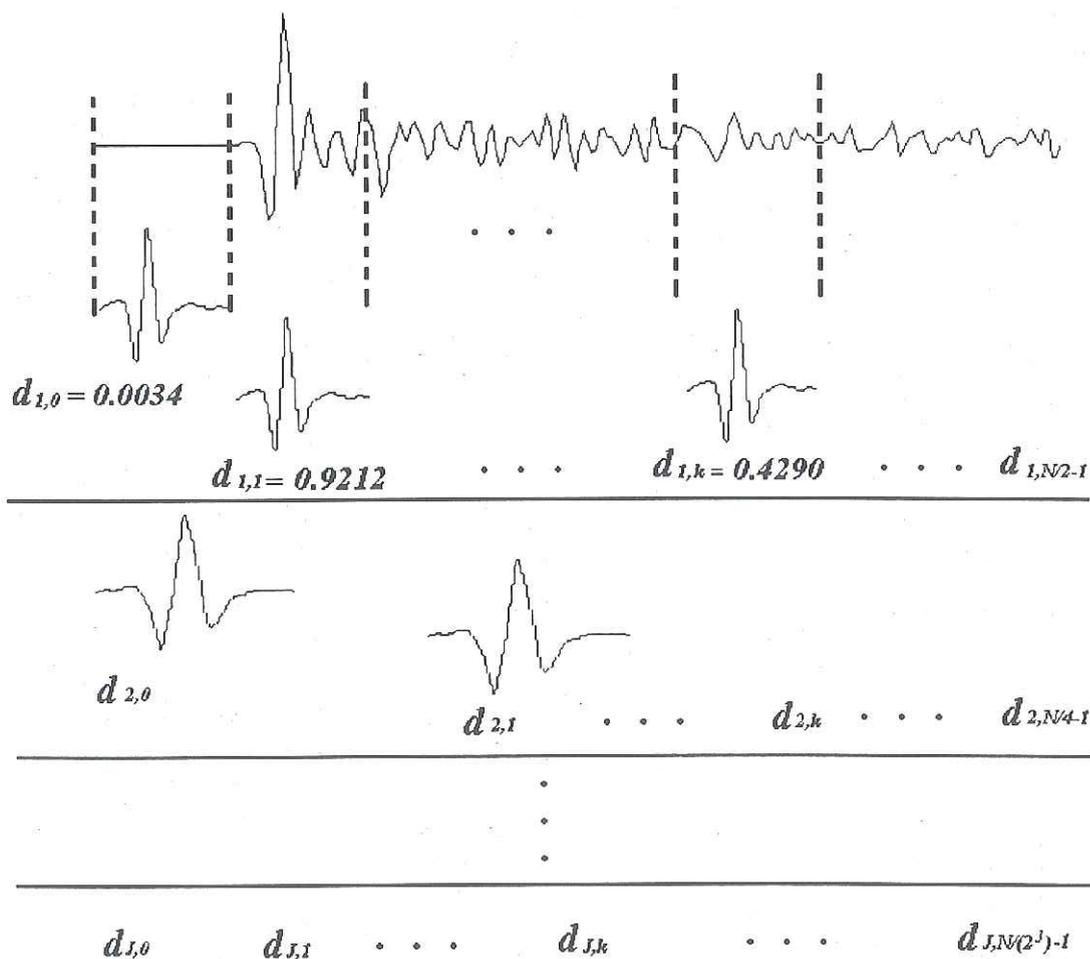


Figura 33. Cálculo de los coeficientes ondulares (producto interno de la ondícula y la parte de la señal mostrada en la ventana), y la asignación de sus posiciones en el tiempo.

Los valores contenidos en la tabla II constituyen la base de datos sobre la que se aplicará, en forma automática, los tres primeros criterios (persistencia, alineamiento y amplitudes). El cuarto criterio (congruencia), será aplicado en una etapa posterior, cuando se incluya otros tipos de ondículas u otras componentes. De la tabla II saldrá un sólo tiempo, el cual será el mejor candidato para ser considerado como tiempo de arribo de la onda P, para la ondícula empleada y la componente analizada. A continuación se describe la forma de aplicar los tres primeros criterios sobre la tabla II.

Ordinariamente, para la búsqueda del tiempo de arribo sólo se utiliza los tiempos correspondientes a las cuatro primeras escalas de cada umbral debido a que la resolución temporal disminuye conforme se avanza a escalas mayores, y a que los quiebres de los primeros arribos se transformarán en coeficientes elevados de alta frecuencia. Si no se consigue un adecuado seguimiento de los criterios de búsqueda dentro de las primeras cuatro escalas, se puede incluir iteradamente una escala más, hasta el número total de escalas disponibles (de acuerdo al tipo de filtro empleado en el cálculo de la TO). La búsqueda se inicia formando un subconjunto de tiempos (vector de tiempos) extraídos de la tabla II, lo cual constituye la **etapa 3**. La selección de tiempos a partir de la tabla II puede hacerse con base en varios esquemas; en este trabajo se hicieron pruebas con las siguientes combinaciones:

- a) Formación del vector con los tiempos correspondientes a las amplitudes máximas de cada umbral (inicialmente dentro de las primeras cuatro escalas). El vector contiene NU tiempos, donde NU es el número de umbrales considerados.

- b) Formación del vector con todos los tiempos de cada umbral, sin importar su amplitud, con tal de que estén dentro de las primeras NE escalas. NE es inicialmente igual a 4, pero puede llegar hasta el número máximo de escalas (NEM) permitido por el filtro empleado en la TO. El vector contiene $NU * NE$ tiempos.
- c) Búsqueda de los tiempos dentro de todos los umbrales trabajados (de 0.2σ a 3.0σ); ésto es, $NU = 15$ umbrales.
- d) Búsqueda de los tiempos dentro de la última mitad de los umbrales (de 1.6σ a 3.0σ); ésto es, $NU = 8$ umbrales.

En el apéndice B se describe las pruebas numéricas llevadas a cabo para probar la bondad de las cuatro combinaciones mencionadas. Como resultado de esas pruebas, se eligió la combinación siguiente:

Búsqueda de tiempos dentro de los 15 umbrales, usando todos los tiempos correspondientes a las primeras NE escalas. Ésto produce un vector de tiempos con $NT = NU * NE = 15 * 4 = 60$ valores.

Se ilustrará la aplicación de esta etapa 3 con el sismograma que produjo la tabla II. Se procede a extraer todos los tiempos correspondientes a las primeras NE escalas de cada uno de los NU umbrales de la tabla II, para formar la tabla III.

Tabla III Reducción de la tabla II a los tiempos correspondientes a las primeras NE (4) escalas, de los NU (15) umbrales, para el evento E1421500, aplicando Daubechies-4.

Umbral>	0.2 σ		0.4 σ		0.6 σ		0.8 σ	
Escala	tiempo (s)	amplitud						
1	0.00	-5.84E-06	0.09	1.27E-05	0.10	-1.91E-05	1.64	-2.48E-05
2	0.06	-2.17E-05	1.86	-2.83E-05	15.16	-5.53E-05	15.16	-5.53E-05
3	0.04	2.98E-05	15.16	8.38E-05	15.16	8.38E-05	15.20	2.84E-04
4	0.48	-1.22E-05	0.56	3.31E-05	0.56	3.31E-05	15.12	6.47E-05
	1.0 σ		1.2 σ		1.4 σ		1.6 σ	
1	7.50	-3.15E-05	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04
2	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04
3	15.20	2.84E-04	15.20	2.84E-04	15.20	2.84E-04	15.20	2.84E-04
4	15.12	6.47E-05	15.12	6.47E-05	15.20	9.11E-05	15.20	9.11E-05
	1.8 σ		2.0 σ		2.2 σ		2.4 σ	
1	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04
2	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04
3	15.20	2.84E-04	15.20	2.84E-04	15.20	2.84E-04	15.24	3.70E-04
4	16.88	-1.46E-04	16.88	-1.46E-04	16.88	-1.46E-04	16.88	-1.46E-04
	2.6 σ		2.8 σ		3.0 σ			
1	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04	15.20	-1.57E-04		
2	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04	15.18	-3.03E-04		
3	15.24	3.70E-04	15.24	3.70E-04	15.24	3.70E-04		
4	16.88	-1.46E-04	17.28	-7.02E-04	17.28	-7.02E-04		

La etapa 4 consiste en la determinación del "mejor" tiempo de arribo de la onda P, para la ondícula que se haya empleado y la componente utilizada. Ésto se consigue aplicando sobre el vector de tiempos formado en la etapa 3 (Tabla III), el siguiente procedimiento:

- 1) Los NT tiempos que forman el vector de búsqueda son agrupados en intervalos de ancho DT, para formar un histograma de frecuencia.
- 2) Se escoge un grupo de tiempos (i) de acuerdo a:
 - 2.1) Grupo de elementos de tiempo con mayor frecuencia de ocurrencia (F_i)

2.2) Grupo de elementos de tiempo con mayor amplitud promedio si hubiera más de un grupo con frecuencia de ocurrencia máxima.

3) Se aplica sobre el grupo (i) las siguientes pruebas:

- a) Si $F_i > 5$, entonces se elige el tiempo promedio de este grupo (T_i) como el tiempo de arribo. Fin de búsqueda.
- b) Si $F_i < 5$ y $NE < NEM$, entonces se regresa a la formación de la tabla III, incrementando el número de escalas a considerar ($NE = NE+1$). Regreso a paso 1.
- c) Si $F_i < 5$ y $NE = NEM$, se elige como tiempo de arribo al promedio del grupo con amplitud promedio mayor. Fin de búsqueda.

El valor óptimo para DT en el paso 1 fue determinado a partir de las pruebas numéricas que se describen en el apéndice B, quedando en $DT = 0.2$ s.

En la tabla IV se presentan los valores del histograma resultante de aplicar el paso 1 sobre la tabla III (evento E1421500, componente vertical, ondícula Daubechies-4); en esta tabla se ha eliminado los intervalos de tiempo vacíos. La figura 34 ilustra este histograma. En la tabla y figura se ve que existen ocho grupos con frecuencias de ocurrencia: [5 3 1 1 1 42 5 2]. La aplicación del paso 2 arroja como resultado la selección del grupo número 6, el cual tiene la mayor frecuencia de ocurrencia ($F_6 = 42$), por lo que el tiempo de arribo de la onda P queda $T_{PC} = 15.189$ s, ya que éste cumple con la condición 3a. El valor leído por un *lecturista* independiente, sobre la traza sísmica amplificada, es de $T_{PL} = 15.190$ s, lo que da un residual $T_{PL} - T_{PC} = 0.001$ s. La figura 35 muestra los tiempos leído (T_{PL} , flecha hacia abajo) y calculado (T_{PC} , flecha hacia arriba) para este evento usado como ejemplo (E1421500).

Tabla IV. Valores que forman el histograma ilustrado en la figura 34.

No. de grupo	Promedio de tiempo por grupo (s)	Frecuencia de ocurrencia	Promedio de amplitud por grupo
1	0.058	5	1.78E-05
2	0.538	3	2.61E-05
3	1.640	1	2.48E-05
4	1.860	1	2.83E-05
5	7.500	1	3.15E-05
6	15.189	42	2.22E-05
7	16.880	5	1.46E-05
8	17.280	2	7.02E-05

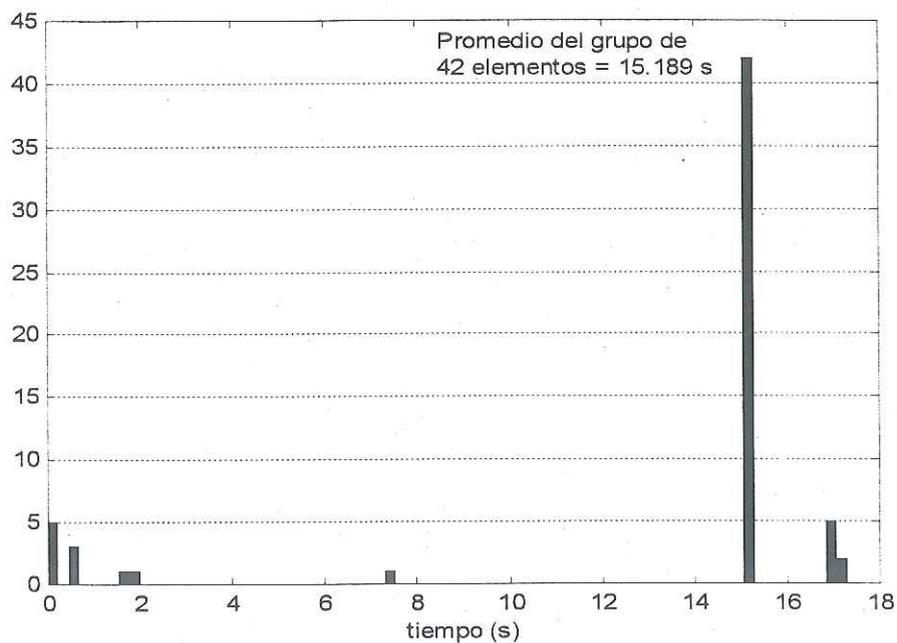


Figura 34. Histograma de frecuencias de los tiempos extraídos de la tabla III.

El proceso automático que llevó hasta la obtención del tiempo T_{PC} sólo requirió la intervención del usuario para proporcionar el nombre del sismograma a trabajar, y consumió un total de 1.65 segundos para su ejecución en una PC de 500 MHz.

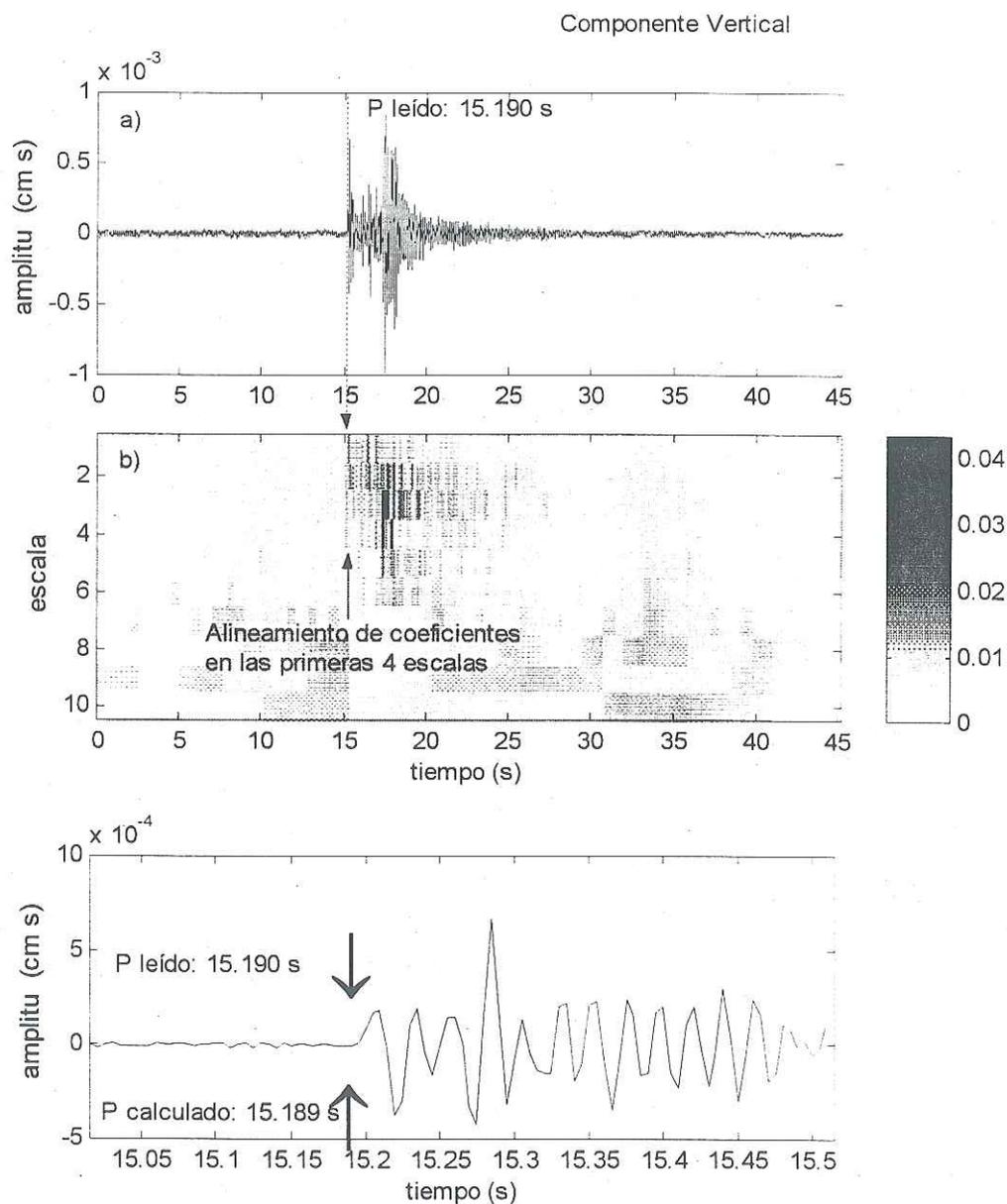


Figura 35. (a) Tiempo de arribo de la onda P, marcado con la línea punteada sobre el sismograma. (b) Mismo tiempo, marcado sobre el plano tiempo-escala. (c) Ventana de acercamiento para mostrar los tiempos de arribo de P en el sismograma, calculado (flecha hacia arriba) y leído (flecha hacia abajo). Evento E1421500, componente vertical, ondícula Daubechies-4.

En el ejemplo anterior, se aplicó la TO para calcular los tiempos de arribo para la onda P, utilizando la ondícula de Daubechies-4. El siguiente ejemplo lo constituye un sismograma de difícil lectura de tiempo de P (incluso para un lectorista con cursores de alta resolución), ya que se presenta un arribo inicial de onda Pn. Este evento es el E1481350, el

histograma de frecuencias define siete grupos de tiempos con las siguientes frecuencias de ocurrencia: [1 1 38 2 7 5 6] el grupo de tiempos de 38 elementos arroja un promedio de 15.202 s, mientras que el valor leído es de 15.300; su residual es de 0.098 s, por lo que sería de utilidad marginal en la localización hipocentral. La figura 36 muestra con flechas estos tiempos de arribo y además un tiempo de arribo de una posible fase P_n, antecedente al arribo P.

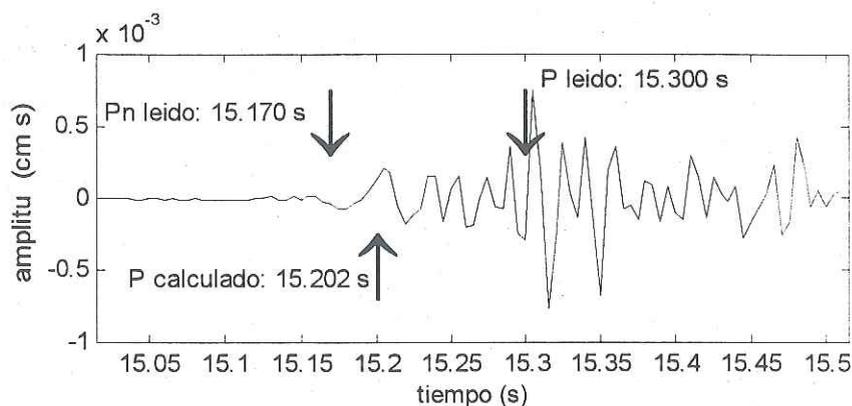


Figura 36. Arribos de P leído y calculado con TO usando la ondícula de Daubechies-4, para el evento E1481350. También se muestra el valor leído de la fase P_n.

Los resultados obtenidos en los ejemplos anteriores se lograron con la aplicación de una ondícula Daubechies-4. Dado que la aplicación de la TO implica una serie de productos internos entre el sismograma y la ondícula, es posible que la forma de ésta influya en el resultado de identificación de arribos de fases sísmicas. Para cubrir tal posibilidad, se aplicó el procedimiento antes descrito sobre las TO obtenidas con diferentes ondículas. La selección de las ondículas se realizó tomando en cuenta las diferentes formas simples que pueden tomar los primeros arribos de las ondas sísmicas; para ello, los lecturistas independientes formaron un catálogo con las formas más comunes que observaron en los

primeros arribos de los 140 sismogramas de la base de datos. Con ayuda de este catálogo, el cual se discute con detalle en el apéndice 4, se eligieron los filtros que mejor reproducen las formas de los primeros arribos. Se ha empleado las ondículas de Daubechies-4 (Db-4), Symmlet-4 (Sym-4), Coiflet-3 (Coif-3) y Haar.

Los filtros correspondientes a las cuatro ondículas seleccionadas se muestran en la figura 37. Al aplicar estas cuatro ondículas sobre el mismo sismograma empleado antes como ejemplo (E1421500), se obtienen los tiempos mostrados en la tabla V. En la tabla también se muestran la amplitud promedio resultante y la frecuencia de ocurrencia de los tiempos.

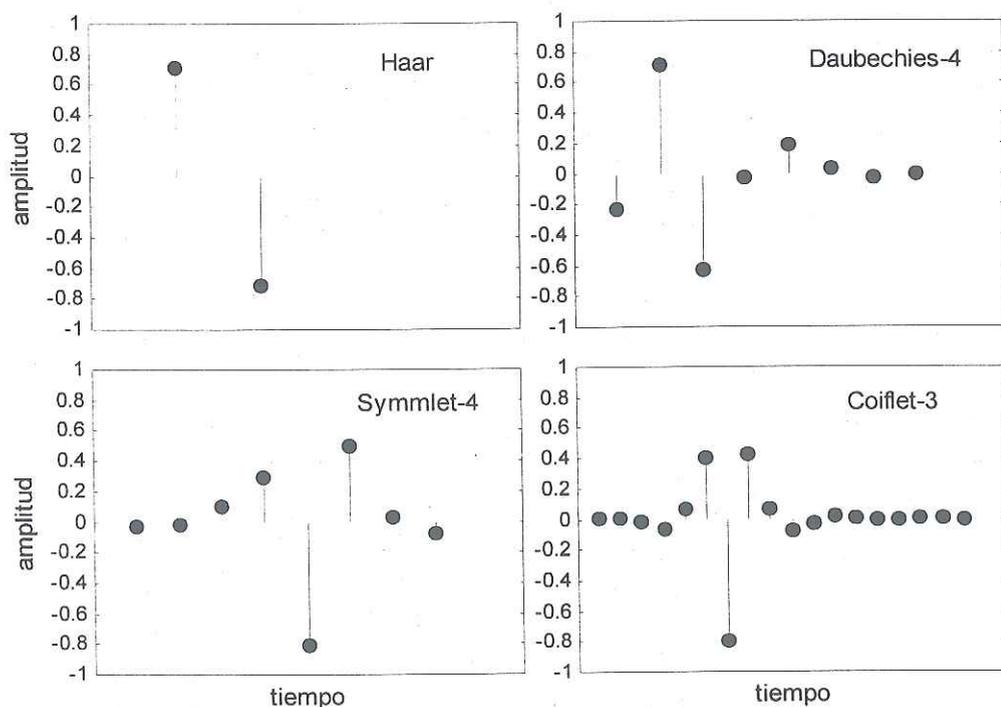


Figura 37. Filtros utilizados como kernel de la TO aplicada a la base de datos de 140 terremotos.

Tabla V. Tiempos de arribo obtenidos con cuatro ondículas utilizadas como kernel de la TO, aplicada sobre el sismograma del evento E1421500. El tiempo de arribo obtenido por los lecturistas independientes es de 15.190 s.

Ondícula	Arribo P (s)	Amplitud promedio	Frecuencia de ocurrencia
Haar	15.208	2.70 E-04	47
Daubechies-4	15.189	2.22 E-04	42
Symmlet-4	15.216	2.36 E-04	34
Coiflet-3	15.204	2.74 E-04	40

La tabla VI muestra los resultados obtenidos con cada una de las cuatro ondículas, para los 140 eventos de la base de datos. Es pertinente aclarar que la base de datos no fue depurada de manera alguna. Esta tabla contiene los tiempos de arribo de la fase P (leído y calculado) y sus residuales, calculados éstos como la diferencia entre el valor leído y el calculado. La figura 38 muestra los gráficos de esta tabla de valores.

Tabla VI. Valores de tiempo de arribo de onda P leído y calculado para las ondículas utilizadas

Evento	P leído	P calculado				Residuales (Pleído- Pcalculado)			
		Haar	Db-4	Sym-4	Coif-3	Haar	Db-4	Sym-4	Coif-3
E1420451	14.990	14.990	14.945	14.983	14.966	0.000	0.045	0.007	0.024
E1421119	14.905	14.930	14.921	14.942	14.914	-0.025	-0.016	-0.037	-0.009
E1421137	15.300	15.330	15.284	15.307	15.284	-0.030	0.016	-0.007	0.016
E1421204	15.185	15.225	15.192	15.228	15.204	-0.040	-0.007	-0.043	-0.019
E1421230	14.975	15.007	14.956	14.990	14.982	-0.032	0.019	-0.015	-0.007
E1421250	15.020	15.075	15.064	15.071	15.048	-0.055	-0.044	-0.051	-0.028
E1421500	15.190	15.208	15.189	15.216	15.204	-0.018	0.001	-0.026	-0.014
E1421504	14.975	14.990	14.958	14.973	14.958	-0.015	0.017	0.002	0.017
E1430215	14.950	14.973	14.922	14.979	14.954	-0.023	0.028	-0.029	-0.004
E1430343	15.065	15.080	15.053	15.086	15.084	-0.015	0.012	-0.021	-0.019
E1430410	15.045	15.073	15.071	15.063	15.053	-0.028	-0.026	-0.018	-0.008
E1430654	14.980	15.011	14.973	15.005	15.000	-0.031	0.007	-0.025	-0.020
E1430655	14.955	14.977	14.927	14.959	14.945	-0.022	0.028	-0.004	0.010
E1430749	14.980	15.042	14.979	15.009	15.010	-0.062	0.001	-0.029	-0.030
E1431347	15.090	15.087	15.063	15.075	15.071	0.003	0.027	0.015	0.019
E1431559	14.250	14.553	14.327	14.521	14.488	-0.303	-0.077	-0.271	-0.238
E1431607	21.540	21.532	21.493	21.505	21.503	0.008	0.047	0.035	0.037
E1440810	11.600	11.556	11.623	11.546	11.534	0.044	-0.023	0.054	0.066
E1441105	10.880	10.896	10.917	10.910	10.854	-0.016	-0.037	-0.030	0.026
E1441623	15.235	15.255	15.224	15.235	15.222	-0.020	0.011	0.000	0.013

E1442300	14.945	14.974	14.908	14.963	14.928	-0.029	0.037	-0.018	0.017
E1450044	14.810	14.853	14.833	14.856	14.826	-0.043	-0.023	-0.046	-0.016
E1450309	15.135	15.191	15.151	15.189	15.150	-0.056	-0.016	-0.054	-0.015
E1450428	15.275	15.299	15.253	15.269	15.261	-0.024	0.022	0.006	0.014
E1450518	14.915	14.959	14.920	14.930	14.944	-0.044	-0.005	-0.015	-0.029
E1450522	14.925	15.007	14.984	14.982	14.968	-0.082	-0.059	-0.057	-0.043
E1450613	14.750	14.837	14.802	14.851	14.861	-0.087	-0.052	-0.101	-0.111
E1450637	14.950	15.052	15.039	15.052	15.027	-0.102	-0.089	-0.102	-0.077
E1450651	15.055	15.055	15.034	15.048	15.047	0.000	0.021	0.007	0.008
E1450716	12.695	12.827	13.480	12.786	13.334	-0.132	-0.785	-0.091	-0.639
E1450837	10.690	10.725	10.664	10.724	10.679	-0.035	0.026	-0.034	0.011
E1451004	15.195	15.216	15.196	15.221	15.215	-0.021	-0.001	-0.026	-0.020
E1460240	14.600	14.700	14.684	14.707	14.694	-0.100	-0.084	-0.107	-0.094
E1460929	14.585	14.608	14.606	14.606	14.564	-0.023	-0.021	-0.021	0.021
E1461349	15.280	15.282	15.229	15.261	15.212	-0.002	0.051	0.019	0.068
E1461853	15.260	15.281	15.255	15.250	15.249	-0.021	0.005	0.010	0.011
E1470144	14.400	14.834	14.828	14.947	14.892	-0.434	-0.428	-0.547	-0.492
E1471305	15.010	15.022	15.027	15.012	15.001	-0.012	-0.017	-0.002	0.009
E1471421	15.255	15.284	15.244	15.288	15.251	-0.029	0.011	-0.033	0.004
E1471522	15.015	15.015	14.983	15.001	14.979	0.000	0.032	0.014	0.036
E1471524	15.070	15.068	15.021	15.068	15.038	0.002	0.049	0.002	0.032
E1471708	15.125	15.156	15.134	15.136	15.118	-0.031	-0.009	-0.011	0.007
E1480340	15.090	15.157	15.246	15.164	15.155	-0.067	-0.156	-0.074	-0.065
E1480609	15.140	15.188	15.133	15.154	15.138	-0.048	0.007	-0.014	0.002
E1481218	15.255	15.279	15.257	15.270	15.272	-0.024	-0.002	-0.015	-0.017
E1481223	14.975	14.978	14.949	14.955	14.943	-0.003	0.026	0.020	0.032
E1481238	15.010	15.027	14.994	15.023	14.999	-0.017	0.016	-0.013	0.011
E1481251	15.285	15.300	15.279	15.293	15.289	-0.015	0.006	-0.008	-0.004
E1481350	15.300	15.226	15.202	15.206	15.205	0.074	0.098	0.094	0.095
E1481737	15.140	15.173	15.144	15.160	15.133	-0.033	-0.004	-0.020	0.007
E1481742	34.225	34.243	34.203	34.240	34.211	-0.018	0.022	-0.015	0.014
E1490348	15.155	15.170	15.164	15.165	15.136	-0.015	-0.009	-0.010	0.019
E1490834	15.085	15.093	15.075	15.078	15.068	-0.008	0.010	0.007	0.017
E1491620	14.095	14.121	14.084	14.118	14.070	-0.026	0.011	-0.023	0.025
E1491746	15.145	15.147	15.122	15.141	15.123	-0.002	0.023	0.004	0.022
E1500840	14.975	15.229	15.083	15.118	15.253	-0.254	-0.108	-0.143	-0.278
E1500937	15.145	15.250	15.199	15.236	15.228	-0.105	-0.054	-0.091	-0.083
E1501412	15.155	15.157	15.125	15.164	15.163	-0.002	0.030	-0.009	-0.008
E1510223	15.340	15.376	15.332	15.333	15.334	-0.036	0.008	0.007	0.006
E1510540	14.945	14.952	14.938	14.946	14.936	-0.007	0.007	-0.001	0.009
E1511031	15.285	15.383	15.330	15.353	15.368	-0.098	-0.045	-0.068	-0.083
E1512209	14.975	14.970	14.922	14.949	14.934	0.005	0.053	0.026	0.041
E1520153	14.990	15.012	14.999	14.997	14.986	-0.022	-0.009	-0.007	0.004
E1520354	15.020	15.066	15.024	15.057	15.033	-0.046	-0.004	-0.037	-0.013
E1520650	15.100	15.196	15.192	15.199	15.207	-0.096	-0.092	-0.099	-0.107
E1521512	15.015	15.011	14.997	15.013	14.991	0.004	0.018	0.002	0.024
E1521951	12.495	12.521	12.501	12.520	12.491	-0.026	-0.006	-0.025	0.004

E1530217	15.205	15.249	15.204	15.210	15.212	-0.044	0.001	-0.005	-0.007
E1530218	15.185	15.215	15.166	15.206	15.178	-0.03	0.019	-0.021	0.007
E1530350	15.010	14.999	14.976	14.968	14.964	0.011	0.034	0.042	0.046
E1530438	14.980	14.975	14.950	14.949	14.949	0.005	0.030	0.031	0.031
E1530625	15.075	15.150	15.090	15.109	15.106	-0.075	-0.015	-0.034	-0.031
E1530637	15.240	15.262	15.252	15.240	15.218	-0.022	-0.012	0.000	0.022
E1530640	12.885	6.890	6.873	13.012	6.886	5.995	6.012	-0.127	5.999
E1530641	14.860	14.917	14.901	14.907	14.875	-0.057	-0.041	-0.047	-0.015
E1530956	15.280	15.326	15.300	15.306	15.291	-0.046	-0.020	-0.026	-0.011
E1531758	9.275	9.354	9.337	9.351	9.306	-0.079	-0.062	-0.076	-0.031
E1540642	15.090	15.085	15.070	15.087	15.064	0.005	0.020	0.003	0.026
E1540651	15.190	15.213	15.198	15.218	15.214	-0.023	-0.008	-0.028	-0.024
E1540834	15.050	15.050	15.022	15.037	15.019	0.000	0.028	0.013	0.031
E1541024	15.100	15.117	15.081	15.079	15.077	-0.017	0.019	0.021	0.023
E1541032	15.140	15.179	15.129	15.154	15.134	-0.039	0.011	-0.014	0.006
E1541228	14.935	15.018	14.984	15.006	14.987	-0.083	-0.049	-0.071	-0.052
E1541409	15.030	15.048	15.016	15.039	15.016	-0.018	0.014	-0.009	0.014
E1541741	15.220	15.227	15.208	15.207	15.197	-0.007	0.012	0.013	0.023
E1541819	15.115	15.153	15.118	15.141	15.105	-0.038	-0.003	-0.026	0.010
E1552013	15.325	15.323	15.313	15.310	15.299	0.002	0.012	0.015	0.026
E1560154	15.270	15.343	15.331	15.339	15.316	-0.073	-0.061	-0.069	-0.046
E1560156	14.810	14.886	14.849	14.881	14.851	-0.076	-0.039	-0.071	-0.041
E1560313	14.990	15.020	14.984	14.995	15.006	-0.030	0.006	-0.005	-0.016
E1560320	14.710	14.785	14.769	14.786	14.744	-0.075	-0.059	-0.076	-0.034
E1560416	14.590	14.646	14.615	14.644	14.559	-0.056	-0.025	-0.054	0.031
E1560549	11.600	11.669	11.668	11.660	11.655	-0.069	-0.068	-0.060	-0.055
E1560912	15.065	15.131	15.095	15.093	15.100	-0.066	-0.030	-0.028	-0.035
E1560913	14.780	14.907	14.820	15.025	15.216	-0.127	-0.040	-0.245	-0.436
E1560918	14.795	14.820	14.793	14.814	14.812	-0.025	0.002	-0.019	-0.017
E1561234	15.025	15.090	15.089	15.094	15.127	-0.065	-0.064	-0.069	-0.102
E1561300	14.845	14.855	14.832	14.860	14.829	-0.010	0.013	-0.015	0.016
E1561326	15.255	15.313	15.278	15.315	15.259	-0.058	-0.023	-0.060	-0.004
E1561443	15.155	15.191	15.181	15.173	15.142	-0.036	-0.026	-0.018	0.013
E1561831	15.080	15.074	15.015	15.052	15.036	0.006	0.065	0.028	0.044
E1562346	15.095	15.126	15.134	15.140	15.121	-0.031	-0.039	-0.045	-0.026
E1562351	15.040	15.093	15.042	15.054	15.036	-0.053	-0.002	-0.014	0.004
E1570446	15.045	15.052	15.023	15.037	15.041	-0.007	0.022	0.008	0.004
E1570603	13.910	13.958	14.524	13.980	14.543	-0.048	-0.614	-0.070	-0.633
E1570734	15.100	15.108	15.087	15.109	15.098	-0.008	0.013	-0.009	0.002
E1571554	14.905	15.001	14.975	14.996	14.920	-0.096	-0.070	-0.091	-0.015
E1571639	14.725	14.873	14.919	14.857	14.864	-0.148	-0.194	-0.132	-0.139
E1571650	15.260	15.335	15.318	15.334	15.373	-0.075	-0.058	-0.074	-0.113
E1571656	15.340	15.378	15.323	15.346	15.337	-0.038	0.017	-0.006	0.003
E1572017	14.905	14.895	14.869	14.881	14.868	0.010	0.036	0.024	0.037
E1580024	14.935	15.006	14.993	14.997	14.993	-0.071	-0.058	-0.062	-0.058
E1580540	15.280	15.348	15.312	15.351	15.324	-0.068	-0.032	-0.071	-0.044
E1580606	15.100	15.145	15.107	15.123	15.206	-0.045	-0.007	-0.023	-0.106

E1580732	15.135	15.186	15.167	15.167	15.161	-0.051	-0.032	-0.032	-0.026
E1581038	15.250	15.325	15.305	15.313	15.285	-0.075	-0.055	-0.063	-0.035
E1581500	15.130	15.147	15.126	15.133	15.142	-0.017	0.004	-0.003	-0.012
E1581519	14.975	15.023	14.992	15.000	14.997	-0.048	-0.017	-0.025	-0.022
E1581520	14.940	15.017	15.295	15.285	15.277	-0.077	-0.355	-0.345	-0.337
E1581546	13.960	13.964	13.949	13.975	13.946	-0.004	0.011	-0.015	0.014
E1581920	15.050	15.134	15.097	15.133	15.094	-0.084	-0.047	-0.083	-0.044
E1581925	14.950	15.038	15.018	15.043	15.016	-0.088	-0.068	-0.093	-0.066
E1582007	14.720	14.816	14.773	14.756	14.765	-0.096	-0.053	-0.036	-0.045
E1582103	15.045	15.122	15.087	15.107	15.083	-0.077	-0.042	-0.062	-0.038
E1582133	15.100	15.148	15.144	15.111	15.147	-0.048	-0.044	-0.011	-0.047
E1590305	15.090	15.143	15.110	15.130	15.107	-0.053	-0.020	-0.040	-0.017
E1590415	15.090	15.113	15.107	15.105	15.100	-0.023	-0.017	-0.015	-0.010
E1590520	15.195	15.287	15.251	15.262	15.275	-0.092	-0.056	-0.067	-0.080
E1590812	15.210	15.205	15.175	15.196	15.174	0.005	0.035	0.014	0.036
E1590823	15.075	15.109	15.056	15.078	15.076	-0.034	0.019	-0.003	-0.001
E1590831	15.270	15.323	15.310	15.324	15.254	-0.053	-0.04	-0.054	0.016
E1590921	15.230	15.272	15.254	15.249	15.244	-0.042	-0.024	-0.019	-0.014
E1590931	14.930	14.941	14.929	14.930	14.907	-0.011	0.001	0.000	0.023
E1590952	13.685	13.925	14.294	13.932	14.260	-0.140	-0.509	-0.147	-0.475
E1590953	15.165	15.212	15.193	15.202	15.191	-0.047	-0.028	-0.037	-0.026
E1591004	15.215	15.283	15.250	15.255	15.254	-0.068	-0.035	-0.040	-0.039
E1591147	15.045	15.117	15.082	15.092	15.092	-0.072	-0.037	-0.047	-0.047
E1591222	15.295	15.309	15.300	15.301	15.282	-0.014	-0.005	-0.006	0.013
E1591509	14.955	15.024	15.020	15.033	15.011	-0.069	-0.065	-0.078	-0.056
E1591525	19.535	15.382	19.506	19.512	19.482	4.153	0.029	0.023	0.053

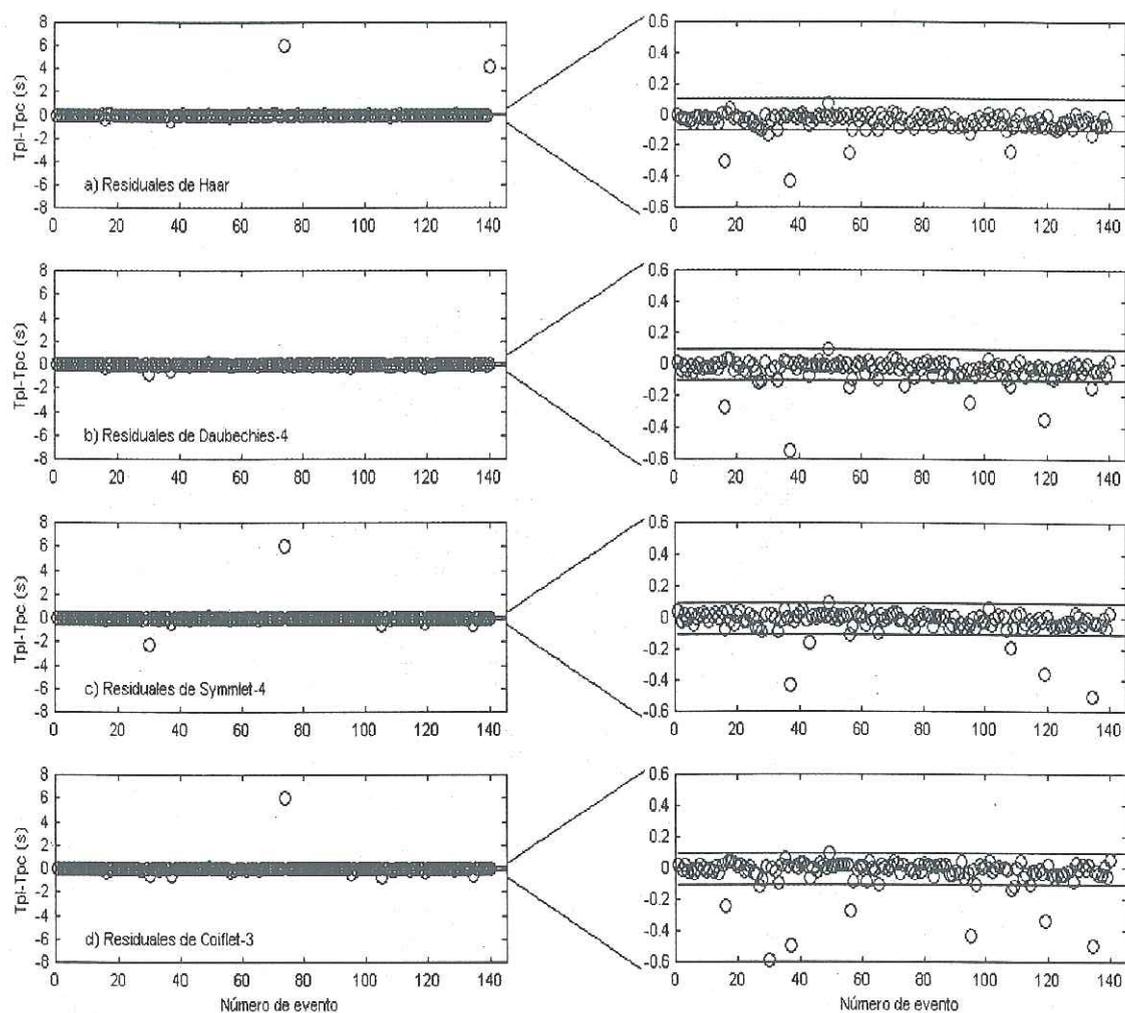


Figura 38. Residuales de tiempo de arribo ($P_{leído} - P_{calculado}$) obtenidos al utilizar cuatro diferentes ondículas.

Ahora se tiene cuatro tiempos de arribo de onda P para cada uno de los 140 sismogramas, cada uno proveniente de una ondícula. Es necesario aplicar algún criterio de selección del tiempo definitivo de arribo, o bien usar el promedio de los cuatro tiempos. La idea intuitiva del autor es que la selección del tiempo menor entre los cuatro evitaría la influencia de la coda de la P. De cualquier manera, se probó cuatro criterios de selección:

- a) Frecuencia de ocurrencia. Se atiende a la máxima frecuencia de ocurrencia dentro de los histogramas correspondientes a las cuatro ondículas. De los cuatro resultados se escoge como tiempo de arribo aquel que produjo la frecuencia de ocurrencia más alta. Con este criterio se toma en cuenta la persistencia de los *PCDC* a lo largo de los truncamientos; ésto es, cuanto más robusto sea un coeficiente, su tiempo asociado tendrá una mayor frecuencia de ocurrencia.
- b) Mayor amplitud. Se escoge como tiempo de arribo aquel que produjo la mayor amplitud promedio, entre los cuatro filtros utilizados. Este criterio se basa en la idea de que los coeficientes con amplitudes mayores estarán asociados a los tiempos de arribo.
- c) Tiempo mínimo. Se toma como tiempo de arribo el menor entre las cuatro ondículas, después de excluir los tiempos claramente excéntricos (tiempos alejados más del 30% de la media). Al elegir el menor tiempo se evita la selección de tiempos asociados a las amplitudes máximas del grupo de P, en los casos en que el primer arribo es de amplitud menor que el máximo.
- d) Tiempo promedio. Se obtiene un promedio de los tiempos de todas las ondículas, después de excluir los valores excéntricos. Con ésto se pretende probar si la combinación simple de las cuatro ondículas cancela los errores de signo opuesto.

La tabla VII presenta los tiempos de arribo seleccionados de acuerdo a los cuatro criterios enumerados arriba. En la figura 39 se presenta las gráficas de sus residuales. La selección se realiza sobre los valores de la Tabla VI; en la cual, por razones de simplicidad, no se incluye los valores de frecuencia de ocurrencia ni de amplitud, pero se tomaron en cuenta para la aplicación de los cuatro criterios. Así, las gráficas de residuales de la figura 39 son el resultado de una mezcla de tiempos calculados con las 4 diferentes ondículas.

Tabla VII. Tiempos de arribo de onda P y sus residuales, para los cuatro criterios de selección. T_{p1} es el tiempo de máxima frecuencia, T_{p2} es el tiempo de máxima amplitud, T_{p3} es el tiempo menor, T_{p4} es el tiempo promedio; R_i son los residuales correspondientes; T_{Lp} es el tiempo de arribo leído por un lectorista independiente.

Evento	T_{p1}	R_1	T_{p2}	R_2	T_{p3}	R_3	T_{p4}	R_4	T_{Lp}
1420451	14.945	0.045	14.983	0.007	14.945	0.045	14.971	0.019	14.990
1421119	14.930	-0.025	14.914	-0.009	14.914	-0.009	14.927	-0.022	14.905
1421137	15.307	-0.007	15.330	-0.030	15.284	0.016	15.301	-0.001	15.300
1421204	15.228	-0.043	15.204	-0.019	15.192	-0.007	15.212	-0.027	15.185
1421230	15.007	-0.032	14.982	-0.007	14.956	0.019	14.984	-0.009	14.975
1421250	15.071	-0.051	15.048	-0.028	15.048	-0.028	15.065	-0.045	15.020
1421500	15.208	-0.018	15.204	-0.014	15.189	0.001	15.204	-0.014	15.190
1421504	14.990	-0.015	14.990	-0.015	14.958	0.017	14.970	0.005	14.975
1430215	14.973	-0.023	14.973	-0.023	14.922	0.028	14.957	-0.007	14.950
1430343	15.080	-0.015	15.084	-0.019	15.053	0.012	15.076	-0.011	15.065
1430410	15.073	-0.028	15.071	-0.026	15.053	-0.008	15.065	-0.020	15.045
1430654	15.000	-0.020	15.011	-0.031	14.973	0.007	14.997	-0.017	14.980
1430655	14.945	0.010	14.977	-0.022	14.927	0.028	14.952	0.003	14.955
1430749	15.010	-0.030	15.042	-0.062	14.979	0.001	15.010	-0.030	14.980
1431347	15.075	0.015	15.071	0.019	15.063	0.027	15.074	0.016	15.090
1431559	14.521	-0.271	14.521	-0.271	14.327	-0.077	14.472	-0.222	14.250
1431607	21.505	0.035	21.503	0.037	21.493	0.047	21.508	0.032	21.540
1440810	11.556	0.044	11.623	-0.023	11.534	0.066	11.565	0.035	11.600
1441105	10.917	-0.037	10.910	-0.030	10.854	0.026	10.894	-0.014	10.880
1441623	15.255	-0.020	15.224	0.011	15.222	0.013	15.234	0.001	15.235
1442300	14.974	-0.029	14.963	-0.018	14.908	0.037	14.943	0.002	14.945
1450044	14.856	-0.046	14.856	-0.046	14.826	-0.016	14.842	-0.032	14.810
1450309	15.191	-0.056	15.189	-0.054	15.150	-0.015	15.170	-0.035	15.135
1450428	15.253	0.022	15.261	0.014	15.253	0.022	15.270	0.005	15.275
1450518	14.959	-0.044	14.944	-0.029	14.920	-0.005	14.938	-0.023	14.915
1450522	14.982	-0.057	15.007	-0.082	14.968	-0.043	14.985	-0.060	14.925
1450613	14.802	-0.052	14.851	-0.101	14.802	-0.052	14.838	-0.088	14.750
1450637	15.052	-0.102	15.039	-0.089	15.027	-0.077	15.043	-0.093	14.950
1450651	15.055	0.000	15.047	0.008	15.034	0.021	15.046	0.009	15.055
1450716	12.827	-0.132	13.480	-0.785	12.786	-0.091	12.827	-0.132	12.695
1450837	10.679	0.011	10.724	-0.034	10.664	0.026	10.698	-0.008	10.690
1451004	15.196	-0.001	15.215	-0.020	15.196	-0.001	15.212	-0.017	15.195
1460240	14.700	-0.100	14.694	-0.094	14.684	-0.084	14.696	-0.096	14.600
1460929	14.608	-0.023	14.564	0.021	14.564	0.021	14.596	-0.011	14.585
1461349	15.282	-0.002	15.282	-0.002	15.212	0.068	15.246	0.034	15.280
1461853	15.255	0.005	15.255	0.005	15.249	0.011	15.259	0.001	15.260
1470144	14.828	-0.428	14.828	-0.428	14.828	-0.428	14.875	-0.475	14.400
1471305	15.001	0.009	15.001	0.009	15.001	0.009	15.015	-0.005	15.010
1471421	15.284	-0.029	15.288	-0.033	15.244	0.011	15.267	-0.012	15.255
1471522	15.015	0.000	15.001	0.014	14.979	0.036	14.995	0.021	15.015
1471524	15.021	0.049	15.068	0.002	15.021	0.049	15.049	0.021	15.070
1471708	15.156	-0.031	15.156	-0.031	15.118	0.007	15.136	-0.011	15.125
1480340	15.155	-0.065	15.246	-0.156	15.155	-0.065	15.181	-0.091	15.090
1480609	15.188	-0.048	15.188	-0.048	15.133	0.007	15.153	-0.013	15.140
1481218	15.279	-0.024	15.272	-0.017	15.257	-0.002	15.269	-0.014	15.255
1481223	14.955	0.020	14.949	0.026	14.943	0.032	14.956	0.019	14.975
1481238	15.023	-0.013	15.023	-0.013	14.994	0.016	15.011	-0.001	15.010

1481251	15.289	-0.004	15.279	0.006	15.279	0.006	15.290	-0.005	15.285
1481350	15.226	0.074	15.226	0.074	15.202	0.098	15.210	0.090	15.300
1481737	15.144	-0.004	15.144	-0.004	15.133	0.007	15.153	-0.012	15.140
1481742	34.203	0.022	34.240	-0.015	34.203	0.022	34.224	0.001	34.225
1490348	15.165	-0.010	15.165	-0.010	15.136	0.019	15.159	-0.004	15.155
1490834	15.075	0.010	15.075	0.010	15.068	0.017	15.078	0.007	15.085
1491620	14.121	-0.026	14.084	0.011	14.070	0.025	14.098	-0.003	14.095
1491746	15.147	-0.002	15.123	0.022	15.122	0.023	15.133	0.012	15.145
1500840	15.229	-0.254	15.253	-0.278	15.083	-0.108	15.171	-0.196	14.975
1500937	15.250	-0.105	15.250	-0.105	15.199	-0.054	15.228	-0.083	15.145
1501412	15.163	-0.008	15.163	-0.008	15.125	0.030	15.152	0.003	15.155
1510223	15.376	-0.036	15.376	-0.036	15.332	0.008	15.344	-0.004	15.340
1510540	14.938	0.007	14.938	0.007	14.936	0.009	14.943	0.002	14.945
1511031	15.383	-0.098	15.330	-0.045	15.330	-0.045	15.359	-0.074	15.285
1512209	14.970	0.005	14.934	0.041	14.922	0.053	14.944	0.031	14.975
1520153	15.012	-0.022	14.999	-0.009	14.986	0.004	14.999	-0.008	14.990
1520354	15.024	-0.004	15.066	-0.046	15.024	-0.004	15.045	-0.025	15.020
1520650	15.207	-0.107	15.192	-0.092	15.192	-0.092	15.198	-0.098	15.100
1521512	14.997	0.018	14.997	0.018	14.991	0.024	15.003	0.012	15.015
1521951	12.521	-0.026	12.501	-0.006	12.491	0.004	12.508	-0.013	12.495
1530217	15.249	-0.044	15.249	-0.044	15.204	0.001	15.219	-0.014	15.205
1530218	15.206	-0.021	15.215	-0.030	15.166	0.019	15.191	-0.006	15.185
1530350	14.964	0.046	14.968	0.042	14.964	0.046	14.977	0.033	15.010
1530438	14.950	0.030	14.949	0.031	14.949	0.031	14.956	0.024	14.980
1530625	15.150	-0.075	15.090	-0.015	15.090	-0.015	15.114	-0.039	15.075
1530637	15.262	-0.022	15.262	-0.022	15.218	0.022	15.243	-0.003	15.240
1530640	13.012	-0.127	6.890	5.995	6.890	5.995	13.763	-0.878	12.885
1530641	14.917	-0.057	14.917	-0.057	14.875	-0.015	14.900	-0.040	14.860
1530956	15.326	-0.046	15.326	-0.046	15.291	-0.011	15.306	-0.026	15.280
1531758	9.306	-0.031	9.337	-0.062	9.306	-0.031	9.337	-0.062	9.275
1540642	15.070	0.020	15.064	0.026	15.064	0.026	15.077	0.013	15.090
1540651	15.213	-0.023	15.214	-0.024	15.198	-0.008	15.211	-0.021	15.190
1540834	15.050	0.000	15.050	0.000	15.019	0.031	15.032	0.018	15.050
1541024	15.117	-0.017	15.081	0.019	15.077	0.023	15.089	0.011	15.100
1541032	15.179	-0.039	15.179	-0.039	15.129	0.011	15.149	-0.009	15.140
1541228	15.018	-0.083	15.018	-0.083	14.984	-0.049	14.999	-0.064	14.935
1541409	15.048	-0.018	15.016	0.014	15.016	0.014	15.030	0.000	15.030
1541741	15.207	0.013	15.227	-0.007	15.197	0.023	15.210	0.010	15.220
1541819	15.153	-0.038	15.141	-0.026	15.105	0.010	15.129	-0.014	15.115
1552013	15.323	0.002	15.323	0.002	15.299	0.026	15.311	0.014	15.325
1560154	15.339	-0.069	15.331	-0.061	15.316	-0.046	15.332	-0.062	15.270
1560156	14.851	-0.041	14.849	-0.039	14.849	-0.039	14.867	-0.057	14.810
1560313	15.006	-0.016	15.020	-0.030	14.984	0.006	15.001	-0.011	14.990
1560320	14.769	-0.059	14.744	-0.034	14.744	-0.034	14.771	-0.061	14.710
1560416	14.615	-0.025	14.644	-0.054	14.559	0.031	14.616	-0.026	14.590
1560549	11.669	-0.069	11.660	-0.060	11.655	-0.055	11.663	-0.063	11.600
1560912	15.131	-0.066	15.131	-0.066	15.093	-0.028	15.105	-0.040	15.065
1560913	14.907	-0.127	15.216	-0.436	14.820	-0.040	44.752	-29.97	14.780
1560918	14.814	-0.019	14.812	-0.017	14.793	0.002	14.810	-0.015	14.795
1561234	15.090	-0.065	15.089	-0.064	15.089	-0.064	15.100	-0.075	15.025
1561300	14.860	-0.015	14.860	-0.015	14.829	0.016	14.844	0.001	14.845
1561326	15.313	-0.058	15.315	-0.060	15.259	-0.004	15.291	-0.036	15.255
1561443	15.191	-0.036	15.181	-0.026	15.142	0.013	15.172	-0.017	15.155
1561831	15.036	0.044	15.015	0.065	15.015	0.065	15.044	0.036	15.080
1562346	15.121	-0.026	15.134	-0.039	15.121	-0.026	15.130	-0.035	15.095
1562351	15.093	-0.053	15.054	-0.014	15.036	0.004	15.056	-0.016	15.040
1570446	15.023	0.022	15.041	0.004	15.023	0.022	15.038	0.007	15.045

1570603	14.524	-0.614	14.524	-0.614	13.958	-0.048	13.958	-0.048	13.910
1570734	15.108	-0.008	15.109	-0.009	15.087	0.013	15.101	-0.001	15.100
1571554	15.001	-0.096	14.996	-0.091	14.920	-0.015	14.973	-0.068	14.905
1571639	14.864	-0.139	14.919	-0.194	14.857	-0.132	14.878	-0.153	14.725
1571650	15.334	-0.074	15.373	-0.113	15.318	-0.058	15.340	-0.080	15.260
1571656	15.346	-0.006	15.323	0.017	15.323	0.017	15.346	-0.006	15.340
1572017	14.868	0.037	14.868	0.037	14.868	0.037	14.878	0.027	14.905
1580024	14.993	-0.058	14.993	-0.058	14.993	-0.058	14.997	-0.062	14.935
1580540	15.348	-0.068	15.348	-0.068	15.312	-0.032	15.334	-0.054	15.280
1580606	15.145	-0.045	15.145	-0.045	15.107	-0.007	15.145	-0.045	15.100
1580732	15.186	-0.051	15.186	-0.051	15.161	-0.026	15.170	-0.035	15.135
1581038	15.305	-0.055	15.305	-0.055	15.285	-0.035	15.307	-0.057	15.250
1581500	15.142	-0.012	15.142	-0.012	15.126	0.004	15.137	-0.007	15.130
1581519	14.997	-0.022	15.023	-0.048	14.992	-0.017	15.003	-0.028	14.975
1581520	15.017	-0.077	15.295	-0.355	15.017	-0.077	15.218	-0.278	14.940
1581546	13.975	-0.015	13.949	0.011	13.946	0.014	13.958	0.002	13.960
1581920	15.134	-0.084	15.134	-0.084	15.094	-0.044	15.115	-0.065	15.050
1581925	15.038	-0.088	15.018	-0.068	15.016	-0.066	15.029	-0.079	14.950
1582007	14.816	-0.096	14.773	-0.053	14.756	-0.036	14.778	-0.057	14.720
1582103	15.122	-0.077	15.122	-0.077	15.083	-0.038	15.100	-0.055	15.045
1582133	15.144	-0.044	15.144	-0.044	15.111	-0.011	15.138	-0.038	15.100
1590305	15.143	-0.053	15.110	-0.020	15.107	-0.017	15.123	-0.033	15.090
1590415	15.113	-0.023	15.113	-0.023	15.100	-0.010	15.106	-0.016	15.090
1590520	15.287	-0.092	15.275	-0.080	15.251	-0.056	15.269	-0.074	15.195
1590812	15.205	0.005	15.196	0.014	15.174	0.036	15.188	0.023	15.210
1590823	15.078	-0.003	15.056	0.019	15.056	0.019	15.080	-0.005	15.075
1590831	15.323	-0.053	15.324	-0.054	15.254	0.016	15.303	-0.033	15.270
1590921	15.272	-0.042	15.249	-0.019	15.244	-0.014	15.255	-0.025	15.230
1590931	14.941	-0.011	14.930	0.000	14.907	0.023	14.927	0.003	14.930
1590952	13.932	-0.147	13.932	-0.147	13.925	-0.140	13.925	-0.140	13.785
1590953	15.212	-0.047	15.193	-0.028	15.191	-0.026	15.200	-0.035	15.165
1591004	15.283	-0.068	15.283	-0.068	15.250	-0.035	15.261	-0.046	15.215
1591147	15.117	-0.072	15.082	-0.037	15.082	-0.037	15.096	-0.051	15.045
1591222	15.309	-0.014	15.300	-0.005	15.282	0.013	15.298	-0.003	15.295
1591509	15.024	-0.069	15.011	-0.056	15.011	-0.056	15.022	-0.067	14.955
1591525	15.382	4.153	19.482	0.053	19.482	0.053	29.250	-9.715	19.535

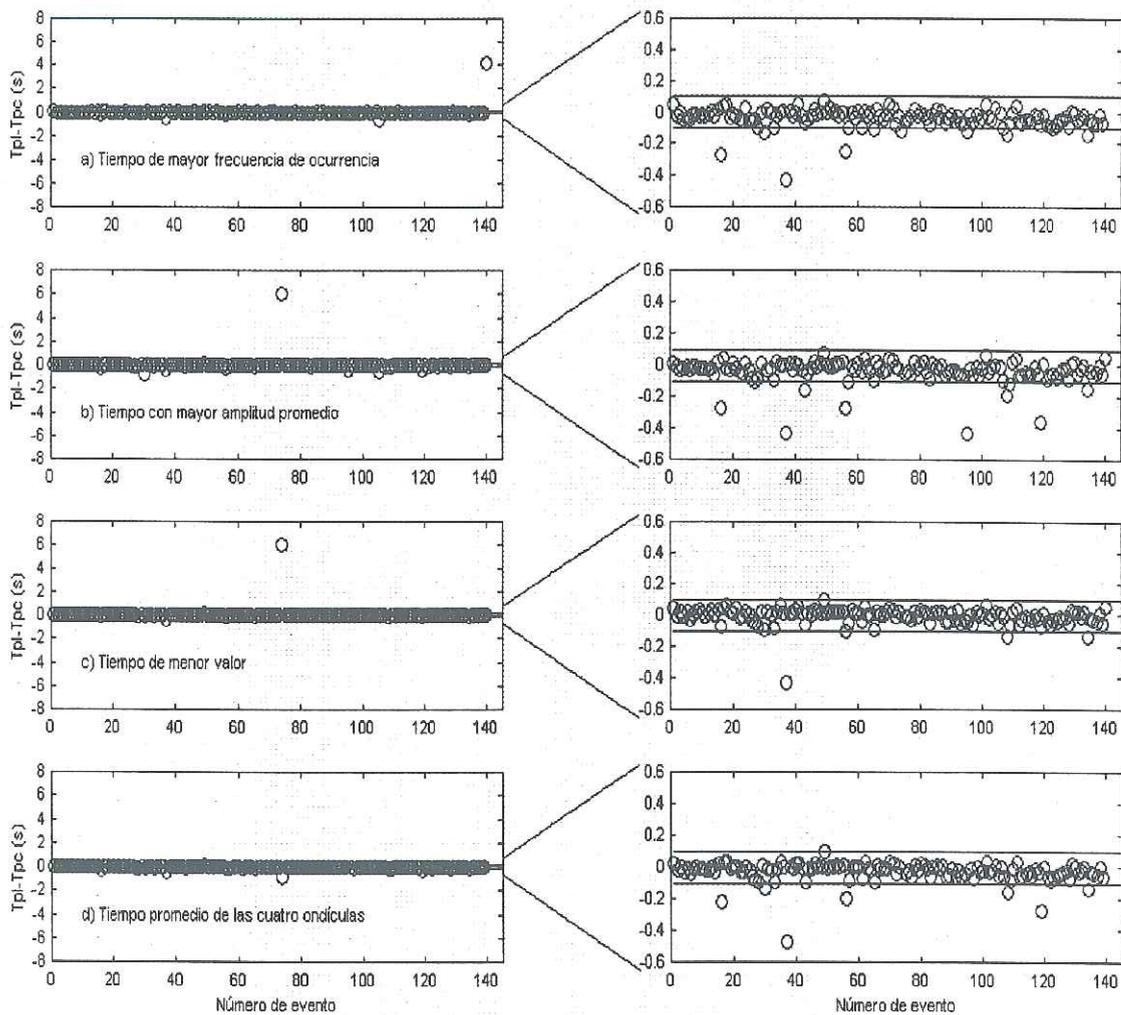


Figura 39. Residuales (tiempo leído menos tiempo calculado), para cada uno de los cuatro criterios de selección probados. T_{pc} es el tiempo de arribo calculado, T_{pl} es el leído.

Estas gráficas indican que los residuales que sobrepasan la línea de error de una décima de segundo varían desde 1 evento (criterio de tiempo menor) hasta 7 eventos (criterio de mayor amplitud promedio), lo que corresponde al 0.7% y 5% de la base de datos, respectivamente. En la figura 40 se muestra las distribuciones estadísticas de los residuales para cada criterio de selección probado. Los histogramas fueron fabricados con intervalos

de 0.02 s. En la parte superior derecha se muestra la estadística realizada (media, desviación estándar, moda y mediana). De la figura se puede concluir que el histograma con menor sesgo es el que representa al criterio de tiempo menor.

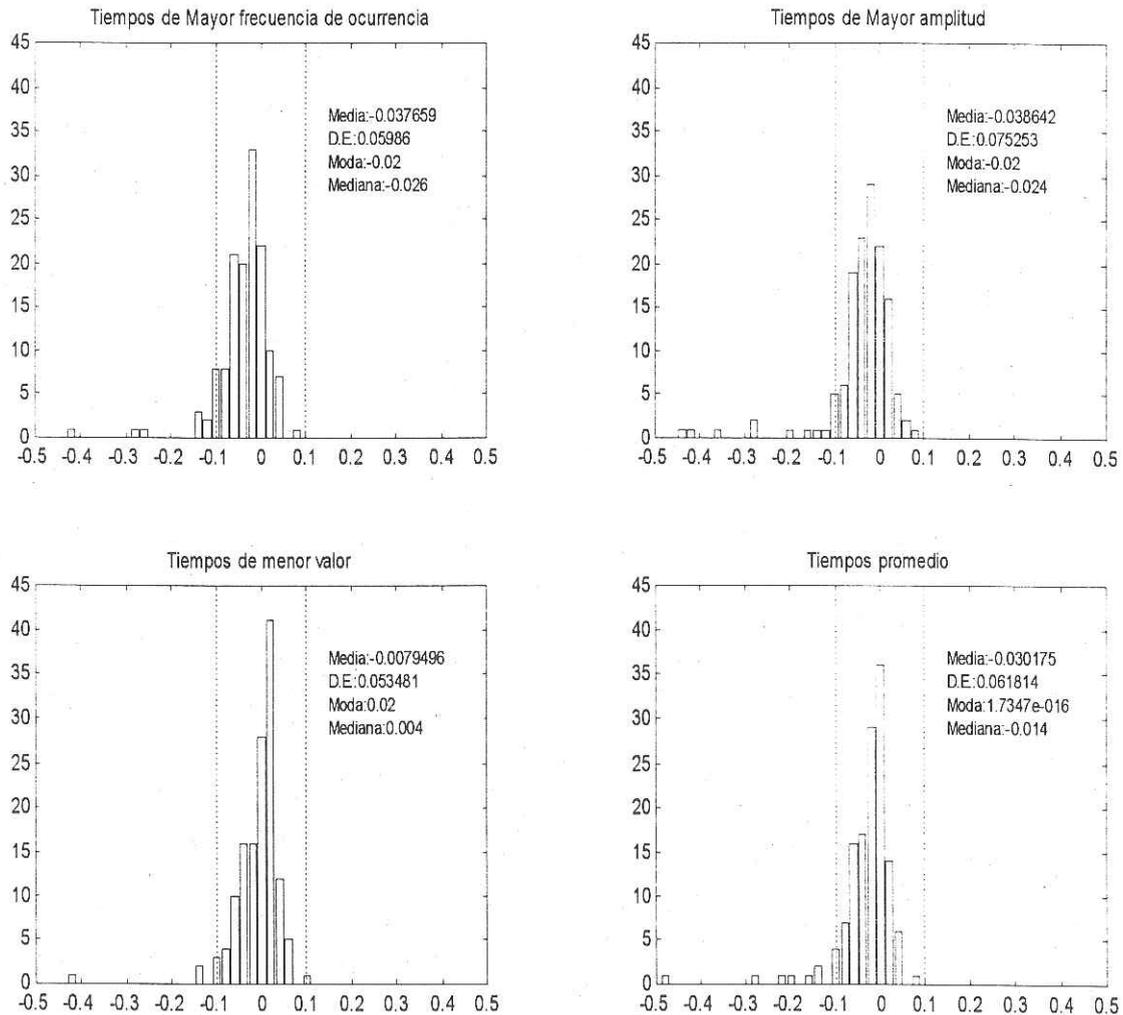


Figura 40. Histogramas representativos de los residuales de onda P para los cuatro criterios de selección probados.

Como resultado de estas pruebas, se eligió el tiempo menor del conjunto de tiempos producidos por las cuatro onículas, ya que produce los resultados más satisfactorios. La

tabla VIII muestra los resultados finales de los tiempos de arribo de la onda P, para la base de datos de 140 sismogramas. Con el método desarrollado, se logra calcular automáticamente los tiempos de arribo de la fase P con un error menor a 0.1 s, en más del 97% de los 140 eventos que forman la base de datos.

Tabla VIII. Tiempos de arribo de la onda P, calculados según el criterio de tiempo menor. T_{pc} es el tiempo calculado, T_{lp} es el tiempo leído, R es el residual ($T_{lp}-T_{pc}$), N es el número de la ondícula que produjo el tiempo calculado (1=Haar, 2=Daubechies-4, 3=symmlet-4, 4=Coiflet-3).

Evento	T_{pc}	T_{lp}	R	N	Evento	T_{pc}	T_{lp}	R	N
1420451	14.945	14.990	0.045	2	1530438	14.949	14.980	0.031	3
1421119	14.914	14.905	-0.009	4	1530625	15.090	15.075	-0.015	2
1421137	15.284	15.300	0.016	2	1530637	15.218	15.240	0.022	4
1421204	15.192	15.185	-0.007	2	1530640	6.890	12.885	5.995	3
1421230	14.956	14.975	0.019	2	1530641	14.875	14.860	-0.015	4
1421250	15.048	15.020	-0.028	4	1530956	15.291	15.280	-0.011	4
1421500	15.189	15.190	0.001	2	1531758	9.306	9.275	-0.031	4
1421504	14.958	14.975	0.017	2	1540642	15.064	15.090	0.026	4
1430215	14.922	14.950	0.028	2	1540651	15.198	15.190	-0.008	2
1430343	15.053	15.065	0.012	2	1540834	15.019	15.050	0.031	4
1430410	15.053	15.045	-0.008	4	1541024	15.077	15.100	0.023	4
1430654	14.973	14.980	0.007	2	1541032	15.129	15.140	0.011	2
1430655	14.927	14.955	0.028	2	1541228	14.984	14.935	-0.049	2
1430749	14.979	14.980	0.001	2	1541409	15.016	15.030	0.014	2
1431347	15.063	15.090	0.027	2	1541741	15.197	15.220	0.023	4
1431559	14.327	14.250	-0.077	2	1541819	15.105	15.115	0.010	4
1431607	21.493	21.540	0.047	2	1552013	15.299	15.325	0.026	4
1440810	11.534	11.600	0.066	4	1560154	15.316	15.270	-0.046	4
1441105	10.854	10.880	0.026	4	1560156	14.849	14.810	-0.039	2
1441623	15.222	15.235	0.013	4	1560313	14.984	14.990	0.006	2
1442300	14.908	14.945	0.037	2	1560320	14.744	14.710	-0.034	4
1450044	14.826	14.810	-0.016	4	1560416	14.559	14.590	0.031	4
1450309	15.150	15.135	-0.015	4	1560549	11.655	11.600	-0.055	4
1450428	15.253	15.275	0.022	2	1560912	15.093	15.065	-0.028	3
1450518	14.920	14.915	-0.005	2	1560913	14.820	14.780	-0.040	2
1450522	14.968	14.925	-0.043	4	1560918	14.793	14.795	0.002	2
1450613	14.802	14.750	-0.052	2	1561234	15.089	15.025	-0.064	2
1450637	15.027	14.950	-0.077	4	1561300	14.829	14.845	0.016	4
1450651	15.034	15.055	0.021	2	1561326	15.259	15.255	-0.004	4
1450716	12.786	12.695	-0.091	3	1561443	15.142	15.155	0.013	4
1450837	10.664	10.690	0.026	2	1561831	15.015	15.080	0.065	2
1451004	15.196	15.195	-0.001	2	1562346	15.121	15.095	-0.026	4
1460240	14.684	14.600	-0.084	2	1562351	15.036	15.040	0.004	4
1460929	14.564	14.585	0.021	4	1570446	15.023	15.045	0.022	2
1461349	15.212	15.280	0.068	4	1570603	13.958	13.910	-0.048	1
1461853	15.249	15.260	0.011	4	1570734	15.087	15.100	0.013	2
1470144	14.828	14.400	-0.428	2	1571554	14.920	14.905	-0.015	4

1471305	15.001	15.010	0.009	4	1571639	14.857	14.725	-0.132	3
1471421	15.244	15.255	0.011	2	1571650	15.318	15.260	-0.058	2
1471522	14.979	15.015	0.036	4	1571656	15.323	15.340	0.017	2
1471524	15.021	15.070	0.049	2	1572017	14.868	14.905	0.037	4
1471708	15.118	15.125	0.007	4	1580024	14.993	14.935	-0.058	2
1480340	15.155	15.090	-0.065	4	1580540	15.312	15.280	-0.032	2
1480609	15.133	15.140	0.007	2	1580606	15.107	15.100	-0.007	2
1481218	15.257	15.255	-0.002	2	1580732	15.161	15.135	-0.026	4
1481223	14.943	14.975	0.032	4	1581038	15.285	15.250	-0.035	4
1481238	14.994	15.010	0.016	2	1581500	15.126	15.130	0.004	2
1481251	15.279	15.285	0.006	2	1581519	14.992	14.975	-0.017	2
1481350	15.202	15.300	0.098	2	1581520	15.017	14.940	-0.077	1
1481737	15.133	15.140	0.007	4	1581546	13.946	13.960	0.014	4
1481742	34.203	34.225	0.022	2	1581920	15.094	15.050	-0.044	4
1490348	15.136	15.155	0.019	4	1581925	15.016	14.950	-0.066	4
1490834	15.068	15.085	0.017	4	1582007	14.756	14.720	-0.036	3
1491620	14.070	14.095	0.025	4	1582103	15.083	15.045	-0.038	4
1491746	15.122	15.145	0.023	2	1582133	15.111	15.100	-0.011	3
1500840	15.083	14.975	-0.108	2	1590305	15.107	15.090	-0.017	4
1500937	15.199	15.145	-0.054	2	1590415	15.100	15.090	-0.010	4
1501412	15.125	15.155	0.030	2	1590520	15.251	15.195	-0.056	2
1510223	15.332	15.340	0.008	2	1590812	15.174	15.210	0.036	4
1510540	14.936	14.945	0.009	4	1590823	15.056	15.075	0.019	2
1511031	15.330	15.285	-0.045	2	1590831	15.254	15.270	0.016	4
1512209	14.922	14.975	0.053	2	1590921	15.244	15.230	-0.014	4
1520153	14.986	14.990	0.004	4	1590931	14.907	14.930	0.023	4
1520354	15.024	15.020	-0.004	2	1590952	13.925	13.785	-0.140	1
1520650	15.192	15.100	-0.092	2	1590953	15.191	15.165	-0.026	4
1521512	14.991	15.015	0.024	4	1591004	15.250	15.215	-0.035	2
1521951	12.491	12.495	0.004	4	1591147	15.082	15.045	-0.037	2
1530217	15.204	15.205	0.001	2	1591222	15.282	15.295	0.013	4
1530218	15.166	15.185	0.019	2	1591509	15.011	14.955	-0.056	4
1530350	14.964	15.010	0.046	4	1591525	19.482	19.535	0.053	4

La figura 41 muestra un diagrama de flujo para el cálculo de los tiempos de arribo de la onda P, con el método desarrollado en este trabajo. El símbolo que representa la salida: $\{T_{c1}, A_{c1}, k_{c1} \quad T_{c2}, A_{c2}, k_{c2} \quad T_{c3}, A_{c3}, k_{c3} \quad T_{c4}, A_{c4}, k_{c4}\}$, contiene los tiempos calculados para cada una de las ondículas utilizadas (T_c), así como su amplitud promedio resultante (A_c) y su frecuencia de ocurrencia (k_c). Estos datos pasan al recuadro de elección de tiempos por los criterios antes descritos.

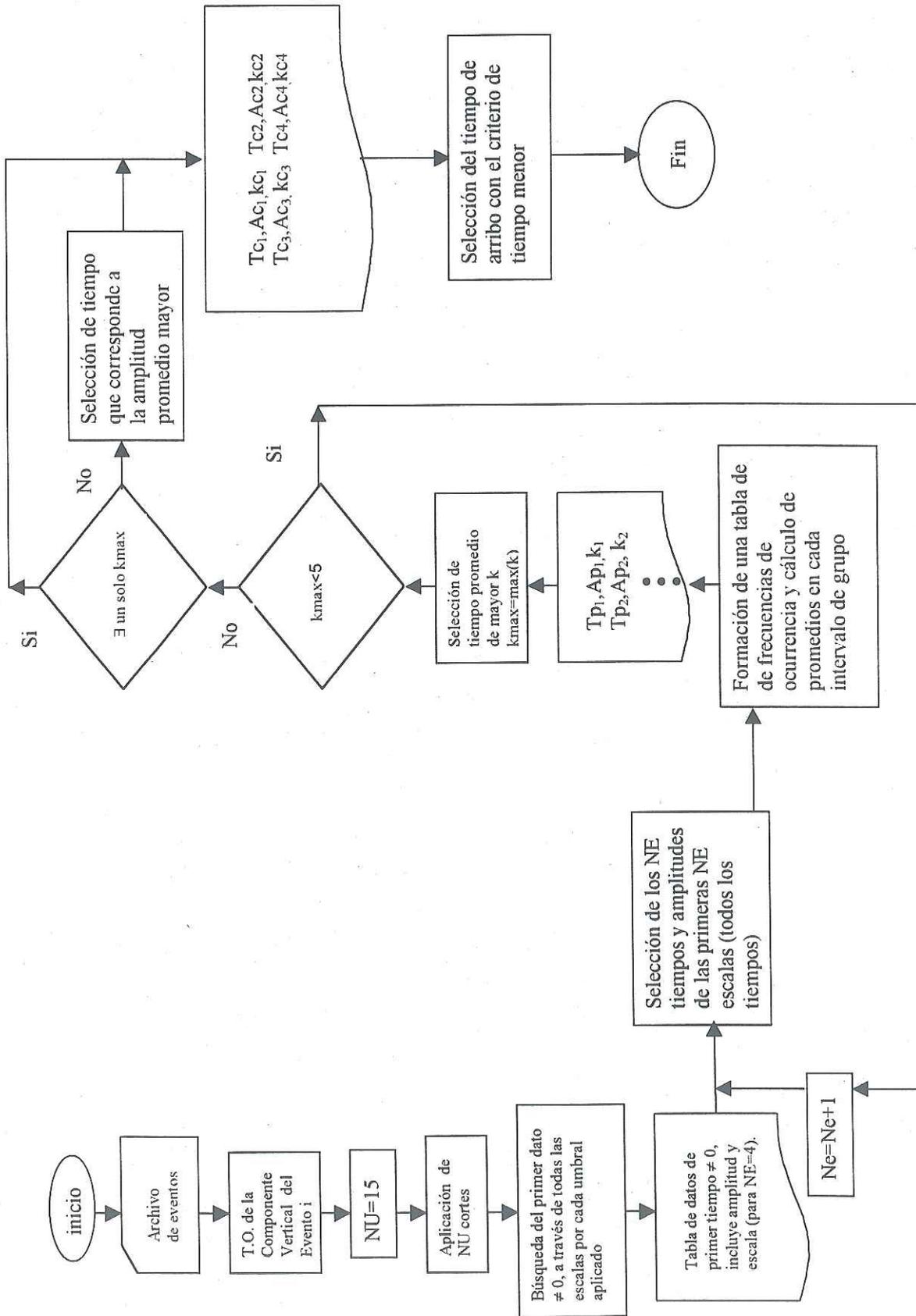


Figura 41. Diagrama de flujo que representa el cálculo de tiempo de arribo de onda P usando TO.

V.2.2 Identificación de la fase S

El procedimiento de identificación de la fase S en sismogramas suele ser más complicado que el de la P, ya que la S se encuentra inmersa en la coda de ésta, lo cual dificulta el análisis de las descomposiciones lineales, como es el caso de la TO. Este panorama se complica aún más cuando la S/R del sismograma es baja.

El procedimiento descrito para la onda P se aplicó inicialmente para la S, pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, debido a que ese procedimiento se apoya fuertemente en la suposición de que el arribo de P provoca el primer cambio fuerte en la distribución de los coeficientes en el plano tiempo-escala, lo cual no es cierto para la S. En esta sección se describe un procedimiento diferente para calcular el tiempo de arribo de la onda S, a partir de los coeficientes ondulares de los planos tiempo-escala (como los de la figura 42). El esquema general consiste en:

- i) Obtener los planos tiempo-escala con la aplicación de cuatro ondículas; en cada una de las dos componentes horizontales, lo cual produce 8 planos.
- ii) Aplicar los truncamientos de coeficientes, con umbrales adecuados para atenuar la interferencia de onda P y aislar el arribo S.
- iii) Buscar los *PCDC* dentro de ventanas de tiempo cuyas longitud y posición son estimados, para cada plano tiempo-escala, con base en un análisis estadístico.
- iv) Aplicar los criterios de selección del tiempo de arribo sobre histogramas creados a partir de los *PCDC* de los dos canales horizontales juntos, para cada ondícula.

- v) Aplicar los criterios de selección del tiempo definitivo sobre el conjunto de tiempos provenientes de las ondículas.

La aplicación de la etapa (i) se llevó a cabo de igual manera que para la onda P, con el empleo de las ondículas Daubechies-4, Coiflet-3, Haar y Symmlet-4. Para la fase S se aplica sobre cada una de las dos componentes horizontales (N-S y E-O).

Para la etapa (ii) se definió nuevos umbrales de corte (respecto a la P) y se incrementó su número, pues la amplitud de la onda S es generalmente mayor en las componente horizontales. Con el aumento del número de umbrales y la elevación de los niveles de corte de coeficientes se pretende remover la información contenida en la coda de P, y aislar los coeficientes ondiculares que representan la fase S. En total, se aplicaron 25 umbrales, entre 0.2σ y 5σ .

En la etapa (iii), la búsqueda de los *PCDC*, fue realizada dentro de ventanas de tiempo elegidas mediante un análisis estadístico de los coeficientes, a diferencia del caso P donde la búsqueda se hace a lo largo de todo el eje temporal del plano tiempo-escala. El *PCDC* se buscará en una ventana de ancho $|T_{S_{\text{Max}}} - T_{pc}|$ y centrada en $T_{S_{\text{Max}}}$, donde T_{pc} es el tiempo de arribo de P previamente calculado (sección V.2.1), $T_{S_{\text{Max}}}$ es el tiempo correspondiente al máximo del vector resultante de la suma de los valores absolutos de los coeficientes de las primeras cuatro escalas; esta suma se realiza en una ventana de 20 s que

inicia en $1.1 * T_{pc}$, como lo muestra la figura 43. En esa figura se puede apreciar que aún cuando existen coeficientes posicionados fuera de la ventana, éstos no se toman en cuenta para la estadística de la onda S. Así pues, en esta etapa se obtiene una tabla de *PCDC* con $NEM * NUM * NC$ elementos, donde $NEM = 10$ escalas, $NUM = 25$ (umbrales) y $NC = 2$ componentes. La Tabla IX es un ejemplo del resultado de aplicar esta etapa (iii) sobre las TO de las dos componentes horizontales del sismograma E1580540, utilizando la ondícula Daubechies-4; en esta tabla sólo se muestran los *PCDC* de las primeras 4 escalas. Existirán otras tres tablas similares a esa, correspondientes a las otras tres ondículas utilizadas.

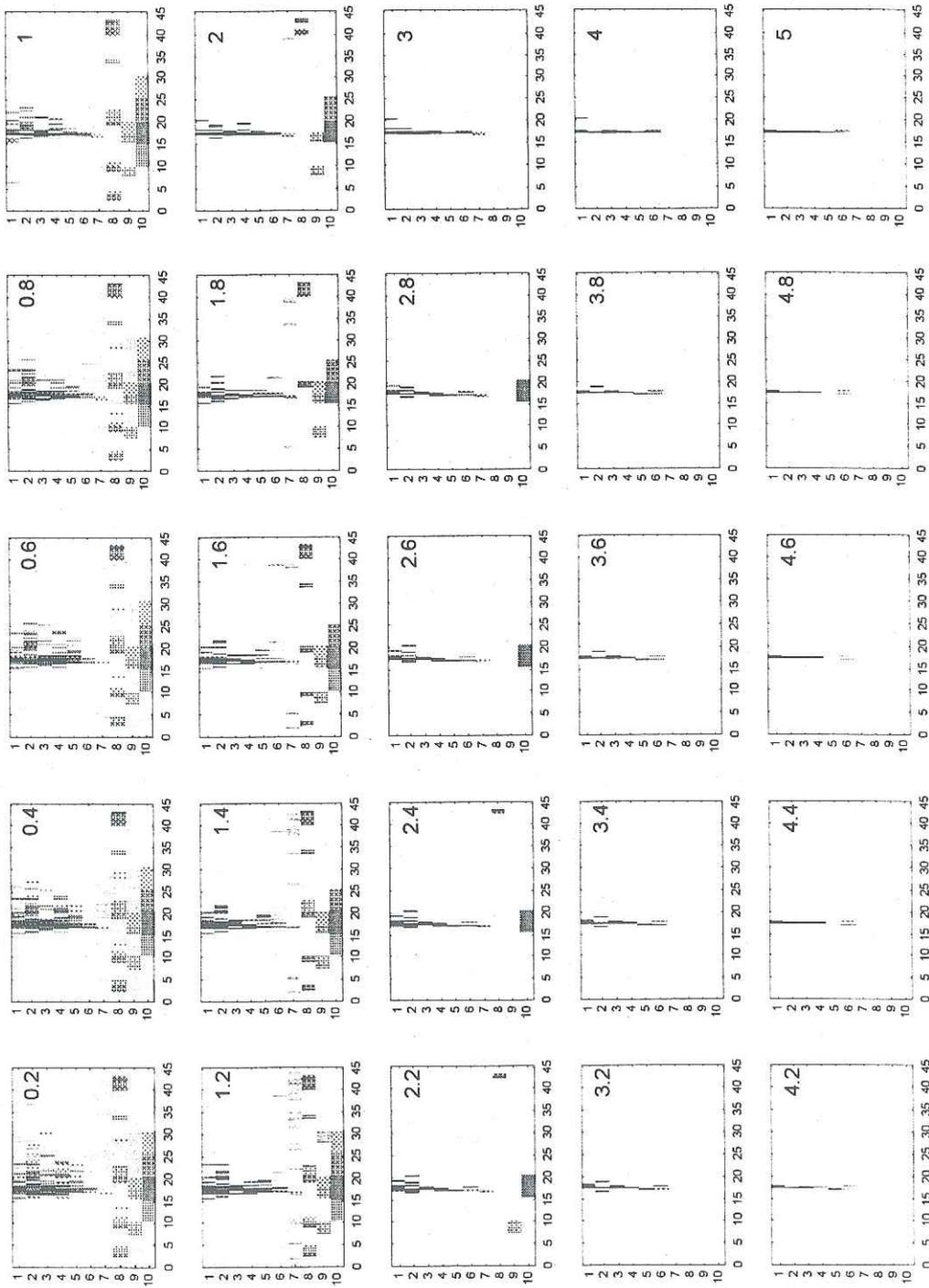


Figura 42. Secuencia de coeficientes ondulares truncados con la aplicación sucesiva de umbrales de corte desde 0.2σ hasta 5.0σ , sobre el evento E1580540. En la parte superior derecha de cada recuadro se indica el número de fracciones de la desviación estándar empleado para el umbral.

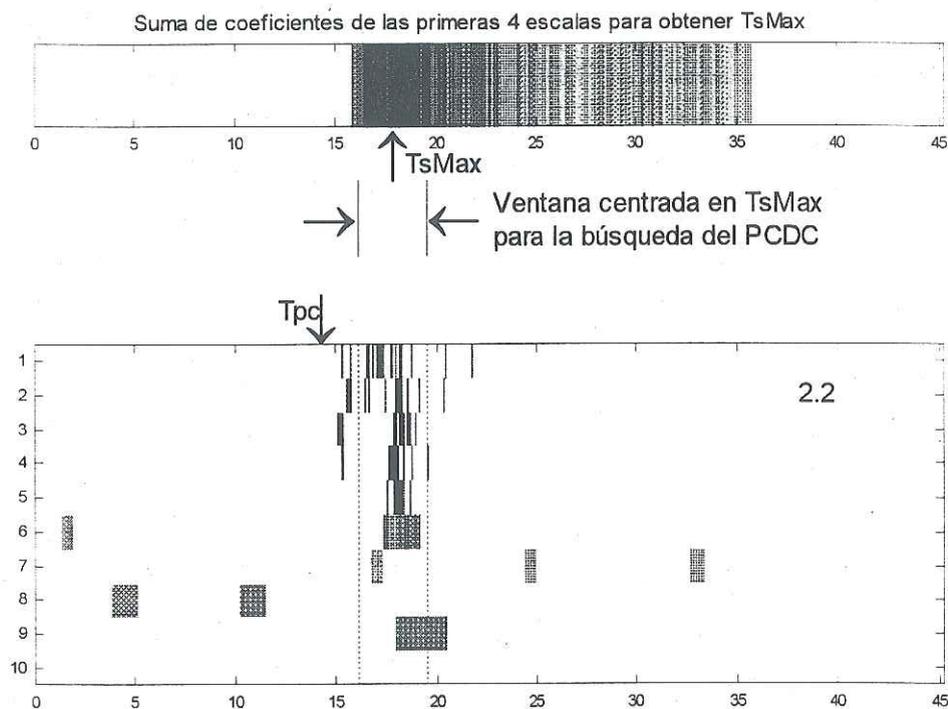


Figura 43. Posicionamiento de la ventana de búsqueda de los PCDC. Se ilustra con un umbral de truncamiento de 2.2σ . T_{pc} es el tiempo calculado de onda P.

Tabla IX. Tabla de tiempos de los PCDC, resultado de aplicar la etapa (iii) sobre las TO de las dos componentes horizontales del sismograma E1580540, utilizando la ondícula Daubechies-4.

Ondícula de Daubechies-4

Escala	Componente norte-sur		Componente este-oeste	
	Tiempo	Amplitud	Tiempo	Amplitud
Umbral	0.2 σ			
1	16.275	1.952558E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.275	-2.637563E-04	16.360	-8.561271E-05
3	16.275	-4.176032E-04	16.360	1.447118E-04
4	16.275	-1.455398E-04	16.360	4.845180E-04
Umbral	0.4 σ			
1	16.275	1.952558E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.275	-2.637563E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.275	-4.176032E-04	16.400	2.692838E-03

4	16.480	2.511099E-04	16.360	4.845180E-04
Umbral	0.6 σ			
1	16.275	1.952558E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.275	-2.637563E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.275	-4.176032E-04	16.400	2.692838E-03
4	16.560	-4.642362E-04	16.360	4.845180E-04
Umbral	0.8 σ			
1	16.280	3.221032E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.280	-3.047911E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.320	6.044388E-04	16.400	2.692838E-03
4	16.560	-4.642362E-04	16.360	4.845180E-04
Umbral	1.0 σ			
1	16.280	3.221032E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	16.560	-4.642362E-04	16.400	-1.068382E-03
Umbral	1.2 σ			
1	16.280	3.221032E-04	16.360	-3.423124E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	16.640	-7.594555E-04	16.400	-1.068382E-03
Umbral	1.4 σ			
1	16.300	-1.035196E-03	16.360	-3.423124E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	16.640	-7.594555E-04	16.400	-1.068382E-03
Umbral	1.6 σ			
1	16.300	-1.035196E-03	16.370	-4.785348E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	16.640	-7.594555E-04	16.400	-1.068382E-03
Umbral	1.8 σ			
1	16.300	-1.035196E-03	16.370	-4.785348E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	17.040	1.362093E-03	16.400	-1.068382E-03
Umbral	2.0 σ			
1	16.300	-1.035196E-03	16.370	-4.785348E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04
3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
4	17.040	1.362093E-03	16.400	-1.068382E-03
Umbral	2.2 σ			
1	16.300	-1.035196E-03	16.390	6.954714E-04
2	16.300	-9.282919E-04	16.380	-6.328271E-04

	3	16.480	-1.378122E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.040	1.362093E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	2.4 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.390	6.954714E-04
	2	16.300	-9.282919E-04	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.040	1.362093E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	2.6 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.390	6.954714E-04
	2	16.300	-9.282919E-04	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.040	1.362093E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	2.8 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.390	6.954714E-04
	2	16.620	1.037910E-03	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.040	1.362093E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	3.0 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.390	6.954714E-04
	2	16.620	1.037910E-03	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	3.2 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.460	-8.214249E-04
	2	16.660	1.090139E-03	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	3.4 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.460	-8.214249E-04
	2	16.680	1.180277E-03	16.440	-9.606730E-04
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.120	1.661978E-03
Umbral	3.6 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.460	-8.214249E-04
	2	16.740	1.440423E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	3.8 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	16.740	1.440423E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	4.0 σ				
	1	16.300	-1.035196E-03	16.490	-1.662622E-03

	2	16.740	1.440423E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	4.2 σ				
	1	16.610	1.072727E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	16.740	1.440423E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	4.4 σ				
	1	17.030	1.419126E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	17.160	-1.880015E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	4.6 σ				
	1	17.030	1.419126E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	17.160	-1.880015E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	4.8 σ				
	1	17.030	1.419126E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	17.160	-1.880015E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03
Umbral	5.0 σ				
	1	17.030	1.419126E-03	16.490	-1.662622E-03
	2	17.160	-1.880015E-03	16.500	-1.414153E-03
	3	17.120	4.278650E-03	16.400	2.692838E-03
	4	17.120	5.388306E-03	17.200	-6.979490E-03

Para la aplicación de la etapa (iv) se hizo pruebas para determinar el rango de umbrales de truncamiento dentro de los cuales se seleccionó los tiempos que formarán el llamado vector de tiempos (igual que en la sección V.2.1), así como del criterio de selección de tiempos dentro de las NE escalas de búsqueda; en el Apéndice B se encuentra la descripción de estas pruebas. Los mejores resultados en la detección del arribo S, fueron obtenidos a partir de la selección de *PCDC* correspondientes a la amplitud máxima de las

primeras cuatro escalas, dentro de 10 umbrales que van desde 2.2σ hasta 4σ . La Tabla X muestra el vector de tiempos obtenido al aplicar esta etapa sobre la tabla VIII.

Tabla X. Vector de tiempos correspondientes a los *PCDC* de máxima amplitud entre las cuatro primeras escalas de la tabla VIII, para los umbrales trabajados. Evento E1580540, ondícula Daubechies-4.

Umbral	Tiempo (s) N-S	Amplitud N-S	Tiempo (s) E-O	Amplitud E-O
2.2 σ	16.480	-1.38E-03	16.400	2.69E-03
2.4 σ	17.120	4.27E-03	16.400	2.69E-03
2.6 σ	17.120	4.27E-03	16.400	2.69E-03
2.8 σ	17.120	4.27E-03	16.400	2.69E-03
3.0 σ	17.120	5.38E-03	16.400	2.69E-03
3.2 σ	17.120	5.38E-03	16.400	2.69E-03
3.4 σ	17.120	5.38E-03	16.400	2.69E-03
3.6 σ	17.120	5.38E-03	17.200	-6.98E-03
3.8 σ	17.120	5.38E-03	17.200	-6.98E-03
4.0 σ	17.120	5.38E-03	17.200	-6.98E-03

Con los tiempos de la Tabla X se forma un histograma de frecuencias de ocurrencia, el cual es mostrado en la figura 44 y en la Tabla XI. La selección del tiempo de arribo de la onda S, para las dos componentes del sismograma en cuestión, se realiza aplicando el algoritmo descrito en la etapa 4 del procedimiento de onda P (sección V.2.1). Se eligió el tiempo 17.140 s, correspondiente a la máxima frecuencia de ocurrencia (12), mientras que el tiempo leído por un lectorista independiente, en pantalla de PC, fue de 17.130; esto representa un error de 0.01 s. Este resultado es aplicable a la ondícula de Daubechies-4.

Tabla XI. Valores del histograma ilustrado en la figura 44, correspondientes al evento E1580540, ondícula Daubechies-4.

No. de grupo	Promedio de tiempo por grupo (s)	Frecuencia de ocurrencia	Promedio de amplitud por grupo
1	16.410	8	2.53E-03
2	17.140	12	5.50E-03

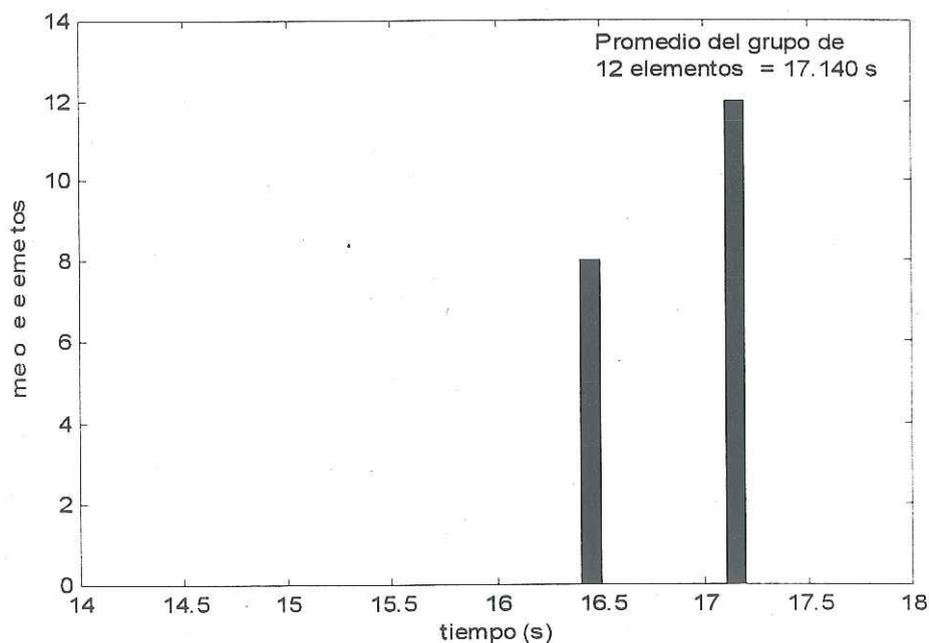


Figura 44. Histograma de frecuencias de ocurrencia de los tiempos de la tabla IX, correspondientes al evento E1580540, ondícula Daubechies-4.

De igual manera a lo descrito para la ondícula Daubechies-4, se aplica las etapas (i) a (iv) para las ondículas Coiflet-3, Haar y Symmlet-4. Los resultados para el mismo evento E1580540 se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Tiempos de arribo de onda S, obtenidos utilizando cuatro ondículas como kernel de la TO, aplicadas sobre las dos componentes horizontales del sismograma E1580540.

Ondícula	Arribo S (s)	Amplitud promedio	Frecuencia de ocurrencia
Haar	17.133	2.85E-03	12
Daubechies-4	17.140	5.51E-03	13
Symmlet-4	17.127	3.26E-03	11
Coiflet-3	17.116	3.86E-03	20

Para aplicar la etapa (v) se probó los mismos cuatro criterios descritos en la sección V.2.1 (procedimiento para onda P): tiempo de máxima frecuencia, tiempo mayor, tiempo de amplitud máxima y tiempo promedio de las 4 ondículas. El criterio de tiempo promedio es el que produjo los mejores resultados (residuales menores). Así pues, para el ejemplo que se ha estado desarrollando (E1580540), se eligió como tiempo definitivo de arribo de la onda S el valor 17.129 s, que comparado con el tiempo leído en pantalla de PC, con cursores de resolución 0.005 s, de 17.130 s, produce un error de 0.001 s. Estos tiempos se aprecian en la figura 45, para las dos componentes horizontales.

Así, el procedimiento de cálculo para la fase S se aplicó a la base de datos formada por 140 sismogramas. La tabla XIII muestra todos los eventos utilizados, con sus valores de tiempos de arribo calculados para la fase S, para las cuatro ondículas consideradas. La figura 46 muestra los gráficos de los residuales para cada ondícula.

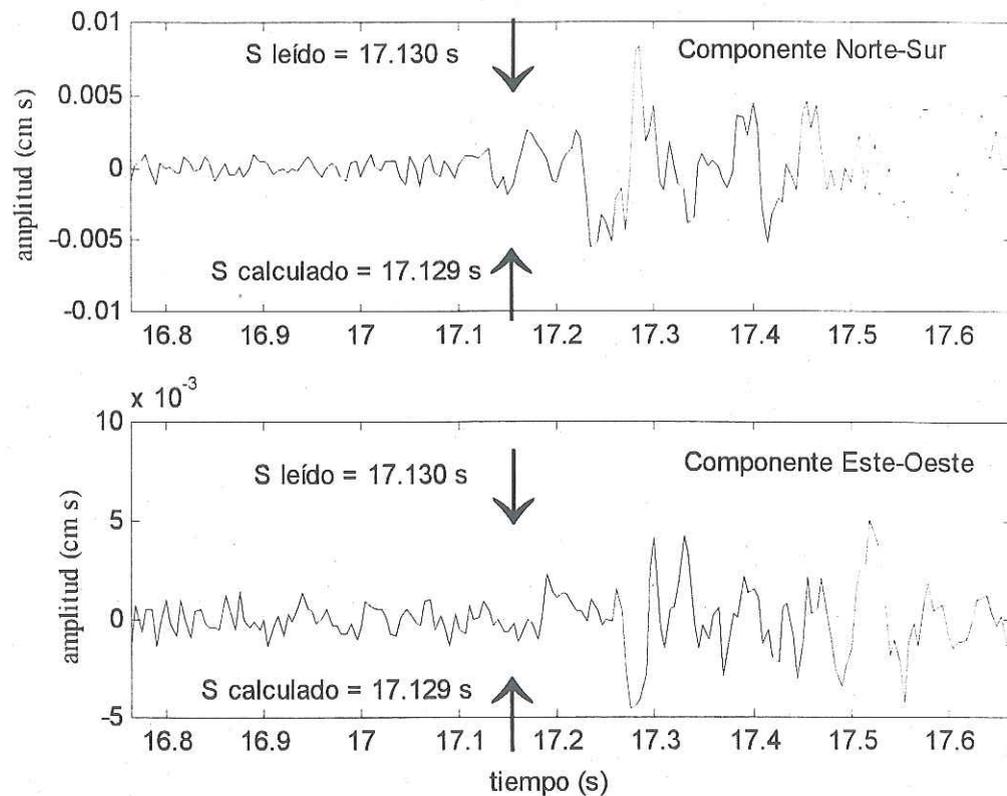


Figura 45. Acercamiento de las componentes horizontales del sismograma E1580540, donde se han marcado las posiciones de los tiempos de arribo de onda S, calculado y leído.

Tabla XIII. Tiempos de arribo de onda S, para las ondículas Haar (H), Daubachies-4 (D), Symmlet-4 (S) y Coiflet-3 (C). T_{sc} indica el tiempo de arribo calculado, A es la amplitud promedio y F es la frecuencia de ocurrencia de T_{sc} .

Evento	T_{sc}	A	F									
1420451	17.320	0.1032E-02	18	17.320	0.1881E-02	20	17.296	0.1625E-02	16	17.303	0.1317E-02	19
1421119	16.800	0.5315E-03	17	16.735	0.4372E-03	19	16.807	0.4666E-03	18	16.720	0.7916E-03	10
1421137	18.220	0.8988E-03	16	18.178	0.6997E-03	13	18.197	0.8652E-03	12	18.400	0.1316E-02	7
1421204	18.162	0.2451E-03	17	18.060	0.1217E-03	10	18.105	0.1326E-03	13	18.111	0.1496E-03	14
1421230	20.240	0.5738E-03	9	20.062	0.5657E-03	13	19.920	0.9239E-03	10	20.182	0.9275E-03	11
1421250	17.816	0.1565E-02	10	17.769	0.7386E-03	9	17.717	0.4290E-03	8	17.714	0.1123E-02	16
1421500	17.392	0.6969E-03	20	17.382	0.8463E-03	18	17.353	0.8561E-03	17	17.320	0.7930E-03	15
1421504	17.120	0.7027E-02	10	17.120	0.3095E-02	20	17.120	0.6459E-02	10	17.091	0.4607E-02	11
1430215	18.204	0.1584E-02	18	16.720	0.1200E-02	10	18.204	0.1820E-02	18	18.115	0.1715E-02	16
1430343	15.895	0.1041E-02	10	16.709	0.1661E-02	14	16.747	0.2275E-02	18	16.696	0.2122E-02	20
1430410	17.228	0.8072E-03	10	17.248	0.1437E-02	15	16.480	0.7460E-03	12	16.480	0.6819E-03	8
1430654	16.480	0.1919E-02	18	16.457	0.2521E-02	19	16.452	0.2632E-02	20	16.453	0.2314E-02	15
1430655	16.494	0.1276E-02	17	16.400	0.2075E-02	18	16.537	0.1455E-02	16	16.410	0.1939E-02	8
1430749	19.954	0.3086E-02	7	19.820	0.1855E-02	10	19.824	0.2088E-02	10	19.886	0.2246E-02	14

1431347	19.516	0.5620E-03	20	18.493	0.6291E-03	15	18.513	0.5359E-03	20	19.436	0.6489E-03	19
1431352	17.980	0.1070E-02	20	17.840	0.1272E-02	10	17.951	0.1119E-02	15	17.934	0.1193E-02	11
1431617	22.948	0.1930E-02	10	22.890	0.2663E-02	11	23.991	0.2482E-02	9	23.860	0.3142E-02	12
1440911	14.710	0.2038E-03	8	14.628	0.1869E-03	17	13.600	0.1710E-03	10	14.662	0.1914E-03	19
1441613	19.604	0.3123E-02	18	18.000	0.3371E-02	18	18.019	0.3040E-02	17	19.000	0.3385E-02	20
1442317	19.050	0.4840E-02	12	19.000	0.6093E-02	20	19.020	0.4337E-02	20	19.064	0.5695E-02	10
1450044	17.442	0.3052E-02	20	17.400	0.5906E-02	20	17.400	0.3189E-02	20	17.360	0.2802E-02	10
1450319	19.853	0.1173E-02	12	19.873	0.1782E-02	17	19.822	0.1115E-02	13	19.840	0.1087E-02	16
1450419	17.396	0.4915E-03	20	17.384	0.5988E-03	20	17.384	0.6108E-03	20	17.334	0.8649E-03	11
1450519	16.451	0.8540E-03	19	16.460	0.7420E-03	12	16.418	0.7701E-03	20	16.390	0.9517E-03	20
1450611	19.817	0.1737E-02	14	18.880	0.2405E-02	11	18.617	0.1801E-02	14	19.527	0.1537E-02	17
1450613	19.520	0.7350E-03	10	19.507	0.3606E-03	18	19.520	0.7903E-03	10	19.440	0.7925E-03	10
1450637	17.750	0.4503E-03	12	16.633	0.3557E-03	9	17.180	0.4954E-03	9	17.758	0.4837E-03	11
1450651	17.624	0.5663E-03	20	17.530	0.2892E-03	14	17.575	0.5705E-03	16	17.470	0.2779E-03	18
1450718	15.160	0.2433E-03	20	15.063	0.2476E-03	14	15.104	0.2089E-03	20	15.045	0.1723E-03	17
1450937	14.560	0.1578E-03	9	14.587	0.1376E-03	8	14.320	0.2272E-03	9	14.328	0.1823E-03	15
1451014	17.372	0.7434E-03	13	17.360	0.1132E-02	20	17.520	0.1147E-02	10	17.347	0.7287E-03	19
1460041	19.470	0.1832E-02	20	18.422	0.4303E-02	18	18.516	0.2295E-02	20	18.471	0.2346E-02	19
1460319	18.269	0.2602E-03	7	17.580	0.3649E-03	11	18.311	0.3225E-03	9	18.306	0.2907E-03	14
1461343	17.333	0.1186E+00	19	17.333	0.1086E+00	15	17.292	0.7802E-01	20	17.270	0.1033E+00	20
1461933	17.409	0.7555E-02	13	17.438	0.9283E-02	19	17.412	0.9625E-02	20	17.352	0.1175E-01	10
1470144	18.080	0.7383E-03	7	17.611	0.7651E-03	19	17.589	0.7755E-03	15	17.609	0.7041E-03	9
1471305	15.888	0.2795E-02	16	16.216	0.4368E-02	15	16.240	0.4187E-02	14	15.893	0.3079E-02	12
1471421	17.884	0.1827E-01	10	17.844	0.1586E-01	11	18.030	0.4399E-01	16	17.960	0.5345E-01	20
1471512	16.613	0.7103E-03	9	17.040	0.6901E-03	14	17.080	0.9981E-03	20	17.062	0.1002E-02	13
1471524	17.495	0.8612E-03	19	17.380	0.9308E-03	12	17.440	0.9731E-03	13	17.388	0.7772E-03	13
1471709	17.248	0.2512E-02	10	17.180	0.1134E-02	10	16.360	0.1107E-02	19	17.160	0.2144E-02	20
1480340	19.325	0.8082E-03	15	18.285	0.9486E-03	16	18.253	0.9757E-03	15	18.400	0.9826E-03	10
1480609	17.307	0.4287E-03	12	17.308	0.6274E-03	13	17.274	0.6241E-03	13	17.217	0.4087E-03	19
1481019	18.123	0.6980E-03	13	18.140	0.7412E-03	19	18.142	0.8474E-03	18	18.032	0.7081E-03	15
1481213	17.868	0.2873E-03	10	17.886	0.2180E-03	7	17.593	0.1569E-03	15	17.750	0.1953E-03	12
1481239	17.929	0.4063E-03	18	17.834	0.3116E-03	14	17.848	0.2792E-03	20	17.836	0.3423E-03	20
1481251	19.133	0.1829E-03	15	18.148	0.2135E-03	20	18.188	0.2879E-03	20	18.049	0.1804E-03	13
1481350	17.054	0.1198E-02	13	17.066	0.8619E-03	13	17.076	0.1001E-02	20	17.000	0.9317E-03	20
1481737	16.217	0.1357E-02	9	16.174	0.1071E-02	14	16.880	0.2139E-02	10	16.871	0.1559E-02	19
1481742	36.240	0.1032E-01	10	35.993	0.1447E-01	14	36.204	0.1164E-01	20	36.082	0.1685E-01	20
1490349	16.933	0.9273E-03	18	16.912	0.8301E-03	20	16.922	0.1144E-02	19	16.880	0.1169E-02	10
1490834	17.350	0.1393E-02	16	17.280	0.1792E-02	20	17.308	0.1918E-02	20	17.280	0.1193E-02	15
1491820	17.200	0.3639E-03	12	17.251	0.4626E-03	11	17.232	0.4112E-03	10	17.168	0.3480E-03	10
1491746	17.417	0.6039E-03	14	17.453	0.6485E-03	15	17.480	0.6347E-03	10	17.380	0.6231E-03	20
1500840	19.040	0.2499E-02	10	18.922	0.2245E-02	17	18.968	0.2017E-02	19	19.913	0.3097E-02	12
1500937	17.360	0.1379E-02	10	17.240	0.1118E-02	18	17.255	0.8104E-03	13	17.271	0.9461E-03	13
1501412	16.660	0.2855E-03	10	17.462	0.3678E-03	11	17.600	0.3537E-03	16	17.424	0.2997E-03	10
1510223	17.573	0.5592E-02	15	17.600	0.5854E-02	20	17.760	0.1335E-01	10	17.509	0.4222E-02	15
1510540	16.807	0.7260E-03	11	16.030	0.4651E-03	12	16.832	0.8621E-03	13	16.759	0.6476E-03	15
1511031	19.280	0.7025E-02	18	19.236	0.9815E-02	18	19.262	0.8350E-02	18	19.257	0.1187E-01	14
1512209	17.958	0.2152E-02	19	17.977	0.1562E-02	14	17.960	0.2583E-02	20	17.880	0.2044E-02	20
1520153	19.160	0.1345E-01	20	19.076	0.1405E-01	20	19.090	0.1123E-01	20	19.080	0.1702E-01	20
1520354	17.225	0.7408E-03	19	17.200	0.5495E-03	15	17.216	0.7316E-03	20	17.219	0.6580E-03	17
1520650	18.700	0.8508E-03	16	18.040	0.5818E-03	6	18.540	0.7348E-03	16	18.560	0.6347E-03	14
1521512	26.430	0.1204E-02	8	20.140	0.9613E-03	9	26.430	0.1802E-02	8	26.476	0.1536E-02	7
1521821	15.600	0.1126E-02	10	15.320	0.7097E-03	20	15.389	0.8352E-03	18	15.372	0.5665E-03	13
1530217	16.468	0.6289E-03	9	17.351	0.1868E-02	18	17.308	0.1195E-02	13	16.485	0.7478E-03	15
1530219	18.308	0.1094E-02	20	16.925	0.1135E-02	10	18.356	0.1412E-02	20	18.400	0.1429E-02	10
1530350	17.360	0.1210E-02	18	17.318	0.1458E-02	19	17.360	0.1258E-02	10	17.378	0.1347E-02	13
1530439	17.158	0.7817E-03	17	17.152	0.7275E-03	15	17.091	0.7863E-03	9	17.058	0.8311E-03	11
1530625	18.200	0.5336E-03	20	18.400	0.3180E-03	10	18.187	0.4370E-03	15	18.122	0.3342E-03	19
1530637	17.395	0.1072E-02	16	17.371	0.9082E-03	17	17.353	0.8625E-03	12	17.382	0.9996E-03	17
1530640	14.936	0.1387E-03	17	14.944	0.1252E-03	17	14.984	0.1560E-03	10	14.992	0.2994E-03	20
1530641	20.107	0.7653E-03	12	20.078	0.5375E-03	17	20.080	0.1272E-02	10	20.000	0.9220E-03	10
1530956	16.676	0.1607E-02	9	17.409	0.2440E-02	17	16.557	0.1533E-02	13	17.433	0.3681E-02	11
1531759	14.834	0.4785E-03	14	14.827	0.5124E-03	15	14.760	0.3915E-03	12	14.815	0.4540E-03	19
1540642	18.336	0.3936E-03	10	18.409	0.3118E-03	18	18.540	0.2946E-03	10	18.328	0.3437E-03	10
1540651	17.372	0.1345E-02	13	17.400	0.1435E-02	20	17.390	0.1570E-02	16	17.393	0.1651E-02	17
1540834	18.930	0.9032E-02	12	18.918	0.6672E-02	17	18.946	0.7593E-02	20	18.922	0.1144E-01	20
1541024	18.356	0.4837E-02	10	18.451	0.4393E-02	19	18.336	0.5574E-02	10	18.397	0.6656E-02	13
1541030	18.063	0.3234E-02	20	18.036	0.2841E-02	19	18.192	0.4763E-02	10	18.204	0.4417E-02	10
1541029	17.832	0.7525E-02	20	17.640	0.3614E-02	17	17.800	0.5145E-02	20	17.659	0.3263E-02	19

1541408	17.905	0.6293E-03	16	17.930	0.6799E-03	16	17.916	0.5969E-03	10	17.912	0.8143E-03	13
1541741	17.360	0.2640E-02	10	16.733	0.1056E-02	9	16.395	0.1527E-02	9	17.120	0.1388E-02	10
1541819	20.284	0.5638E-03	11	20.255	0.5552E-03	11	20.245	0.7317E-03	16	20.280	0.6319E-03	9
1552013	17.475	0.8572E-02	16	17.488	0.1277E-01	20	17.480	0.1323E-01	20	17.432	0.8394E-02	20
1560154	17.920	0.5315E-02	10	17.960	0.5757E-02	20	17.940	0.1885E-02	11	17.967	0.4466E-02	12
1560156	16.303	0.6066E-03	11	17.360	0.6731E-03	19	17.360	0.7086E-03	15	17.426	0.1030E-02	17
1560313	17.303	0.2849E-01	14	16.180	0.1463E-01	10	17.253	0.1656E-01	15	17.235	0.1840E-01	9
1560320	17.360	0.1089E-02	20	17.440	0.1317E-02	10	17.279	0.6468E-03	19	17.290	0.1509E-02	11
1560418	17.166	0.3841E-03	20	17.115	0.6662E-03	17	17.242	0.8438E-03	19	17.080	0.3813E-03	20
1560549	15.816	0.4899E-03	10	15.583	0.4342E-03	14	15.800	0.6262E-03	18	15.820	0.6985E-03	16
1560912	17.699	0.6097E-03	17	17.698	0.1222E-02	11	17.590	0.5729E-03	12	17.600	0.8322E-03	9
1560913	27.474	0.1261E-02	7	27.120	0.1038E-02	10	27.326	0.1297E-02	7	27.040	0.1132E-02	10
1560919	17.644	0.1391E-03	11	17.520	0.2119E-03	10	17.650	0.1766E-03	16	17.520	0.2374E-03	10
1561234	17.696	0.1863E-02	20	17.760	0.2214E-02	10	17.578	0.1016E-02	19	17.627	0.1928E-02	19
1561300	17.440	0.7565E-03	13	17.445	0.6955E-03	17	17.402	0.6551E-03	18	17.348	0.8103E-03	20
1561328	17.984	0.1039E-02	20	17.863	0.2053E-02	14	17.950	0.2250E-02	20	17.846	0.1478E-02	20
1561443	16.967	0.3222E-03	10	18.396	0.4951E-03	9	18.297	0.3401E-03	14	18.375	0.4414E-03	13
1561931	17.520	0.8638E-03	16	17.404	0.6111E-03	11	17.564	0.6152E-03	11	17.495	0.6525E-03	13
1562346	17.844	0.2568E-02	9	17.857	0.1747E-02	14	17.840	0.2352E-02	18	17.809	0.1988E-02	17
1562351	17.640	0.1909E-02	20	17.605	0.2678E-02	17	17.600	0.2166E-02	14	17.616	0.1856E-02	15
1570446	18.286	0.9595E-03	13	18.114	0.1244E-02	14	18.293	0.1343E-02	15	18.300	0.1280E-02	16
1570603	17.240	0.8454E-03	20	17.389	0.1037E-02	11	17.240	0.1073E-02	20	17.153	0.8580E-03	17
1570734	17.292	0.1340E-02	13	17.285	0.1560E-02	16	17.277	0.1621E-02	13	17.496	0.3863E-02	10
1571554	17.423	0.1152E-02	14	17.443	0.1515E-02	12	16.633	0.1031E-02	12	17.395	0.2031E-02	19
1571639	17.200	0.1396E-02	16	17.120	0.6229E-03	10	17.200	0.1344E-02	17	17.120	0.1281E-02	18
1571650	17.935	0.1301E-01	16	17.920	0.8671E-02	20	17.895	0.1149E-01	19	17.840	0.1143E-01	17
1571656	17.542	0.1909E-02	18	17.476	0.2686E-02	18	17.520	0.3404E-02	20	17.482	0.2920E-02	17
1572017	17.056	0.6611E-03	20	17.062	0.6833E-03	11	16.997	0.7539E-03	12	17.147	0.1361E-02	15
1580024	18.857	0.9605E-03	14	18.860	0.8199E-03	16	18.825	0.1203E-02	13	18.772	0.7787E-03	20
1580540	17.133	0.2847E-02	12	17.140	0.5509E-02	12	17.127	0.3256E-02	11	17.116	0.3856E-02	20
1580606	17.994	0.6428E-03	10	18.226	0.7329E-03	7	17.927	0.7403E-03	11	18.286	0.8820E-03	10
1580732	18.464	0.1192E-02	20	18.466	0.1823E-02	20	18.460	0.1245E-02	20	18.460	0.1020E-02	20
1581038	18.410	0.4250E-02	16	18.320	0.5225E-02	12	18.396	0.5526E-02	19	18.314	0.3032E-02	20
1581500	18.062	0.5212E-03	20	18.213	0.6427E-03	15	18.072	0.6151E-03	20	18.046	0.5895E-03	20
1581519	17.572	0.1714E-02	20	17.556	0.2100E-02	20	17.574	0.2793E-02	20	17.506	0.1537E-02	20
1581520	19.704	0.2643E-01	10	19.600	0.3837E-01	9	19.680	0.3290E-01	11	19.640	0.4412E-01	10
1581546	16.650	0.1379E-02	8	16.480	0.3337E-02	8	16.560	0.3024E-02	11	16.536	0.4141E-02	15
1581920	17.800	0.2352E-02	20	17.711	0.1457E-02	14	17.700	0.1217E-02	20	17.720	0.3397E-02	20
1581925	17.627	0.1819E-02	18	17.504	0.1050E-02	15	17.557	0.1300E-02	13	17.620	0.2098E-02	20
1582007	18.640	0.1745E-02	8	18.533	0.1608E-02	12	18.549	0.2006E-02	15	18.587	0.1988E-02	15
1582103	17.588	0.6754E-02	10	17.581	0.7300E-02	19	17.630	0.6901E-02	20	17.635	0.1480E-01	8
1582133	18.109	0.3286E-02	19	18.272	0.4341E-02	10	18.140	0.3451E-02	20	18.160	0.5057E-02	16
1590305	16.960	0.1205E-02	15	17.024	0.1291E-02	20	16.960	0.1543E-02	17	16.920	0.1213E-02	20
1590415	16.301	0.2493E-02	16	17.332	0.3989E-02	13	16.278	0.2281E-02	15	16.284	0.2415E-02	16
1590520	17.920	0.8081E-03	16	17.789	0.6086E-03	15	17.829	0.5770E-03	19	17.876	0.1297E-02	19
1590812	17.760	0.7614E-03	11	16.750	0.4241E-03	14	17.400	0.6477E-03	9	17.704	0.7386E-03	10
1590823	17.692	0.6108E-03	20	17.674	0.5508E-03	13	17.720	0.7771E-03	20	17.600	0.5652E-03	19
1590931	17.936	0.1380E-02	20	17.940	0.1137E-02	20	17.920	0.2334E-02	10	17.840	0.1824E-02	10
1590921	17.520	0.7453E-02	10	17.840	0.1498E-01	20	17.967	0.1578E-01	15	17.822	0.1305E-01	13
1590931	17.520	0.9933E-03	19	17.600	0.9693E-03	10	17.520	0.1504E-02	10	17.440	0.9506E-03	20
1590952	16.960	0.3619E-03	10	16.905	0.4748E-03	19	17.076	0.4440E-03	18	17.004	0.4694E-03	18
1590953	17.920	0.9525E-03	7	17.760	0.1030E-02	10	17.854	0.7392E-03	17	17.773	0.4705E-03	19
1591004	17.861	0.4641E-02	15	17.917	0.6729E-02	12	17.467	0.4517E-02	9	17.456	0.4684E-02	10
1591147	17.760	0.5122E-02	13	17.600	0.3928E-02	12	17.686	0.4644E-02	19	17.720	0.8458E-02	20
1591222	18.080	0.2429E-02	19	18.092	0.2187E-02	10	17.880	0.8033E-03	9	17.931	0.2343E-02	14
1591509	17.618	0.1034E-02	9	17.606	0.1077E-02	13	17.575	0.9521E-03	11	17.630	0.1167E-02	20
1591525	21.610	0.4564E-03	8	21.472	0.4194E-03	17	20.633	0.2494E-03	9	21.474	0.6279E-03	17

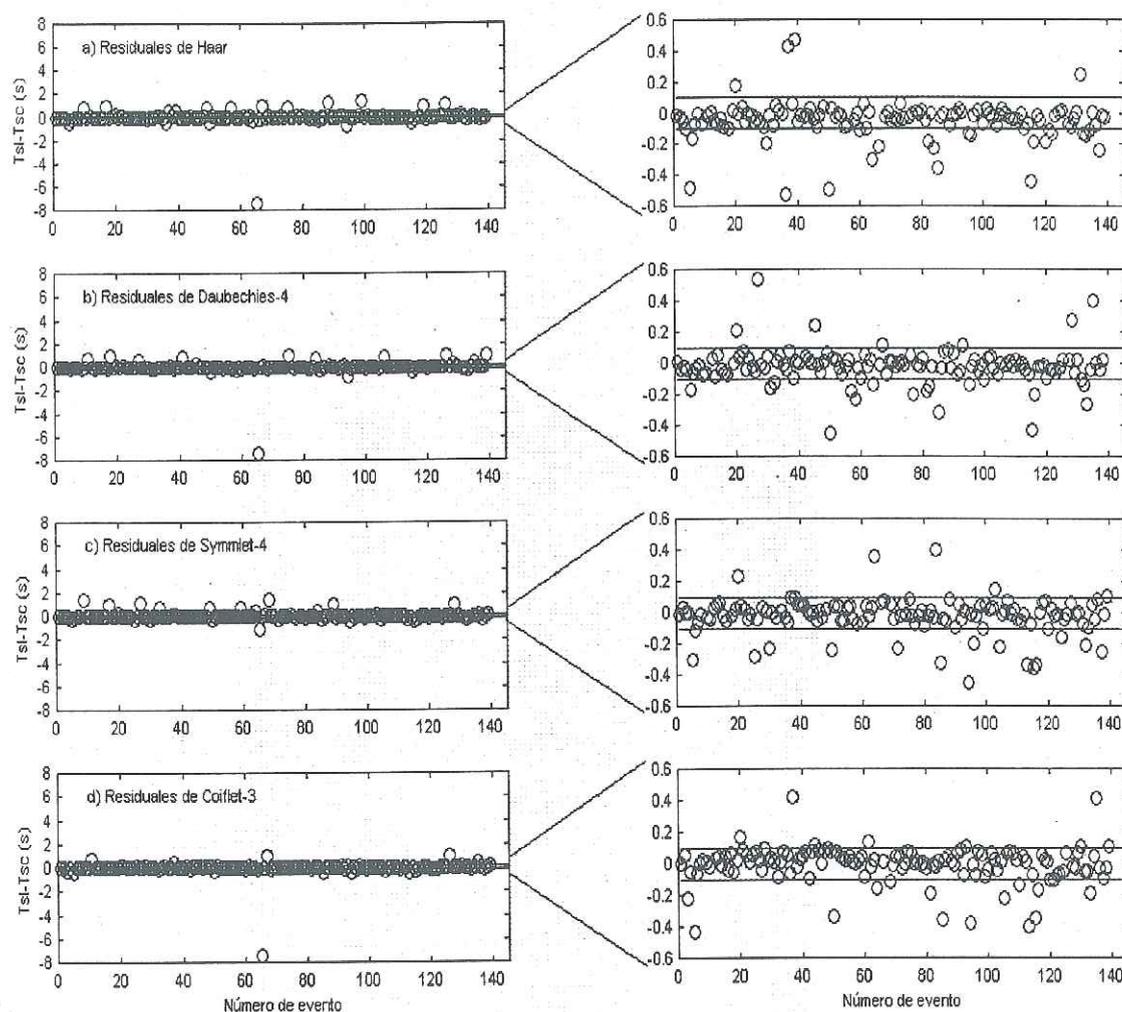


Figura 46. Residuales de tiempo de arribo ($S_{leído} - S_{calculado}$) obtenidos al utilizar cuatro diferentes ondículas.

Del mismo modo como en la fase P, ahora se tienen cuatro tiempos de arribo de onda S, uno proveniente de cada ondícula, para cada sismograma de la base de datos. El autor no encontró un criterio con base sólida para elegir entre estos cuatro tiempos, por lo que el promedio de éstos parece ser la elección más plausible. De cualquier manera, se probó los cuatro diferentes criterios descritos en la sección V.2.1, con la única diferencia de

que en el criterio (c) se selecciona el tiempo mayor para la fase S (para la P se selecciona el tiempo menor). La tabla XIV contiene los tiempos de arribo seleccionados de acuerdo a esos cuatro criterios. La figura 47 muestra los residuales correspondientes.

Tabla XIV. Tiempos de arribo de onda S, correspondientes a los cuatro criterios de selección del tiempo final. T_{sc1} es el tiempo de máxima frecuencia, T_{sc2} es el tiempo mayor, T_{sc3} es el tiempo con máxima amplitud, T_{sc4} es el tiempo promedio; R_i es el residual correspondiente, respecto a los tiempos de arribo leídos por un lectorista independiente.

Evento	T_{sc1}	R_1	T_{sc2}	R_2	T_{sc3}	R_3	T_{sc4}	R_4
1420451	17.320	-0.015	17.320	-0.015	17.320	-0.015	17.310	-0.005
1421119	16.735	0.035	16.807	-0.037	16.720	0.050	16.765	0.005
1421137	18.220	-0.045	18.400	-0.225	18.400	-0.225	18.249	-0.074
1421204	18.162	-0.102	18.162	-0.102	18.162	-0.102	18.110	-0.050
1421230	20.062	-0.307	20.240	-0.485	20.182	-0.427	20.054	-0.299
1421250	17.714	-0.064	17.816	-0.166	17.816	-0.166	17.754	-0.104
1421500	17.392	-0.072	17.392	-0.072	17.353	-0.033	17.362	-0.042
1421504	17.120	-0.010	17.120	-0.010	17.120	-0.010	17.113	-0.003
1430215	18.204	-0.074	18.204	-0.074	18.204	-0.074	18.175	-0.045
1430343	16.696	-0.016	16.747	-0.067	16.747	-0.067	16.717	-0.037
1430410	17.248	-0.038	17.248	-0.038	17.248	-0.038	17.238	-0.028
1430654	16.452	0.033	16.480	0.005	16.452	0.033	16.461	0.024
1430655	16.400	0.050	16.537	-0.087	16.400	0.050	16.460	-0.010
1430749	19.886	-0.006	19.954	-0.074	19.954	-0.074	19.871	0.009
1431347	18.516	-0.041	18.516	-0.041	18.436	0.039	18.489	-0.014
1431559	17.834	-0.044	17.880	-0.090	17.840	-0.050	17.851	-0.061
1431607	23.860	0.060	23.991	-0.071	23.860	0.060	23.926	-0.006
1440810	14.662	-0.052	14.710	-0.100	14.710	-0.100	14.667	-0.057
1441623	18.000	0.020	18.019	0.001	18.000	0.020	18.006	0.014
1442300	19.000	0.230	19.064	0.166	19.000	0.230	19.034	0.196
1450044	17.400	0.040	17.442	-0.002	17.400	0.040	17.400	0.040
1450309	19.873	0.022	19.873	0.022	19.873	0.022	19.847	0.048
1450428	17.334	0.006	17.396	-0.056	17.334	0.006	17.374	-0.034
1450518	16.390	0.055	16.460	-0.015	16.451	-0.006	16.430	0.015
1450522	18.527	0.073	18.880	-0.280	18.880	-0.280	18.587	0.013
1450613	19.507	-0.042	19.520	-0.055	19.440	0.025	19.497	-0.032
1450637	17.750	-0.035	17.758	-0.043	17.180	0.535	17.754	-0.039
1450651	17.624	-0.059	17.624	-0.059	17.575	-0.010	17.550	0.015
1450716	15.160	-0.090	15.160	-0.090	15.063	0.007	15.093	-0.023
1450837	14.328	0.032	14.587	-0.227	14.320	0.040	14.449	-0.089
1451004	17.360	0.000	17.520	-0.160	17.520	-0.160	17.400	-0.040
1460240	18.516	-0.126	18.516	-0.126	18.422	-0.032	18.470	-0.080
1460929	18.306	0.014	18.311	0.009	17.580	0.740	18.295	0.025
1461349	17.270	0.075	17.333	0.012	17.333	0.012	17.307	0.038
1461853	17.412	-0.007	17.438	-0.033	17.352	0.053	17.403	0.002
1470144	17.611	-0.061	18.080	-0.530	17.589	-0.039	17.603	-0.053
1471305	15.888	0.427	16.240	0.075	16.216	0.099	16.228	0.087
1471421	17.960	-0.020	18.030	-0.090	17.960	-0.020	17.929	0.011
1471522	17.080	0.010	17.080	0.010	17.062	0.028	17.061	0.029
1471524	17.495	-0.060	17.495	-0.060	17.440	-0.005	17.426	0.009

1471708	17.160	0.075	17.248	-0.013	17.248	-0.013	17.196	0.039
1480340	18.285	0.015	18.400	-0.100	18.400	-0.100	18.316	-0.016
1480609	17.217	0.078	17.308	-0.013	17.308	-0.013	17.276	0.019
1481218	18.140	0.005	18.142	0.003	18.142	0.003	18.109	0.036
1481223	17.593	0.242	17.886	-0.051	17.868	-0.033	17.774	0.061
1481238	17.836	0.004	17.929	-0.089	17.929	-0.089	17.862	-0.022
1481251	18.188	-0.068	18.188	-0.068	18.188	-0.068	18.130	-0.010
1481350	17.076	0.014	17.076	0.014	17.054	0.036	17.049	0.041
1481737	16.871	0.074	16.880	0.065	16.880	0.065	16.876	0.069
1481742	36.082	-0.332	36.240	-0.490	36.082	-0.332	36.130	-0.380
1490348	16.912	0.043	16.933	0.022	16.880	0.075	16.912	0.043
1490834	17.308	0.017	17.350	-0.025	17.308	0.017	17.305	0.021
1491620	17.200	0.000	17.251	-0.051	17.251	-0.051	17.213	-0.013
1491746	17.380	0.025	17.480	-0.075	17.453	-0.048	17.433	-0.028
1500840	18.968	-0.018	19.040	-0.090	18.913	0.037	18.961	-0.011
1500937	17.240	0.040	17.360	-0.080	17.360	-0.080	17.282	-0.002
1501412	17.600	-0.180	17.600	-0.180	17.462	-0.042	17.495	-0.075
1510223	17.600	-0.070	17.760	-0.230	17.760	-0.230	17.611	-0.081
1510540	16.759	0.041	16.832	-0.032	16.832	-0.032	16.799	0.001
1511031	19.236	-0.066	19.280	-0.110	19.257	-0.087	19.259	-0.089
1512209	17.960	0.055	17.977	0.038	17.960	0.055	17.944	0.071
1520153	19.080	-0.020	19.160	-0.100	19.080	-0.020	19.099	-0.039
1520354	17.216	0.019	17.225	0.010	17.225	0.010	17.215	0.020
1520650	18.700	-0.300	18.700	-0.300	18.700	-0.300	18.600	-0.200
1521512	20.140	-1.135	26.476	-7.471	26.430	-7.425	26.445	-7.440
1521951	15.320	0.060	15.600	-0.220	15.600	-0.220	15.420	-0.040
1530217	17.351	0.074	17.351	0.074	17.351	0.074	17.329	0.096
1530218	18.356	-0.076	18.400	-0.120	18.400	-0.120	18.355	-0.075
1530350	17.318	0.052	17.378	-0.008	17.318	0.052	17.354	0.016
1530438	17.158	-0.053	17.158	-0.053	17.058	0.047	17.115	-0.010
1530625	18.200	-0.035	18.400	-0.235	18.200	-0.035	18.227	-0.062
1530637	17.382	-0.032	17.395	-0.045	17.395	-0.045	17.375	-0.025
1530640	14.992	0.003	14.992	0.003	14.992	0.003	14.964	0.031
1530641	20.078	-0.008	20.107	-0.037	20.080	-0.010	20.066	0.004
1530956	17.409	0.086	17.433	0.062	17.433	0.062	17.421	0.074
1531758	14.815	-0.005	14.834	-0.024	14.827	-0.017	14.809	0.001
1540642	18.409	-0.074	18.540	-0.205	18.336	-0.001	18.403	-0.068
1540651	17.400	-0.020	17.400	-0.020	17.393	-0.013	17.389	-0.009
1540834	18.922	0.003	18.946	-0.021	18.922	0.003	18.929	-0.004
1541024	18.451	-0.081	18.451	-0.081	18.397	-0.027	18.385	-0.015
1541032	18.063	-0.048	18.204	-0.189	18.192	-0.177	18.124	-0.109
1541228	17.832	-0.182	17.832	-0.182	17.832	-0.182	17.733	-0.083
1541409	17.930	-0.035	17.930	-0.035	17.930	-0.035	17.916	-0.021
1541741	17.360	-0.230	17.360	-0.230	17.360	-0.230	17.240	-0.110
1541819	20.245	-0.320	20.284	-0.359	20.245	-0.320	20.266	-0.341
1552013	17.480	-0.030	17.488	-0.038	17.480	-0.030	17.469	-0.019
1560154	17.960	-0.050	17.960	-0.050	17.960	-0.050	17.897	0.013
1560156	17.360	0.080	17.426	0.014	17.426	0.014	17.382	0.058
1560313	17.253	-0.028	17.303	-0.078	17.303	-0.078	17.264	-0.039
1560320	17.360	-0.015	17.440	-0.095	17.280	0.065	17.339	0.006
1560416	17.080	0.085	17.242	-0.077	17.242	-0.077	17.151	0.014
1560549	15.600	-0.055	15.620	-0.075	15.620	-0.075	15.580	-0.035
1560912	17.699	0.006	17.699	0.006	17.698	0.007	17.647	0.058
1560913	27.040	-0.375	27.526	-0.861	27.526	-0.861	27.500	-0.835

1560918	17.650	-0.140	17.650	-0.140	17.520	-0.010	17.583	-0.073
1561234	17.696	-0.141	17.760	-0.205	17.760	-0.205	17.665	-0.110
1561300	17.348	0.077	17.445	-0.020	17.440	-0.015	17.409	0.016
1561326	17.950	-0.050	17.950	-0.050	17.950	-0.050	17.886	0.014
1561443	18.297	-0.007	18.396	-0.106	18.396	-0.106	18.356	-0.066
1561831	17.520	-0.065	17.564	-0.109	17.520	-0.065	17.496	-0.041
1562346	17.840	0.035	17.857	0.018	17.844	0.031	17.838	0.037
1562351	17.640	0.000	17.640	0.000	17.605	0.035	17.615	0.025
1570446	18.300	-0.040	18.300	-0.040	18.293	-0.033	18.248	0.012
1570603	17.240	-0.075	17.389	-0.224	17.240	-0.075	17.256	-0.091
1570734	17.285	-0.010	17.496	-0.221	17.496	-0.221	17.338	-0.063
1571554	17.385	0.065	17.443	0.007	17.385	0.065	17.417	0.033
1571639	17.120	0.070	17.200	-0.010	17.200	-0.010	17.160	0.030
1571650	17.920	-0.015	17.935	-0.030	17.935	-0.030	17.897	0.008
1571656	17.520	-0.020	17.542	-0.042	17.520	-0.020	17.505	-0.005
1572017	17.056	-0.041	17.147	-0.132	17.147	-0.132	17.065	-0.050
1580024	18.772	0.038	18.860	-0.050	18.825	-0.015	18.828	-0.018
1580540	17.116	0.014	17.140	-0.010	17.140	-0.010	17.129	0.001
1580606	17.927	-0.037	18.286	-0.396	18.286	-0.396	18.049	-0.159
1580732	18.466	-0.076	18.466	-0.076	18.466	-0.076	18.463	-0.073
1581038	18.314	-0.349	18.410	-0.445	18.396	-0.431	18.360	-0.395
1581500	18.072	-0.197	18.213	-0.338	18.213	-0.338	18.098	-0.223
1581519	17.574	-0.019	17.574	-0.019	17.574	-0.019	17.552	0.003
1581520	19.680	-0.020	19.704	-0.044	19.640	0.020	19.656	0.004
1581546	16.536	0.014	16.560	-0.010	16.536	0.014	16.525	0.025
1581920	17.720	-0.110	17.800	-0.190	17.720	-0.110	17.733	-0.123
1581925	17.620	-0.100	17.627	-0.107	17.620	-0.100	17.577	-0.057
1582007	18.549	-0.039	18.640	-0.130	18.549	-0.039	18.577	-0.067
1582103	17.630	-0.060	17.635	-0.065	17.635	-0.065	17.609	-0.039
1582133	18.140	-0.030	18.272	-0.162	18.160	-0.050	18.170	-0.060
1590305	17.024	-0.044	17.024	-0.044	16.960	0.020	16.966	0.014
1590415	16.301	1.024	17.332	-0.007	17.332	-0.007	16.288	1.037
1590520	17.829	0.026	17.920	-0.065	17.876	-0.021	17.854	0.001
1590812	16.750	0.920	17.760	-0.090	17.760	-0.090	17.732	-0.062
1590823	17.720	-0.060	17.720	-0.060	17.720	-0.060	17.671	-0.011
1590831	17.936	0.009	17.940	0.005	17.920	0.025	17.909	0.036
1590921	17.840	-0.075	17.867	-0.102	17.867	-0.102	17.843	-0.078
1590931	17.440	-0.055	17.600	-0.215	17.520	-0.135	17.520	-0.135
1590952	16.905	-0.090	17.076	-0.261	16.905	-0.090	16.986	-0.171
1590953	17.773	0.037	17.920	-0.110	17.760	0.050	17.827	-0.017
1591004	17.861	0.009	17.917	-0.047	17.917	-0.047	17.889	-0.019
1591147	17.720	-0.035	17.760	-0.075	17.720	-0.035	17.692	-0.007
1591222	18.080	-0.240	18.092	-0.252	18.080	-0.240	17.996	-0.156
1591509	17.630	-0.030	17.630	-0.030	17.630	-0.030	17.607	-0.007
1591525	21.474	0.106	21.610	-0.030	21.474	0.106	21.519	0.061

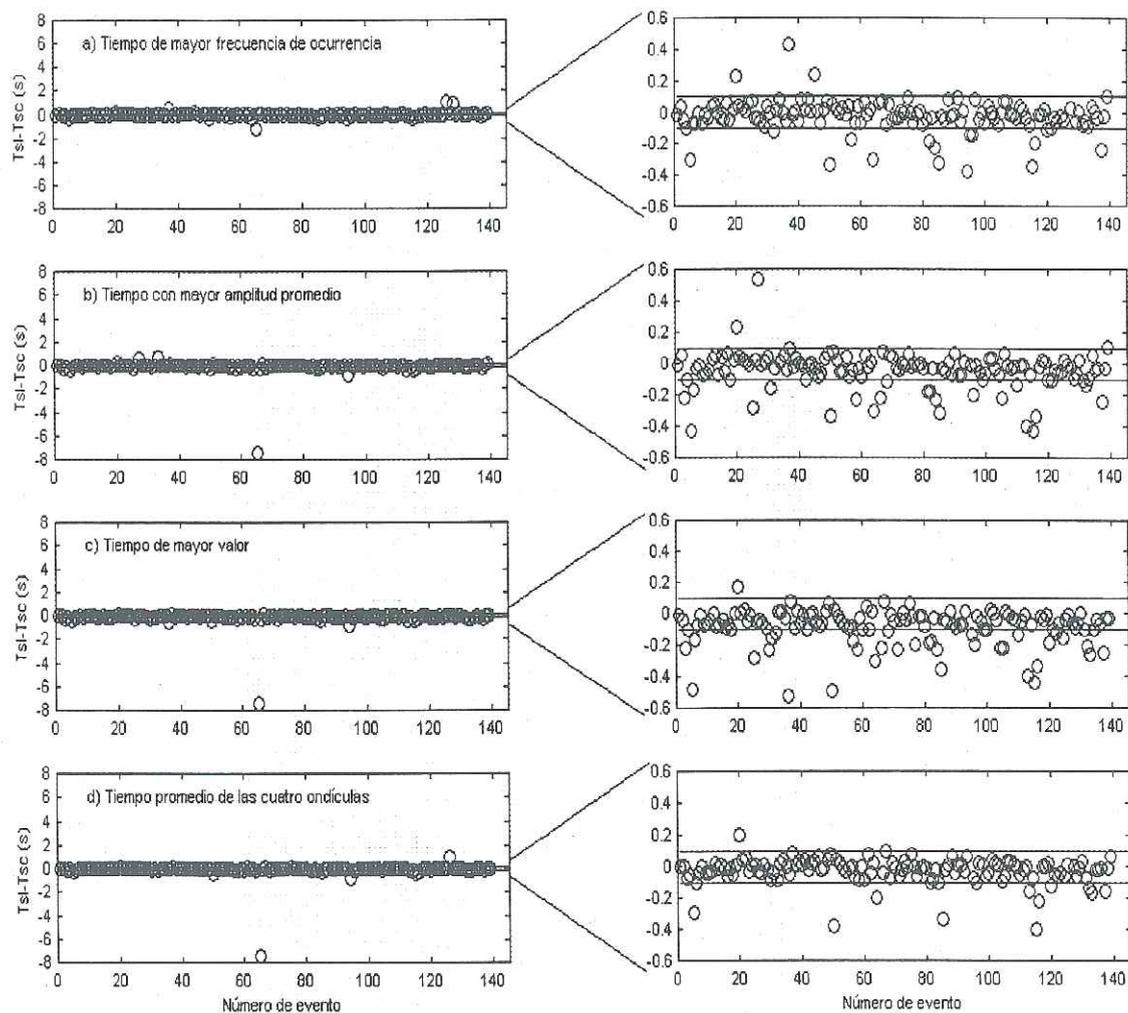


Figura 47. Residuales de los tiempos de arribo de onda S, tiempo calculado menos tiempo leído, para cada uno de los cuatro criterios de selección.

La figura 48 muestra los histogramas de los residuales de los cuatro criterios de selección que se probó. El histograma de menor sesgo es el que representa la distribución de los tiempos promedio de las cuatro ondículas, se aprecia que está más centrado en cero. Sus parámetros estadísticos indican que puede ser el más viable para ser escogido ya que

produce los mejores resultados, tiene la menor desviación estándar y presenta el menor número de residuales fuera de límite de 0.1 s (líneas interrumpidas verticales en la figura).

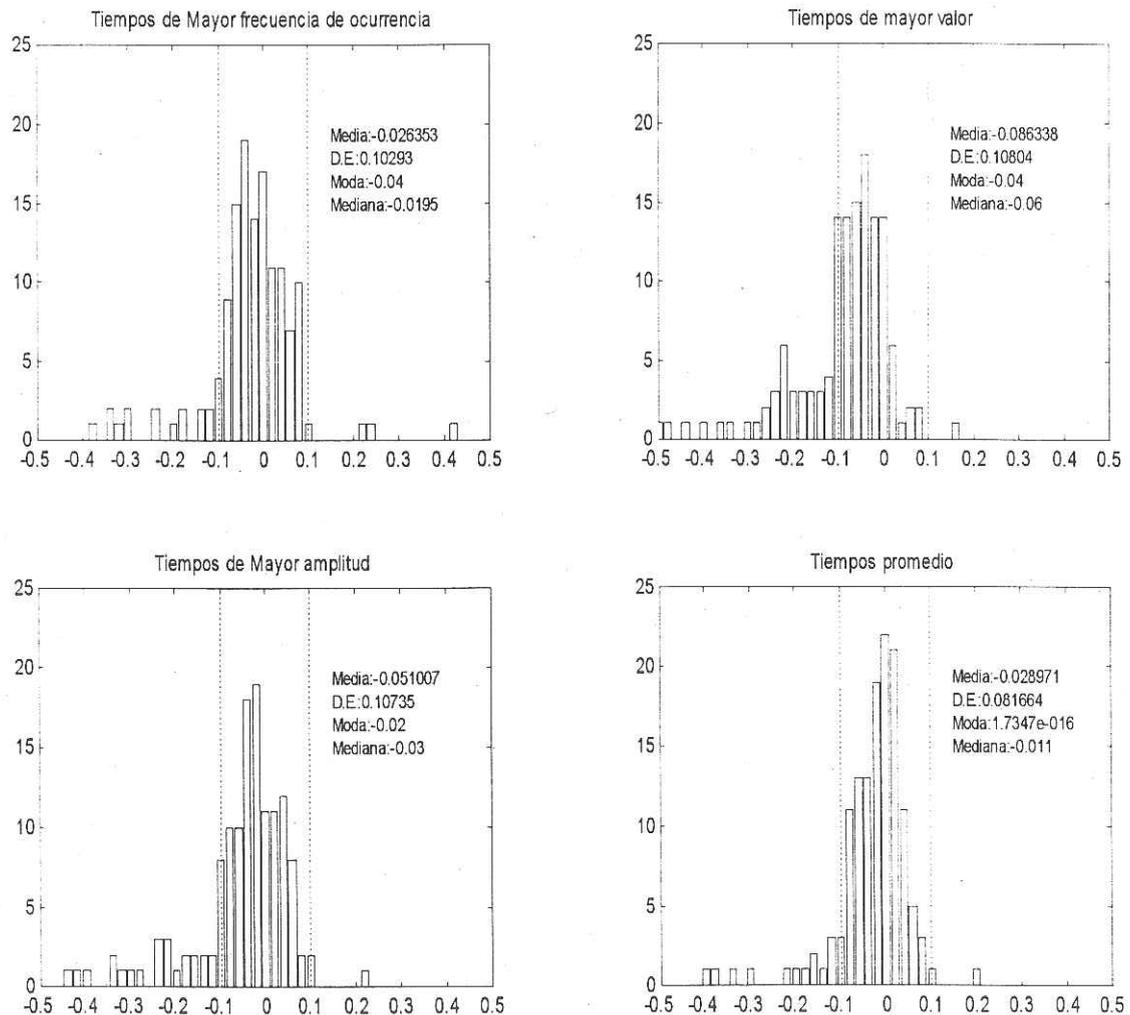


Figura 48. Histogramas representativos de los residuales de onda S para los cuatro filtros aplicados y después de aplicar los criterios de depuración.

En las gráficas de la figura 47 se observa que los residuales menos dispersos corresponden al criterio de selección del tiempo promedio de las cuatro ondículas (excluidos los tiempos excéntricos). Con base en los resultados mostrados en las figuras 47

y 48, se eligió al criterio de tiempo promedio como el definitivo para calcular el tiempo de arribo de la onda S. La tabla XV muestra los tiempos de arribo finales obtenidos al aplicar esta metodología a la base de datos de 139 sismogramas.

Tabla XV. Tiempos de arribo de la onda S, elegidos por medio del criterio de promedio de las cuatro ondículas. T_{sc} es el tiempo calculado, R es el residual (tiempo leído menos tiempo calculado).

Evento	T_{sc}	R	Evento	T_{sc}	R
1530625	18.227	-0.062	1530637	17.375	-0.025
1530637	17.375	-0.025	1530640	14.964	0.031
1530640	14.964	0.031	1530641	20.066	0.004
1530641	20.066	0.004	1530956	17.421	0.074
1530956	17.421	0.074	1531758	14.809	0.001
1531758	14.809	0.001	1540642	18.403	-0.068
1540642	18.403	-0.068	1540651	17.389	-0.009
1540651	17.389	-0.009	1540834	18.929	-0.004
1540834	18.929	-0.004	1541024	18.385	-0.015
1541024	18.385	-0.015	1541032	18.124	-0.109
1541032	18.124	-0.109	1541228	17.733	-0.083
1541228	17.733	-0.083	1541409	17.916	-0.021
1541409	17.916	-0.021	1541741	17.240	-0.110
1541741	17.240	-0.110	1541819	20.266	-0.341
1541819	20.266	-0.341	1552013	17.469	-0.019
1552013	17.469	-0.019	1560154	17.897	0.013
1560154	17.897	0.013	1560156	17.382	0.058
1560156	17.382	0.058	1560313	17.264	-0.039
1560313	17.264	-0.039	1560320	17.339	0.006
1560320	17.339	0.006	1560416	17.151	0.014
1560416	17.151	0.014	1560549	15.580	-0.035
1560549	15.580	-0.035	1560912	17.647	0.058
1560912	17.647	0.058	1560913	27.500	-0.835
1560913	27.500	-0.835	1560918	17.583	-0.073
1560918	17.583	-0.073	1561234	17.665	-0.110
1561234	17.665	-0.110	1561300	17.409	0.016
1561300	17.409	0.016	1561326	17.886	0.014
1561326	17.886	0.014	1561443	18.356	-0.066
1561443	18.356	-0.066	1561831	17.496	-0.041
1561831	17.496	-0.041	1562346	17.838	0.037
1562346	17.838	0.037	1562351	17.615	0.025
1562351	17.615	0.025	1570446	18.248	0.012
1570446	18.248	0.012	1570603	17.256	-0.091
1570603	17.256	-0.091	1570734	17.338	-0.063
1570734	17.338	-0.063	1571554	17.417	0.033
1571554	17.417	0.033	1571639	17.160	0.030
1571639	17.160	0.030	1571650	17.897	0.008
1571650	17.897	0.008	1571656	17.505	-0.005
1571656	17.505	-0.005	1572017	17.065	-0.050

1572017	17.065	-0.050	1580024	18.828	-0.018
1580024	18.828	-0.018	1580540	17.129	0.001
1580540	17.129	0.001	1580606	18.049	-0.159
1580606	18.049	-0.159	1580732	18.463	-0.073
1580732	18.463	-0.073	1581038	18.360	-0.395
1581038	18.360	-0.395	1581500	18.098	-0.223
1581500	18.098	-0.223	1581519	17.552	0.003
1581519	17.552	0.003	1581520	19.656	0.004
1581520	19.656	0.004	1581546	16.525	0.025
1581546	16.525	0.025	1581920	17.733	-0.123
1581920	17.733	-0.123	1581925	17.577	-0.057
1581925	17.577	-0.057	1582007	18.577	-0.067
1582007	18.577	-0.067	1582103	17.609	-0.039
1582103	17.609	-0.039	1582133	18.170	-0.060
1582133	18.170	-0.060	1590305	16.966	0.014
1590305	16.966	0.014	1590415	16.288	1.037
1590415	16.288	1.037	1590520	17.854	0.001
1590520	17.854	0.001	1590812	17.732	-0.062
1590812	17.732	-0.062	1590823	17.671	-0.011
1590823	17.671	-0.011	1590831	17.909	0.036
1590831	17.909	0.036	1590921	17.843	-0.078
1590921	17.843	-0.078	1590931	17.520	-0.135
1590931	17.520	-0.135	1590952	16.986	-0.171
1590952	16.986	-0.171	1590953	17.827	-0.017
1590953	17.827	-0.017	1591004	17.889	-0.019
1591004	17.889	-0.019	1591147	17.692	-0.007
1591147	17.692	-0.007	1591222	17.996	-0.156
1591222	17.996	-0.156	1591509	17.607	-0.007
1591509	17.607	-0.007	1591525	21.519	0.061
1591525	21.519	0.061	1420451	17.310	-0.005
1530625	18.227	-0.062			

En la gráfica de la izquierda aparece un residual con valor muy disparado (-7.4 s), que corresponde al sismograma E1521512. Este sismograma se muestra en la figura 49, donde se aprecia la existencia de un tren de ruido de alta frecuencia (seguramente por mal funcionamiento instrumental), en las tres componentes.

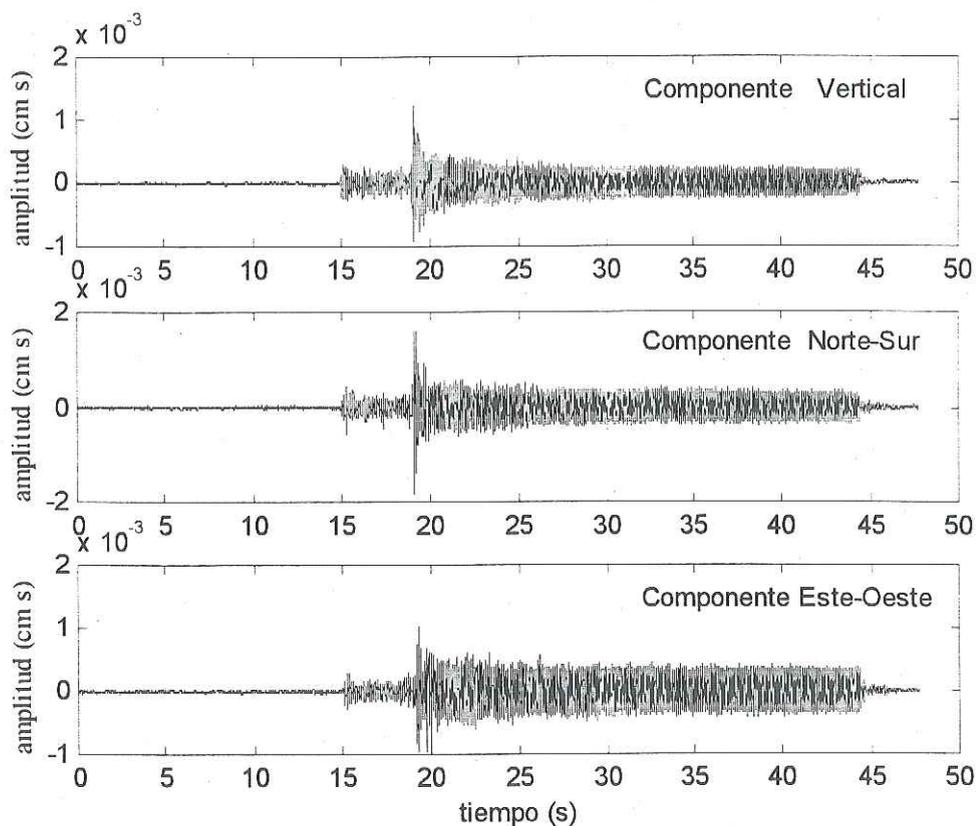


Figura 49. Sismograma E1521512, que muestra la presencia de un ruido en forma de tren de alta frecuencia, el cual aparece súbitamente en el paquete de onda S. Este fué el único sismograma con residual disparado.

La figura 50 muestra el diagrama de flujo que representa al procedimiento desarrollado para llevar a cabo la identificación automática del tiempo de arribo de la onda S.

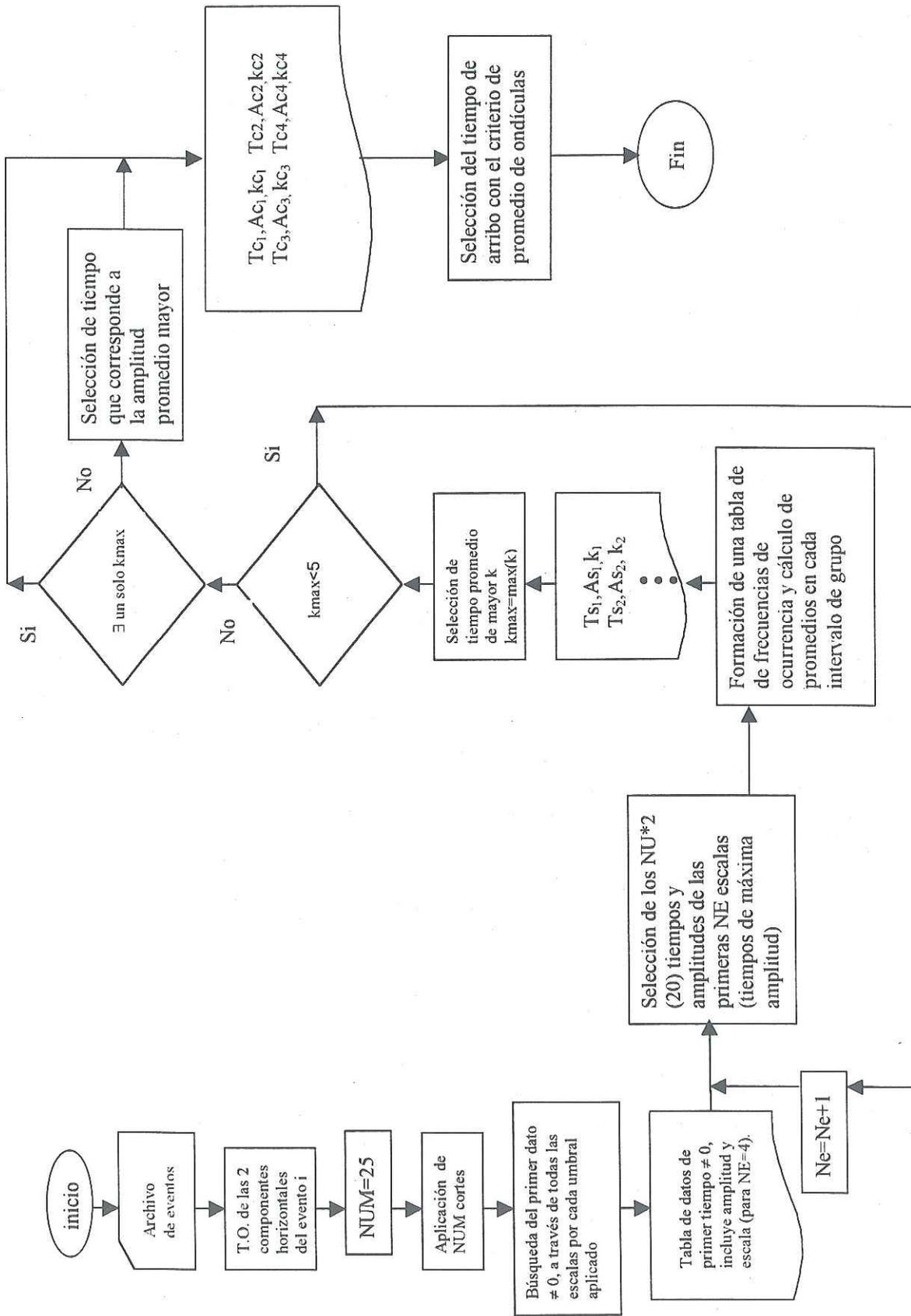


Figura 50. Diagrama de flujo para el procedimiento de cálculo del tiempo de arribo de la onda S.

V.3 DISCUSIONES

- La mayoría de las estimaciones de tiempos de arribo de P y S presentan errores menores de una décima de segundo. Esta banda de errores es comparada a continuación con la dispersión de los tiempos leídos en cinco ocasiones, por cuatro lecturistas expertos (apéndice C). La figura 51 muestra los residuales de los tiempos calculados (en cruces rojas), sobrepuestos a las diferencias en los tiempos leídos, para la onda P; mientras que la figura 52 lo hace para la onda S. Aún cuando los errores de los tiempos calculados raramente son iguales a cero, su variación queda dentro de los límites extremos de variación de los errores en los tiempos leídos. Es posible que los tiempos calculados puedan ser catalogados como obtenidos por un lectorista de mediana experiencia. Las dificultades para identificar automáticamente los tiempos de arribo de la onda S fueron mayores que para la P, lo cual también sucede en el caso de los tiempos leídos.
- La identificación automática de las fases P y S se aplicó sobre una base de datos registrada en una sola estación (EWA). Se podría reducir la influencia de los errores mayores que 0.1 s en la determinación de las localizaciones epicentrales, si se toma en cuenta los tiempos de arribo calculados para los mismos eventos, registrados en otras estaciones.
- Los parámetros estadísticos en los que se basan las elecciones de los tiempos de arribo de un sismograma, tales como números de umbrales y escalas, frecuencia de ocurrencia, amplitudes mayores, promedios de tiempos, ventanas de aceptación y rechazo, y otros, fueron combinados asignándoles el mismo peso a todos ellos. Cuando existe una muy clara concentración de elementos de decisión, el método funciona óptimamente. Por

ejemplo: en la tabla IV y el histograma de la figura 34, existe un intervalo que sobresale notablemente por su frecuencia de ocurrencia; en este ejemplo el tiempo elegido tiene un residual despreciable. Sin embargo, cuando no existe una dominancia clara de algún parámetro estadístico, cualquier pequeña diferencia entre ellos es suficiente para seleccionar un tiempo, el cual puede tener un residual grande, aún cuando en el grupo de tiempos rechazados haya quedado un valor más acertado. Es posible que mediante la aplicación de pesos en la combinación de los parámetros estadísticos sea posible mejorar la selección de los tiempos.

V.4 CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un método, basado en la TO, para la identificación automática del tiempo de arribo de las fases P y S en sismogramas de terremotos. Ha sido aplicado a una base que consta de 140 eventos de magnitud pequeña, con distintas distancias epicentrales y profundidades focales. Los resultados presentan la siguiente distribución de residuales:

residual menor de	Porcentaje de sismogramas	
	onda P	Onda S
0.10 s	97%	87%
0.05 s	81%	57%
0.03 s	61%	44%

- Estos resultados se comparan favorablemente con los reportados en la literatura: Wang y Teng (1997) obtienen errores menores a 0.1 s en el 74% de los tiempos de arribo de onda S, utilizando el concepto de redes neuronales; Allen (1982) consigue un error de 0.05 o menor en el 70% de los sismogramas.

- La TO utilizó cuatro diferentes filtros (en longitud y forma) para cubrir las posibles formas de onda que adaptaría el primer arribo de las fases sísmicas.
- Se probó diferentes combinaciones de valores de truncamiento y escalas en el dominio ondicular para reducir el rango de búsqueda del tiempo de arribo.
- Se probó cuatro criterios de selección del tiempo de arribo definitivo y se eligió el de tiempo menor, para la onda P, y el de promedio de las cuatro ondículas para la S.

V.5 RECOMENDACIONES

- Es recomendable que se implante un sistema para asignar calificaciones de calidad (o confianza) a los tiempos calculados. Este sistema pudiera estar basado en la asignación de puntuaciones acumulables a lo largo del proceso de aplicación de los diferentes criterios; dichas puntuaciones estarían en función de los parámetros estadísticos; así, por ejemplo, una frecuencia de ocurrencia muy dominante añadiría un puntaje elevado, mientras que un histograma sin un claro intervalo dominante aportaría pocos puntos a la calificación del tiempo de arribo estimado.
- De llevarse a cabo la recomendación anterior, con base en las calificaciones de calidad, se recomendaría implantar un sistema de despliegue gráfico (en pantalla de PC), interactivo, que mostrara automáticamente los sismogramas con tiempos de arribo de baja calidad, indicara la posición de los tiempos elegidos, y permitiera aceptarlos o rechazarlos expeditamente. En caso de rechazo, debería de activar el empleo de cursores gráficos para seleccionar visualmente el tiempo de arribo.

- Se recomienda probar extensivamente esta metodología en sismos de todo tipo, puesto que esta aplicación se llevó a cabo sobre un conjunto de sismos regionales y caracterizados por bajas magnitudes y profundidades.
- La experiencia con diferentes tipos de formas de onda en los primeros arribos permitiría probar, y eventualmente incorporar, otros tipos de filtros para la aplicación de la TO, además de los cuatro filtros empleados en este trabajo.

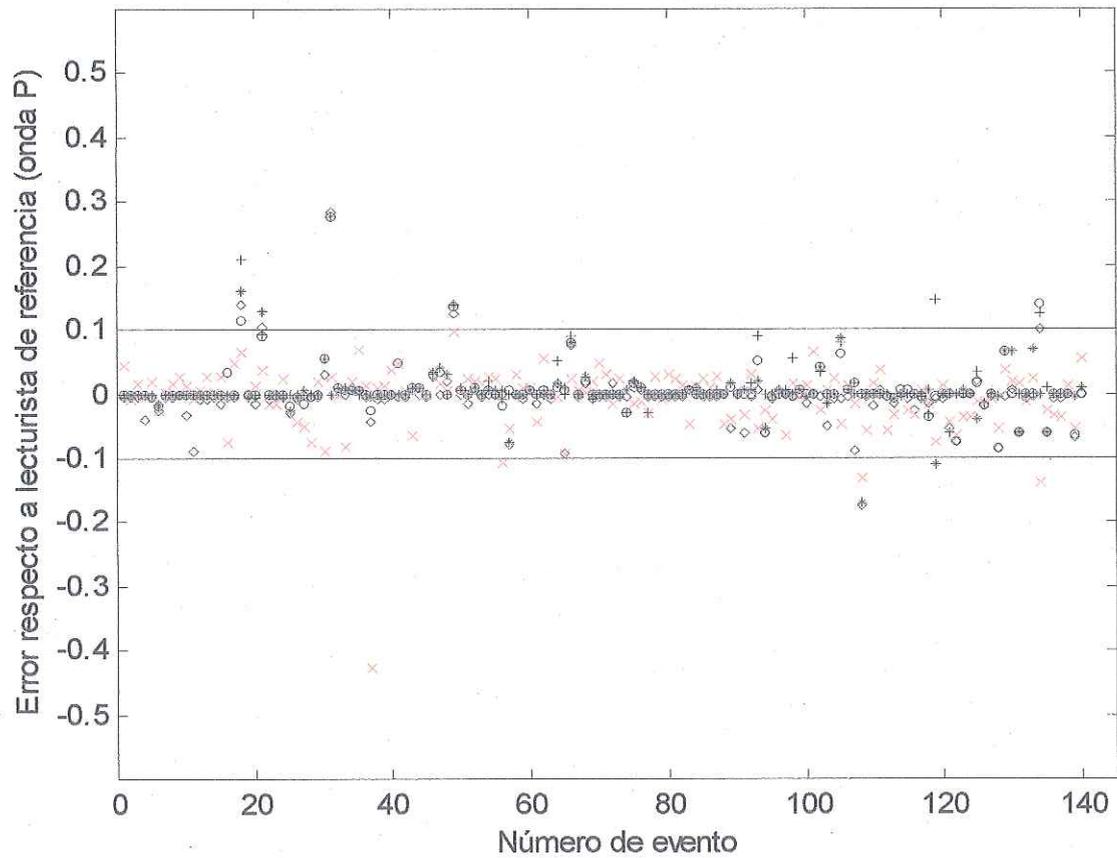


Figura 51. Errores en la estimación automática de los tiempos de arribo de la onda P (marcas: x en rojo), sobrepuestas a las variaciones de los tiempos leídos por cuatro lectoristas independientes. Todos los valores están referidos al lectorista de referencia.

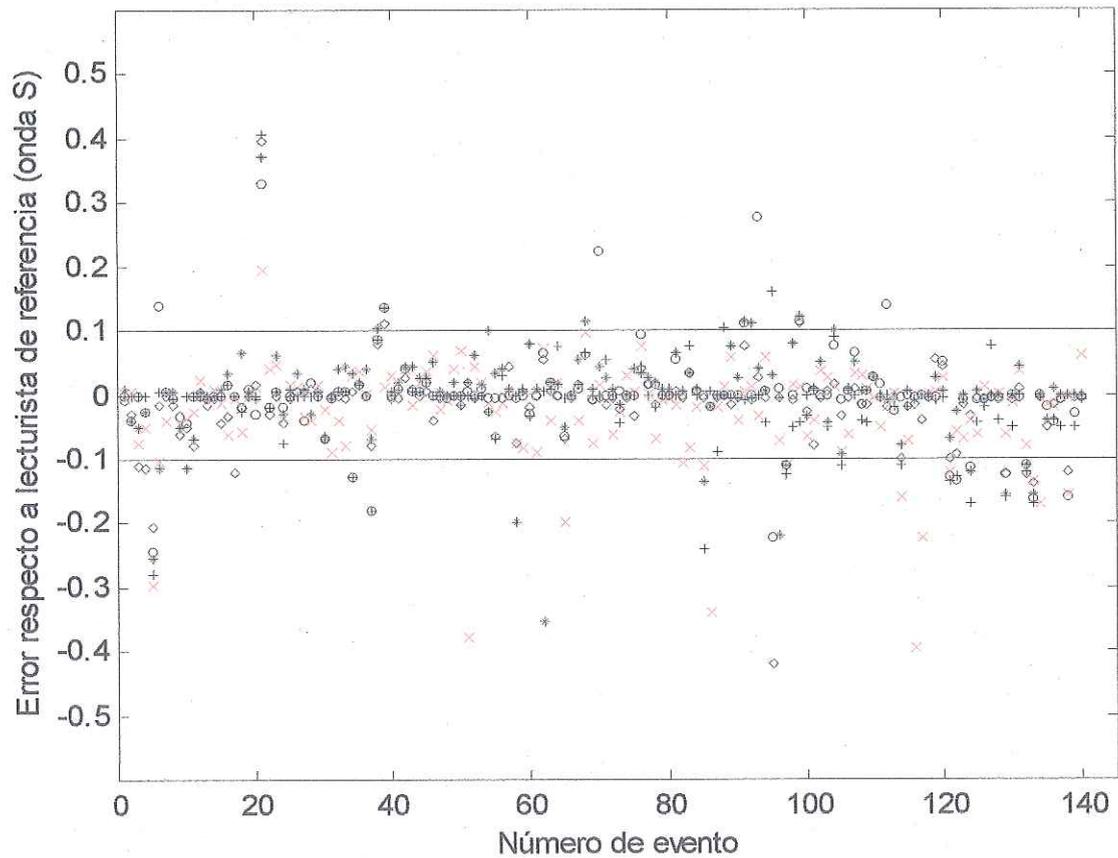


Figura 52. Errores en la estimación automática de los tiempos de arribo de la onda S (marcas: x en rojo), sobrepuestas a las variaciones de los tiempos leídos por cuatro lectoristas independientes. Todos los valores están referidos al lectorista de referencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen V. Rex (1978): Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 68, No. 5, pp. 1521-1532.
- Allen V. Rex (1982): Automatic Phase pickers: Their present use and future prospects. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 6, pp. S225-S242.
- Arfken, G.B. & Weber, H.J. (1995): *Mathematical Methods for Physicists*, Fourth Edition, Academic Press.
- Beylkin, G. & Vassiliou, A. (1998): *Mathematical Geophysics Summer School*, Stanford, August, 1998.
- Cohen, J. & Chen, T. (1993): Quantitative dip bounds for the two-dimensional Discrete Wavelet Transform: *Mathematical Methods in Geophysical Imaging*, vol. 2023, pp. 140-157.
- Chun, J.H. & Jacewitz, C.A. (1981): Fundamentals of frequency domain migration. *Geophysics*, 46, No. 5, pp.717-733.
- Daubechies, Ingrid (1992) : Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematic; 61.
- Deigan, A.J. & Watts, D.R. (1997): Ground-roll supression using the Wavelet Transform. *Geophysics*, Vol. 62, No. 6, pp. 1896-1903.
- Deily, F., Paff, D., Ortloff, J. & Lynn, R. (1968): Downhole measurements of drill string forces and motions. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng. of Eng. For Ind.* pp.217-225.
- Donoho, D.L. (1992): De-Noising via Soft-thresholding. Technical Report, Department of Statistics. Stanford University.

- Donoho, P. L., Ergas, R.A. & Polzer, R.S. (1996): Compression optimization by Multidimensional Wavelet Transform and Data Dependent Quantization. Annual Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists.
- Earle, P. S. & Shearer, P.M. (1994): Characterization of global Seismograms using an Automatic-Picking Algorithm. Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 84, No. 2, pp. 366-376.
- Ergas, R.A., Polzer, R.S., Donoho, P.L. & Villaseñor, J.D. (1996): Measuring Seismic Data Compression: What losses are acceptable?. Annual Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists.
- Frez, J., González, J.J., Acosta, J.G., Nava, F.A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R.E. & Álvarez, M. (1980): A Detailed Microseismicity Study and Current Stress Regime in the Peninsular Ranges of the Northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros Region. Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 90, No. 5, pp. 1-10.
- Gabor, D. (1946): Theory of Communication: J. Inst. Elec. Eng. (London), **93**, 429-457.
- Huffman, D.A. (1952): Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol.40, pp.1098-1101.
- Jericevic, Z. & Sitton, G.A. (1996): Lossless compression in seismic data. Annual Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists.
- Kanasewich, E.R. (1975): Time Sequence Analysis in Geophysics, Second Edition. The University of Alberta Press, Alberta.
- Kanasewich, E.R. (1981): Time Sequence Analysis in Geophysics, Third Edition. The University of Alberta Press, Alberta.

- Kumar, P. & Foufola-Georgiou, E. (1997): Wavelet Analysis for Geophysical Applications. American Geophysical Union. Reviews of Geophysics, 35, 4, pp. 385-412.
- Lutz, J., Raynaud, M., Stalder, S., Quichaud, C. Raynal, J. & Muckelroy, J. (1972): Instantaneous logging based on a dynamic theory of drilling. J. Pet. Tec., 10, pp. 750-758.
- Mallat, S. (1989): A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Itell., 11, no. 7, pp.674-693.
- Misity, M., Misity, Y., Oppenheim, G. & Poggi, J.M. (1997): Wavelet Toolbox For Use with MATLAB (User's Guide Version 1). © COPYRIGHT 1996-1997 by The MathWorks, Inc. All Right Reserved.
- Niitsuma, H., Tsuyuki, K. & Asanuma, H. (1993): Discrimination of split-waves by Wavelet Transform: Canadian Geophysics.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P (1992): Numerical Recipes in Fortran 77 Second Edition.
- Rector, J.W. & Marion, B.P. (1991): The use of the drill-bit as a downhole seismic source. Geophysics, Vol. 56, No. 5. pp. 628-634.
- Saito, N. (1994): Simultaneous Noise Suppression and Signal Compression using a Library of Orthonormal Bases and the Minimum Description Length Criterion. Wavelets in Geophysics. Editado por Foufoula-Georgiou Efi y Praveen Kumar. Academic Press. pp. 299-324.

- Sing, K.A. & Dowla, F.U. (1997): Wavelet Transform Methods for Phase Identification in Three-Component Seismograms. *Bulleti of Seismological Society of America*. Vol. 87, No. 6, pp.1598-1612.
- Strang, G. & Nguyen, T. (1996): *Wavelets and filters banks*. Wesllesley-Cambridge Press.
- Wang, J. & Teng Ta-liang (1997): Identification and Picking of S Phase using an Artificial Neural Network. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 5, pp. 1140-1149.
- Welsh, P.A. (1984): A technique for high performance data compression. *IEEE Computer Magazine*, pp.8-19.
- Yomogida, K. (1994): Detection of anomalous seismic phases by the Wavelet Transform. *Geophysical Journal International*. 116, pp. 119-130.

Apéndice A

A.1 Transformada de Fourier (TF)

Sin lugar a duda, la transformada más usada para el análisis de señales geofísicas es la Transformada de Fourier. La TF descompone una señal en armónicas senoideas dentro del ancho de banda de la señal, las cuales pueden ser localizadas con gran facilidad en el dominio de la frecuencia.

Si la señal en el dominio temporal tiene un intervalo de muestreo de

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{max}}, \quad (22)$$

Entonces la Transformada Discreta de Fourier se expresa mediante la sumatoria:

$$F(\omega_m) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) e^{-i\omega_m t_n} \quad (23)$$

con $\omega_m = m\Delta\omega$, $t_n = n\Delta t$ y N = número de puntos de la serie de tiempo.

La Transformada Inversa Discreta de Fourier es calculada mediante

$$f(t_n) = \frac{1}{N} \sum_{m=-N/2}^{N/2} F(\omega_m) e^{i\omega_m t_n} \quad (24)$$

La TF no permite la ubicación simultánea de la energía en el tiempo y la frecuencia. Para enfrentar este problema se ha ideado un esquema para la aplicación de la TF en forma segmentada a lo largo de la señal, dando origen a la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (*TFTC*), la cual se describe a continuación.

La implementación de la TFTC se hace con el empleo de una ventana móvil en el dominio temporal, dentro de la cual es calculada la TF en diferentes posiciones a lo largo de toda la señal. Con esto se consigue extraer los principales contenidos de energía y relacionarlos con el contenido de frecuencias y su ubicación en el tiempo de acuerdo a la posición de la ventana; es decir, localizar aproximadamente la energía de la señal en una tabla de tiempo-frecuencia.

La TFTC consiste en multiplicar la función $f(t)$ por la función de ventana $w(t)$ de ancho L y centrada en $t=t_0$. Así se calcula los coeficientes de Fourier del producto $f(t)w(t)$, los cuales indican el contenido espectral de la señal en el tiempo $t=t_0$. Este procedimiento se repite desplazando la ventana por un lapso de tiempo τ , a todo lo largo de la señal; entonces $w(t)$ se reemplaza por $w(t-\tau)$. Con la discretización de los parámetros de corrimiento τ y frecuencia ω en las formas $\tau=nt_0$ y $\omega=m\omega_0$ se tiene la forma discreta de la *TFTC*:

$$TFTC_{(m\omega_0, nt_0)} = \sum_{t=nt_0-L/2}^{nt_0+L/2} f(t)w(t-nt_0)e^{-im\omega_0 t}, \quad (25)$$

donde $\omega_0 = 2\pi/N\Delta t$, $0 \leq nt_0 \leq N-1$, t_0 es el centro de la ventana y n es un entero mayor que cero.

La TFCT podría aplicarse para obtener una descripción de la variación de la energía, simultáneamente en el tiempo y la frecuencia. Sin embargo, trabajos realizados por Chakraborty y Okaya (1995) demuestran que esta transformada tiene limitaciones de resolución, puesto que la elección de un L angosto ubica muy bien las características impulsivas de corta duración pero no puede resolver los eventos de baja frecuencia contenidos en la misma señal. Por otro lado si se trata de resolver estos últimos, se toma un mayor ancho de ventana para obtener una adecuada resolución, pero se descuidaría los eventos de altas frecuencias. Los autores citados recomiendan utilizar análisis de multiresolución, descomposición por paquetes de ondículas, Transformada Ondicular, u otros procesos que utilizan ventanas de anchura variable, lo cual produce pocas limitaciones de resolución.

A.2 Transformada de Gabor

La Transformada de Gabor posee muy buena eficiencia en lo que se refiere a límites de resolución en el plano tiempo-frecuencia, debido a que utiliza la función gaussiana en el dominio del tiempo para crear ventanas sobre la señal $f(t)$. La Transformada de Gabor descompone una señal mediante el empleo de un conjunto de funciones base, el cual es

generado y caracterizado por los parámetros de escalamiento α , traslación τ y modulación ξ de la forma

$$\Psi_{(\alpha, \xi, \tau)}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \Psi(t - \tau) \exp(i \xi t) \quad (26)$$

donde la función $\Psi(t)$ se sustituye por la función Gaussiana

$$\gamma(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right), \quad (27)$$

que tiene la propiedad de ser su propia Transformada de Fourier. La Transformada de Fourier del producto $f(t) \psi_{(\alpha, \xi, \tau)}(t)$ provoca la descomposición de la señal $f(t)$ en el plano tiempo-frecuencia. Gabor (1946) describe a detalle esta técnica en su trabajo sobre aplicaciones sísmicas. En el problema de detección de fases sísmicas se trabaja con señales que frecuentemente tienen carácter impulsivo, por lo que la aplicación de una descomposición armónica basada en el empleo de ventanas movibles en el tiempo, aún con forma gaussiana, como es el caso de la Transformada de Gabor, redundante en un oscurecimiento de ese carácter impulsivo, lo que dificulta la identificación precisa de una fase sísmica.

A.3 Análisis de Multi-Resolución (AMR)

El estudio de las bases ortonormales de ondículas compactas y de duración finita dió origen al Análisis de Multi-Resolución (AMR). El concepto de AMR, iniciado por Meyer y Mallat (1989), provee un marco de resolución para el entendimiento de la distribución de las bases ortonormales en el espacio de Hilbert $L^2(\mathbf{R})$. Desde el punto de vista de la

discretización del kernel se describirá brevemente el AMR y su relación con las funciones de ondícula y escalamiento, para el valor de $a_0=2$ contenido en la ecuación (10) del capítulo II. Otras discusiones más detalladas del concepto AMR se encuentran en Strang (1989).

Se define un Análisis de Multi-Resolución del espacio de Hilbert como una secuencia de sub-espacios "anidados" contiguos V_j de $L^2(\mathbb{R})$, con $j \in \mathbb{Z}$, y con las siguientes propiedades:

- $V_j \subset V_{j+1}$
- $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$
- $f(t) \in V_0 \Leftrightarrow f(t+1) \in V_0$
- $\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j$ es densa en $L^2(\mathbb{R})$ y $\bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\}$
- Existe una función de escalamiento $\varphi \in V_0$, con una integral desvaneciente, tal que el conjunto $\{\varphi(t-k) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ es llamado una base de Riesz de V_0 .

Para discutir la relación del AMR y la función de ondícula ψ se establece W_{j+1} para denotar un espacio llamado complemento de V_{j+1} en el espacio V_j , donde se satisface

- $V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}$

Lo anterior significa que cada elemento en el espacio V_j puede ser representado mediante la suma directa de dos elementos V_{j+1} y W_{j+1} . El espacio W es el espacio de interacción de la función de ondícula, mientras que el espacio V representa la interacción de la función de escalamiento. El espacio W_{j+1} contiene la información de detalle que se necesita para ir de una generalidad en la resolución $j+1$ a una mejor generalidad en resolución j . Como consecuencia de lo anterior se tiene

- $\bigoplus_j W_j = L^2(\mathbb{R})$
- Existe una función ψ llamada ondícula si existe una colección de funciones $\{\psi(t-k) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ que son una base de Riesz en el espacio W_0 y/o $L^2(\mathbb{R})$.

Una idea más clara de los espacios V y W donde actúan las funciones de escalamiento y ondícula se ilustra en la figura 53, que muestra la descomposición del espacio V_0 en la secuencia de subespacios V_j y sus subespacios complemento W_j .

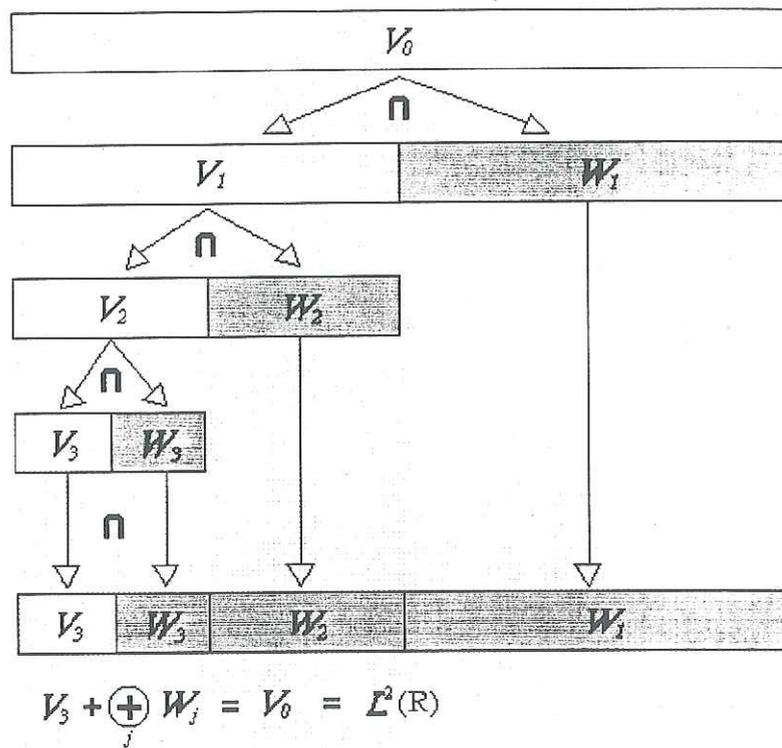


Figura 53. Esquema que ilustra los subespacios de interacción de las funciones de escalamiento y ondícula, así como algunas propiedades del AMR.

Apéndice B

En este apéndice se muestra algunos de los múltiples ejercicios realizados para optimizar los resultados de la identificación automática de los tiempos de arribo de las fases P y S. Los ejercicios se ilustran con las gráficas de residuales obtenidos al aplicar diferentes criterios de selección de los tiempos candidatos a primer arribo, figuras 54 a 57. Las gráficas se muestran a tres diferentes escalas para observar el amplio rango de error, desde los tiempos muy diparados hasta tiempos calculados con error marginal. Las cuatro columnas de gráficas corresponden a los cuatro criterios que se probó para la selección del tiempo de arribo definitivo, a partir de los tiempos determinados por las cuatro ondículas, el orden es: columna 1, tiempo con la mayor frecuencia de ocurrencia; columna 2, tiempo menor; columna 3, tiempo correspondiente a la máxima amplitud de coeficientes ondiculares; columna 4, tiempo promedio de todas las ondículas.

Como se describió en el capítulo V, el procedimiento de identificación automática de fase P, se basa en la búsqueda de *PCDC* en los diferentes niveles o escalas proporcionados por TO. Se logra aislar los coeficientes más altos a través de cortes sucesivos, estableciendo los umbrales de corte como un número de veces la desviación estándar de los coeficientes, desde 0.2 hasta 3 veces; es decir, 15 umbrales de corte.

Ejercicio B1

Para cada filtro se emplea 8 umbrales, entre 1.6 y 3σ . La tabla de frecuencias de ocurrencia para elegir el tiempo de arribo, se formó con un intervalo de grupo de $DT = 0.2$ s, se escogió de las primeras cuatro escalas el *PCDC*, o sea, se contó con 32 elementos de tiempo para formar el histograma. Los residuales se muestran en la figura 54.

Ejercicio B2

Este ejercicio es practicamente igual al B1, con la diferencia de que aqui se usaron los 15 umbrales propuestos, es decir hubo 60 elementos de tiempo para formar el histograma. Los residuales se muestran en la figura 55.

Ejercicio B3

A diferencia de B2, en esta prueba se usa los 15 umbrales propuestos, pero escogiendo, de las cuatro primeras escalas, el tiempo de aquel *PCDC* que posee la amplitud máxima es decir solamente 15 elementos de tiempo para formar el histograma. Los residuales se muestran en la figura 56.

Ejercicio B4

Igual que B3, con $DT = 0.2s$. Se tomó de las primeras cuatro escalas los tiempos de los *PCDC* con amplitud máxima, pero solamente a partir de los últimos ocho umbrales. El histograma se forma a partir del grupo de 8 elementos de tiempo. En la gráfica de residuales (figura 57) se puede ver un considerable número de puntos disparados y fuera del límite de error aceptado, como consecuencia de la poca información recabada para formar el histograma.

Estos son los ejercicios más representativos, a partir de los cuales se eligió los criterios y parámetros a emplear en la determinación automática del tiempo de arribo de la fase P. También se determinó mediante ejercicios el intervalo de agrupamiento de tiempos para formar el histograma de ocurrencias, se probó anchos $DT = 0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4 s, y se determinó que el ancho óptimo es $DT=0.2$ s.

En esta serie de pruebas, el ejercicio B2 es el que representa la mejor estimación de arribos de P, aún cuando presenta varios tiempos con residuales grandes. Para mejorar el procedimiento, se probó dos algoritmos adicionales: 1) la exclusión de los tiempos excéntricos en el cómputo de los tiempos promedio y en la elección del tiempo menor (capítulo V.2.1); 2) la determinación del rango de umbrales de truncamiento a partir de una prueba de ruido, consistente en la estimación de cocientes de promedios de amplitud entre dos ventanas: una situada al inicio del sismograma y otra centrada en la amplitud máxima. El resultado de aplicar estos algoritmos se muestra en la figura 39, donde solamente se

observa un residual disparado, correspondiente al evento No. 74 (E1530640), el cual es extremadamente ruidoso y se muestra en la figura 58.

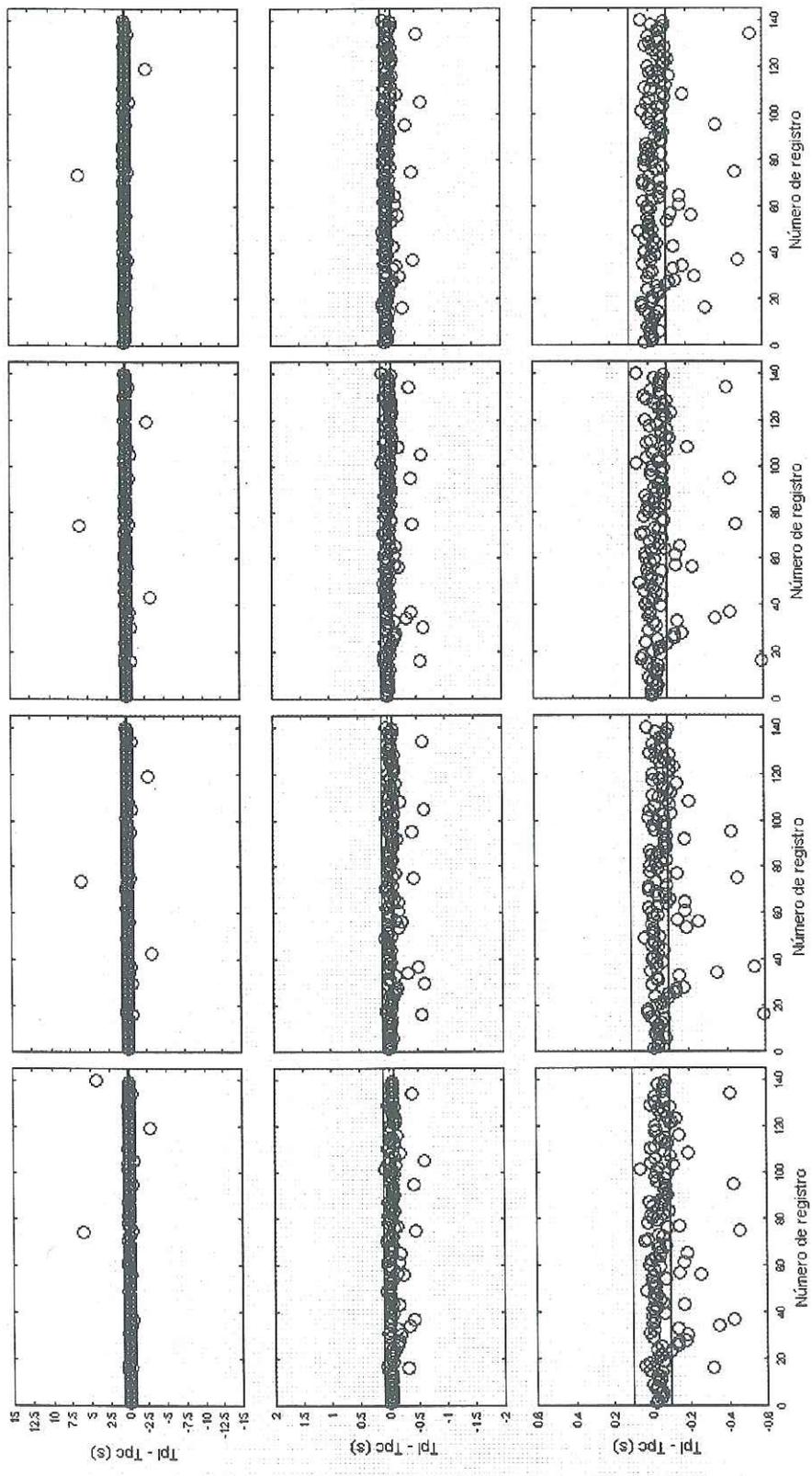


Figura 54. Ejercicio B1.

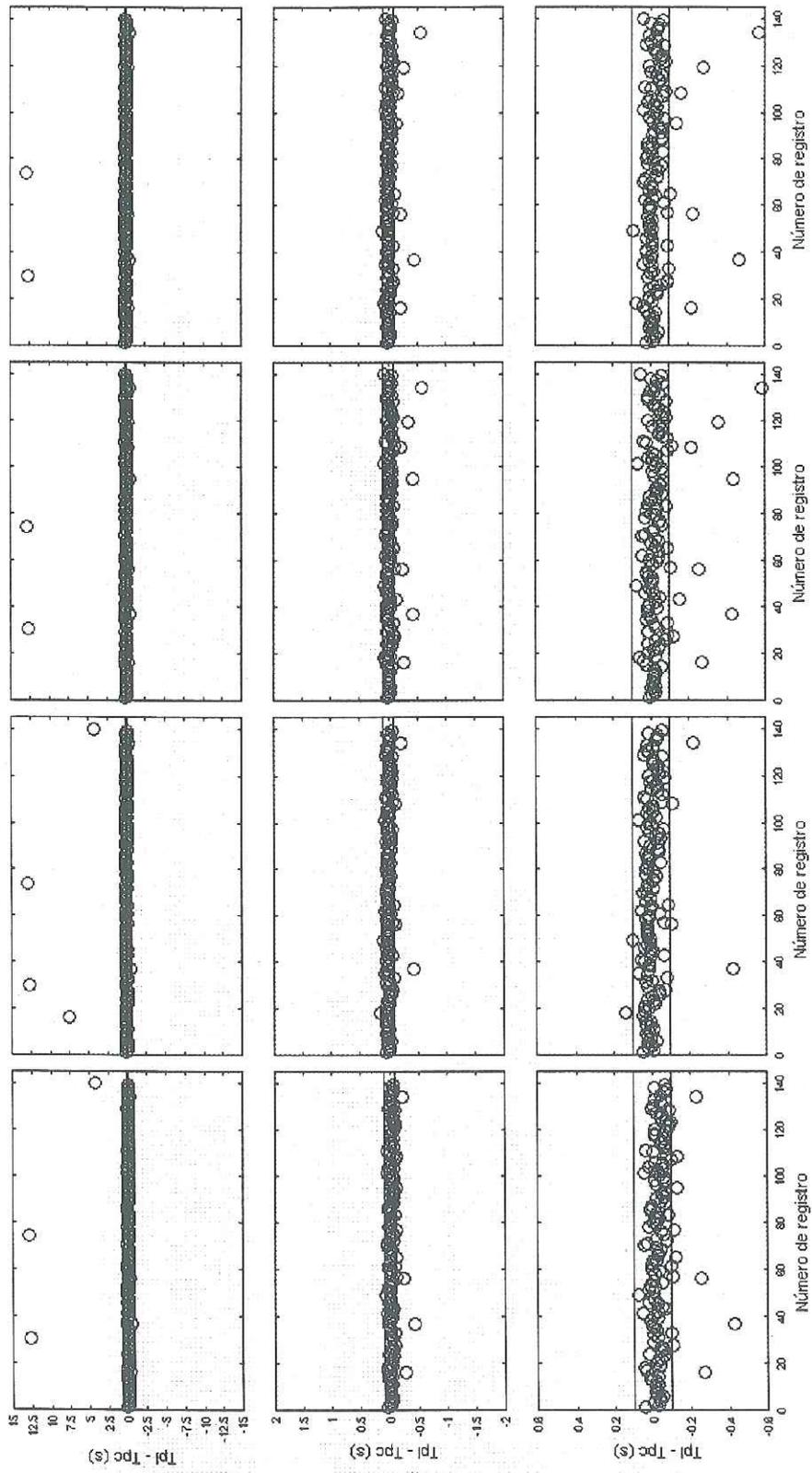


Figura 55. Ejercicio B2.

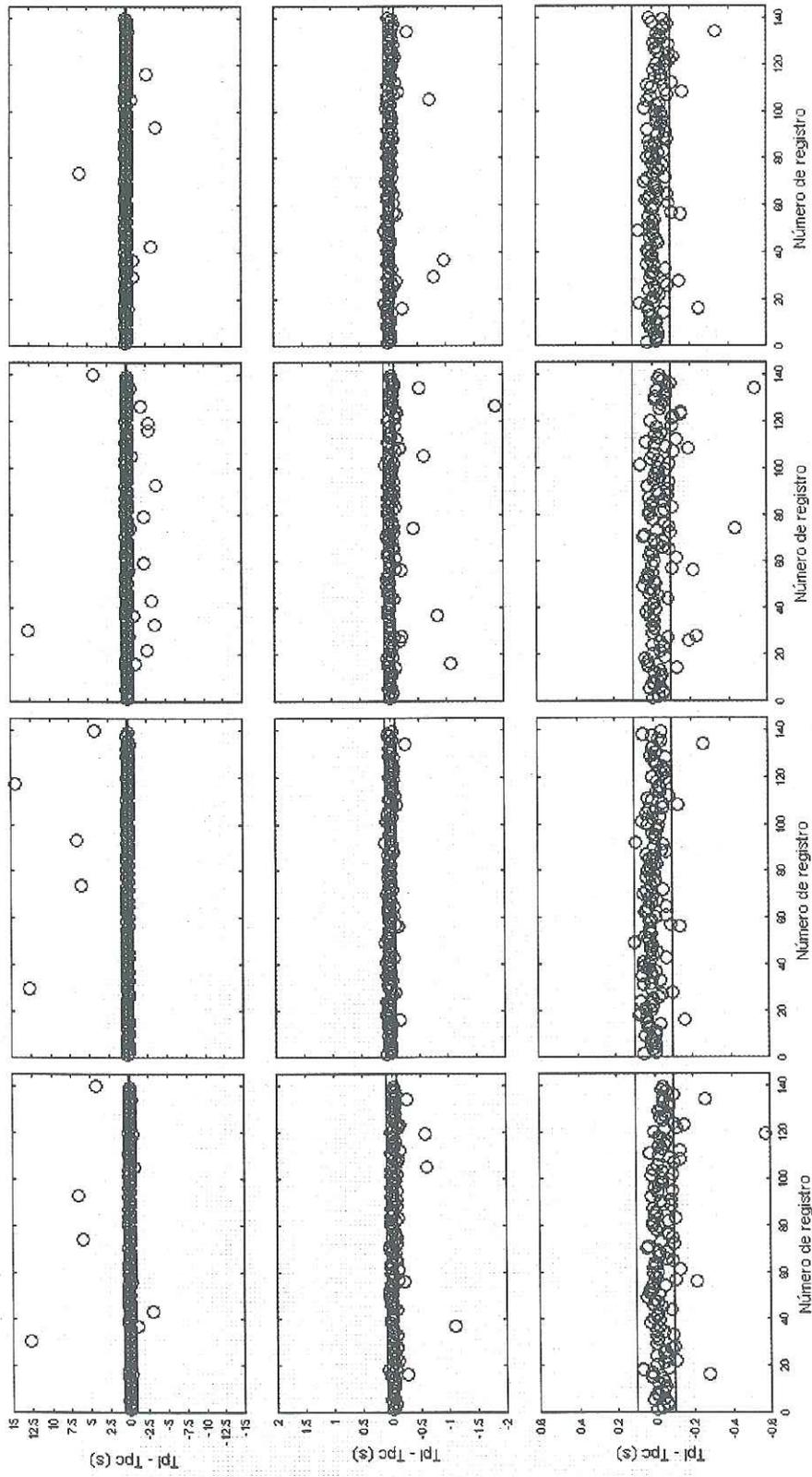


Figura 56. Ejercicio B3.

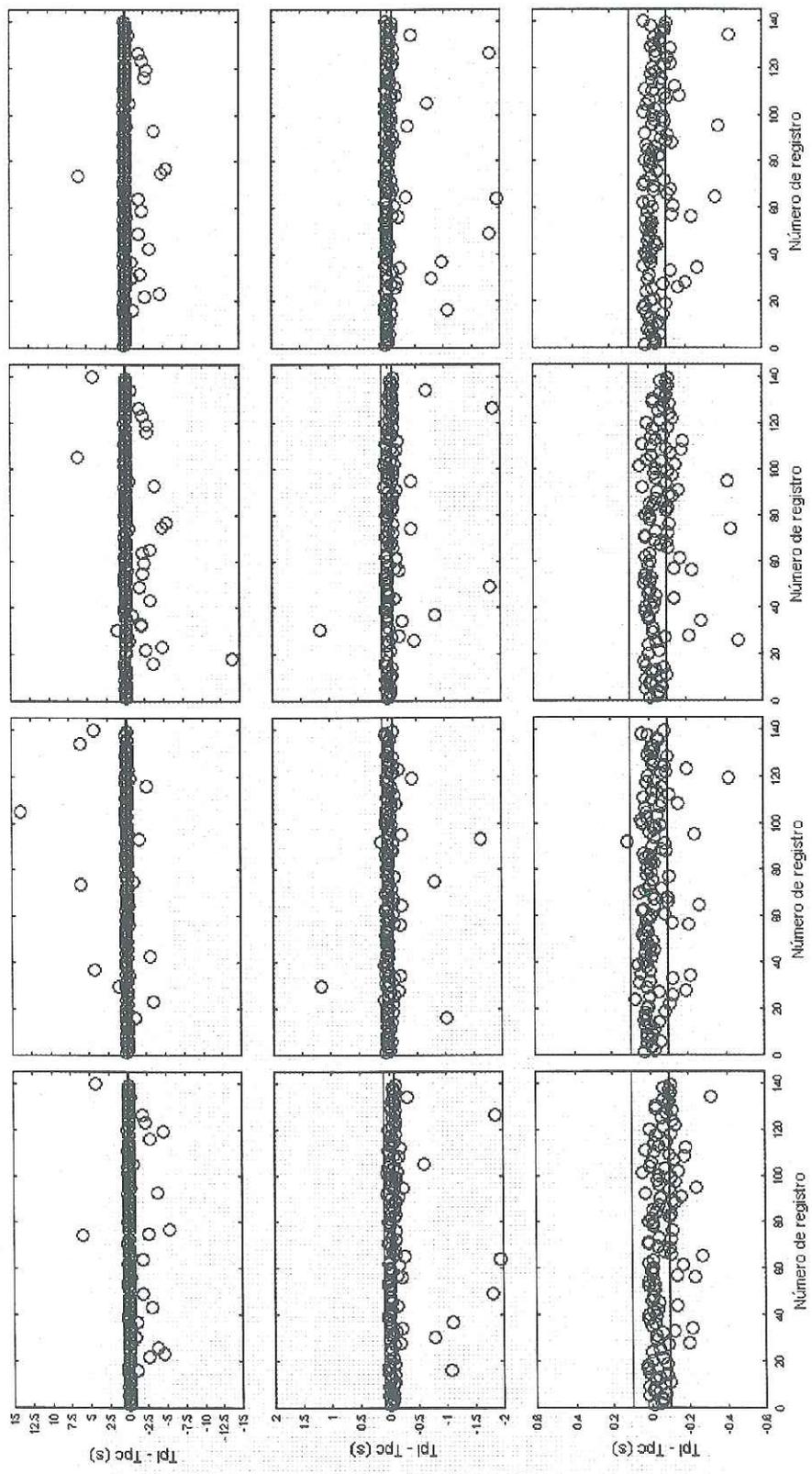


Figura 57 Ejercicio B4.

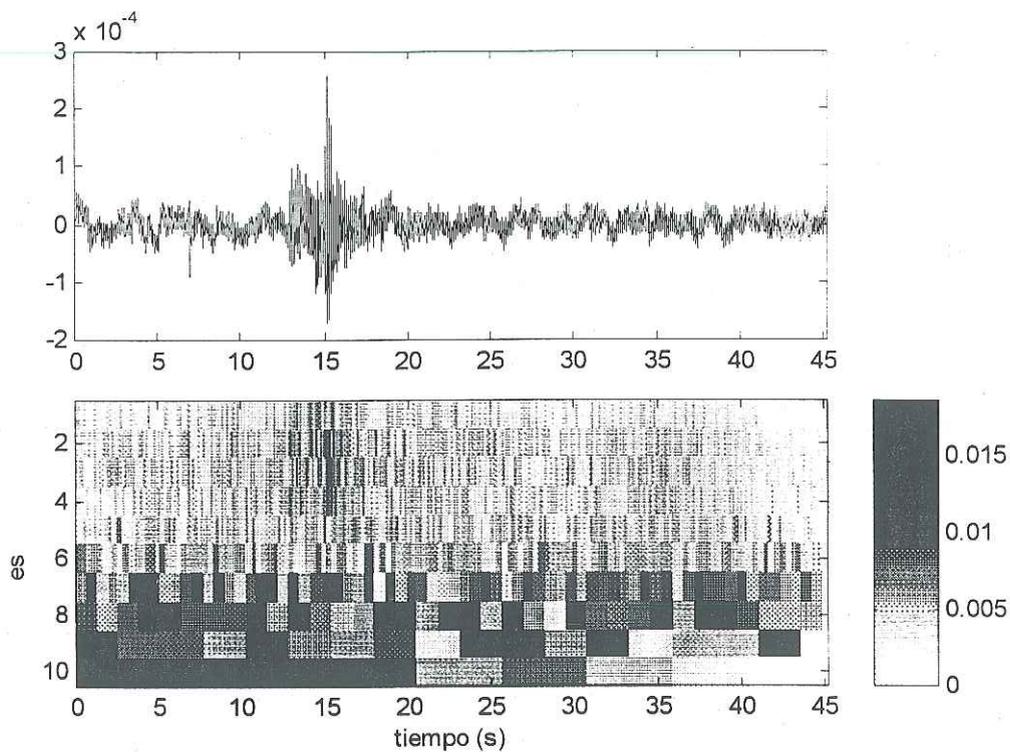


Figura 58. Componente vertical del evento E1530640 y los coeficientes ondulares en el plano tiempo-escala. Ejemplo extremadamente ruidoso, donde no se puede apreciar alineamiento de coeficientes para posicionar el arribo P.

Para la determinación del tiempo de arribo de la fase S se realizó una gran cantidad de ejercicios, para los cuales se aplicó distintos criterios de selección de ventanas (como la de la figura 43) para aislar los coeficientes y determinar la estadística de los mismos, como se describe en V.2.2. Se llevó a cabo ejercicios aplicando las condiciones de búsqueda que aquí se describen:

Ejercicio B5

La tabla de los *PCDC* se fabrica a partir de las primeras cuatro escalas y descartando aquellos *PCDC* posicionados antes de $1.1 * T_{pc}$, siendo T_{pc} el tiempo calculado para la fase P, luego se escoge el valor del *PCDC* de mayor amplitud. Sólo se utilizó los tiempos correspondientes a los umbrales desde 2.2σ hasta 4σ . Así es que se cuenta para este ejercicio con 20 elementos de tiempo para evaluar el arribo S.

Ejercicio B6

Casi de la misma forma que en el ejemplo anterior, pero con la diferencia de descartar aquellos *PCDC* que están posicionados antes del tiempo $1.1 * T_{pc} + Li$, con $Li = 0.75 * |T_{max} - 1.1 * T_{pc}|$, siendo T_{max} el tiempo correspondiente al coeficiente de mayor amplitud. Tomando en cuenta que este valor de mayor amplitud es buscado a partir de $1.1 * T_{pc}$, con el fin de evitar los posibles maximos representados por una fase P.

* Ejercicios complementarios de B6

- Para este ejercicio se utilizó $Li = 0.6 * |T_{max} - 1.1 * T_{pc}|$.
- Para este ejercicio se utilizó $Li = 0.5 * |T_{max} - 1.1 * T_{pc}|$.
- Se realizó otros ejercicios aplicando diferentes definiciones de Li , como por ejemplo $Li = k * |T_{max} - T_{pc}|$, con $k = 0.5, 0.6$ y 0.75 .
- En otros ejercicios se tomó el tiempo para descartar $PCDC$ en:
 $0.9 T_{max}, T_{max}-0.5, T_{max}-1.0, T_{max}-1.5, T_{pc} + 0.5, T_{pc} + 1.0$. También se incluyó la variante de tomar 15 umbrales para cada componente, desde 2.2σ hasta 5σ .

Ejercicio B7

También se calculó la resultante vectorial de los coeficientes y los $PCDC$ fueron buscados dentro de ella:

$$C_j^R(k) = \sqrt{C_j^{NS}(k)^2 + C_j^{EO}(k)^2}$$

donde $C_j^{NS}(k)$ y $C_j^{EO}(k)$ son los k -ésimos coeficientes perteneciente a la escala j , de las componente Norte-Sur y Este-Oeste. El tiempo para descartar información no deseada es $T_p + Li$ con $Li = 0.6 * |T_{max} - T_{pc}|$.

Se efectuó alrededor de veinte pruebas con diferentes longitudes y posicionamientos de ventanas de búsqueda de los $PCDC$. El procedimiento que obtiene los residuales menos dispersos ha sido descrito en V.2.2.

En todas las figuras que siguen, el orden de los criterios de prueba es el siguiente:
columna 1: tiempo de máxima frecuencia, columna 2: tiempo mayor, columna 3: tiempo de
máxima amplitud, columna 4: tiempo promedio de las cuatro ondículas.

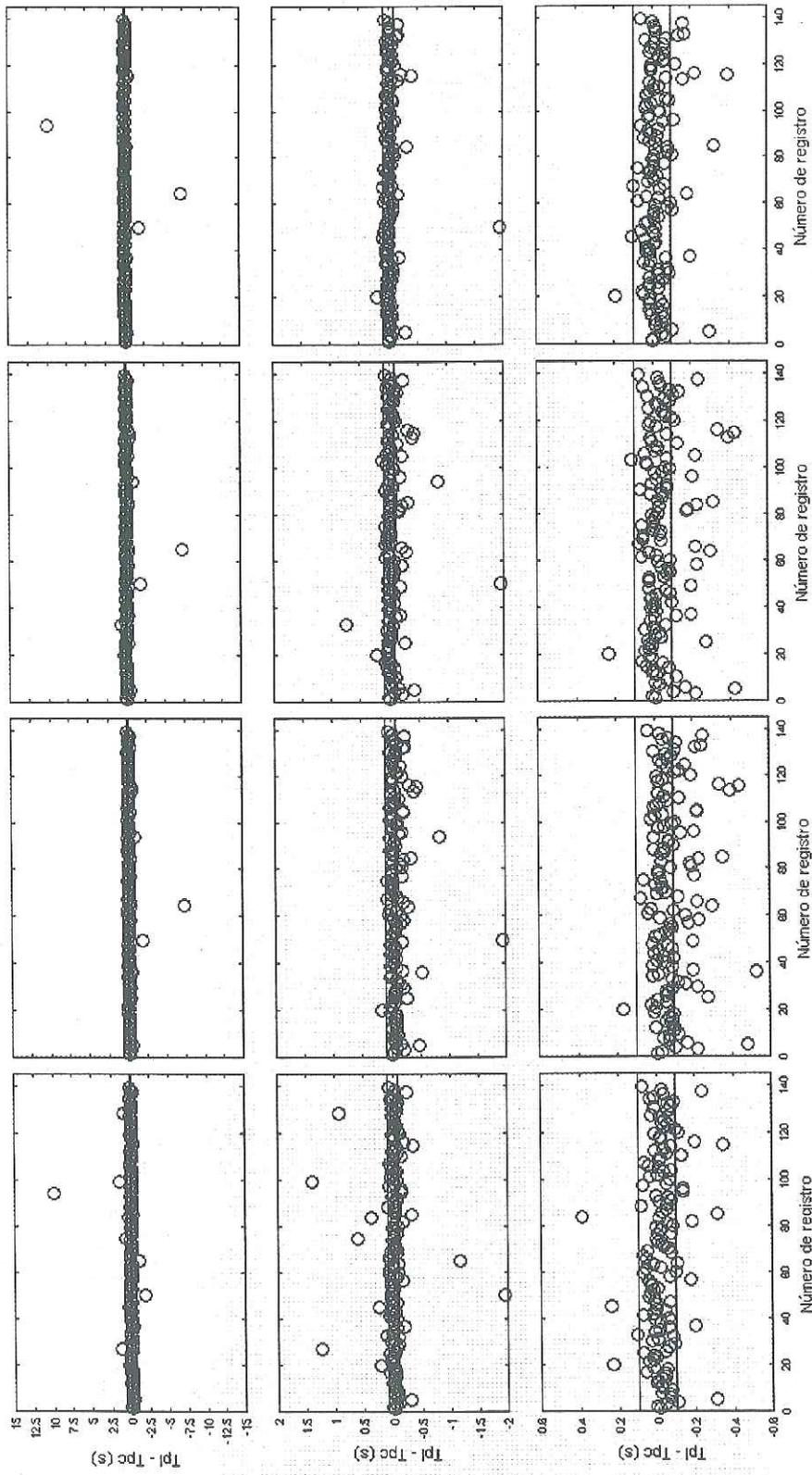


Figura 59. Ejercicio B5.

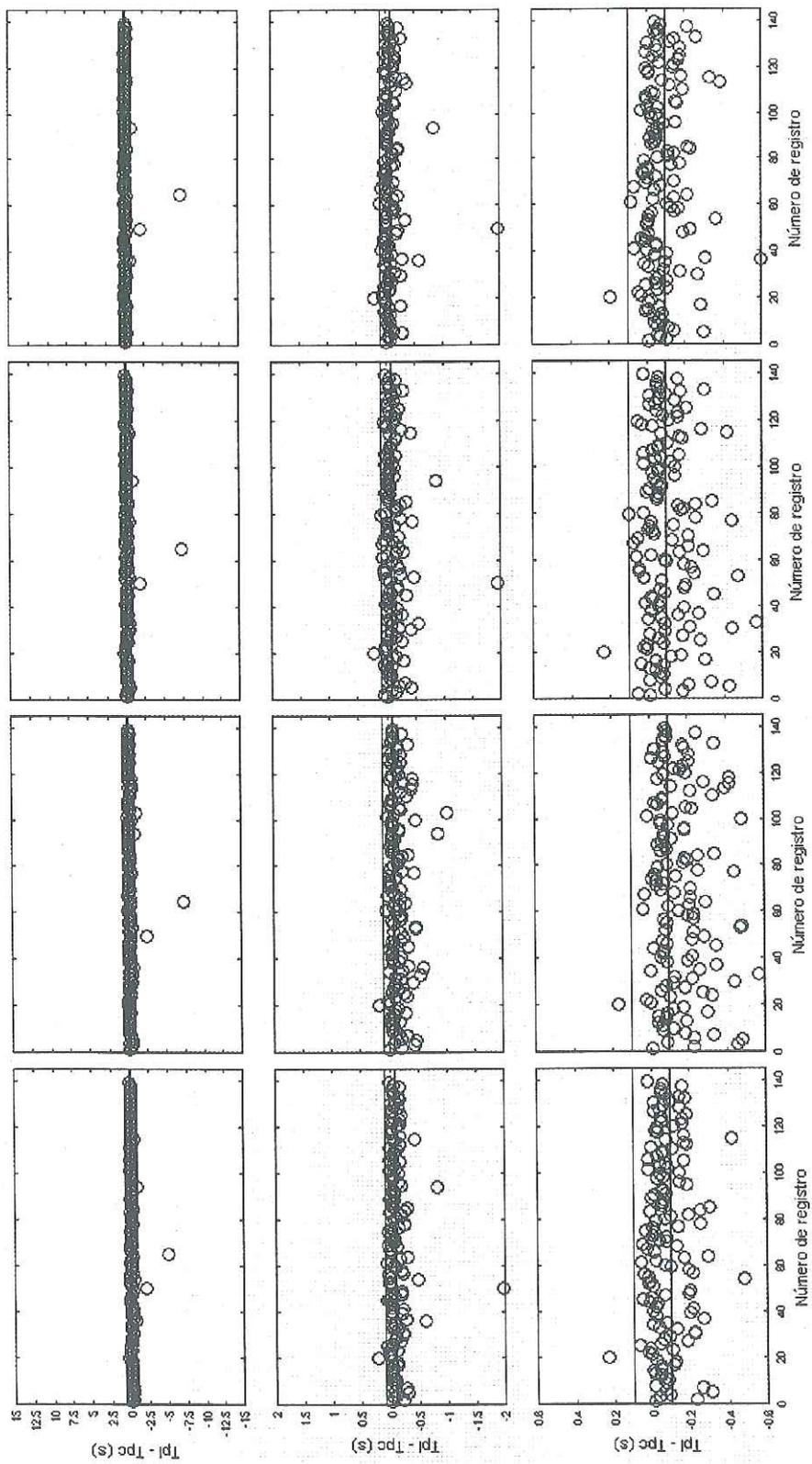


Figura 60. Ejercicio B6.

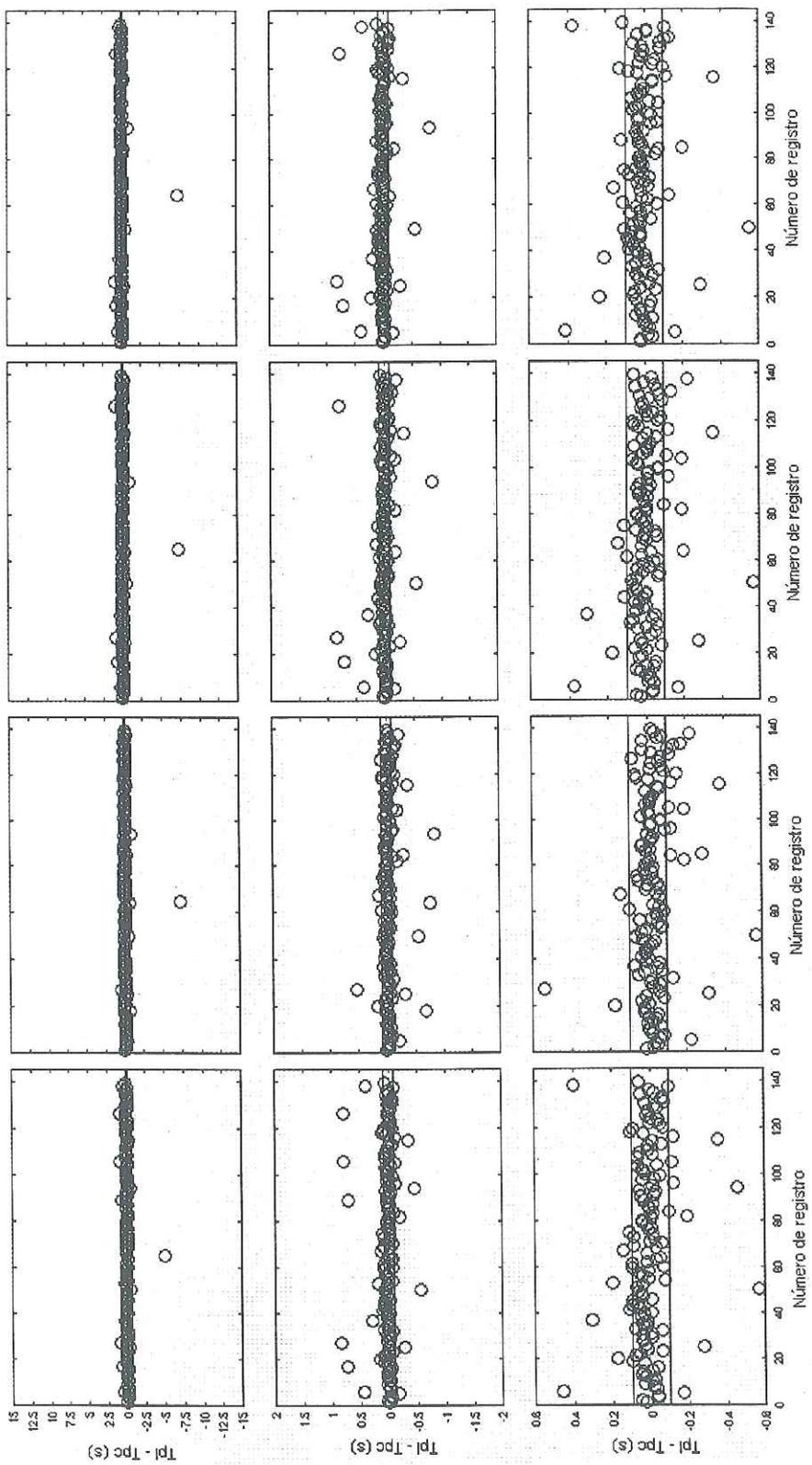


Figura 61. Ejercicio B7.

Apéndice C

C.1 Tiempos de arribo leídos

Todos los tiempos de arribo calculados con la metodología desarrollada en esta tesis fueron comparados con los correspondientes tiempos leídos por cuatro diferentes expertos en lectura de sismogramas. Ninguno de los lectors tuvo conocimiento de los tiempos calculados. Una de las personas, investigador en Sismología, leyó los mismos sismogramas en dos ocasiones, con seis meses de separación entre ambas lecturas. Los otros tres lectors son: un técnico del Departamento de Sismología, con 20 años de experiencia en lectura de sismogramas; un técnico del mismo departamento, con 10 años de experiencia; un estudiante del posgrado de Sismología.

Todos los lectors emplearon un programa de despliegue gráfico en pantalla de PC-compatible, con capacidad de agrandamiento de la gráfica, hasta alcanzar una resolución igual al intervalo de muestreo de los datos (0.005 s). Los tiempos fueron escogidos con el empleo de cursores gráficos sobre los tres canales de datos (dos horizontales y uno vertical).

Se calculó la variación de las lecturas respecto al conjunto de tiempos leídos por el investigador (lectorista de referencia) en la primera ocasión:

$$E_i(j) = T_o(j) - T_i(j),$$

donde $T_0(j)$ es el tiempo del sismograma j , leído por el lectorista de referencia; $T_i(j)$ es el tiempo del sismograma j , leído por el lectorista i ; $E_i(j)$ es la variación en el tiempo del sismograma j , leído por el lectorista i .

La figura 62 muestra los valores de la variación $E_i(j)$, para los cuatro lectoristas, en el caso de la onda P. La figura 63 es la gráfica de la variación en los tiempos leídos, para la onda S.

Además de la lectura de los tiempos de arribo de P y S, se pidió a los lectoristas que formasen un catálogo con las formas de onda que adquieren los primeros arribos de la onda P. Los lectoristas tendieron a incluir en el catálogo las formas de arribo más simples que pudieron encontrar, seguramente desechando formas complicadas o ruidosas. La mayoría de las formas contenidas en el catálogo (aproximadamente 1/3 de los sismogramas) pudo agruparse en cuatro formas simples, que se muestran en la figura 64. Para cada uno de los cuatro grupos de formas simples se buscó un filtro de ondícula cuya forma, desde el primer coeficiente, reprodujera adecuadamente la forma del arribo. En la parte superior de la figura 64 se muestran los filtros elegidos. El autor considera que el catálogo en que se basó para seleccionar los filtros de ondícula que se aplicaron en el procedimiento de detección automática de P y S no es necesariamente exhaustivo; sin embargo, el alcance de esta tesis no permitió analizar otras bases de datos que permitiesen identificar otras formas de arribos.

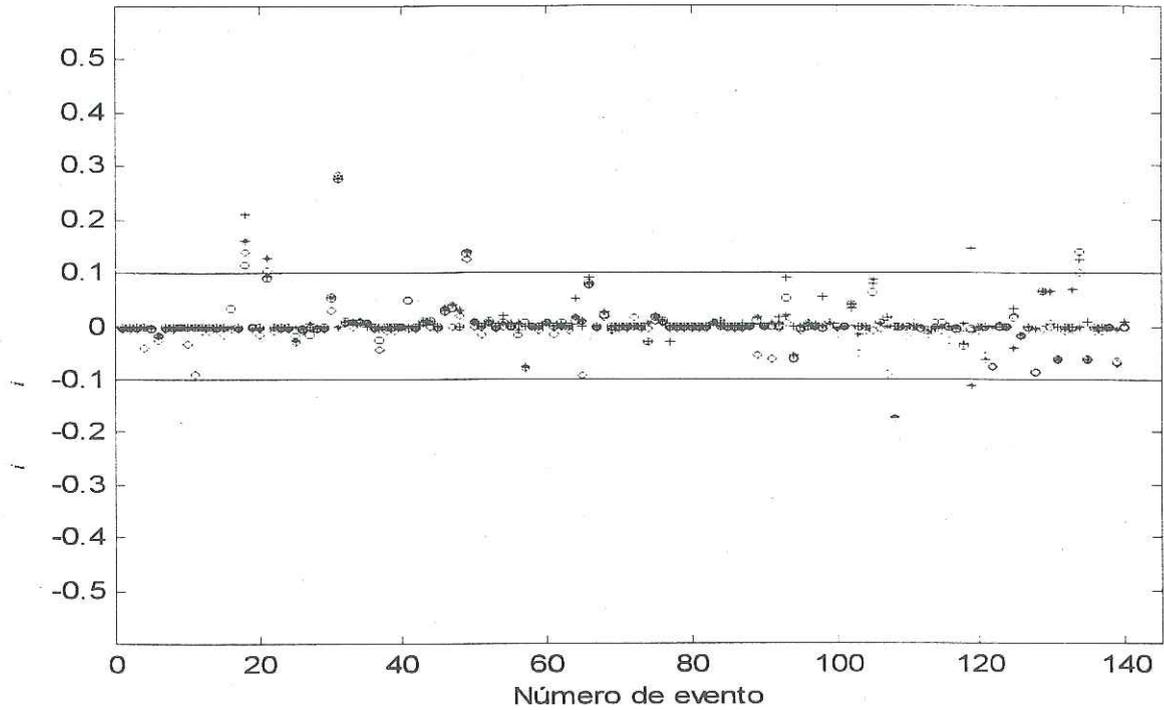


Figura 62. Gráfica de la variación en los tiempos leídos por cuatro lectores de sismogramas, respecto a un lectorista de referencia. Onda P, 140 sismogramas.

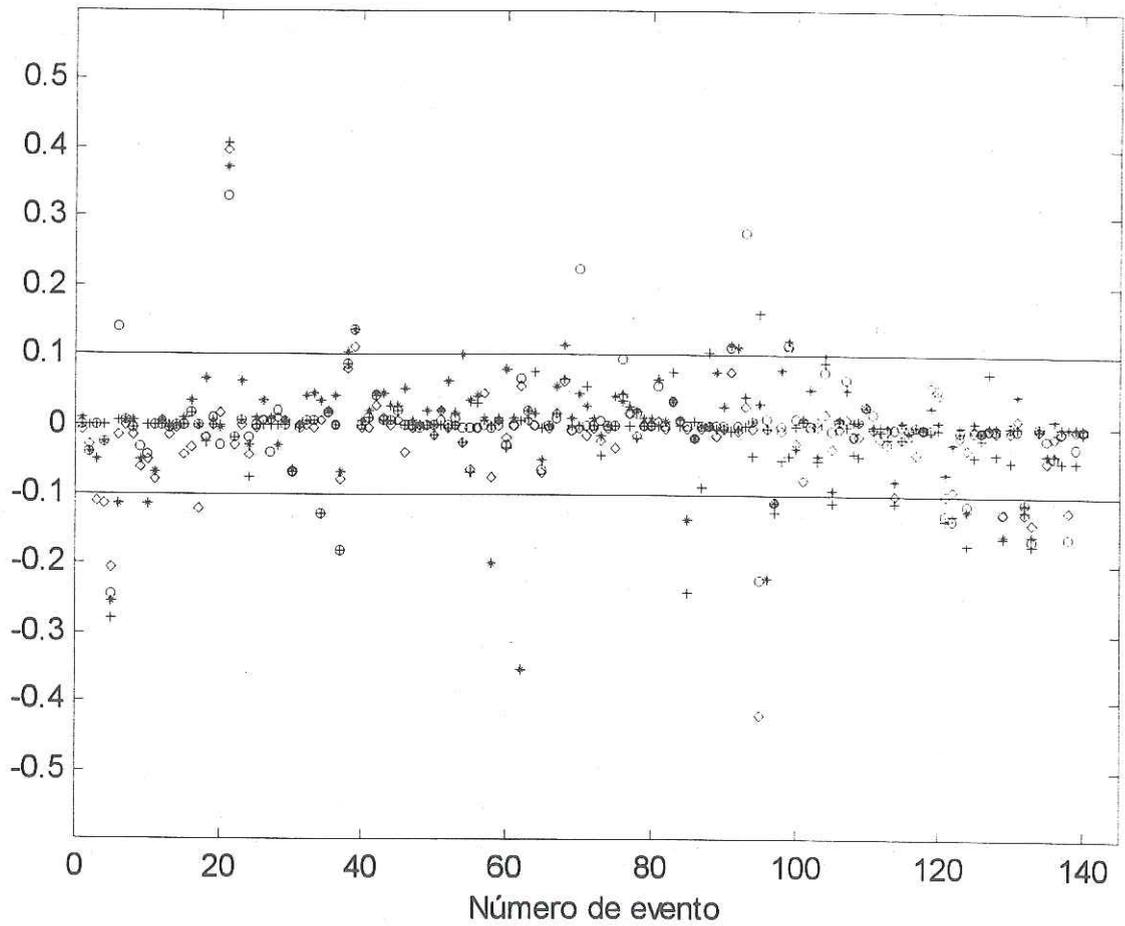


Figura 63. Gráfica de la variación en los tiempos leídos por cuatro lectores de sismogramas, respecto a un lectorista de referencia. Onda S, 140 sismogramas.

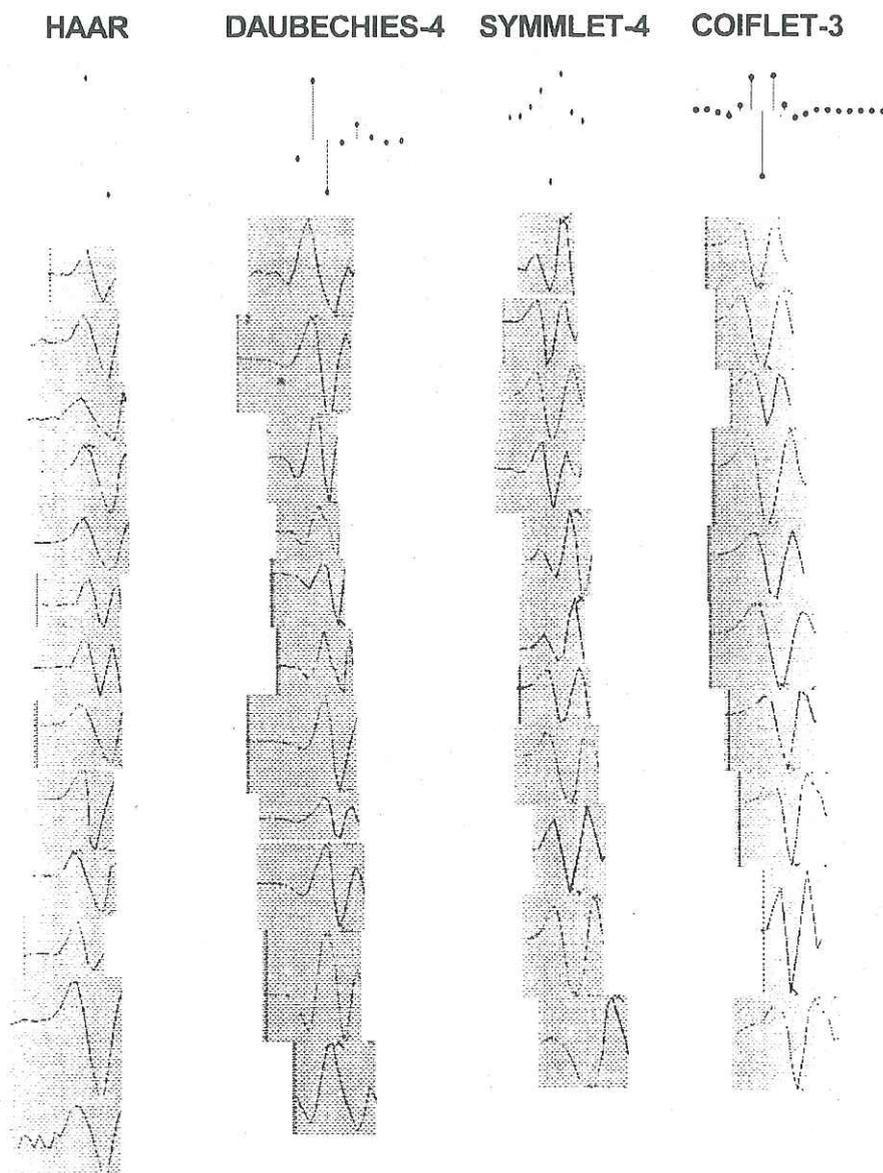


Figura 64. Agrupamiento de las formas de arriba más abundantes en el catálogo elaborado por los lectoristas de sismogramas. En la parte superior se muestran los filtros de ondícula seleccionados.

