

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**Departamento de Geofísica y Meteorología**



**MÉTODOS PARA LA INVERSIÓN DEL TENSOR MOMENTO  
SÍSMICO . TERREMOTOS DEL SUR DE ESPAÑA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR**

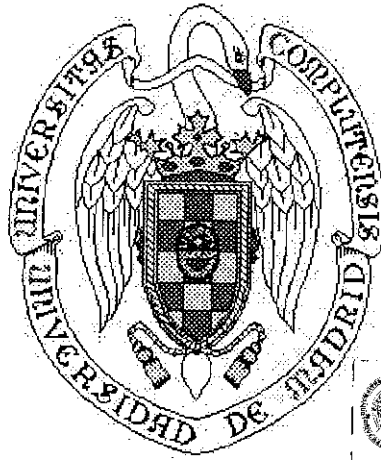
María Pilar Coca Llanos

Bajo la dirección de la doctora

Elisa Buforn Peiró

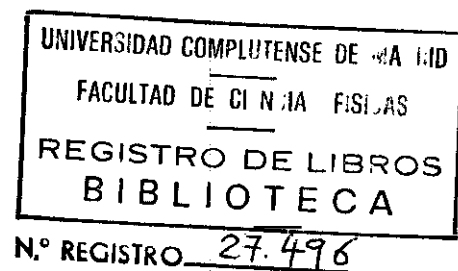
**Madrid, 2003**

TI 1999/24



**Departamento de Geofísica y Meteorología  
Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense de Madrid  
Madrid 1999**

**Métodos para la inversión del tensor momento  
sísmico. Terremotos del Sur de España**



**Memoria presentada por  
D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup> Pilar Coca Llanos  
para optar al grado de Doctor en Ciencia Físicas  
directora de la Tesis  
Dra. D<sup>a</sup>. Elisa Buforn Peiró**

*A quien conmigo camina*

## **Agradecimientos**

Quisiera reflejar en estas líneas mi profundo agradecimiento a todas las personas que de alguna forma han contribuido a que este trabajo llegue a su fin.

En primer lugar agradecer a mi directora de tesis Dra. Elisa Buforn, el tiempo y esfuerzo dedicado, para que llegara este momento, sin su continuo apoyo y aliento esto hubiera sido imposible.

Agradecer también al profesor Udías que me dejara trabajar durante tanto tiempo en el departamento, y sus comentarios precisos en la memoria final.

Al profesor Raúl Madariaga por haberme aceptado durante tres meses en el Instituto de Física del Globo de París, no debió parecerle muy mal mi presencia, pues me invitó un mes más.

A mis compañeros de departamento con quien compartí tantas horas, en especial a Antonio, Beatriz, Carmen, Jhonny, Mourad, Mario.

Al Ministerio de Educación y Ciencia por concederme la beca de FPI que me permitió iniciar este trabajo, y a la CICYT a través del proyecto AMB97-0975-C02.

A mi familia que siempre ha estado ahí, dándome su continuo apoyo, y siempre ha pensado que la loca de la casa era una trabajadora nata que conseguiría acabar el trabajo.

Por último, agradecer a Javier toda su ayuda a lo largo del desarrollo del trabajo y en especial durante los últimos meses cuando el trabajo se volvió más duro, y mi carácter empeoró considerablemente, gracias a él conseguí terminar. Gracias Javier por lo que me has dado y lo que nos queda por vivir.

# ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Problema directo</b> .....	<b>5</b>
1.1. Representación de la fuente sísmica: fuerzas equivalentes	
1.2. Desplazamientos de la onda P	
1.3. Correcciones	
<b>Capítulo 2. Problema inverso:     obtención de las componentes del tensor momento sísmico</b> .....	<b>23</b>
2.1. Inversa generalizada de Lanczös	
2.2. Matriz de resolución, densidad de información, covarianza y correlación	
2.3. Cálculo del patrón de radiación y función temporal	
2.3.1. Descomposición del tensor momento sísmico	
2.3.2. Errores en las magnitudes calculadas	
2.4. Representación del tensor momento sísmico	
2.5. Descripción del algoritmo desarrollado	
<b>Capítulo 3. Aplicación del método a casos teóricos</b> .....	<b>41</b>
3.1. Análisis de los casos teóricos	
3.2. Inversión de sismogramas sintéticos	
3.2.1. Mecanismo focal de desgarre. CLVD=0%	
3.2.2. Mecanismo focal de desgarre. CLVD=14%	
3.2.3. Mecanismo focal de desgarre. CLVD=34%	
3.2.4. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD=0%	
3.2.5. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD=15%	
3.2.6. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD=35%	
3.2.7. Mecanismo focal vertical. CLVD=0%	
3.2.8. Mecanismo focal vertical. CLVD=14%	
3.2.9. Mecanismo focal vertical. CLVD=33%	
3.3. Conclusiones	
<b>Capítulo 4. Aplicación a terremotos del sur de España</b> .....	<b>139</b>
Málaga, 27-Marzo-1987	
Málaga, 19-Julio-1989	
Málaga, 6-Febrero-1990	
Málaga, 14-Marzo-1992	
Granada, 8-Marzo-1990	
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	<b>203</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>209</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>213</b>
<b>Anexo 2</b> .....	<b>241</b>

## Introducción

El estudio de la fuente sísmica corresponde a un problema inverso en Sismología: a partir de los desplazamientos del suelo registrados en las estaciones sísmicas, hay que calcular los parámetros que definen la fuente sísmica de un terremoto. El principal problema que se plantea es aislar en los registros sísmicos, los efectos de la fuente de los efectos de la propagación, lo cual supone conocer la estructura de la Tierra recorrida por las ondas sísmicas.

Para realizar dicho estudio, se utilizan diversas simplificaciones con el fin de desarrollar la teoría matemática adecuada al problema inverso planteado. Estas simplificaciones están relacionadas con el modelo de Tierra supuesto y con las dimensiones del foco sísmico. El modelo de Tierra más sencillo, es suponer ésta como un medio elástico, homogéneo e isótropo. El foco sísmico se suele aproximar a un punto en el cual actúan las fuerzas generadoras del terremoto, aproximación de fuente puntual, válida si la longitud de onda de la señal utilizada es mayor que la dimensión del foco. Otra simplificación muy utilizada, es suponer que la distancia entre el observador y el foco es mucho mayor que las dimensiones del mismo (aproximación de campo lejano).

Una tercera simplificación muy utilizada, para evitar la triplicación de los rayos que tienen su punto de reflexión en el manto superior, es trabajar a distancias epicentrales mayores de  $30^\circ$ , y para evitar las ondas P que penetran en el núcleo interno, se utilizan distancias menores de  $90^\circ$ . A estas distancias telesísmicas, entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$ , la Tierra puede aproximarse a un medio elástico, homogéneo e isótropo y reducirlo a este modelo.

Si en lugar de trabajar con datos a distancias telesísmicas entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$ , lo hacemos con datos regionales, las distancias epicentrales varían entre 100 km.  $<\Delta < 1000$  km. En este caso el efecto del medio va a ser muy importante y no siempre conocido, por lo tanto no se puede hacer la simplificación de considerar la Tierra como un medio homogéneo, ya que las primeras llegadas corresponderán a distintas reflexiones y refracciones en la corteza. Una posible solución al problema de la propagación, es utilizar sólo las ondas directas (ondas que viajan directamente del foco al observador sin sufrir ningún tipo de reflexión), lo que simplifica los efectos de la estructura en las ondas sísmicas.

Una vez supuestas estas simplificaciones, se puede desarrollar la teoría matemática necesaria para solucionar el problema inverso, es decir, encontrar los parámetros que definen la fuente sísmica.

Los terremotos están generados por procesos físicos que tienen lugar en el foco sísmico. Un modelo utilizado para representar las fuerzas que actúan en el foco sísmico es el que se conoce como modelo de fuerzas equivalentes y reproduce los desplazamientos en la superficie terrestre, que son idénticos a los producidos por los procesos físicos que tiene lugar en la fuente sísmica. En este caso, el problema directo se reduce a encontrar el campo de desplazamientos producidos por las ondas sísmicas según este modelo teórico. Otra formulación consiste en expresar los desplazamientos producidos por un terremoto en la superficie terrestre, en términos del tensor momento sísmico (Gilbert, 1971).

El tensor momento sísmico es una representación de la fuente sísmica puntual muy general (sin tener que optar por un tipo determinado de ruptura) y ha sido utilizado para obtener el mecanismo focal de un terremoto fundamentalmente a partir de su inversión, tanto a partir de oscilaciones libres de la Tierra (Gilbert y Dziewonski, 1975), ondas internas de período largo (Strelitz, 1980; Sipkin, 1982), ondas superficiales (Dziewonski and Woodhouse, 1983; Sipkin, 1987; Sipkin and Needham, 1994) y ondas internas registradas a distancias regionales en banda ancha (Dreger and Helmberger, 1993; Mao et. al., 1994; Ichinose et al., 1998).

El objetivo del presente estudio es desarrollar un método de inversión que permita obtener las componentes del tensor momento sísmico y la función temporal de la fuente sísmica, mediante la inversión lineal de sismogramas registrados a distancias regionales. Para este fin se han utilizado algunas de las simplificaciones descritas anteriormente. Dicho método se ha aplicado terremotos del Sur de España de magnitud pequeña ( $3 < M < 5$ ), registrados por la Red Sísmica Nacional.

En el primer capítulo, se presenta el problema directo, un estudio del proceso físico que se produce en el foco de un terremoto: cálculo de los desplazamientos generados por el foco sísmico registrados en las estaciones. En él se presentan las diferentes simplificaciones que se deben introducir para obtener el modelo matemático que nos permite realizar dicho estudio para terremotos registrados a distancias regionales.

En el segundo capítulo, se describe el problema inverso: obtención de los parámetros focales que describen el proceso que se produce en el foco sísmico de un terremoto, mediante las componentes del tensor momento sísmico. Esto se realiza mediante la inversión lineal de los desplazamientos de la onda P directa registrada a distancias regionales, que permite obtener las componentes del tensor momento sísmico. Se incluye la descripción de las diferentes correcciones que deben realizarse en los sismogramas para poder obtener el tensor momento sísmico, y se describen los algoritmos desarrollados para realizar el estudio propuesto.

En el capítulo tercero, se comprueba el funcionamiento del método de inversión desarrollado aplicándolo a casos teóricos de profundidad intermedia registradas a distancias regionales, de los cuales se conoce previamente los datos hipocentrales que se desean obtener: mecanismo focal y la profundidad.

En el cuarto capítulo, se ha aplicado el método descrito en el capítulo dos y tres, a terremotos del Sur de España, de profundidad intermedia (50-100km.) ocurridos en la zona del mar de Alborán y a un terremoto profundo (637 km.) cuyo epicentro se localiza en la zona de Granada. Los datos utilizados son sismogramas digitales de velocidad de la onda P directa, registrados a distancias regionales ( $80 \text{ km} < \Delta < 500 \text{ km}$ ), proporcionados por la Red Sísmica Nacional (IGN). Tras la inversión se han obtenido para todos los terremotos: las componentes del tensor momento sísmico, la función temporal de la fuente sísmica. La profundidad ha permanecido fija durante todo el proceso de inversión. Para obtener la

profundidad del terremoto, se han realizado inversiones a distintas profundidades y se ha calculado el error cuadrático (rms, root mean square) entre los sismogramas observados y sismogramas sintéticos (construidos utilizando las componentes del tensor momento sísmico obtenidas y la función temporal calculada). La profundidad en la que se produce el mínimo de dicho rms corresponde a la profundidad del centroide del terremoto.

En el capítulo quinto, se describen las conclusiones obtenidas sobre el método desarrollado, a partir de la aplicación del mismo tanto a casos teóricos (resultados del capítulo tres) como a terremotos del Sur de España (resultados del capítulo cuatro).

En el Anexo 1, se muestran las superficies nodales de DC y CLVD obtenidas tras la inversión, para los casos teóricos estudiados en el capítulo 3.

En el Anexo 2, se muestran los ajustes entre sismogramas observados y sismogramas sintéticos para los terremotos del sur de España, estudiados en el capítulo 4.

## Capítulo 1

### Problema directo

El problema directo que se plantea en Geofísica al realizar un estudio del proceso físico que se produce en el foco de un terremoto, consiste en calcular los desplazamientos generados por un foco sísmico en las estaciones donde se registra el terremoto, conociendo las características de la fuente sísmica, las fuerzas que actúan en ella y el medio que recorren las ondas sísmicas. Para realizar dicho estudio se necesita hacer ciertas suposiciones sobre dicho proceso físico. El desarrollo utilizado para describir el problema directo es el propuesto por Udías (1985).

### 1.1. Representación de la fuente sísmica: fuerzas equivalentes

Una forma de estudiar el problema de la fuente sísmica es utilizar un modelo cinemático. Este modelo propone un sistema de fuerzas  $f(x_i, t)$  (denominadas equivalentes) que representa las fuerzas generadoras de los terremotos, siendo éstas físicamente aceptables.

Dicho sistema de fuerzas, es aceptable desde el punto de vista mecánico si cumple las siguientes condiciones (Madariaga, 1985):

a) la suma de las fuerzas es igual a 0 en la región focal (con volumen  $V_0$ ), es decir, no existe fuerza resultante neta

$$\int_{V_0} f(x_i, t) dV = 0 \quad [1.1]$$

b) el momento alrededor de cualquier eje es nulo, no existe momento resultante neto

$$\int_{V_0} f \times \hat{x} dV = 0 \quad [1.2]$$

Con estas dos condiciones, el sistema de fuerzas  $f(x_i, t)$  representa un sistema de fuerzas en equilibrio, y puede obtenerse de un potencial tensorial ( $m$ ), de tal forma que se puede expresar a partir de dicho potencial tensorial como:

$$f(x_i, t) = -\nabla \cdot m(x_i, t) \quad [1.3]$$

donde  $m(x_i, t)$  es el tensor densidad de momento sísmico, y está distribuido en la zona activa de la fuente sísmica. El operador  $\nabla$  representa el operador divergencia.

A partir de las fuerzas equivalentes podemos conocer los desplazamientos que se producen en las estaciones sísmicas debidas al terremoto. La solución al caso más sencillo, fuente puntual, fuerza impulsiva, de estos desplazamientos es lo que se conoce como función de Green, que representa los desplazamientos debido a una fuerza puntual en la dirección  $j$  aplicada en el punto  $(x_0, 0)$ . Por lo tanto, la función de Green sería la respuesta del medio a una fuerza impulsiva en la dirección  $x_j$ .

A partir de las definiciones dadas el sistema de fuerzas equivalentes  $(f(x_i, t))$ , queremos calcular los desplazamientos producidos por los procesos que tienen lugar en el foco sísmico,  $U_n(x_i, t)$ , (que representa la componente  $n$  del vector desplazamiento en el punto  $(x_i, t)$ ), Para ello suponemos que la Tierra es un medio sólido, elástico, infinito, donde actúan las fuerzas equivalentes, y lo consideramos dividido en dos partes, una parte (región focal) con volumen  $V_0$  rodeada por una superficie cerrada  $\Sigma$ , y otra parte exterior a ésta, con volumen  $V$  de superficie externa  $S$  (Fig. 1.1). Si los procesos del foco se limitan a la región  $V_0$ , es decir,  $f_i=0$  en la región exterior a la región focal ( $V$ ), a partir del teorema de Betti podemos expresar los desplazamientos producidos de la siguiente forma:

$$U_n(x_s, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{V_0} f_i G_{in} dV + \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{\Sigma} [G_{in} \sigma_i - u_i C_{ijkl} G_{kn,l} n_j] dS \quad [1.4]$$

$$+ \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_S [G_{in} \sigma_i - u_i C_{ijkl} G_{kn,l} v_j] dS$$

donde  $f_i$  representa el sistema de fuerzas,  $u_i$  son los desplazamientos en la región focal,  $\sigma_i$  representa el tensor de esfuerzos,  $G_{in}$  representa la función de Green y  $C_{ijkl}$  es el tensor que representa los parámetros elásticos del medio.

El problema del cálculo de los desplazamientos  $(U_n(x_s, t))$  se simplifica si se suponen homogéneas las condiciones de contorno sobre la superficie  $S$  y la función de Green es continua a través de las superficies  $\Sigma$  y  $S$ . Con estas condiciones la integral sobre  $S$  se anula y los desplazamientos  $(U_n(x_s, t))$  quedan definidos por las fuerzas que actúan por unidad de volumen en la región focal ( $V_0$ ) y por los valores que tienen los desplazamientos  $u_i$  y los esfuerzos  $\sigma_i$  por unidad de superficie sobre la superficie de la región focal ( $\Sigma$ ). Si además, se suponen las fuerzas de volumen nulas en la región focal  $V_0$  ( $f_i=0$ ), la ecuación [1.4] queda reducida a:

$$U_n(x_s, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{\Sigma} [G_{in} \sigma_i - u_i C_{ijkl} G_{kn,l} n_j] dS \quad [1.5]$$

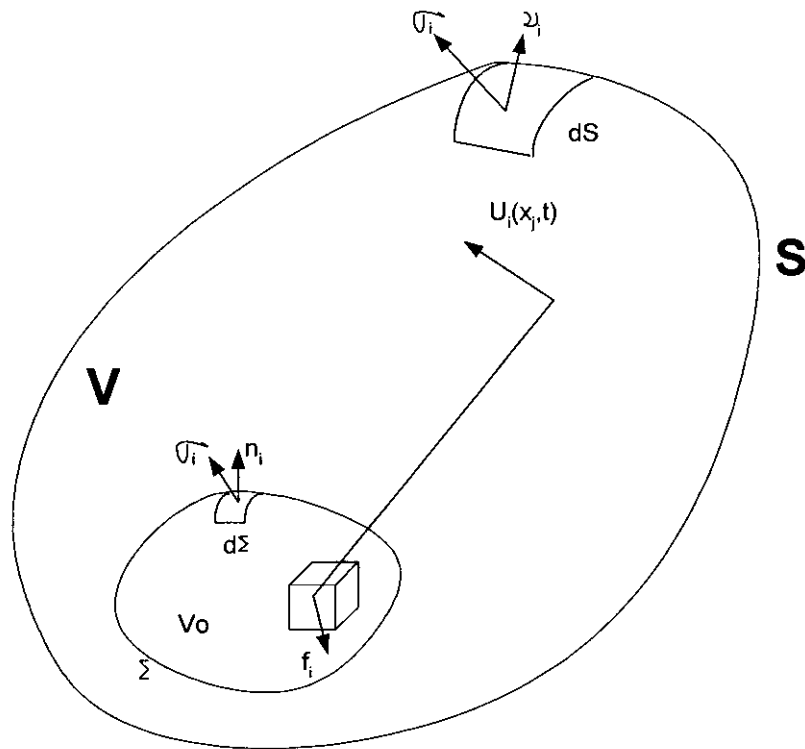


Figura 1.1. Fuerzas y esfuerzos en la región focal (\$V\_o\$).

Si suponemos como modelo de ruptura que produce un terremoto, una fractura (Fig. 1.2), las condiciones de contorno sobre la superficie de la región focal (\$\Sigma\$) son: continuidad en los esfuerzos y discontinuidad en los desplazamientos, y por lo tanto los desplazamientos \$U\_n(x\_s, t)\$ de la ecuación [1.5], se pueden expresar:

$$U_n(x_s, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{\Sigma} \Delta u_i(\xi_s, \tau) C_{ijkl} G_{kn,l}(x_s, t; \xi_s, \tau) n_j(\xi_s) dS \quad [1.6]$$

donde \$\xi\_i\$ y \$\tau\$ son las coordenadas espaciales y temporales del punto donde se aplica la fuerza sobre \$\Sigma\$ y \$n\_j\$ es la normal a cada elemento de superficie \$dS\$. La diferencia de desplazamiento entre los dos lados de la fractura es \$\Delta u\_i(\xi\_i, \tau)\$, se denomina dislocación, en general es función de la posición sobre la fractura y el tiempo, y representa lo que se ha movido un lado de la fractura con respecto al otro.

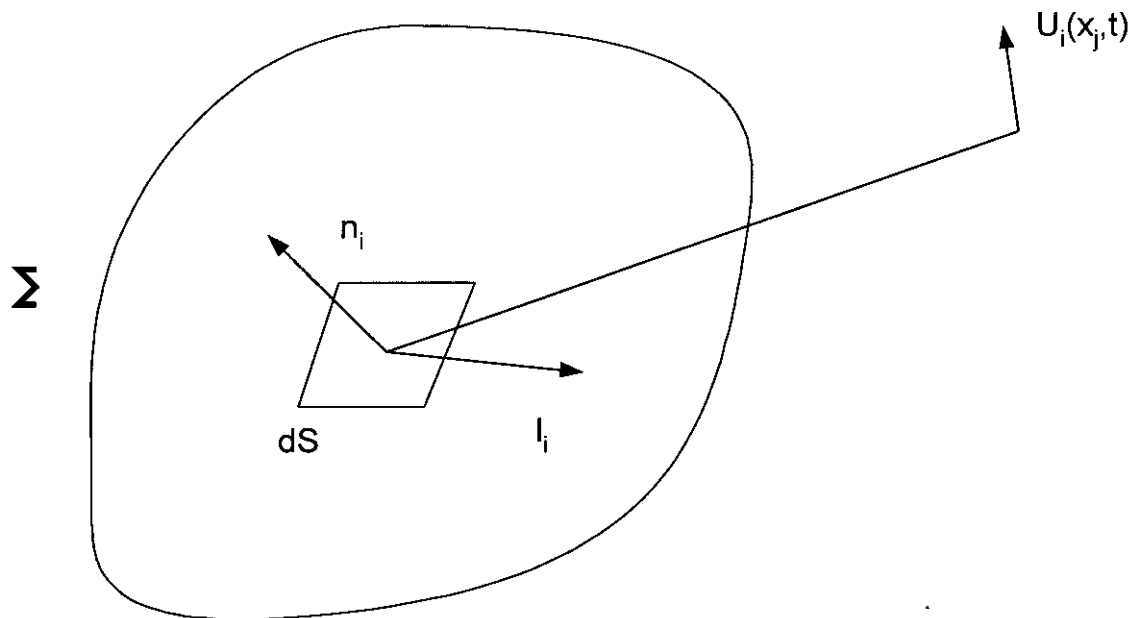


Figura 1.2. Desplazamientos producidos por una fractura de cizalla.

La ecuación anterior se puede expresar en función del tensor densidad de momento sísmico  $m_{ij}$  (ecuación [1.3]) de la siguiente forma:

$$U_n(x_s, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{\Sigma} m_{kl}(\xi_s, \tau) G_{knl}(x_s, t; \xi_s, \tau) dS \quad [1.7]$$

El tensor momento sísmico total ( $M_{ij}$ ) viene dado por la integral sobre la superficie focal ( $\Sigma$ ) del tensor densidad de momento sísmico ( $m_{ij}$ ), es decir, la zona donde el tensor densidad de momento sísmico es no nulo.

$$M_{ij} = \int_{\Sigma} m_{ij} dV \quad [1.8]$$

El tensor densidad de momento representa en realidad el esfuerzo en "exceso del elástico", es decir, la parte de esfuerzo no elástico y sólo se relaciona con la deformación no elástica. (Udías, 1985). Lo que se llama comúnmente tensor momento sísmico, es el primer término del momento sísmico (Julian et. al, 1998) y sólo es válido en el caso de la aproximación de fuente puntual (Udías, 1985).

A partir de la ecuación [1.8], los desplazamientos producidos por las ondas sísmicas  $U_n(x_s, t)$ , se pueden expresar como la convolución en el tiempo del tensor momento sísmico  $M_{ij}$ , (relacionado con el tensor densidad de momento sísmico  $m_{ij}(x)$  y las derivadas de la función de Green del medio). Si hacemos la aproximación de foco puntual, los desplazamientos se pueden expresar:

$$U_n(x_s, t) = M_{ij} * G_{nij} \quad [1.9]$$

donde \* representa la convolución,  $M_{ij}$  es el tensor momento sísmico. La idea de expresar los desplazamientos a partir del tensor momento sísmico y la función de Green del medio, fue introducida por primera vez por Gilbert (1971).

Uno de los modelos más utilizados para representar el mecanismo focal de un terremoto es una fractura de cizalla (Fig. 1.3). Si consideramos una fractura sobre una superficie de normal  $n_i$ , que los desplazamientos se producen en la dirección  $l_i$ , y que la dislocación es constante ( $\Delta u_k = \Delta u l_k$ ) sobre la fractura, el tensor densidad de momento sísmico ( $m_{ij}$ ) se puede definir de la forma:

$$m_{ij} = \Delta u C_{ijkl} l_k n_l \quad [1.10]$$

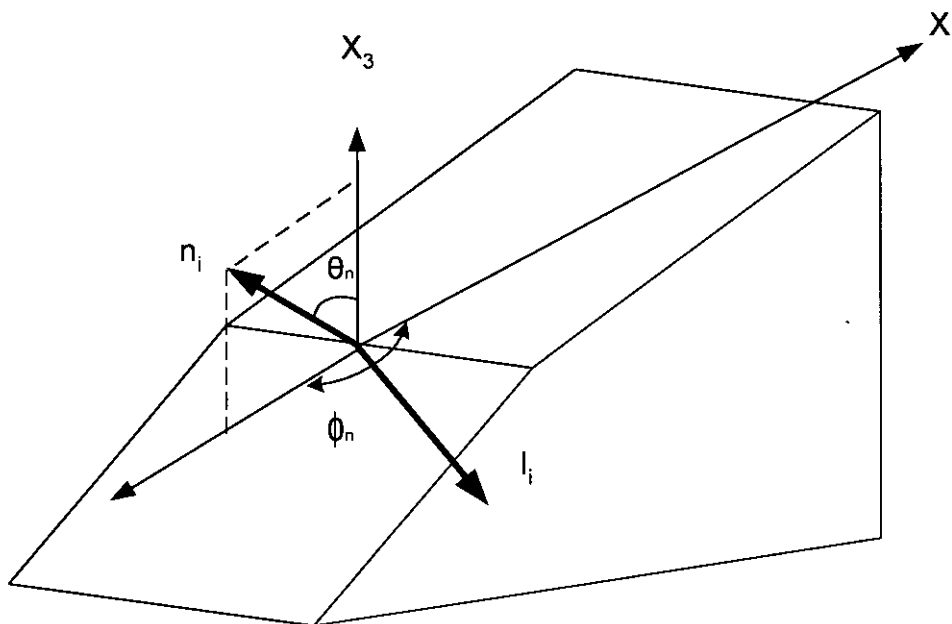
(expresión utilizada para substituir en la ecuación [1.6] y obtener la ecuación [1.7]) donde  $C_{ijkl}$  es el tensor que representa los parámetros elásticos del medio, es de cuarto orden y por lo tanto tiene 81 componentes. Si suponemos que el medio es isótropo,  $C_{ijkl}$  queda reducido a dos constantes,  $\lambda$  y  $\mu$ , que son los parámetros de Lamé y el tensor densidad de momento sísmico queda:

$$m_{ij} = \Delta u (\lambda n_k l_k \delta_{ij} + \mu (n_i l_j + n_j l_i)) \quad [1.11]$$

$\Delta u$  representa la diferencia de desplazamientos entre los dos lados de la fractura, es decir, lo que se ha movido un lado de la fractura con respecto al otro. Considerando como modelo de fuente sísmica una fractura puramente de cizalla ( $n_i l_i = 0$ ), de área  $S$  y  $\Delta u$  es constante en toda ella, el tensor momento sísmico se puede escribir:

$$M_{ij} = \mu \Delta u S (n_i l_j + n_j l_i) = M_o (n_i l_j + n_j l_i) \quad [1.12]$$

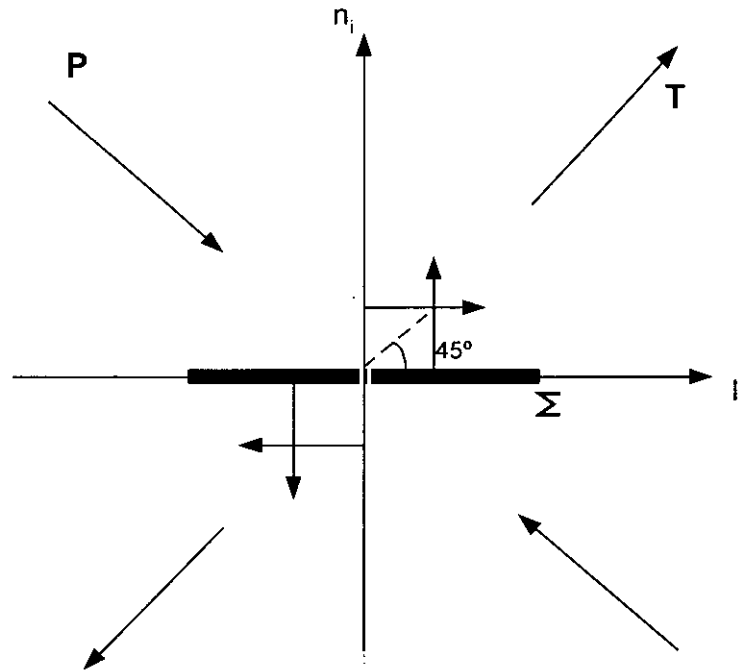
donde aparece una constante que se denomina momento sísmico escalar,  $M_o = \mu \Delta u S$ , donde  $\mu$  es el coeficiente de cizalla,  $S$  es el área de la fractura y  $\Delta u$  es la diferencia de desplazamientos entre los dos lados de la fractura. La ecuación [1.12] es simétrica respecto a la normal del plano de fractura ( $n_i$ ), y dirección de dislocación ( $l_i$ ), ya que al intercambiar  $n_i$  y  $l_i$ , el resultado es el mismo, lo que introduce una ambigüedad en la resolución del problema inverso.



**Figura 1.3.** Fractura de cizalla, coordenadas  $(\theta, \phi)$  de la normal al plano de falla ( $n_i$ ), y dirección de dislocación ( $l_i$ ).

En términos del modelo de fuerzas equivalentes, una fractura de cizalla equivale a un sistema de dos pares de fuerza sin momento resultante, situados en el plano normal al de fractura. Este es un modelo de fuerzas equivalentes, universalmente aceptado como representación de la fuente sísmica y se denomina modelo de doble par de fuerzas.

En la Fig. 1.4. se muestra este modelo de fuerzas, uno de los pares está en la dirección de dislocación y el otro en la dirección de la normal al plano. Este sistema es equivalente a otro sistema de fuerzas de presión (P) y tensión (T) situadas en el mismo plano y a 45° de las direcciones de los pares de fuerzas.



**Figura 1.4.** Doble par de fuerzas y su relación con los ejes de Tensión y Presión.

Podemos expresar las componentes del tensor momento sísmico, en función de los ejes geográficos. Para ello necesitamos expresar la normal ( $n_i$ ) y dirección de los desplazamientos ( $l_i$ ) en función de las componentes de los ejes geográficos:

$$n_1 = \text{sen}\theta_n \cos\phi_n \quad l_1 = \text{sen}\theta_l \cos\phi_l \quad [1.13]$$

$$n_2 = \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \quad l_2 = \text{sen}\theta_l \text{sen}\phi_l \quad [1.14]$$

$$n_3 = \cos\theta_n \quad l_3 = \cos\theta_l \quad [1.15]$$

donde el ángulo  $\theta_n$  representa el ángulo que forma el eje con la vertical y el ángulo  $\phi_n$  es el ángulo que forma el eje con el norte y se denomina acimut para la normal  $n_i$ , y  $\theta_l$ ,  $\phi_l$ , son los mismos ángulos para la dirección de dislocación  $l_i$  (Fig. 1.3).

Las ecuaciones siguientes muestran las componentes del tensor momento sísmico en función de la dirección de dislocación  $l_i$ , y su normal  $n_i$ :

$$\begin{aligned}
 m_{11} &= n_1 l_1 = \text{sen} \theta_n \cos \phi_n \text{sen} \theta_l \cos \phi_l \\
 m_{22} &= n_2 l_2 = \text{sen} \theta_n \text{sen} \phi_n \text{sen} \theta_l \text{sen} \phi_l \\
 m_{12} &= n_1 l_2 + n_2 l_1 = \text{sen} \theta_n \cos \phi_n \text{sen} \theta_l \text{sen} \phi_l + \text{sen} \theta_n \text{sen} \phi_n \text{sen} \theta_l \cos \phi_l \\
 m_{13} &= n_1 l_3 + n_3 l_1 = \text{sen} \theta_n \cos \phi_n \cos \theta_l + \cos \theta_n \text{sen} \theta_l \cos \phi_l \\
 m_{23} &= n_2 l_3 + n_3 l_2 = \text{sen} \theta_n \text{sen} \phi_n \cos \theta_l + \cos \theta_n \text{sen} \theta_l \text{sen} \phi_l
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

Utilizando las relaciones de las ecuaciones [1.9] y [1.12], la componente  $n$  de los desplazamientos queda:

$$U_n(x_s, t) = M_{ij} * G_{ni,j} = M_o (n_i l_j + n_j l_i) * G_{ni,j} = M_o m_{ij} * G_{ni,j} \tag{1.17}$$

La ecuación anterior se puede expresar a partir de la función de Green ( $G_{ni}$ ). Dicha función representa los desplazamientos correspondientes a una fuerza impulsiva que está concentrada en un punto y un instante, por lo tanto en el caso del campo lejano de las ondas P:

$$G_{ni} = \frac{\delta(t - \frac{r}{\alpha})}{4\pi\rho r \alpha^2 \gamma_n \gamma_i} \tag{1.18}$$

donde  $\rho$  es la densidad del medio,  $\alpha$  es la velocidad de las ondas P,  $r$  es el radio vector, y  $\gamma_n, \gamma_i$  son los cosenos directores del radio vector del foco al punto de observación. Restringirnos al campo lejano supone quedarnos sólo con las potencias de  $r$  menor, al tomar las derivadas de la función de Green.

Substituyendo la ecuación [1.18] en la ecuación [1.17], y teniendo en cuenta las propiedades de la función de Green, obtenemos que los desplazamientos  $U_n(x_s, t)$  para la onda P en el campo lejano para un modelo de fractura de cizalla, vienen dados por:

$$U_n^p(t) = M_{ij} * G_{ni,j} = \frac{\dot{M}_o(t - r/\alpha)}{4\pi\rho\alpha^3 r} m_{ij} \gamma_i \gamma_j \gamma_n \quad [1.19]$$

En la ecuación anterior, el producto  $m_{ij} \gamma_i \gamma_j \gamma_n$  se conoce con el nombre de patrón de radiación ( $R(\phi, i)$ ), y describe la forma que se distribuyen las amplitudes de las ondas sísmicas.

Utilizar el modelo del doble par de fuerzas (DC, fractura de cizalla) como modelo de ruptura, es una simplificación del problema de las fuerzas que actúan en el foco sísmico y aunque la mayoría de los terremotos se ajustan a este modelo, existen excepciones. Expresar los desplazamientos no en función de los parámetros que definen un doble par de fuerzas, sino en función de las componentes del tensor momento sísmico, nos permite utilizar mecanismos focales que corresponden a un doble par puro o a otro modelo de fuente sísmica diferente (Julian et al., 1998)

El tensor momento sísmico ( $m_{ij}$ ) contiene toda la información sobre la fuente de un terremoto, describe en primera aproximación las fuerzas equivalentes, y es un concepto general que describe una gran variedad de modelos de fuentes sísmicas. Una fractura de cizalla, modelo de doble par de fuerzas, es sólo un caso particular de dichos modelos. Para un mecanismo de doble par de fuerzas, los desplazamientos están distribuidos en cuatro cuadrantes alternativos de dilataciones (amplitudes negativas) y compresiones (amplitudes positivas). Es aquí donde se introduce la idea de no-doble par al hablar del foco sísmico de un terremoto.

La existencia de un mecanismo focal de no-doble par implica las siguientes propiedades:

- un proceso físico espacial o temporal en la fuente más complicado que una única fractura de cizalla.
- los campos de dilataciones y compresiones ya no se pueden representar en 4 cuadrantes alternativos de dilataciones y compresiones, ya que aumentan unas u otras dependiendo del tipo de proceso que se da en la fuente sísmica, y por lo tanto las superficies nodales ya no corresponden a planos ortogonales.

Se han propuesto varios procesos físicos para explicar aquellos terremotos cuyo mecanismo focal no corresponde a un doble par, Sipkin (1986):

- procesos que incluyan sucesos múltiples de fallas de cizalla (fuentes complejas) (Baker and Langston, 1982)
- ruptura en superficies de falla no planar (Dziewonski and Woodhouse, 1983)
- efectos de la estructura próxima a la fuente (Kawasaki, 1982)
- fractura tensil bajo altas presiones (Julian, 1983)

El tensor momento sísmico ( $m_{ij}$ ) puede descomponerse utilizando el análisis de autovalores y autovectores (descomposición espectral). Esta descomposición nos va a permitir realizar un estudio del mecanismo focal que tiene el terremoto y permite determinar las fuerzas equivalente que representan la fuente sísmica. A partir de la descomposición espectral, el tensor momento sísmico se puede separar en dos partes, la parte isotrópica ( $m_{ij}^{\text{isotrópica}}$ ) y la parte desviatoria ( $m_{ij}^{\text{desviatoria}}$ ). La parte isotrópica ( $m_{ij}^{\text{isotrópica}}$ ), describe el cambio de volumen en la fuente sísmica: si es positiva, la componente isotrópica corresponde a una explosión, si es negativa es implosiva y si es nula, el tensor momento sísmico sólo tiene parte desviatoria ( $m_{ij}^{\text{desviatoria}}$ ). La parte desviatoria, se puede descomponer a su vez, de diversas formas, una de las más utilizadas consiste en dividirla en parte de doble par ( $m_{ij}^{\text{DC}}$ ) y de no doble par llamada Compensated Linear Vector Dipole (CLVD) según Knopoff y Randall (1970). ( $m_{ij}^{\text{CLVD}}$ ). La ec. [1.20] muestra dicha descomposición.

$$m_{ij} = m_{ij}^{\text{isotrópica}} + m_{ij}^{\text{desviatoria}}$$
$$m_{ij}^{\text{desviatoria}} = m_{ij}^{\text{DC}} + m_{ij}^{\text{CLVD}} \quad [1.20]$$

De la parte desviatoria del tensor momento sísmico, la parte del doble par puro ( $m_{ij}^{\text{DC}}$ ), tiene la traza nula y uno de los autovalores es nulo, (además de tener el determinante nulo), por lo tanto sus autovalores son iguales y cambiados de signo, y podemos calcular los ejes de esfuerzos. El eje principal que corresponde al autovalor negativo es el eje de las Presiones (P), el eje principal corresponde al valor propio positivo que representa al eje de Tensión (T) y el correspondiente al autovalor nulo es el eje nulo (Z).

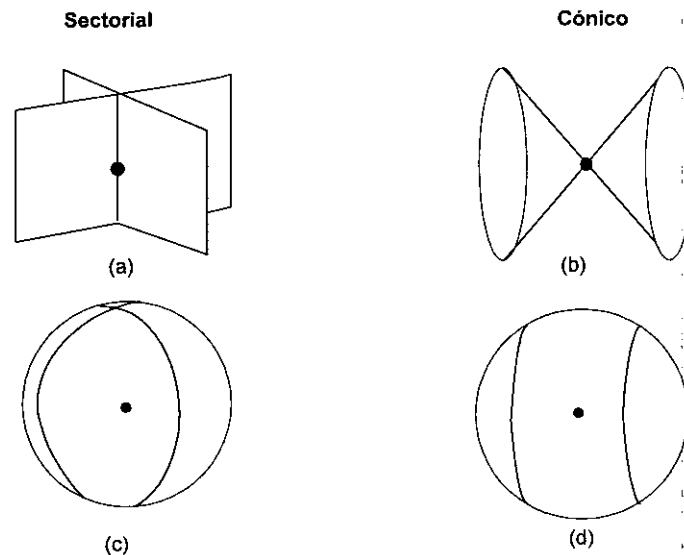
Si la traza de la parte desviatoria es nula pero ninguno de sus autovalores es nulo, el mecanismo focal del terremoto ya no representa un puro doble par, y el tensor momento sísmico se puede descomponer de diversas formas, en este estudio el CLVD.

El CLVD se define como un dipolo que se corrige por el efecto del cambio de volumen, describiendo fuentes sísmicas que no tienen cambio de volumen, ni fuerza, ni momento netos (Jost y Hermann, 1989). Si suponemos un modelo que describe la radiación debido a un cambio en el módulo de cizalla en presencia de una deformación axial, (que se representa por LVD (Lineal Vector Dipole)) con fuerza y momento resultante nulos y no existe cambio de volumen, aparece el CLVD (Knopoff y Randall, 1970).

A partir de la descomposición espectral del tensor momento sísmico y la obtención de sus autovalores y autovectores del tensor, se puede hallar el porcentaje de CLVD que posee cualquier mecanismo focal de un terremoto, para poder saber cómo éste se aleja de un modelo de doble par puro.

En el caso de un doble par puro, si representamos los puntos cuyos desplazamientos tiene amplitud nula en la esfera focal, se obtienen los planos de falla. Estas superficies nodales son planos ortogonales cuyas intersecciones con la esfera focal son círculos ortogonales, que dividen a la esfera focal en cuatro cuadrantes iguales, mientras que para otro tipo de mecanismo focal de no doble par, las superficies nodales no son planos ortogonales.

Las superficies nodales para un CLVD, son conos circulares, cuya intersección con la esfera focal son dos pequeños círculos que la dividen en tres regiones (Fig. 1.5). Para un mecanismo intermedio entre DC y CLVD, las superficies nodales son conos más generales (no circulares); las superficies nodales para un doble par (planos de falla), pueden considerarse como un caso límite en el que uno de los momentos principales es nulo, (Julian y Sipkin, 1985; Julian et al, 1998).



**Figura 1.5.** (Arriba) Superficies nodales de la onda P para mecanismo focal de doble par (a) y CLVD (b). (Abajo) Intersección de las superficies nodales con la esfera focal, doble par (c), CLVD (d).

## 1.2. Desplazamientos de la onda P

A partir de las ecuaciones [1.17] y [1.18], y si suponemos en la ecuación [1.19] un modelo de Tierra estratificado, y que la dependencia temporal de la fuente sísmica está contenida en el momento sísmico, los desplazamientos producidos por un terremoto en la superficie terrestre, se pueden expresar como (Kanamori y Stewart, 1976; Deschamps et al., 1980):

$$U_n^p(t) = M_{ij} * G_{m,j} = \frac{1}{4\pi\alpha^3 r} \frac{g(\Delta)}{a} C(i_0) \dot{M}(t - r/\alpha) \gamma_n \quad [1.21]$$

donde  $\Delta$  es la distancia epicentral (distancia entre epicentro y estación),  $i_0$  el ángulo de incidencia en la superficie terrestre,  $r$  es la distancia medida a lo largo del rayo desde el foco a la estación, y  $a$  es el radio terrestre. La corrección de la incidencia de la onda sísmica en la superficie terrestre queda representada por  $C(i_0)$ , la expansión geométrica del rayo viene dada por  $g(\Delta)$ , que se describe como el efecto que sufren las ondas al atravesar la tierra sólida elástica.

En la ecuación [1.21] el proceso de ruptura que se produce en el foco, está contenido en  $\dot{M}(t)$ , tasa de radiación de momento en el tiempo, que se puede expresar para terremotos moderados (magnitud < 6) como (De Natale y Zollo, 1993):

$$\dot{M}(t) = M_0 f(t) \quad [1.22]$$

donde  $M_0$  es el valor medio del momento sísmico escalar, y  $f(t)$  es la función temporal de la fuente. La expresión anterior, supone aceptar que el mecanismo focal no cambia durante el proceso de fractura y toda la dependencia en el tiempo está contenida en la función temporal de la fuente sísmica,  $f(t)$ , conocida como STF (Source Time Function). Esta suposición es razonable para terremotos pequeños no así para terremotos grandes (magnitud >6) con mecanismos de fractura complejos.

En la práctica, las señales sísmicas producidas por un terremoto, que son registradas en las estaciones sísmicas,  $s(t)$  y son la convolución de :

- los desplazamientos en la superficie terrestre,  $U(t)$
- la atenuación sufrida por las ondas debido a la absorción del medio,  $Q(t)$
- el instrumento,  $I(t)$

y por lo tanto estas señales sísmicas  $s(t)$ , se pueden expresar como:

$$s(t) = U(t) * Q(t) * I(t) \quad [1.23]$$

donde \* representa el símbolo de la convolución.

Si en lugar de trabajar en el dominio de tiempo, trabajamos en el dominio de las frecuencias, la convolución se transforma en una multiplicación y podemos despejar los desplazamientos producidos en la superficie terrestre,  $U(w)$ :

$$\frac{S(w)}{Q(w) \cdot I(w)} = U(w) \quad [1.24]$$

a partir de las ecuaciones [1.21] y [1.24], los desplazamientos producidos en la superficie terrestre ( $U(w)$ ), nos quedan:

$$U(w) = \frac{S(w)}{Q(w) \cdot I(w)} = \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{g(\Delta)}{a} C(i_o) \dot{M}(w) m_{ij} \gamma_n \gamma_j \quad [1.25]$$

por lo tanto como se deduce de la ecuación anterior, para poder obtenerlos hay que corregir los sismogramas por la respuesta instrumental y los efectos de propagación.

### 1.3. Correcciones

Como se observa en la ecuación [1.24], para poder obtener los desplazamientos producidos en el foco de un terremoto en el dominio de frecuencias  $U(w)$ , y poder así calcular los procesos causantes del mismo, hay que corregir los sismogramas registrados ( $S(w)$ ) en las estaciones sísmicas, por el efecto de la atenuación anelástica ( $Q(w)$ ), la respuesta instrumental ( $I(w)$ ), la expansión geométrica ( $g(\Delta)$ ) y el efecto de la superficie terrestre ( $C(i_o)$ ). A continuación se va a describir cada una de estas correcciones.

El **efecto de la atenuación anelástica** está descrito por el operador lineal  $Q(w)$ . Se le conoce como factor de atenuación de Futterman (Futterman, 1962). En general la transformada de Fourier de este operador se expresa como (Carpenter, 1967; Langston y Helmberger, 1975):

$$F(w, T/Q) = \exp\left[-w/2 \frac{T}{Q} + i \frac{wT}{\pi Q} \log w/w_1\right] \quad [1.26]$$

donde  $T$  representa el tiempo de recorrido efectivo,  $w_1$  se toma como  $2\pi$ , pero su elección no es muy importante, ya que lo único que hace es avanzar o retardar el sismograma, sin modificar su forma (Deschamps et al., 1980). Por lo general el valor de  $Q$  aumenta con la profundidad pero para distancias epicentrales entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$ , se ha comprobado que el cociente  $T/Q$  (que se conoce como  $t^*$ ), es prácticamente independiente de la distancia epicentral. De tal forma que se puede hacer la aproximación de tomar como valor 1 para las ondas P, y 4 para las ondas S.

La **función de transferencia del instrumento** se expresa por medio de otro operador lineal  $I(w)$ , según el tipo de instrumento utilizado para el registro de la señales sísmicas. Generalmente, es una función de variables complejas en el dominio de frecuencias. Está representado para reproducir las diferentes funciones correspondientes a cada etapa de adquisición de los datos (sismómetro, amplificador, filtro analógico,...). De forma genérica, se pueden expresar como

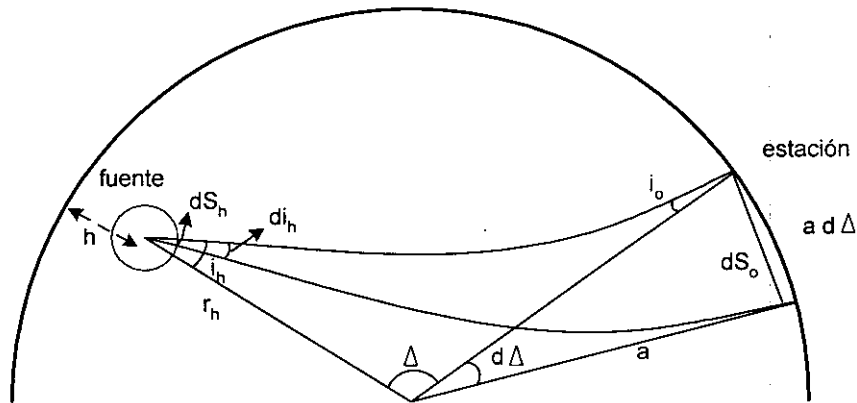
$$I(w) = C \frac{Z(w)}{P(w)} = C \frac{\prod_{j=1}^n (iw - z_j)}{\prod_{k=1}^m (iw - p_k)} \quad [1.27]$$

donde  $C$  es una constante,  $Z(w)=0$  corresponde a los ceros de  $I(w)$ , y  $P(w)=0$  corresponde a los polos de  $I(w)$ . Los valores de estos polos y ceros, son características propias de cada instrumento y vienen dados para cada instrumento por el fabricante.

El **coeficiente de expansión geométrica** representado por el operador  $g(\Delta)$ , describe el efecto que sufren las ondas sísmicas al atravesar la tierra sólida elástica y se conoce como atenuación geométrica. Se define como la raíz cuadrada del cociente entre el flujo de energía recibida en la estación donde se registra el terremoto y el flujo de energía emitido en la fuente por unidad de ángulo sólido. Su expresión en función de la distancia epicentral, en una tierra esférica simétrica y para las ondas P es (Honda, 1957; Dechamps et al. ,1980):

$$g(\Delta) = \left[ \frac{\rho_h \alpha_h \text{sen} i_h}{\rho_o \alpha_o \text{sen} \Delta \cos i_o} \left| \frac{di_h}{d\Delta} \right| \right]^{1/2} \quad [1.28]$$

donde los términos con el índice  $h$  representan la densidad ( $\rho$ ), velocidad ( $\alpha$ ) y ángulo de emergencia en la fuente ( $i$ ) para el foco sísmico, y los términos con índice  $o$  son los mismos parámetros pero en el punto de observación (superficie). Esta expresión se ha obtenido a partir de la conservación del flujo de energía que entra en una esfera infinitesimal alrededor del foco, y el frente de ondas en la superficie terrestre (Fig. 1.6).



**Figura 1.6.** Efecto de la atenuación geométrica en las ondas internas (Aki and Richards, 1980).

La relación entre los desplazamientos en la superficie y el foco es:

$$\frac{U_o}{U_h} = g(\Delta) \frac{r_h}{a} \quad [1.29]$$

Para el caso de los terremotos a distancias regionales, se puede reemplazar  $g(\Delta)/a$  por  $1/r_h$  en la solución de la ecuación [1.25], donde  $r_h^2 = h^2 + a^2$ .

Los sismogramas registrados en las estaciones sísmicas, poseen otro efecto importante en ellos, el **efecto de la incidencia en la superficie libre de la Tierra** que está representado por el operador  $C(i_o)$ . En el caso de la componente vertical de un sismograma se define dicho efecto por el operador lineal  $C_z(i_o)$  (Deschamps et al., 1980):

$$C_z(i_o) = \frac{2 \cos i_o \cos 2j_o}{\cos^2 2j_o + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin 2i_o \sin 2j_o} \quad [1.30]$$

siendo  $i, j$  los ángulos de incidencia de las ondas P y S ( $\sin i_o = \alpha/\beta \sin j_o$ ),  $\alpha$  y  $\beta$  son sus velocidades respectivamente.



## Capítulo 2

### **Problema inverso: obtención de las componentes del tensor momento sísmico**

El problema descrito en el capítulo primero corresponde a la resolución del problema directo del cálculo de los desplazamientos producidos por un modelo de fuente puntual correspondiente a un terremoto. Sin embargo, la mayor parte de los problemas que se plantean en Sismología corresponden a problemas inversos, y el estudio de la fuente sísmica de los terremotos no es una excepción. Se trata de obtener los procesos de ruptura producidos en el foco sísmico.

Para ello, se ha desarrollado un método que permite obtener las componentes del tensor momento sísmico por inversión lineal de registros sísmicos. El método no restringe el estudio del proceso de ruptura a un tipo concreto de mecanismo focal. A continuación se describe el método propuesto.

Se va a calcular la evolución con el tiempo de las componentes del tensor momento sísmico, es decir  $M_{ij}(t)$ , a partir de la inversión de sismogramas previamente corregidos, por el efecto del instrumento de registro, de la atenuación anelástica, la expansión geométrica y de la superficie libre. El objetivo que nos lleva a calcular dichas componentes, es poder hacer un estudio lo más general posible del proceso físico que tiene lugar en el foco de un terremoto, es decir, calcular la función temporal (STF) y el patrón de radiación del mismo, sin tener que imponer un modelo de mecanismo focal determinado.

A partir de la ecuación [1.24], válida para las ondas P, podemos obtener el mecanismo focal del terremoto. Para conseguirlo, hay que eliminar del sismograma ( $s(t)$ ) todo lo que no representa el proceso de ruptura, corregir el sismograma por los efectos del instrumento ( $I(t)$ ), de la propagación ( $Q(t)$ ,  $g(\Delta)$ ), y la incidencia sobre la superficie libre de la Tierra ( $C(i)$ ). En dicha ecuación, se han expresado todas las variables en el dominio de frecuencias, los desplazamientos registrados en las estaciones ( $S(w)$ ), y los operados de atenuación ( $Q(w)$ ) y el instrumento ( $I(w)$ ), para facilitar el cálculo ya que es más sencillo eliminar dichos efectos en dicho dominio. A partir de dicha ecuación podemos encontrar las expresiones de las componentes del tensor momento sísmico:

$$U(w) = \frac{S(w)}{Q(w) \cdot I(w) \cdot g(\Delta) \cdot C(i_o)} = \frac{\dot{M}(w)R(\phi, i)}{4\pi\rho\alpha^3\bar{a}} \quad [2.1]$$

donde la parte temporal del proceso físico viene expresarse mediante ( $M(w)$ ), y el patrón de radiación por  $R(\phi, i)$  para las ondas P en el campo lejano suponiendo un mecanismo general representado por el tensor momento sísmico para el proceso físico de ruptura, viene dado por (ver ecuación [1.18]):

$$\dot{M}(w)R(\phi, i) = M_o f(w) M_{ij} \gamma_i \gamma_j \quad \begin{matrix} i = 1, 3 \\ j = 1, 3 \end{matrix} \quad [2.2]$$

siendo  $M_o$  el momento sísmico escalar y  $f(w)$  la función temporal. Si aplicamos la transformada de Fourier a la ecuación [2.1] es inmediato obtener los desplazamientos  $U(t)$  producidos en el foco sísmico, en el dominio de tiempo.

A partir de las ecuaciones [2.1], [2.2] podemos obtener las componentes del tensor momento sísmico. Dicho tensor tiene seis elementos independientes, ya que es un tensor de segundo orden simétrico. Si consideramos que la traza (parte isotrópica) del tensor momento sísmico es nula, es decir, no existe el cambio de volumen en la fuente sísmica, el número de parámetros a controlar es cinco. Esta condición no es muy severa en el caso de terremotos a profundidad intermedia debido a la presión litosférica existente a dichas profundidades (De Natale y Zollo, 1993).

Tomamos los desplazamientos obtenidos a partir de la ecuación [2.1] y sustituimos en ella la ecuación [2.2], los desplazamientos quedan expresados en función de las componentes del tensor momento ( $M_{ij}$ ). Suponiendo que la traza del tensor momento sísmico es nula ( $M_{11} + M_{22} + M_{33} = 0$ ) y tomando la componente vertical ( $z$ ) de los desplazamientos para una estación  $j$  ( $j=1, n$ ), los desplazamientos de la onda P en el dominio del tiempo quedan:

$$U_{zj}^P(t) = A_j \frac{[M_{11}(t)\Gamma_{1j} + M_{22}(t)\Gamma_{2j} + M_{12}(t)\Gamma_{3j} + M_{13}(t)\Gamma_{4j} + M_{23}(t)\Gamma_{5j}]}{4\pi\rho\alpha^3 a} \quad j = 1, n \quad [2.3]$$

donde los desplazamientos en el foco sísmico  $U_{zj}^P(t)$  están corregidos por los efectos de atenuación ( $Q(t)$ ), incidencia en la superficie libre ( $C_2(i_0)$ ), expansión geométrica ( $g(\Delta)$ ) e instrumento ( $I(t)$ ).

En nuestro método de inversión, la profundidad no va a considerarse una de las variables de la inversión y por lo tanto permanecerá fija. Sin embargo, se va a realizar un estudio de su influencia en las componentes del tensor momento sísmico obtenido tras la inversión, utilizando para ello la profundidad correcta o profundidades "equivocadas".

En la ecuación [2.3],  $A_j$ ,  $\Gamma_{1j}$ ,  $\Gamma_{2j}$ ,  $\Gamma_{3j}$ ,  $\Gamma_{4j}$ ,  $\Gamma_{5j}$ , quedan definidos según:

$$A_j = \frac{C_{z_j}(i_0) g_j(\Delta_j)}{4\pi\rho\alpha^3 a} \quad [2.4]$$

$$\Gamma_{1j} = \gamma_{1j}^2 - \gamma_{3j}^2$$

$$\Gamma_{2j} = \gamma_{2j}^2 - \gamma_{3j}^2$$

$$\Gamma_{3j} = 2\gamma_{1j}\gamma_{2j}$$

$$\Gamma_{4j} = 2\gamma_{1j}\gamma_{3j}$$

$$\Gamma_{5j} = 2\gamma_{2j}\gamma_{3j}$$

donde  $j$  representa cada una de las estaciones sismológicas donde se registran las señales de terremoto (con un total de  $n$ ). A partir de la ecuación [2.3], se pueden obtener las componentes del tensor momento sísmico en función de los desplazamientos ( $U^P(t)$ ), una vez corregidos los diferentes efectos ajenos a la fuente sísmica. Dicha ecuación se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones (tantas como estaciones que registren el terremoto) que se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} A_1 g_{11} & A_1 g_{12} & A_1 g_{13} & A_1 g_{14} & A_1 g_{15} \\ A_2 g_{11} & A_2 g_{12} & A_2 g_{13} & A_2 g_{14} & A_2 g_{15} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n-1} g_{11} & A_{n-1} g_{12} & A_{n-1} g_{13} & A_{n-1} g_{14} & A_{n-1} g_{15} \\ A_n g_{11} & A_n g_{12} & A_n g_{13} & A_n g_{14} & A_n g_{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{M}_{11}(t) \\ \dot{M}_{22}(t) \\ \dot{M}_{12}(t) \\ \dot{M}_{13}(t) \\ \dot{M}_{23}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ \dots \\ \dots \\ U_{n-1}(t) \\ U_n(t) \end{bmatrix} \quad [2.5]$$

El sistema se puede expresar de forma más compacta:

$$[A]_{n \times 5} [M(t)]_{5 \times m} = [U^P(t)]_{n \times m} \quad [2.6]$$

donde n representa el número de estaciones y m es el número de puntos tomados en cada señal sísmica para realizar la inversión. Para obtener el tensor momento sísmico,  $[M(t)]_{5 \times m}$ , se debe resolver un sistema lineal de ecuaciones:

$$[A^{-1}]_{5 \times n} [U(t)^P]_{n \times m} = [M(t)]_{5 \times m} \quad [2.7]$$

La resolución de este sistema va a depender del valor de n, de si n es mayor, menor o igual al número de incógnitas (5 en nuestro caso):

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| (1) si n=5 - solución exacta           | solución es elemental      |
| (2) si n>5 - problema sobredeterminado | $M = (A^T A)^{-1} A^T U^P$ |
| (3) si n<5 - problema indeterminado    | $M = A^T (A A^T)^{-1} U^P$ |

en nuestro estudio n>5, luego se a utilizar la solución del caso 2. Para ello se utiliza la Inversa Generalizada de Lanczös (1961).

### 2.1. Inversa generalizada de Lanczös

El método de Lanczös se basa en que la matriz que se desea invertir (A) para poder resolver el sistema lineal (ecuación [2.7]), se puede expresar en función de su descomposición de valor singular (SVD).

$$A = W \Lambda V^T \quad [2.8]$$

siendo  $\Lambda$  una matriz diagonal formada por los valores singulares de la matriz  $A$ , (el valor singular de una matriz es la raíz cuadrada de los autovalores de  $A^T A$ ),  $W$  es una matriz de dimensiones  $(m) \times (p)$  donde sus columnas son los autovectores correspondientes a los  $p$  autovalores de  $A A^T$ , y  $V$  es una matriz de dimensiones  $(p) \times (n)$ , donde las  $p$  columnas son los autovectores correspondientes a los autovalores no nulos de  $A^T A$ . El parámetro  $p$  debe ser el mínimo de  $(5, n)$  y puede ser interpretado como el número de grados de libertad de los datos de la matriz  $A$  o como el rango de  $A$ . Se cumple que  $V \cdot V^T = I$  (matriz identidad).

Para hallar la inversa de la matriz  $A$  basta utilizar la inversa generalizada definida por la ecuación [2.8]:

$$A^{-1} = W \Lambda^{-1} V^T \quad [2.9]$$

Para evitar posibles problemas con los valores singulares de  $A$  muy pequeños (que imposibilitarían la inversión), se introduce un parámetro  $\theta^2$  (Aki y Richards, 1980), de tal forma que la inversa de  $A$  ( $H$ ), queda (Menke, 1984):

$$H = (A^{-1}) = (A^T A)^{-1} A^T = (V \Lambda^2 V^T + \theta^2 I)^{-1} V \Lambda W^T \quad [2.10]$$

donde  $\theta^2$  se suele definir como  $\theta^2 = \lambda_{\max}^2 / \lambda_{\min}^2$  (condición de número, simple indicador de la amplitud de los autovalores), donde  $\lambda_{\max}$  y  $\lambda_{\min}$  son los autovalores máximo y mínimo respectivamente de la matriz  $\Lambda$ . Esta condición permite que la solución de la inversión converja y se estabilice (Mao et al., 1994). Si el número es grande esto implica una tendencia hacia la solución no única.

La matriz  $M$  (matriz de los componentes del tensor momento sísmico) que queremos obtener (ecuación [2.7]) nos queda, según la definición de la inversa generalizada de Lanczös:

$$(M) = (A^{-1})(U^p) = (V \Lambda^2 V^T + \theta^2 I)^{-1} V \Lambda W^T U^p \quad [2.11]$$

## 2.2. Matriz de resolución, densidad de información, covarianza y correlación

Además de resolver el sistema de ecuaciones propuesto para obtener el tensor momento sísmico (ecuación [2.7]), se debe hacer un estudio de los resultados obtenidos, tras la inversión. Para ello se utilizan la Matriz de Resolución, la Matriz de Información y la Matriz de Covarianza, y la Matriz de Correlación, que nos va a permitir calcular una estimación de las desviaciones de las componentes del tensor momento sísmico.

La **Matriz de Resolución (R)**, nos da idea de si los parámetros buscados pueden ser resueltos independientemente, y se define como:

$$[R]_{5,5} = [H]_{5,n} [A]_{n,5} \quad [2.12]$$

donde H es la matriz inversa de A, y es una matriz 5x5. Si R=I, entonces cada parámetro del modelo puede ser determinado, pero si R≠I, las estimaciones de los parámetros del modelo son realmente valores medios de los parámetros del verdadero modelo (Menke, 1984).

En nuestro caso, si multiplicamos ambos lados de la ecuación [2.6] por H, nos queda:

$$HAM = HU^p = RM = M' \quad [2.13]$$

de la ecuación anterior se deduce que cada componente de M' es la combinación lineal de las componentes de cualquier modelo de M, solución del sistema. Sólo en el caso de que R=I, la solución es única, y para el caso en que p=m, esto se cumple siempre.

Las observaciones (U<sup>p</sup>), pueden examinarse definiendo la **Matriz Densidad de Información (Q)**, es una matriz n x n, siendo n el número de registros utilizados. Esta matriz describe cómo ajustan los cálculos a los datos, y cómo pueden ser resueltos independientemente los datos. Se define como:

$$[Q]_{n,n} = [A]_{n,5} [H]_{5,n} \quad [2.14]$$

La matriz de densidad de información, no depende de los valores de observación, sino de la distribución y tipo de datos considerados, y también del modelo pero débilmente. Si  $Q=I$  los datos calculados y los observados coinciden, y el error de cálculo es cero. Si  $Q \neq I$ , el error de cálculo no será cero (Menke, 1984). Si consideramos una fila de  $Q$  y ésta contiene todos sus elementos ceros excepto uno, el elemento de la matriz  $m_{ij}$  que corresponde a esa fila, puede calcularse exactamente.

La **Matriz de Covarianza (C)** se define de tal forma que permite obtener a partir de los elementos de su diagonal principal, las varianzas de cada uno de los parámetros hallados tras la inversión. La definición de dicha matriz es (Menke, 1984):

$$[C]_{5 \times 5} = \sigma^{-2} H [\text{cov} U^P] H^T = [H]_{5 \times m} [H^T]_{m \times 5} \quad [2.15]$$

La segunda igualdad de la ecuación anterior sólo es posible si los datos no están correlacionados y tienen varianza unidad. Si suponemos acertada la inversión, y en ausencia de restricciones lineales, la solución puede escribirse como:

$$M_{est} = H U^P \quad [2.16]$$

La **Matriz de Correlación (D)**, se define a partir de los elementos de la matriz de covarianza de tal forma que:

$$D_{ij} = \frac{C_{ij}}{(C_{ii} C_{jj})^{1/2}} \quad \begin{array}{l} i = 1,5 \\ j = 1,5 \end{array} \quad [2.17]$$

Los elementos de esta matriz nos dan idea de como están de correlacionados los diferentes parámetros calculados.

El método descrito, es un método simple para resolver el problema inverso aquí presentado, que está basado en la medida del tamaño o longitud de los elementos de la matriz  $(M)_{5 \times 1}$  estimado o calculado. Este método resuelve los problemas sobredeterminados completamente y tiene como característica que la matriz de resolución tiende a ser la identidad ( $R=I$ ), es decir, tiende a resolver perfectamente el modelo.

### 2.3. Cálculo del patrón de radiación y función temporal de la fuente sísmica

A partir de las componentes del tensor momento sísmico obtenidas  $m_{ij}(t)$  (ecuación [2.11]), calculamos los parámetros que definen el mecanismo focal de un terremoto. En nuestro método y ya que se va a considerar fija la profundidad, los dos parámetros fundamentales que van a definir el mecanismo focal de un terremoto son: la función temporal de la fuente sísmica (STF), y el patrón de radiación.

La función temporal de un terremoto, se define como el tiempo durante el cual se produce la ruptura en el foco sísmico, es la tasa temporal de radiación del momento ( $M(t)$ ). En este estudio, se ha considerado que todas las componentes del tensor momento sísmico tienen una historia temporal conjunta y común para todas. Deben tener la misma variación temporal (forma) y el tiempo de ruptura (duración) deber ser común. Esto implica que al representar las componentes del tensor momento sísmico juntas deben unirse en un punto, este punto de unión va a definir la duración total de la función temporal. Su forma vendrá dada por la envolvente, la variación de las componentes del tensor momento sísmico con el tiempo, hasta el instante de corte.

En la Fig. 2.1 se muestra un ejemplo de las componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión, observándose la misma variación temporal para todas. Su duración es de 0.30s, y su forma es un triángulo perfecto. Dichas componentes han sido obtenidas utilizando sismogramas sintéticos de la componente vertical de la onda P generados utilizando una función temporal triangular de 0.30s de duración.

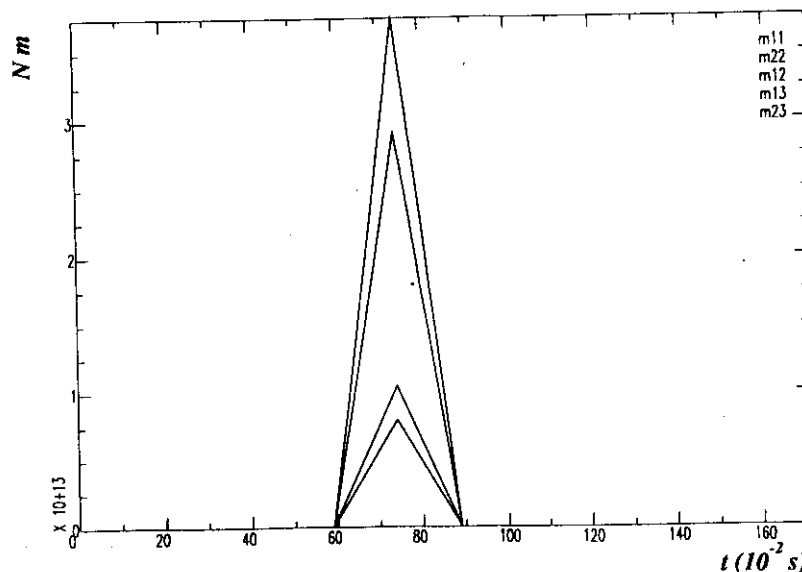


Fig. 2.1. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión de sismogramas

### 2.3.1. Descomposición del tensor momento sísmico. Cálculo del patrón de radiación

El patrón de radiación que va a caracterizar un terremoto, se va a calcular en este estudio a partir del primer máximo de las amplitudes de cada una de las componentes del tensor momento sísmico, que debe ser obtenido en el mismo instante para todas ellas (Sileny et al., 1992). En la Fig. 2.1 se muestra un ejemplo de las componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión, en el que la función temporal es de 0.30s y se observa que la amplitud máxima de todas las componentes se produce a 0.15s del inicio del terremoto. Estas amplitudes máximas permiten obtener el tensor momento sísmico.

Tras la obtención del tensor momento sísmico, se realiza su descomposición espectral, determinándose sus autovalores y autovectores. A partir de dicha descomposición espectral, el tensor momento sísmico se puede descomponer en un parte de doble par (DC) y otra de vector dipolar lineal compensado (CLVD, capítulo 1), que está basada en el método de Strelizt (1989).

Para hacer la descomposición espectral, se ha utilizado la transformación Householder (Press et al., 1987). Con la descomposición espectral se diagonaliza el tensor momento sísmico ( $m_{ij}$ ), se obtienen sus valores propios ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ,  $m_{ij}^{diagonal}$ ), y sus autovectores ( $V_i$ ). Esta matriz diagonal ( $m_{ij}^{diagonal}$ ) a su vez se puede re-escribir en dos matrices diagonales, una que corresponde a la parte de DC ( $m_{ij}^{DC}$ ), donde el autovalor mayor representa al eje de tensión (T), el autovalor menor corresponde al eje de presión (P) y el autovalor intermedio representa al eje nulo (Z), y otra matriz que corresponde a la parte de CLVD ( $m_{ij}^{CLVD}$ ). Ambas matrices diagonales ( $m_{ij}^{DC}$ ,  $m_{ij}^{CLVD}$ ) tienen su traza nula, ya que su suma es una matriz ( $m_{ij}^{diagonal}$ ) cuya diagonal principal es nula también.

La descomposición de la matriz del tensor momento sísmico ( $m_{ij}$ , obtenido a partir de las amplitudes máximas de las componentes del tensor momento sísmico) descrita en el párrafo anterior que se ha realizado en este trabajo es:

$$m_{ij} = (V_i^T) m_{ij}^{diagonal} (V_i) \Rightarrow m_{ij}^{diagonal} = m_{ij}^{DC} + m_{ij}^{CLVD} \quad [2.18]$$

Las matrices de la parte de doble par, de CLVD y la matriz diagonalizada en función de los autovalores del tensor momento sísmico quedan:

$$\begin{pmatrix} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\sigma_2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma_2}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad [2.19]$$

La primera matriz ( $m_{ij}^{DC}$ ) representa el mecanismo focal de un DC puro, la segunda un mecanismo focal de CLVD ( $m_{ij}^{CLVD}$ ) y la tercera matriz ( $m_{ij}^{diagonal}$ ) es la obtenida tras la diagonalización del tensor momento sísmico original, donde  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Como se observa para el caso de un DC puro, el determinante del tensor momento sísmico es 0, mientras que para el caso de un mecanismo focal que no es doble par puro, ésta condición no se cumple. Según Vasco (1990) el valor determinante puede ser interpretado como una medida del alejamiento del mecanismo focal de las dos dimensiones.

La parte de doble par del tensor sísmico original, se puede expresar en función de sus autovalores que son  $\lambda^{DC} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ , de tal forma de la matriz de doble par queda expresada como  $(\lambda^{DC}, 0, -\lambda^{DC})$ . El momento sísmico escalar que posee la parte de DC, se calcula a partir de los autovalores del tensor momento sísmico inicial (Strelitz, 1989):

$$M_o = \lambda^{DC} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad [2.20]$$

Los ejes de Tensión y Presión, se calculan a partir de los autovectores obtenidos tras la descomposición espectral efectuada en la matriz del tensor momento sísmico ( $m_{ij}$ ). Los autovectores se definen como  $V_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$  con  $i=1,3$  (donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  representan los cosenos directores), y la definición de T y P se efectúa a partir de sus componentes de la siguiente forma (Vasco, 1990):

$$\begin{aligned} \theta_i &= \arccos \gamma_i \\ \Phi_i &= \arctg \left( \frac{\beta_i}{\alpha_i} \right) \end{aligned} \quad [2.21]$$

donde  $\theta_i$  representa el ángulo que forman los ejes con la vertical y  $\Phi_i$  es el acimut, ángulo que forman los ejes con el norte (Fig. 1.3). Con  $i=1$  para el eje T,  $i=3$  eje P, e  $i=2$  eje Z.

De la parte correspondiente a no-Doble Par en el tensor momento sísmico diagonalizado ( $m_{ij \text{ diagonal}}$ ), se puede hallar el porcentaje de CLVD de un terremoto (Vasco, 1990; Campos, 1995) definido como:

$$\varepsilon = \%CLVD = \frac{\sigma_2}{\max(|\sigma_1|, |\sigma_3|)} \quad [2.22]$$

### 2.3.2. Errores en las magnitudes calculadas

Un problema importante es determinar las estimaciones de los errores cometidos al realizar los cálculos de las diferentes magnitudes obtenidas tras la inversión. Los errores de los autovalores ( $\sigma_i$ ) y los autovectores ( $V_i$ ) del tensor momento sísmico (calculados a partir de su descomposición espectral), se definen a partir de los errores de las componentes del tensor momento sísmico ( $\delta M$ ) (Strelizt, 1989):

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_i &= V_i^T \delta M V_i \\ \Delta V_i^j &= \frac{V_j^T \delta M V_i}{(\sigma_j - \sigma_i)} \end{aligned} \quad [2.23]$$

Los errores del momento sísmico escalar ( $M_o$ ), se obtienen a partir de la definición del momento sísmico escalar derivando la ecuación [2.20]:

$$\Delta M_o = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3}{2} \quad [2.24]$$

Para los ejes de Presión y Tensión, los errores cometidos se calculan a partir de los autovectores ( $V_i = \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ), y de la definición de los ejes de esfuerzos, ecuación [2.21]:

$$\Delta\theta_i = \frac{\Delta\gamma_i}{\text{sen}\theta_i} \quad [2.25]$$

$$\Delta\Phi_i = \frac{1}{(1 + \text{tg}^2\Phi_i)\alpha_i} (\Delta\beta_i + \text{tg}\Phi_i \Delta\alpha_i)$$

Para el porcentaje de dipolo vectorial lineal compensado (CLVD), los errores cometidos al calcularlo se definen (suponiendo que máximo  $(|\sigma_1|, |\sigma_3|) = \sigma_1$ ) según:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \left( \frac{\Delta\sigma_2}{\sigma_2} + \frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1} \right) * 100 \quad [2.26]$$

## 2.4. Representación gráfica del tensor momento sísmico

En el capítulo 1 se ha comentado que la representación gráfica del mecanismo focal de un terremoto varía según se trate de un doble par o corresponda a otro tipo de mecanismo focal. Las superficies nodales del tensor momento sísmico se puede representar para un mecanismo focal cualquiera como un hiperboloide según se muestra en la Figura 2.2 (Riedsel and Jordan, 1989):

$$\sigma_1 x^2 + \sigma_2 y^2 + \sigma_3 z^2 = 1 \quad [2.27]$$

donde  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  y representan los autovalores obtenidos de la descomposición espectral del tensor momento sísmico calculado tras la inversión, matriz  $m_{ij}$  diagonal (ecuaciones [2.18], [2.19]).

Si suponemos que la traza del tensor es nula (como se ha supuesto en este estudio), el autovalor intermedio se define como  $\sigma_2 = -(\sigma_1 + \sigma_3)$ , con lo que la ecuación [2.27] queda:

$$\sigma_1 x^2 - (\sigma_1 + \sigma_3) y^2 + \sigma_3 z^2 = 1 \quad [2.28]$$

La ecuación anterior posee dos soluciones:

- 1 - dos valores propios positivos y uno negativo
- 2 - un valor propio positivo y dos negativos

que se representan en la Figura 2.2a, 2.2b. Estas dos soluciones representan un mecanismo focal que no posee cambio de volumen (traza nula). Si se representan sobre la esfera focal estas dos soluciones, esta va a quedar dividida en tres partes, separadas por la proyección de las ramas del hiperboloide.

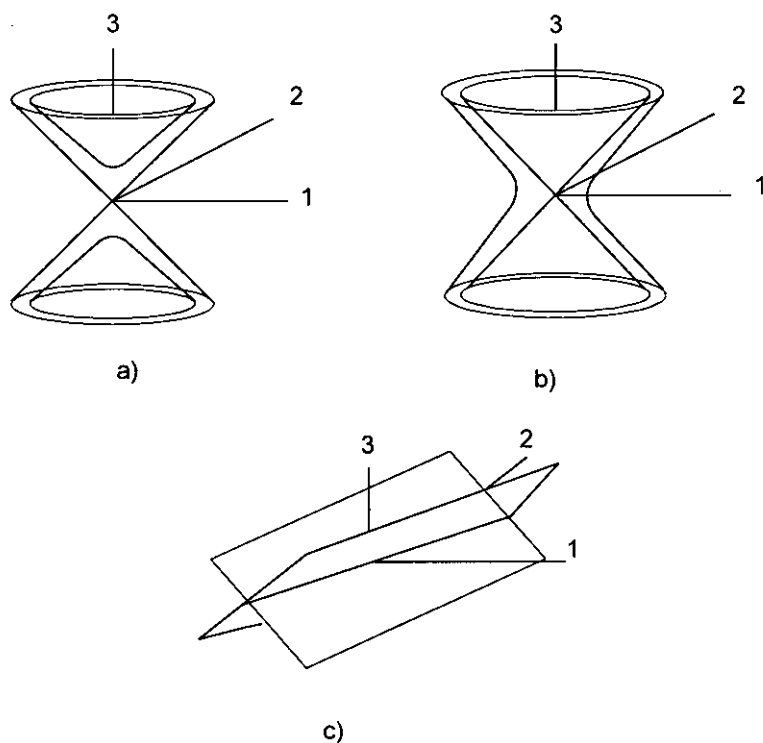
Para un mecanismo focal de doble par puro, el autovalor intermedio es nulo ( $\sigma_2 = 0$ ) y como la traza es nula,  $\sigma_1 = -\sigma_3$ , la ecuación [2.27] queda reducida a:

$$\sigma_1(x^2 - z^2) = 0 \quad [2.29]$$

cuyas dos soluciones son dos planos Fig. 2.2c y se muestran en la siguiente ecuación:

$$x = \pm z \quad [2.30]$$

Estos planos ortogonales (Fig. 2.2c) proyectados sobre la esfera focal son círculos máximos, los planos de falla, que representan los puntos cuyas amplitudes son nulas y dividen la esfera focal en cuatro cuadrantes alternativos de dilataciones y compresiones



**Figura 2.2.** Representación gráfica del tensor momento sísmico

## 2.5. Descripción del algoritmo desarrollado

A partir del desarrollo matemático expuesto en este capítulo, se ha desarrollado un algoritmo que obtiene las componentes del tensor momento sísmico, que permiten estudiar los procesos que se producen en el foco de un terremoto. Los datos utilizados son sismogramas digitales de velocidad de la componente vertical de la onda P directa de terremotos de profundidad intermedia. Para la obtención de dichas componentes, se deben eliminar los efectos ajenos a la fuente sísmica presentes en dichos registros.

El primer paso que se debe realizar para obtener las componentes del tensor momento sísmico, y previo a cualquier tratamiento de las señales sísmicas, es localizar el inicio de la primera llegada de la onda P directa, que se produce en cada estación. Es esencial que el primer punto de inversión de cada registro, corresponda a tiempo y amplitud cero, ya que va a influir decisivamente en los resultados de toda inversión que se vaya a realizar.

El segundo paso a efectuar, es aislar de los registros sísmicos los efectos ajenos a la fuente sísmica, para ello debemos corregir las señales sísmicas por el efecto del instrumento y de la atenuación. Las correcciones se realizan utilizando las señales originales sin ningún tipo de filtro.

Se han desarrollado varios programas en FORTRAN que permiten eliminar dichos efectos de los registros:

1. Programa LEES. Cambia el formato de las señales de ASCII a formato SAC.
2. Programa SAC (Seismic Analysis Code). Se ha utilizado este algoritmo para corregir en el dominio de frecuencias el sismograma por el efecto del instrumento y de la atenuación y volver al dominio de tiempo.
3. Programa SACPC. Cambia de formato SAC a formato ASCII. Este programa adapta el formato de las señales corregidas por el efecto del instrumento y la atenuación, al formato del algoritmo de inversión.
4. Programa PCESPAÑA2-NEW. Dicho algoritmo elimina los efectos de expansión geométrica y el efecto de la superficie libre de la Tierra de las señales sísmicas, y permite obtener la solución del sistema lineal [2.5], [2.7] que se resuelve por estar sobredeterminado mediante las ecuaciones [2.10], [2.11]. Obtiene la evolución con el tiempo de las componentes del tensor momento sísmico, y se calcula los errores de dichas componentes.  
A partir de la evolución temporal de las componentes del tensor momento sísmico, se calcula la función temporal y el patrón de radiación, según se ha descrito en la sección 2.3.
5. Programa TENSOR. Realiza la descomposición espectral, utilizando los valores de la máxima amplitud del tensor momento sísmico y se obtienen sus autovalores y autovectores. A partir de la ecuación [2.18] se obtiene la parte del mecanismo focal que corresponde a un modelo de ruptura de doble par de fuerzas (DC) y un dipolo lineal compensado (CLVD), el momento sísmico escalar, los ejes de Tensión, ejes de Presión y el porcentaje de CLVD. Mediante las varianzas de las componentes del tensor momento sísmico, se calculan los errores de todos los parámetros obtenidos con este algoritmo, según se indica en la sección 2.3.2.
6. Programa CLVD. Dibuja sobre la esfera focal, las superficies nodales de mecanismo focal de no doble par y de doble par (planos de falla), los ejes de Tensión y Presión, y calcula el porcentaje de aciertos en polaridades de las señales.

Por lo tanto, el método desarrollado permite obtener:

- evolución temporal de las componentes del tensor momento sísmico,
- función temporal de la fuente sísmica,
- patrón de radiación: parte de DC y CLVD,
  - eje de Tensión y Presión, momento sísmico escalar, porcentaje de CLVD
- errores de cada parámetro calculado.

El algoritmo no calcula la profundidad del terremoto, ya que ésta se ha considerado fija en el proceso de inversión.



## Capítulo 3

### Aplicación del método a casos teóricos

#### 3.1. Análisis de los casos teóricos

Para comprobar el funcionamiento del método de inversión descrito en el capítulo anterior, éste se ha aplicado a varios casos teóricos. La ventaja de utilizar sismogramas teóricos es que se conocen previa y exactamente los parámetros que describen el mecanismo focal del terremoto, que son los parámetros que se van obtener tras la inversión: función temporal de la fuente (source time function, STF), y patrón de radiación. Por lo tanto, permite comprobar la eficacia del método de inversión.

El método desarrollado, sólo utiliza la onda P directa para obtener las componentes del tensor momento sísmico por inversión de los sismogramas, sin introducir ningún tipo de ruido en el registro, ni de otras fases como pP y sP, de tal forma que la inversión no se vea afectada por la llegada de otras fases. Esto es posible ya que va a aplicarse a terremotos de profundidad intermedia en los que llega suficientemente separada la onda P directa de las ondas pP y sP.

Para generar los sismogramas teóricos que se van a utilizar para realizar la inversión, se han supuesto conocidos los siguientes parámetros que caracterizan un terremoto:

- función temporal de la fuente sísmica ( $f(t)$ ): 0.30s de duración, y forma de triángulo isósceles
- profundidad del foco ( $h$ ) a 68 km, lo que corresponde a una profundidad intermedia.
- patrón de radiación utilizado corresponde a mecanismo focal: de desgarre, normal y vertical
- factor de calidad ( $Q$ ) en todas las estaciones: varía entre 300 y 600.

El proceso seguido para realizar la inversión de los sismogramas sintéticos ha sido el siguiente:

- generación de los registros sísmicos teóricos digitales que incluyen el efecto del instrumento  $I(w)$  y la propagación  $Q(w)$ ,
- selección de la longitud de registro que se desea invertir ,que debe contener sólo la llegada de la onda P directa
- corrección de los registros por el instrumento ( $I(w)$ ),
- corrección de los registros por la atenuación anelástica ( $Q(w)$ ),
- inversión de los sismogramas: obtención de las componentes del tensor momento sísmico.

Para generar los sismogramas teóricos, se ha utilizado una versión modificada del programa creado por Deschamps (Deschamps et al., 1980). Las características fundamentales del algoritmo que genera los sismogramas sintéticos están descritas en Buforn et al. (1997), si bien en el presente estudio se ha adaptado el algoritmo a terremotos cuyo mecanismo focal no corresponde a un doble par de fuerzas, por lo tanto en lugar de utilizar los ejes de esfuerzos para generar el patrón de radiación, se utilizan las componentes del tensor momento sísmico según las ecuaciones [1.24, 2.2 y 2.3]

Se ha seleccionado una ventana de inversión de 5.12s, con un intervalo de tiempo de 0.01s lo que representa un total de 512 puntos, una longitud suficiente de registro para el estudio de la onda P directa.

La respuesta instrumental ( $I(w)$ ), utilizada para generar los datos teóricos corresponde a aparatos Kinematics, ya que éste es el tipo de instrumentos empleado en la Red Sísmica Nacional del Instituto Geográfico Nacional (los terremotos reales que van a estudiarse con posterioridad, han sido registrados con este tipo de instrumento). El operador lineal que describe este tipo de instrumentos es el producto de dos funciones que expresan la transferencia del instrumento en velocidad (Tejedor y García, 1993):

$$I(w) = H_1(w) \cdot H_2(w) = \frac{s^5}{\prod_{i=1}^5 (s - s_i)} \frac{10^8 A_o}{\prod_{i=1}^5 (s - s_i)} \cdot K$$

donde  $s_i$  son los polos del instrumento, y  $K$  representa la constante de normalización cuya expresión es:

$$K = \frac{1}{1.22} G_o \frac{R_x}{R_c + R_x} 10^{\frac{(90-A)}{20}} \quad [3.2]$$

donde  $s = \sqrt{-1}$ ,  $R_x$  es la resistencia al amortiguamiento,  $R_c$  es la resistencia de la bobina sensora,  $A$  es la atenuación del amplificador de campo,  $G_o$  es la constante de transducción.

El factor de calidad ( $Q(w)$ ) se conoce en todos los registros teóricos, y esto permite eliminar el efecto de la atenuación anelástica de los mismos. Para efectuar la corrección de la atenuación anelástica en las señales utilizadas, se ha empleado la ecuación [1.25], y el operador lineal que representa dicho efecto es el siguiente:

$$F(w, \frac{T}{Q}) = \exp(-\frac{wT}{2Q}) \quad [3.3]$$

$$F(f, \frac{T}{Q}) = \exp(-\frac{\pi f T}{Q})$$

En la primera parte de la ecuación [3.3] el operador lineal que representa la atenuación anelástica ( $F(\omega, T/Q)$ ) está en función de la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi f$ ), en la segunda dicho operador ( $F(f)$ ) está en función de la frecuencia. En esta ecuación, T representa el tiempo de recorrido observado, realizado por la onda en su viaje a través de la Tierra.

A partir de la ecuación [3.3] datos regionales la señal sísmica se corrige sólo en amplitud ( $\text{ampl.}(f)$ ), esto se puede expresar como:

$$\text{Ampl}(f) = \text{Ampl}(f) / \exp\left(-\frac{\omega T}{2Q}\right) \quad [3.4]$$

donde f es la frecuencia ( $f = 2\pi/\omega$ ), Q es el factor de calidad. La corrección de la señal por la atenuación anelástica, actúa como un filtro sobre la misma, de tal forma el factor de calidad utilizado puede adelantar o retardar la señal, por lo tanto debe ser elegido de tal forma que de la señal corregida sólo se modifique en amplitud, y quede con la misma forma de onda, antes y después de eliminar la atenuación anelástica, y sin producir adelantos ni retardos en la señal.

A partir de los sismogramas sintéticos generados, una vez efectuadas todas las correcciones sobre ellos, se procede a realizar la inversión utilizando el algoritmo creado. De la inversión se obtienen las componentes del tensor momento sísmico, a partir de las cual se obtiene la fuente sísmica: patrón de radiación y la fuente temporal, que ha generado el terremoto. En todo el proceso de inversión la profundidad del evento permanece fija ya que se ha considerado un parámetro previamente conocido.

### 3.2. Inversión de sismogramas sintéticos

Se quiere comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo descrito anteriormente, utilizando datos teóricos que corresponden a cada uno de los siguientes tipos de mecanismo focal: normal, vertical y desgarre, con componente de CLVD de 0% (doble par, DC), 15%, y 35%. La función temporal de los casos teóricos es de 0.30 s y una profundidad intermedia de 68 km. Han sido registrados a distancias regionales (100 km.  $<\Delta < 1000$  km.), y el factor de calidad de los sismogramas sintéticos es de 300 para el mecanismo focal normal y de 600 para los mecanismos focales vertical y desgarre. En la Tabla 3.1 se muestran los datos hipocentrales de los casos teóricos así como su mecanismo focal mediante las componentes del tensor momento sísmico, los ejes de esfuerzos de Tensión y Presión, el momento sísmico escalar, el porcentaje de CLVD y la duración de la función temporal de la fuente sísmica.

**Tabla 3.1a.** Datos hipocentrales de los casos teóricos.

Mecanismo focal	Latitud (N)	Longitud (O)	profundidad (km)	Nº estaciones	Factor de calidad
normal 0%					300
normal 15%					300
normal 35%					300
vertical 0%	36.41	2.5	68	10	600
vertical 15%					600
vertical 34%					600
desgarre 0%					600
desgarre 15%					600
desgarre 34%					600

**Tabla 3.1b.** Mecanismo focal de los casos teóricos.

<b>mecanismo focal</b>	<b><math>m_{11}^{(*)}</math></b>	<b><math>m_{22}^{(*)}</math></b>	<b><math>m_{12}^{(*)}</math></b>	<b><math>m_{13}^{(*)}</math></b>	<b><math>m_{23}^{(*)}</math></b>	<b>Eje T (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Eje P (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Mo<sup>(*)</sup></b>	<b>CLVD (%)</b>	<b>f(t) (s)</b>
<b>desgarre 0%</b>	0.64	-0.64	-0.77	0.02	-0.01	89 335	90 65	1.00	0	0.30
<b>desgarre 14%</b>	-0.89	0.81	-1.68	0.51	-0.76	67 302	89 211	2.08	14	0.30
<b>desgarre 34%</b>	1.07	-0.83	0.28	-0.60	-0.24	69 190	73 93	1.13	34	0.30
<b>normal 0%</b>	0.01	0.95	-0.07	0.02	-0.31	81 274	9 92	1.00	0	0.30
<b>normal 15%</b>	1.04	0.19	-0.02	0.46	0.04	79 359	11 189	1.23	15	0.30
<b>normal 35%</b>	2.16	2.53	-0.22	-0.87	3.18	69 108	21 285	4.92	35	0.30
<b>vertical 0%</b>	-0.02	-0.02	0.02	-0.69	0.72	44 134	46 314	1.00	0	0.30
<b>vertical 14%</b>	-1.51	-0.75	0.01	4.48	-0.14	34 358	56 178	4.86	14	0.30
<b>vertical 33%</b>	1.58	-0.75	4.21	-7.84	7.89	43 149	49 311	11.31	33	0.30

(\*)factor de  $10^{14}$  y expresados en Nm

Se desea estudiar cómo influyen algunos parámetros en los resultados de la inversión. Estos parámetros son:

- Efecto de la atenuación anelástica, es decir, corrección o no de la atenuación anelástica en los sismogramas teóricos.
- Efecto de la profundidad del foco sísmico, es decir, utilización de la profundidad correcta y otras profundidades no correctas.
- Efecto de la variación de la atenuación anelástica entre estaciones: utilización de igual valor de factor de calidad en todas las estaciones en unos casos de la inversión y variándolo de unas a otras estaciones, en otros casos.

Para ello se han realizado varias inversiones, modificado dichos parámetros. Se ha variado la profundidad, eliminado o no de los sismogramas sintético la atenuación anelástica, y variado la atenuación de unas estaciones a otras. Para las diversas inversiones que se han realizado a diversas profundidades, se han recalculado el ángulo de incidencia en el foco y en la estación.

Para cada caso propuesto se han representado sobre la esfera focal la posición de las estaciones, y los sismogramas sintéticos utilizados para realizar la inversión, los mecanismos focales utilizados para generar dichos sismogramas, el factor de calidad de cada estación y la duración de la fuente sísmica. Los resultados obtenidos se muestran agrupados por el tipo de mecanismo focal: desgarre, desgarre, normal y vertical, respectivamente.

La solución numérica se ha representado en tablas, mostrando el patrón de radiación a partir de las componentes del tensor momento sísmico ( $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ ,  $m_{23}$ ), la función temporal del terremoto ( $f(t)$ ), y los ejes de Tensión y Presión, el momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y el porcentaje de CLVD obtenidos tras la descomposición espectral de dichas componentes. Como se han realizado variaciones en las inversiones para comprobar cómo influyen algunos parámetros en los resultados de la inversión, los resultados se presenta en tres grupos: el primero son las soluciones obtenidas cuando se ha corregido el efecto de la atenuación anelástica en los sismogramas, el segundo grupo son las soluciones obtenidas cuando no se ha corregido el efecto de la atenuación anelástica, pero éste es igual para todas las estaciones, y el tercer grupo corresponde a las soluciones obtenidas cuando no se ha corregido el efecto de la atenuación anelástica en los sismogramas y éste varía de unas estaciones a otras.

En las Figuras 3.1-3.54, y Fig. A1.-1.18 del Anexo 1, se han representado todas las soluciones de las inversiones realizadas, mostrando las componentes tensor momento sísmico obtenidas. Para la obtención de la duración de la función temporal de la fuente se ha utilizado el punto de corte entre las cinco componentes del tensor momento sísmico al representarlas juntas. A partir de la máxima amplitud de cada una de las componentes del tensor momento sísmico, se ha obtenido el tensor momento sísmico (mostrado en las tablas) y tras su descomposición espectral se calcula el patrón de radiación. La parte de DC, la parte de CLVD, así como la distribución de las estaciones utilizadas en la inversión sobre la esfera focal, los planos de falla y superficies nodales de la parte de no-doble por del patrón de radiación. Además se ha representado el porcentaje de CLVD (obtenido para cada profundidad para la que se ha realizado la inversión), frente a dicha profundidad.

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada uno de los tres tipos de mecanismo focal elegido, desgarre, normal y vertical, al efectuar las diferentes variaciones en la inversión.

### 3.2.1. Mecanismo focal de desgarre. CLVD = 0%

La orientación del mecanismo focal y la función temporal elegidos para generar los sismogramas sintéticos para el caso de mecanismo focal de desgarre, se muestran en la Tabla 3.1(a). En la Figura 3.1 se ha representado dicho mecanismo focal junto con las estaciones, los sismogramas sintéticos generados, la función temporal de la fuente sísmica de 0.30 s de duración, así como el factor de calidad que es 600 en todas las estaciones y la profundidad. Las inversiones realizadas sin corregir la atenuación anelástica pero variando de unas estaciones a otras se muestra en la Fig. 3.2, en ella el factor de calidad es de 600 salvo para cuatro, en las que se ha cambiado a 300: est4, est5, est7, st10 (representadas con asterisco).

En la Tabla 3.2, se muestran la localización de las estaciones utilizadas en la inversión, mediante el acimut, el ángulo de incidencia en el foco, y la distancia epicentral.

**Tabla 3.2.** Estaciones utilizadas en la inversión de mecanismo focal: desgarre CLVD=0%, desgarre CLVD 34%, normal CLVD 0% y normal CLVD 35%

Estación	Acimut (°)	Ángulo de incidencia en el foco (°)	Distancia epicentral (km)
est5	74	81	178
st11	96	67	121
est2	121	63	105
est6	155	52	72
est4	180	81	259
est3	200	52	72
est7	215	67	121
est8	275	67	121
st10	305	52	72
st12	338	67	121

Mecanismo focal desgarre CLVD= 0%

$h=68$  Km,  $Q=600$

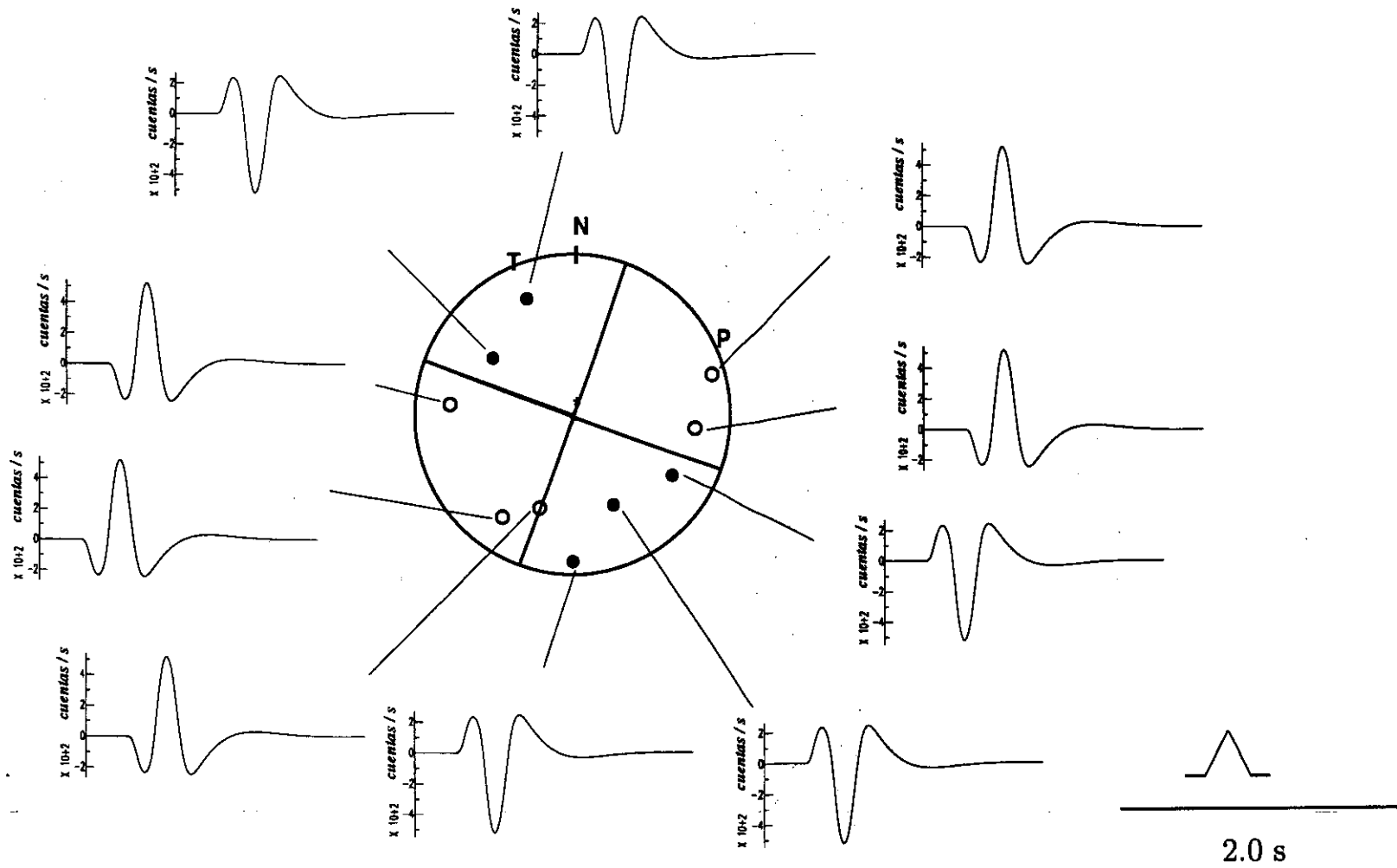


Fig. 3.1. Mecanismo focal de desgarre con  $CLVD = 0\%$ , sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

Mecanismo focal desgarre CLVD= 0%

$h=68$  Km,  $Q=300$ ,  $Q^*=600$

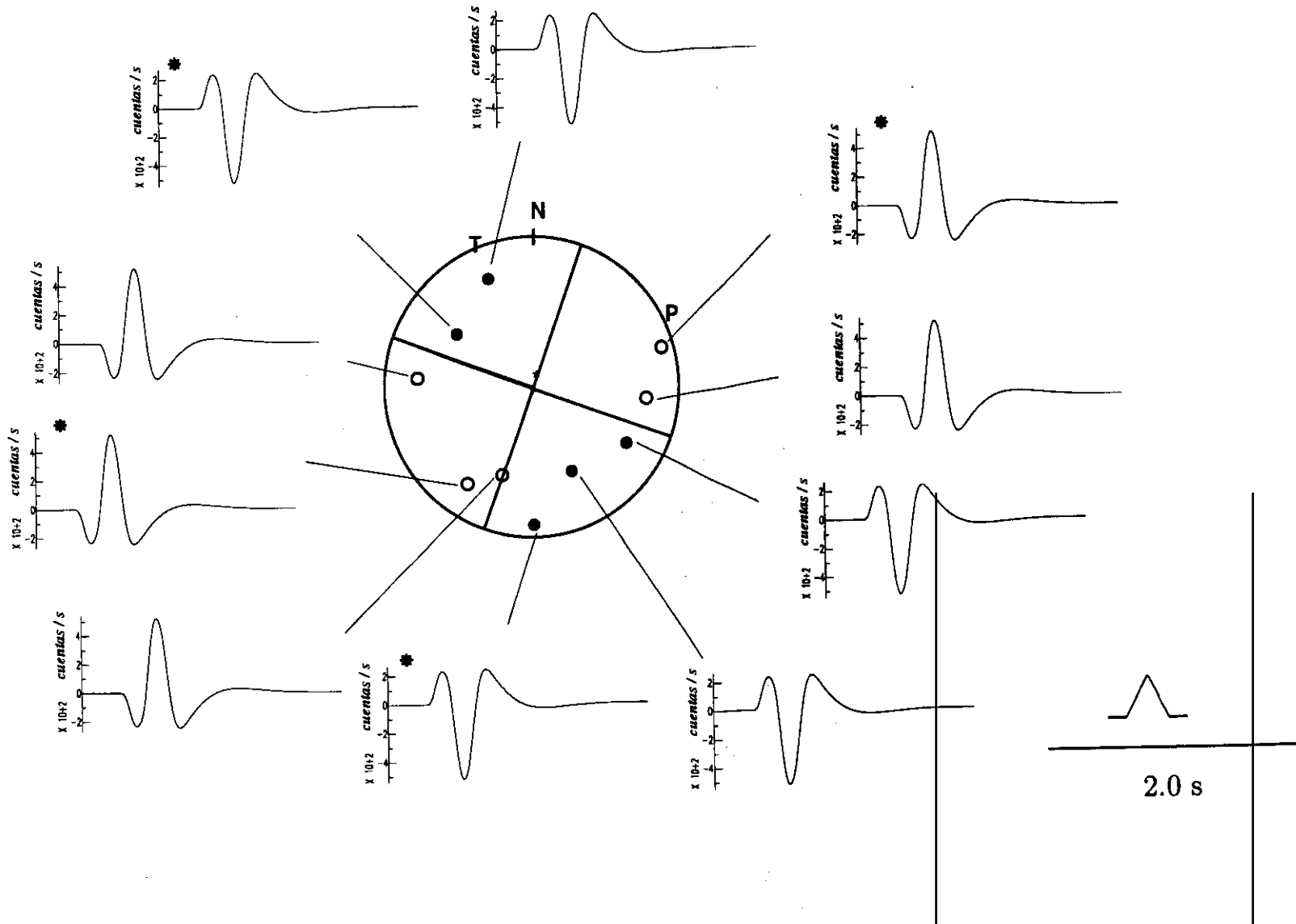


Fig.3.2. Mecanismo focal de desgarre con CLVD =0%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre las estaciones).

A fin de comprobar el efecto de la profundidad ya que este es un parámetro fijo en la inversión, se ha realizado ésta utilizando diversas profundidades entre 58-88 km con un intervalo de 5 km. En la Tabla 3.3, se muestran los resultados de las soluciones obtenidas tras realizar la inversión para este mecanismo focal de desgarre con CLVD del 0%. En la Tabla 3.3a se muestran las componentes del tensor momento sísmico, el porcentaje de CLVD y la función temporal.

**Tabla 3.3a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, y función temporal del caso teórico con mecanismo focal de desgarre con CLVD 0%, obtenidos tras la inversión

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas corrigiendo la atenuación anelástica</b>							
58	2.26±0.02	-2.28±0.01	-2.59±0.02	0.13±0.02	-0.01±0.03	1±1	0.30
63	2.29±0.02	-2.29±0.02	-2.69±0.03	0.08±0.02	-0.02±0.02	1±1	0.30
68	2.36±0.03	-2.36±0.01	-2.81±0.02	0.06±0.02	-0.03±0.02	0±0	0.30
73	2.37±0.03	-2.41±0.03	-2.93±0.02	0.02±0.02	-0.03±0.03	1±1	0.30
78	2.42±0.03	-2.45±0.03	-3.04±0.03	0.003±0.03	-0.02±0.02	1±1	0.30
83	2.44±0.02	-2.53±0.02	-3.14±0.02	0.007±0.02	-0.009±0.02	2±1	0.30
88	2.45±0.03	-2.64±0.03	-3.22±0.03	0.03±0.03	0.02±0.03	4±2	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	1.72±0.04	-1.69±0.04	-1.89±0.03	0.78±0.08	0.59±0.09	5±3	0.30
63	1.93±0.04	-1.86±0.04	-2.11±0.03	0.73±0.07	0.53±0.02	2±3	0.30
68	2.17±0.04	-2.05±0.02	-2.33±0.04	0.69±0.07	0.50±0.07	0±0	0.30
73	2.42±0.05	-2.23±0.05	-2.56±0.04	0.66±0.06	0.46±0.07	3±2	0.30
78	2.70±0.06	-2.41±0.06	-2.81±0.04	0.65±0.06	0.44±0.07	5±2	0.30
83	2.98±0.06	-2.51±0.07	-3.05±0.06	0.68±0.06	0.45±0.06	7±2	0.30
88	3.28±0.07	-2.71±0.08	-3.30±0.05	0.72±0.06	0.47±0.06	10±2	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	1.55±0.04	-1.54±0.04	-1.70±0.03	0.35±0.09	1.16±0.08	18±5	0.30
63	1.73±0.04	-1.70±0.04	-1.89±0.03	0.35±0.08	1.04±0.08	13±4	0.30
68	1.93±0.05	-1.87±0.05	-2.08±0.04	0.34±0.07	0.96±0.07	9±4	0.30
73	2.14±0.05	-2.03±0.06	-2.29±0.04	0.34±0.07	0.90±0.07	5±3	0.30
78	2.37±0.06	-2.19±0.06	-2.50±0.04	0.35±0.06	0.86±0.07	2±2	0.30
83	2.60±0.06	-2.34±0.07	-2.71±0.05	0.38±0.06	0.85±0.06	0±0	0.30
88	2.83±0.07	-2.49±0.08	-2.93±0.05	0.42±0.06	0.85±0.06	3±3	0.30

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 3.3b.** Ejes de esfuerzos mediante  $\theta$  (ángulo que forma con la vertical) y  $\phi$  (acimut), momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos (en polaridades) del caso teórico con mecanismo focal de desgarre con CLVD 0%, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

h (km)	eje de Tensión ( $\theta$ , $\phi$ )	eje de Presión ( $\theta$ , $\phi$ )	Mo(*)	score CLVD	score DC
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
58	88±1 336±0	89±0 246±2	3.44±0.11	100%	100%
63	89±1 335±2	90±3 245±2	3.53±0.12	100%	100%
68	89±1 335±0	89±2 65±0	3.67±0.09	100%	100%
73	89±1 335±1	90±2 65±2	3.78±0.14	100%	100%
78	90±1 334±2	90±2 64±1	3.89±0.12	100%	100%
83	90±1 334±2	90±2 64±2	3.99±0.16	100%	100%
88	90±1 334±3	90±2 244±3	4.09±0.18	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
58	80±0 338±0	73±0 244±0	2.72±0.07	100%	100%
63	81±0 337±1	75±0 245±0	2.98±0.06	100%	100%
68	83±0 337±0	77±0 245±0	3.26±0.06	100%	100%
73	84±0 337±1	78±0 245±1	3.55±0.05	100%	100%
78	84±0 337±0	79±0 246±1	3.88±0.06	100%	100%
83	87±0 337±0	79±1 246±0	4.21±0.06	100%	100%
88	85±0 337±0	79±1 246±0	4.55±0.07	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
58	86±0 155±0	67±0 247±0	2.56±0.07	100%	100%
63	88±0 156±0	69±0 247±0	2.76±0.07	100%	100%
68	89±0 156±0	72±0 246±0	2.99±0.06	100%	100%
73	89±0 156±0	73±0 246±0	3.24±0.06	100%	100%
78	89±0 156±0	75±1 246±1	3.51±0.07	100%	100%
83	90±0 336±2	75±0 246±2	3.79±0.07	100%	100%
88	89±0 336±0	76±0 246±1	4.08±0.08	100%	100%

(\*) multiplicado por  $10^{13}$  expresado en Nm

Las soluciones obtenidas tras las inversiones realizadas para diferentes profundidades entre 58 km. <math>h</math> <math>88</math> km., para los tres tipos de inversiones realizadas, corrigiendo o no la atenuación anelástica en los sismogramas teóricos, se muestran en la Tabla 3.3 y Figuras 3.3-3.6, y en el Anexo 1, Fig. A1.1-A1.3. En dichas soluciones se observan las siguientes características:

- las componentes del tensor momento sísmico son bastante estables y similares entre sí, tanto para el caso en que sí se efectúa la corrección anelástica en los sismogramas sintéticos como en los que no se ha efectuado. Sin embargo, en los casos en que no se ha realizado dicha corrección, las componentes del tensor momento sísmico se redondean y en lugar de dar un triángulo perfecto la solución obtenida es un triángulo redondeado (Fig. 3.4 y 3.5).
- la función temporal de la fuente no varía ni en duración ni en forma entre las diferentes inversiones realizadas, si se efectúa la corrección de la atenuación anelástica, con una solución de 0.30s, y forma de triángulo perfecto. Cuando no se realiza dicha corrección la duración de la función temporal es la correcta 0.30s, pero se redondea y deja de ser un triángulo perfecto.
- el eje P está girado en  $180^\circ$  en acimut en algunas de las inversiones realizadas con respecto al mecanismo focal original, sin embargo en todos los casos el mecanismo focal obtenido es muy similar alejándose como máximo en el caso más desfavorable  $23^\circ$  respecto al original. Para las soluciones obtenidas variando la atenuación anelástica de unas estaciones a otras y sin corregirlas, tanto los ejes T como el P están girados  $180^\circ$ . Dado que se trata de ejes horizontales, el cambio de cuadrante apenas afecta al tipo de mecanismo focal.
- el momento sísmico escalar ( $M_0$ ) obtenido es del mismo orden de magnitud, oscila entre  $2.72-4.55 \times 10^{14}$  Nm, que el inicial magnitud  $1.0 \times 10^{14}$  Nm.
- para la profundidad correcta, 68 km., se ha obtenido la solución más próxima a la real, un 0% de CLVD para los casos en que se ha corregido la atenuación anelástica, y cuando no se corrige pero el factor de calidad es igual en todas las estaciones. A profundidades más superficiales se obtienen valores comprendidos entre 0-10% en ambos tipos de inversión, aumentando el porcentaje de CLVD a medida que nos alejamos de la profundidad correcta para ambos casos. Para las soluciones obtenidas al no corregir la atenuación anelástica y varía de una estaciones a otras, el porcentaje de CLVD es mayor y el mínimo de 0% no se produce para la profundidad correcta sino para profundidad de 83 km., 15 km. más que la correcta (ver Figura 3.6).
- los errores calculados en todas las componentes del tensor momento sísmico y en el momento sísmico escalar son dos órdenes de magnitud menor a los valores obtenidos, en los ejes de Tensión y Presión son de  $2^\circ$  en el peor de los casos, y el porcentaje de CLVD es 5% como máximo, para los tres tipos de inversiones realizadas.

### Mecanismo focal desgarre, CLVD=0%

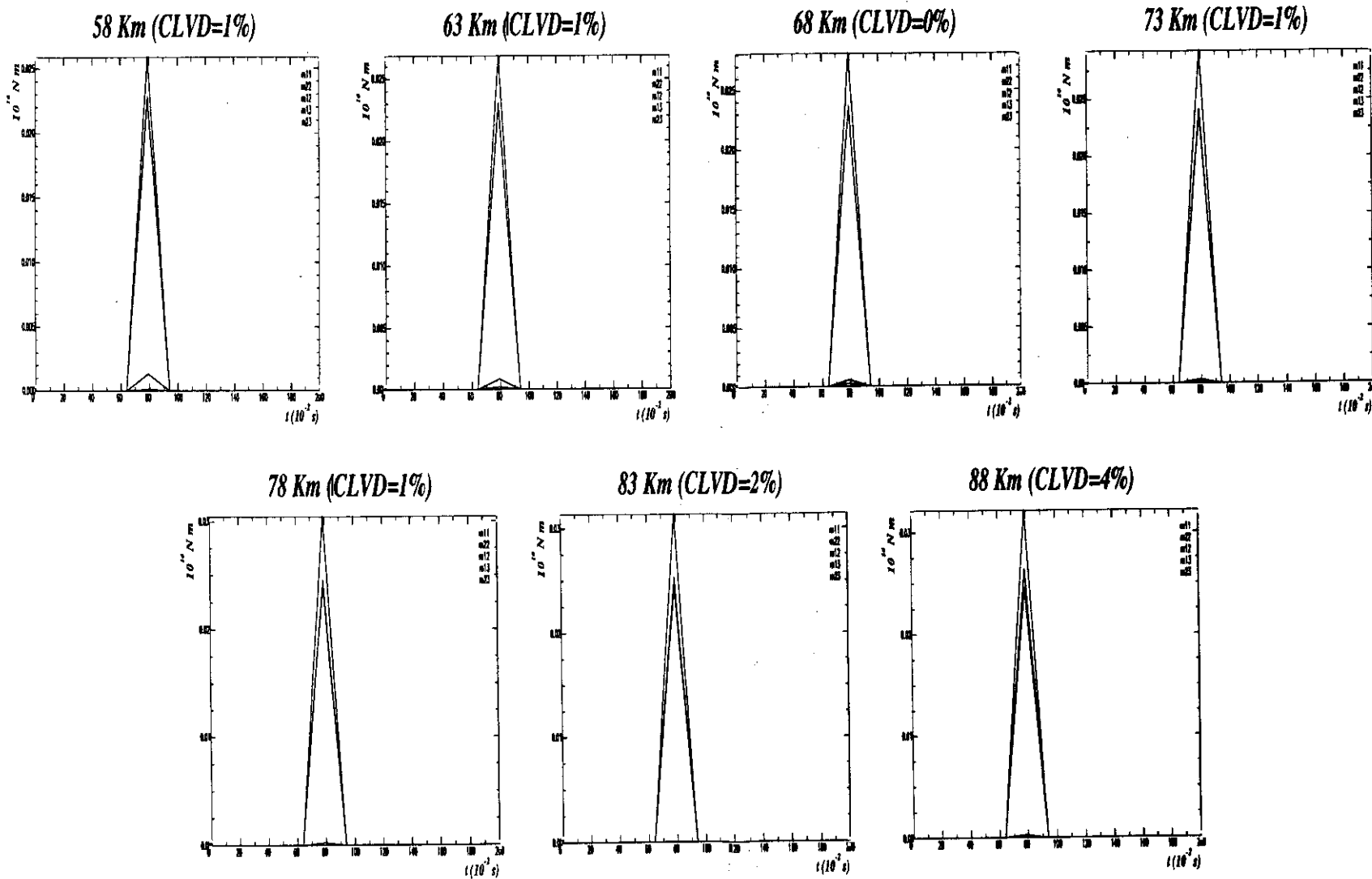


Fig. 3.3. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=0%

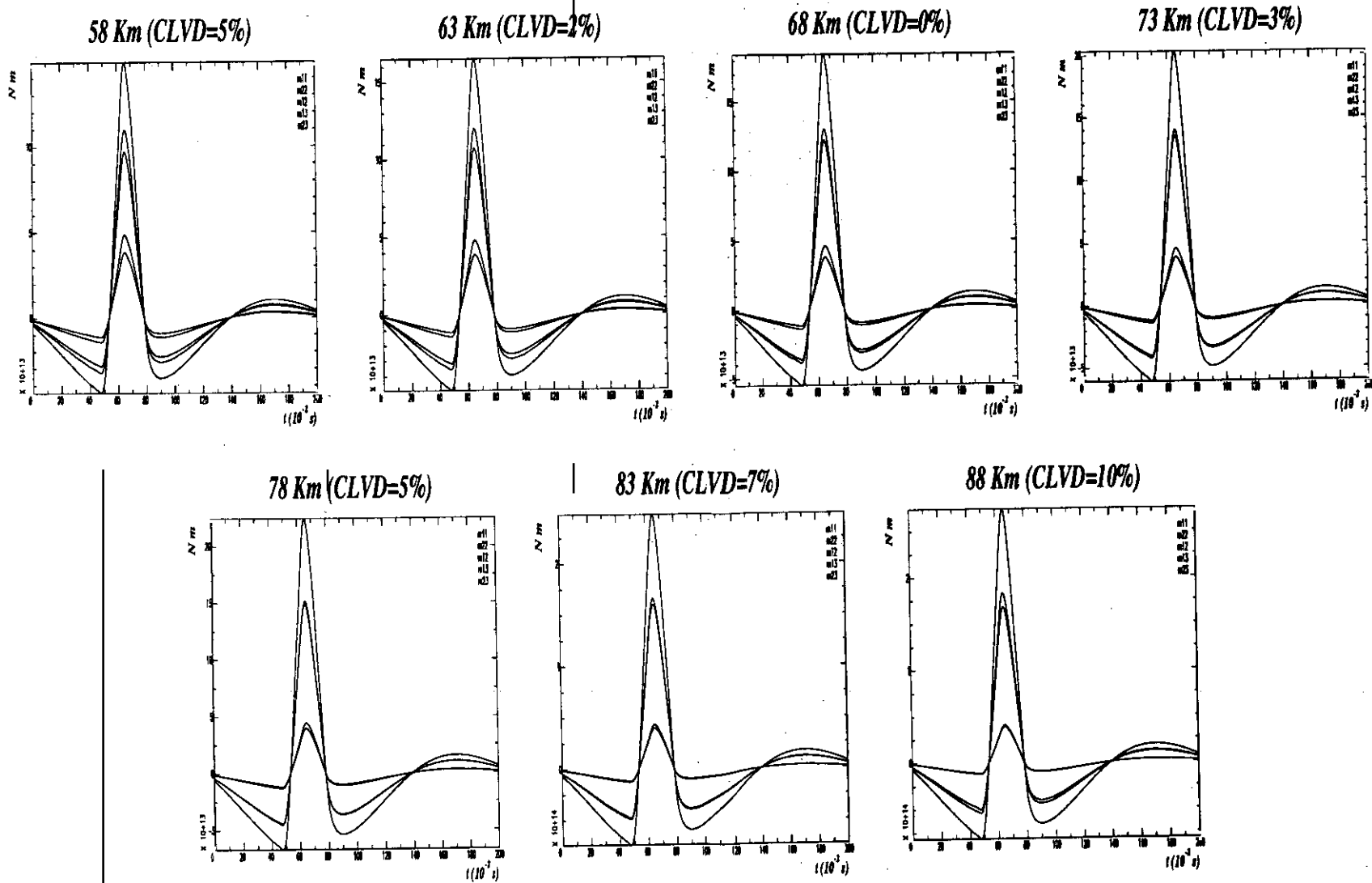


Fig. 3.4. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal desgarre, CLVD=0%

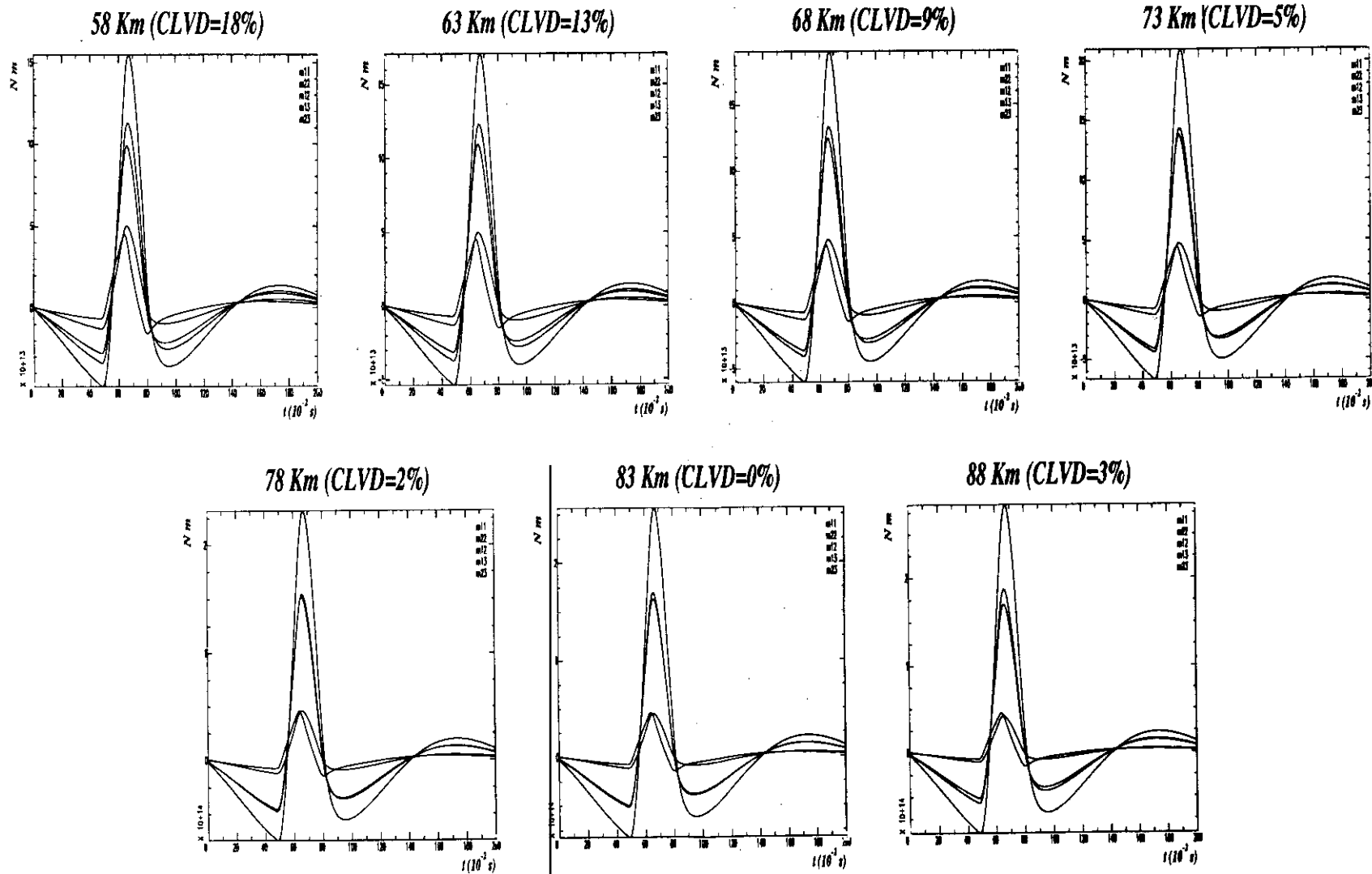


Fig. 3.5. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones)

Mecanismo focal de desgarre. CLVD=0%

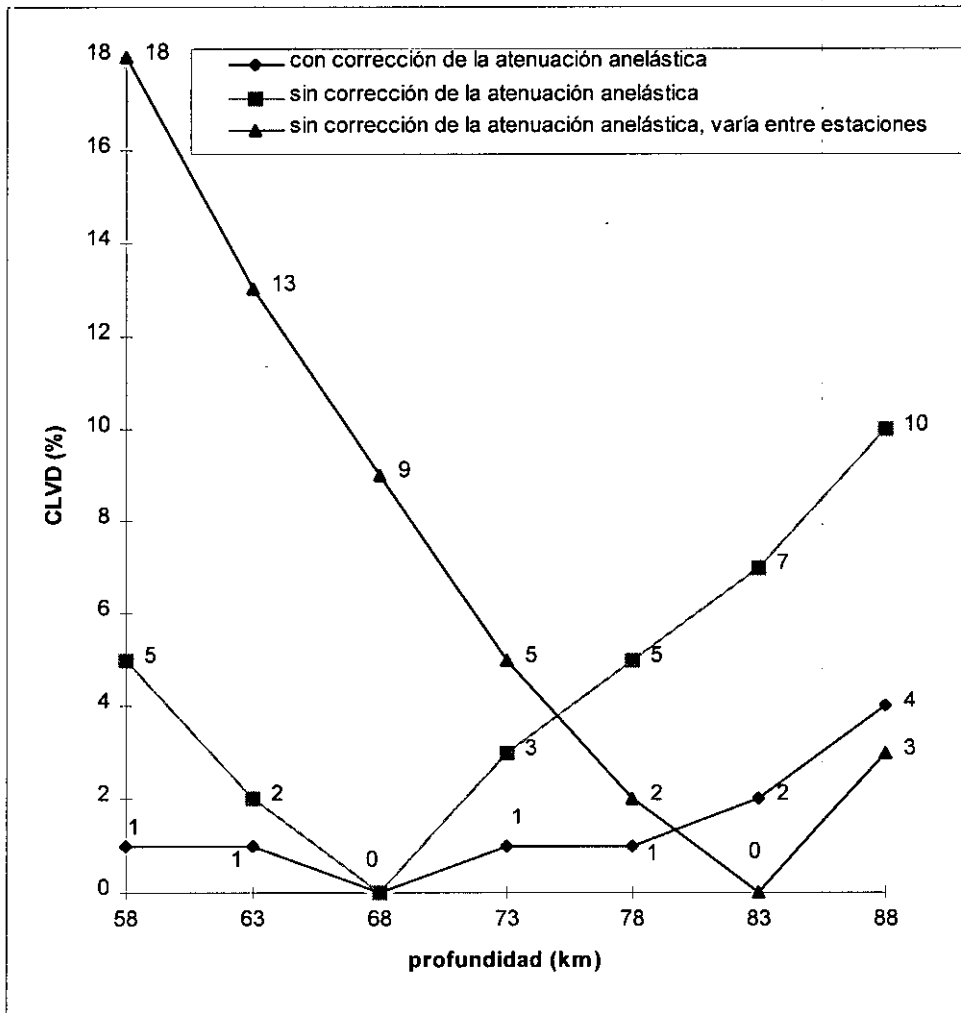


Fig. 3.6. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

### 3.2.2. Mecanismo focal de desgarre. CLVD = 14%

El mecanismo focal de desgarre con un 14% de CLVD seleccionado para generar los sismogramas teóricos, se muestra en la Tabla 3.1, al igual que los datos hipocentrales del caso teórico. En la Fig. 3.7, se han representado las estaciones sobre la esfera focal, los sismogramas sintéticos, los ejes de T, P, los planos de falla, superficies nodales de no doble par, atenuación anelástica 600 en todas las estaciones y la función temporal. En las inversiones realizadas variándola de unas estaciones, que se muestra en la Figura 3.8, en todas es de 600 salvo en sta1, sta2, est8, st11, poseen una atenuación de 300, representadas con un asterisco.

En la Tabla 3.4 se muestra la localización de las estaciones utilizadas en la inversión: su acimut, ángulo de incidencia en el foco y la distancia epicentral.

**Tabla 3.4.** Estaciones utilizadas en la inversión de mecanismo focal de desgarre CLVD=14%.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)
sta1	30	81	259
sta2	60	81	259
st11	96	67	121
sta3	140	75	178
est4	180	81	259
sta5	200	45	58
est7	215	67	121
sta4	245	75	178
est8	275	67	121
st12	338	67	121

Las inversiones realizadas se han efectuado con las variaciones propuestas anteriormente para estudiar los efectos que producen en la inversión: variando la profundidad entre 58-88 km con un intervalo de 5 km, corrigiendo o no la atenuación anelástica y variándola de unas estaciones a otras.

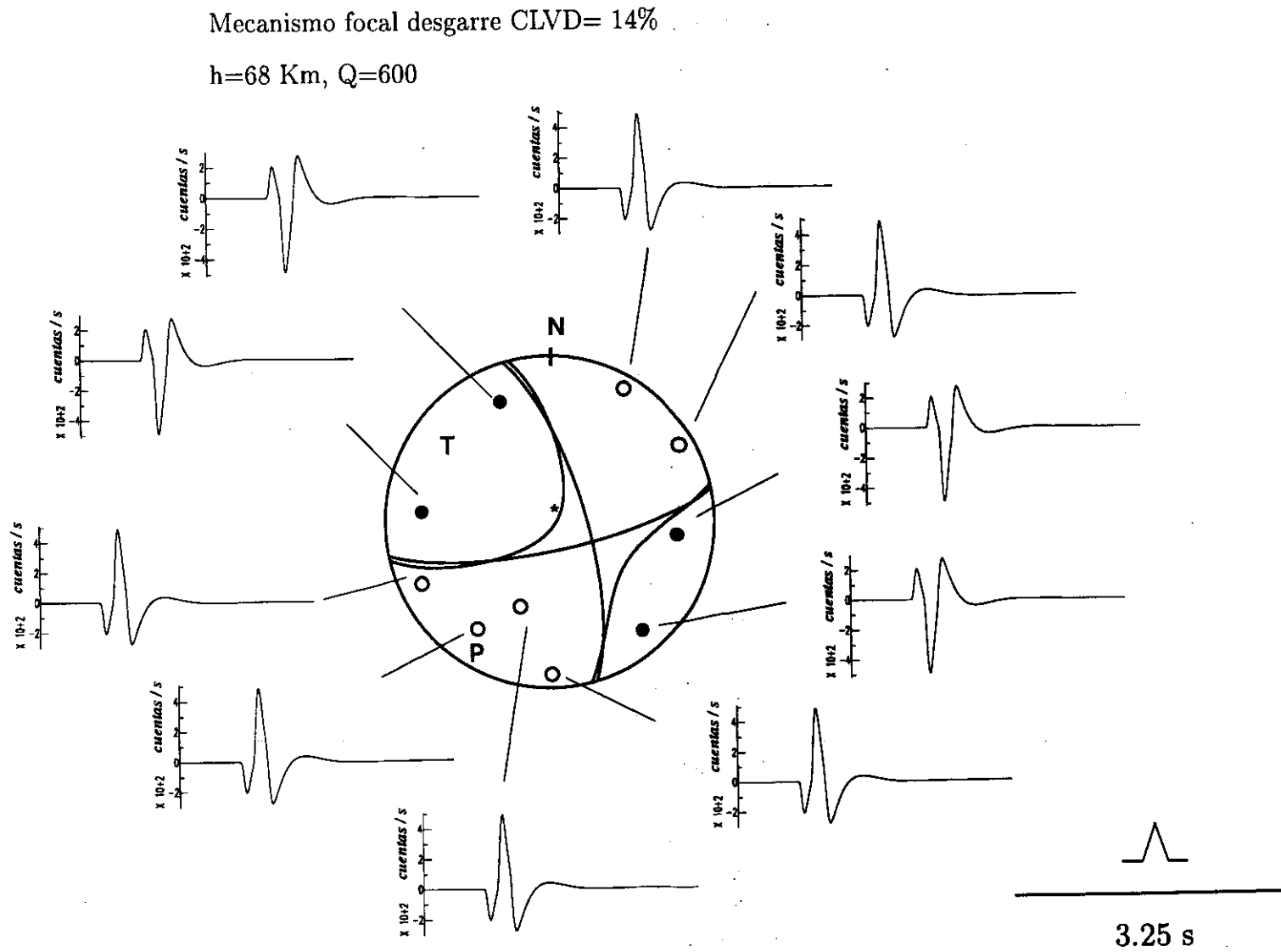


Fig. 3.7. Mecanismo focal de desgarré con CLVD = 14%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

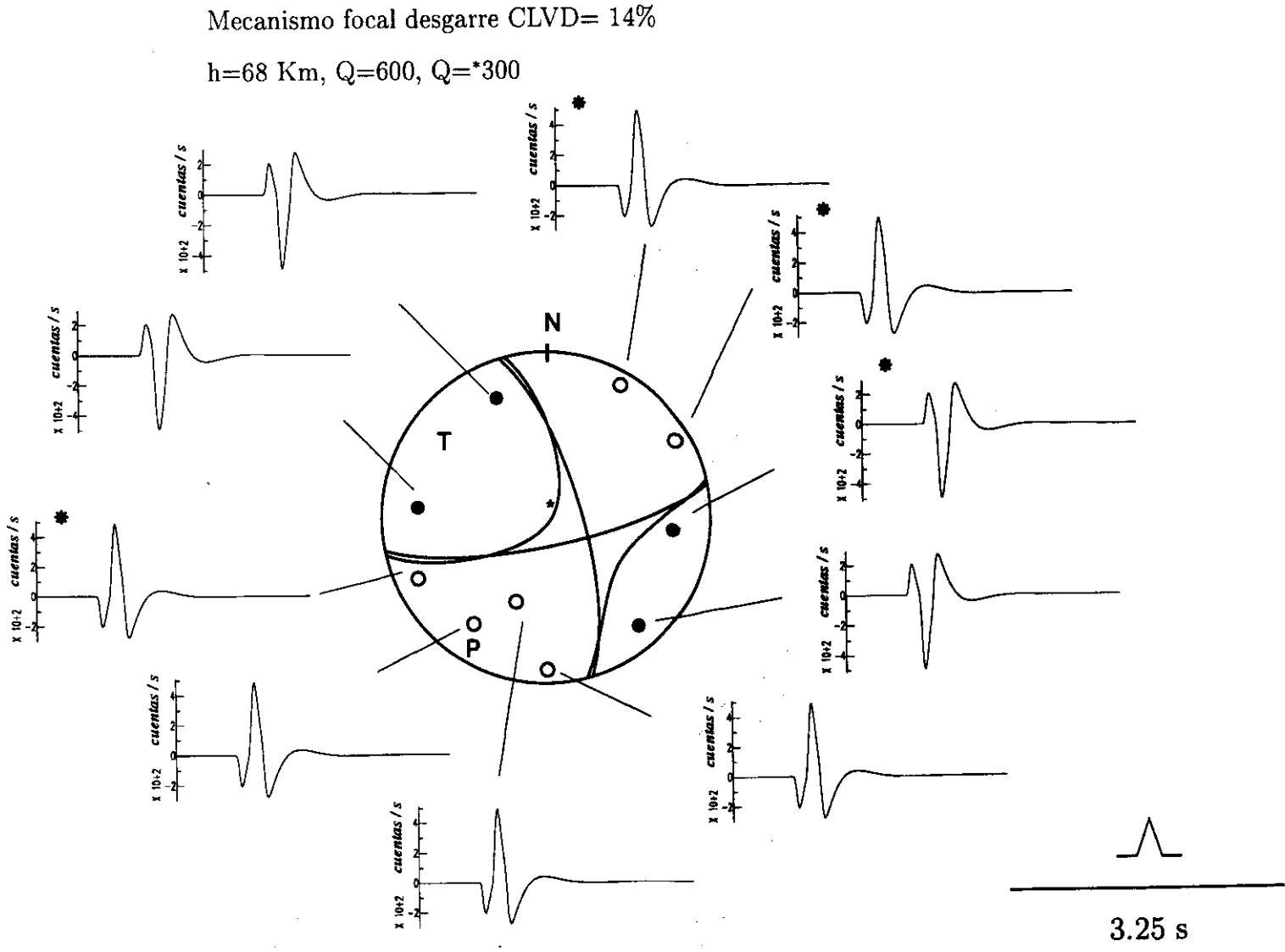


Fig. 3.8. Mecanismo focal de desgarre con CLVD =14%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones)

Las soluciones obtenidas se muestran en la Tabla 3.5, Fig. 3.9-3.11, A1.4-A1.6 del Anexo 1. En la Tabla 3.5a se muestra el valor de la amplitud máxima de las componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, la función temporal. En la Tabla 3.5b se muestran los ejes de esfuerzos,  $M_o$ , y el score para el DC y CLVD. Dichas soluciones presentan las siguientes características:

- las componentes del tensor momento sísmico se ven afectadas por la no corrección de la atenuación anelástica, ya que se redondean en su forma frente a las que si tienen corregidas este efecto de la atenuación que no se redondean y coinciden con las correctas de 0.30s (Figura 3.9, 3.10 y 3.11).
- la duración de la función temporal obtenida es en todos los casos de 0.30s, coincidiendo con la función temporal correcta. Sin embargo, su forma varía según se realice o no la corrección anelástica. Cuando se corrige la atenuación su forma es igual que la correcta, un triángulo perfecto, cuando no se corrige la atenuación, su forma se redondea y no coincide exactamente con la correcta.
- la influencia de la no corrección de la atenuación anelástica es importante en las soluciones obtenidas, ya que las componentes del tensor momento sísmico son menores en el caso de la no corrección. El eje de Tensión se aleja del valor correcto hasta  $13^\circ$  para el ángulo que forma con la vertical,  $2^\circ$  en el acimut, mientras que el eje de Presión se aleja hasta  $10^\circ$  y  $2^\circ$ , respectivamente. Sin embargo, cuando se corrige la atenuación la variación del eje de Tensión es de hasta  $7^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical,  $1^\circ$  en el acimut, mientras que el eje P varía hasta  $2^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical y girado  $180^\circ$  en el acimut. En todas las soluciones obtenidas el porcentaje de aciertos en polaridades es del 100%.
- el momento sísmico escalar es mayor en el caso de la corrección anelástica, que varía entre  $7.60-8.19 \times 10^{14}$  Nm, mientras que cuando no se corrige varía entre  $3.4-5.8 \times 10^{14}$  Nm, frente al valor correcto de  $2.08 \times 10^{14}$  Nm.
- al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad (Fig. 3.12) cuando se corrige la atenuación, el punto crítico se produce en la profundidad correcta 68 km, y el valor de CLVD es el correcto 14%. Sin embargo, el porcentaje de CLVD obtenido se ve afectado por la no corrección de la atenuación anelástica, ya que se aleja hasta 12% del correcto, y el punto crítico se desplaza de la profundidad correcta a una profundidad diferente 15km más profunda y el valor del CLVD no coincide con el correcto.
- los errores calculados son en el caso de los componentes del tensor dos órdenes de magnitud menor que las componentes obtenidas, en los ejes de esfuerzos son de hasta  $2^\circ$ , en el momento sísmico escalar es hasta dos órdenes de magnitud menor, y en el porcentaje de CLVD de hasta 4%.

**Tabla 3.5a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal de desgarre 14% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

<b>h (km)</b>	<b>M<sub>11</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>22</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>12</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>13</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>23</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>CLVD (%)</b>	<b>f(t) (s)</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
<b>58</b>	-3.23±0.05	2.72±0.03	-5.91±0.03	1.86±0.03	-3.63±0.03	18±3	0.30
<b>63</b>	-3.24±0.05	2.83±0.03	-6.02±0.04	1.93±0.03	-3.20±0.03	16±2	0.30
<b>68</b>	-3.26±0.05	2.97±0.03	-6.16±0.03	1.87±0.03	-2.79±0.03	14±3	0.30
<b>73</b>	-3.28±0.06	3.12±0.03	-6.01±0.03	1.93±0.03	-2.66±0.03	15±3	0.30
<b>78</b>	-3.26±0.06	3.29±0.04	-6.04±0.04	1.91±0.04	-2.52±0.04	15±4	0.30
<b>83</b>	-3.22±0.05	3.49±0.04	-6.13±0.03	1.88±0.03	-2.23±0.04	15±4	0.30
<b>88</b>	-3.15±0.05	3.80±0.04	-6.92±0.05	1.84±0.04	-2.14±0.03	16±2	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
<b>58</b>	-1.13±0.04	1.35±0.04	-3.03±0.03	0.77±0.03	-0.45±0.03	10±1	0.30
<b>63</b>	-1.26±0.05	1.49±0.04	-3.33±0.04	0.88±0.04	-0.40±0.03	8±1	0.30
<b>68</b>	-1.42±0.04	1.63±0.03	-3.66±0.03	0.97±0.03	-0.36±0.04	7±2	0.30
<b>73</b>	-1.58±0.05	1.78±0.04	-3.97±0.04	1.10±0.03	-0.34±0.03	5±1	0.30
<b>78</b>	-1.74±0.05	1.94±0.05	-4.31±0.03	1.19±0.04	-0.30±0.03	4±2	0.30
<b>83</b>	-1.91±0.04	2.10±0.04	-4.68±0.03	1.29±0.03	-0.26±0.03	3±3	0.30
<b>88</b>	-2.07±0.04	2.31±0.05	-5.11±0.03	1.42±0.04	-0.25±0.03	3±2	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
<b>58</b>	-1.25±0.05	1.48±0.05	-3.15±0.04	0.62±0.04	-0.61±0.04	11±1	0.30
<b>63</b>	-1.39±0.05	1.63±0.05	-3.46±0.05	0.74±0.05	-0.56±0.04	10±1	0.30
<b>68</b>	-1.56±0.03	1.79±0.03	-3.70±0.03	0.82±0.03	-0.52±0.04	8±1	0.30
<b>73</b>	-1.74±0.05	1.94±0.05	-4.12±0.04	0.94±0.04	-0.50±0.04	7±1	0.30
<b>78</b>	-1.91±0.05	2.11±0.06	-4.48±0.04	1.03±0.05	-0.47±0.04	6±1	0.30
<b>83</b>	-2.09±0.05	2.29±0.05	-4.86±0.04	1.24±0.03	-0.43±0.03	5±1	0.30
<b>88</b>	-2.27±0.09	2.51±0.09	-5.30±0.04	1.25±0.03	-0.42±0.03	5±2	0.30

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

**Tabla 3.5b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades del caso con mecanismo focal de desgarre 14% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	63±0 301±0	87±0 33±0	7.71±0.10	100%	100%
<b>63</b>	65±1 302±1	90±0 32±2	7.60±0.10	100%	100%
<b>68</b>	67±0 302±0	89±0 211±1	7.62±0.10	100%	100%
<b>73</b>	68±0 301±0	87±1 211±0	7.51±0.10	100%	100%
<b>78</b>	69±0 301±0	87±1 211±1	7.54±0.10	100%	100%
<b>83</b>	71±0 301±0	86±0 209±2	7.53±0.11	100%	100%
<b>88</b>	74±1 302±0	86±0 211±2	8.19±0.11	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	78±0 305±0	82±0 213±0	3.39±0.12	100%	100%
<b>63</b>	79±0 305±0	81±0 213±0	3.73±0.12	100%	100%
<b>68</b>	79±0 305±0	81±0 213±1	4.09±0.12	100%	100%
<b>73</b>	79±0 304±0	80±1 213±0	4.46±0.12	100%	100%
<b>78</b>	80±0 304±0	80±0 212±1	4.85±0.12	100%	100%
<b>83</b>	80±0 304±0	79±0 212±1	5.26±0.12	100%	100%
<b>88</b>	81±1 304±2	79±0 212±1	5.75±0.12	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	78±0 304±0	87±0 213±0	3.53±0.10	100%	100%
<b>63</b>	79±0 304±0	85±0 213±0	3.88±0.10	100%	100%
<b>68</b>	79±0 303±0	84±0 212±0	4.17±0.09	100%	100%
<b>73</b>	79±0 304±0	83±1 212±0	4.64±0.09	100%	100%
<b>78</b>	80±0 304±0	80±0 212±1	5.04±0.09	100%	100%
<b>83</b>	80±0 304±0	82±0 212±1	5.46±0.09	100%	100%
<b>88</b>	81±1 304±0	82±1 212±1	5.96±0.09	100%	100%

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

## Mecanismo focal desgarrre, CLVD=14%

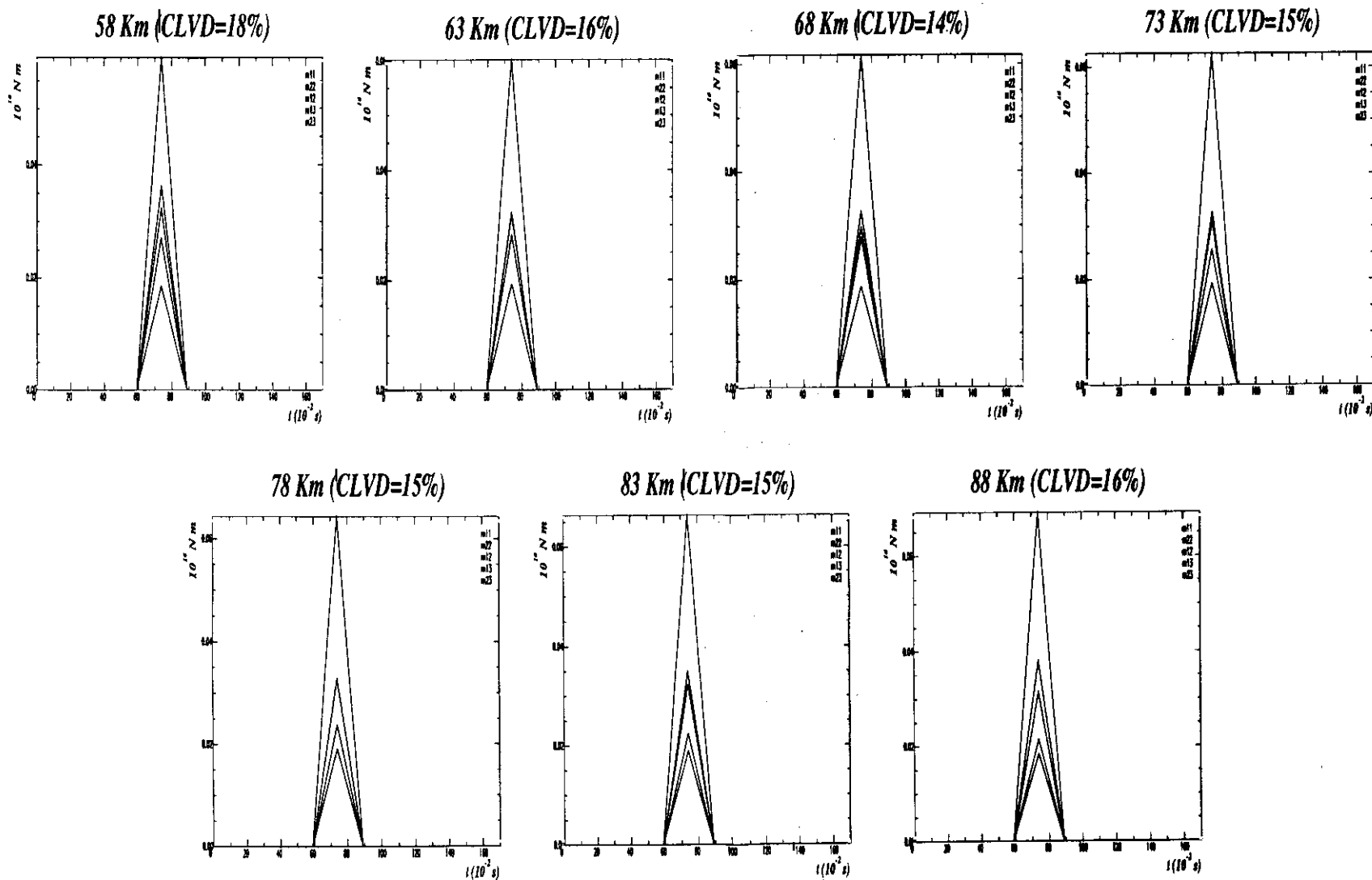


Fig. 3.9. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

## Mecanismo focal desgarre, CLVD=14%

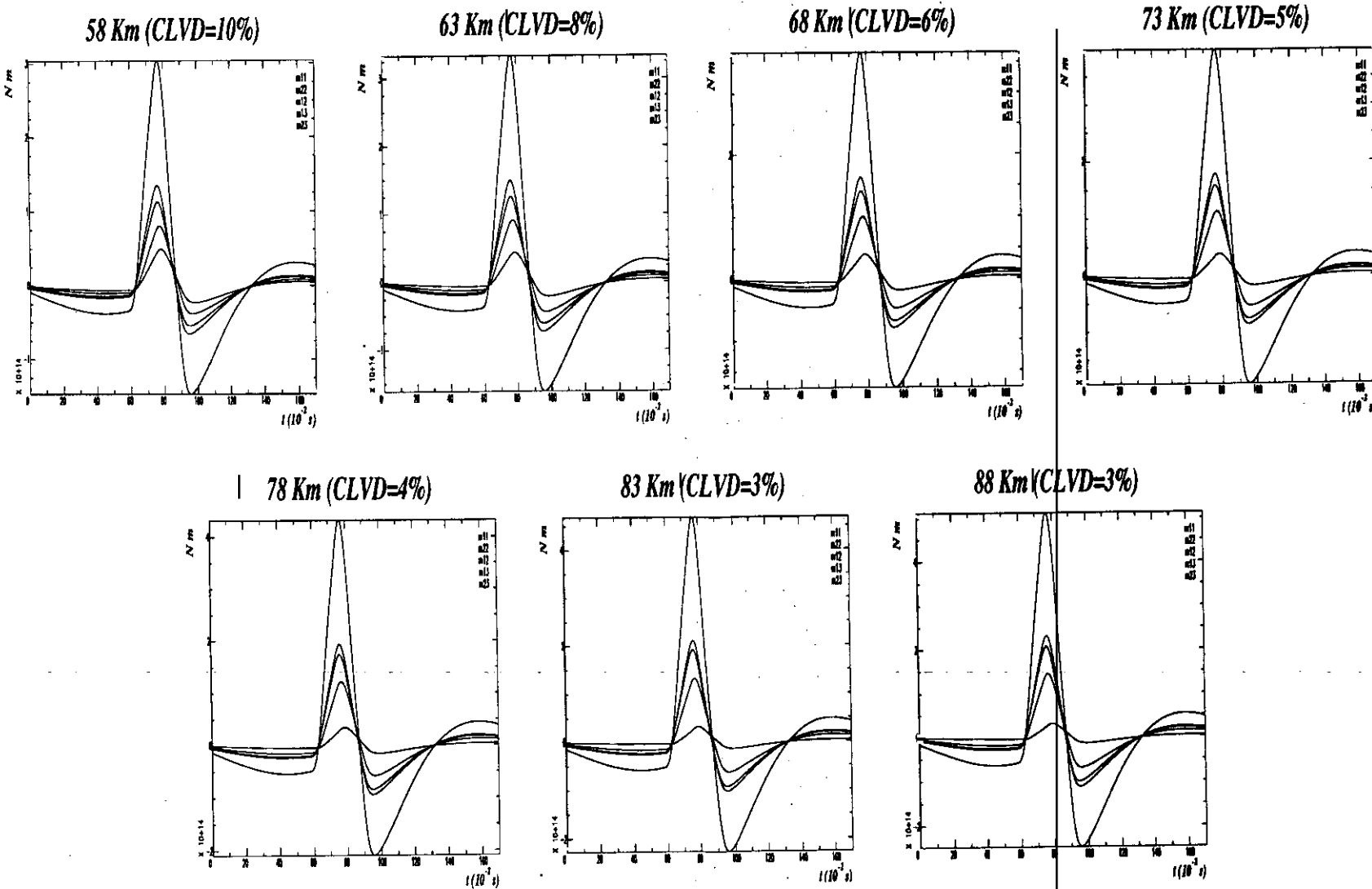


Fig. 3.10. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal desgarrre, CLVD=14%

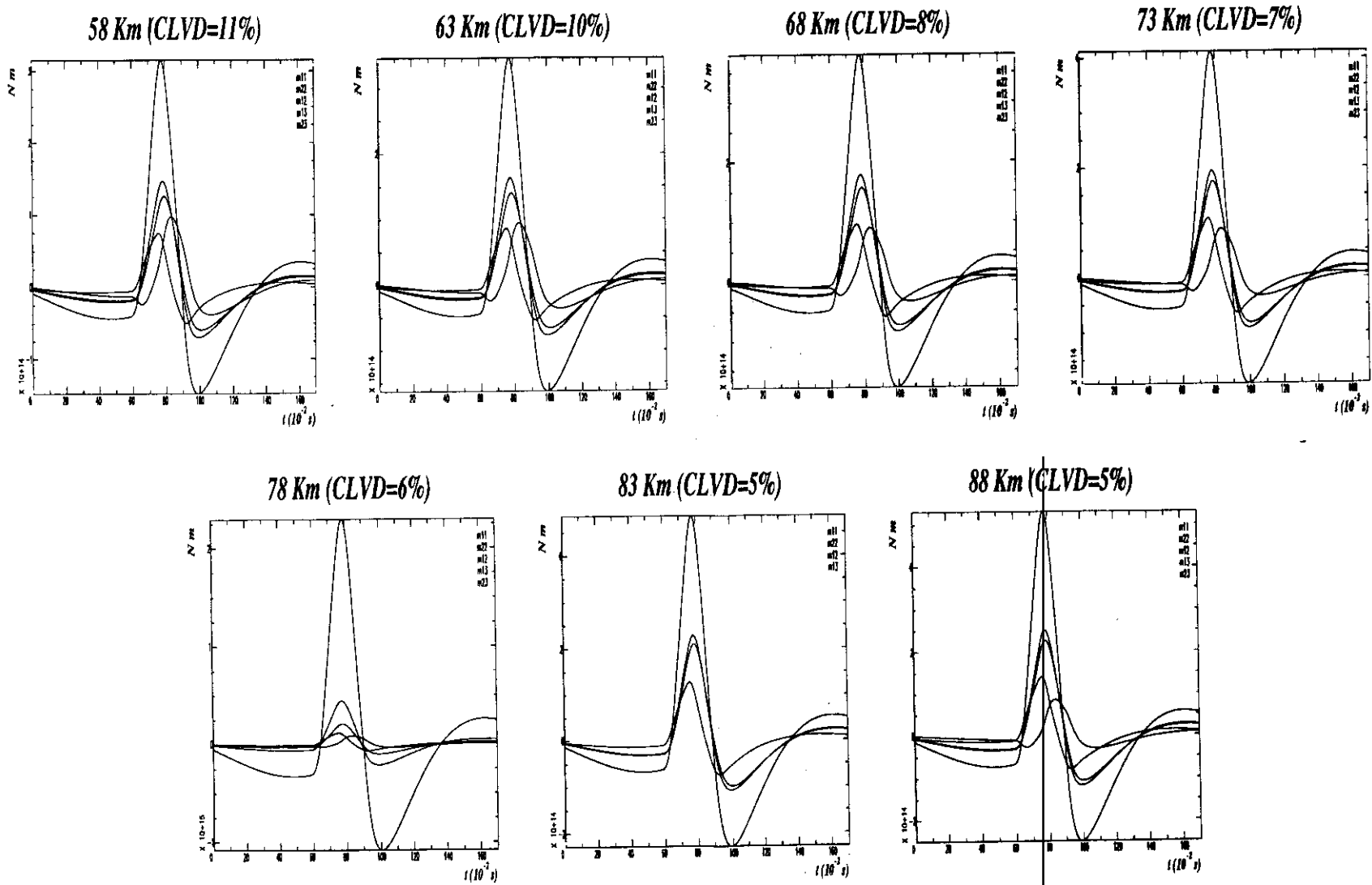


Fig. 3.11. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal de desgarre. CLVD=14%

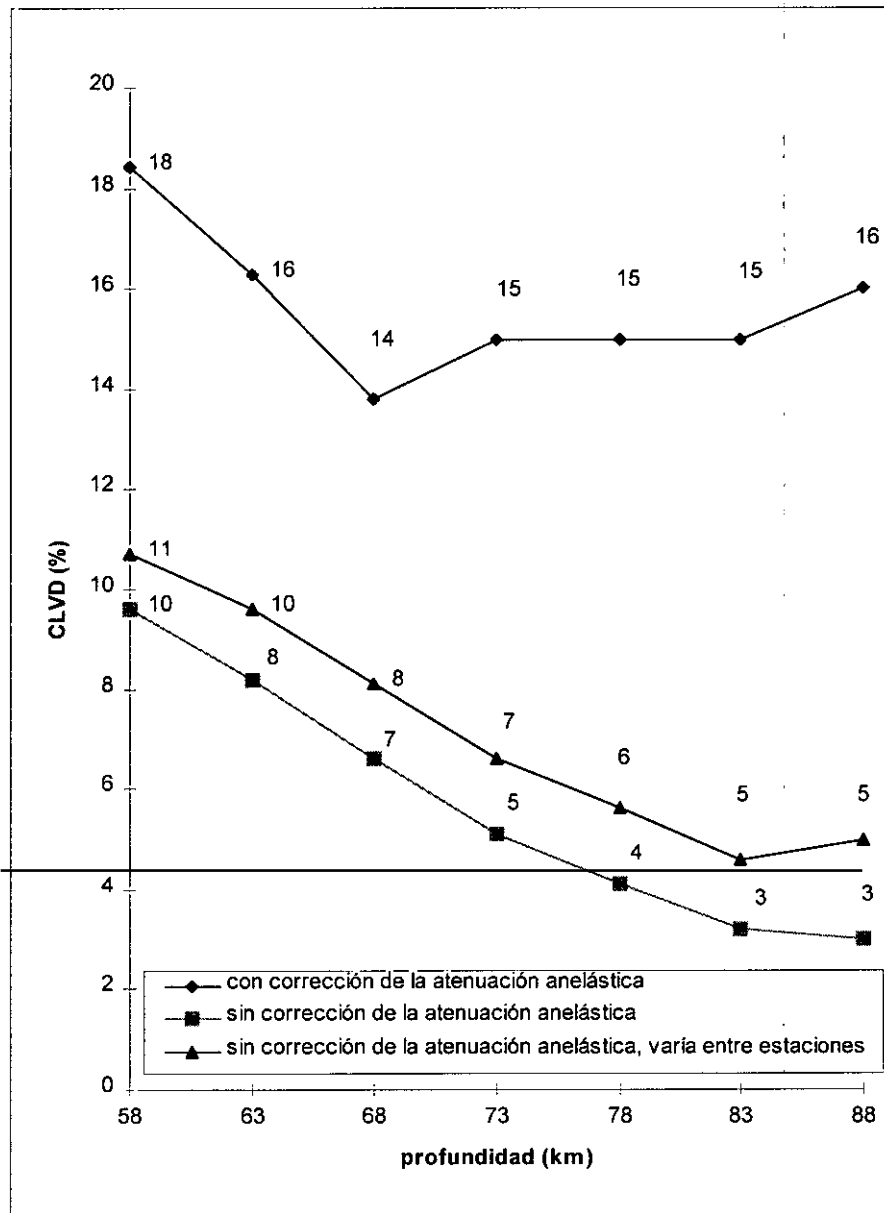


Fig. 3.12. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

### 3.2.3. Mecanismo focal de desgarre. CLVD = 34%

El mecanismo focal de desgarre con 34% de CLVD que se ha seleccionado para generar los sismogramas sintéticos, se muestra en la Tabla 3.1, también se muestran los datos hipocentrales. En la Fig. 3.13, se muestra su representación sobre la esfera focal, junto con las estaciones (factor de calidad de 600), la función temporal, los ejes de esfuerzos, planos de falla y superficies nodales de la parte de no doble par. En la Fig. 3.14 se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para las inversiones realizadas variando el factor de calidad de unas estaciones a otras. Todas mantienen un factor de calidad de 600 salvo est2, est5, est8, st11 que pasan a tener 300, y se han representado con un asterisco.

En la Tabla 3.2 se muestra la lista de las estaciones utilizadas para realizar la inversión: acimut, ángulo de incidencia en el foco y distancia epicentral.

Las soluciones obtenidas tras las inversiones realizadas variando la profundidad, la atenuación anelástica y la corrección o no de la misma, se muestran en la Tabla 3.6, Fig. 3.15-3.17, y las superficies nodales del mecanismo focal sobre la esfera focal, en el Anexo 1 en las Fig. A1.7-A1.9. En la Tabla 3.6a, se muestran las componentes del tensor momento sísmico, el porcentaje de CLVD y la duración de la función temporal de la fuente sísmica. En la Tabla 3.6b muestra los ejes de Tensión y Presión mediante  $\theta$  (ángulo que forma con la vertical), y  $\phi$  (acimut), el momento sísmico escalar, el porcentaje de aciertos (score) en polaridades para DC y CLVD.

Mecanismo focal de desgarre CLVD= 34%

$h=68$  Km,  $Q=600$

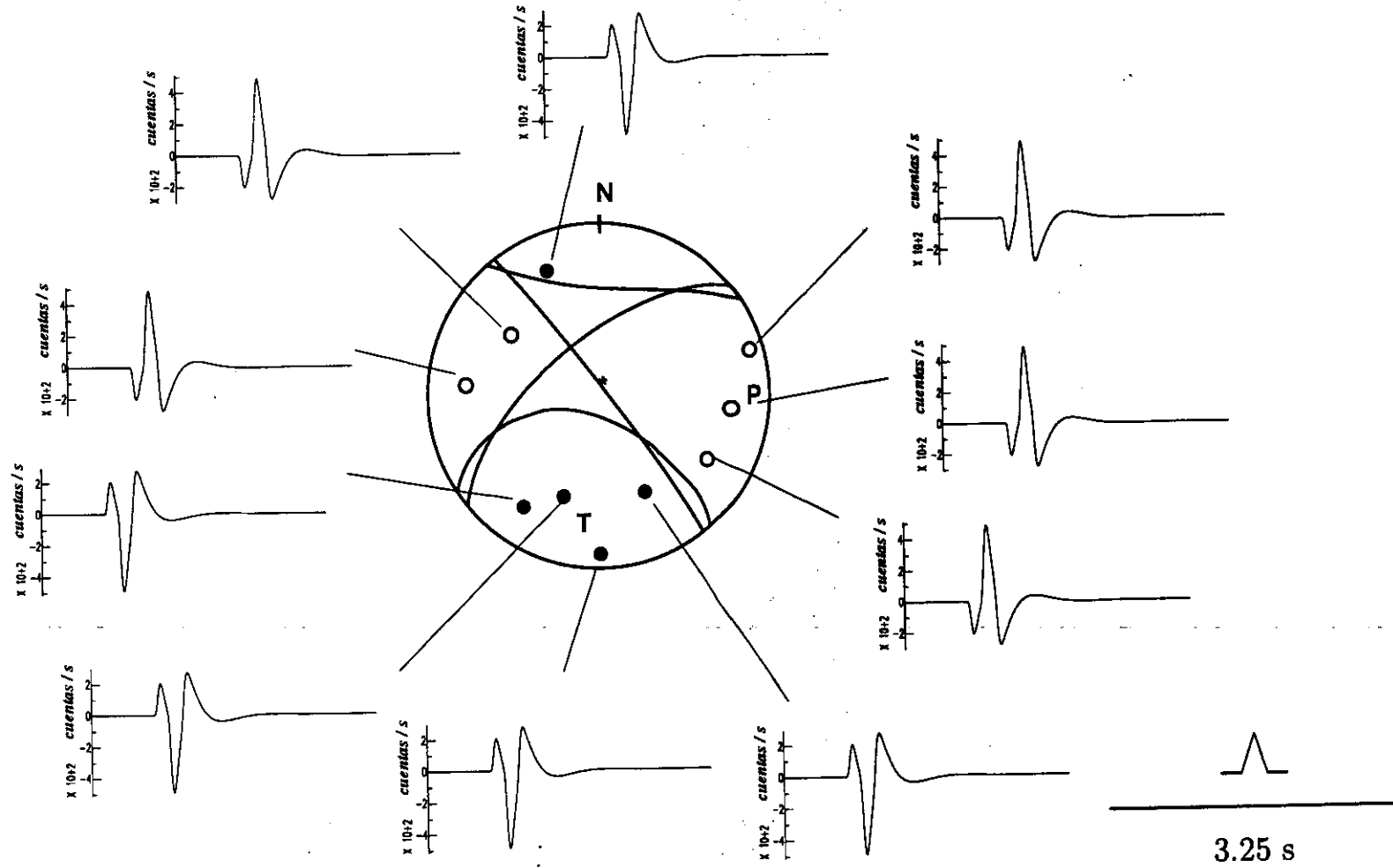


Fig. 3.13. Mecanismo focal de desgarre con CLVD = 34%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas estaciones).

Mecanismo focal desgarre CLVD= 34%

$h=68$  Km,  $Q=600$ ,  $Q^*=300$

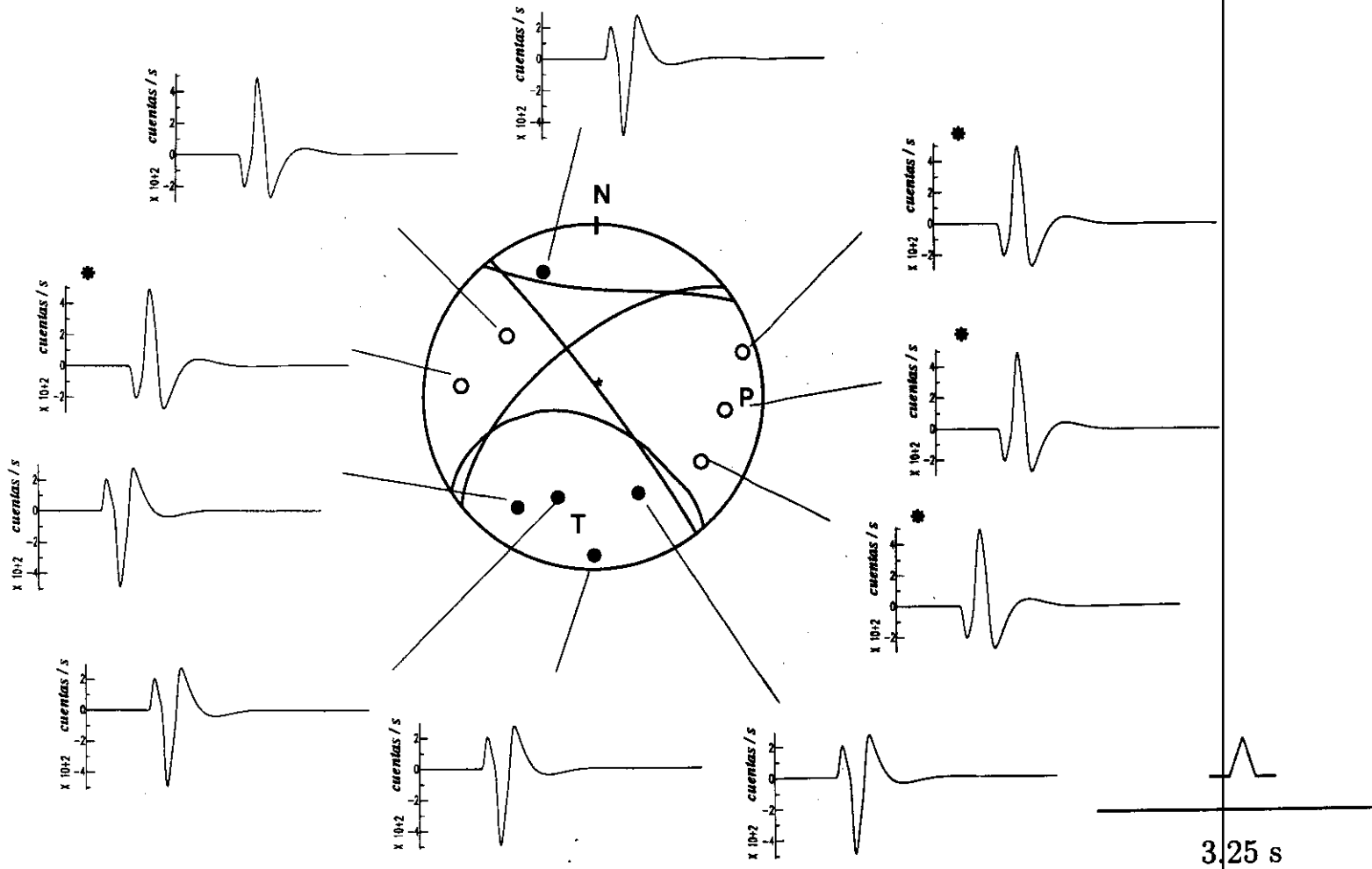


Fig. 3.14. Mecanismo focal de desgarre con CLVD =34%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.6a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal de desgarre con 34% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

<b>h (km)</b>	<b>M<sub>11</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>22</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>12</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>13</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>23</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>CLVD (%)</b>	<b>f(t) (s)</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
<b>58</b>	3.75±0.05	-2.92±0.03	1.11±0.03	-2.24±0.03	-0.80±0.03	23±2	0.30
<b>63</b>	3.85±0.05	-2.98±0.03	1.04±0.04	-2.22±0.03	-0.79±0.03	33±2	0.30
<b>68</b>	3.92±0.04	-3.04±0.03	1.03±0.03	-2.20±0.03	-0.77±0.03	34±2	0.30
<b>73</b>	3.99±0.06	-3.12±0.03	1.01±0.03	-2.23±0.03	-0.77±0.03	33±3	0.30
<b>78</b>	3.99±0.05	-3.29±0.05	1.07±0.04	-2.20±0.05	-0.76±0.04	31±3	0.30
<b>83</b>	3.99±0.06	-3.39±0.05	1.14±0.04	-2.17±0.04	-0.73±0.04	28±3	0.30
<b>88</b>	3.96±0.06	-3.61±0.05	1.27±0.05	-2.11±0.05	-0.67±0.04	24±4	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
<b>58</b>	3.16±0.06	-2.83±0.04	0.71±0.03	-0.47±0.04	0.09±0.03	12±4	0.30
<b>63</b>	3.47±0.05	-3.12±0.04	0.78±0.04	-0.55±0.03	0.05±0.03	11±1	0.30
<b>68</b>	3.76±0.03	-3.49±0.03	0.86±0.06	-0.60±0.05	0.02±0.06	9±4	0.30
<b>73</b>	4.02±0.06	-3.86±0.03	0.95±0.06	-0.69±0.05	0.03±0.06	6±4	0.30
<b>78</b>	4.34±0.06	-4.28±0.06	1.10±0.05	-0.68±0.06	0.02±0.04	4±3	0.30
<b>83</b>	4.58±0.04	-4.80±0.05	1.31±0.04	-0.07±0.04	0.01±0.04	3±2	0.30
<b>88</b>	4.79±0.03	-5.42±0.06	1.62±0.03	-0.06±0.03	0.01±0.04	10±2	0.30
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
<b>58</b>	2.87±0.06	-3.13±0.03	0.71±0.03	-0.31±0.04	0.05±0.02	7±3	0.30
<b>63</b>	3.14±0.05	-3.48±0.05	0.82±0.04	-0.34±0.03	0.04±0.03	11±3	0.30
<b>68</b>	3.39±0.06	-3.93±0.04	0.97±0.05	-0.34±0.05	0.06±0.06	12±5	0.30
<b>73</b>	3.63±0.04	-4.36±0.04	1.13±0.06	-0.36±0.05	0.09±0.06	16±3	0.30
<b>78</b>	3.93±0.05	-4.87±0.04	1.32±0.06	-0.28±0.06	0.11±0.04	18±4	0.30
<b>83</b>	4.17±0.05	-5.46±0.05	1.69±0.05	-0.19±0.05	0.18±0.08	22±8	0.30
<b>88</b>	4.42±0.09	-6.13±0.06	2.10±0.07	-0.56±0.06	0.28±0.08	25±9	0.30

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

**Tabla 3.6b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades del caso teórico con mecanismo focal de desgarre 34% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	69±1 6±5	63±0 107±2	4.19±0.07	100%	100%
<b>63</b>	68±2 190±2	75±1 94±4	4.09±0.08	100%	100%
<b>68</b>	69±0 190±2	76±2 94±3	4.14±0.06	100%	100%
<b>73</b>	69±0 189±1	76±2 94±2	4.21±0.07	100%	100%
<b>78</b>	68±2 189±3	78±2 95±3	4.27±0.08	100%	100%
<b>83</b>	68±2 190±4	81±5 96±3	4.34±0.09	100%	100%
<b>88</b>	68±1 190±5	84±3 98±1	4.45±0.10	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	83±0 187±0	87±0 277±0	3.10±0.07	100%	100%
<b>63</b>	83±0 187±0	88±0 277±4	3.41±0.07	100%	100%
<b>68</b>	82±0 187±1	89±0 277±2	3.82±0.08	100%	100%
<b>73</b>	81±0 187±1	89±1 277±1	4.10±0.09	100%	100%
<b>78</b>	82±0 187±2	89±1 277±2	4.52±0.09	100%	100%
<b>83</b>	82±0 188±2	89±0 278±2	4.91±0.11	100%	100%
<b>88</b>	83±0 189±0	89±1 279±1	5.39±0.12	100%	100%
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	84±0 187±0	87±0 277±0	3.08±0.07	100%	100%
<b>63</b>	84±0 187±0	89±0 277±4	3.39±0.08	100%	100%
<b>68</b>	84±0 187±0	89±0 278±2	3.83±0.08	100%	100%
<b>73</b>	84±0 188±1	89±1 278±1	4.20±0.09	100%	100%
<b>78</b>	85±0 188±2	87±1 278±2	4.62±0.11	100%	100%
<b>83</b>	87±0 190±0	88±0 280±0	5.09±0.12	100%	100%
<b>88</b>	81±0 191±0	87±1 281±0	5.69±0.13	100%	100%

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=34%

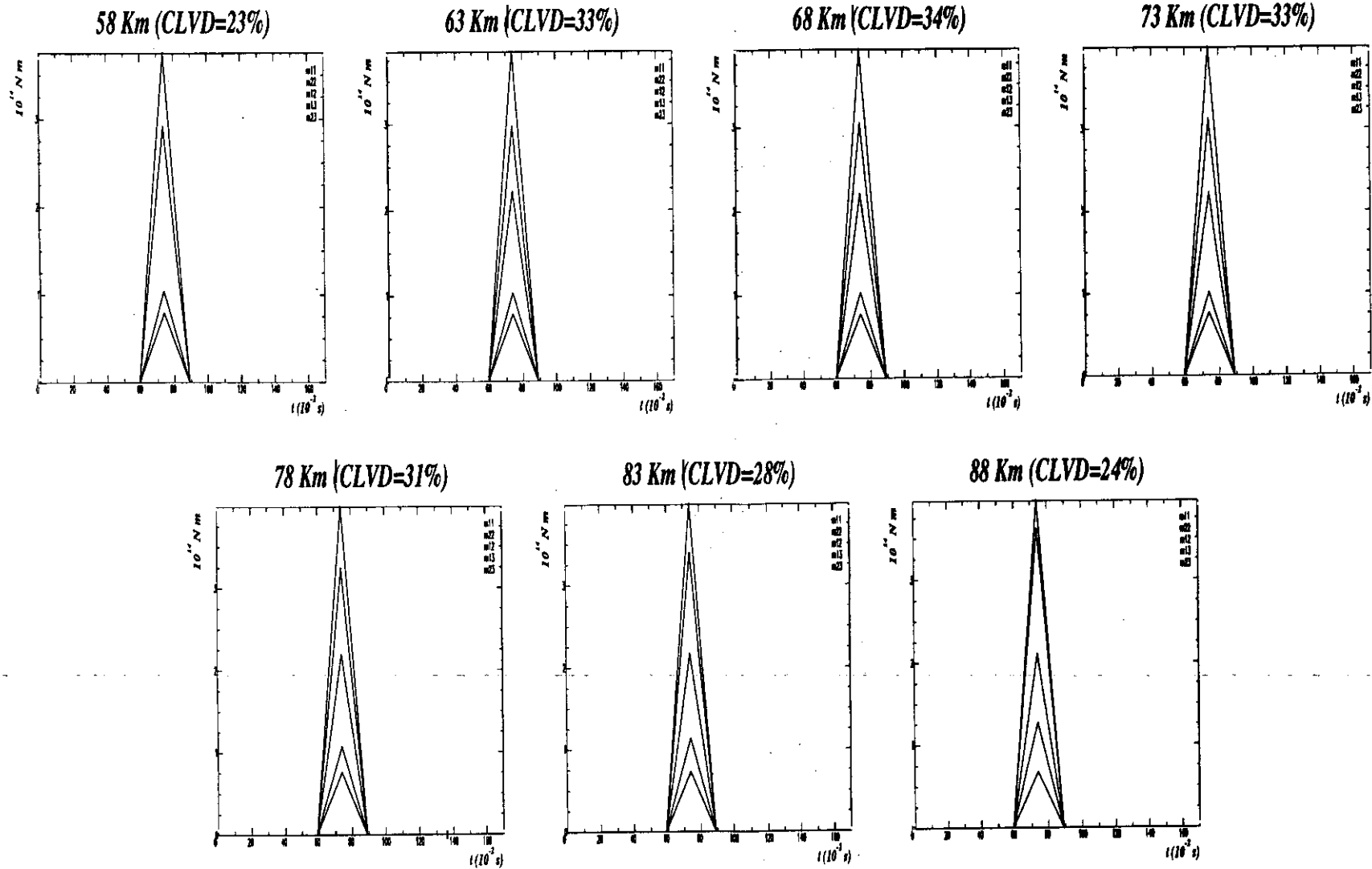


Fig. 3.15. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

## Mecanismo focal desgarrre, CLVD=34%

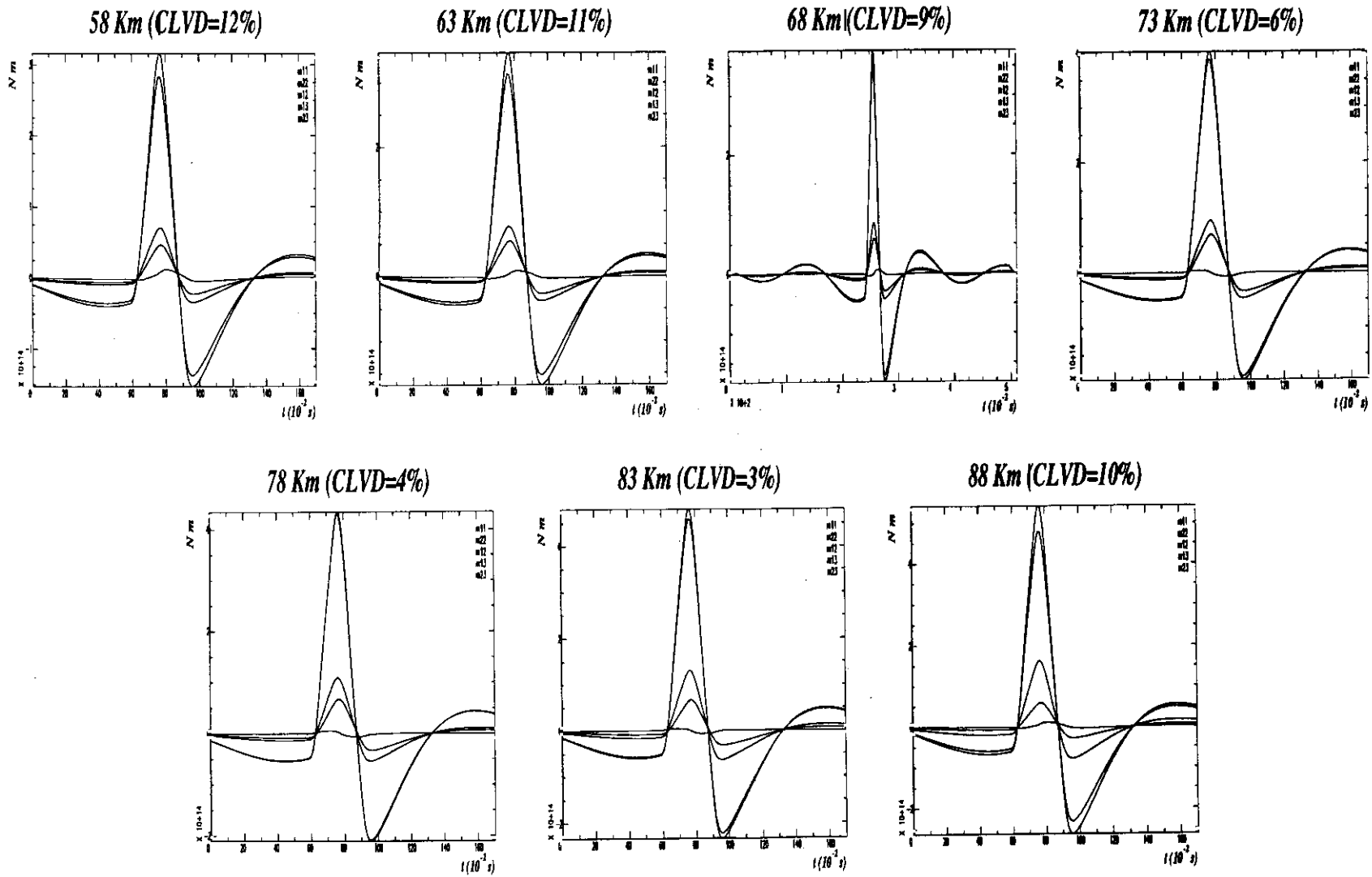


Fig. 3.16. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=34%

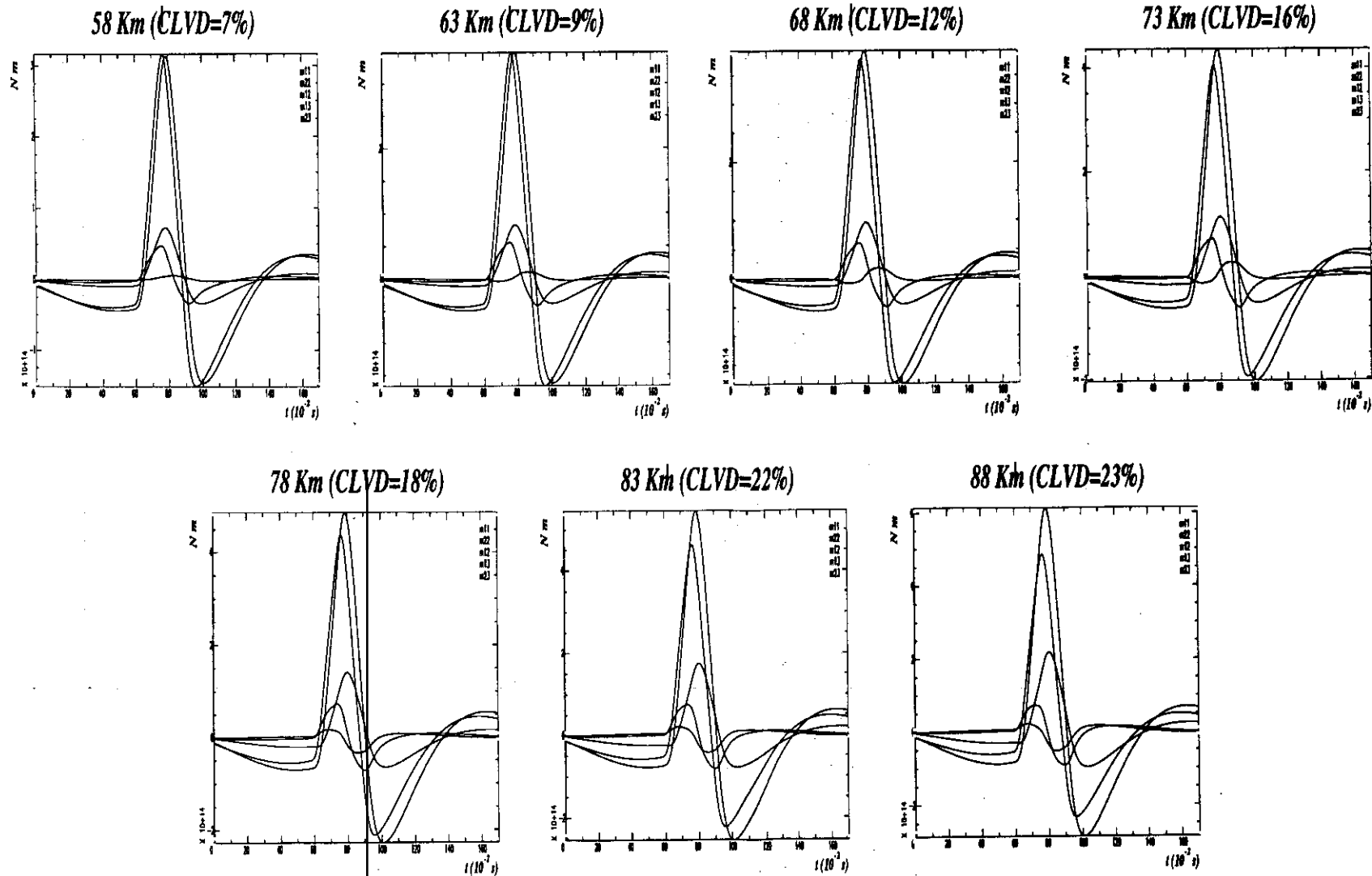


Fig. 3.17. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal de desgarre. CLVD=34%

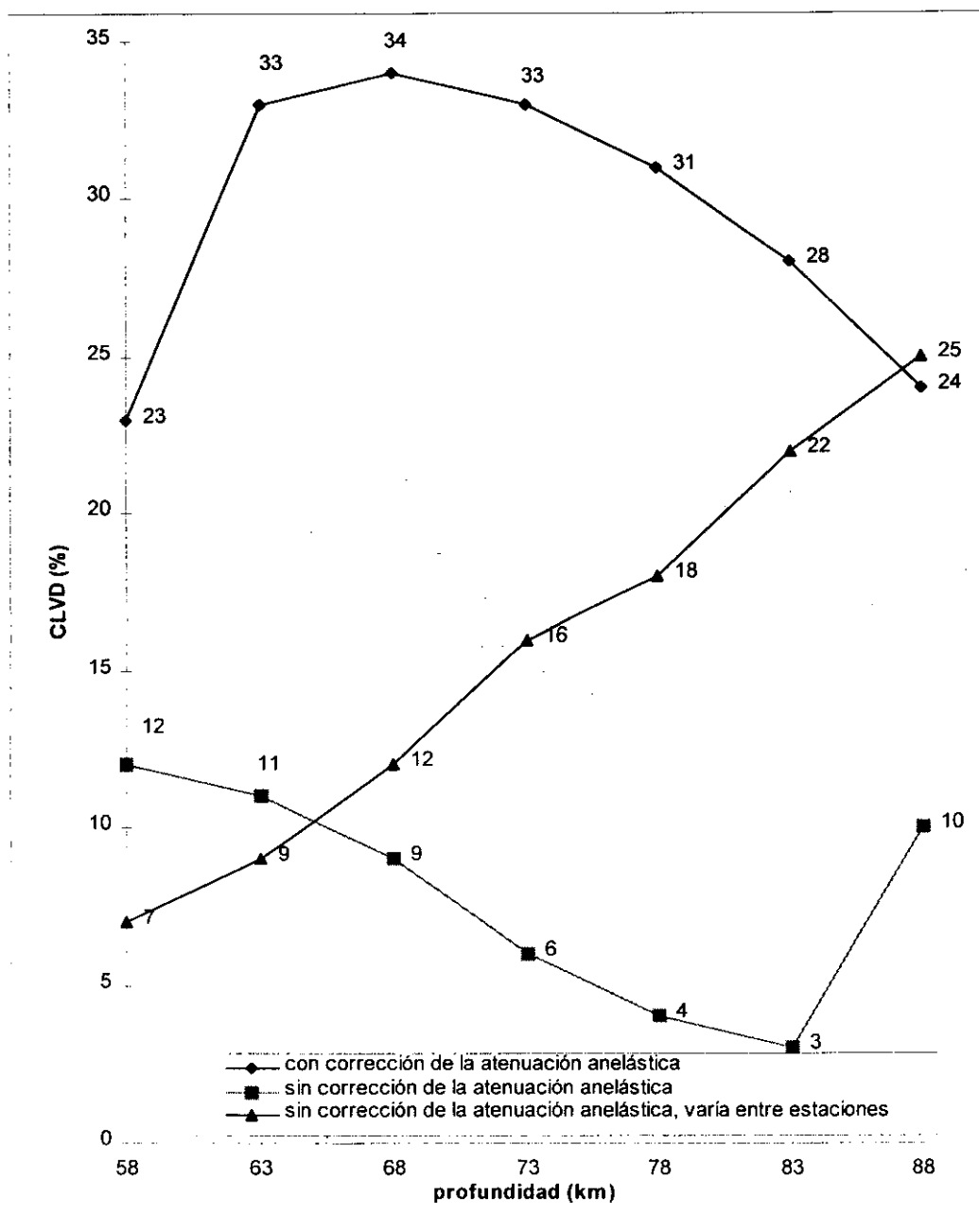


Fig. 3.18. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

De los resultados mostrados en las figuras anteriores, se pueden obtener las siguientes características:

- la influencia de la no corrección de la atenuación anelástica es importante, ya que cuando no se realiza, el eje de Tensión se aleja para el acimut hasta  $3^\circ$  y en el ángulo que forma con la vertical hasta  $18^\circ$ . Cuando se realiza dicha corrección la desviación respecto al valor correcto es de  $1^\circ$  y  $2^\circ$  respectivamente. Para el eje de Presión, sucede algo similar, para las inversiones realizadas sin corregir la atenuación anelástica, el acimut discrepa del correcto hasta  $18^\circ$  y en el ángulo con la vertical es de hasta  $183^\circ$ , mientras que en las inversiones donde se ha corregido la atenuación anelástica es de hasta  $9^\circ$  y  $4^\circ$  respectivamente. Sin embargo, aunque para el eje P se obtienen soluciones numéricas con un rango muy amplio, esto no influye en el tipo de mecanismo focal obtenido ya que es un eje horizontal.
- la duración de la función temporal obtenida cuando se efectúa la corrección anelástica es para todas las inversiones efectuadas con independencia de la profundidad utilizada, de 0.30s y es un triángulo perfecto igual que la función temporal correcta. Cuando no se efectúa dicha corrección, la duración es la correcta 0.30s, pero la forma de la función temporal obtenida se deforma redondeándose y deja de ser un triángulo perfecto (Fig. 3.15, 3.16, 3.17).
- el momento sísmico escalar obtenido para todas las inversiones realizadas varía entre  $3.10-5.72 \times 10^{14}$  Nm, es del mismo orden de magnitud que el correcto,  $1.13 \times 10^{14}$  Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido para los casos en que se ha efectuado la corrección anelástica es mucho más próximo al valor correcto (34%) ya que varía entre 23-34%, obteniéndose al representar el porcentaje del CLVD frente a la profundidad, el punto crítico en la profundidad correcta (ver Figura 3.18). Cuando no se efectúa la corrección anelástica, el porcentaje de CLVD se ve muy afectado, alejándose hasta un 29% de su valor correcto, llegando a encontrarse en punto crítico en una profundidad superior a 15km a la correcta, y llega a desaparecer el punto crítico, en el caso en que se varía la atenuación de unas estaciones a otras.
- los errores calculados en todos los parámetros obtenidos tras la inversión son pequeños, para las componentes del tensor momento sísmico y el momento sísmico escalar, son dos órdenes de magnitud inferior al valor obtenido, los ejes de esfuerzos tienen  $4^\circ$  como máximo de error, y el porcentaje de CLVD es del 9% en el caso más desfavorable

### **3.2.4. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD=0%.**

Este caso se aplica a mecanismo focal con deslizamiento en la dirección de buzamiento, tanto para mecanismo normal como inverso (cambiando el signo de la polaridad del primer impulso de la onda P). Aquí hemos tomado el caso de mecanismo focal normal.

La inversión se ha realizado utilizando sismogramas sintéticos de la onda P directa, contruidos a partir del mecanismo focal normal que aparece en la Tabla 3.1. En la Fig. 3.19 se ha representado dicho mecanismo focal, la situación de las estaciones utilizadas para realizar la inversión sobre la esfera focal, los sismogramas teóricos generados, la fuente temporal de 0.30s y el factor de calidad que es para todas las estaciones de 300. A fin de estudiar como afecta la atenuación anelástica en la inversión, ésta se ha variado de unas a otras estaciones, se han dejado seis de ellas con el mismo factor, y se ha variado el factor de calidad a 600 para est2, est5, est8, st11, representándolas con un asterisco, según se muestra en la Fig. 3.20.

En la Tabla 3.2, se muestra la localización de las estaciones utilizadas para invertir y obtener las componentes del tensor momento sísmico: acimut, ángulo de incidencia en el foco, y distancia epicentral.

Se han realizado diversas inversiones con diversas profundidades con un rango comprendido entre 58-88 km., cuyo intervalo es de 5 km, cuyas soluciones se muestran en la Tabla 3.7 y en la Fig. 3.21-3.23, mediante las componentes del tensor momento sísmico, y en el Anexo 1, en las Fig. A1.10-A1.12, donde se muestran los ejes de esfuerzos T y P, y las superficies nodales sobre la esfera focal. En la Tabla 3.7a aparecen las componentes del tensor momento sísmico, el porcentaje de CLVD, y la duración de la función temporal de la fuente sísmica. En la Tabla 3.7b, se muestran los ejes de esfuerzos utilizando el ángulo que forma con la vertical ( $\theta$ ) y el acimut ( $\phi$ ), el momento sísmico escalar ( $M_0$ ), el porcentaje de aciertos en polaridades para DC y CLVD.

Mecanismo focal normal CLVD= 0%

$h=68$  Km,  $Q=300$

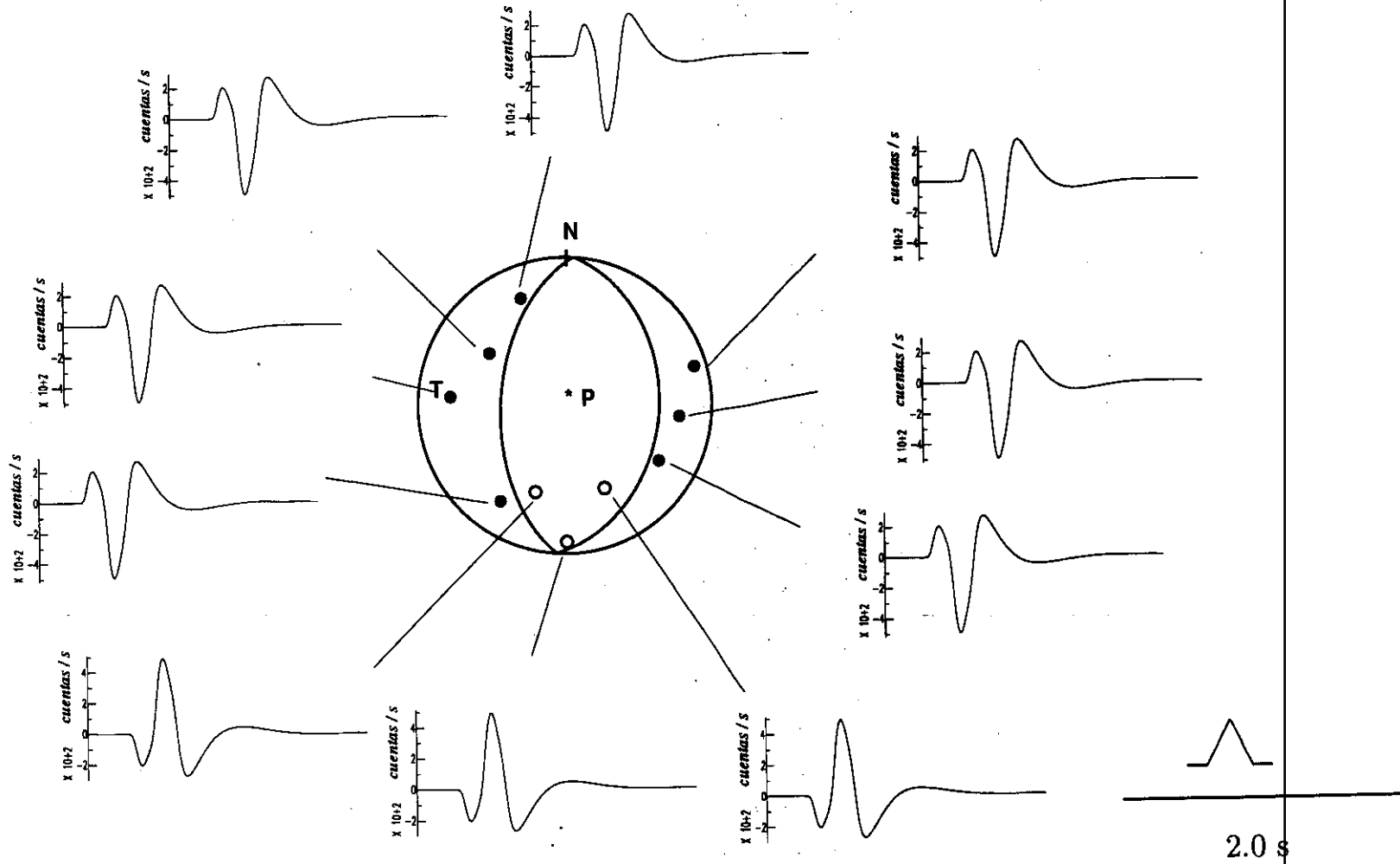


Fig. 3.19. Mecanismo focal normal con  $CLVD = 0\%$ , sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

Mecanismo focal normal CLVD= 0%  
 h=68 Km, Q=300, Q\*=600

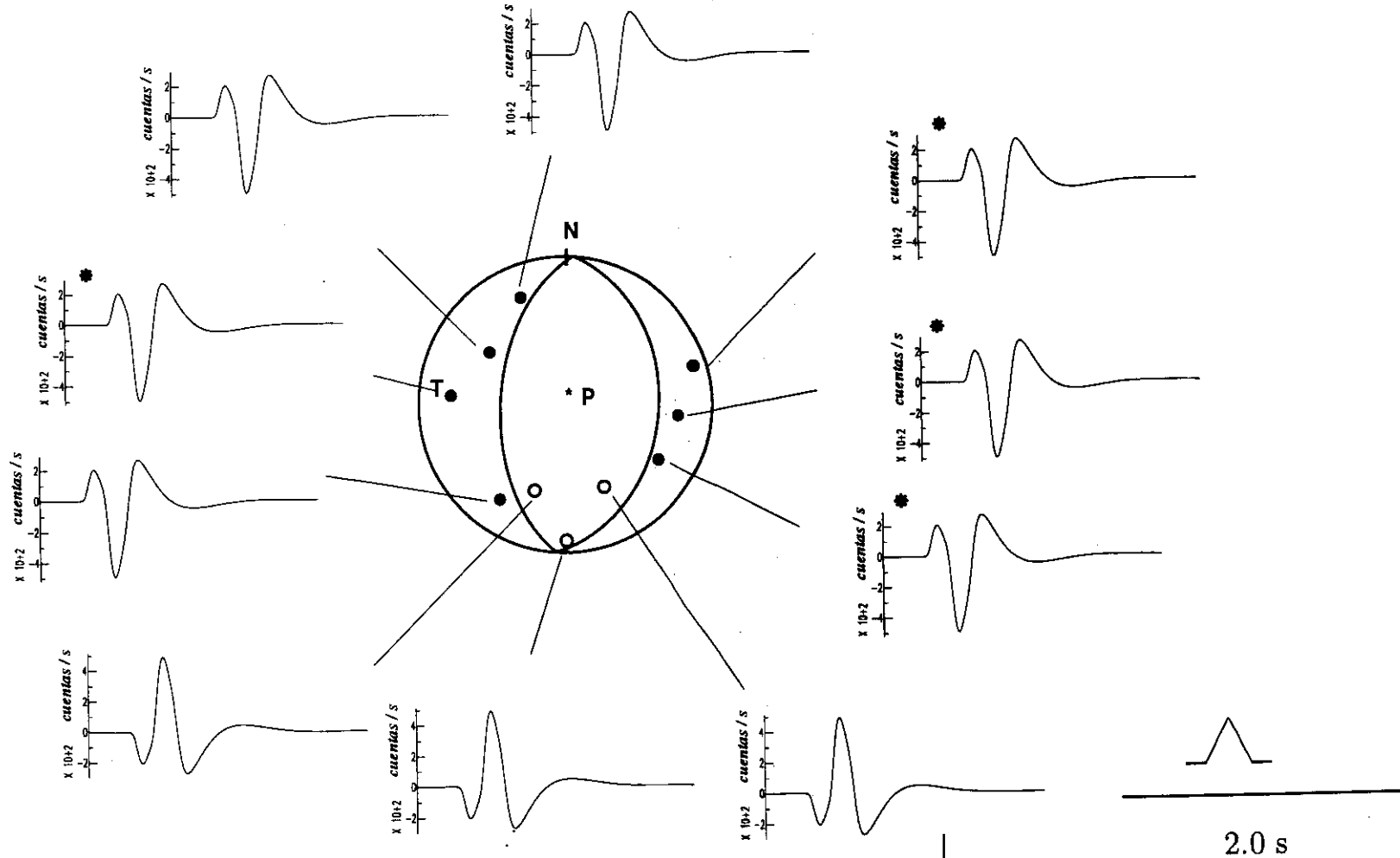


Fig.3.20. Mecanismo focal normal con CLVD=0%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.7a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, y función temporal del caso teórico con mecanismo focal normal con 0% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

<b>h</b> <b>(km)</b>	<b>M<sub>11</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>22</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>12</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>13</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>M<sub>23</sub><sup>(*)</sup></b>	<b>CLVD</b> <b>(%)</b>	<b>f(t)</b> <b>(s)</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
<b>58</b>	-0.57±0.02	30.20±0.01	1.58±0.02	5.08±0.02	-9.16±0.03	1±1	0.30
<b>63</b>	-0.41±0.02	31.85±0.02	-0.38±0.03	2.80±0.02	-10.10±0.02	1±1	0.30
<b>68</b>	0.17±0.03	34.69±0.01	-2.46±0.02	0.59±0.02	11.31±0.02	0±0	0.30
<b>73</b>	-0.31±0.03	36.89±0.03	-5.11±0.02	-1.73±0.02	-12.70±0.03	1±1	0.30
<b>78</b>	-0.16±0.03	39.95±0.03	-8.84±0.03	-4.34±0.03	-13.50±0.02	2±1	0.30
<b>83</b>	-0.99±0.02	42.40±0.02	-12.01±0.02	-6.43±0.02	-14.58±0.02	4±1	0.30
<b>88</b>	-2.72±0.03	44.41±0.03	-15.21±0.03	-8.36±0.03	-15.48±0.03	7±1	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
<b>58</b>	0.41±0.02	21.34±0.01	-1.07±0.02	9.53±0.02	-3.39±0.02	14±1	0.30
<b>63</b>	-0.19±0.03	24.06±0.02	-2.75±0.02	7.77±0.02	-4.67±0.02	6±1	0.30
<b>68</b>	-0.49±0.02	27.50±0.02	-4.69±0.02	6.13±0.02	-6.35±0.02	1±1	0.30
<b>73</b>	-1.49±0.03	30.68±0.07	-6.98±0.06	4.63±0.06	-7.42±0.06	8±1	0.30
<b>78</b>	-3.58±0.03	33.50±0.02	-10.10±0.02	2.64±0.02	-8.84±0.02	16±1	0.30
<b>83</b>	-6.28±0.03	35.90±0.03	-12.50±0.03	1.49±0.02	-9.87±0.02	24±1	0.30
<b>88</b>	-10.26±0.03	37.20±0.04	-14.30±0.03	0.09±0.02	-10.40±0.02	32±1	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
<b>58</b>	0.33±0.06	17.41±0.05	-0.91±0.05	7.91±0.06	-2.91±0.06	15±15	0.30
<b>63</b>	-0.17±0.06	19.62±0.05	-2.21±0.06	6.51±0.06	-3.92±0.06	6±5	0.30
<b>68</b>	-0.46±0.07	22.26±0.06	-3.92±0.06	4.25±0.06	-4.89±0.06	3±1	0.30
<b>73</b>	-1.29±0.08	24.99±0.06	-5.66±0.06	3.98±0.06	-6.16±0.06	8±3	0.30
<b>78</b>	-3.01±0.09	27.33±0.08	-8.10±0.07	2.41±0.06	-7.31±0.06	17±4	0.30
<b>83</b>	-5.31±0.09	29.21±0.09	-9.61±0.08	1.52±0.07	-8.12±0.06	24±3	0.30
<b>88</b>	-8.22±0.10	30.31±0.11	-11.92±0.10	-1.41±0.07	-8.21±0.07	30±3	0.30

(\*) multiplicado por 10<sup>13</sup> expresado en Nm

**Tabla 3.7b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades del caso teórico con mecanismo focal normal con 0% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	82±0 269±0	13±0 138±0	31.75±0.12	100%	100%
<b>63</b>	81±0 271±0	10±0 118±0	33.30±0.14	100%	100%
<b>68</b>	81±0 274±0	9±0 92±0	36.67±0.10	100%	100%
<b>73</b>	81±0 277±0	10±1 69±1	39.40±0.11	100%	100%
<b>78</b>	82±0 281±0	13±0 52±1	43.20±0.14	90%	90%
<b>83</b>	82±0 283±0	15±0 44±1	46.40±0.15	90%	90%
<b>88</b>	82±0 285±0	19±1 39±1	48.91±0.17	90%	90%
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	84±0 275±0	20±0 170±0	23.61±0.07	90%	90%
<b>63</b>	83±0 278±0	17±0 165±0	25.78±0.07	90%	90%
<b>68</b>	83±0 281±0	13±1 154±1	29.03±0.06	90%	90%
<b>73</b>	83±0 282±0	10±1 142±0	31.90±0.10	90%	90%
<b>78</b>	82±0 284±0	8±0 110±0	34.26±0.11	90%	90%
<b>83</b>	82±0 285±0	9±1 84±0	35.90±0.13	90%	90%
<b>88</b>	82±0 285±0	13±1 53±0	35.75±0.13	90%	90%
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	84±0 276±0	21±0 170±0	19.40±0.07	90%	90%
<b>63</b>	83±0 278±0	17±0 165±0	21.12±0.07	90%	90%
<b>68</b>	83±0 280±0	11±0 151±3	23.21±0.08	90%	90%
<b>73</b>	82±0 282±0	10±0 143±0	26.00±0.10	90%	90%
<b>78</b>	82±0 284±0	8±1 115±1	27.84±0.11	90%	90%
<b>83</b>	82±0 284±0	9±1 91±0	29.14±0.11	90%	90%
<b>88</b>	82±0 285±0	18±0 40±0	29.15±0.14	90%	90%

(\*) multiplicado por  $10^{13}$  expresado en Nm

# Mecanismo focal normal, CLVD=0%

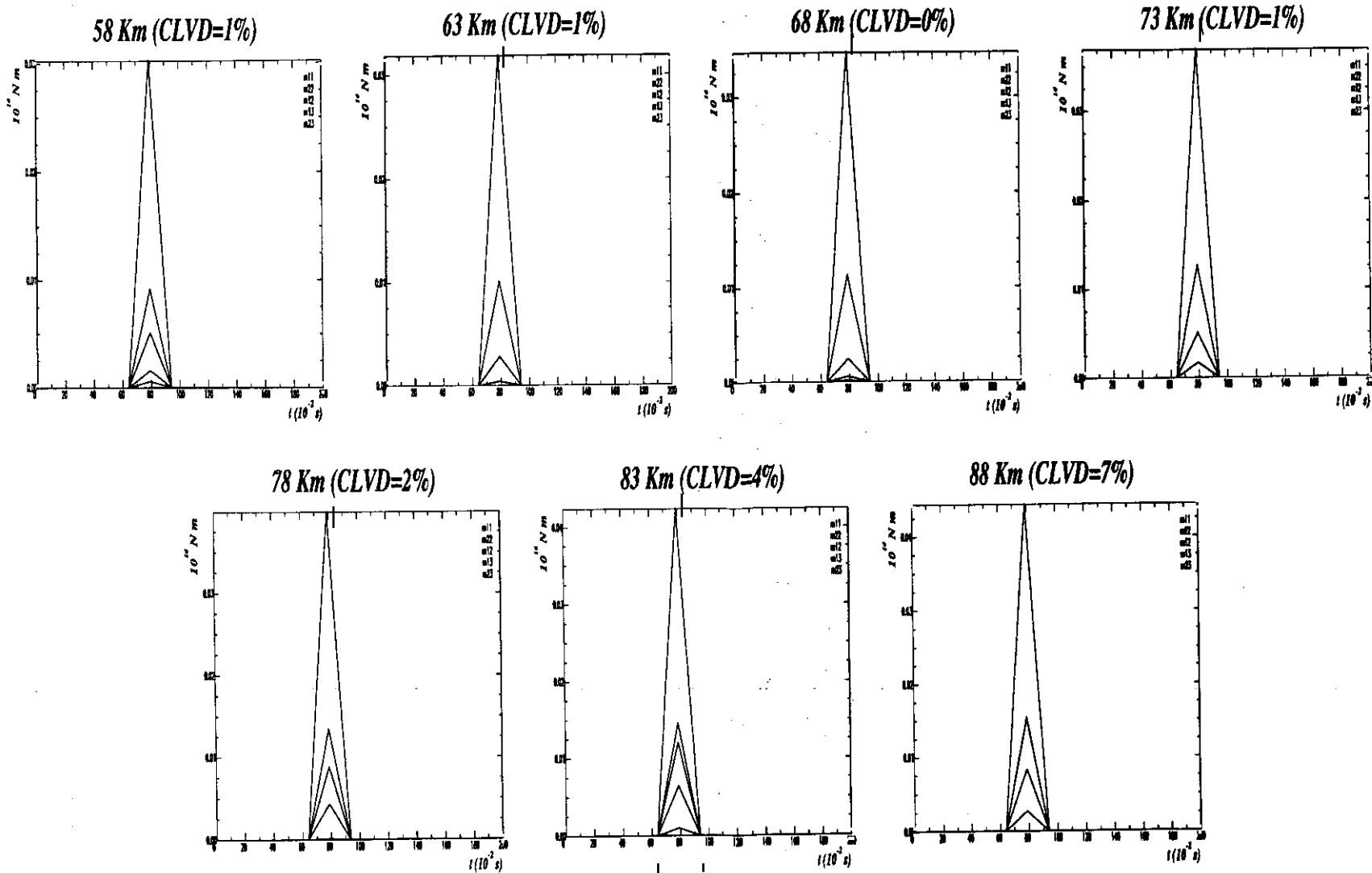


Fig. 3.21. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

## Mecanismo focal normal, CLVD=0%

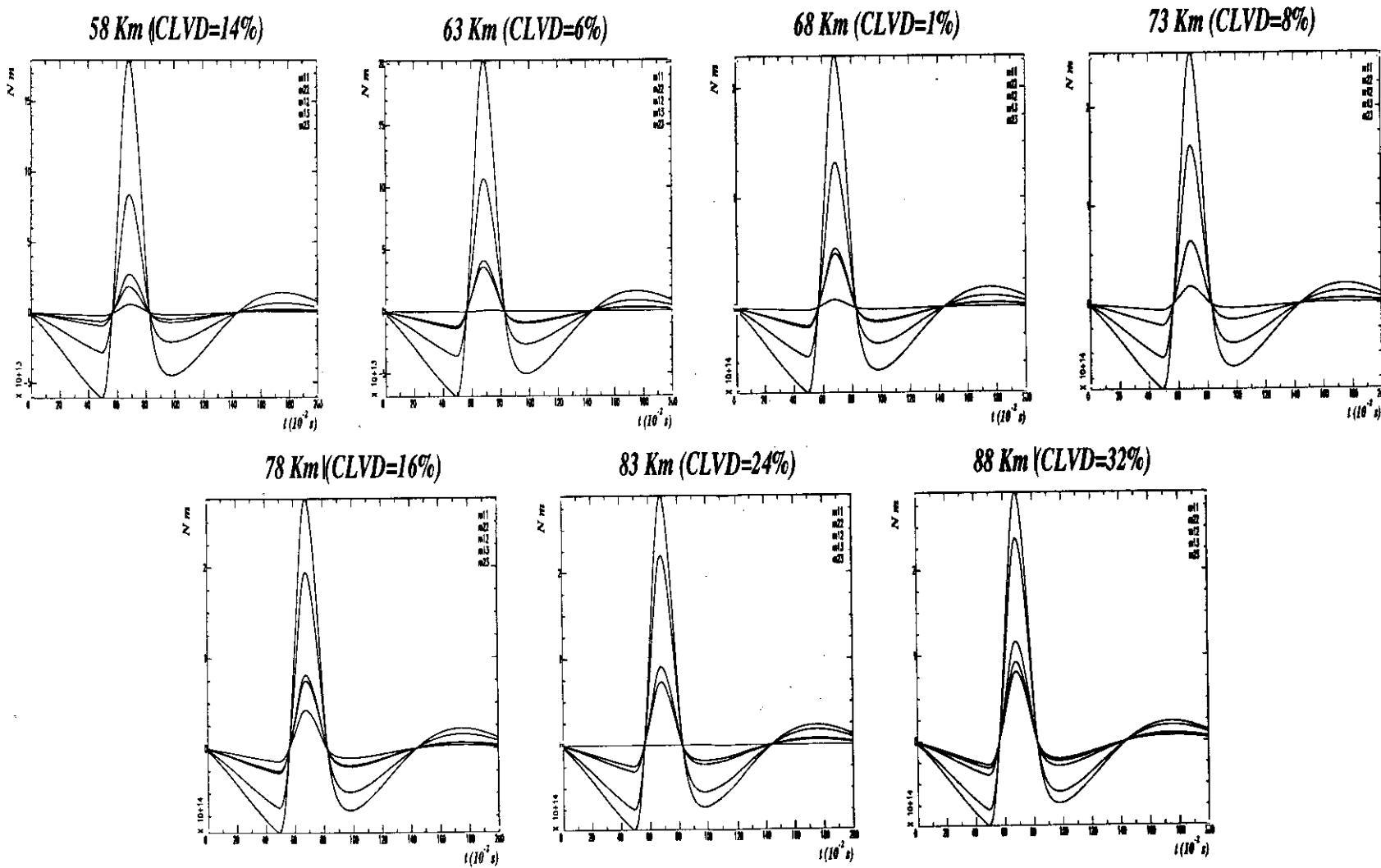


Fig. 3.22. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal normal, CLVD=0%

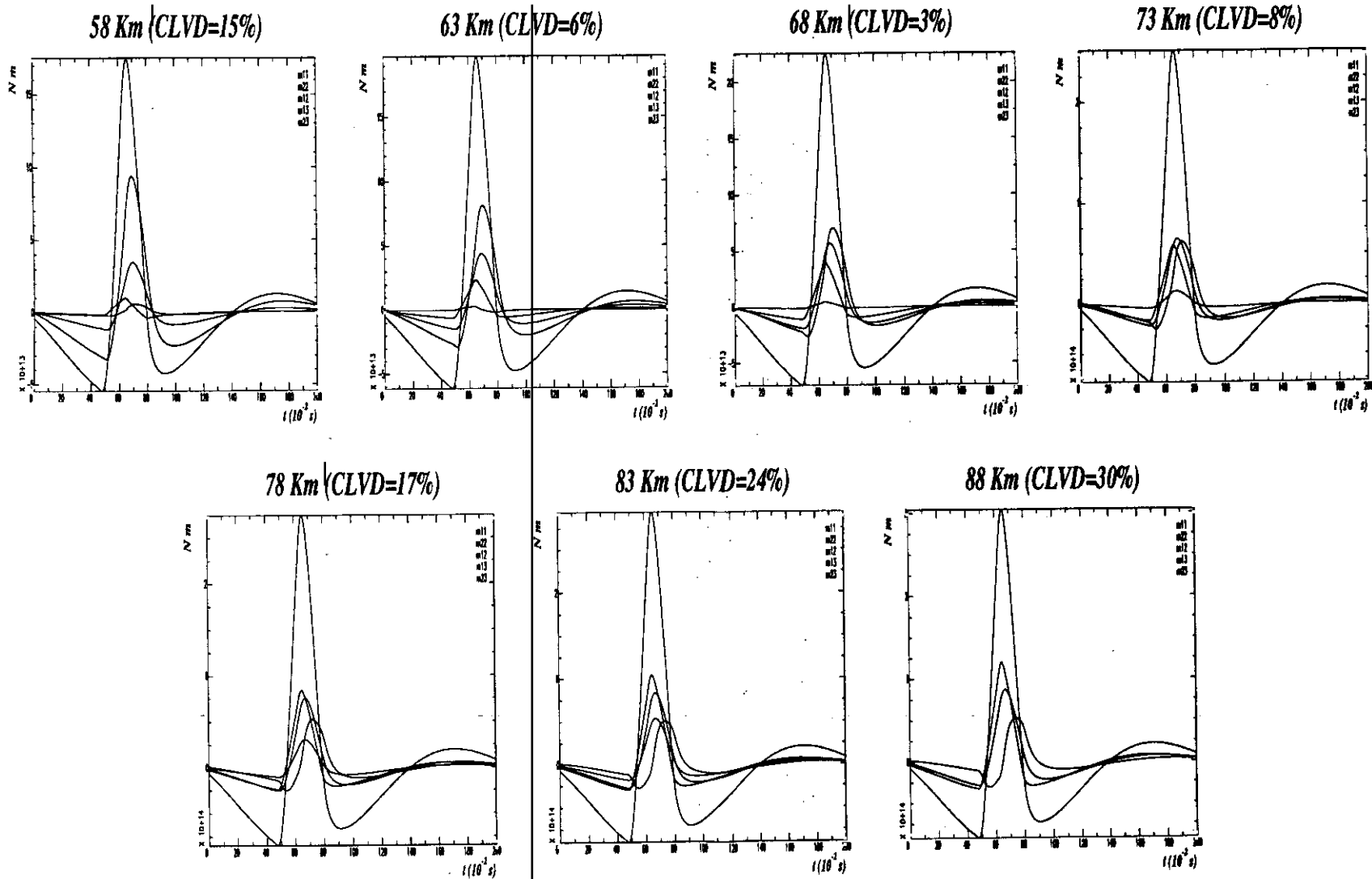


Fig. 3.23. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal normal. CLVD=0%

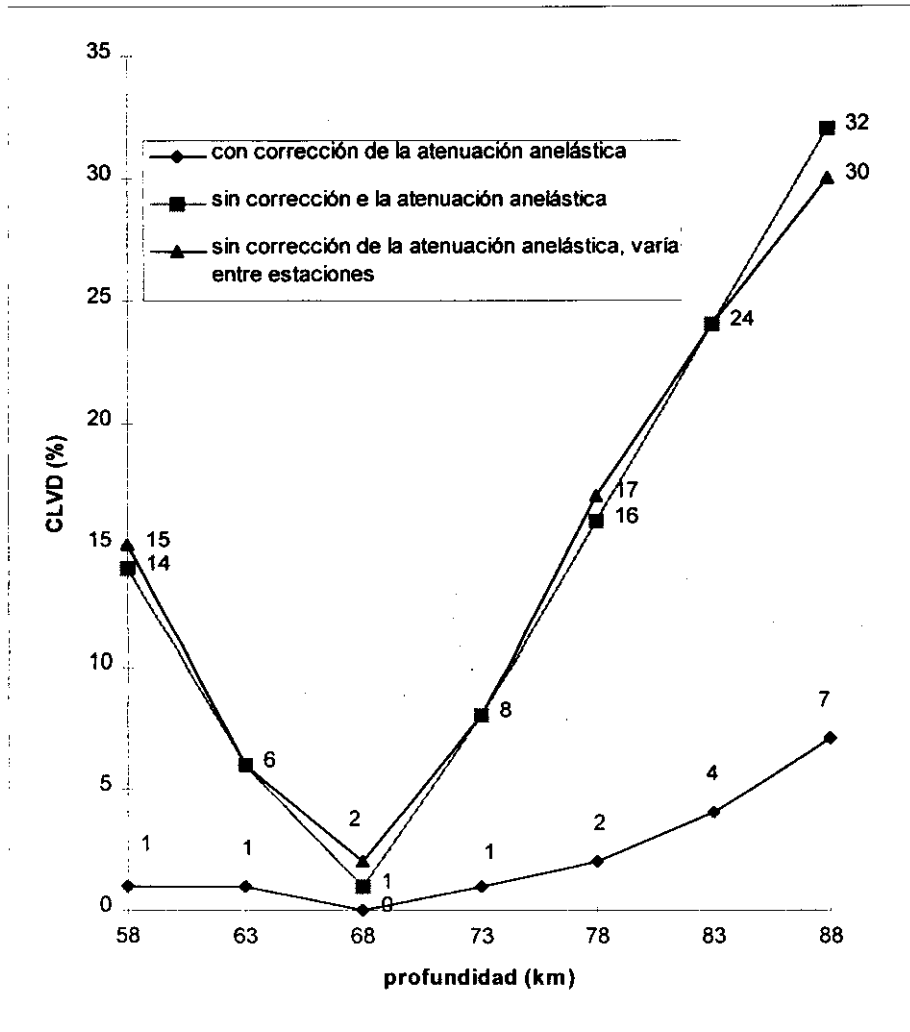


Fig. 3.24. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

A partir de las soluciones obtenidas para las distintas profundidades entre 58-88 km., que se muestran en la Tabla 3.7 y Figura 3.21-3.22, y Fig. A1.10-A1.12, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- para todas inversiones realizadas utilizando diferentes profundidades, las componentes del tensor momento sísmico son bastante estables y similares entre si, tanto para el caso en que sí se efectúa la corrección anelástica en los sismogramas sintéticos como en los que no se ha efectuado. Sin embargo, para las inversiones en que no se ha realizado la corrección por el efecto de la atenuación anelástica, las componentes del tensor momento sísmico se redondean y en lugar de dar un triángulo perfecto, la solución obtenida es un triángulo redondeado.
- la duración de la función temporal de la fuente no depende de la profundidad ni de si se efectúa o no la corrección de la atenuación anelástica y en todos los casos es de 0.30s. Sin embargo, la forma de la función temporal obtenida cuando no se corrige por el efecto de la atenuación no es exactamente la correcta (triángulo perfecto), y se obtiene un triángulo redondeado.
- los ejes de Tensión obtenidos discrepan en acimut hasta  $11^\circ$  y en el ángulo que forma con la vertical hasta  $3^\circ$  del valor inicial. El eje de presión el acimut varía hasta  $62^\circ$ , sin embargo esto no afecta al mecanismo focal ya que el valor inicial del ángulo que forman con la vertical es muy pequeño, es decir, el eje P es muy vertical.
- el momento sísmico escalar ( $M_0$ ) es del mismo orden de magnitud, con un rango de  $2.0-4.9 \times 10^{14}$  Nm, que el mecanismo focal inicial,  $1.0 \times 10^{14}$  Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido en los mecanismos focales para los casos de la inversión en que se ha realizado la corrección de la atenuación anelástica, es menor que para los casos en los que si se ha realizado dicha corrección. Se ha obtenido el mínimo de CLVD en los tres tipos de inversiones realizadas en la profundidad correcta. Para otras profundidades, cuando no se corrige por la atenuación anelástica, se obtienen porcentajes de CLVD muy elevados hasta 32% (ver Figura 3.24)
- los errores calculados en todos los parámetros obtenidos tras la inversión son pequeños comparados con estos, en las componentes del tensor momento sísmico y el momento sísmico escalar es 2 órdenes de magnitud inferior, los ejes de T y P de  $3^\circ$  en el caso más desfavorable, y en el porcentaje de CLVD es de 15% como máximo.

### 3.2.5. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD=15%

Los datos hipocentrales de este caso teórico se muestran en la Tabla 3.1. Este caso teórico corresponde a un mecanismo focal normal con 15% de CLVD que se ha seleccionado para generar los sismogramas sintéticos, se muestra en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.25. Como se observa todas las estaciones tienen un factor de calidad de 600 cuando las inversiones se realizan sin variarlo de unas a otras. En la Fig. 3.26 se muestra lo mismo que en la Fig. 3.25, pero se ha variado el factor de calidad de unas estaciones a otras, algunas mantienen el valor de 600 salvo est2, est5, est8, st11 que pasan a tener 300, que se muestran con un asterisco.

En la Tabla 3.8 se muestran las estaciones utilizadas para realizar la inversión: acimut, ángulo de incidencia en el foco y la distancia epicentral.

**Tabla 3.8.** Estaciones utilizadas en la inversión del mecanismo focal normal. CLVD=15%.

Estación	Acimut (°)	Ángulo de incidencia en el foco (°)	Distancia epicentral (km)
st20	10	63	105
st30	60	63	105
est5	74	81	259
st11	96	67	121
est2	121	63	105
est6	155	52	72
est4	180	81	259
est3	200	52	72
est8	275	67	121
st12	338	67	121

Para estudiar cómo afectan la variación de la atenuación anelástica y la profundidad a las soluciones obtenidas con la inversión, se han efectuado diversas inversiones con un rango de profundidades de 58-88 km y un intervalo de 5 km.

Mecanismo focal normal CLVD= 15%

$h=68$  Km,  $Q=300$

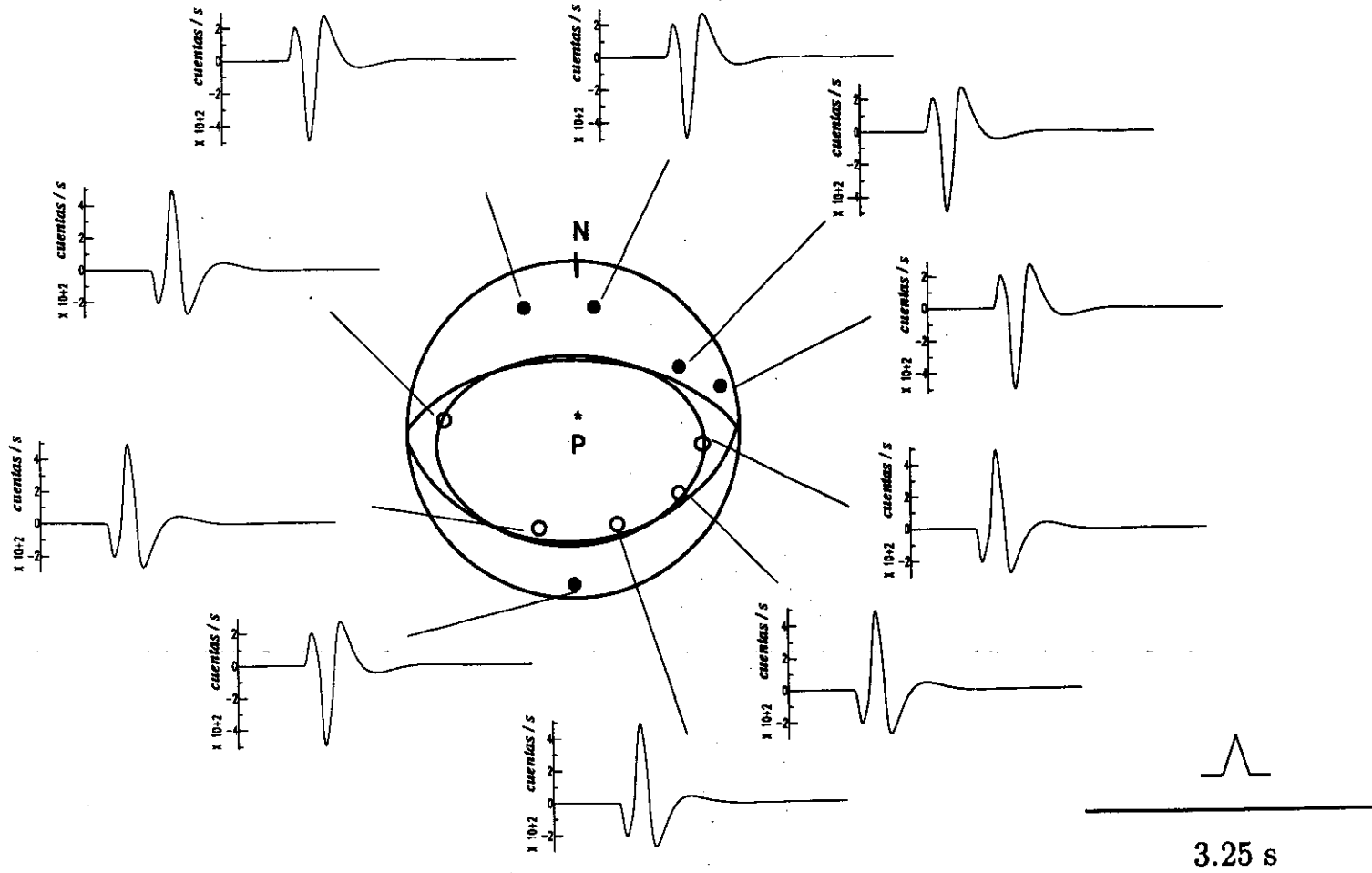


Fig. 3.25. Mecanismo focal normal con CLVD = 15%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

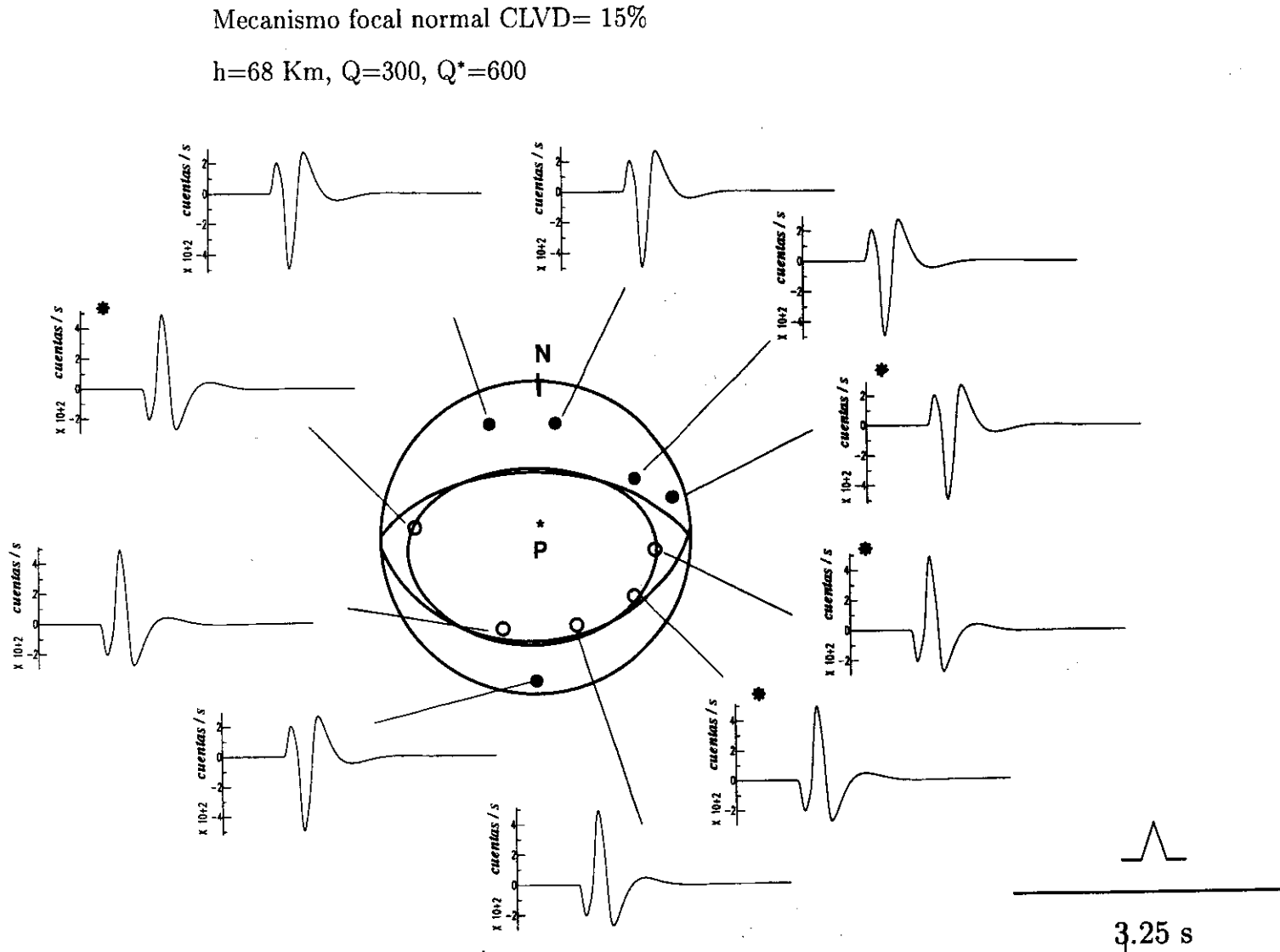


Fig. 3.26. Mecanismo focal normal con CLVD = 15%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.9a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal normal con 15% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

h (km)	M <sub>11</sub> (*)	M <sub>22</sub> (*)	M <sub>12</sub> (*)	M <sub>13</sub> (*)	M <sub>23</sub> (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
58	2.49±0.03	0.89±0.02	-1.13±0.03	1.31±0.02	0.11±0.03	11±2	0.30
63	3.46±0.02	0.54±0.03	-0.54±0.02	1.95±0.03	0.11±0.02	12±1	0.30
68	3.81±0.02	0.69±0.01	-0.07±0.01	1.87±0.02	0.15±0.02	15±0	0.30
73	3.97±0.02	0.72±0.03	-0.10±0.03	1.49±0.03	0.23±0.03	14±1	0.30
78	4.14±0.02	0.65±0.03	-0.16±0.02	1.48±0.02	0.46±0.02	14±2	0.30
83	4.04±0.03	0.45±0.02	-0.23±0.03	1.48±0.03	0.58±0.03	11±1	0.30
88	3.78±0.03	0.13±0.04	-0.28±0.03	1.53±0.03	0.68±0.02	6±1	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	2.19±0.04	-0.89±0.03	1.71±0.04	3.21±0.03	0.86±0.03	32±6	0.30
63	2.64±0.02	-0.76±0.03	1.94±0.03	3.12±0.03	0.77±0.03	30±5	0.30
68	3.32±0.02	-0.59±0.01	2.21±0.01	3.00±0.01	0.75±0.01	27±6	0.30
73	3.99±0.03	-0.37±0.03	2.47±0.02	2.87±0.03	0.73±0.03	26±7	0.30
78	5.13±0.03	-0.02±0.03	2.79±0.03	2.78±0.03	0.87±0.03	17±8	0.30
83	5.93±0.04	0.13±0.02	3.05±0.03	2.75±0.03	1.01±0.04	15±6	0.30
88	6.52±0.04	0.09±0.04	3.30±0.03	2.80±0.04	1.18±0.02	15±7	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	2.20±0.04	-0.89±0.03	1.71±0.04	3.20±0.03	0.86±0.03	32±5	0.30
63	2.64±0.02	-0.26±0.04	1.94±0.03	3.12±0.03	0.77±0.03	30±6	0.30
68	3.32±0.02	-0.59±0.01	2.21±0.01	3.00±0.01	0.75±0.01	27±7	0.30
73	3.99±0.03	-0.37±0.03	2.47±0.02	2.87±0.03	0.73±0.03	24±7	0.30
78	5.13±0.03	0.18±0.03	2.79±0.03	2.78±0.03	0.87±0.03	15±8	0.30
83	5.93±0.04	0.13±0.02	3.05±0.03	2.75±0.03	1.03±0.04	15±6	0.30
88	6.51±0.05	0.09±0.04	3.10±0.05	2.80±0.04	1.18±0.02	15±8	0.30

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

**Tabla 3.9b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades del caso teórico con mecanismo focal normal 15% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	80±2 335±1	14±0 199±1	3.47±0.06	90%	90%
<b>63</b>	76±2 360±1	14±1 186±1	4.80±0.07	100%	100%
<b>68</b>	78±1 359±0	12±0 188±1	4.60±0.08	100%	100%
<b>73</b>	81±0 359±1	10±2 195±0	4.61±0.08	100%	100%
<b>78</b>	81±3 359±3	10±3 208±1	4.71±0.08	100%	100%
<b>83</b>	81±1 358±2	12±2 215±1	4.60±0.07	100%	100%
<b>88</b>	79±0 358±1	14±2 220±1	4.20±0.08	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	61±1 21±2	32±1 172±1	4.00±0.10	100%	100%
<b>63</b>	65±1 22±2	29±1 169±2	4.20±0.10	100%	100%
<b>68</b>	70±1 23±2	24±1 172±0	4.71±0.10	100%	100%
<b>73</b>	86±1 25±2	14±2 279±2	4.51±0.10	90%	90%
<b>78</b>	77±1 23±2	14±3 187±3	6.41±0.10	100%	100%
<b>83</b>	78±2 23±1	12±1 195±2	7.30±0.10	100%	100%
<b>88</b>	79±3 23±2	11±1 203±2	7.90±0.10	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	61±2 22±1	32±1 172±1	4.00±0.10	100%	100%
<b>63</b>	65±1 22±1	29±1 169±2	4.20±0.10	100%	100%
<b>68</b>	70±1 23±2	24±1 172±0	4.71±0.10	100%	100%
<b>73</b>	73±2 23±1	19±2 175±2	5.28±0.10	100%	100%
<b>78</b>	77±1 24±1	14±3 187±2	6.50±0.10	100%	100%
<b>83</b>	78±1 23±2	12±1 196±1	7.27±0.10	100%	100%
<b>88</b>	79±1 23±2	11±1 203±1	7.90±0.10	100%	100%

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

Las soluciones obtenidas utilizando un rango de 58-88 km, se muestran en la Tabla 3.9 y Figura 3.27-3.30, A1-13-A1.15, agrupados en los tres tipos de inversiones ya descritos anteriormente. Las soluciones obtenidas permiten extraer las siguientes conclusiones:

- las componentes  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ ,  $m_{23}$  obtenidas corrigiendo la atenuación anelástica, son menores que las no corregidas, para todas las profundidades. Para  $m_{11}$ , y  $m_{22}$ , esto depende de la profundidad, y sólo se cumple para profundidades mayores a la correcta.
- la duración de la fuente temporal obtenida es de 0.30s, no varía en ninguno de los casos obteniéndose. Sin embargo, su forma varía, cuando se efectúa la corrección es un triángulo perfecto igual que la función temporal correcta (Fig. 3.27). Cuando no se efectúa dicha corrección, la forma de la función temporal obtenida se deforma y redondea (Fig. 3.28, 3.29) y se aleja del triángulo perfecto que debería obtenerse.
- la influencia de la no corrección de la atenuación anelástica es importante en la parte de DC obtenida, ya que cuando no se realiza, los ejes de Tensión se alejan del mecanismo correcto en el acimut hasta  $26^\circ$  y en el ángulo que forma con la vertical hasta  $18^\circ$ , mientras que cuando se realiza dicha corrección la desviación respecto al valor correcto es de  $4^\circ$  y  $2^\circ$  respectivamente. Para los ejes de Presión, sucede algo similar, para las inversiones realizadas sin corregir la atenuación anelástica, el acimut discrepa del correcto hasta  $90^\circ$  y el ángulo con la vertical hasta  $21^\circ$ , mientras que en las inversiones donde se ha corregido la atenuación anelástica es como máximo de  $31^\circ$  y  $3^\circ$  respectivamente. Sin embargo, aunque para el eje P se obtienen soluciones numéricas con un rango muy amplio, esto no influye en el tipo de mecanismo focal obtenido ya que es un eje vertical.
- el momento sísmico escalar obtenido, varía de  $3.5-7.9 \times 10^{14}$  Nm, y es del mismo orden de magnitud que el correcto  $1.0 \times 10^{14}$  Nm. Para todas las profundidades en que se ha corregido la atenuación anelástica, el momento escalar obtenido es menor que las inversiones donde no se ha efectuado dicha corrección.
- el porcentaje de CLVD obtenido para los casos en que se ha efectuado la corrección anelástica es menor y mucho más próximo al valor correcto (15%), obteniéndose al representar el porcentaje del CLVD frente a la profundidad, el punto crítico en la profundidad correcta (ver Fig. 3.30). Cuando no se efectúa la corrección anelástica, el porcentaje de CLVD se ve muy afectado, alejándose hasta un 17% (valor de 32%) de su valor correcto, llegando a desaparecer el punto crítico.
- los errores calculados para las componentes del tensor momento sísmico y el momento sísmico escalar, son dos órdenes de magnitud inferior al valor obtenido, los ejes de esfuerzos tienen  $3^\circ$  como máximo de error, y el porcentaje de CLVD es del 8% en el caso más desfavorable.

# Mecanismo focal normal, CLVD=15%

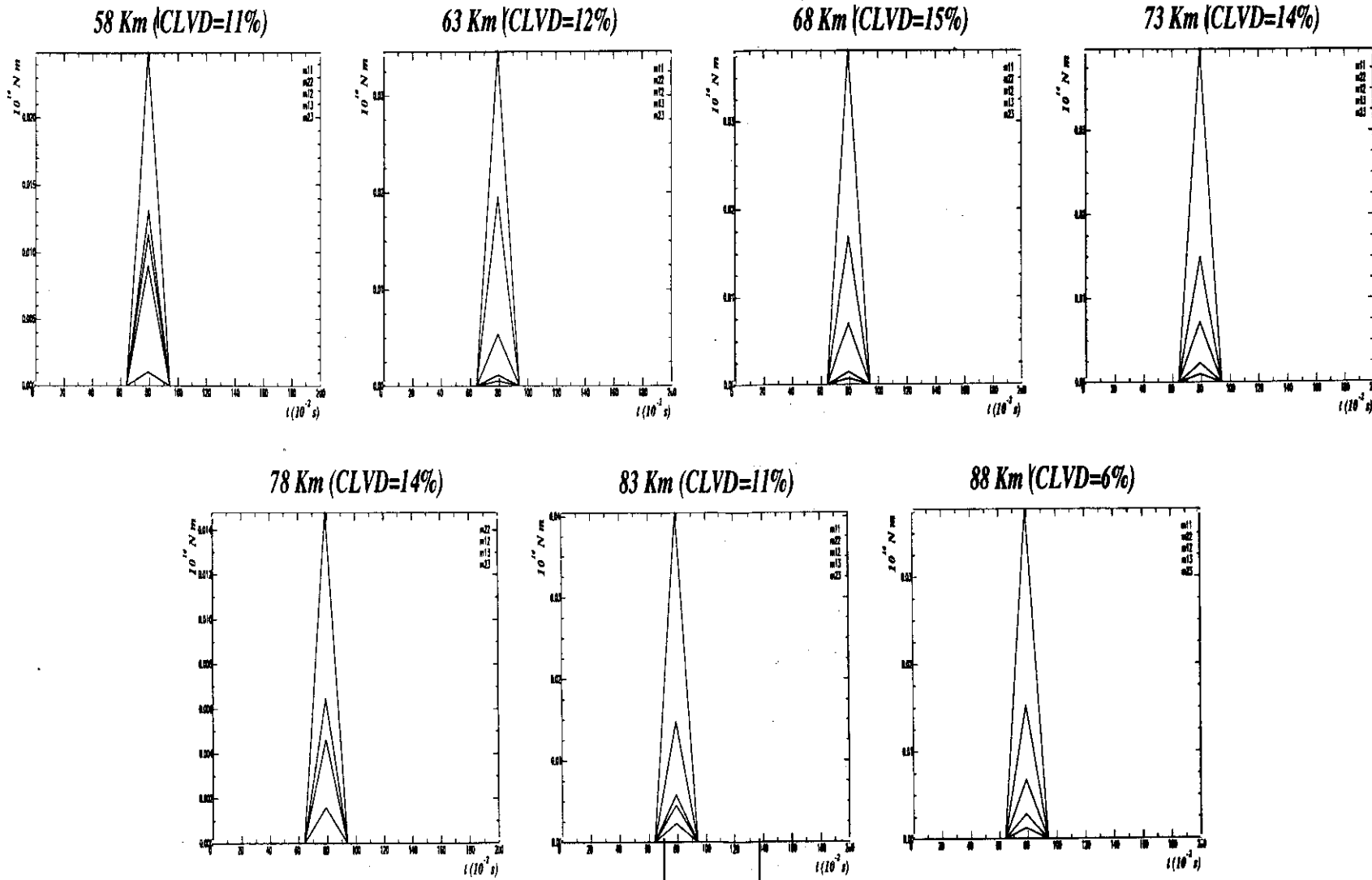


Fig. 3.27. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal normal, CLVD=15%

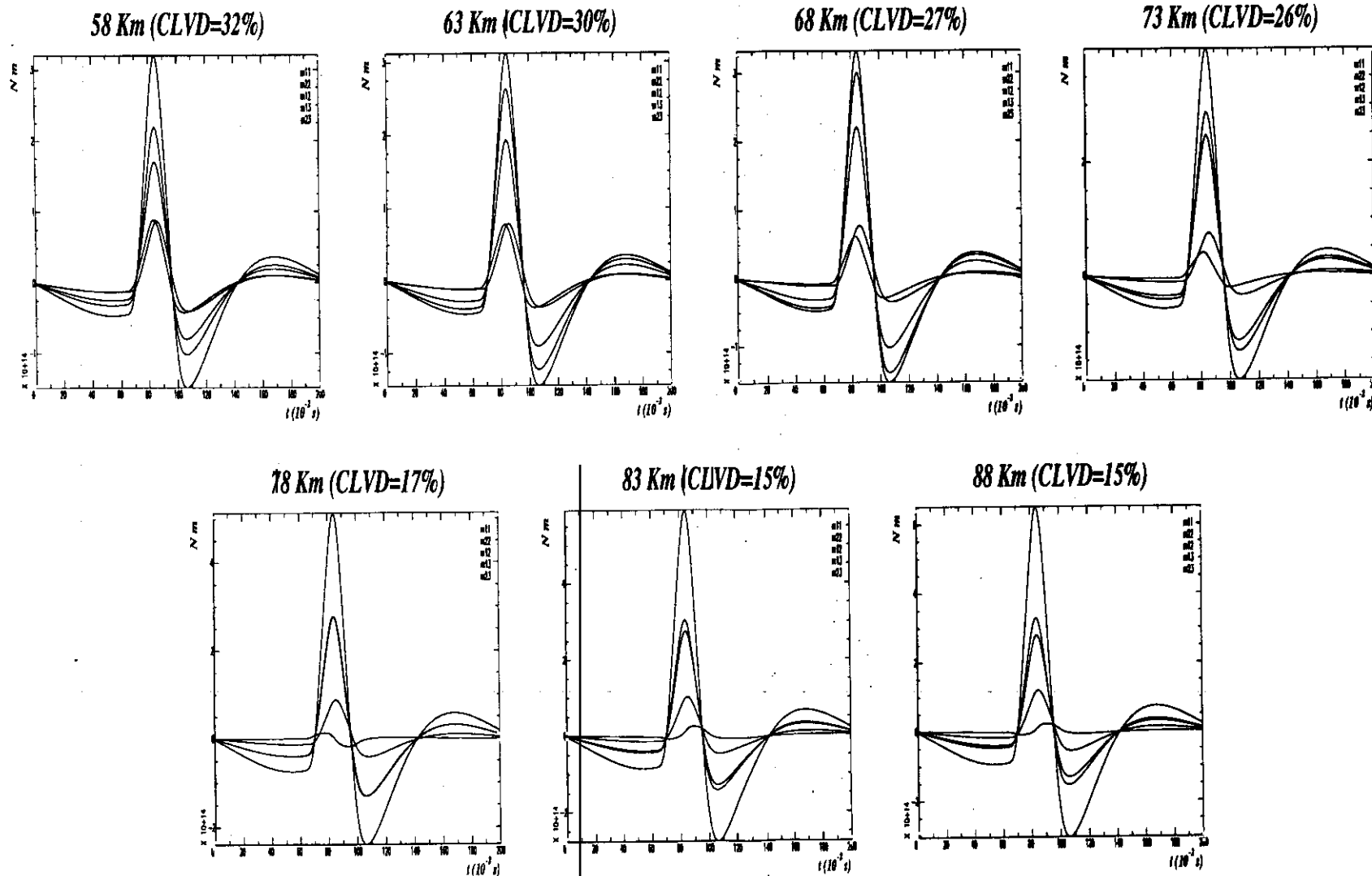


Fig. 3.28. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal normal, CLVD=15%

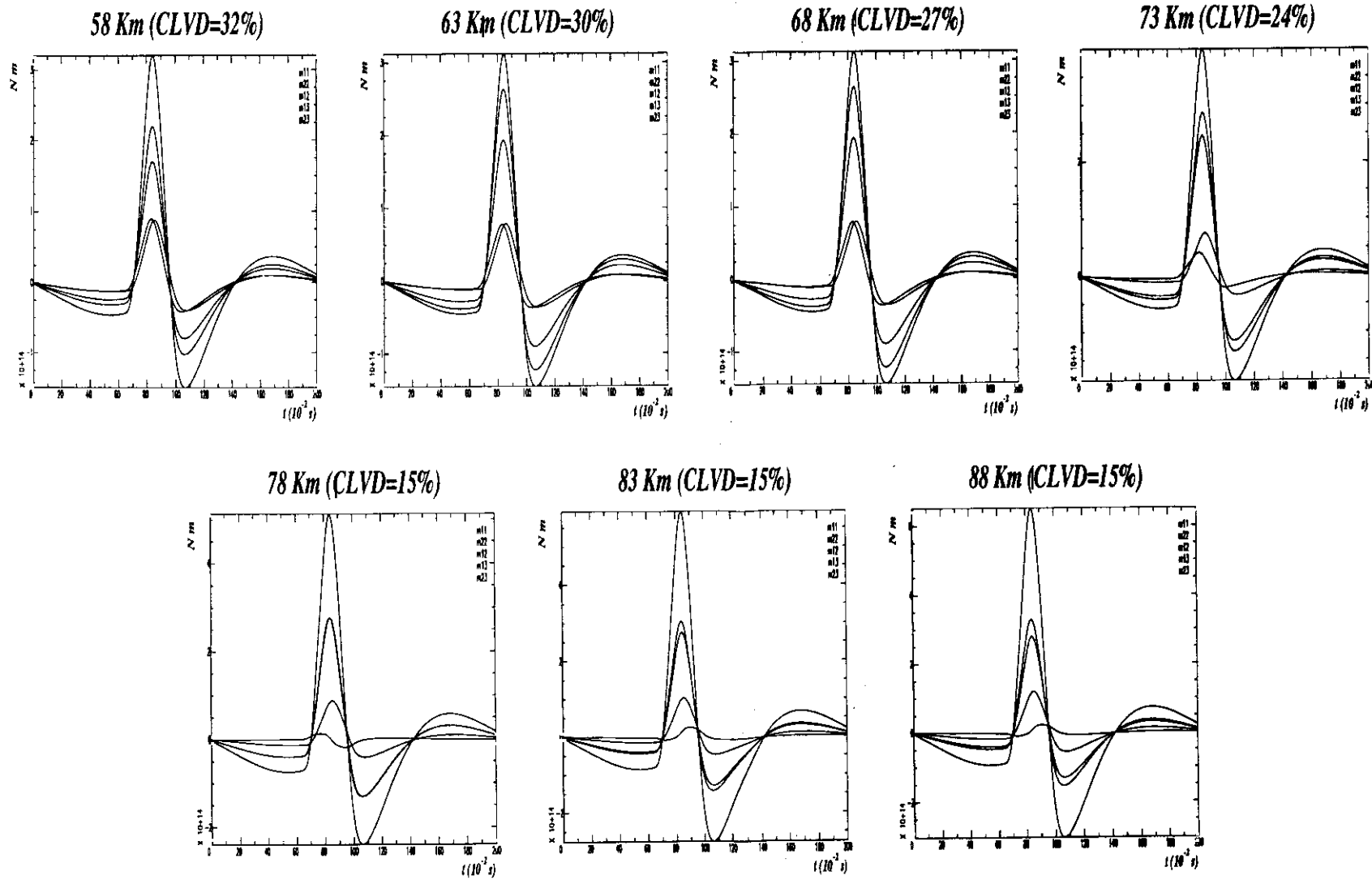


Fig. 3.29. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal normal. CLVD=15%

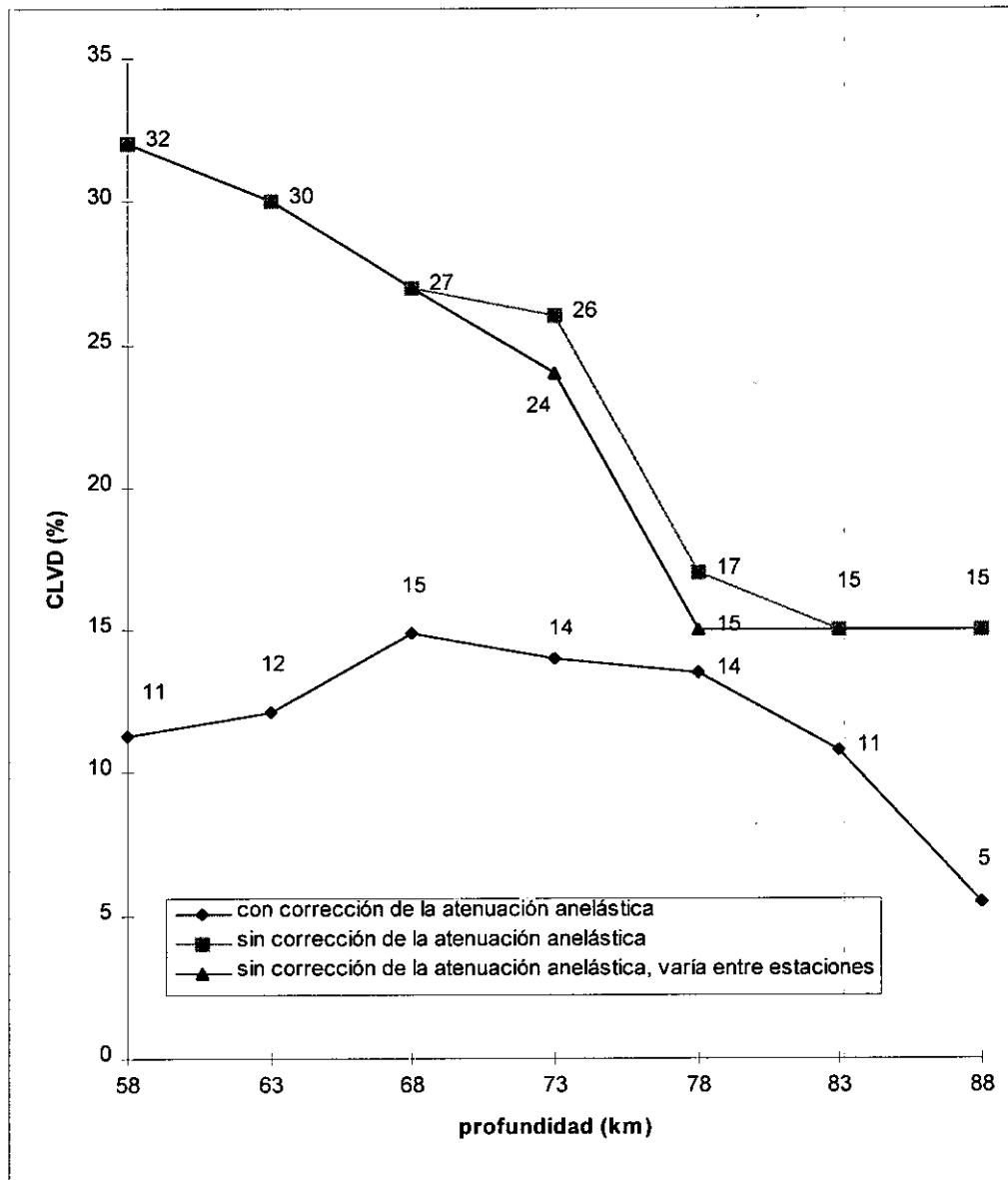


Fig. 3.30. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

### **3.2.6. Mecanismo focal de deslizamiento en la dirección del buzamiento. CLVD= 35%**

Los datos hipocentrales de este caso teórico se muestran en la Tabla 3.1. El mecanismo focal normal con 35% de CLVD seleccionado para generar los sismogramas teóricos, se muestra en la Fig. 3.31. También, se han representado las estaciones sobre la esfera focal, los ejes de T, P, la atenuación anelástica, la función temporal, la profundidad de 68 km. y las estaciones que tienen una atenuación anelástica de 600. Con el fin de estudiar cómo afecta la atenuación anelástica a las soluciones obtenidas de la inversión, se ha variado la atenuación anelástica de unas estaciones a otras, est2, est5, est8, st11, tienen poseen una atenuación de 300 (representadas con un asterisco), y el resto permanece con 600, según se muestra en la Fig. 3.32, junto con las superficies nodales y la función temporal.

En la Tabla 3.2 se han listado las estaciones utilizadas en la inversión: acimut, ángulo de incidencia en el foco, y la distancia epicentral. Las inversiones realizadas se han efectuado con las variaciones propuestas anteriormente: variando la profundidad entre 58-88 km con un intervalo de 5 km, corrigiendo o no la atenuación anelástica y variándola de unas estaciones a otras.

Las soluciones obtenidas tras las inversiones realizadas para todas las profundidades se muestran en la Tabla 3.10 y Fig. 3.33-3.36, y en el Anexo Fig. A1.16-A1.18. En la Tabla 3.10a se muestran las componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, y la duración de la función temporal. En la Tabla 3.10b se muestran los ejes de esfuerzos mediante  $\theta$  (ángulo que forma con la vertical) y  $\phi$  (acimut), el momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y el porcentaje de aciertos en polaridades (score) de DC y CLVD.

Mecanismo focal normal CLVD= 35%  
h=68 Km, Q=300

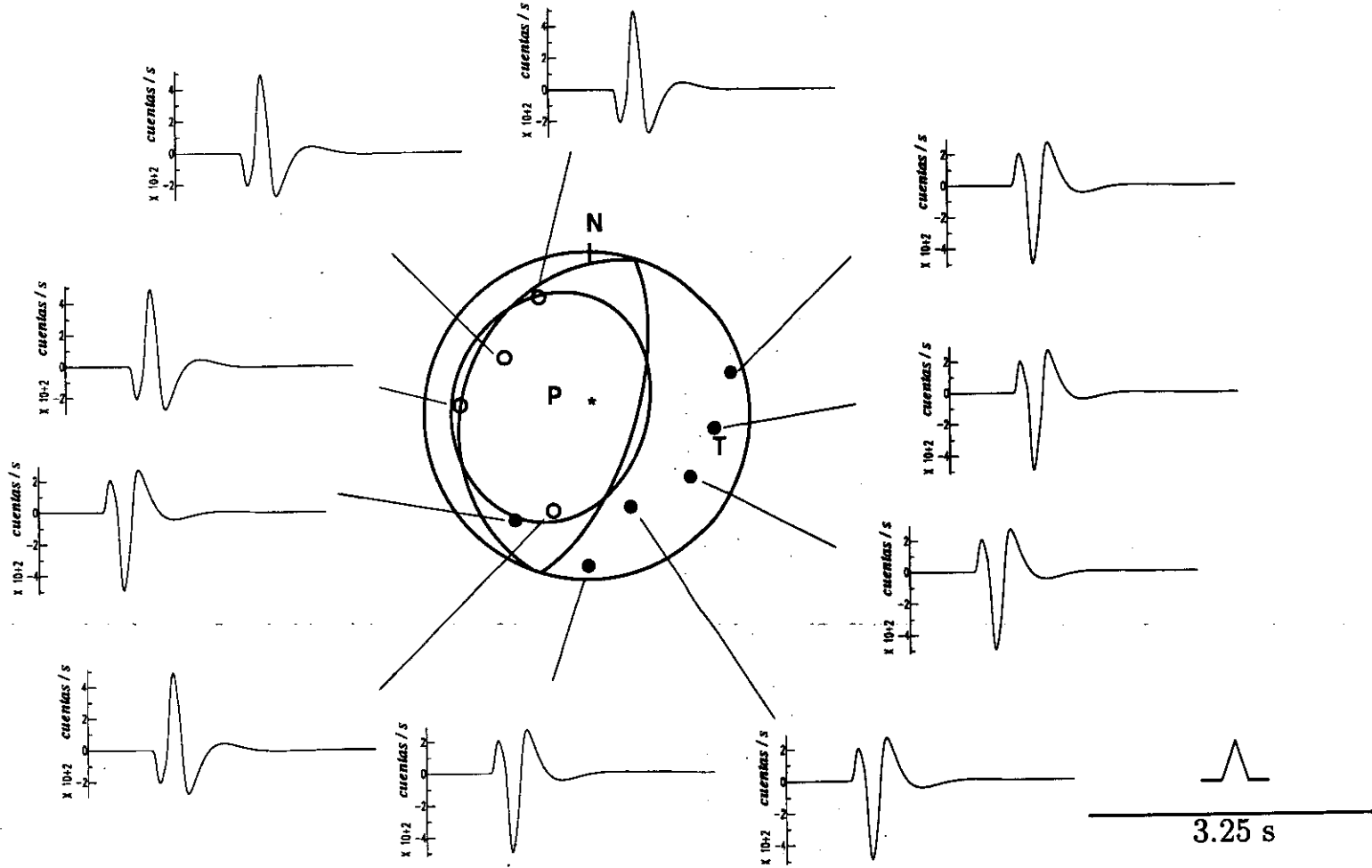


Fig. 3.31. Mecanismo focal normal con CLVD =35%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

Mecanismo focal normal CLVD= 35%

$h=68$  Km,  $Q=300$ ,  $Q^*=600$

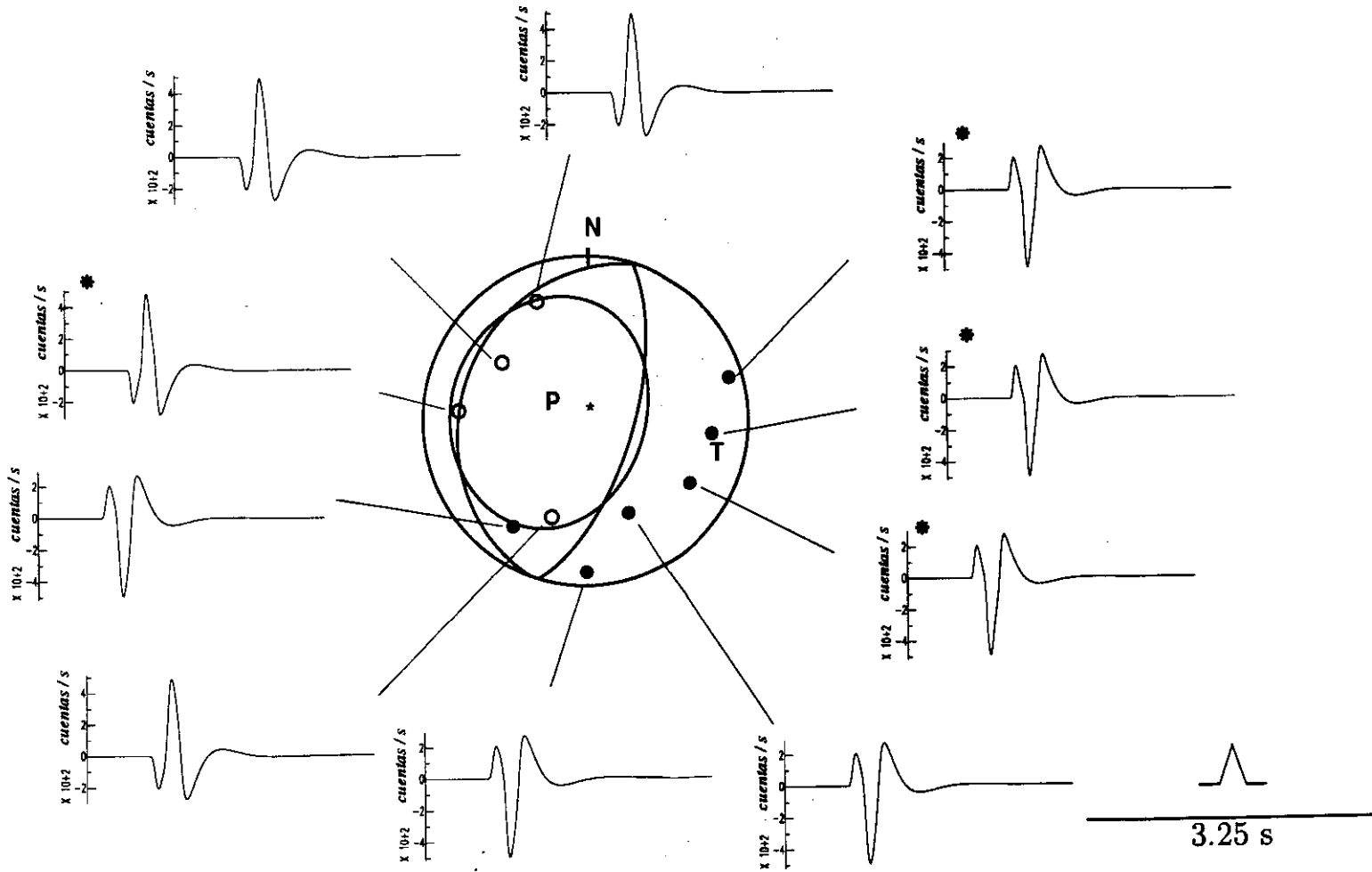


Fig. 3.32. Mecanismo focal normal con CLVD =35%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.10a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal normal con 35% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
58	0.71±0.04	0.77±0.03	0.12±0.03	-0.01±0.03	1.55±0.03	31±3	0.30
63	0.74±0.03	0.84±0.03	0.04±0.02	-0.19±0.04	1.37±0.03	34±2	0.30
68	0.79±0.03	0.93±0.01	-0.08±0.01	-0.32±0.02	1.17±0.02	35±2	0.30
73	0.80±0.02	1.00±0.04	-0.21±0.03	-0.44±0.03	1.02±0.04	31±3	0.30
78	0.81±0.03	1.10±0.04	-0.37±0.03	-0.55±0.03	0.91±0.03	25±5	0.30
83	0.79±0.04	1.19±0.04	-0.52±0.04	-0.65±0.04	0.81±0.04	20±5	0.30
88	0.74±0.04	1.25±0.04	-0.67±0.04	-0.75±0.03	0.73±0.02	13±5	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	1.59±0.05	1.08±0.03	0.11±0.03	-0.32±0.03	4.061±0.04	27±1	0.30
63	1.84±0.04	1.29±0.03	0.11±0.03	-0.53±0.04	3.94±0.03	30±1	0.30
68	2.11±0.03	1.57±0.01	0.11±0.01	-9.18±0.02	3.66±0.03	37±2	0.30
73	2.37±0.02	1.82±0.04	0.09±0.03	-1.27±0.03	3.51±0.05	42±3	0.30
78	2.61±0.03	2.18±0.04	0.07±0.03	-1.66±0.04	3.38±0.05	46±3	0.30
83	2.82±0.04	2.55±0.04	0.04±0.04	-2.10±0.05	3.24±0.04	45±2	0.30
88	2.93±0.05	2.89±0.04	0.05±0.04	-2.56±0.03	3.10±0.03	40±2	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	1.45±0.05	0.84±0.03	1.08±0.03	-0.42±0.04	3.56±0.05	28±1	0.30
63	1.70±0.05	1.02±0.04	1.14±0.04	-0.59±0.05	3.45±0.04	32±2	0.30
68	1.99±0.02	1.29±0.01	1.03±0.01	-0.10±0.02	3.19±0.03	39±2	0.30
73	2.28±0.02	1.54±0.04	0.94±0.03	-1.28±0.04	3.03±0.05	43±2	0.30
78	2.56±0.03	1.91±0.04	0.70±0.03	-1.66±0.04	2.89±0.05	49±2	0.30
83	2.83±0.04	2.32±0.04	0.39±0.04	-2.10±0.05	2.72±0.05	46±5	0.30
88	3.02±0.06	2.73±0.04	-0.02±0.04	-2.58±0.03	2.54±0.04	40±3	0.30

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 3.10b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades del caso teórico con mecanismo focal normal 35% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	63±0 85±0	27±0 276±0	1.90±0.10	100%	90%
<b>63</b>	66±0 94±0	25±0 279±0	1.81±0.10	100%	90%
<b>68</b>	69±0 108±0	21±0 285±0	1.80±0.10	100%	90%
<b>73</b>	72±1 118±1	19±2 292±2	1.82±0.10	100%	90%
<b>78</b>	73±1 123±1	17±1 300±2	2.00±0.10	100%	90%
<b>83</b>	75±1 126±0	15±0 311±2	2.01±0.11	100%	90%
<b>88</b>	76±1 126±0	15±0 322±2	2.12±0.11	100%	90%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	61±0 68±0	34±0 283±0	4.70±0.10	100%	100%
<b>63</b>	64±0 66±0	32±0 286±0	4.71±0.10	100%	100%
<b>68</b>	67±0 67±0	29±0 290±0	4.71±0.10	100%	100%
<b>73</b>	70±1 69±1	27±0 293±2	4.82±0.10	100%	90%
<b>78</b>	69±1 87±1	25±1 298±2	5.02±0.10	100%	90%
<b>83</b>	67±1 119±0	23±0 303±1	5.41±0.11	100%	90%
<b>88</b>	69±1 130±0	21±0 310±1	5.93±0.11	100%	90%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	61±0 67±0	35±0 285±0	4.12±0.10	90%	90%
<b>63</b>	65±0 64±0	33±0 288±0	4.21±0.10	90%	90%
<b>68</b>	70±0 62±0	30±0 291±0	4.21±0.10	90%	90%
<b>73</b>	75±1 57±1	27±0 296±1	4.31±0.10	90%	90%
<b>78</b>	77±1 62±1	24±1 300±1	4.52±0.10	90%	90%
<b>83</b>	69±1 144±0	22±0 307±1	5.01±0.11	90%	90%
<b>88</b>	70±1 142±0	20±0 315±1	5.71±0.11	90%	90%

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

A partir de las soluciones mostradas en las Tablas 3.10, las Fig. 3.33-3.36, y las Fig. A1.16-A1.18 del Anexo 1, se observan las siguientes características:

- la no corrección de la atenuación anelástica influye en las soluciones obtenidas, ya que las componentes del tensor momento sísmico son menores en el caso de la corrección, el eje de Tensión se aleja del valor correcto hasta  $8^\circ$  para el ángulo que forma con la vertical,  $60^\circ$  en el acimut, mientras que el eje de Presión se aleja  $14^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente. Sin embargo, cuando se corrige la atenuación, la variación del eje de Tensión es de  $7^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical,  $14^\circ$  en el acimut, mientras que el eje P varía respectivamente en  $6^\circ$  y  $37^\circ$ .
- la duración de la función temporal obtenida es de 0.30s en todos los caso. Sin embargo, la forma varía según el tipo de inversión realizada. Cuando se corrige la atenuación es igual que la correcta un triángulo perfecto, cuando no se corrige la atenuación, se redondea y no coincide exactamente con la correcta (Fig. 3.33-3.35).
- el momento sísmico escalar es menor en el caso de la no corrección anelástica varía entre  $1.8-2.1 \times 10^{14}$  Nm, mientras que cuando se corrige varía entre  $4.7-5.9 \times 10^{14}$  Nm, muy similar al momento sísmico correcto que es  $4.92 \times 10^{14}$  Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido para todas la profundidades se aleja más del valor correcto en el caso en el que se corrige la atenuación anelástica donde varía entre 31-13%, que cuando no se corrige la atenuación y es igual en todas las estaciones donde varía entre 27-40% y cuando no se corrige pero varía de unas estaciones a otras donde varía entre 28-40%. Sin embargo, al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad, el punto crítico se produce en la profundidad correcta 68 km, sólo cuando se corrige la atenuación y el valor de CLVD coincide con el correcto 34%, cuando no se corrige el punto crítico se desplaza a una profundidad diferente de la correcta 10 km más profunda y el valor del CLVD no coincide con el correcta (Fig. 3.36).
- El porcentaje de aciertos en polaridades (score) es del 100% en todos los casos tanto para el CLVD como para el DC, con independencia de si se corrige o no la atenuación anelástica.
- los errores calculados son en el caso de los componentes del tensor un orden de magnitud menor, en los ejes de esfuerzos son de hasta  $2^\circ$ , en el momento sísmico escalar es hasta un orden de magnitud menor, y en el porcentaje de CLVD de hasta 5%.

# Mecanismo focal normal, CLVD=35%

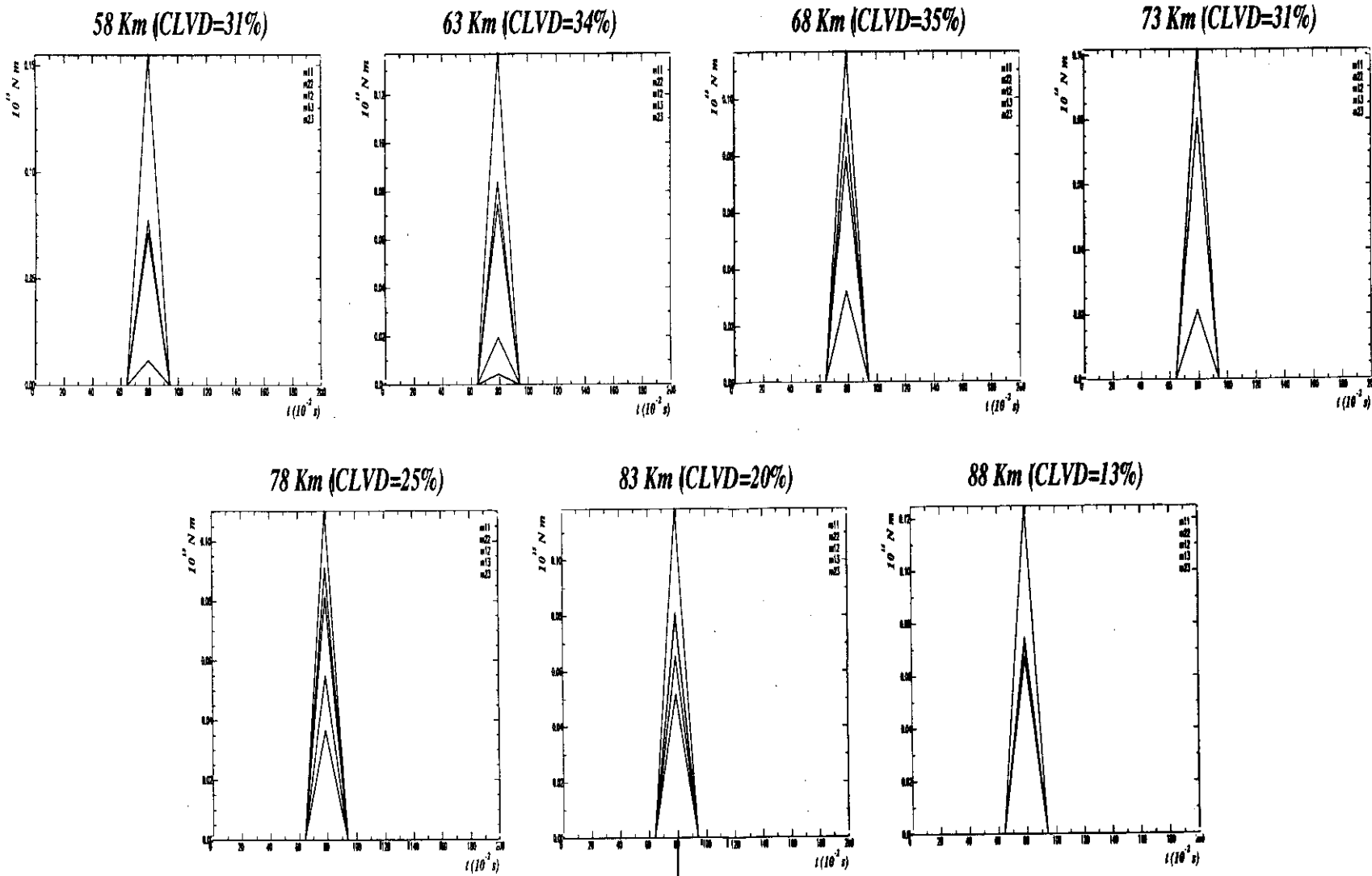


Fig. 3.33. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

## Mecanismo focal normal, CLVD=35%

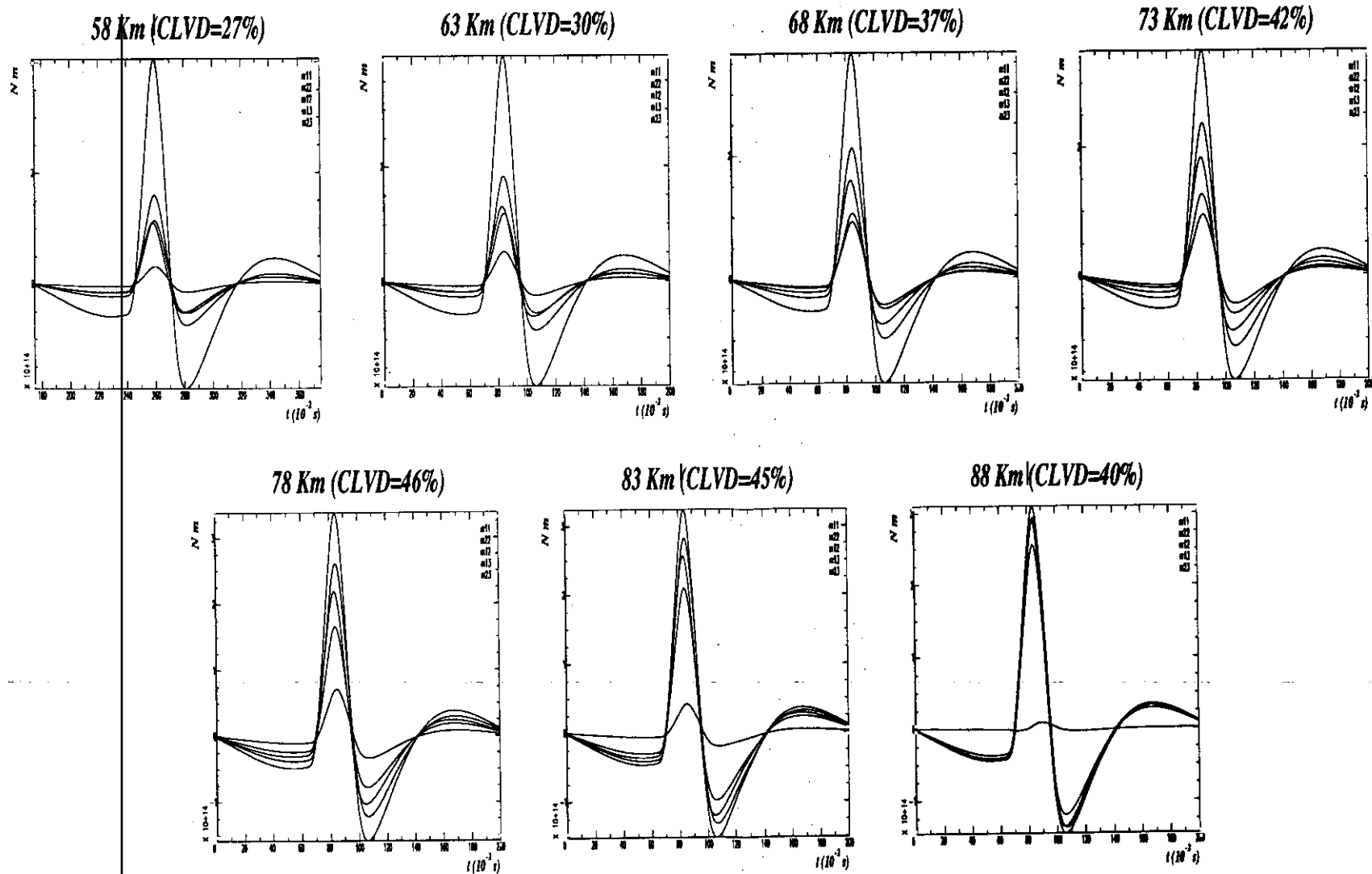
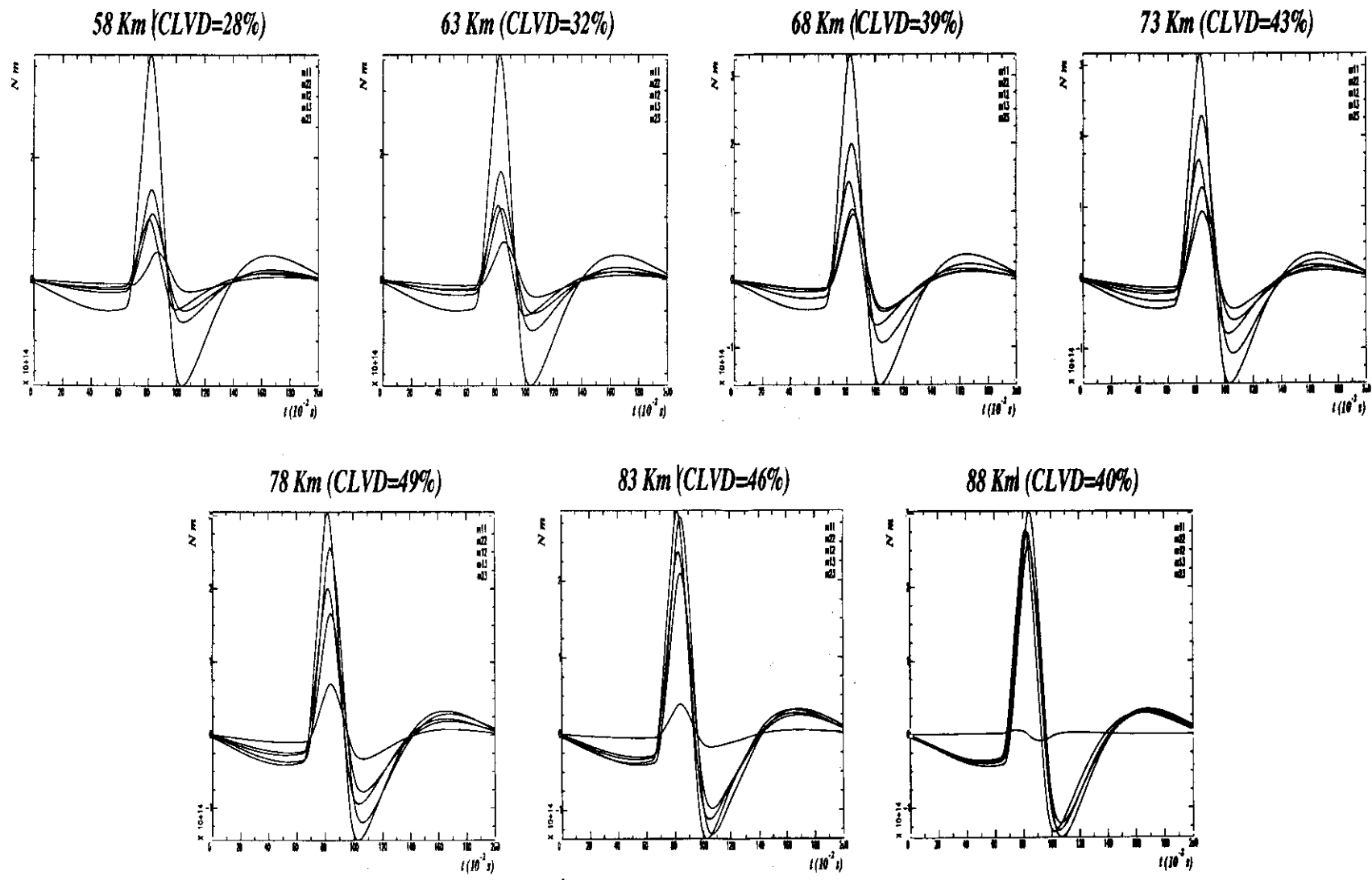


Fig. 3.34. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal normal, CLVD=35%



106

Fig. 3.35. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal normal. CLVD=35%

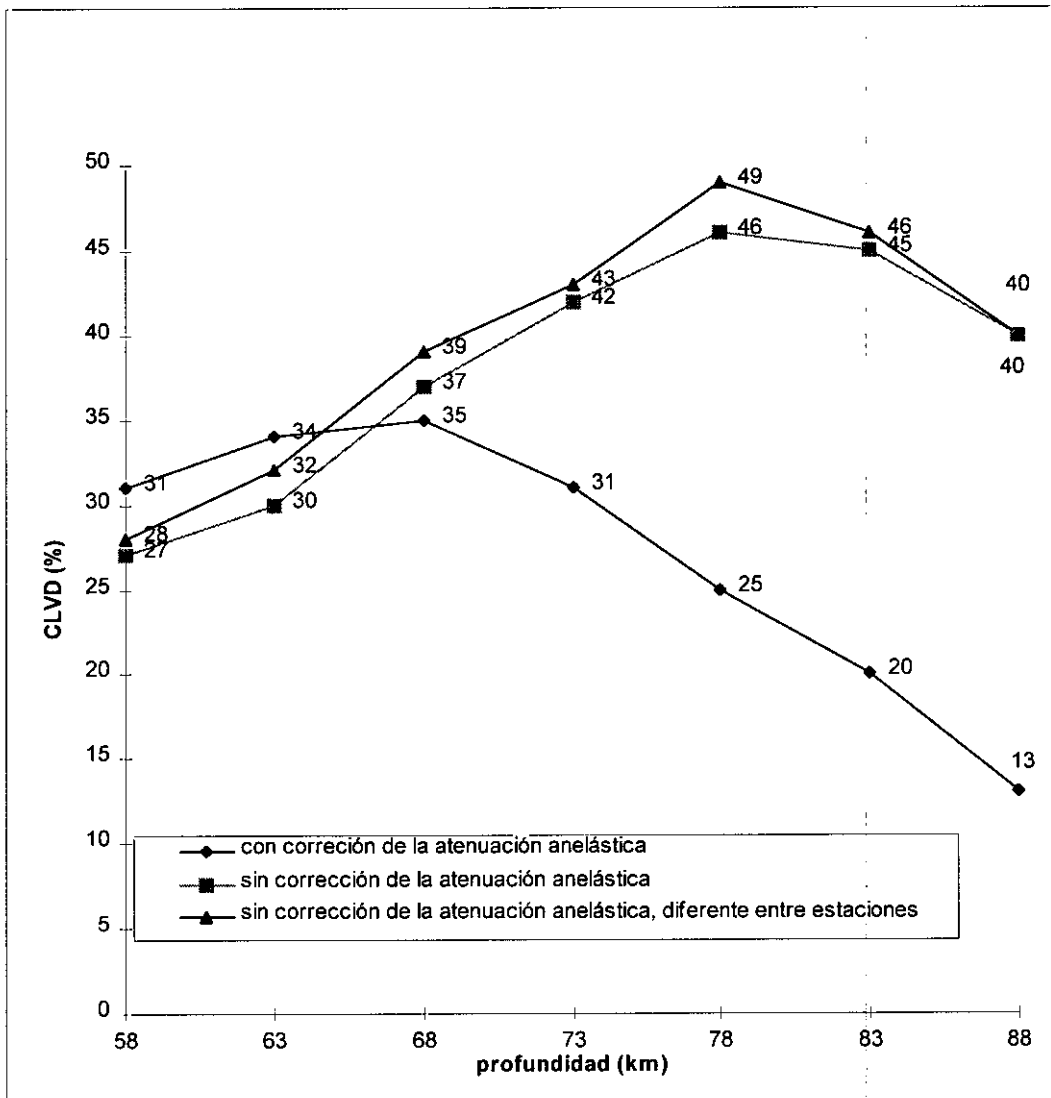


Fig. 3.36. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

### 3.2.7. Mecanismo focal vertical. CLVD = 0%

Se han generado los sismogramas teóricos para la onda P directa, para un caso con un mecanismo focal vertical, profundidad de 68 km. y duración de la función temporal es de 0.30s. Los datos numéricos de dicho patrón de radiación se muestra en Tabla 3.1, mediante las componentes del tensor momento sísmico, los ejes de esfuerzos T y P, el momento sísmico escalar  $M_0$ , el porcentaje de CLVD y la duración de la función temporal de la sísmica. En la Figura 3.37 se muestra dicho mecanismo focal mediante las superficies nodales sobre la esfera focal, los ejes de esfuerzos, junto con las estaciones que lo han registrado y los sismogramas sintéticos, y entre paréntesis aparece el factor de calidad de cada estación que es igual en todas, 600. Las inversiones utilizadas para realizar el estudio de cómo afecta la atenuación a las soluciones de la inversión, la atenuación se ha variado de unas estaciones a otras, ésta ha pasado a ser 300 en las estaciones est3, est7, st10 y st12 (representadas con un asterisco), mientras que el resto permanece con valor de 600, según se muestra en la Fig. 3.38.

La Tabla 3.11 muestra las estaciones utilizadas para realizar la inversión: acimut, ángulo de incidencia en el foco sísmico y distancia epicentral.

**Tabla 3.11.** Estaciones utilizadas para realizar la inversión en el mecanismo focal vertical con 0% de CLVD.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)
est5	74	81	259
st11	96	67	121
est1	121	63	105
est3	200	52	72
est7	215	67	121
st14	240	81	259
est8	275	67	121
st10	305	52	72
st15	320	81	259
st12	338	67	121

Se han realizado inversiones con distintas profundidades para la profundidad correcta de 68 km. y para profundidades que varían entre 58-88 km. con un intervalo de 5 km., y las soluciones obtenidas para todas las inversiones se muestran en la Tabla 3.12 y en las Figuras 3.39-3.42, y A1.19-A1.21 del Anexo 1.

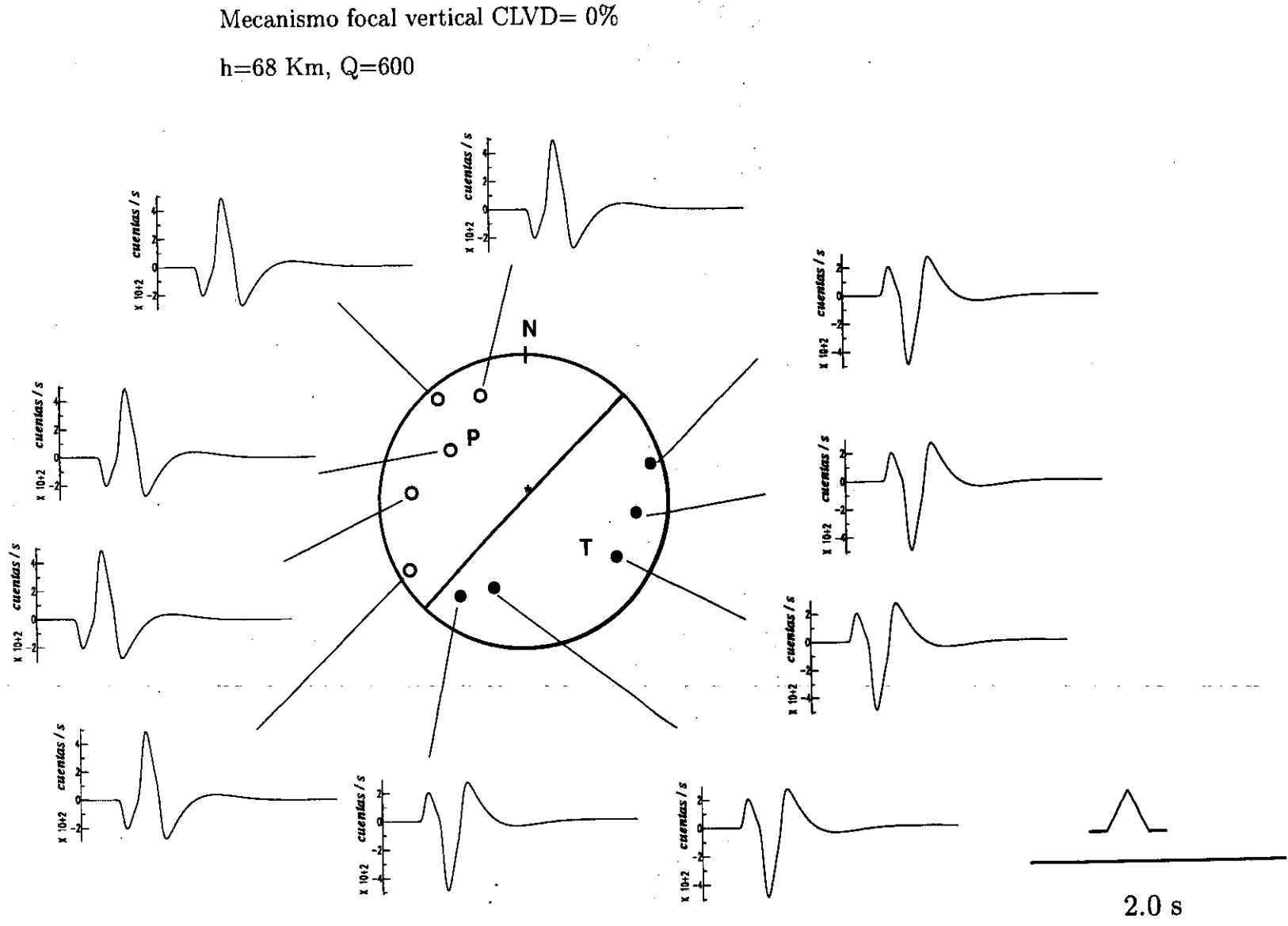


Fig. 3.37. Mecanismo focal vertical con CLVD=0%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

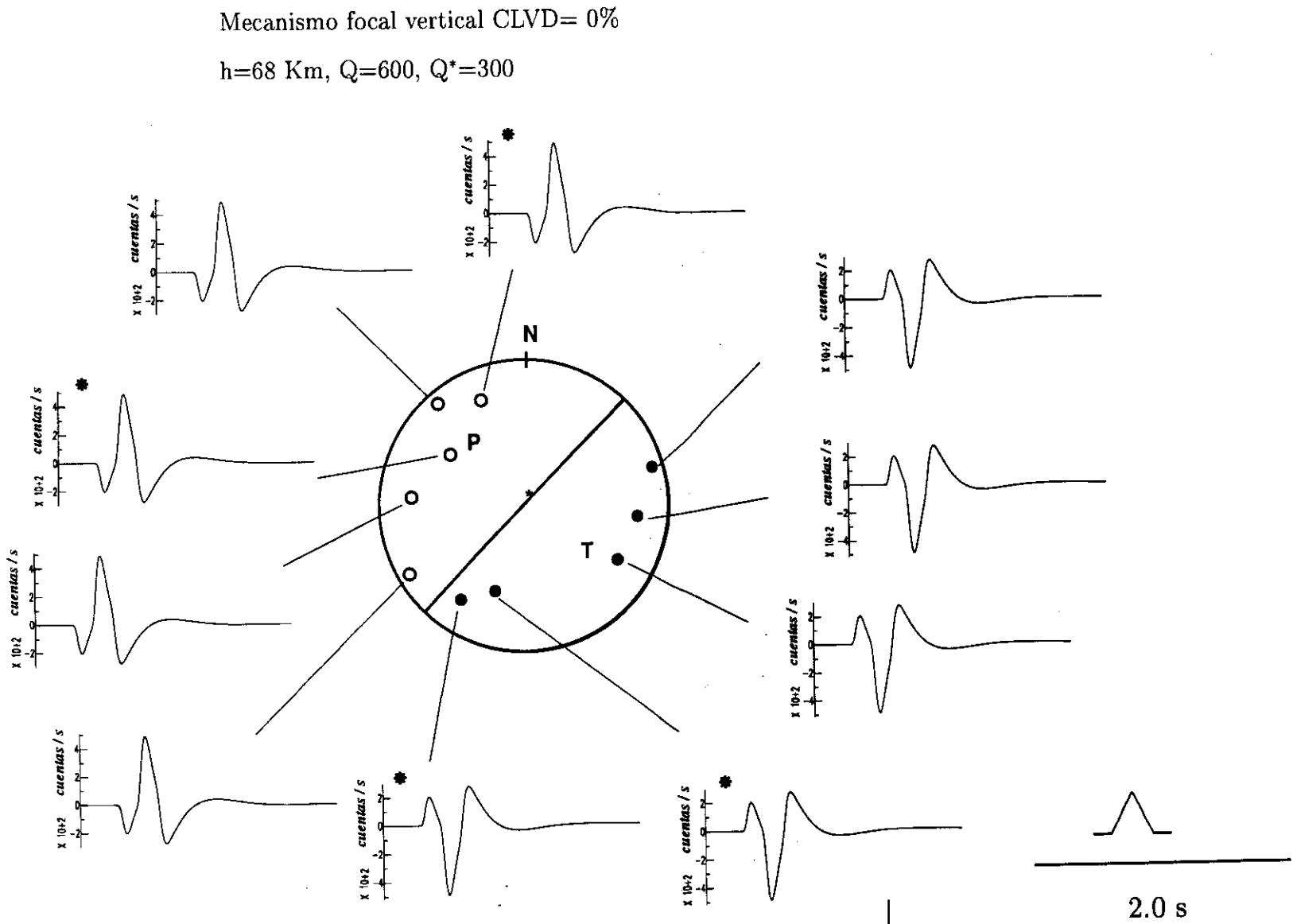


Fig.3.38. Mecanismo focal vertical con CLVD = 0%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.12a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, y función temporal del caso teórico del mecanismo focal vertical con CLVD=0%, obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}^{(*)}$	$M_{22}^{(*)}$	$M_{12}^{(*)}$	$M_{13}^{(*)}$	$M_{23}^{(*)}$	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
58	-2.79±0.03	-0.33±0.02	0.79±0.03	-29.06±0.02	30.30±0.03	2±1	0.30
63	-2.17±0.02	-0.52±0.03	1.19±0.02	-26.72±0.03	28.38±0.02	1±1	0.30
68	-0.62±0.02	-0.66±0.01	0.64±0.01	-25.45±0.02	26.36±0.02	0±0	0.30
73	-0.30±0.02	-0.74±0.03	0.53±0.03	-24.54±0.03	25.16±0.03	1±1	0.30
78	1.52±0.02	-0.92±0.03	0.71±0.02	-23.59±0.02	24.02±0.02	3±1	0.30
83	2.75±0.03	-0.78±0.02	0.35±0.03	-23.37±0.03	23.10±0.03	4±1	0.30
88	3.99±0.03	-0.53±0.04	-0.16±0.03	-23.39±0.03	22.31±0.02	4±1	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	-1.44±0.02	0.02±0.01	1.91±0.02	-15.10±0.02	12.20±0.02	7±1	0.30
63	-2.17±0.02	-0.27±0.02	2.43±0.01	-16.35±0.02	13.47±0.02	6±1	0.30
68	-2.42±0.02	-0.89±0.02	2.32±0.02	-15.12±0.02	12.95±0.02	4±1	0.30
73	-3.19±0.01	-1.66±0.06	2.87±0.06	-15.15±0.07	13.44±0.06	2±1	0.30
78	-4.49±0.01	-2.75±0.03	3.68±0.03	-14.88±0.03	14.07±0.02	0±1	0.30
83	-5.54±0.02	-3.87±0.03	4.42±0.02	-14.80±0.02	14.89±0.02	1±1	0.30
88	-6.46±0.03	-5.37±0.02	5.36±0.02	-14.60±0.02	15.83±0.03	2±1	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	-1.30±0.07	0.70±0.04	2.40±0.04	-18.21±0.07	12.04±0.06	8±2	0.30
63	-1.51±0.08	-0.41±0.05	2.81±0.05	-18.10±0.07	11.42±0.06	8±3	0.30
68	-1.83±0.04	-1.04±0.06	2.80±0.07	-18.32±0.06	12.72±0.06	6±3	0.30
73	-2.30±0.10	-1.80±0.06	3.37±0.06	-18.42±0.07	14.68±0.06	5±2	0.30
78	-5.22±0.11	-3.91±0.07	3.92±0.06	-15.64±0.07	15.43±0.06	1±2	0.30
83	-6.41±0.12	-4.21±0.08	4.76±0.07	-15.45±0.08	16.39±0.06	2±1	0.30
88	-7.51±0.12	-5.71±0.09	5.84±0.08	-15.21±0.08	17.32±0.08	3±2	0.30

(\*) multiplicado por  $10^{13}$  expresado en Nm

**Tabla 3.12b.** Ejes de esfuerzos , momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y porcentaje de aciertos en polaridades del caso teórico con mecanismo focal vertical con CLVD=0%, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

h (km)	eje de Tensión ( $\theta, \phi$ )	eje de Presión ( $\theta, \phi$ )	$M_0$ (*)	score CLVD	score DC
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
58	43±0 132±1	47±0 316±0	42.12±0.12	100%	100%
63	43±1 132±0	47±0 315±0	39.12±0.12	100%	100%
68	44±0 134±0	46±0 314±0	36.66±0.10	100%	100%
73	45±0 135±1	46±0 314±0	35.10±0.12	100%	100%
78	45±0 137±1	45±0 313±0	33.68±0.15	100%	100%
83	46±1 139±0	44±0 312±0	32.91±0.16	100%	100%
88	48±0 141±1	43±0 312±0	32.52±0.18	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
58	42±0 140±0	48±0 322±0	19.53±0.04	90%	90%
63	41±0 139±0	49±0 322±0	21.42±0.05	90%	90%
68	40±0 138±0	50±0 321±0	20.30±0.06	90%	100%
73	38±0 137±0	52±0 320±0	20.89±0.05	100%	100%
78	35±0 135±0	51±0 318±0	21.75±0.05	100%	100%
83	33±0 133±0	57±0 317±0	22.96±0.07	100%	100%
88	31±0 130±0	59±0 315±0	24.37±0.07	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
58	42±0 148±0	48±0 326±0	21.90±0.04	90%	100%
63	41±0 150±0	49±0 326±0	21.60±0.07	90%	100%
68	41±0 147±0	50±0 326±0	21.50±0.04	100%	100%
73	39±0 147±0	51±0 323±0	23.15±0.05	100%	100%
78	35±0 133±0	55±0 318±0	23.12±0.06	100%	100%
83	33±0 130±0	57±0 317±0	24.74±0.08	100%	100%
88	31±0 128±0	60±0 315±0	26.12±0.07	100%	100%

(\*) multiplicado por  $10^{13}$  expresado en Nm

# Mecanismo focal vertical, CLVD=0%

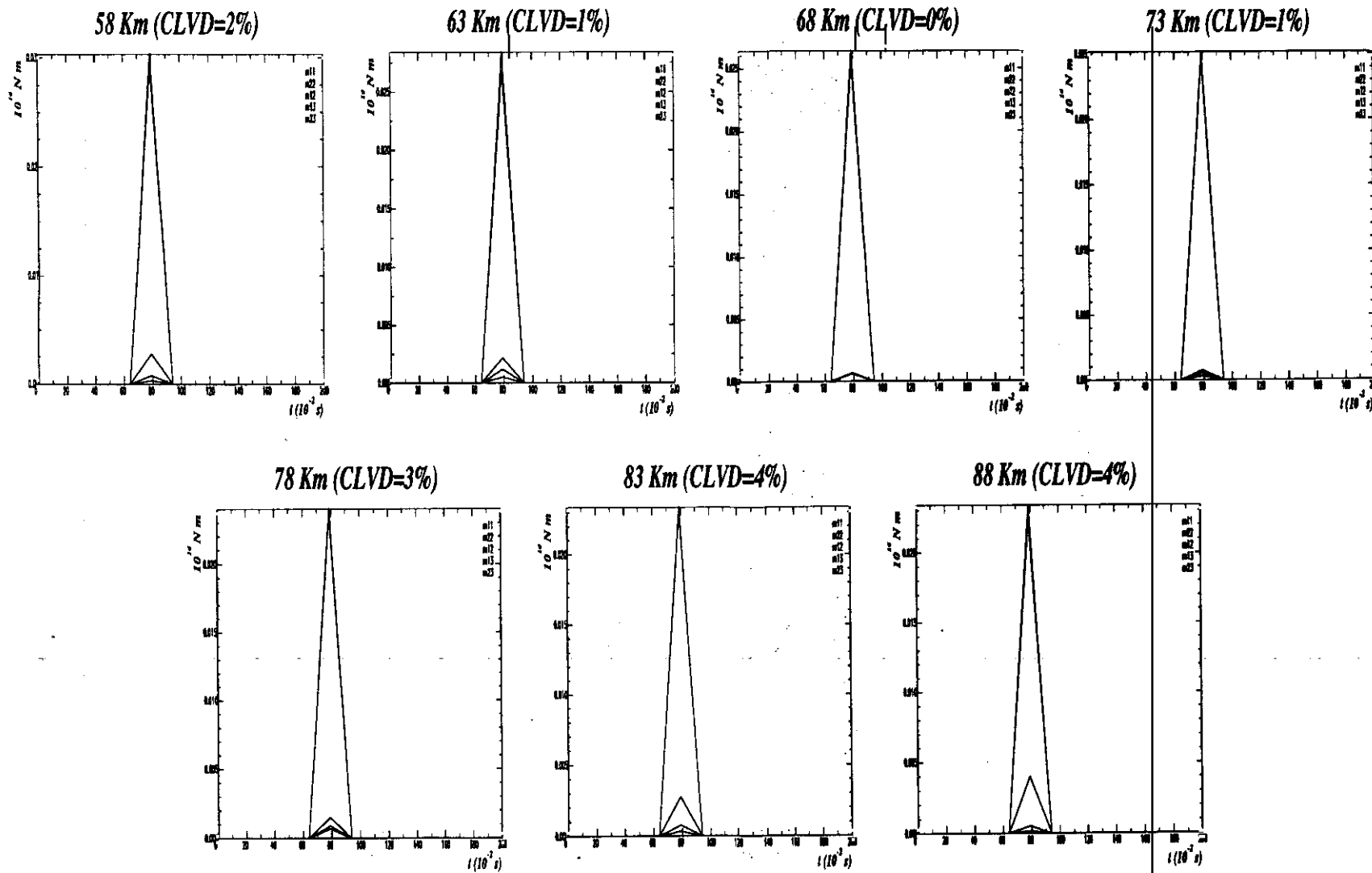


Fig. 3.39. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

## Mecanismo focal vertical, CLVD=0%

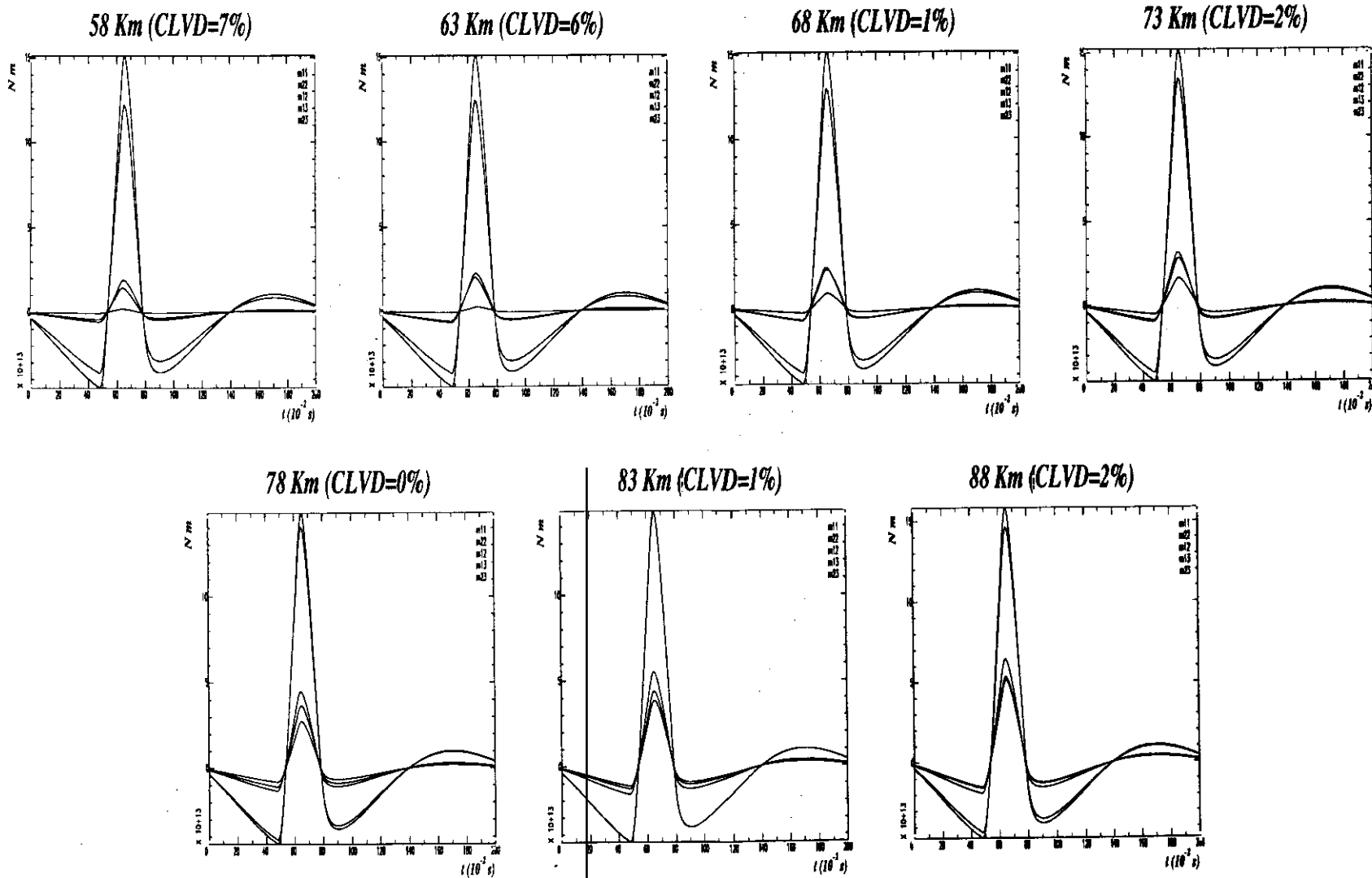


Fig. 3.40. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal vertical, CLVD=0%

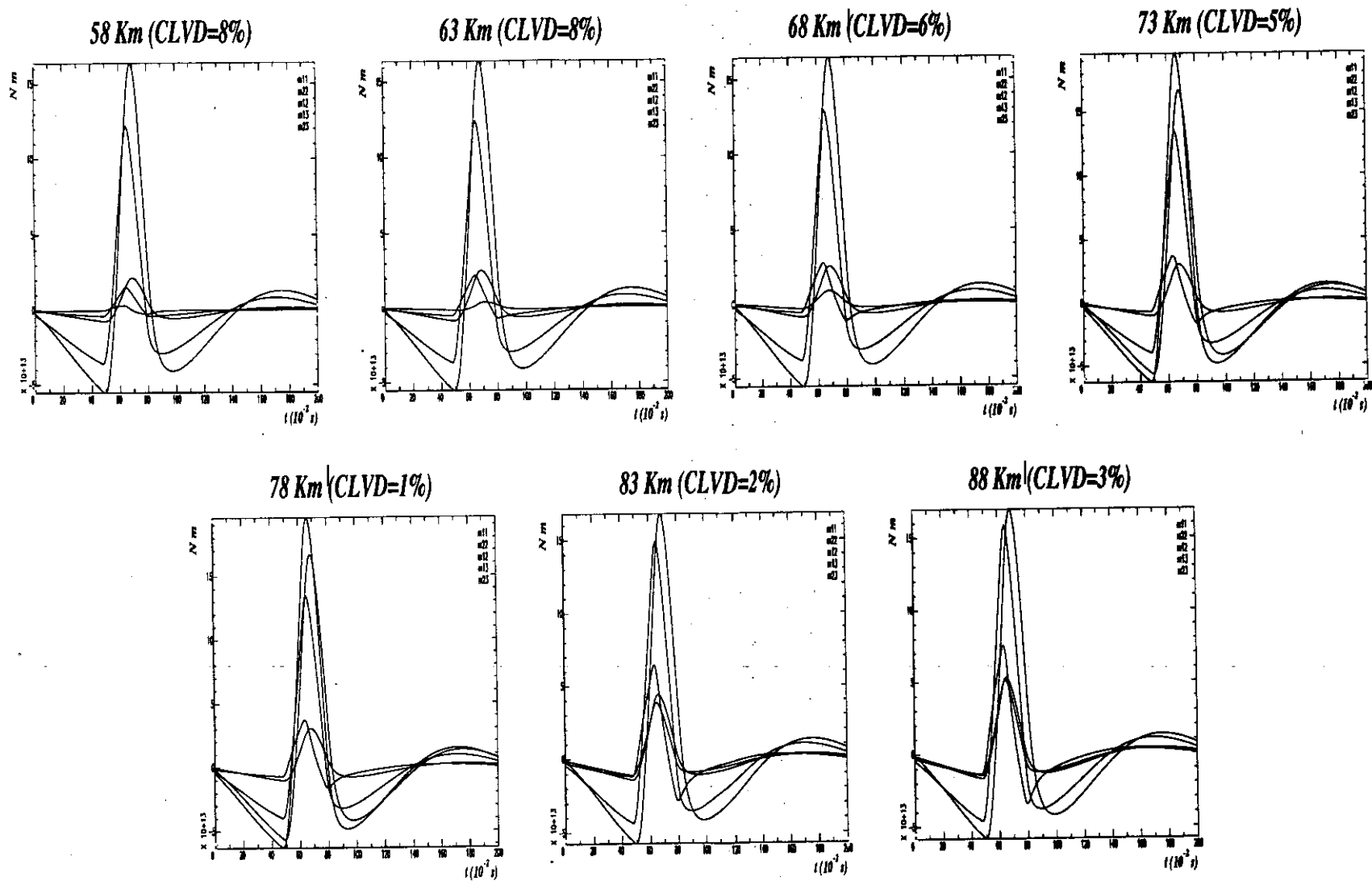


Fig. 3.41. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

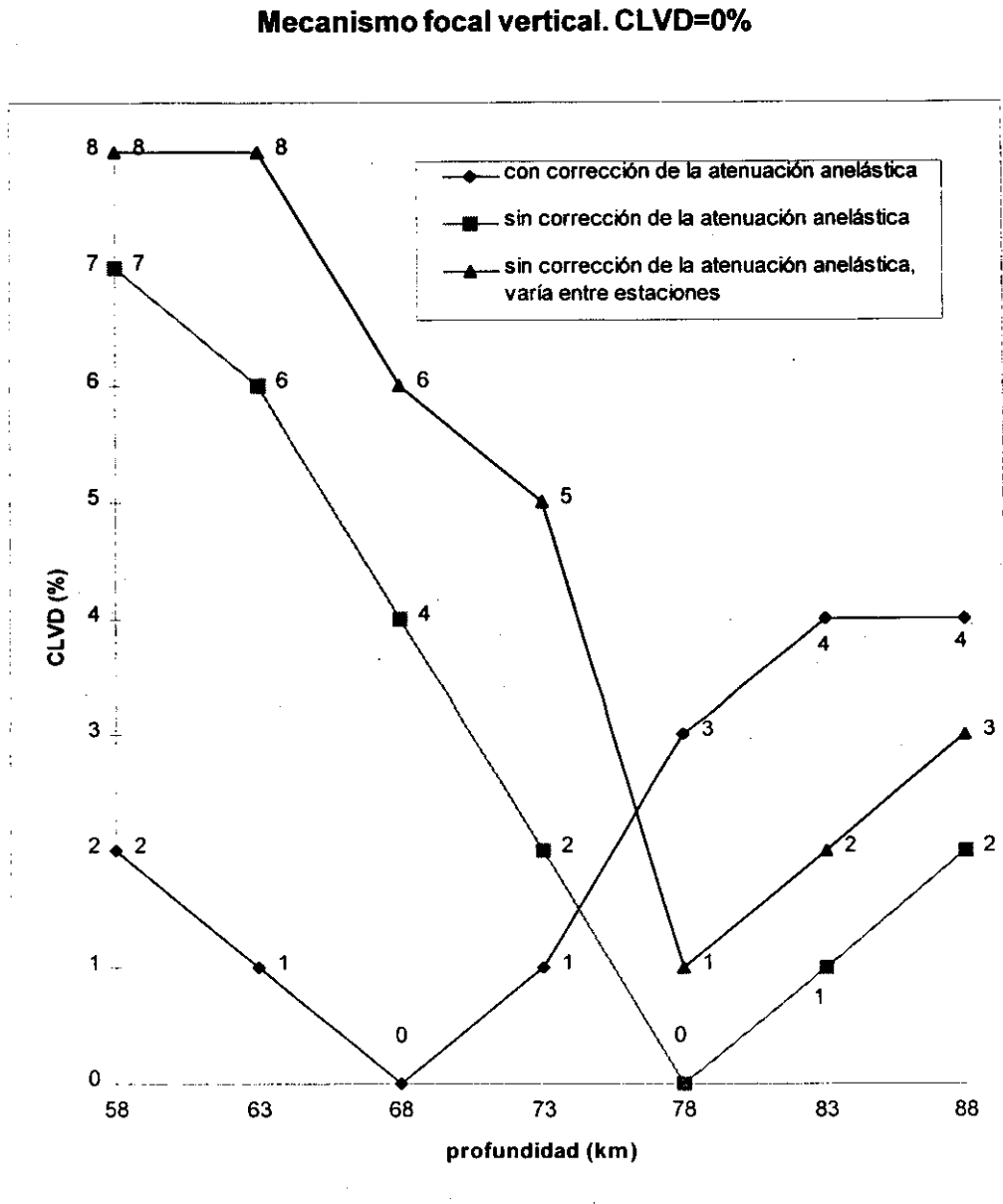


Fig. 3.42. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

Los resultados obtenidos tras los tres tipos de inversiones realizadas, permiten extraer las siguientes conclusiones:

- la duración de la función temporal ( $f(t)$ ) no varía en todos los casos, siendo muy similar a la inicial 0.30s. Sin embargo, la forma varía, siendo en las inversiones corregidas por el efecto de la atenuación exacta a la correcta (triángulo perfecto). Para las inversiones donde no se ha corregido la atenuación, la forma de la función temporal difiere de la correcta y se redondeada, según se muestra en las Fig. 3.39-41.
- los ejes de Tensión y Presión discrepan de los ejes de esfuerzos "correctos" como máximo  $14^\circ$  tanto en el acimut como en el ángulo que forman con la vertical, aproximándose bastante a los valores correctos. Para profundidades inferiores a la correcta, el ángulo que forma con la vertical se acerca más al correcto tanto para resultados obtenido cuando se corrige y no se corrige la atenuación, alejándose más para profundidades mayores a la correcta. Para profundidades mayores que la correcta ocurre lo contrario, es el acimut el más próximo al valor correcto.
- el momento sísmico escalar obtenido es del mismo orden de magnitud, rango entre  $2.0\text{-}4.2 \times 10^{14}$  Nm, que en el caso inicial  $1.0 \times 10^{14}$  Nm, independientemente de la atenuación anelástica y de la profundidad.
- el porcentaje de CLVD obtenido es pequeño ( $<8\%$ ) en todos los casos estudiados, independientemente de la profundidad utilizada y de si se ha efectuado o no la corrección anelástica. El mínimo del porcentaje de CLVD del 0%, se obtiene para la inversión en que se ha corregido la atenuación cuando se utiliza la profundidad correcta. Para las inversiones que se han realizado sin corregir el efecto de la atenuación, el mínimo de CLVD no se obtiene en la profundidad correcta sino a 10 km. de diferencia, a 78 km. y su valor difiere del correcto, según se observa en la Figura 3.42.
- el porcentaje de ciertos en polaridad (score) correcto (100%), sólo se obtiene en el caso de la corrección de la atenuación anelástica. En los casos en que no se ha efectuado la corrección de la atenuación anelástica, el porcentaje de aciertos en polaridades es menor.
- los errores calculados en los parámetros obtenidos tras la inversión son pequeños, para las componentes del tensor momento sísmico y el momento sísmico escalar, son dos órdenes de magnitud inferior al valor obtenido, los ejes de esfuerzos tienen  $1^\circ$  de error como máximo, y para el porcentaje de CLVD es de 3% en el caso más desfavorable.

### 3.2.8. Mecanismo focal vertical. CLVD=14%

El mecanismo focal vertical con un 14% de CLVD seleccionado para generar los sismogramas teóricos, se muestra en la Tabla 3.1, junto con los datos hipocentrales del caso teórico. En la Fig. 3.43, se han representado las estaciones sobre la esfera focal, los sismogramas sintéticos, los ejes de T, P, los planos de falla, superficies nodales de no doble par, la atenuación anelástica 600 en todas las estaciones y la función temporal. Se han realizado inversiones variando la atenuación anelástica de unas estaciones a otras, las estaciones est2, est5, st11 (representadas con un asterisco), poseen una atenuación de 300, y el resto tienen un valor de 600, según se muestra en la Fig. 3.44.

En la Tabla 3.13 se muestra la lista de las estaciones utilizadas para realizar la inversión para este tipo de mecanismo, incluyendo el acimut, ángulo de incidencia en el foco y la distancia epicentral.

**Tabla 3.13.** Estaciones utilizadas en la inversión del mecanismo focal vertical con 14% de CLVD

Estación	Acimut (°)	Ángulo de incidencia en el foco (°)	Distancia epicentral (km)
st20	30	63	105
st30	60	63	105
est5	74	81	259
st11	96	67	121
est2	121	63	105
est3	200	52	72
est7	215	67	121
st14	240	81	259
st10	305	52	72
st12	338	67	121

Las inversiones realizadas se han efectuado con las variaciones propuestas anteriormente: variando la profundidad entre 58-88 km. con un intervalo de 5 km., corrigiendo o no la atenuación anelástica y variándola de unas estaciones a otras. Las soluciones obtenidas tras las inversiones realizadas para todas las profundidades se muestran en la Tabla 3.14, Fig. 3.45-3.48 y Fig. A1.22-A1.24. En la Tabla 3.14a se muestran las componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, y la duración de la fuente sísmica. En la Tabla 3.14b se muestran los ejes de esfuerzos  $\theta$  (ángulo que forma con la vertical) y  $\phi$  (acimut), momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y el porcentaje de aciertos en polaridades (score) de DC y CLVD.

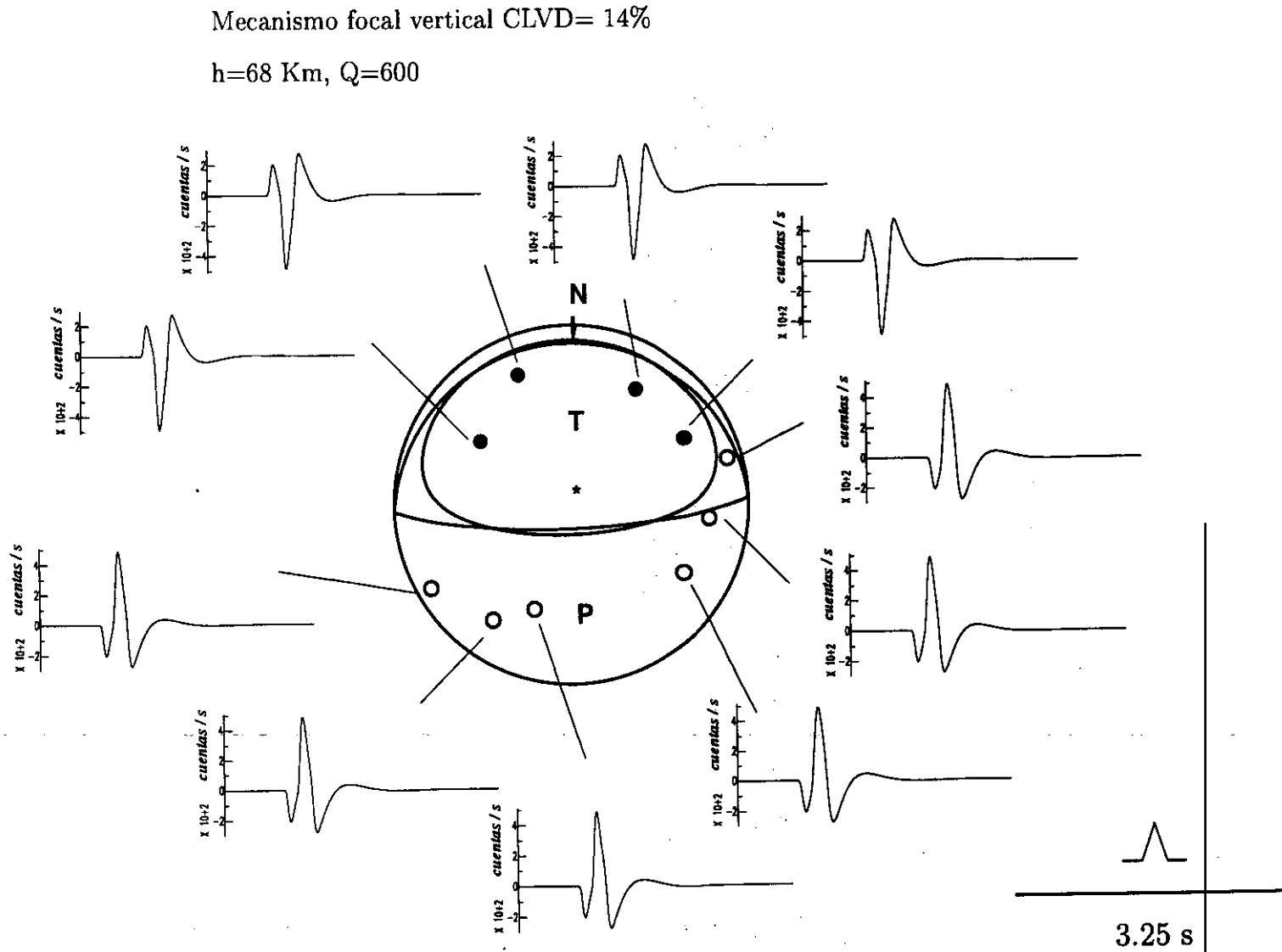


Fig. 3.43. Mecanismo focal vertical con CLVD = 14%, sismogramas y función temporal (igual atenuación anelástica en todas las estaciones).

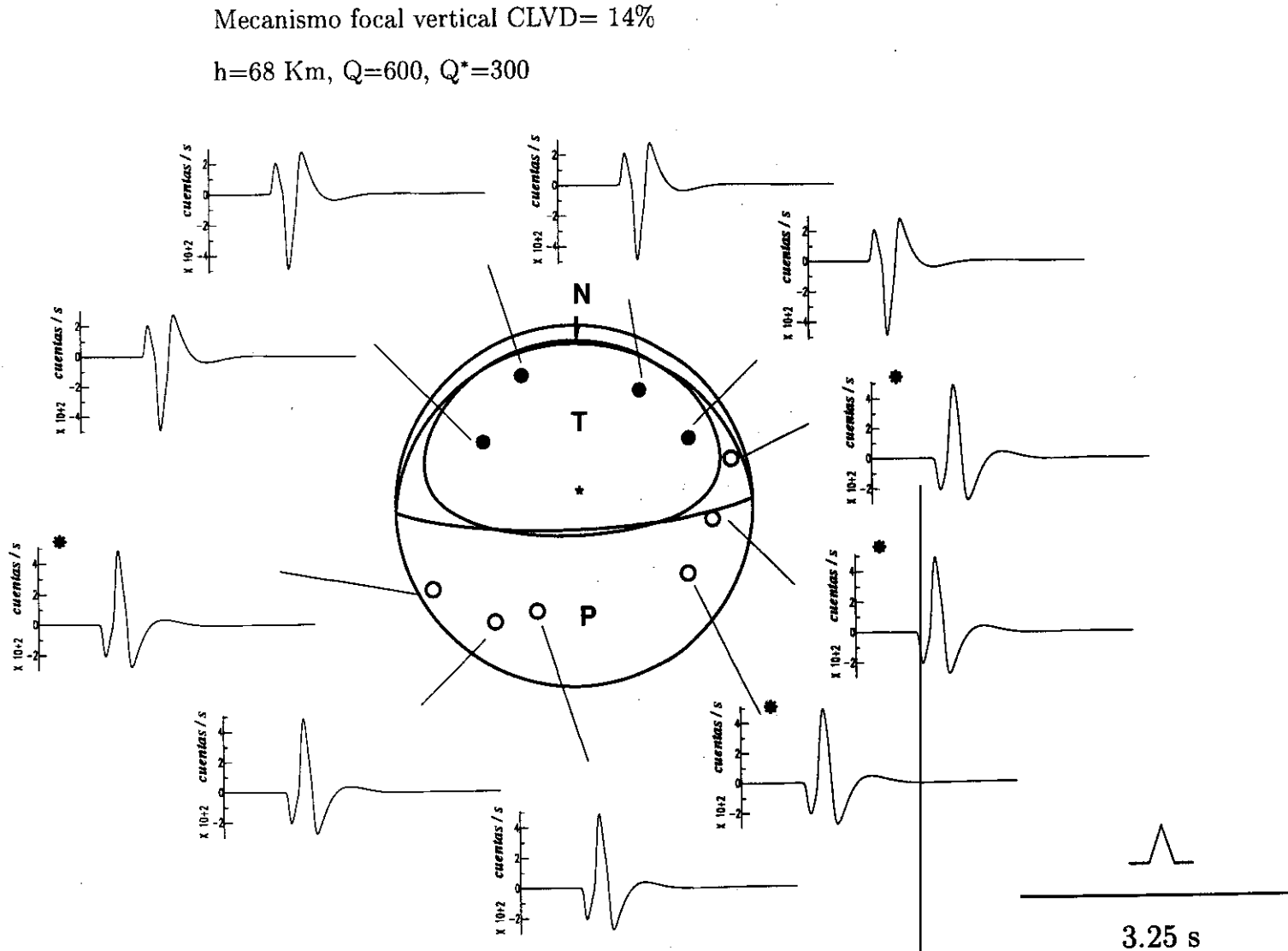


Fig. 3.44. Mecanismo focal vertical con CLVD =14%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.14a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal vertical con 14% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}^{(*)}$	$M_{22}^{(*)}$	$M_{12}^{(*)}$	$M_{13}^{(*)}$	$M_{23}^{(*)}$	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
58	-0.32±0.04	-0.27±0.03	-0.04±0.04	1.85±0.04	-0.02±0.04	13±2	0.30
63	-0.42±0.05	-0.26±0.03	-0.03±0.04	1.73±0.04	-0.04±0.04	13±2	0.30
68	-0.55±0.04	-0.28±0.04	0.04±0.03	1.64±0.03	-0.05±0.02	14±2	0.30
73	-0.62±0.05	-0.27±0.03	0.01±0.03	1.58±0.03	-0.06±0.03	13±3	0.30
78	-0.64±0.05	-0.21±0.04	-0.04±0.04	1.50±0.06	-0.11±0.04	12±3	0.30
83	-0.58±0.06	-0.15±0.05	-0.07±0.04	1.45±0.04	-0.13±0.04	9±3	0.30
88	-0.46±0.06	-0.07±0.05	-0.12±0.06	1.41±0.06	-0.15±0.04	6±4	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	0.44±0.08	-2.28±0.08	0.09±0.09	4.04±0.08	0.26±0.09	43±10	0.30
63	0.80±0.05	-2.61±0.04	0.17±0.04	4.09±0.04	0.27±0.08	47±10	0.30
68	-0.48±0.04	-3.06±0.06	0.38±0.06	4.18±0.05	0.28±0.07	47±11	0.30
73	3.36±0.09	-2.10±0.07	-0.02±0.05	3.44±0.08	-1.61±0.04	32±7	0.30
78	-1.39±0.08	-3.79±0.12	0.51±0.11	4.32±0.10	1.25±0.14	47±15	0.30
83	-1.29±0.10	-3.94±0.08	0.46±0.07	4.42±0.06	0.04±0.09	44±16	0.30
88	-0.68±0.07	-3.94±0.08	0.31±0.08	4.46±0.07	-0.05±0.09	43±10	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	0.43±0.08	-2.42±0.08	0.14±0.08	4.11±0.09	0.20±0.10	45±11	0.30
63	0.06±0.07	-2.78±0.06	0.23±0.07	4.15±0.07	0.21±0.08	48±10	0.30
68	-0.51±0.05	-3.25±0.06	0.45±0.06	4.24±0.06	0.22±0.07	46±10	0.30
73	-3.37±0.09	-2.21±0.08	-0.01±0.04	3.46±0.08	-1.76±0.04	33±7	0.30
78	-1.40±0.09	-4.04±0.09	0.64±0.08	4.29±0.07	-0.02±0.05	41±8	0.30
83	-1.22±0.09	-4.14±0.08	0.53±0.07	4.46±0.07	-0.04±0.09	42±9	0.30
88	-0.59±0.07	-4.11±0.07	0.37±0.07	4.52±0.06	-0.13±0.08	42±8	0.30

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 3.14b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades, del caso teórico con mecanismo focal vertical 14% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>Mo(*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	38±0 358±1	52±0 181±0	1.91±0.05	100%	90%
<b>63</b>	36±0 358±1	54±0 180±0	1.82±0.05	100%	90%
<b>68</b>	34±0 358±1	56±0 179±0	1.78±0.05	100%	90%
<b>73</b>	32±0 358±1	58±0 178±0	1.76±0.05	100%	90%
<b>78</b>	32±0 354±1	58±0 179±0	1.67±0.05	100%	90%
<b>83</b>	33±0 351±1	57±0 180±0	1.59±0.04	100%	90%
<b>88</b>	36±0 349±1	55±0 181±0	1.50±0.04	100%	90%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	40±0 3±1	50±0 191±0	4.11±0.07	100%	80%
<b>63</b>	37±0 4±1	53±1 186±0	4.28±0.08	100%	80%
<b>68</b>	32±0 5±0	69±0 133±0	4.73±0.01	100%	80%
<b>73</b>	21±0 332±1	70±0 166±0	5.79±0.07	100%	100%
<b>78</b>	27±0 15±0	78±1 261±3	5.73±0.01	100%	90%
<b>83</b>	27±0 3±1	78±1 119±2	5.82±0.02	100%	80%
<b>88</b>	30±1 1±0	81±0 107±1	5.61±0.02	100%	100%
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	40±0 3±1	50±0 183±0	4.19±0.07	100%	90%
<b>63</b>	36±0 4±0	57±1 158±0	4.37±0.08	100%	90%
<b>68</b>	32±0 5±0	73±0 124±2	4.93±0.01	100%	100%
<b>73</b>	21±0 330±1	70±0 165±0	5.88±0.07	90%	80%
<b>78</b>	26±0 3±0	78±1 120±0	5.96±0.01	100%	80%
<b>83</b>	27±0 2±0	79±1 116±1	6.01±0.02	100%	90%
<b>88</b>	30±1 1±1	81±0 107±2	5.77±0.02	100%	100%

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

# Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

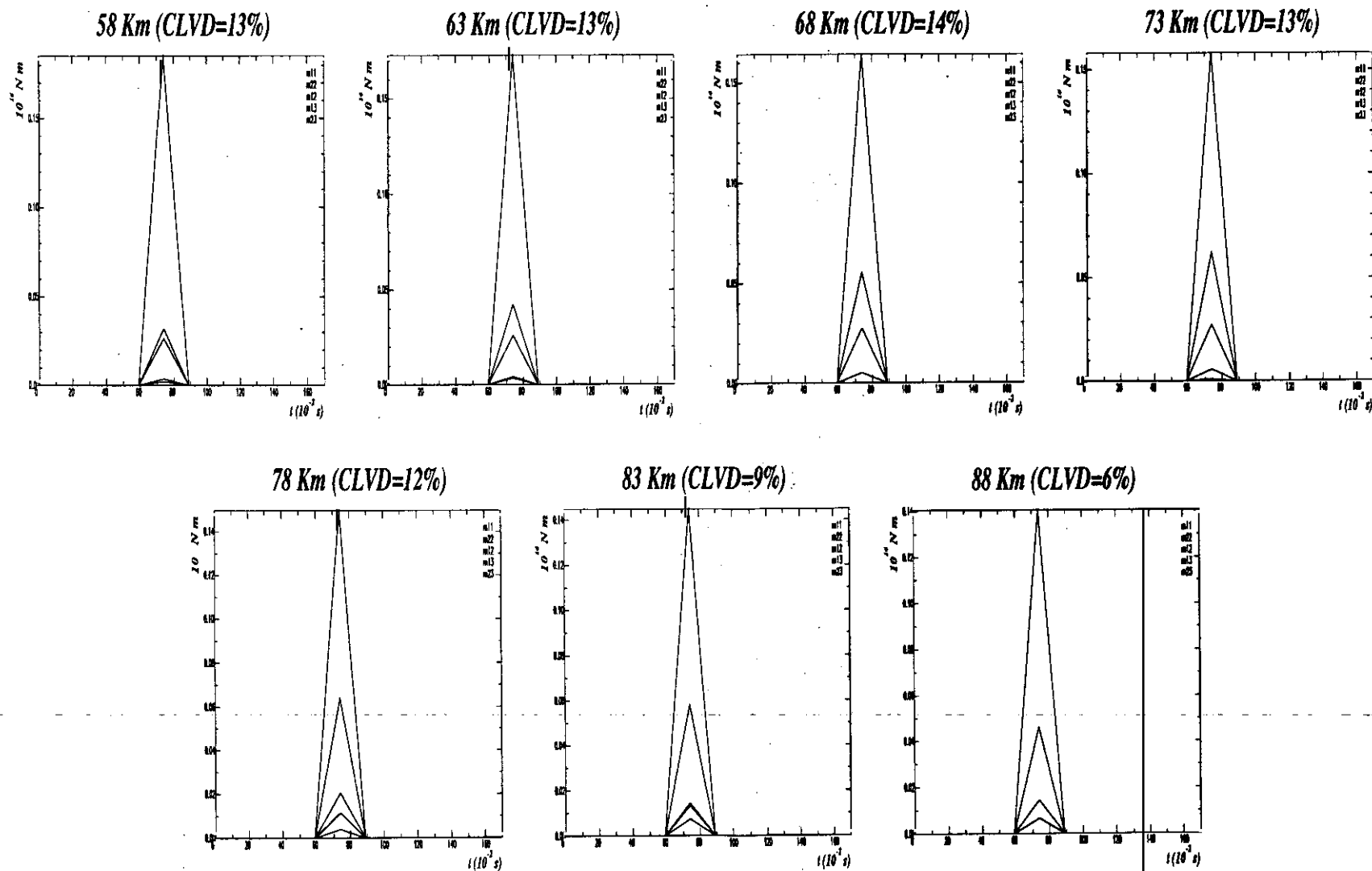


Fig. 3.45. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica.

## Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

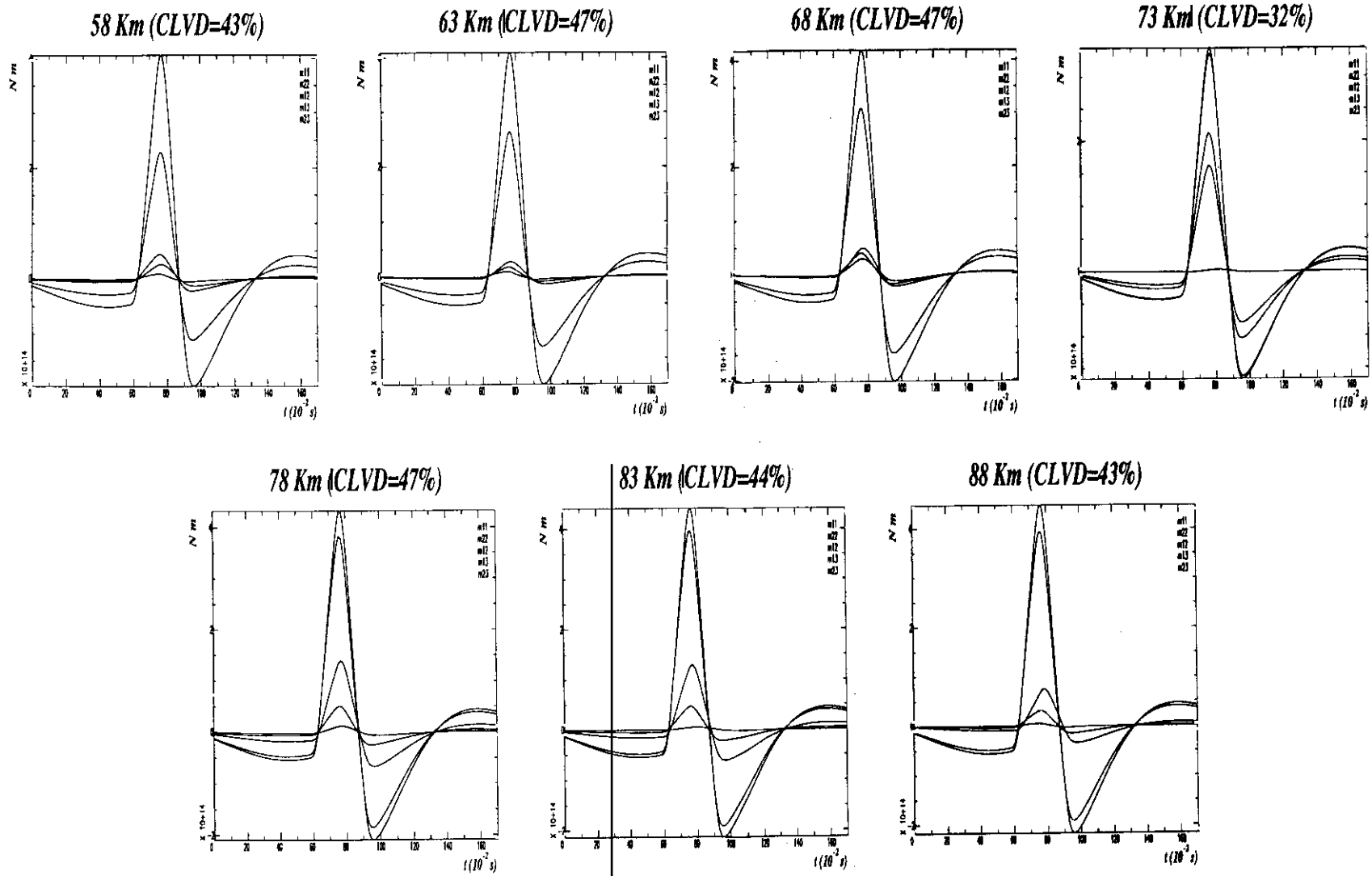


Fig. 3.46. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

## Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

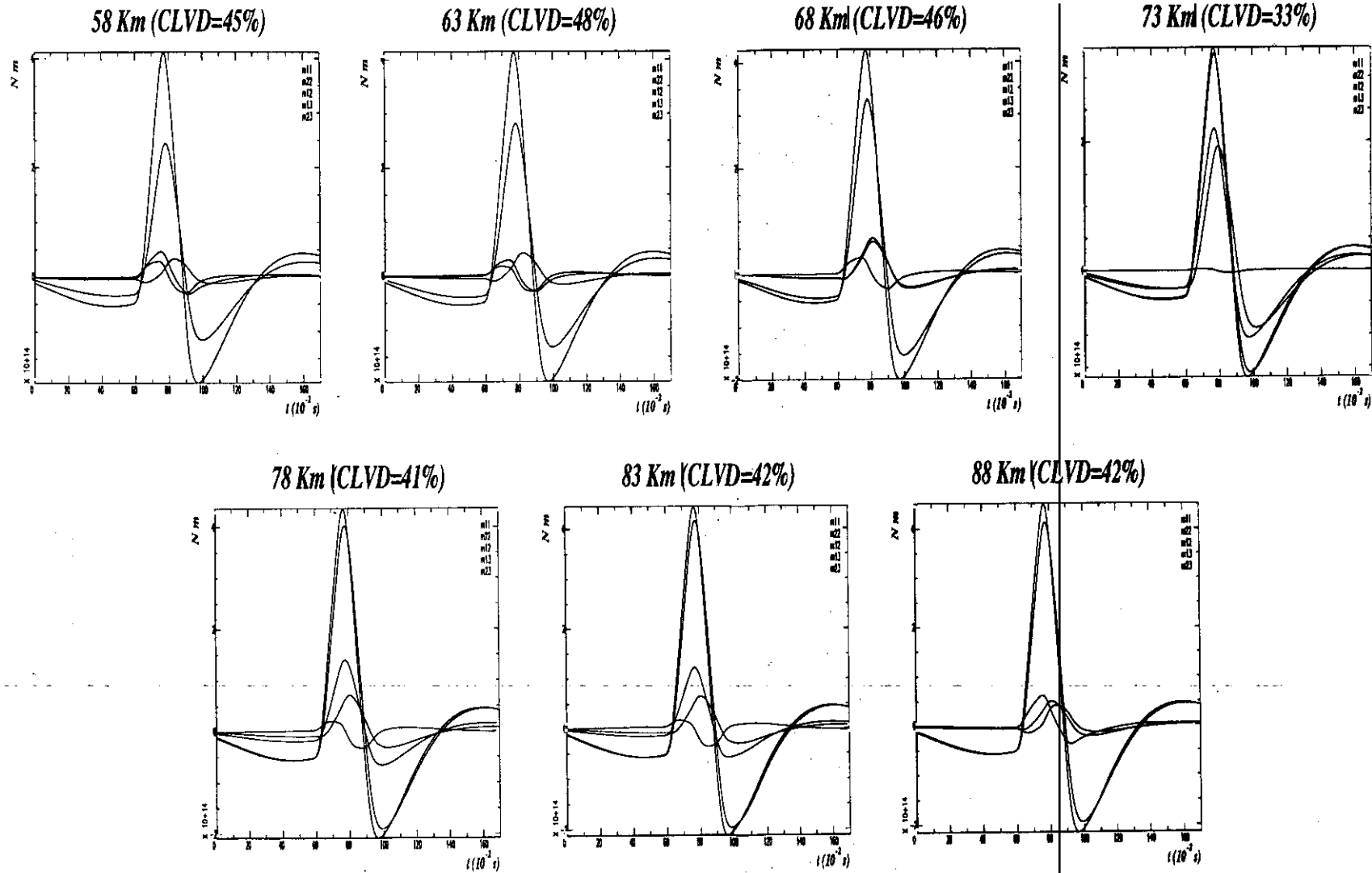


Fig. 3.47. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal vertical. CLVD=14%

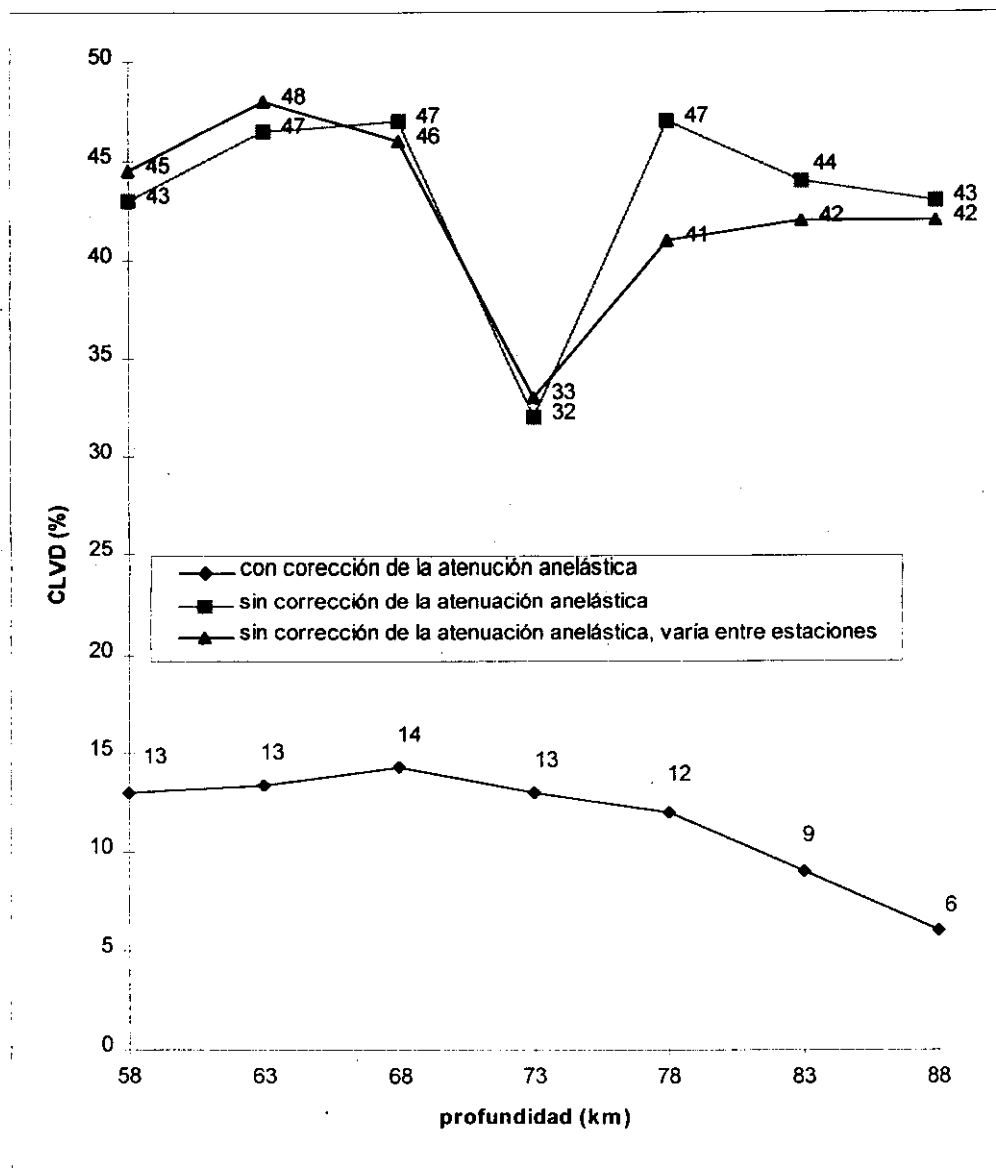


Fig. 3.48. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

De los resultados obtenidos en todas las inversiones realizadas y que se han mostrado en las figuras anteriores, se pueden extraer las siguientes características:

- las componentes del tensor momento sísmico se ven afectadas por la no corrección de la atenuación anelástica, ya que se redondean en su forma frente a las que si tienen corregidas este efecto de la atenuación que no se redondean y coinciden con las correctas.
- la duración de la función temporal obtenida es de 0.30s en todos los casos. Sin embargo, la forma de la función temporal si varía según la inversión realizada. Cuando se corrige la atenuación es igual que la correcta un triángulo perfecto. Cuando no se corrige la atenuación, se redondea alejándose de su forma correcta, según se muestra en las Fig. 3.45-3.48.
- la influencia de la no corrección de la atenuación anelástica es importante en las soluciones obtenidas, ya que el eje de Tensión se aleja del valor correcto hasta  $6^\circ$  para el ángulo que forma con la vertical,  $17^\circ$  en el acimut, mientras que el eje de Presión se aleja respectivamente  $15^\circ$  y  $85^\circ$ . Sin embargo, cuando se corrige la atenuación la variación del eje de Tensión es de  $2^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical,  $9^\circ$  en el acimut, mientras que el eje P varia respectivamente en  $4^\circ$  y  $2^\circ$ .
- el momento sísmico escalar es menor en el caso de la corrección anelástica varía entre  $1.50-1.91 \times 10^{14}$  Nm, mientras que cuando no se corrige varía entre  $4.11-6.01 \times 10^{14}$  Nm, frente al valor correcto de  $4.86 \times 10^{14}$  Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido se ve afectado por la no corrección de la atenuación anelástica, ya que en estos casos varía entre 32-47% para todas las profundidades y cuando se representa el CLVD frente a la profundidad, el punto crítico se desplaza de la profundidad correcta a una profundidad diferente 5km más profunda y el valor del CLVD 32% no coincide con el correcto, resultado que se ha representado en la Fig. 3.48. Sin embargo, al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad cuando se corrige la atenuación, el punto crítico se produce en la profundidad correcta 68 km, y el valor de CLVD es el correcto 14%.
- los errores calculados son en el caso de los componentes del tensor un orden de magnitud menor que las componentes obtenidas, en los ejes de esfuerzos son de hasta  $2^\circ$ , en el momento sísmico escalar es hasta un orden de magnitud menor, y en el porcentaje de CLVD de hasta 11%.

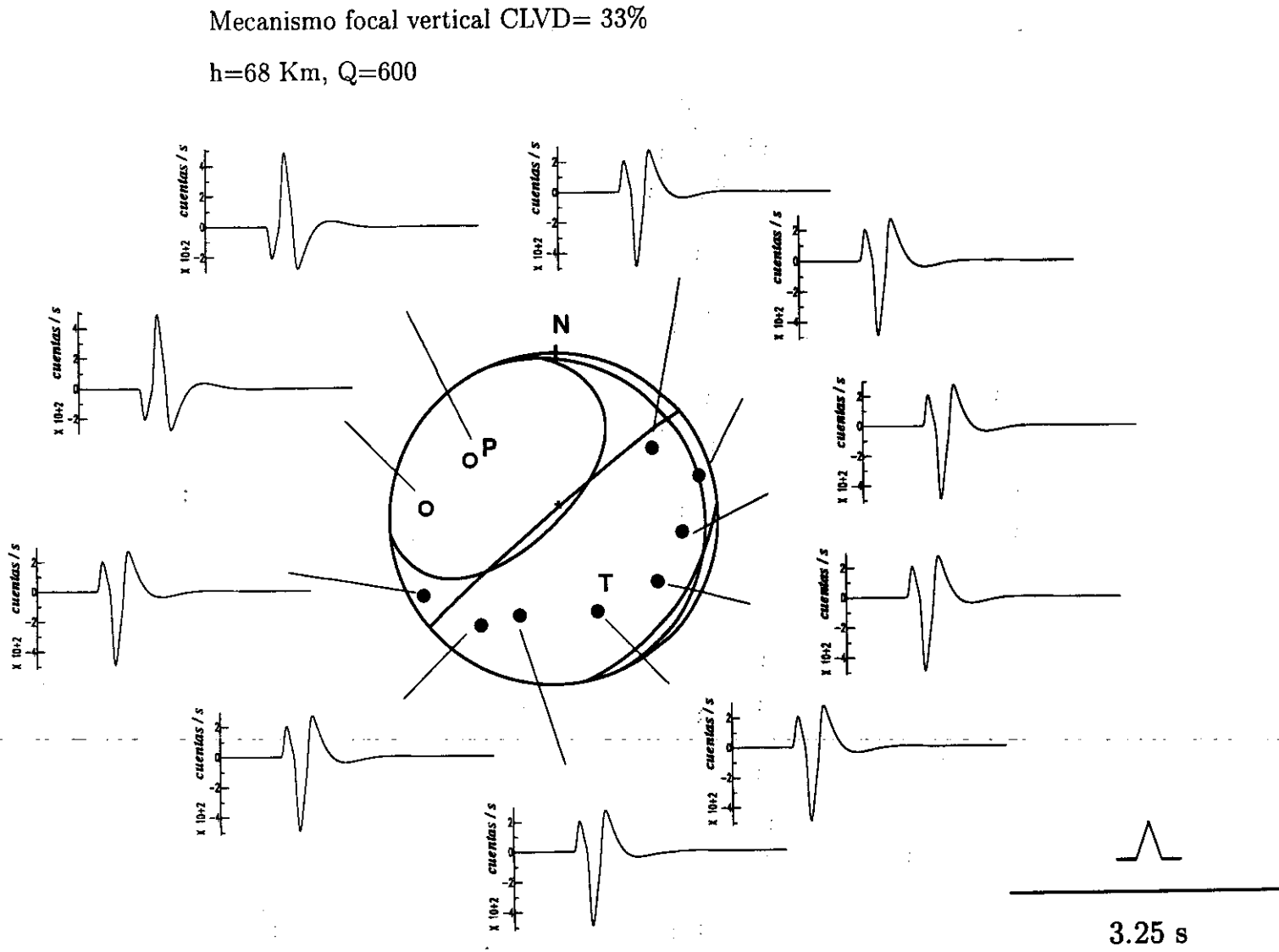
### 3.2.9. Mecanismo focal vertical. CLVD=33%

Los datos hipocentrales de este caso teórico se muestran en la Tabla 3.1. El mecanismo focal vertical con 33% de CLVD seleccionado para generar los sismogramas teóricos, se muestra en la Fig. 3.49 y Tabla 3.16. En dicha figura se han representado las estaciones sobre la esfera focal, los ejes de Tensión, Presión, la función temporal, y la atenuación anelástica que es 600. Para las inversiones realizadas variando la atenuación anelástica, de unas estaciones a otras, ésta ha pasado a ser en las estaciones est2, est5, est8, st11, de 300, mientras que en el resto se mantiene el valor de 600, según se muestra en la Fig. 3.50. En la Tabla 3.15 se muestra la lista de las estaciones utilizadas para este tipo de mecanismo focal en la inversión: acimut, ángulo de incidencia y distancia epicentral.

**Tabla 3.15.** Estaciones utilizadas para realizar la inversión del mecanismo focal vertical con 33% de CLVD.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)
st30	60	63	105
est5	74	81	259
st11	96	67	121
est2	121	63	105
est6	155	52	72
est3	200	52	72
est7	215	67	121
st14	240	81	259
est8	275	67	121
st10	305	52	72

Las inversiones realizadas se han efectuado con las variaciones propuestas anteriormente: variando la profundidad entre 58-88 km. con un intervalo de profundidad de 5 km., corrigiendo o no la atenuación anelástica y variándola de unas estaciones a otras. Las soluciones obtenidas tras las inversiones realizadas para todas las profundidades se muestran en la Tabla 3.16, Fig. 3.51-3.54, y Fig A1.25-A1.27 del Anexo 1. En la Tabla 3.16a se muestran las componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, la función temporal. En la Tabla 3.16b se muestran los ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y el porcentaje de aciertos en polaridades para el DC y CLVD, los errores de todas las magnitudes obtenidas.



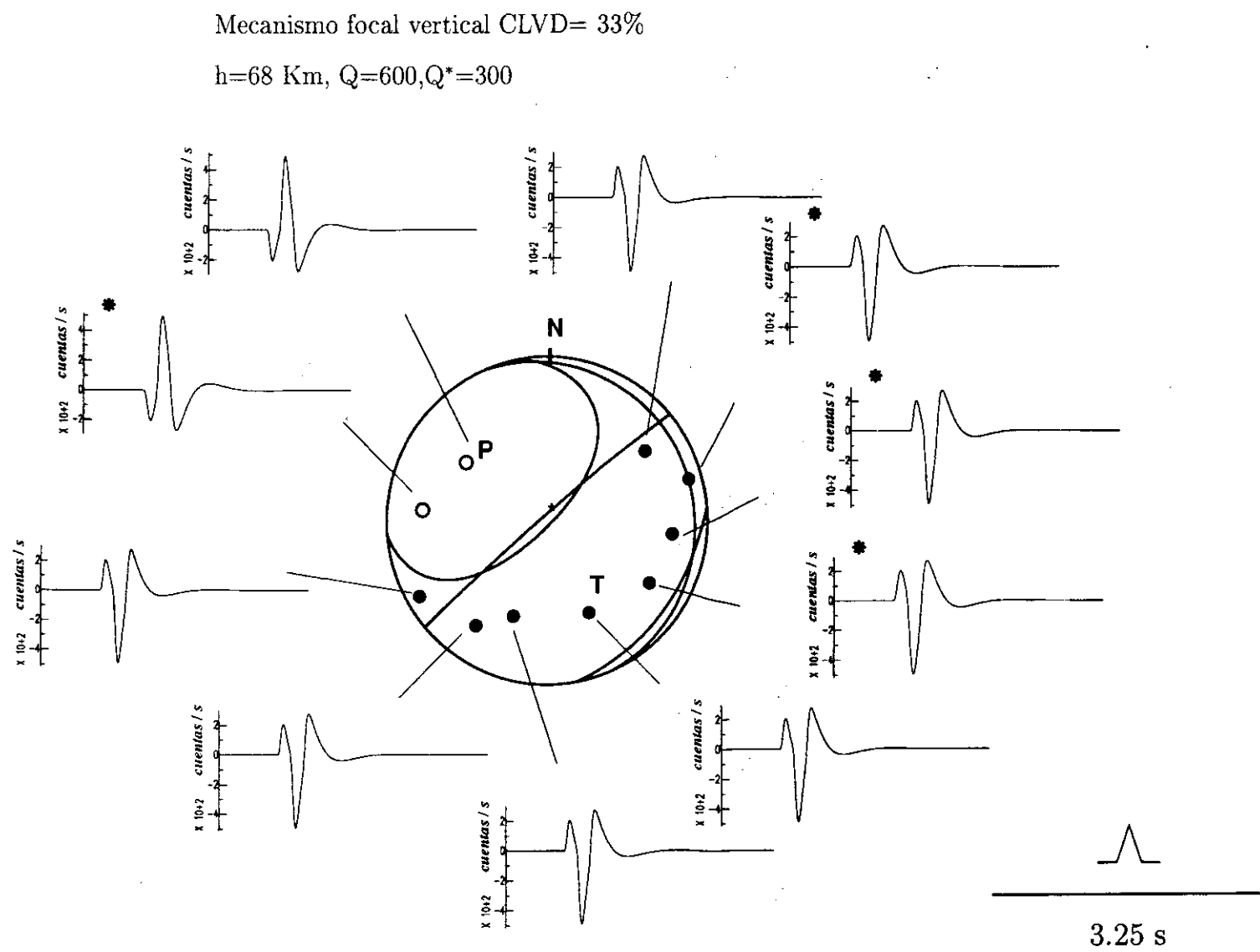


Fig. 3.50. Mecanismo focal vertical con CLVD =33%, sismogramas y función temporal (varía la atenuación anelástica entre estaciones).

**Tabla 3.16a.** Componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD, función temporal del caso teórico con mecanismo focal vertical con 33% de CLVD, obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>							
58	0.76±0.04	-0.22±0.03	1.64±0.04	-2.97±0.05	3.33±0.04	36±3	0.30
63	0.75±0.04	-0.24±0.03	1.53±0.04	-2.90±0.04	3.10±0.05	34±3	0.30
68	0.58±0.04	-0.27±0.03	1.54±0.04	-2.87±0.04	2.89±0.03	33±2	0.30
73	0.36±0.05	-0.34±0.04	1.67±0.05	-2.86±0.05	2.78±0.04	34±2	0.30
78	0.27±0.05	-0.44±0.03	1.83±0.05	-2.78±0.05	2.67±0.05	35±4	0.30
83	0.40±0.05	-0.49±0.03	1.88±0.05	-2.74±0.05	2.61±0.05	36±4	0.30
88	0.51±0.05	-0.53±0.03	1.94±0.05	-2.71±0.05	2.55±0.05	37±4	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>							
58	4.57±0.04	0.90±0.03	0.62±0.04	-0.76±0.05	2.47±0.04	27±2	0.30
63	5.93±0.03	1.16±0.03	0.44±0.04	-0.86±0.05	2.43±0.04	23±2	0.30
68	5.12±0.04	1.50±0.02	0.64±0.04	-1.63±0.05	2.29±0.03	28±3	0.30
73	-0.23±0.05	1.22±0.05	1.99±0.05	-2.82±0.05	2.35±0.05	45±4	0.30
78	-3.33±0.05	0.77±0.05	3.14±0.06	-3.15±0.05	2.50±0.05	33±4	0.30
83	-3.91±0.05	0.58±0.05	3.62±0.06	-3.17±0.05	2.62±0.06	32±3	0.30
88	-3.80±0.05	0.50±0.05	3.96±0.07	-3.14±0.06	2.74±0.06	34±5	0.30
<b>soluciones obtenidas sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>							
58	4.40±0.04	0.96±0.04	0.63±0.05	-0.81±0.03	2.46±0.04	28±2	0.30
63	5.68±0.03	1.22±0.04	0.46±0.05	-0.91±0.05	2.43±0.04	25±4	0.30
68	4.78±0.03	1.53±0.02	0.69±0.04	-1.70±0.05	2.29±0.03	30±2	0.30
73	-0.55±0.05	1.24±0.05	2.05±0.05	-2.87±0.04	2.36±0.06	44±4	0.30
78	-3.64±0.03	0.80±0.05	3.17±0.04	-3.18±0.03	2.50±0.05	32±2	0.30
83	-4.09±0.05	0.65±0.05	3.63±0.05	-3.17±0.04	2.63±0.06	32±3	0.30
88	-3.96±0.05	0.58±0.05	3.95±0.05	-3.14±0.04	2.74±0.06	34±3	0.30

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 3.16b.** Ejes de esfuerzos, momento sísmico escalar, y porcentaje de aciertos en polaridades, del caso teórico con mecanismo focal vertical 33% de CLVD, obtenidos tras descomposición espectral del tensor momento sísmico.

<b>h (km)</b>	<b>eje de Tensión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>eje de Presión (<math>\theta, \phi</math>)</b>	<b>Mo (*)</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>
<b>soluciones obtenidas con corrección de la atenuación anelástica</b>					
<b>58</b>	44±0 144±0	47±0 309±0	4.50±0.11	100%	90%
<b>63</b>	44±0 148±0	48±0 310±0	4.31±0.11	100%	80%
<b>68</b>	43±0 149±1	49±0 311±0	4.10±0.11	100%	80%
<b>73</b>	40±0 150±1	51±0 312±0	4.09±0.11	100%	80%
<b>78</b>	39±0 153±1	53±0 313±0	4.02±0.11	100%	80%
<b>83</b>	41±0 159±0	53±0 312±0	4.04±0.11	100%	80%
<b>88</b>	43±0 166±0	53±0 311±0	3.91±0.11	100%	80%
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones)</b>					
<b>58</b>	88±0 188±0	20±0 284±0	5.54±0.05	100%	90%
<b>63</b>	87±0 184±0	16±0 285±0	6.91±0.06	100%	90%
<b>68</b>	83±0 186±0	17±0 298±0	6.41±0.07	100%	90%
<b>73</b>	67±0 76±0	47±0 323±0	3.87±0.05	100%	90%
<b>78</b>	28±0 112±0	68±0 330±0	5.66±0.09	100%	90%
<b>83</b>	26±0 111±0	69±0 329±0	6.25±0.10	100%	90%
<b>88</b>	27±0 106±0	70±0 328±0	6.37±0.09	100%	90%
<b>soluciones sin corregir la atenuación anelástica (varía entre las estaciones)</b>					
<b>58</b>	87±0 188±0	20±0 285±0	5.41±0.06	100%	90%
<b>63</b>	87±0 188±0	16±0 286±0	6.71±0.06	100%	90%
<b>68</b>	83±0 187±0	18±0 300±0	6.14±0.07	100%	90%
<b>73</b>	61±0 82±0	50±0 324±0	3.94±0.05	100%	90%
<b>78</b>	28±0 112±0	68±0 331±0	5.79±0.09	100%	90%
<b>83</b>	26±0 110±0	70±0 330±0	6.35±0.10	100%	90%
<b>88</b>	27±0 105±0	70±0 328±0	6.44±0.10	100%	90%

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%

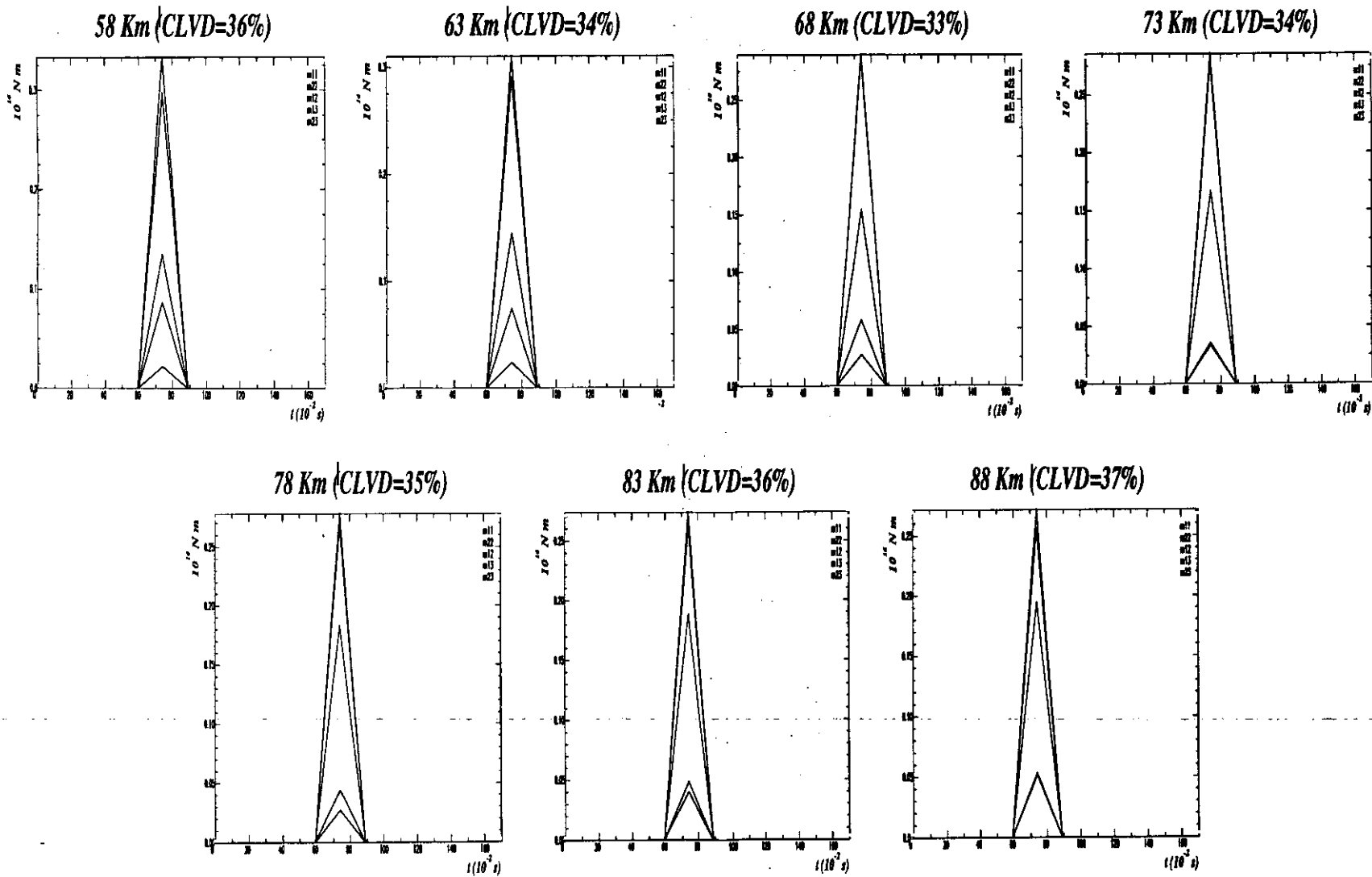


Fig. 3.51. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica.

# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%

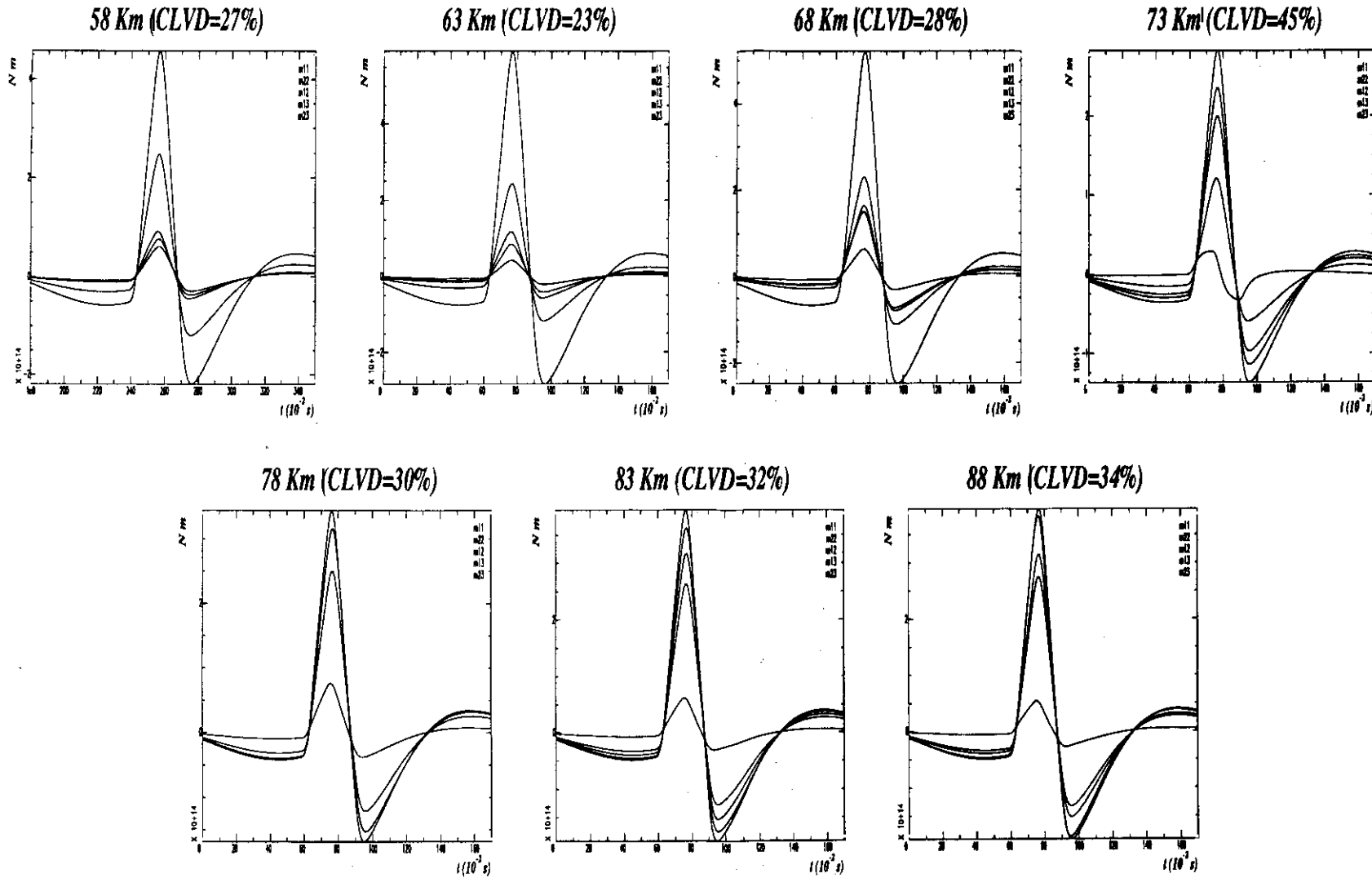


Fig. 3.52. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%

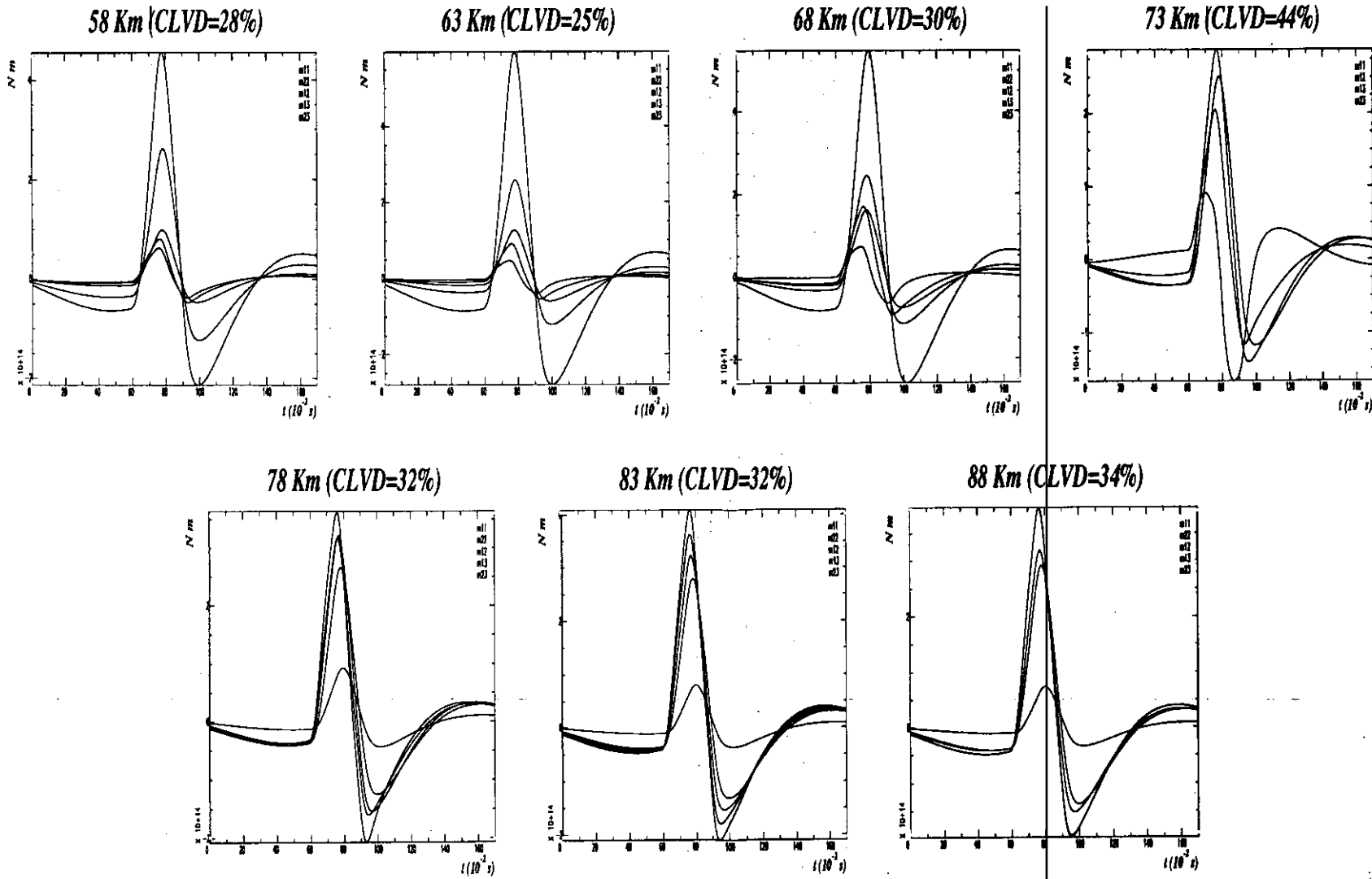


Fig. 3.53. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

Mecanismo focal vertical. CLVD=33%

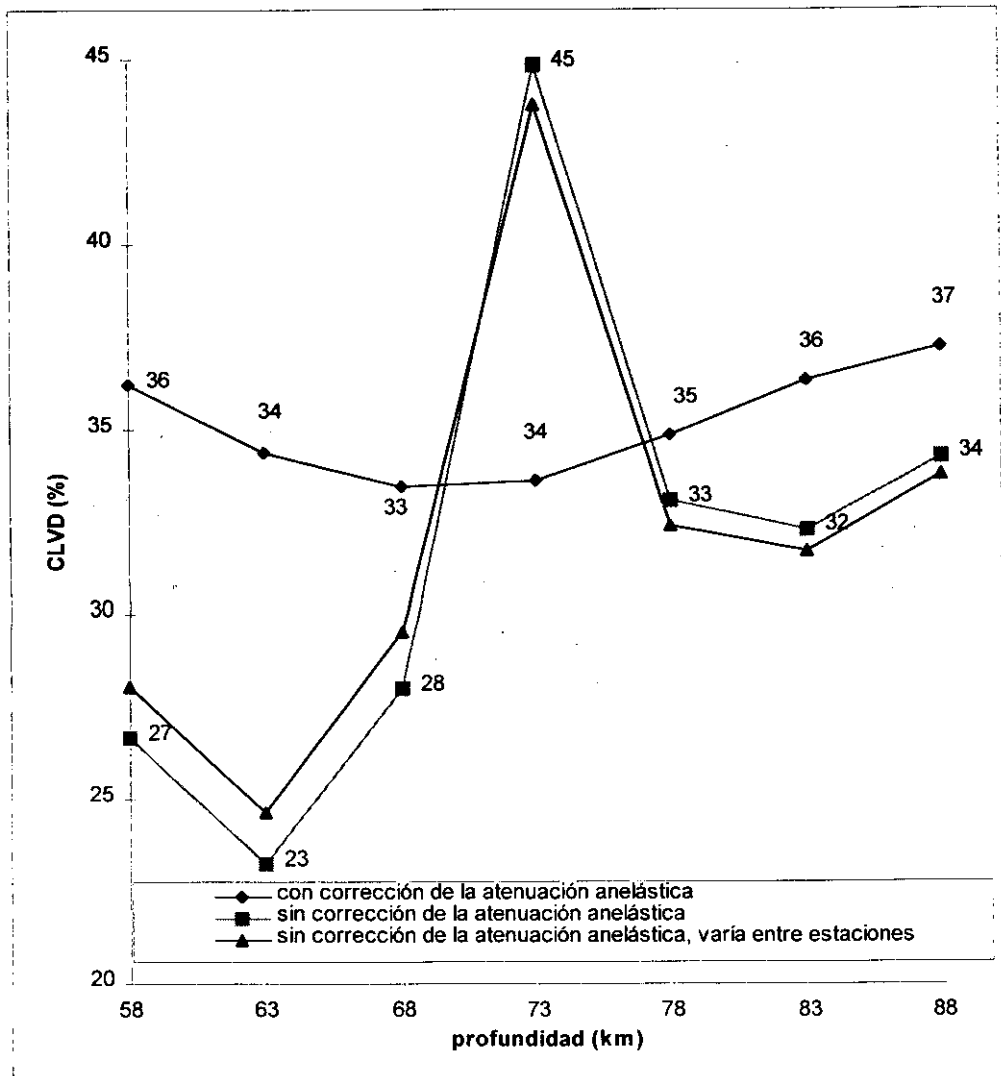


Fig. 3.54. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

De los resultados mostrados en las figuras anteriores para las diversas inversiones realizadas, se pueden obtener a las siguientes características:

- la atenuación anelástica influye en las soluciones obtenidas, en el caso de la corrección, el eje de Tensión se aleja del valor correcto  $44^\circ$  para el ángulo que forma con la vertical, hasta  $33^\circ$  en el acimut, mientras que el eje de Presión se aleja respectivamente  $33^\circ$  y  $26^\circ$ . Sin embargo, cuando se corrige la atenuación la variación del eje de Tensión respecto al correcto es de  $4^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical,  $10^\circ$  en el acimut, mientras que el eje P varía respectivamente en  $4^\circ$  y  $3^\circ$ .
- la duración de la función temporal obtenida es de 0.30s en todos los caso. Sin embargo, su forma varía dependiendo de la inversión realizada. Cuando se corrige la atenuación es igual que la correcta (un triángulo perfecto), cuando no se corrige la atenuación, se redondea y no coincide exactamente con la correcta (Fig. 3.51-3.53).
- el momento sísmico escalar es mayor en el caso de la no corrección anelástica que varía entre  $5.54-6.44 \times 10^{14}$  Nm, mientras que cuando se corrige varía entre  $3.90-4.51 \times 10^{14}$  Nm, mientras que el valor correcto es de  $11.31 \times 10^{14}$  Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido cuando se corrige la atenuación anelástica, es en todos los casos muy próximos al correcto variando entre 33-37%, para todas las profundidades. En los casos en que no se corrige la atenuación anelástica y es igual en todas las estaciones, varía entre 23-45%, y cuando no se corrige pero varía de unas estaciones a otras donde varía entre 25-44%. Además, al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad, el punto crítico se produce en la profundidad correcta 68 km, sólo cuando se corrige la atenuación y el valor de CLVD es el correcto 33%, cuando no se corrige el punto crítico se desplaza a una profundidad diferente de la correcta 5km más profunda y el valor del CLVD no coincide con el correcto, siendo 28% cuando la atenuación es igual en todas las estaciones y 30% cuando difiere de unas a otras (Fig. 3.54)
- los errores calculados son en el caso de los componentes del tensor un orden de magnitud menor, en los ejes de esfuerzos son de hasta  $2^\circ$ , en el momento sísmico escalar es hasta un orden de magnitud menor, y en el porcentaje de CLVD de hasta 5%.

### 3.3. Conclusiones

De todos los resultados obtenidos para los mecanismo focales seleccionados de doble par y no doble par, utilizando la corrección o no de la atenuación anelástica, la variación de la atenuación entre estaciones y la variación de la profundidad en las inversiones, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- la duración de la función temporal obtenida es de 0.30s en todos los caso, coincidiendo con la duración correcta. Sin embargo, su forma varía dependiendo de la inversión realizada. Cuando se corrige la atenuación es igual que la correcta (un triángulo perfecto), cuando no se corrige la atenuación, se redondea y no coincide exactamente con la correcta.
- las superficies nodales, no varían prácticamente con la profundidad. Las soluciones de los casos en que se corrige la atenuación anelástica, son los que se aproximan más a la solución correcta. Cuando no se efectúa la corrección anelástica, las soluciones se alejan más de la solución correcta.
- el momento sísmico escalar es del mismo orden que el original, de  $10^{14}$ Nm.
- el porcentaje de CLVD obtenido cuando se corrige la atenuación anelástica, es en todos los casos muy próximos al correcto. Además, al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad, el punto crítico (máximo o mínimo) se produce en la profundidad correcta, 68 km, cuando se corrige la atenuación. En los casos en que no se corrige la atenuación anelástica, el punto crítico se desplaza a una profundidad diferente de la correcta.
- los errores calculados son en el caso de los componentes del tensor un orden de magnitud menor, en los ejes de esfuerzos son de hasta  $2^\circ$ , en el momento sísmico escalar es hasta un orden de magnitud menor, y en el porcentaje de CLVD de hasta 15%.

## Capítulo 4

### Aplicación del método a terremotos del sur de España

El método anteriormente descrito en el capítulo 2, cuyo funcionamiento se ha estudiado en el capítulo 3 utilizando casos teóricos, se ha aplicado a terremotos del sur de España ocurridos entre 1987-1992, cuyo foco sísmico está situado a profundidad intermedia ( $60 \text{ km.} < h < 100 \text{ km.}$ ) y a un terremoto profundo ( $h=637 \text{ km.}$ ). Se han utilizado la componente vertical de los sismogramas digitales de velocidad de dichos terremotos, todos ellos registrados a distancias regionales ( $80 \text{ km.} < \Delta < 500 \text{ km.}$ ), en las estaciones de la Red Sísmica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.

#### Análisis de los datos

En la Tabla 4.1 y Fig.4.1, se muestran los datos hipocentrales de los terremotos estudiados, como se observa se producen todos en un área muy restringida ( $36^{\circ}$ - $37^{\circ}$  N,  $3.6^{\circ}$ - $4.5^{\circ}$  O) localizada en la zona de Granada-Málaga, al oeste del mar de Alborán. Su magnitud varía entre 3.0 y 5.0.

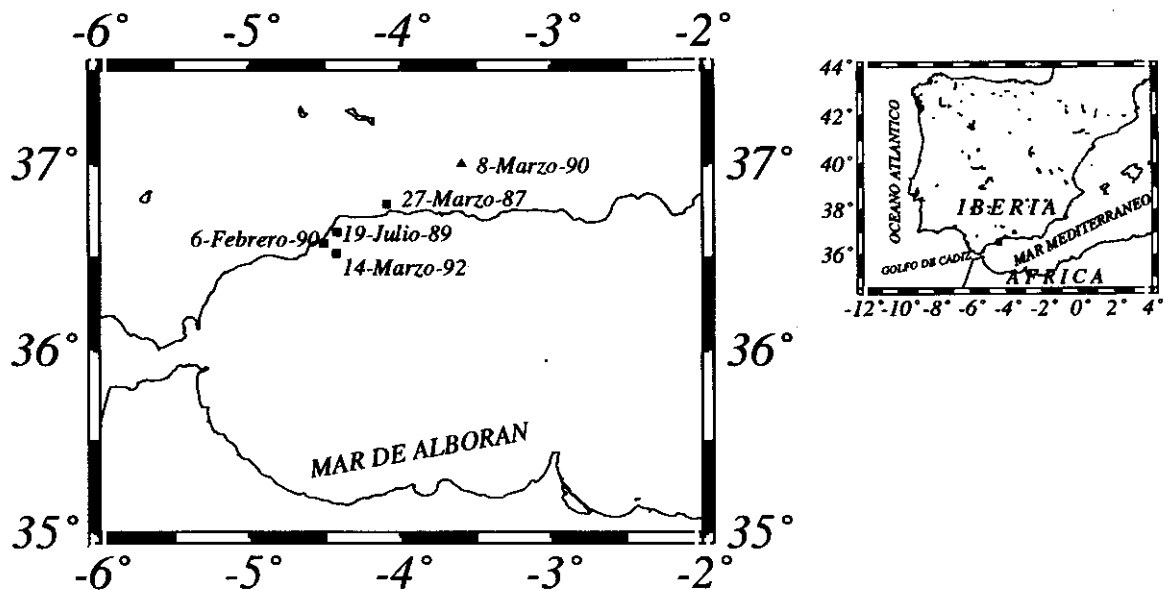


Fig. 4.1. Distribución epicentral de terremotos del Sur de España seleccionados.

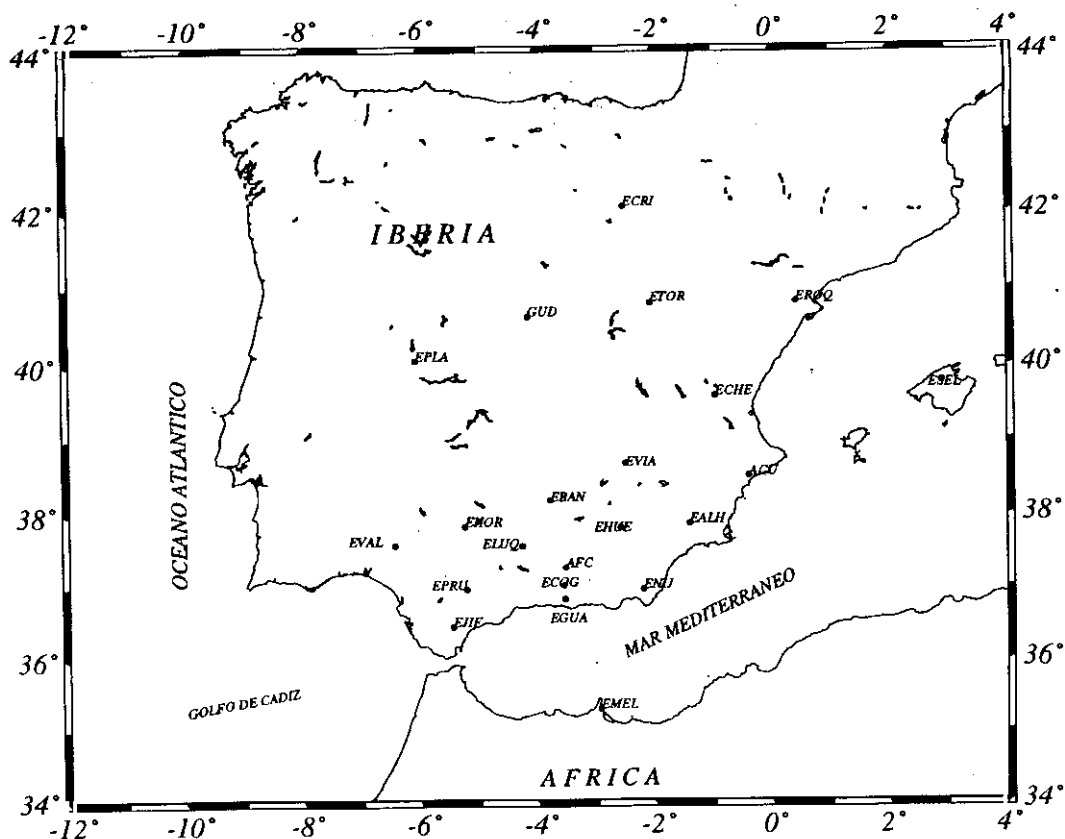


Fig. 4.2. Estaciones de la Red Sísmica Nacional utilizadas en este estudio.

El mecanismo focal de estos terremotos se ha calculado en un estudio previo (Buforn et. al, 1997), salvo para el número 5. En el citado trabajo se determinó el mecanismo focal utilizando un método de modelización de forma de onda pero utilizando un modelo de doble par como mecanismo focal. La función temporal empleada en Buforn et al., 1997, el número de estaciones, y el mecanismo focal se muestran en la Tabla 4.2.

El objetivo de este estudio es comprobar el método de inversión lineal desarrollado, frente a los resultados obtenidos por otros métodos.

**Tabla 4.1.** Datos hipocentrales de los terremotos seleccionados (I.G.N.)

Nº	Fecha	Hora(h:m:s)	Latitud (N)	Longitud (O)	h (km)	Magnitud
1	27-03-87	09:38:25.3	36° 47'	4° 06'	69	3.5
2	19-07-89	10:49:34.4	36° 38'	4° 26'	95	3.0
3	06-02-90	07:41:29.2	36° 34'	4° 31'	68	3.4
4	08-03-90	01:37:12.2	37° 00'	3° 60'	637	5.0
5	14-03-92	08:05:30.7	36° 31'	4° 26'	64	3.6

**Tabla 4.2.** Mecanismo focal utilizado en el método de modelización (Buforn et al., 1997)

Nº	Nº estaciones	Eje de Tensión	Eje de Presión	Mo 10 <sup>15</sup> (Nm)	f(t) (s)
1	7	31 349	66 157	0.28	0.17
2	7	34 202	57 29	0.15	0.16
3	9	22 12	68 185	0.07	0.10
4	17	73 268 56 43	17 84 76 146	14.60	1.20
5	-----	-----	-----	-----	-----

El tipo de estudio que se quiere realizar en este trabajo, necesita sismogramas con un registro de alta calidad de tal forma que la relación señal ruido sea buena y la llegada de la onda P sea clara.

Los datos utilizados en los terremotos estudiados, han sido proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional. En la Fig. 4.2, se muestra la localización de las estaciones de la Red Sísmica Nacional empleadas en este trabajo. El tipo de instrumento que registra los sismos es Kinematics con una frecuencia de normalización de 1 Hz, y su intervalo de muestreo es de 0.01 s (100 muestras/s), y los registros se producen en cuentas/s. El operador lineal que describe este tipo de instrumento es el que aparece descrito en el capítulo 3.

Se han seleccionado las primeras llegadas de la onda P, pero sólo aquellas que son ondas directas (ondas que salen del foco sísmico y llegan directamente a la estación de registro sin sufrir ningún tipo de reflexión, que corresponden a ángulos de incidencia en la estación entre 30°-40°), ya que en este caso no están afectadas por reflexiones y refracciones. Para la realización de las inversiones, se han utilizado las estaciones que se emplearon en la modelización (Buforn et al., 1997).

Para aislar los procesos ocurridos en el foco sísmico, de los que son ajenos a la fuente sísmica, los datos sísmicos originales digitales deben ser corregidos por varios efectos, el efecto del instrumento que los ha registrado, y la atenuación anelástica. En la Fig. 4.3, se muestran las respuestas instrumentales de dos sismómetros correspondientes a algunas estaciones de la Red Sísmica Nacional, EBAN y GUD ambos en velocidad, que representan el instrumento con mayor y menor parte plana, respectivamente. Al tratarse de instrumentos de período corto, se observa que la respuesta instrumental es plana tan solo en un rango pequeño de frecuencias, entre  $10^{-1}$  y 1 Hz.

El operador que describe la corrección de la atenuación anelástica en las señales utilizadas, es el mismo que el utilizado para los casos teóricos, y que aparece descrito en el capítulo 3. La corrección de la señal por la atenuación anelástica, actúa como un filtro sobre la misma, de tal forma el factor de calidad utilizado puede adelantar o retardar la señal, por lo tanto debe ser elegido de tal forma que de la señal corregida sólo se modifique en amplitud, y quede con la misma forma de onda, antes y después de eliminar la atenuación anelástica, y sin producir adelantos ni retardos en la señal. Los valores de la atenuación utilizada en este estudio se han tomado de Buforn et al. (1997).

Las señales han sido utilizadas sin filtrar para no manipularlas dado el pequeño rango de frecuencias en el que los instrumentos presentan respuesta plana, y se ha realizado su inversión mediante el método desarrollado. Se ha obtenido la evolución con el tiempo de las componentes del tensor momento sísmico, según se ha explicado en los capítulos 2 y 3.

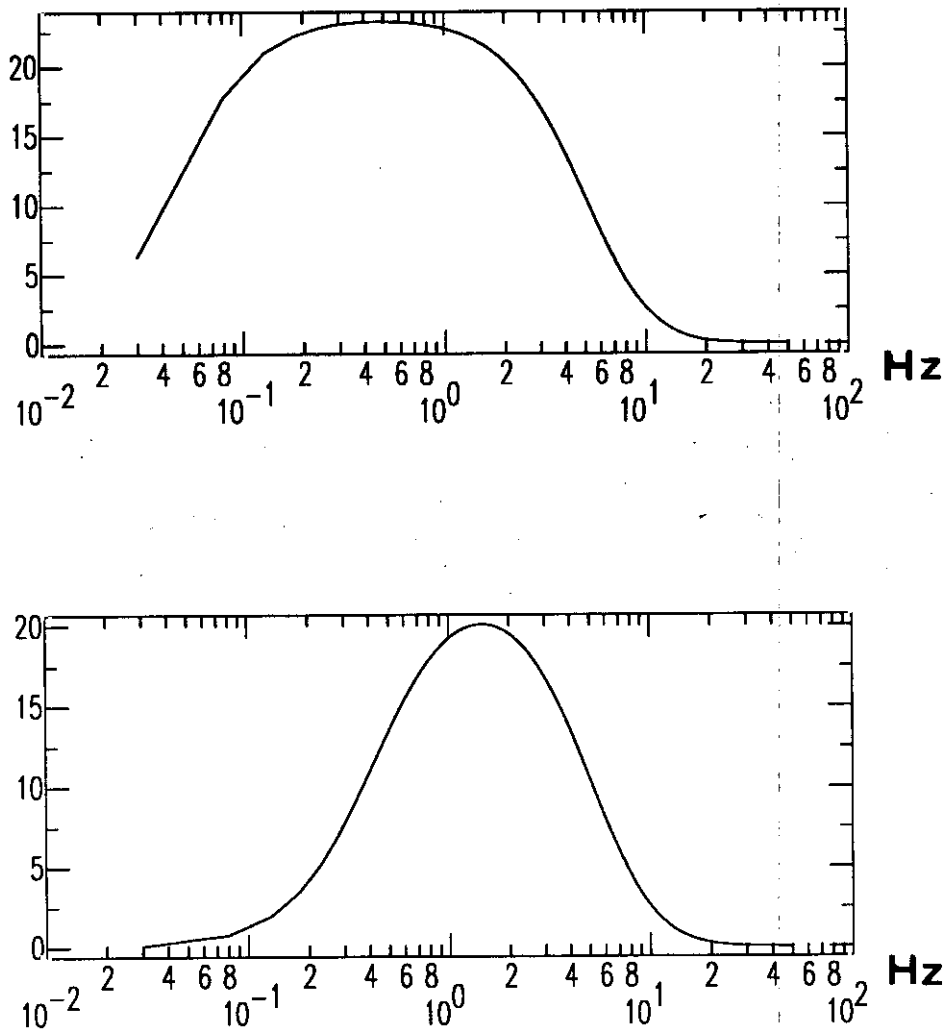


Fig. 4.3. Respuesta instrumental de estaciones de la Red Sísmica Nacional.  
(Arriba) EBAN, (abajo) GUD.

Las componentes del tensor momento sísmico obtenidas, se supone tienen una historia común y conjunta. La duración de la función temporal de la fuente sísmica se obtiene al representar las componentes y dado que su historia temporal es común, deben tener el mismo tipo de variación con el tiempo, y deben tener un tiempo de corte entre todas ellas. El tiempo que transcurre entre el inicio del sismo y este tiempo de corte, nos da la duración de la función temporal.

Para calcular el valor numérico del tensor momento sísmico se busca la primera máxima amplitud de las componentes del tensor momento sísmico obtenido tras la inversión, ésta máxima amplitud debe existir en un tiempo común para todas ellas (Silený et al, 1992).

El patrón de radiación se puede calcular a partir de las máximas amplitudes en el mismo instante de tiempo de las componentes del tensor momento sísmico. La duración de la función temporal se obtiene a partir del primer punto donde se cortan las componentes del tensor momento sísmico. La forma de la función temporal de la fuente sísmica es el promedio de las cinco componentes obtenidas. La función temporal se ha simplificado a una función triangular, ya que se ha comprobado que es una aproximación válida para los terremotos estudiados. La Fig. 4.4. muestra dos ejemplos de terremotos cuya función temporal ha sido obtenida tras la inversión (imponiendo el criterio de positividad a las componentes del tensor momento sísmico, línea continua) y la función temporal teórica utilizada para modelar los sismogramas sintéticos (línea discontinua). Ambas tienen una duración de 0.10s.

En el caso de que se puedan considerar como válida varias funciones temporales como posibles para un mismo terremoto, se han construido los sismogramas sintéticos para todas las posibles soluciones, y posteriormente se ha calculado el error cuadrático medio (rms) existente entre los sismogramas observados y los sintéticos. La ecuación que define dicho error es:

$$rms = \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} \left[ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (O_{ij} - t_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad [4.1]$$

donde  $N$  indica el número de estaciones,  $M$  el número de puntos utilizados en la inversión,  $o$  representa los sismogramas observados y  $t$  los sismogramas teóricos. La función temporal que se selecciona como correcta, es aquella que presenta un menor error cuadrático medio.

En todo el proceso de inversión la profundidad se ha considerado fija, sin embargo, se han realizado diferentes inversiones con diferentes profundidades, como se hizo en el capítulo 3 para los casos teóricos. Para verificar qué profundidad de las utilizadas, es la correcta se ha calculado el error cuadrático medio del terremoto, comparando sismogramas observados y sintéticos, construidos para diferentes profundidades (ecuación [4.1]). La profundidad para la que el ajuste entre sismogramas observados y teóricos, presenta un mínimo rms, corresponde al centroide.

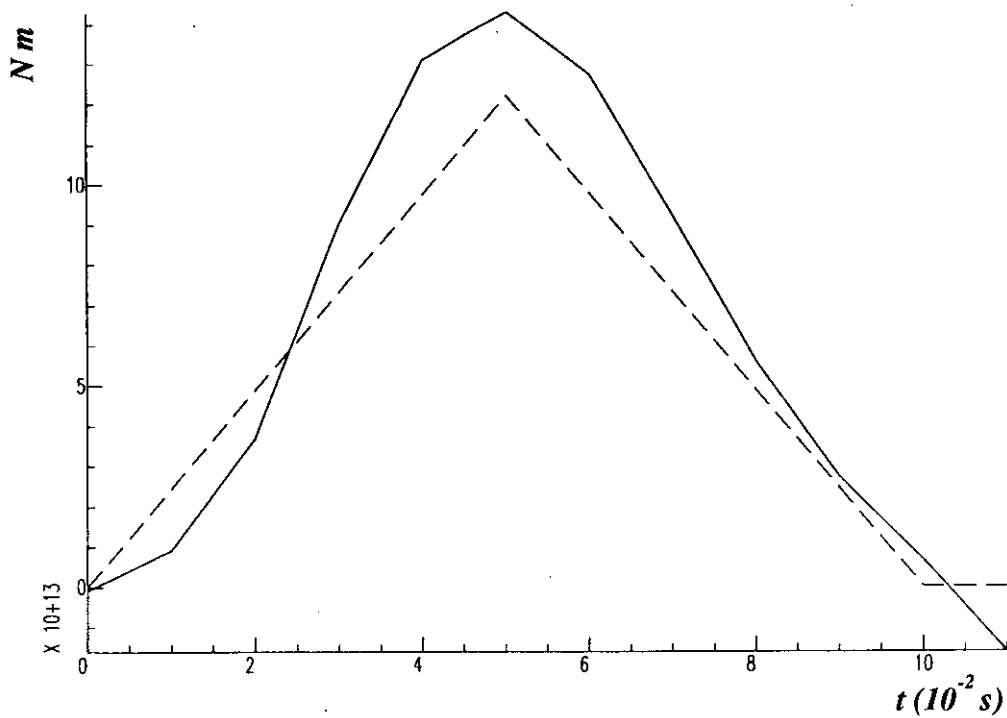
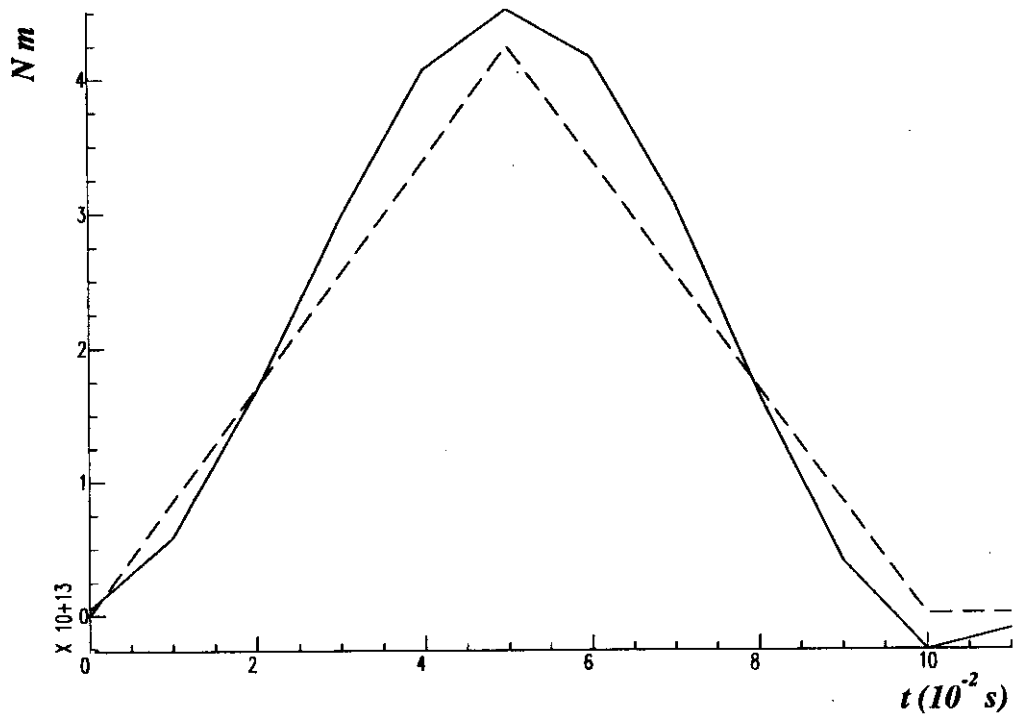


Fig. 4.4. Función temporal de la fuente sísmica obtenida tras la inversión (línea continua), función temporal teórica utilizada para construir los sismogramas teóricos (línea discontinua). (Arriba) Terremoto 19-Julio-1989, (abajo) Terremoto 6-Febrero-1990.

En el caso del patrón de radiación, si el máximo de las amplitudes para varias componentes está situado en tiempos diferentes, se elige el tiempo que más máximos de amplitudes presente.

Algunos de los terremotos estudiados tienen una función temporal simple, sin embargo otros de los eventos estudiados poseen una solución con una función temporal compleja: 27-Marzo-87, 8-Marzo-90. La función temporal compleja está formada en estos casos por varios triángulos simples, y para conocer su duración total, se ha buscado la duración de cada función simple y se han sumado. Para calcular el patrón de radiación correspondiente a cada función temporal simple, se ha buscado la máxima amplitud correspondiente a cada triángulo simple. El patrón de radiación total de los sismos complejos se ha calculado sumando componente a componente todos los tensores que representan cada función temporal simple.

Para todas las inversiones realizadas utilizando diferentes profundidades, con un intervalo de profundidad de 5 ó 10 km. entre ellas, se han calculado todos los parámetros necesarios para cada caso: el ángulo de incidencia en la estación, ángulo de incidencia del foco, distancia epicentral. Sin embargo, el  $t^*=T/Q$  se ha dejado constante, ya que la variación de T es despreciable, del orden de 1s en 50 km de variación de la profundidad.

Una vez obtenido el tensor momento sísmico, se realiza su descomposición espectral mediante el algoritmo desarrollado, obteniéndose sus valores y vectores propios. La matriz de los valores propios se re-escribe (ecuación [2.18], [2.19]) en dos matrices diagonales, una representa la parte de doble par puro que posee el tensor momento sísmico inicial y la otra parte de CLVD. Esto permite conocer si el mecanismo focal del terremoto estudiado se ajusta a un doble par puro o posee otro tipo de mecanismo focal.

Para la parte de doble par del tensor momento sísmico, se calculan los ejes de esfuerzos ejes T, P y Z y también el momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y para la parte de no-DC, se calcula el porcentaje de CLVD. Los errores de los parámetros obtenidos, se calculan a partir de los errores del tensor inicial, según se describe en el capítulo 2.

Posteriormente se representan sobre la esfera focal tanto los ejes de esfuerzos, T, P, Z, los planos de falla, superficies nodales correspondientes al CLVD y las estaciones (dilataciones con círculos blancos, compresiones con círculos negros), calculándose el porcentaje de acierto de las polaridades en ambos casos.

Las condiciones habituales para realizar la inversión de las señales sísmicas son (De Natale y Zollo, 1993) :

- buena cobertura acimutal de la esfera focal por las estaciones empleadas en la inversión
- conocimiento detallado de la estructura
- estimación de la atenuación anelástica
- conocer los instrumentos de registro
- buena localización de los terremotos

estas condiciones se cumplen en este estudio, aunque el mayor problema se plantea en la primera de ellas. Algunos de los terremotos no tienen una buena cobertura acimutal como el terremoto del 19 de julio de 1989 y de 27 de marzo de 1987, donde sólo se cubre la mitad de la esfera focal. El resto de los sismos estudiados, se tiene al menos tres cuartas partes de la esfera focal cubierta. En cuanto al conocimiento detallado de la estructura, no es tan importante en nuestro estudio, ya que el método se va a aplicar a terremotos de profundidad intermedia, y para este tipo de sismos la primera onda que se registra es la onda P directa (suficientemente separada de las onda pP y sP) que es casi vertical con lo que no se ve muy afectada por la estructura de la tierra que atraviesa. El modelo de estructura de Tierra utilizado ya ha sido empleado en trabajos anteriores (Buforn et al., 1988; Coca y Buforn, 1994)

A continuación se van a describir los resultados obtenidos al aplicar el método descrito a los terremotos del sur de España estudiados.

### Málaga, 27-Marzo-1987

Terremoto de magnitud de 3.5 (terremoto nº 1, Tabla 4.1, Fig. 4.1), cuyo epicentro está localizado en la Costa de Málaga con una profundidad de 69 km. (IGN). En 7 estaciones la primera llegada corresponde a la onda P directa, con ángulo de incidencia en la estación entre 30°-40°, y cuya relación señal ruido es aceptable.

Los registros de las estaciones empleados para realizar la inversión, se han representado en la Fig. 4.5, como se observa cubren sólo la mitad de la esfera focal, siendo todas las primeras llegadas dilataciones. En la Tabla 4.3 se muestran las estaciones utilizadas para realizar la inversión: acimut, ángulo de incidencia en el foco, la distancia epicentral, y la atenuación anelástica (Q), para una profundidad de 69 km. (IGN).

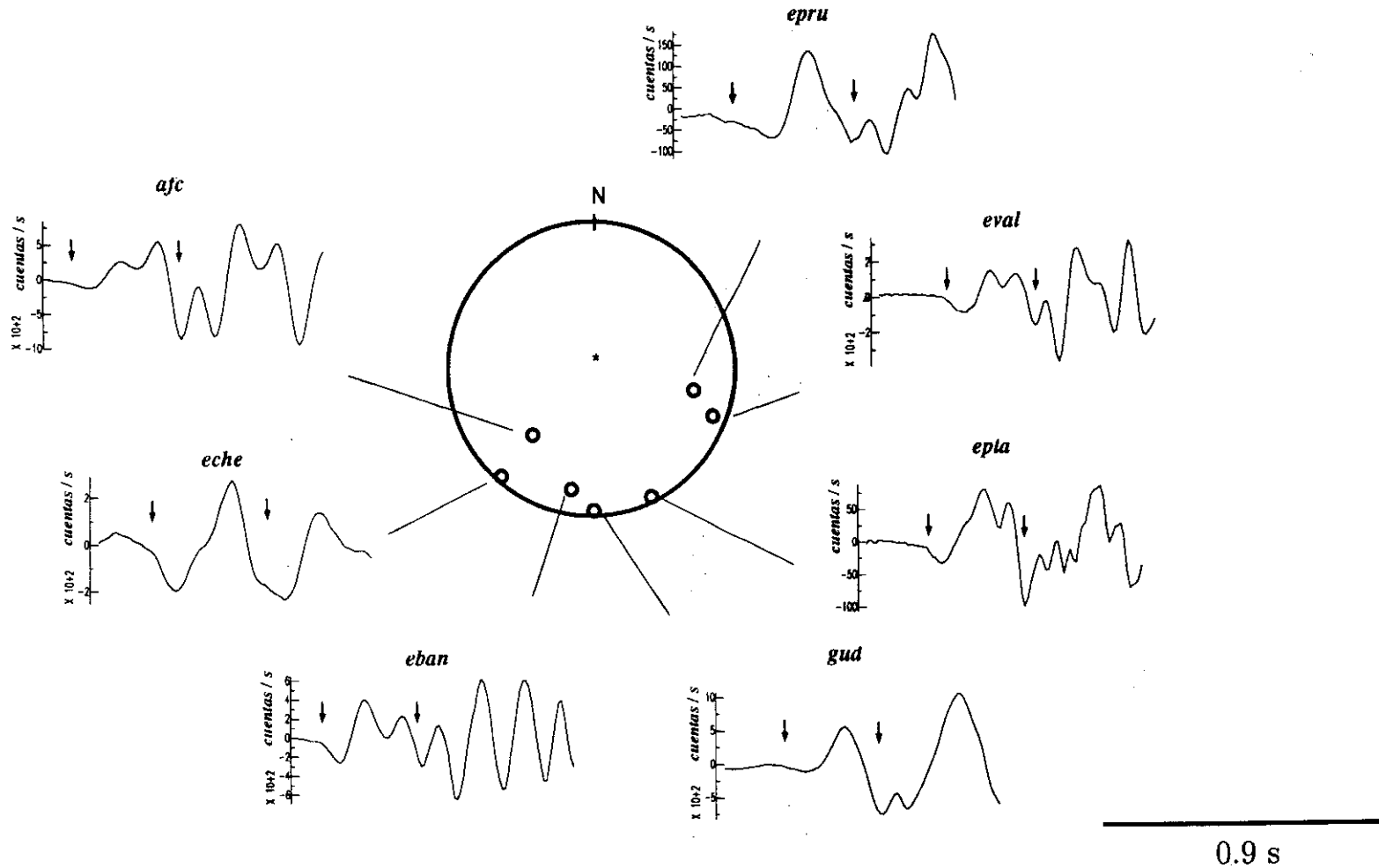
**Tabla 4.3.** Estaciones utilizadas en la inversión. Terremoto 27-Marzo-1987.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)	atenuación anelástica (Q)
epru	102	62	103	150
eval	111	80	251	600
epla	155	86	404	600
gud	179	86	430	600
eban	190	72	157	350
eche	221	86	416	150
afc	223	51	72	130

Se han utilizado una longitud de registro de 0.22s (desde el inicio del sismo) para realizar las inversiones. Este periodo es suficiente para obtener la función temporal del terremoto, ya que abarca toda la llegada de la onda P directa.

Se han realizado inversiones utilizando un rango de profundidades entre 39-99 km, (que comprende la profundidad dada por el IGN, 69 km). con intervalo de profundidad de 10 km., obteniéndose las componentes del tensor momento sísmico, que se muestran en la Fig. 4.6. Se han representado conjuntamente imponiendo el criterio de positividad. En esta figura se puede observar que las componentes se cortan en  $t=0.07s$ , y en  $0.14s$ . Por lo tanto, existen dos posibles funciones temporales, una función simple de  $0.07s$  de duración, y otra posible función compleja de  $0.14s$  de duración formada por dos funciones simples de  $0.07s$  cada una de ellas. La forma de todas las componentes es muy similar entre sí salvo  $m_{11}$ ,  $m_{13}$  que se ven muy afectadas por la variación de la profundidad.

27 Marzo 1987



150

Fig.4.5. Terremoto 27-Marzo-1987. Sismogramas utilizados en la inversión. Los círculos blancos representan dilataciones. La escala horizontal (tiempo) es de 0.9s e igual en todas las estaciones. La escala vertical viene dada en cuentas/s. Las flechas indican la longitud de registro elegida para la inversión.

# 27 Marzo 1987

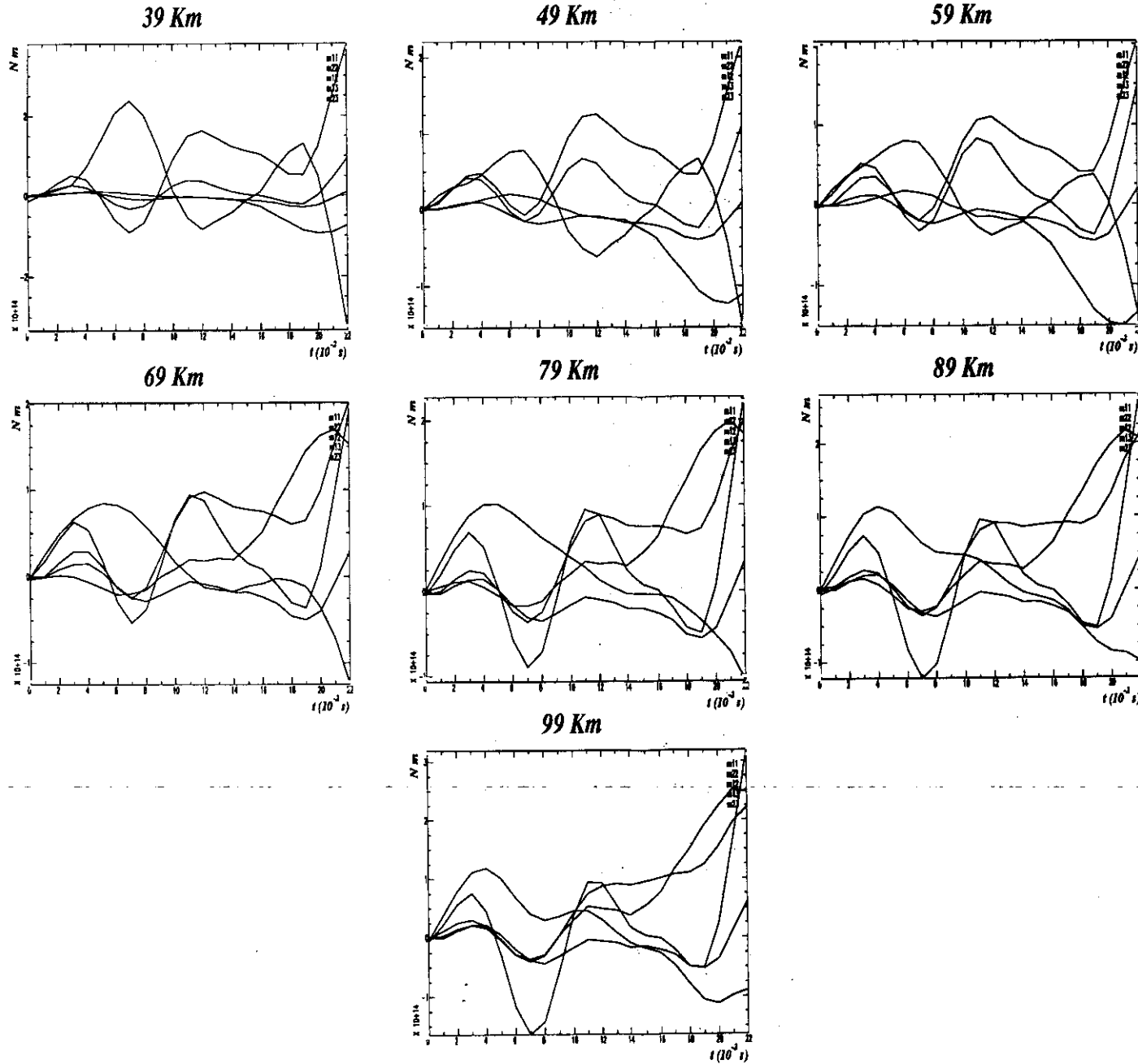


Fig.4.6. Terremoto 27-Marzo-1987. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas tras la inversión.

A partir de la amplitud máxima de las componentes del tensor momento sísmico (situadas en 0.03s, y 0.10s), se han calculado las componentes del tensor momento sísmico y se ha realizado su descomposición espectral. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3 (componentes del tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD y la función temporal de la fuente sísmica) y Tabla 4.4, los ejes de esfuerzos (T, P), momento sísmico escalar, porcentaje de aciertos (score) del CLVD y del doble par.

La superficies nodales y los ejes de esfuerzos obtenidos utilizando los valores que se muestran en la Tabla 4.3, y 4.4, se han representado en las Figuras 4.7 para la primera función de 0.07s, en la Fig. 4.8 para la segunda de 0.07s y Fig. 4.9 para la solución completa de 0.14s. El mecanismo focal es muy similar en todas las soluciones, con independencia de la profundidad utilizada. La primera llegada presenta un mecanismo focal vertical con un plano vertical en dirección O-E, eje de Tensión en la dirección N-S. Mientras que la segunda llegada presenta un mecanismo focal vertical pero el plano de falla situado en dirección NO-SE. La solución completa presenta también un mecanismo focal vertical en dirección NO-SE.

Los valores de momento sísmico escalar obtenido en las diversas inversiones, indican que la primera llegada es similar en tamaño a la segunda, aunque ligeramente superior entre  $1.79-2.73 \times 10^{14}$  Nm, frente a  $1.40-2.12 \times 10^{14}$  Nm de la segunda.

El porcentaje de aciertos para la primera función es del 100% para todas las profundidades, utilizando tanto el mecanismo focal de no doble par como de doble par, salvo para 39km (57%) ya que algunas estaciones ya no son ondas directas. Sin embargo para la segunda función temporal, éste porcentaje sólo se obtiene al utilizar el mecanismo focal de no doble par.

**Tabla 4.4.** Tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD y función temporal del terremoto 27-Marzo-1987, obtenidos tras la inversión

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
<b>primera función temporal</b>							
39	-0.21±0.04	-0.11±0.06	0.15±0.04	2.71±0.30	-0.03±0.23	4±2	0.07
49	-0.33±0.04	-0.31±0.07	0.15±0.05	1.70±0.16	0.28±0.15	18±4	0.07
59	-0.28±0.05	-0.34±0.10	0.19±0.06	1.85±0.14	0.24±0.14	18±4	0.07
69	-0.18±0.06	-0.41±0.12	0.23±0.07	2.04±0.11	0.25±0.13	20±4	0.07
79	-0.08±0.07	-0.42±0.14	0.24±0.08	2.23±0.10	0.21±0.13	18±4	0.07
89	0.07±0.08	-0.41±0.16	0.32±0.10	2.49±0.10	0.23±0.13	17±3	0.07
99	0.19±0.10	-0.34±0.18	0.33±0.11	2.66±0.11	0.20±0.14	14±6	0.07
<b>segunda función temporal</b>							
39	-0.06±0.04	-0.29±0.06	0.03±0.04	1.45±0.30	1.04±0.23	13±2	0.07
49	-0.11±0.04	-0.60±0.07	-0.02±0.05	0.73±0.16	1.02±0.15	15±4	0.07
59	-0.04±0.05	-0.71±0.10	0.02±0.06	0.97±0.14	0.95±0.14	20±4	0.07
69	0.08±0.06	-0.82±0.12	0.02±0.07	1.27±0.11	0.87±0.13	24±4	0.07
79	0.21±0.07	-0.85±0.14	0.03±0.08	1.54±0.10	0.81±0.13	37±4	0.07
89	0.39±0.08	-0.85±0.16	0.09±0.10	1.76±0.10	0.81±0.13	28±3	0.07
99	0.53±0.10	-0.83±0.18	0.09±0.11	1.92±0.11	0.79±0.14	45±6	0.07
<b>función temporal completa</b>							
39	-0.27±0.08	-0.40±0.12	0.18±0.08	4.16±0.60	1.01±0.46	10±4	0.14
49	-0.44±0.08	-0.89±0.14	0.12±0.10	2.43±0.32	1.30±0.30	27±8	0.14
59	-0.33±0.10	-1.05±0.20	0.20±0.12	2.82±0.28	1.19±0.28	29±8	0.14
69	-0.09±0.12	-1.23±0.24	0.25±0.14	3.30±0.22	1.23±0.26	30±8	0.14
79	-0.60±0.14	-1.27±0.28	0.28±0.16	3.81±0.20	1.03±0.26	29±8	0.14
89	0.46±0.16	-1.26±0.32	0.42±0.20	4.24±0.20	1.04±0.26	27±6	0.14
99	0.72±0.20	-1.06±0.36	0.34±0.22	3.63±0.22	1.15±0.28	25±12	0.14

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

Tabla 4.5. Parámetros focales del terremoto 27-Marzo-1987 obtenidos tras la inversión

<b>h (km)</b>	<b>eje de T (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>eje de P (<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	<b>Mo</b>	<b>score CLVD</b>	<b>score DC</b>	<b>rms</b>
<b>primera función temporal</b>						
<b>39</b>	43±0 13±0	47±0 182±0	2.73 ±0.02	57	57	0.423
<b>49</b>	38±0 13±0	53±0 183±0	1.79 ±0.17	100	100	0.348
<b>59</b>	39±0 12±0	52±0 180±0	1.92 ±0.08	100	100	0.347
<b>69</b>	40±0 11±0	50±0 179±0	2.10 ±0.09	100	100	0.339
<b>79</b>	42±0 9±0	49±0 178±0	2.34 ±0.11	100	100	0.343
<b>89</b>	45±1 10±1	47±0 177±1	2.52 ±0.17	100	100	0.340
<b>99</b>	46±1 9±0	45±0 177±0	2.68 ±0.14	100	100	0.341
<b>segunda función temporal</b>						
<b>39</b>	42±0 33±0	49±0 220±0	1.80 ±0.02	57	57	
<b>49</b>	33±0 48±0	58±0 246±0	1.40 ±0.13	100	57	
<b>59</b>	35±0 35±0	59±0 244±0	1.52 ±0.14	100	57	
<b>69</b>	38±0 25±0	58±0 239±0	1.67 ±0.14	100	57	
<b>79</b>	42±0 23±0	53±0 235±0	1.79 ±0.13	100	57	
<b>89</b>	44±1 17±1	50±0 228±0	2.00 ±0.14	100	57	
<b>99</b>	50±1 25±0	45±0 172±0	2.12 ±0.17	100	86	
<b>función temporal completa (0.14s)</b>						
<b>39</b>	42±0 15±0	48±0 192±0	4.31 ±0.12	57	57	0.442
<b>49</b>	36±0 27±0	54±0 212±0	2.89 ±0.14	57	72	0.438
<b>59</b>	39±0 21±0	53±0 207±0	3.16 ±0.14	100	72	0.436
<b>69</b>	40±0 17±0	51±0 204±0	3.56 ±0.13	100	72	0.430
<b>79</b>	37±0 16±0	54±0 193±0	4.13 ±0.13	100	86	0.438
<b>89</b>	44±1 14±0	46±0 194±0	4.37 ±0.13	100	86	0.466
<b>99</b>	47±1 15±0	46±0 194±0	3.82 ±0.13	100	86	0.453

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

# 27 Marzo 1987, primera función

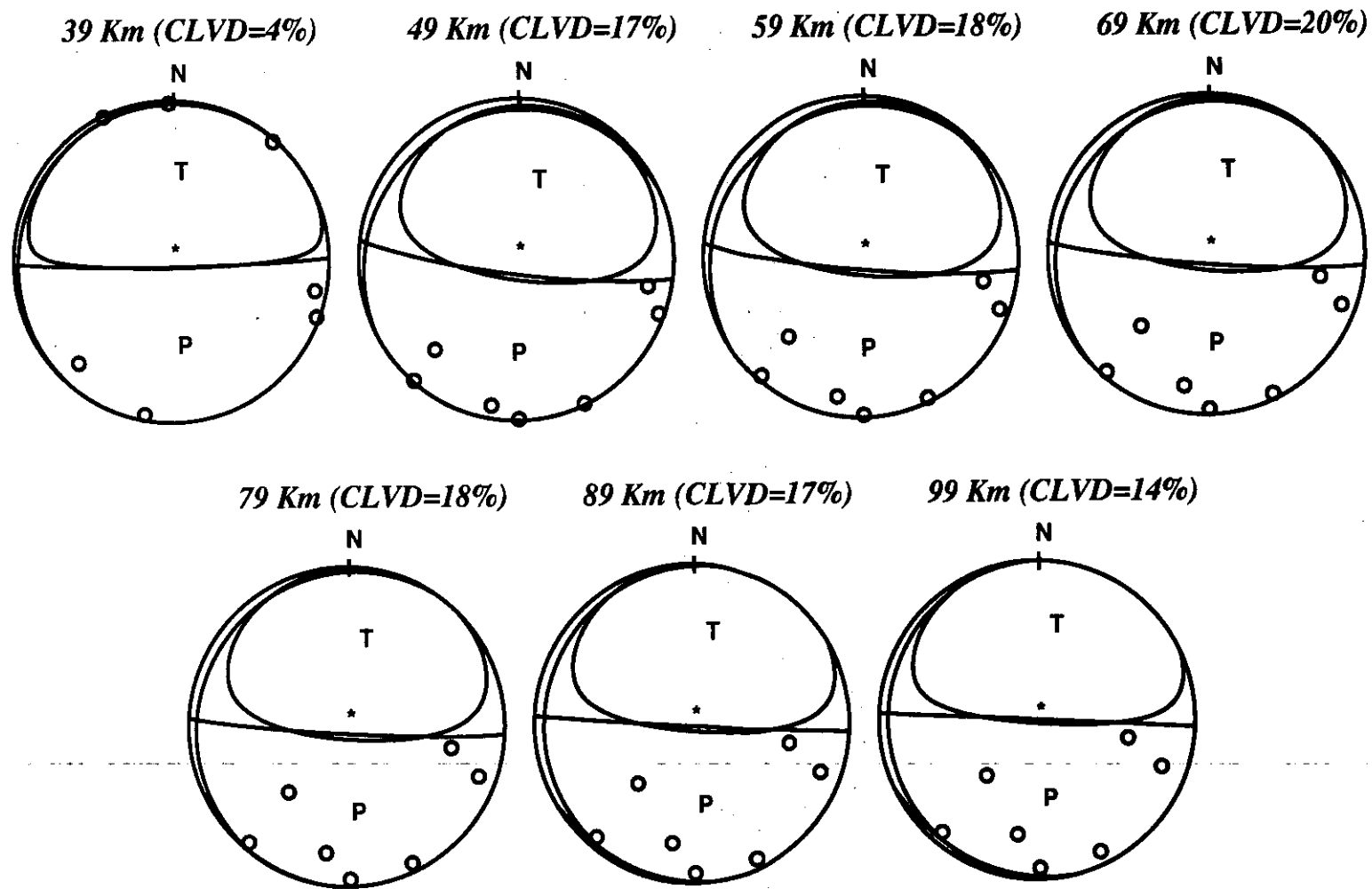


Fig. 4.7. Terremoto 27-Marzo-1987. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión, para la primera función temporal.

## 27 Marzo 1987, segunda función

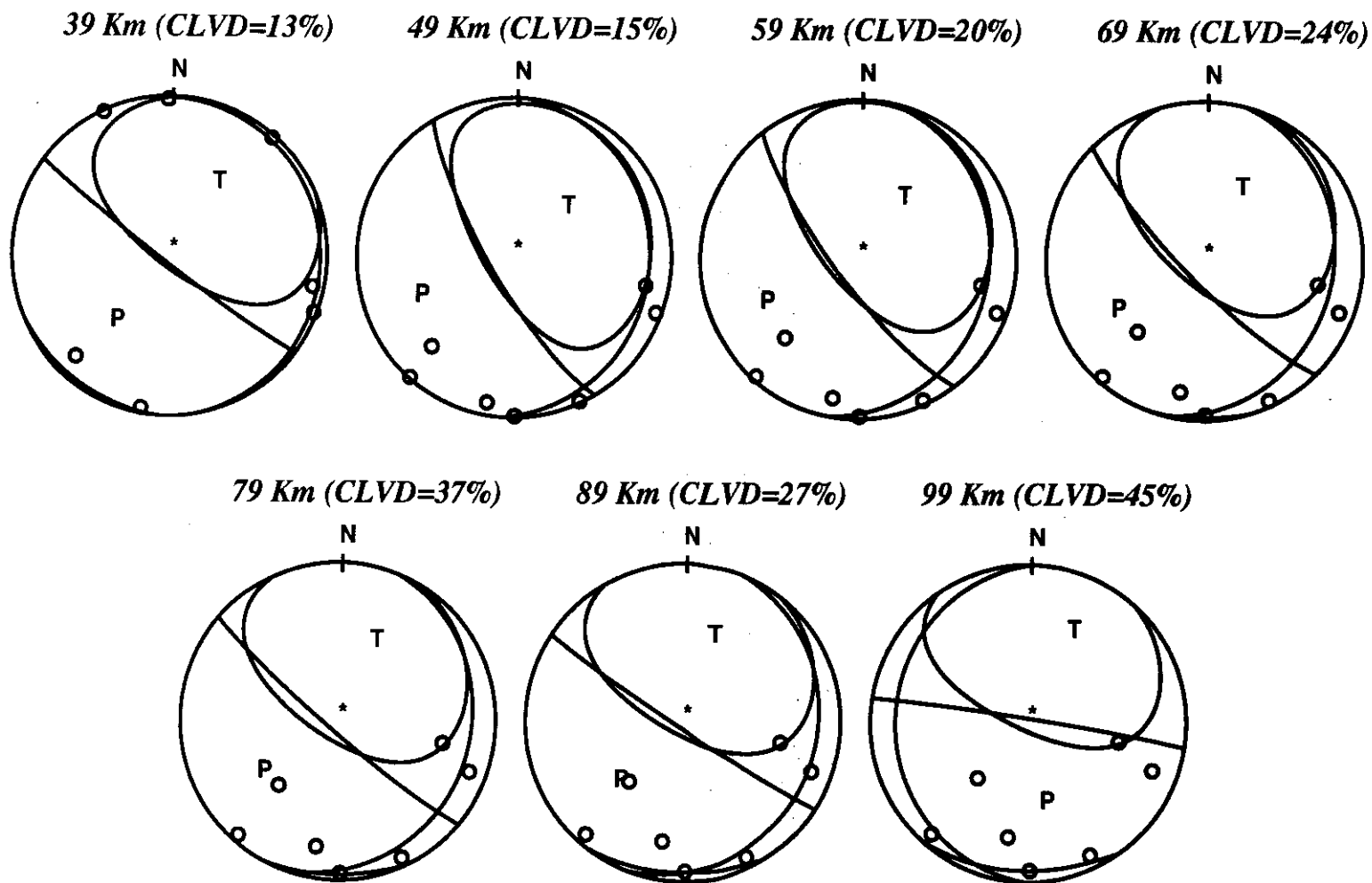


Fig. 4.8. Terremoto 27-Marzo-1987. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión, para la segunda función temporal.

# 27 Marzo 1987, función total

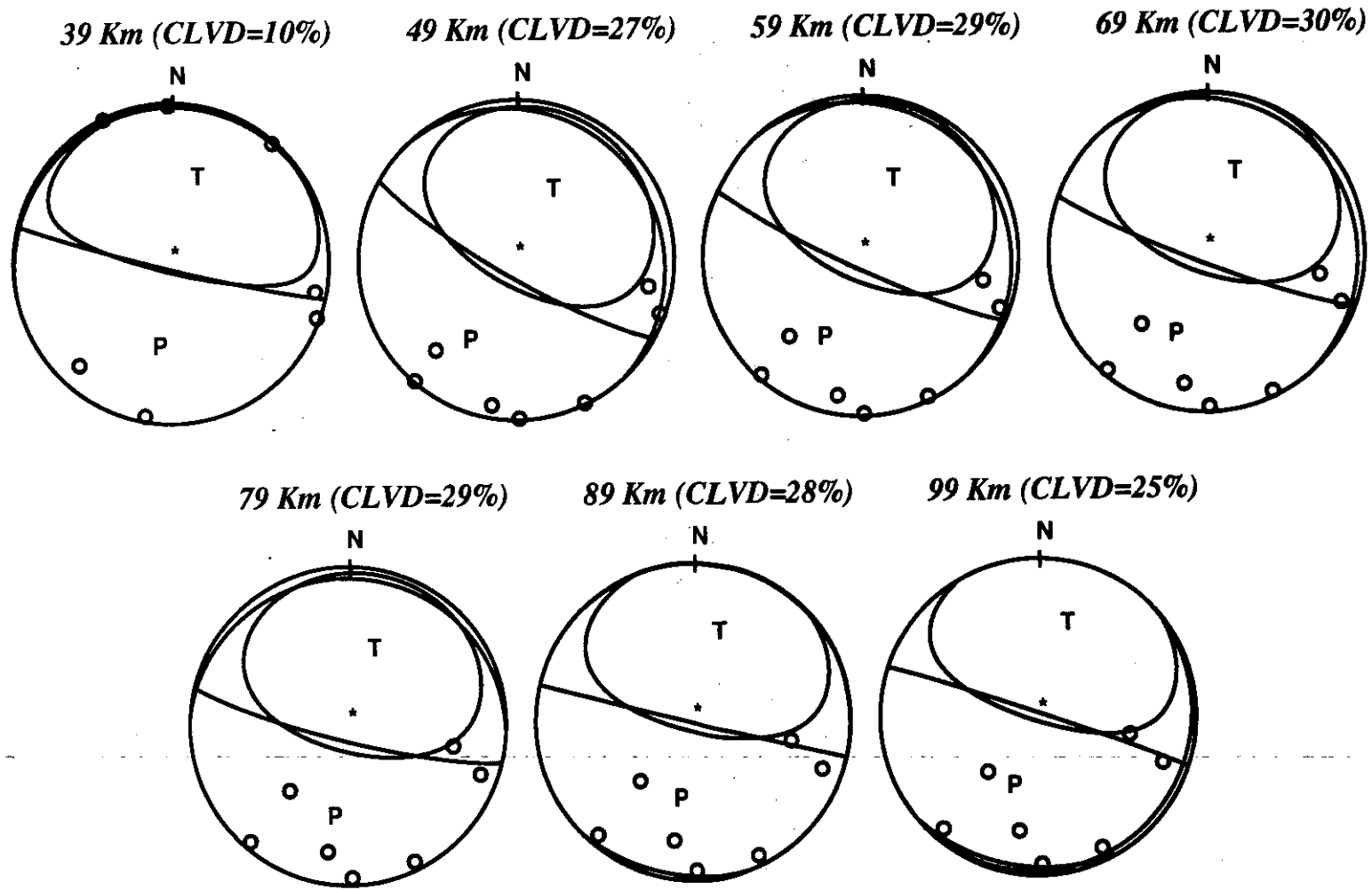


Fig. 4.9. Terremoto 27-Marzo-1987. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión, para la función temporal completa.

En la Fig. 4.10 se muestra la representación del porcentaje de CLVD obtenido para cada una de las inversiones, frente a la profundidad utilizada, cuyos valores se muestran en la Tabla 4.3. El punto crítico, que es un máximo, del CLVD se produce a 69 km para la primera función temporal, para la segunda función se presenta en 79 km y para la función completa aparece en 69 km.

Para poder ajustar la profundidad del terremoto, se ha calculado el rms existente entre los sismogramas observados y los sismogramas teóricos para cada solución obtenida utilizando todas las profundidades (entre 39-99 km) y para ambas funciones temporales de 0.07s y 0.14s. Dichos ajustes se han representado en la Fig. A2.1-A2.7 del Anexo 2, para la primera función de 0.07s y Fig. A2.8-A2.14 del Anexo 2, para la función temporal completa (la primera y segunda función temporal juntas), con una duración de 0.14s. El rms obtenido para cada solución se muestra en la Tabla 4.5. En los ajustes se observa que en todas las profundidades (salvo para 39km), la polaridad de las estaciones es la correcta, que la estación que mejor se ajusta es ECHE y la que peor es GUD.

Se ha representado el rms obtenido para cada inversión, frente a la profundidad (Figura 4.11) obteniéndose el mínimo rms en la profundidad de 69 km. Es decir, el mejor ajuste entre sismogramas observados y teóricos se produce a 69km, y por lo tanto, es ésta la profundidad del centroide obtenida mediante el método de inversión para este terremoto. Dicha profundidad coincide con la calculada por el IGN. Sin embargo, como se observa la curva es casi plana entre 49-99 km.

Para distinguir cuál de las dos funciones temporales calculadas se ajusta más a la correcta, se han utilizado los rms obtenidos (Fig. 4.11). La mejor solución que es aquella que presenta un menor rms, que corresponde a la función temporal simple de 0.07s de duración, ya que tiene un rms de 0.339, frente a la de 0.14s que posee un rms de 0.430. Sin embargo debido a que la diferencia entre los rms no es muy grande, ambas pueden ser posibles aunque la solución con una sola función temporal (0.07s) presenta valores de rms ligeramente menores.

Observando conjuntamente las Fig. 4.10, y 4.11, se aprecia que el mínimo del CLVD y el rms se produce en ambas variables a 69km para la primera función temporal, en 79km para la segunda y a 69km para la función temporal total.

A partir de los resultados obtenidos por el método de inversión y de los valores del rms, se puede concluir que la profundidad del centroide para este terremoto está en 69 km, un mecanismo focal vertical, que se aleja de un doble par fuerzas ya que presenta un 20% de CLVD.

El tipo de mecanismo focal que presenta este terremoto, ha sido estudiado en el capítulo 3, mediante el mecanismo focal vertical de 15% de CLVD, que presenta el plano vertical en dirección E-O. Si comparamos las soluciones del patrón de radiación en ambos casos, son muy estables y no varían prácticamente con la profundidad. La forma de las componentes del tensor momento sísmico, es más estable en el caso teórico, ya que las componentes  $m_{11}$  y  $m_{13}$  varían con la profundidad para el terremoto del 27-Marzo-1987. Esto puede ser debido a la mala cobertura acimutal de la esfera focal en el caso de terremoto del sur de España que es tan sólo de la mitad, frente a la totalidad del caso teórico. El CLVD obtenido frente a la profundidad para el sismo del 27 de Marzo de 1987 (Fig. 4.10), presenta un punto crítico (máximo) en la profundidad del centroide (mínimo rms) poco pronunciado. Dicha variación con la profundidad coincide totalmente en la forma con el caso teórico, en ambos casos el máximo se produce en la profundidad del centroide, y es poco pronunciado. Por lo tanto, las soluciones obtenidas para el sismo del 27 de Marzo de 1987, y el caso teórico de mecanismo focal vertical de 15% de CLVD, presentan las mismas características.

Comparando los resultados obtenidos mediante el método de inversión para este terremoto (Tabla 4.3, 4.4, Fig. 4.7, 4.8 ), con el obtenido a partir del método de la modelización Buforn et al., (1997) que se muestran en la Tabla 4.2, se observa que el tipo de mecanismo focal es el mismo, movimiento vertical con un plano E-O, el momento sísmico escalar es del mismo orden,  $2.1 \times 10^{14}$  Nm frente a  $2.8 \times 10^{14}$  Nm de la modelización, y  $2.2 \times 10^{14}$  Nm del análisis espectral, y la función temporal es algo menor 0.07 s frente a 0.17 s según la modelización (ya que en este método se han utilizado dos funciones simples de 0.07s de duración cada una). La discrepancia en la duración de la función temporal entre ambos métodos puede ser debido a que en el método de la inversión, el mecanismo focal obtenido presenta un 20% de CLVD, mientras que para el método de la modelización se utilizó un mecanismo focal de doble par.

### 27 Marzo 1987

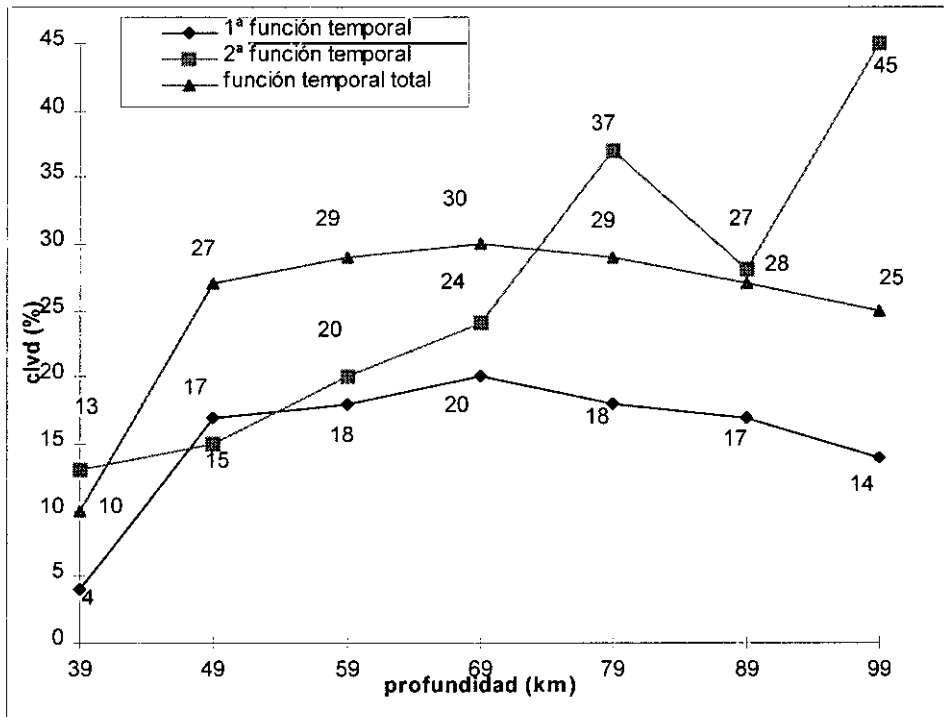


Fig. 4.10. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

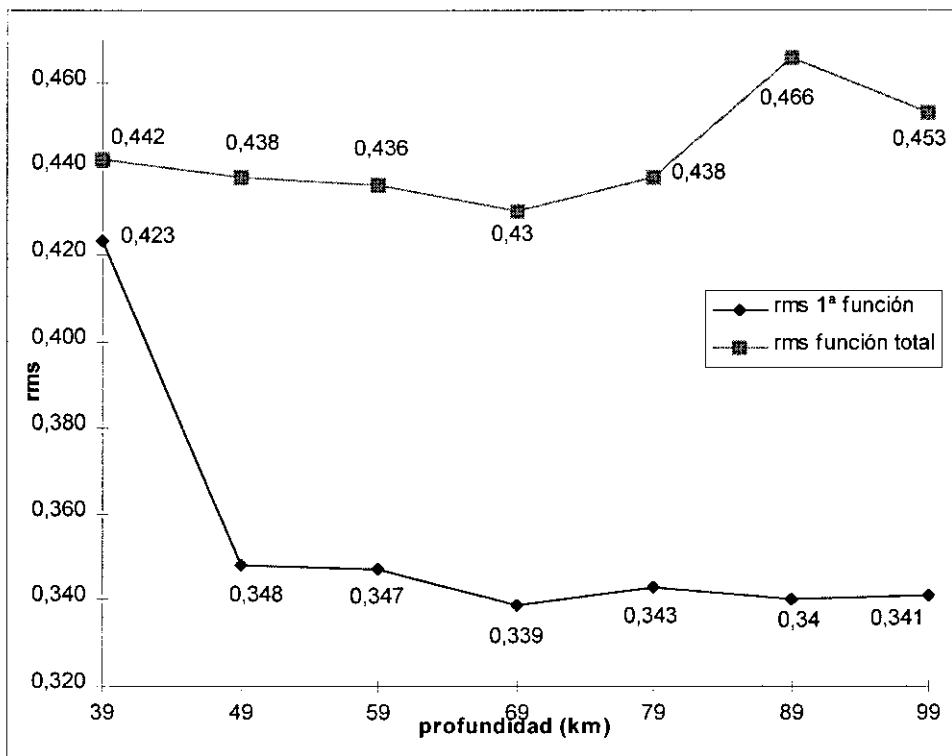


Fig. 4.11. RMS obtenido, frente a la profundidad.

### Málaga, 19-Julio-1989

Terremoto de magnitud 3.0 (terremoto nº2 de la Tabla 4.1) ocurrido en la costa de Málaga con una profundidad de 95 km. (IGN). En 7 estaciones de la Red Sísmica Nacional las primeras llegadas corresponden a la onda P directa. Los registros utilizados para realizar la inversión se muestran en la Fig. 4.12, y en la Tabla 4.6 mediante su acimut, ángulo de incidencia en el foco, distancia epicentral y atenuación anelástica, para 95 km de profundidad (IGN). La cobertura acimutal de la esfera focal no es buena, (la mitad de la misma queda vacía), y sólo está disponible una dilatación.

**Tabla 4.6** . Estaciones utilizadas para realizar la inversión. Terremoto del 19-Julio-1989.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)	atenuación anelástica (Q)
epru	118	43	81	300
ehor	151	62	151	600
epla	159	82	409	600
gud	183	83	448	600
eban	199	67	180	600
evia	217	76	281	600
afc	229	52	105	250

Se ha utilizado una longitud de registro de 0.21s de las señales para realizar las inversiones. Éstas se han realizado a distintas profundidades 50-150 km, con un intervalo de profundidad de 5 km para el rango 65-100km y 15km entre 100-150km. El intervalo de 5 km. se ha utilizado debido al cambio de polaridades que se produce en GUD y EVIA, dependiendo de la solución obtenida para cada profundidad, y para poder ajustar mejor la profundidad.

Al realizar las inversiones se han utilizado las siete estaciones se han obtenido las componentes del tensor momento sísmico según se muestra en la Fig. 4.13, dichas componentes obtenidas no son muy similares entre si. Sin embargo, al eliminar la estación EBAN, la inversión realizada muestra que las componentes del tensor momento sísmico se asemejan más entre si (Fig. 4.14). Esto puede ser debido a que EBAN es una estación con un elevado contenido en altas frecuencias debido a efectos locales no atribuibles a la fuente, de tal forma que su presencia "contamina" la inversión. Por lo tanto, dicha estación se ha eliminado del proceso de inversión. Las componentes del tensor momento sísmico que más varían con la profundidad son  $m_{11}$ , y  $m_{22}$ , mientras que el resto permanece bastante estable.

19 Julio 1989

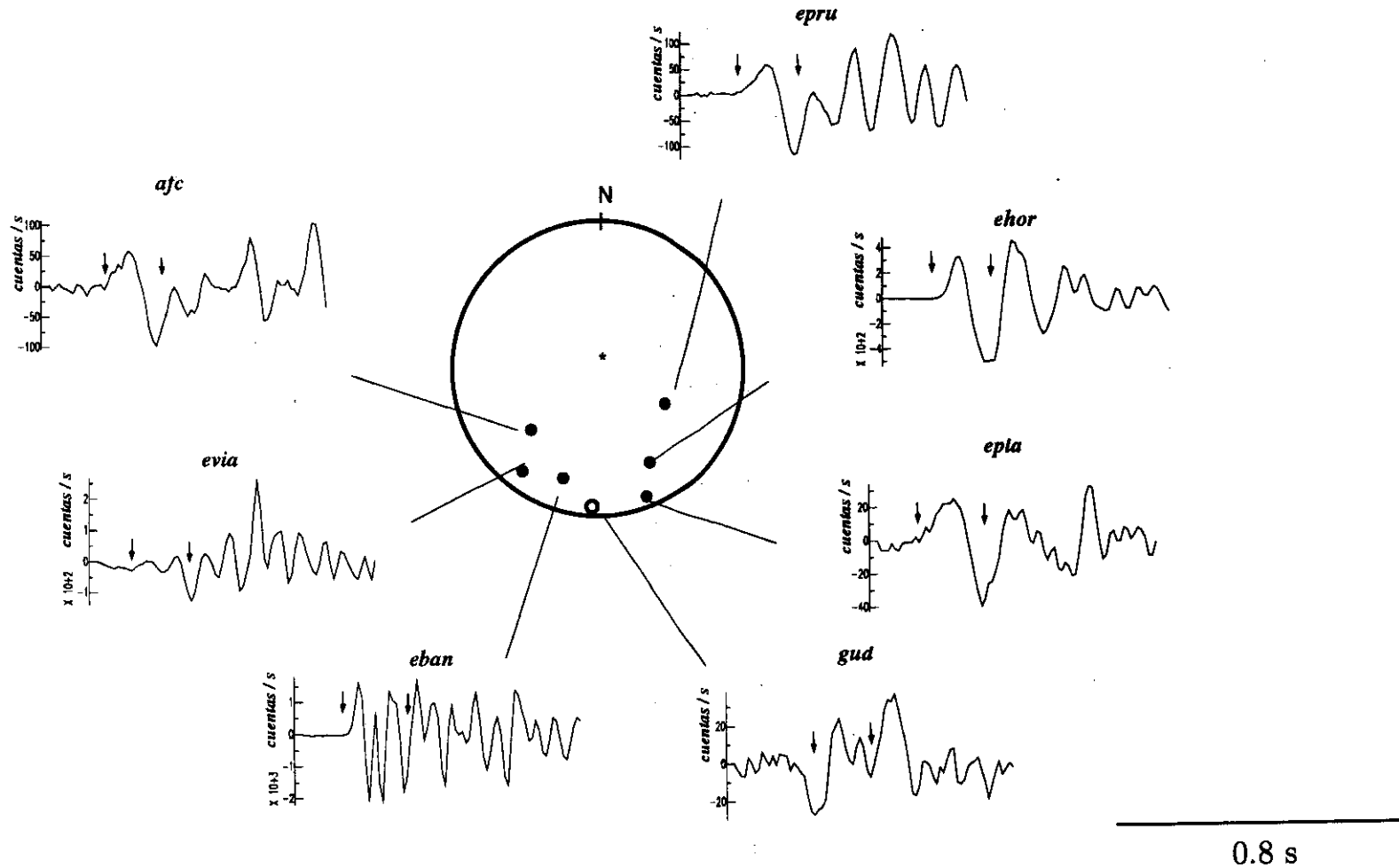


Fig. 4.12. Terremoto 19-Julio-1989. Sismogramas utilizados en la inversión. Los círculos blancos representan dilataciones y los negros compresiones. La escala horizontal (tiempo) es de 0.8s e igual en todas las estaciones. La escala vertical viene dada en cuentas/s. Las flechas indican la longitud de registro elegida para la inversión.

# 19 Julio 1987 (con eban)

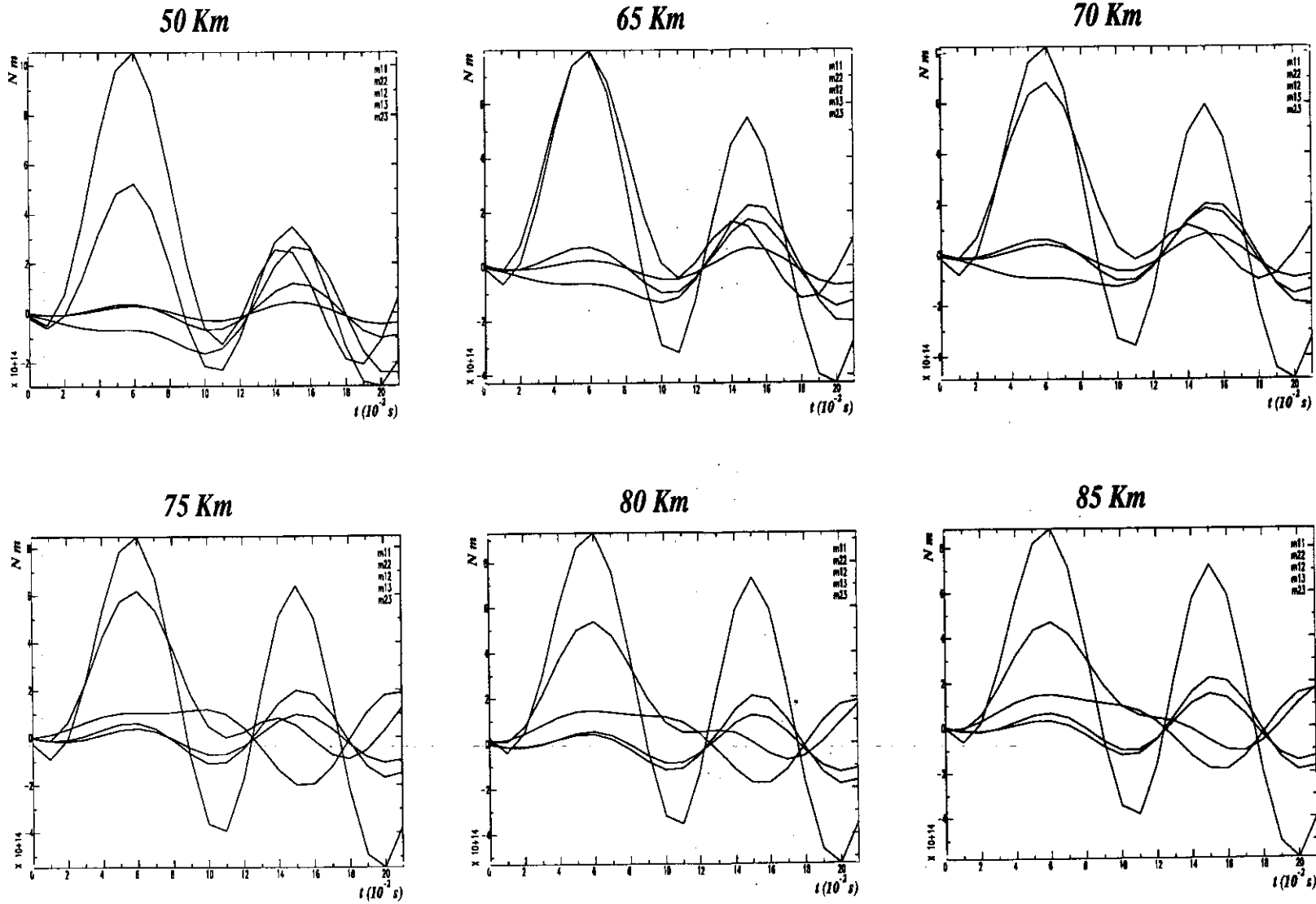


Fig. 4.13. Terremoto 19-Julio-1989. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas utilizando 7 estaciones.

# 19 Julio 1987 (con eban)

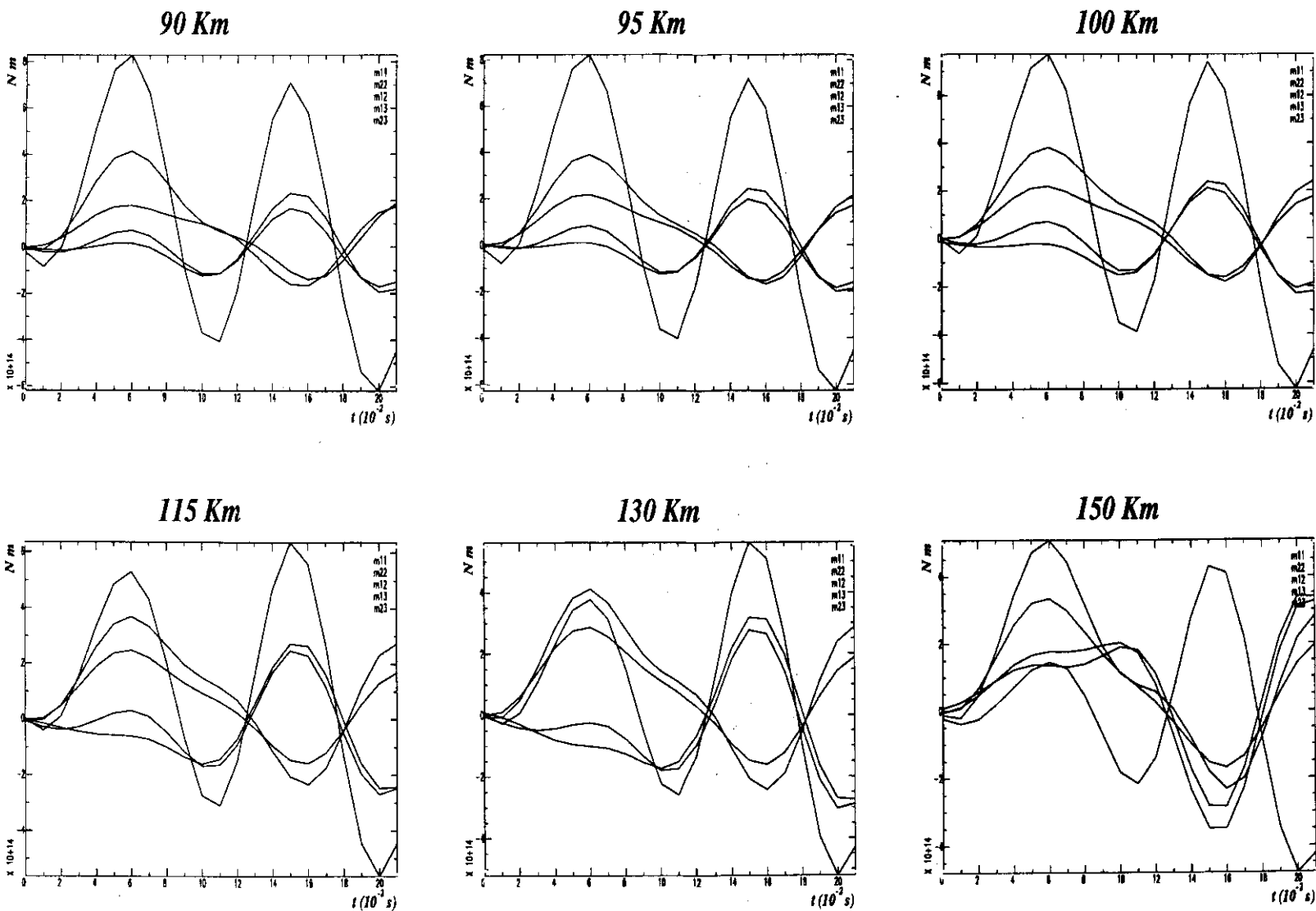


Fig. 4.13. Terremoto 19-Julio-1989. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas utilizando 7 estaciones.

# 19 Julio 1987 (sin eban)

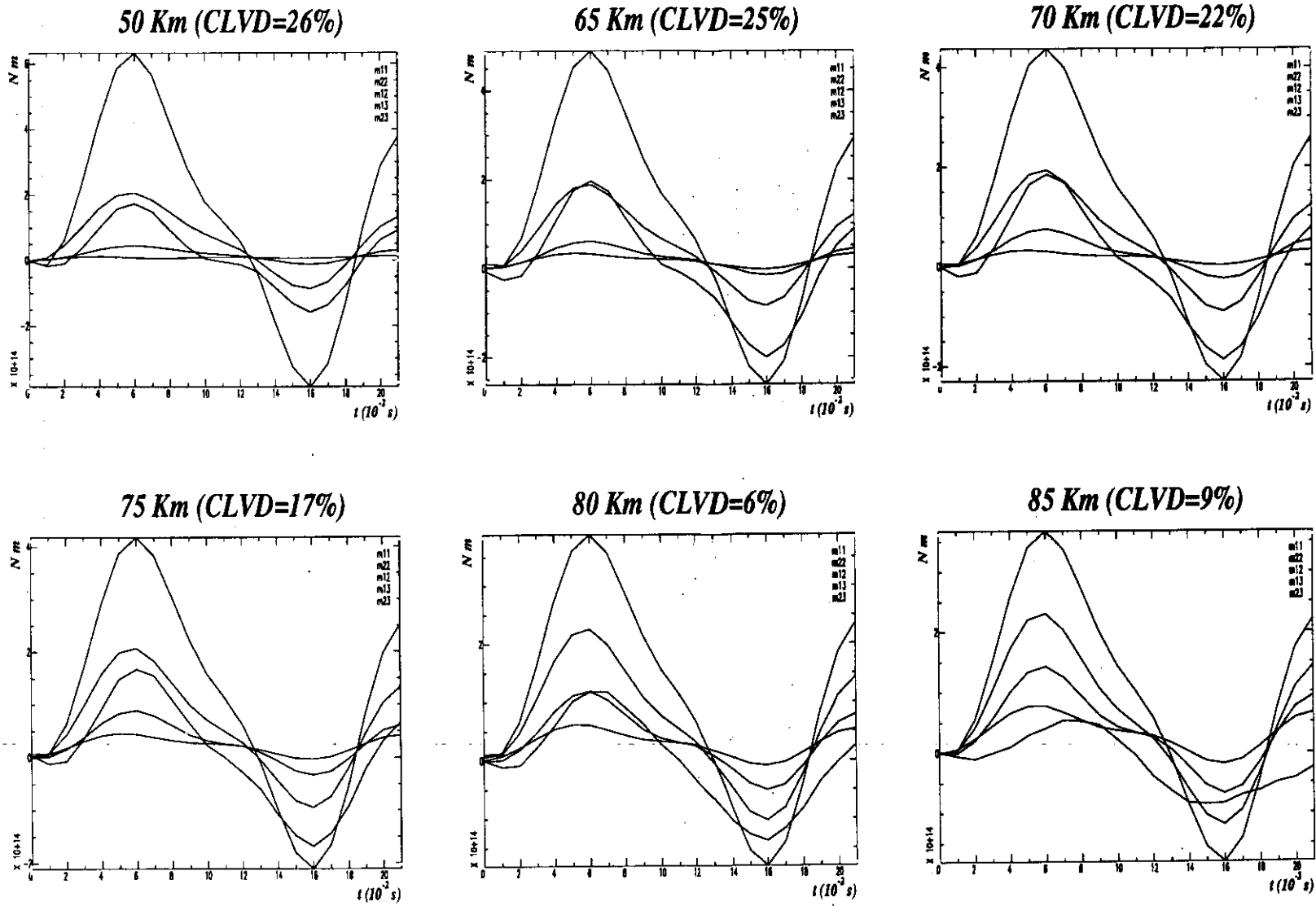


Fig. 4.14. Terremoto 19-Julio-1989. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas utilizando 6 estaciones.

# 19 Julio 1987 (sin eban)

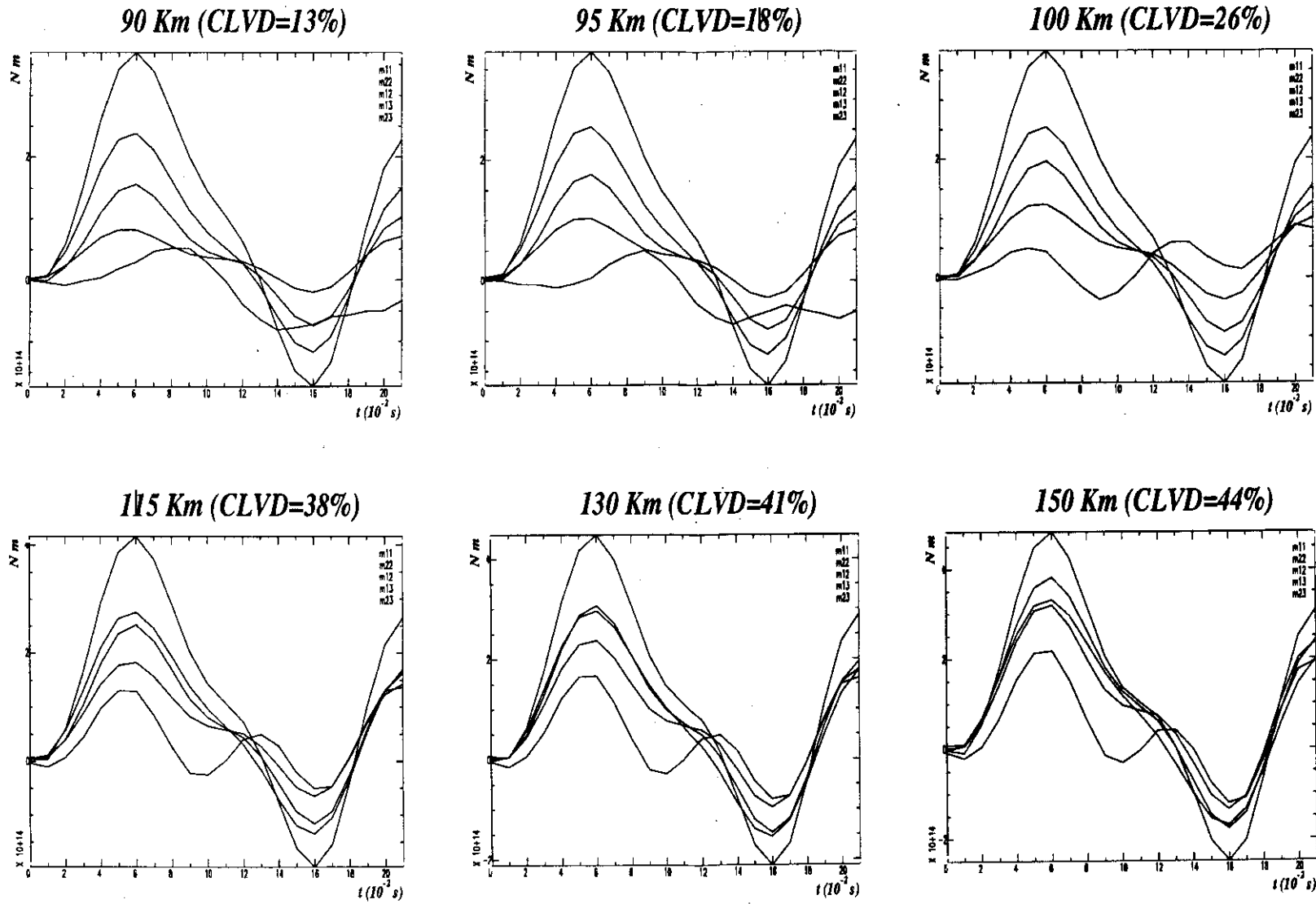


Fig. 4.14. Terremoto 19-Julio-1989. Componentes del tensor momento sísmico obtenidas utilizando 6 estaciones.

Al representar todas las componentes del tensor momento sísmico juntas (Fig. 4.14.), se observa que la amplitud máxima de dichas componentes para los primeros 0.21 s de señal, se encuentra en el  $t=0.06$  s, cuyos valores se han representado en la Tabla 4.7. A partir del valor de la máxima amplitud de dichas componentes se ha calculado el mecanismo focal que se muestra en la Tabla 4.8: la parte de doble par se representa mediante los ejes de esfuerzos (T, P), momento sísmico escalar y la de no doble par mediante el porcentaje de CLVD.

**Tabla 4.7.** Componentes del tensor momento sísmico del terremoto 19-Julio-1989 obtenidas tras la inversión.

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t) (s)
50	-0.027±0.05	-1.61±0.29	-0.33±0.07	-5.33±0.35	-1.52±0.16	27±10	0.10-0.16
65	-0.22±0.07	-1.10±0.43	-0.44±0.11	-3.99±0.23	-1.39±0.14	26±6	0.10-0.16
70	-0.18±0.08	-1.85±0.46	-0.56±0.11	-3.57±0.19	-1.43±0.14	22±4	0.10-0.16
75	-0.29±0.08	-1.67±0.49	-0.67±0.12	-3.38±0.16	-1.52±0.14	17±5	0.10-0.16
80	-0.41±0.09	-1.31±0.52	-0.91±0.14	-3.08±0.12	-1.65±0.13	6±1	0.10-0.16
85	-0.55±0.10	-0.67±0.54	-1.11±0.13	-2.98±0.11	-1.76±0.13	9±5	0.10-0.16
90	-0.57±0.12	-0.58±0.55	-1.22±0.13	-2.95±0.10	-1.79±0.14	13±6	0.10-0.16
95	-0.73±0.13	-0.36±0.57	-1.35±0.14	-2.99±0.11	-1.90±0.14	18±5	0.10-0.16
100	-0.88±0.14	0.036±0.57	-1.51±0.15	-3.03±0.12	-1.94±0.15	26±8	0.10-0.16
115	-1.33±0.18	0.76±0.58	-1.92±0.18	-3.26±0.18	-2.06±0.17	38±9	0.10-0.16
130	-1.78±0.22	1.10±0.62	-2.37±0.21	-3.49±0.23	-2.26±0.19	41±10	0.10-0.16
150	-2.40±0.28	1.87±0.65	-2.92±0.25	-3.84±0.28	-2.52±0.22	44±8	0.10-0.16

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

Dichas soluciones se han representado sobre la esfera focal utilizando los planos nodales de la parte de doble par, las superficies nodales el CLVD y las estaciones en la Fig. 4.15. A partir de los tiempos de corte de las diferentes componentes se pueden observar dos posibles funciones temporales para este evento con una duración de 0.10s ó 0.16s.

**Tabla 4.8.** Parámetros focales del terremoto 19-Julio-1989 obtenidos tras la inversión

h (km)	eje de Tensión ( $\theta$ , $\phi$ )	eje de Presión ( $\theta$ , $\phi$ )	Mo <sup>(*)</sup>	score CLVD	score DC	rms f(t)=0.10s	rms f(t)=0.16s
50	40±2 176±0	50±0 4±0	5.41±0.12	100	100	0.547	0.556
65	36±1 192±1	57±0 40±0	5.33±0.29	86	86	0.546	0.555
70	36±1 193±1	58±0 43±0	4.25±0.19	86	86	0.545	0.557
75	35±1 194±0	59±0 43±0	4.14±0.15	86	86	0.544	0.557
80	34±1 197±1	58±0 43±0	3.92±0.19	100	100	0.352	0.514
85	35 ±1 200±0	56 ±0 38±1	3.77±0.22	86	86	0.418	0.515
90	35±1 201±0	57 ±0 38 ±1	3.76±0.23	86	86	0.418	0.516
95	34±1 204±0	57±0 37±0	3.86±0.38	86	86	0.419	0.517
100	34±1 207±0	56±0 35±1	3.87±0.38	86	86	0.419	0.518
115	35±1 218±0	56±0 31±0	4.15±0.42	100	86	0.354	0.519
130	35±1 232±0	57±0 31±0	4.59±0.49	100	86	0.355	0.522
150	52±1 269±0	58±0 29±0	5.28±0.62	100	72	0.365	0.524

(\*) multiplicado por 10<sup>14</sup> expresado en Nm

El mecanismo focal obtenido en todas la inversiones realizadas es estable con la profundidad, cuya variación máxima para el eje T es de 15° para el ángulo que forma con la vertical, y 93° en el acimut, mientras que para el eje P la variación es de 9° y 40° respectivamente. Los casos que presentan un mecanismo focal diferente, son los correspondientes a profundidades de 50 km y 150 km, profundidades extremas del rango utilizando.

El momento sísmico escalar varía en las inversiones realizadas entre 3.76-5.41x10<sup>14</sup>Nm, obteniéndose los valores más elevados para 50km y 150 km.

El porcentaje de aciertos es mejor en todos las inversiones, cuando se utiliza el mecanismo focal de no doble par, y para 80 km es del 100% tanto para el mecanismo de doble par como de no doble par.

# 19 Julio 1989

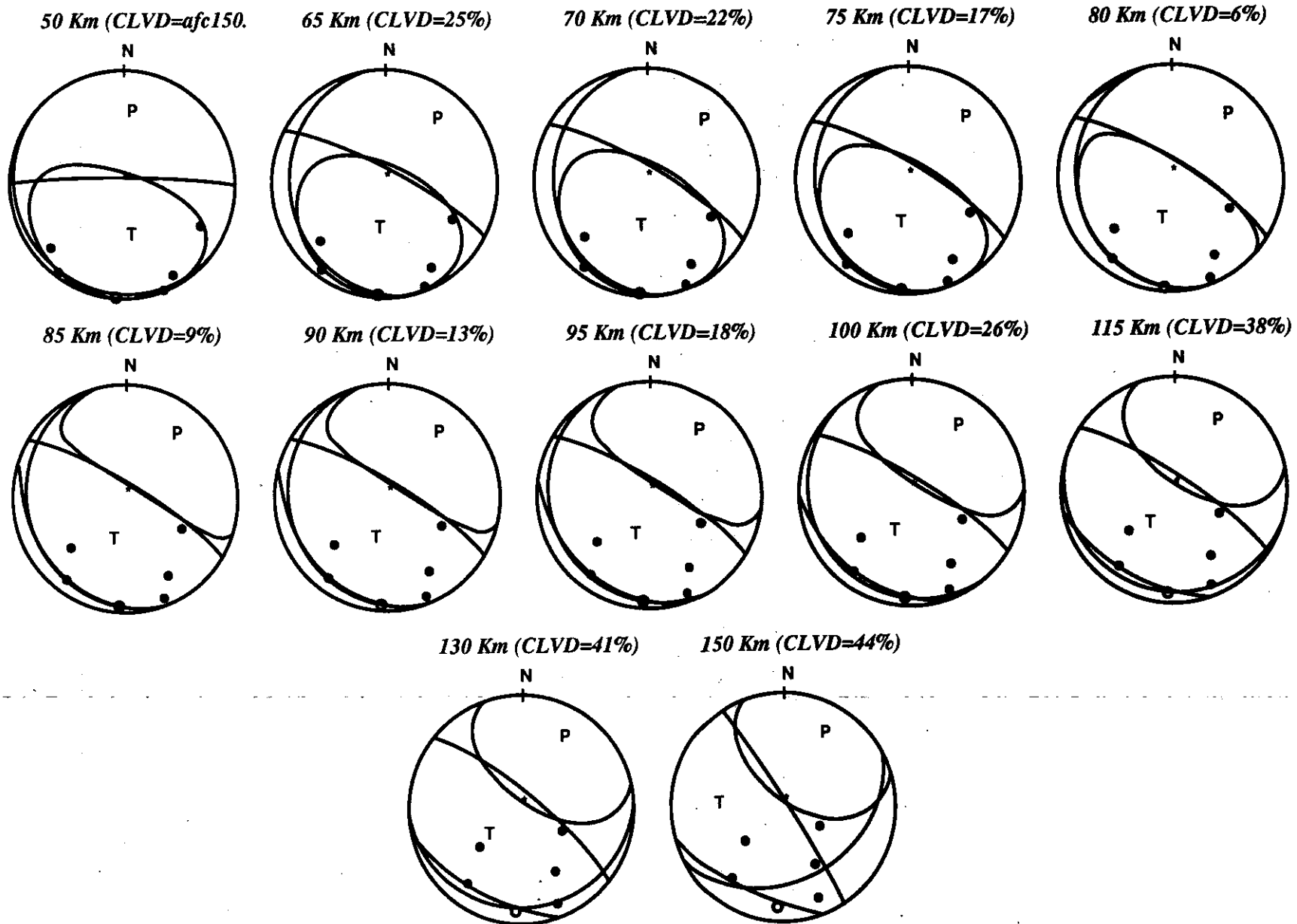


Fig. 4.15. Terremoto 19-Julio-1989. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión.

El porcentaje de CLVD obtenido en todas las inversiones, se han representado frente a la profundidad, según se muestra en la Fig. 4.16. El punto crítico se produce para una profundidad de 80 km. con un 6% de CLVD, frente a la profundidad dada por el IGN de 95 km. con un 18% de CLVD.

Para estudiar la precisión de la profundidad del terremoto, se ha calculado el rms para cada una de las estaciones y cada una de las soluciones obtenidas en las inversiones realizadas. Para calcular dicho rms, se han construido los sismogramas teóricos para cada estación, utilizando ambas funciones temporales y se ha calculado el error cuadrático medio existente entre el sismograma observado y el sintético. Dichos ajustes entre sismogramas observados y teóricos se muestran en las Fig A2.15-A2.26 del Anexo 2, para la función temporal de 0.10s de duración, y para la función temporal de 0.16s en las Fig. A2.27-A2.38, del Anexo 2.

En dichas figuras se observa que las estaciones más difíciles de ajustar son EVIA, y GUD, ya que dependiendo de la profundidad, la polaridad es la correcta o aparece invertida. AFC y EHOR son las que mejor se ajustan tanto en forma como en amplitud. Los ajustes que utilizan la función temporal de 0.16s, presentan un sismograma teórico demasiado ancho en general para todas las estaciones, salvo para EPLA, que queda mejor ajustada con esta función temporal.

Se ha representado en la Figura 4.17 del rms frente a la profundidad. Para el caso de la función temporal de 0.16s, la curva de rms presenta una forma casi lineal, aunque presenta un mínimo muy poco pronunciado a 80 km con un valor de 0.514. Las soluciones obtenidas utilizando la función temporal de 0.10s presentan un mínimo en 80 km pronunciado con un valor de 0.352, y otro mínimo menos acusado en 115 km. Puesto que el rms calcula el ajuste existente entre los sismogramas observados y los teóricos, debemos quedarnos con la solución que presente menor rms, ya que esto implica que los sismogramas teóricos se ajustan mejor a los observados. Esto se produce para la profundidad de 80 km utilizando la función temporal de 0.10s.

Uniendo las curvas de CLVD y rms representadas frente a la profundidad mostrados en las Fig. 4.16 y 4.17, se observa que presentan el punto crítico en la misma profundidad, a 80 km.

La solución obtenida con el método de inversión indica que este terremoto tiene el centroide situado a una profundidad de 80 km, representa un mecanismo focal vertical con los planos de falla en dirección NO-SE, y un porcentaje de CLVD del 6%, por lo tanto se puede decir que corresponde a un doble par. La función temporal es de 0.10s y el momento sísmico escalar es de  $3.92 \times 10^{14}$  Nm.

Comparando la solución obtenida para este terremoto con el caso teórico de mecanismo focal vertical con 0% de CLVD, se observa que las características de las soluciones para las diferentes profundidades son muy similares. La forma de las componentes del tensor momento sísmico en ambos casos es muy similar. El mecanismo focal no varía prácticamente con la profundidad, aunque para el terremoto del sur de España, el rango del porcentaje del CLVD varía entre 6-38%, frente a 0-4% para el referido caso teórico. En ambos casos, el CLVD obtenido para las diferentes profundidades presenta un punto crítico en la profundidad correcta, Fig. 3.42, y 4.16.

Si comparamos la solución obtenida para la profundidad del centroide de 80 km, con la obtenida en Buforn et al (1997) mostrada en la Tabla 4.2, se observa que es muy similar en la parte correspondiente a doble par del mecanismo focal, siendo la diferencia mayor entre los ejes de esfuerzos de  $15^\circ$ . El momento sísmico escalar también es similar  $3.92 \times 10^{14}$  Nm frente a  $1.5 \times 10^{14}$  Nm en el caso de la modelización. Sin embargo, la función temporal muestra discrepancias entre los dos métodos, ya que para la inversión es de 0.10s y para la modelización es de 0.16s, aunque la diferencia no es importante. Esto puede ser debido a que la profundidad obtenida para el centroide mediante la inversión es de 80 km frente a los 95 km (IGN) del hipocentro utilizados en el método de la modelización.

### 19 Julio 1989

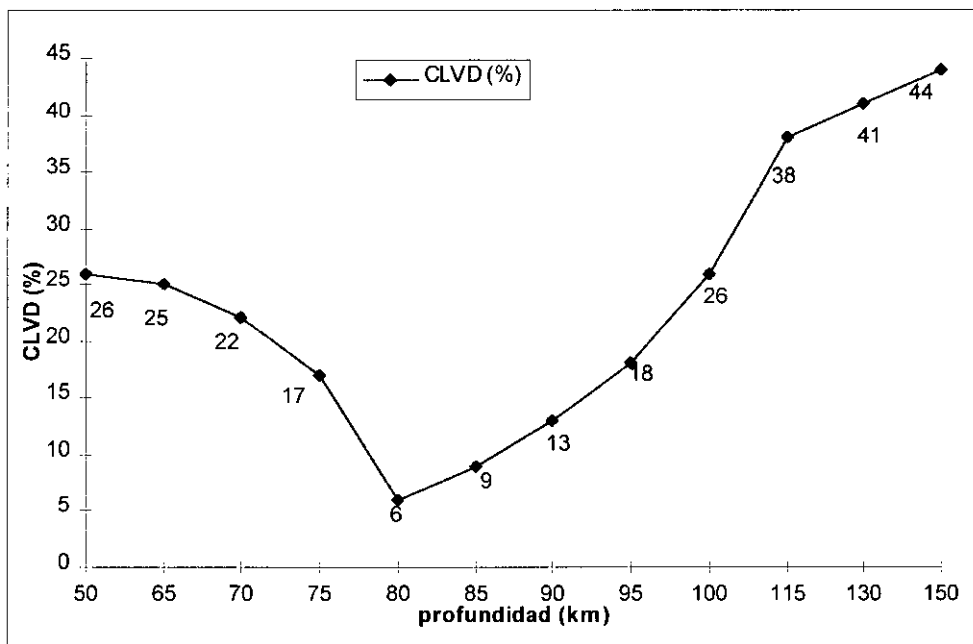


Fig. 4.16. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

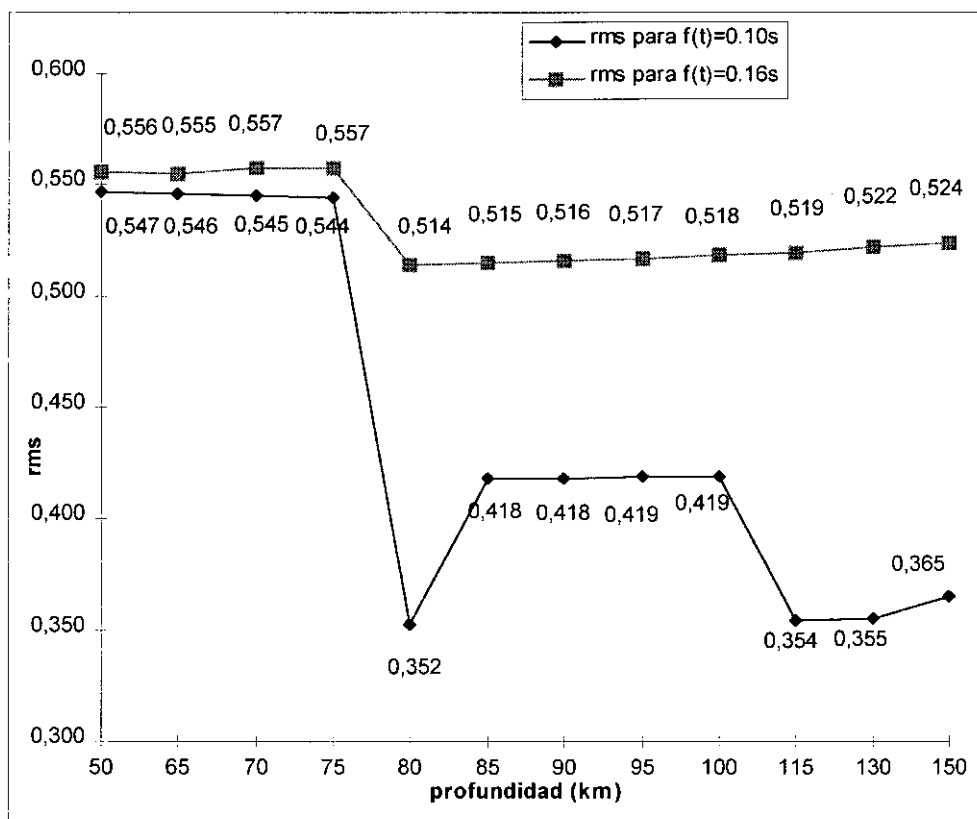


Fig. 4.17. RMS obtenido, frente a la profundidad.

### Málaga, 6-Febrero-1990

Terremoto de profundidad intermedia situado a 68 km. y magnitud 3.4 (I.G.N., sismo nº 3 de la Tabla 4.1), cuyo epicentro está muy próximo al terremoto estudiado anteriormente. En 9 de las estaciones de la Red Sísmica Nacional donde fue registrado, la primera llegada corresponde a la onda P directa.

Los registros utilizados en la inversión se han representado sobre la esfera focal y se muestran en la Fig. 4.18. Se observa que cubren la mitad de la esfera focal, y sólo existen dilataciones. En la Tabla 4.9 se muestran las estaciones utilizadas par la inversión.

**Tabla 4.9.** Estaciones utilizadas en la inversión. Terremoto 6-Febrero-1990.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral	atenuación anelástica (Q)
eval	120	79	229	400
epru	124	54	79	50
ehor	155	73	155	150
epla	161	86	413	600
eban	200	76	189	600
etor	204	88	519	600
evia	218	82	290	600
eche	235	87	457	400
afc	228	65	114	500

Se ha utilizado como ventana de tiempo para la inversión los primeros 0.20s de señal. Se han realizado inversiones para un rango de profundidades entre 38-98 km que incluye la profundidad dada por el IGN (68 km), con un intervalo de profundidad de 10 km. y se han obtenido las componentes del tensor momento sísmico que se muestran en la Fig. 4.19. A partir de las soluciones obtenidas, y con el fin de ajustar mejor la profundidad, se realizaron inversiones cercanas a la profundidad dada por el IGN de  $\pm 2$  y  $\pm 5$ km. En la Fig. 4.19, se puede apreciar que todas las componentes del tensor momento sísmico son similares entre sí salvo la componente  $m_{22}$  es muy diferente del resto. La amplitud máxima de las componentes en los primeros 0.20s de señal, se encuentra en el tiempo 0.06s y sus valores se muestran en la Tabla 4.10. De la observación de la figura anterior, a partir de los puntos de corte en todas las componentes del tensor momento sísmico, se deduce una posible función temporal para este terremoto de 0.10s.

6 Febrero 1990

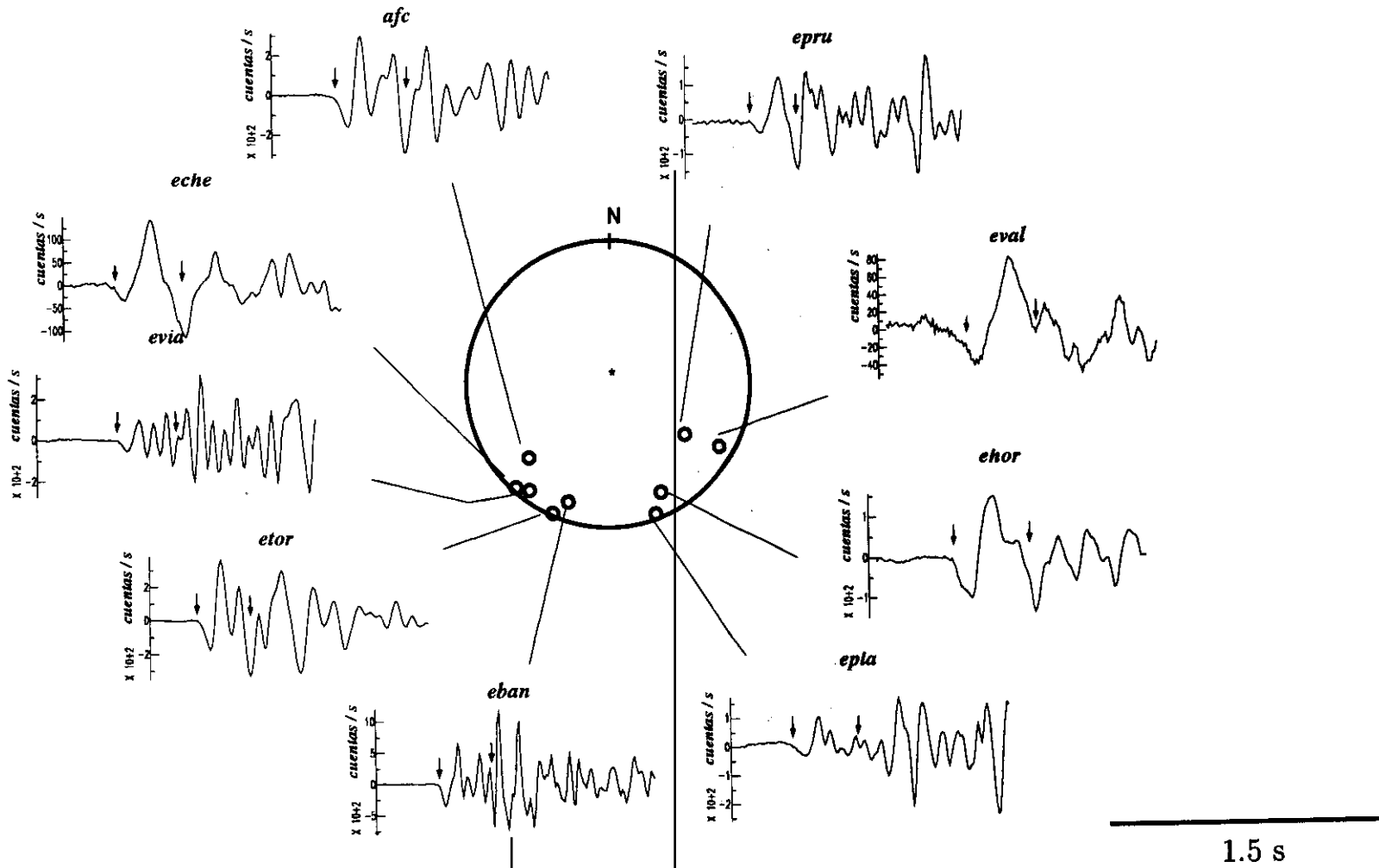


Fig. 4.18. Terremoto 6-Febrero-1990. Sismogramas utilizados en la inversión. Los círculos blancos representan dilataciones. La escala horizontal (tiempo) es de 1.5s e igual en todas las estaciones. La escala vertical viene dada en cuentas/s. Las flechas indican la longitud de registro elegida para la inversión.

# 6 Febrero 1990

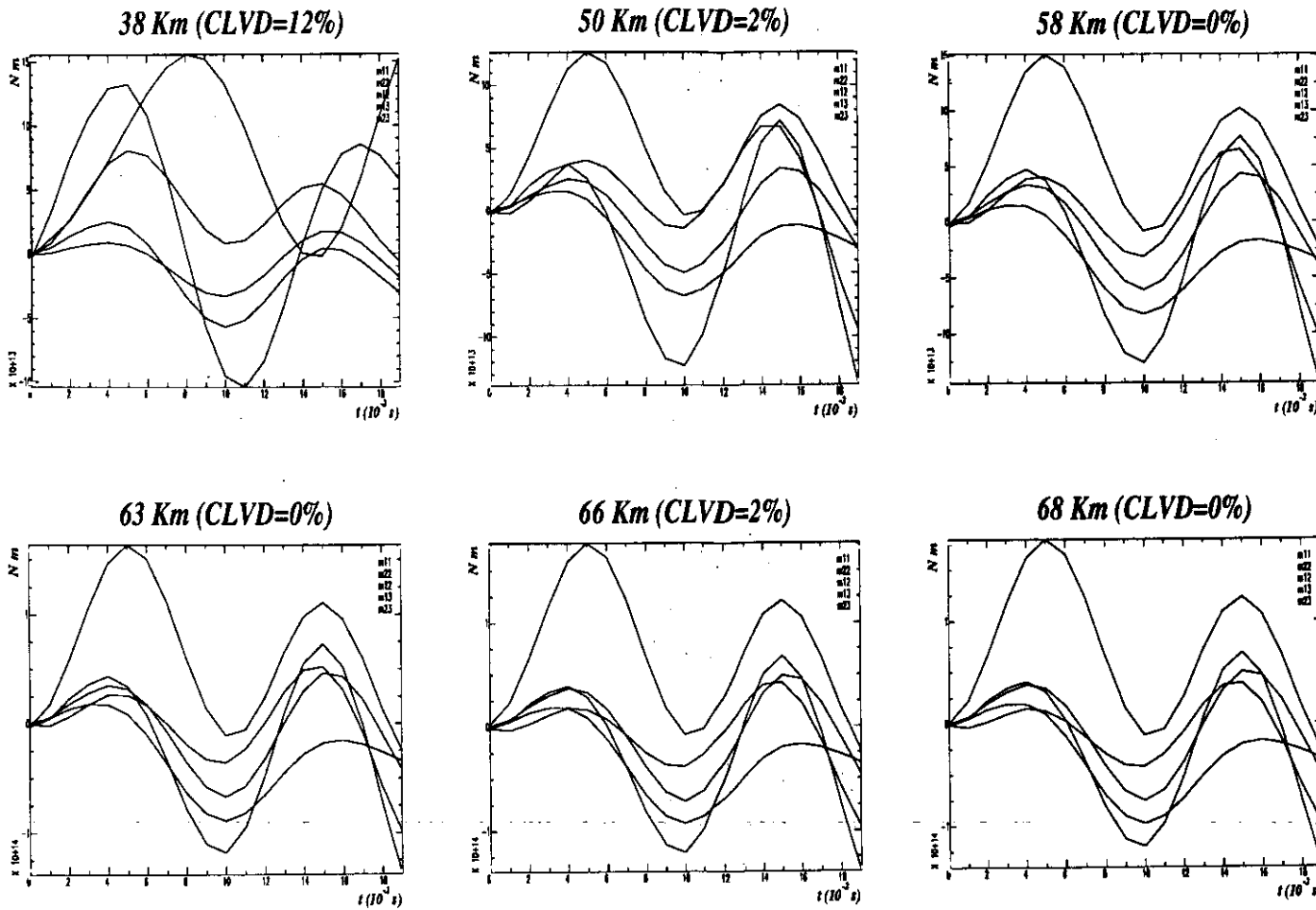


Fig. 4.19. Terremoto 6-Febrero-1990. Componentes del tensor momento sísmico.

# 6 Febrero 1990

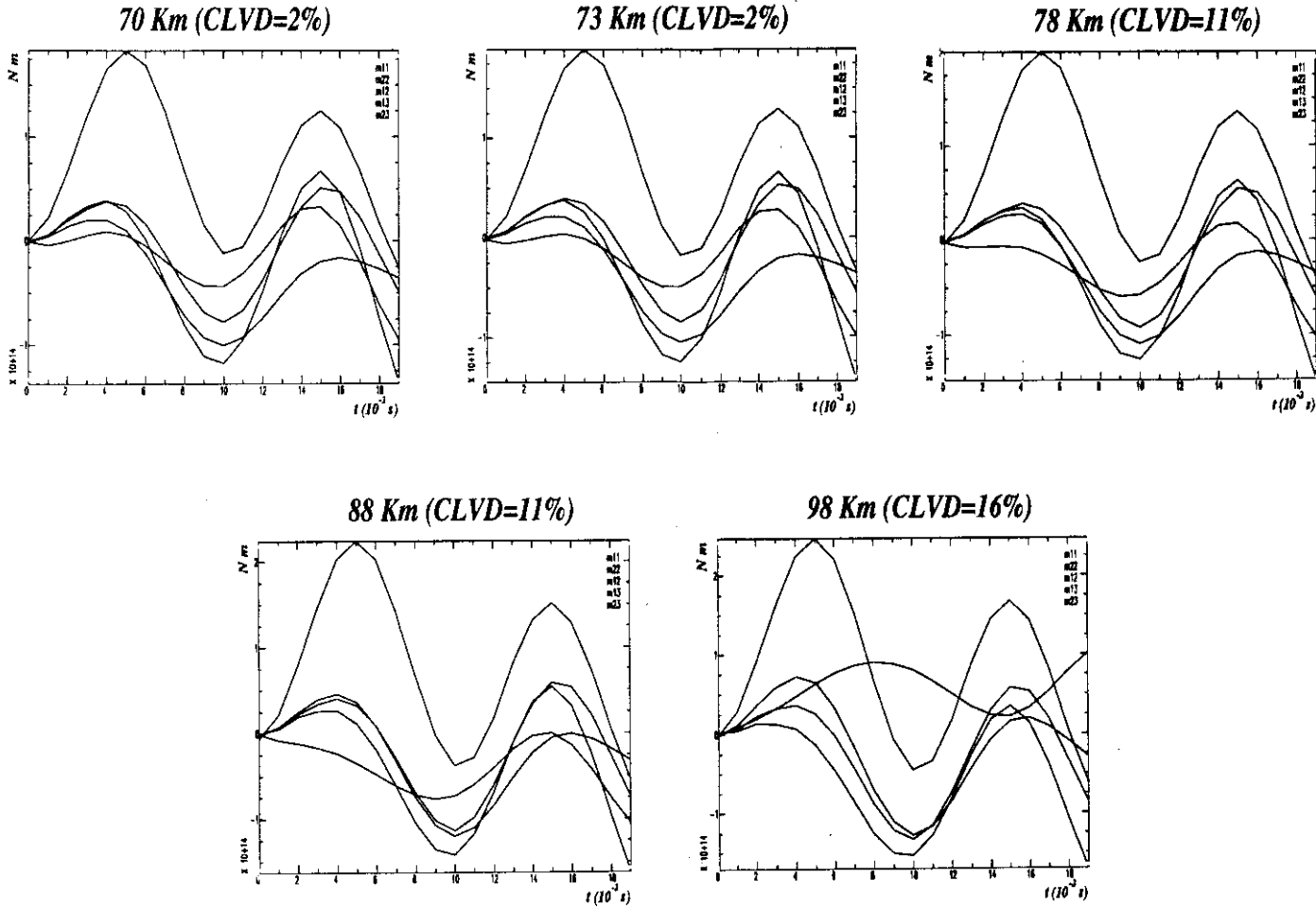


Fig. 4.19. Terremoto 6-Febrero-1990. Componentes del tensor momento sísmico.

**Tabla 4.10.** Tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD y función temporal, del terremoto del 6-Febrero-1990 obtenidos tras la inversión

h (km)	$M_{11}^{(*)}$	$M_{22}^{(*)}$	$M_{12}^{(*)}$	$M_{13}^{(*)}$	$M_{23}^{(*)}$	CLVD (%)	f(t) (s)
38	-1.82±0.04	0.39±0.05	-0.05±0.03	0.58±0.29	0.34±0.22	12±4	0.10
50	-0.96±0.05	0.008±0.07	1.29±0.03	-0.26±0.13	-0.006±0.11	2±4	0.10
58	-1.14±0.05	-0.02±0.08	-0.17±0.04	-0.25±0.12	-0.12±0.11	0±4	0.10
63	-1.23±0.06	-0.01±0.09	-0.17±0.04	-0.15±0.10	-0.09±0.10	0±7	0.10
66	-1.29±0.06	-0.01±0.10	-0.16±0.05	-0.08±0.09	-0.04±0.10	2±3	0.10
68	-1.33±0.07	-0.01±0.10	-0.17±0.05	0.50±0.10	-0.06±0.10	0±2	0.10
70	-1.36±0.07	0.001±0.11	-0.17±0.05	0.02±0.10	-0.04±0.10	2±6	0.10
73	-1.42±0.07	0.01±0.11	-0.17±0.05	0.06±0.10	-0.01±0.10	2±3	0.10
78	-1.50±0.08	0.16±0.12	-0.16±0.05	0.17±0.10	-0.10±0.10	11±4	0.10
88	-1.69±0.09	0.19±0.15	-0.13±0.06	0.34±0.10	0.12±0.11	11±4	0.10
98	-1.81±0.10	0.40±0.17	-0.05±0.07	0.58±0.10	0.34±0.11	16±3	0.10

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 4.11.** Parámetros focales del terremoto 6-Febrero-1990 obtenidos tras la inversión

h (km)	eje de Tensión ( $\theta, \phi$ )	eje de Presión ( $\theta, \phi$ )	$M_0^{(*)}$	score CLVD	score DC	rms
38	39±0 56±1	54±0 209±1	1.57±0.06	89	78	0,403
50	8±0 175±4	83±3 7±1	1.06±0.06	89	89	0.407
58	8±0 218±0	84±0 9±0	1.19±0.06	89	89	0.395
63	5±0 230±0	87±0 8±0	1.26±0.07	89	89	0.407
66	2±1 222±0	88±0 7±0	1.31±0.06	89	89	0.407
68	11±0 341±0	80±0 187±0	1.43±0.10	100	100	0.303
70	2±1 284±2	90±0 187±0	1.37±0.19	89	89	0.409
73	1±0 330±0	89±0 187±0	1.42±0.11	89	89	0.407
78	6±1 305±0	87±0 185±0	1.44±0.10	89	89	0.306
88	7±0 40±0	84±0 184±0	1.64±0.12	89	89	0.395
98	18±0 59±0	80±0 183±0	1.76±0.13	89	89	0.475

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

A partir de estos valores de las máximas amplitudes del tensor momento sísmico, se ha calculado la descomposición espectral del tensor momento sísmico, para la parte de doble par se han obtenido los ejes de esfuerzos, el momento sísmico escalar ( $M_0$ ), y el porcentaje de CLVD, que se muestran en la Tabla 4.11. Los errores calculados para el mecanismo focal ejes T, P,  $M_0$ , CLVD son pequeños, no superando en ningún caso el 10% del valor calculado.

Los ejes de esfuerzos obtenidos en cada una de las inversiones que se muestra en las Tablas 4.10 y 4.11, y se ha representado en la Fig. 4.20 mediante los planos de falla (DC), y las superficies nodales (de CLVD) y las estaciones sobre la esfera focal. El mecanismo focal obtenido en todas las inversiones es bastante estable, es un mecanismo focal inverso con los planos de falla en dirección E-O. El eje de T varía hasta  $19^\circ$  para el ángulo que forma con la vertical y  $90^\circ$  para el acimut, mientras que el eje P varía  $20^\circ$  y gira  $180^\circ$ , respectivamente. Las soluciones que más se alejan es la obtenida utilizando 38 km de profundidad (extremo del intervalo de profundidad elegido), que está en el límite de considerar el terremoto como de profundidad intermedia y además algunas estaciones ya no son rayos directos.

Debido a que durante la aplicación del método la profundidad permanece fija, se han calculado para todas las inversiones realizadas, los errores cuadráticos medios existentes entre sismogramas observados y sintéticos, con el fin de ajustar la profundidad del terremoto. Para ello se han construido los sismogramas sintéticos a partir las soluciones obtenidas en la inversión y se han creado los ajusten entre sismogramas observados y teóricos, que se han representado en las Fig. A2.39-A2.49 del Anexo 2. Los valores numéricos de dichos ajusten se muestran en la Tabla 4.11. Las estaciones que peor ajustan son EPRU, ya que depende mucho del tipo de mecanismo y su polaridad puede estar invertida, y ETOR ya que la duración de su primera llegada es menor que la teórica.

El error obtenido en estos ajustes, se ha representado frente a la profundidad en la Fig. 4.22, y como se observa el mínimo del error se encuentra a 68 km de profundidad con un valor de 0.303, ya que en el resto de las profundidades EPRU aparece cambiada de polaridad lo cual afecta negativamente al error. Debido a que el mejor ajuste entre sismogramas observados y teóricos se produce a 68 km y los ajustes realizados para 66 km y 70 km, son peores, se puede afirmar que la profundidad de 68 km. es la correspondiente al mejor ajuste del tensor momento sísmico.

Se ha representado también el porcentaje de CLVD obtenido en cada inversión frente a la profundidad en la Fig. 4.21. El punto crítico se obtiene a 68 km con un 0% de CLVD. Sin embargo, existe un amplio rango de profundidades entre 50 y 73 km, en el que el sismo es claramente un doble par ya que su porcentaje de CLVD varía entre 0% y 2%.

Observando conjuntamente ambas figuras anteriores, la forma de CLVD y rms en las Fig. 4.21 y 4.22, se observa que el punto crítico se produce para ambas variables a 68 km.

La solución obtenida tras la inversión indica que el terremoto presenta la profundidad del centroide a 68 km de profundidad, ajustando hasta 2 km la precisión de la misma, presenta un mecanismo focal de doble par (CLVD=0%), con movimiento inverso con planos de falla en dirección E-O, y la duración temporal de la fuente sísmica es de 0.10s.

Si se compara esta solución con la obtenida por el método de modelización Buforn et al (1997), (Tabla 4.2) se observa que es muy semejante, ya que los planos nodales tienen la misma dirección, aunque el buzamiento no es exactamente el mismo. Las diferencias pueden deberse a que en el caso de la modelización los planos de falla utilizados para modelar se calcularon utilizando 12 estaciones (incluyendo ejif, la única compresión existente) mientras que en la inversión sólo se utilizaron 9. Ejif se eliminó ya que su registro es muy ruidoso, a pesar de que por ser la única compresión los planos nodales quedan más constreñidos y por lo tanto la solución puede variar. La función temporal de la fuente es de 0.10s de duración, y también coincide con la obtenida en la modelización. Sin embargo, existe una discrepancia en el momento sísmico escalar que para el método de inversión es de  $1.43 \times 10^{14}$  Nm frente a  $0.7 \times 10^{14}$  Nm del método de la modelización. La profundidad de 68 km. coincide con la calculada por el IGN.

# 6 Febrero 1990

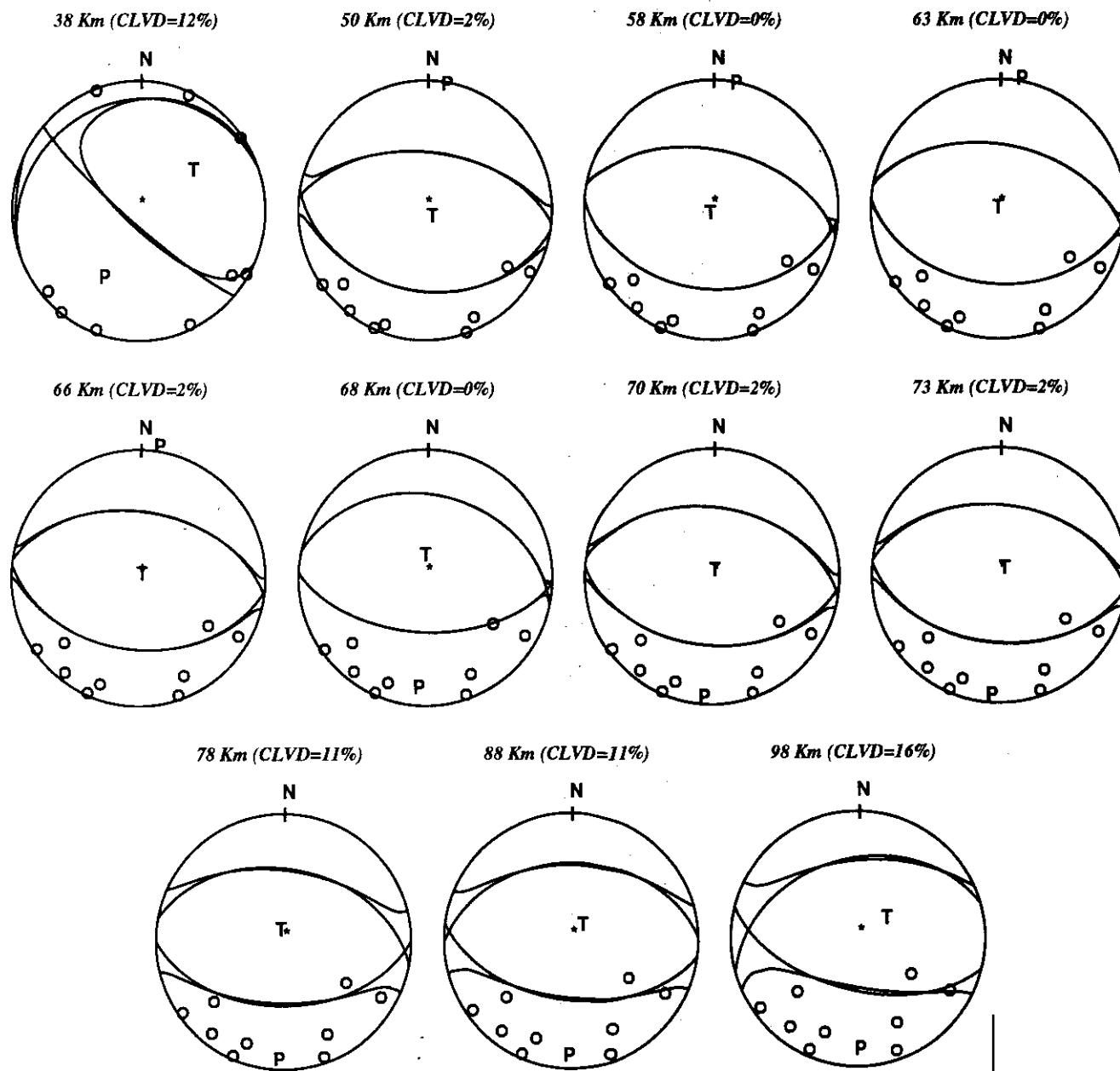


Fig. 4.20. Terremoto 6-Febrero-1990. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión.

6 Febrero 1990

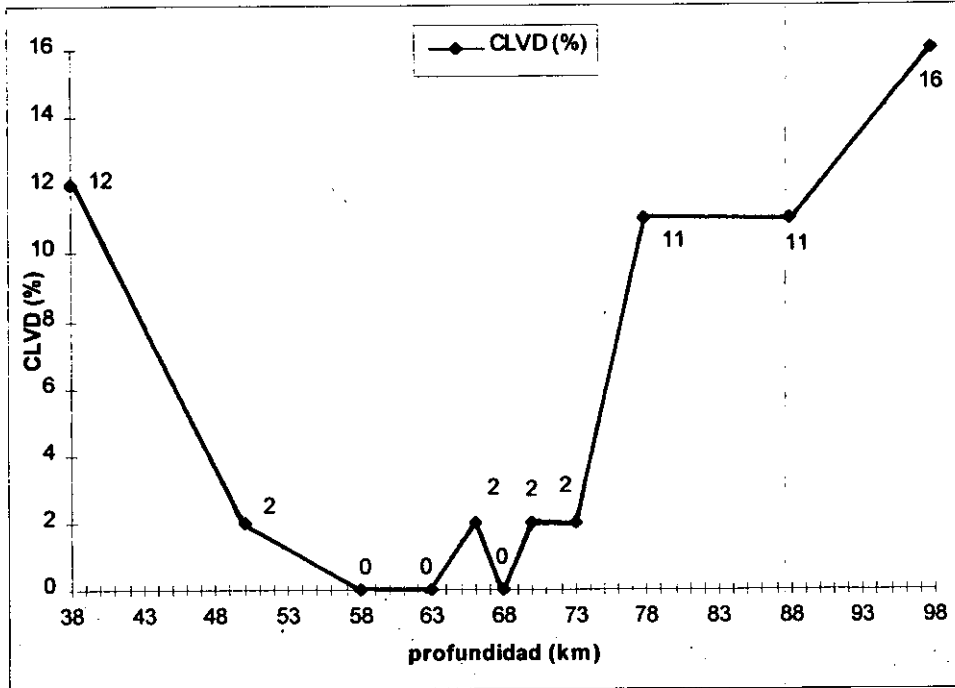


Fig. 4.21. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

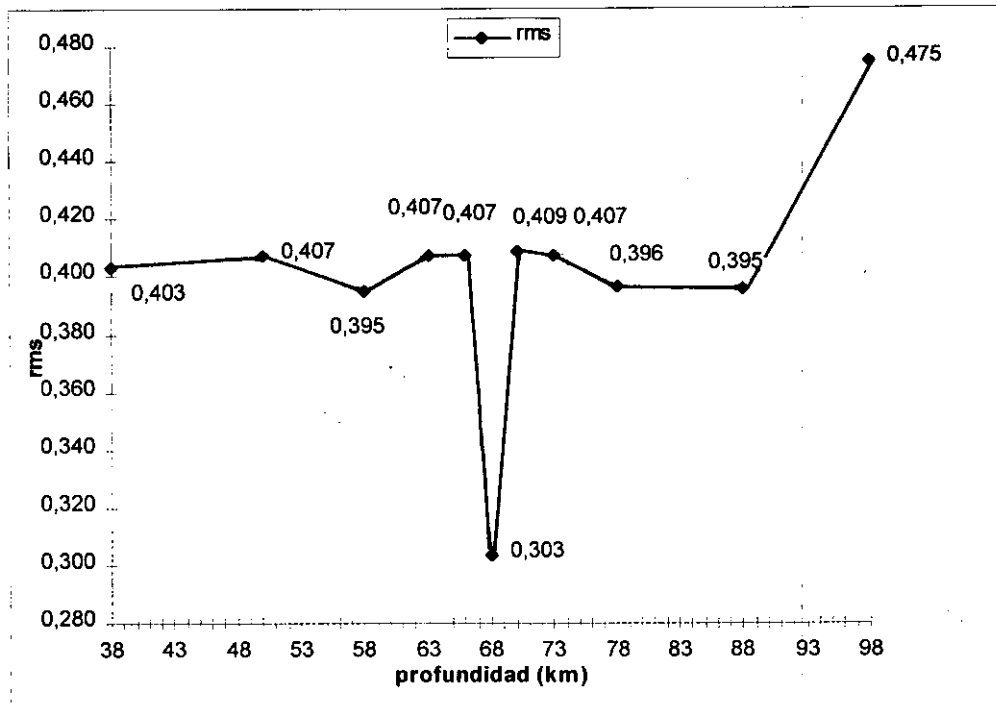


Fig. 4.22. RMS obtenido, frente a la profundidad.

### Málaga, 14-Marzo-1992

Terremoto de magnitud 3.6 (terremoto nº 5, de la Tabla 4.1 y Fig. 4.1) cuyo epicentro está situado en la costa de Málaga con un profundidad de 64 km según el IGN. En 10 estaciones de la Red Sísmica Nacional donde se registró, la primera llegada corresponde a la onda P directa. Este terremoto no ha sido modelado con anterioridad a diferencia de los otros sismos seleccionados. A fin de conocer los valores de la atenuación anelástica, se hizo una primera modelización del mismo.

En la Fig. 4.23 se muestran los registros de las estaciones utilizadas en la inversión sobre la esfera focal, que cubren en sus tres cuartas partes. La localización de dichas estaciones se muestra en la Tabla 4.12, con su acimut, ángulo de incidencia en el foco, la distancia epicentral, y la atenuación anelástica.

**Tabla 4.12.** Estaciones utilizadas en la inversión. Terremoto 14-Marzo-1992.

Estación	Acimut (°)	Angulo de incidencia en el foco (°)	Distancia epicentral (km)	Atenuación anelástica (Q)
eval	120	81	238	500
epru	125	60	87	200
eluj	187	68	117	200
eban	197	78	192	600
evia	216	83	291	500
ecog	222	67	114	200
ehue	229	80	218	600
egua	246	59	85	200
enij	256	79	205	500
emel	316	78	190	600

La ventana de tiempo utilizada para realizar la inversión corresponde a los primeros 0.20s de las señales. Para comprobar la profundidad del sismo, se han realizado diversas inversiones utilizando diferentes profundidades entre 44-104 km (rango que comprende la profundidad dada por el IGN para este terremoto) con un intervalo de profundidad de 10 km. A partir de los resultados obtenidos, y para ajustar la profundidad del terremoto, se realizaron inversiones de  $\pm 2$  km respecto a la profundidad dada por el IGN. Se han obtenido las componentes del tensor momento sísmico, que se han representado en la Fig. 4.24. Las componentes  $m_{22}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ , obtenidas son muy similares entre sí, mientras que el resto son diferentes. La posible función temporal del terremoto es de 0.07s. (punto de corte entre las 5 componentes) y no se ha considerado otra posible función temporal a la vista de la figura anterior, ya que la única función posible sería múltiple y en los registros originales no se observa una primera llegada múltiple.

14 Marzo 1992

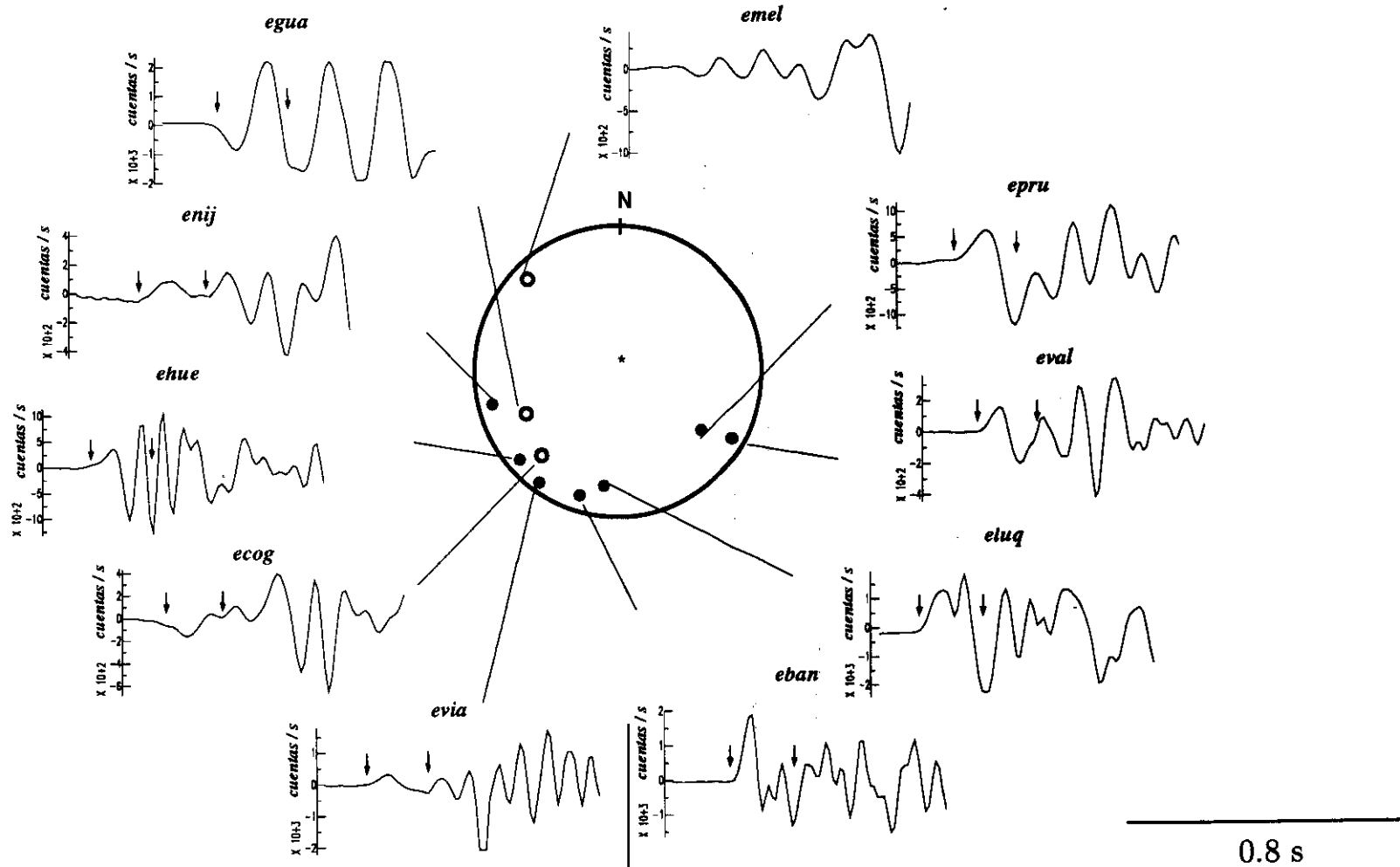


Fig. 4.23. Terremoto 14-Marzo-1992. Sismogramas utilizados en la inversión. Los círculos blancos representan dilataciones y los negros compresiones. La escala horizontal (tiempo) es de 0.8s e igual en todas las estaciones. La escala vertical viene dada en cuentas/s. Las flechas indican la longitud de registro elegida para la inversión.

14 Marzo 1992

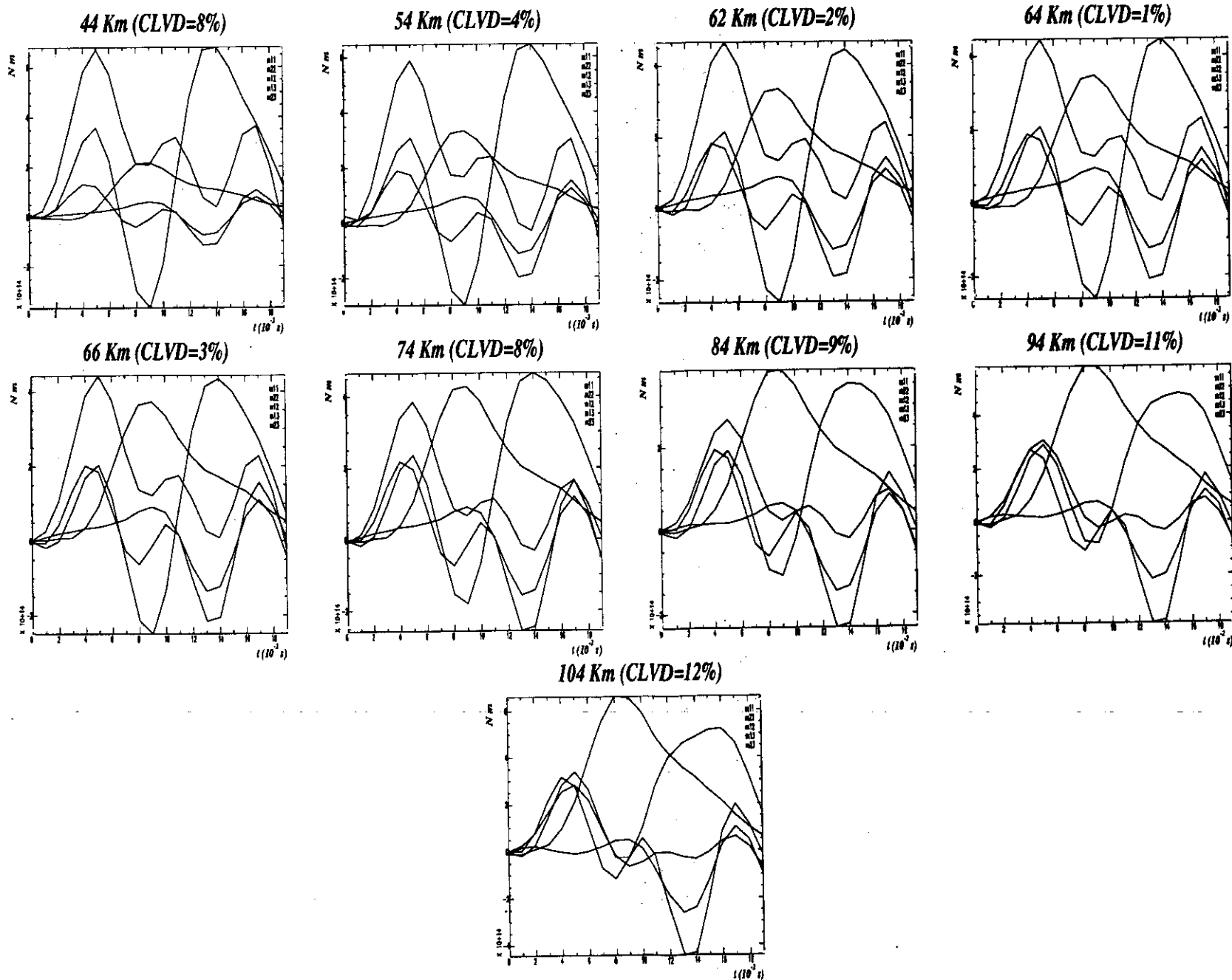


Fig. 4.24. Terremoto 14-Marzo-1992. Componentes del tensor momento sísmico.

A partir de la amplitudes máximas de las componentes del tensor momento sísmico situado en 0.03s, se ha obtenido el tensor momento sísmico que se muestra en la Tabla 4.13. Tras su descomposición espectral se han obtenido los ejes de esfuerzos, el momento sísmico escalar ( $M_0$ ) y el porcentaje de CLVD, representadas en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.13.** Tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD y función temporal, del terremoto 14-Marzo-1992 obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}^{(*)}$	$M_{22}^{(*)}$	$M_{12}^{(*)}$	$M_{13}^{(*)}$	$M_{23}^{(*)}$	CLVD (%)	f(t) (s)
44	-0.71±0.06	1.58±0.05	0.73±0.03	-0.77±0.19	4.81±0.15	8±4	0.07
54	-0.66±0.09	1.70±0.07	0.74±0.05	-1.15±0.16	4.55±0.14	4±1	0.07
62	-0.51±0.09	1.67±0.07	0.75±0.05	-0.99±0.13	3.49±0.11	2±4	0.07
64	-0.44±0.09	1.86±0.07	1.14±0.05	-0.93±0.12	3.24±0.10	1±2	0.07
66	-0.52±0.10	1.76±0.08	0.79±0.05	-0.91±0.12	3.46±0.10	3±2	0.07
74	-0.85±0.11	2.32±0.09	0.85±0.06	-0.96±0.11	3.12±0.10	8±2	0.07
84	-0.68±0.10	2.34±0.08	0.75±0.06	-0.77±0.08	2.31±0.07	9±3	0.07
94	-1.42±0.15	1.10±0.12	2.72±0.09	-1.15±0.10	2.99±0.10	11±4	0.07
104	-1.53±0.17	1.14±0.13	3.51±0.10	-1.28±0.11	2.93±0.10	12±5	0.07

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

**Tabla 4.14.** Parámetros focales del terremoto 14-Marzo-1992 obtenidos tras la inversión.

h (km)	eje de Tensión ( $\theta$ , $\phi$ )		eje de Presión ( $\theta$ , $\phi$ )		$M_0^{(*)}$	score CLVD	score DC	rms
44	57±0	59±0	33±0	245±1	5.10±0.10	82	100	0.558
54	54±1	57±0	37±0	247±1	4.98±0.09	82	100	0.555
62	57±1	89±0	38±0	302±1	3.99±0.09	91	100	0.487
64	57±0	55±0	34±0	251±1	3.92±0.12	100	100	0.435
66	57±1	87±0	38±0	301±1	3.98±0.09	91	100	0.486
74	61±0	55±0	31±0	255±1	3.93±0.12	82	100	0.552
84	65±0	57±0	27±0	259±1	3.28±0.16	82	100	0.549
94	68±0	60±0	24±0	265±1	4.11±0.18	82	100	0.548
104	70±0	67±0	22±0	273±1	4.53±0.08	82	100	0.546

(\*) multiplicado por  $10^{14}$  expresado en Nm

En la Fig. 4.25 se han representado sobre la esfera focal, los ejes de esfuerzos, planos de falla (DC), las superficies nodales (CLVD) y las estaciones utilizadas en la inversión. El mecanismo focal no varía prácticamente con la profundidad, obteniéndose un mecanismo vertical con los planos en dirección N-S. El eje de T varía con la profundidad hasta  $15^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical y hasta  $10^\circ$  en el acimut, mientras que el eje P varía hasta  $12^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente.

14 Marzo 1992

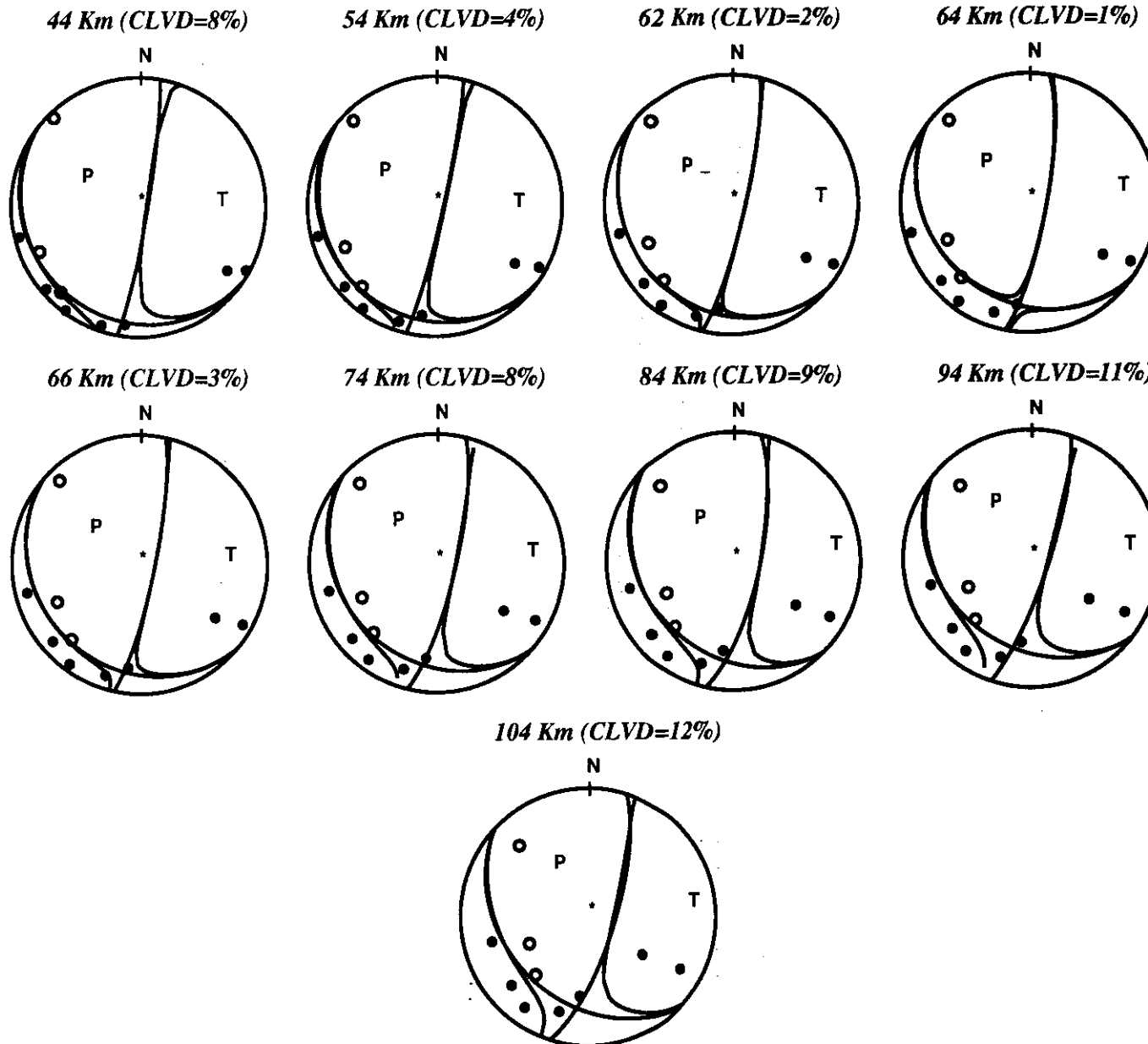


Fig. 4.25. Terremoto 14-Marzo-1992. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión.

Se ha representado el porcentaje de CLVD obtenido para todas las inversiones, frente a la profundidad en la Fig. 4.26. En dicha figura se observa que el punto crítico, que se produce a 64 km con un CLVD del 1%.

La profundidad del terremoto se ha ajustado mediante el cálculo del rms existente entre los sismogramas observados y teóricos. Para ello se han construido sismogramas sintéticos de cada estación y cada solución obtenida para cada inversión realizada, utilizando la función temporal de 0.07s. Los ajustes realizados entre los sismogramas observados y sintéticos se muestran en la Fig. A2.50-A2.58 del Anexo 2, según la profundidad. Se observa que las estaciones más difíciles de controlar son ELUQ, y EBAN (geográficamente muy próximas entre sí), ya que según la solución utilizada para calcular el sismograma teórico, la polaridad de ambas se obtiene invertida. Se ha calculado el rms existente entre observados y teóricos, y se han representado frente a la profundidad en la Fig. 4.27, y su valor para cada inversión se muestra en la Tabla 4.14.

El mejor ajuste entre sismogramas observados y teóricos se produce cuando se obtiene el mínimo rms, correspondiente al mejor ajuste del tensor momento sísmico. Éste se produce para la profundidad de 64 km con un valor del rms de 0.435, por lo tanto la profundidad obtenida mediante el método de inversión para este terremoto es de 64 km. Dicha profundidad coincide con la calculada por el IGN.

A partir de la representación del rms y CLVD frente a la profundidad, Fig. 4.26, y 4.27, se observa que el rms y el CLVD obtienen su punto crítico en la misma profundidad de 64 km.

A partir de la solución obtenida, se concluye que este terremoto presenta la profundidad del centroide a 64 km, la duración de la función temporal es de 0.07s, el mecanismo focal corresponde a un movimiento vertical con planos de falla en dirección N-S, y corresponde a un doble par de fuerzas ya que el porcentaje de CLVD obtenido es de 1%. El momento sísmico es  $3.92 \times 10^{14} \text{Nm}$ , que coincide con los valores obtenidos por otros terremotos de la zona.

Comparando la solución obtenida para este sismo con la obtenida para el caso teórico de mecanismo focal vertical de 0% de CLVD (mecanismo semejante al obtenido para este terremoto), se puede decir que las características de las soluciones obtenidas en todas las inversiones son similares en ambos casos. El mecanismo focal varía poco al variar la profundidad, para el eje T varía  $15^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical y  $10^\circ$  para el acimut, y el eje P varía hasta  $12^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente. Para el caso teórico, los ejes de esfuerzos se alejan como máximo  $14^\circ$  para ambos ángulos. Al representar el CLVD frente a la profundidad (Fig. 3.42 y 4.26), éste muestra un mínimo en la profundidad correcta. El CLVD varía para el caso teórico de 2-4% para el rango de profundidades de 58-88 km y para el terremoto del 14-Marzo-1992, varía de 4-9% para un rango de profundidades de 54-84 km, por lo tanto el comportamiento del CLVD para ambos casos es muy semejante.

14 Marzo 1992

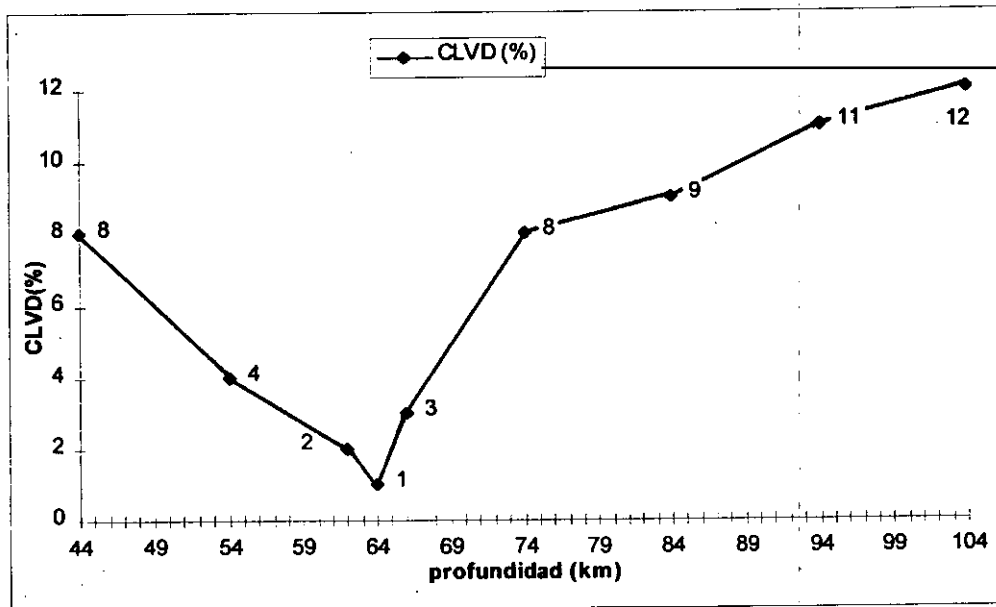


Fig. 4.26. CLVD obtenido tras inversión, frente a la profundidad.

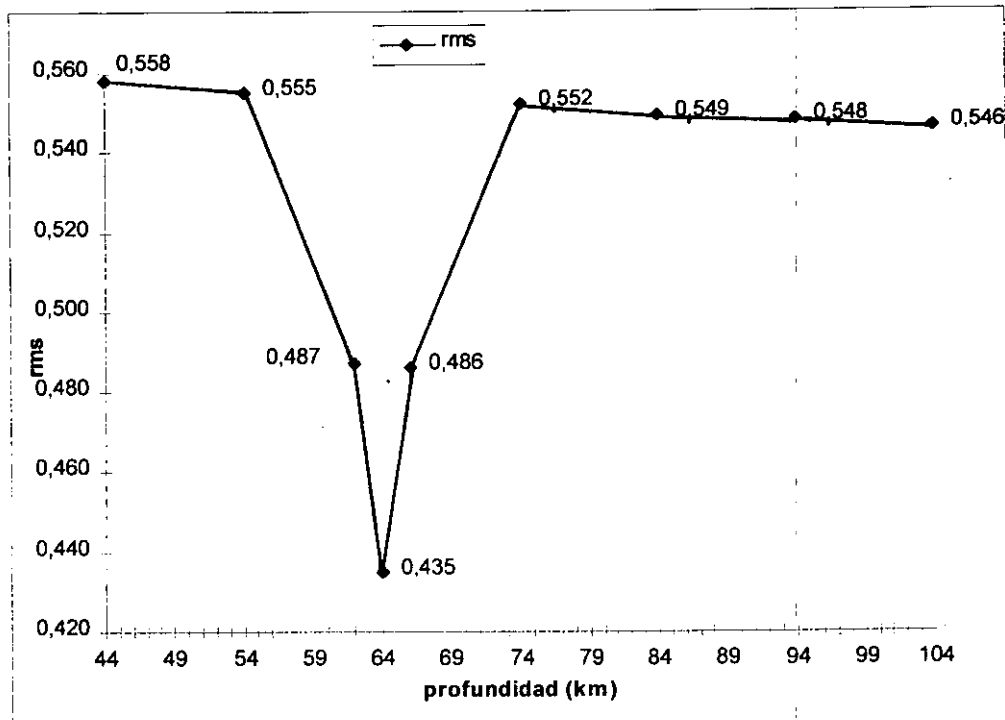


Fig. 4.27. RMS obtenido, frente a la profundidad.

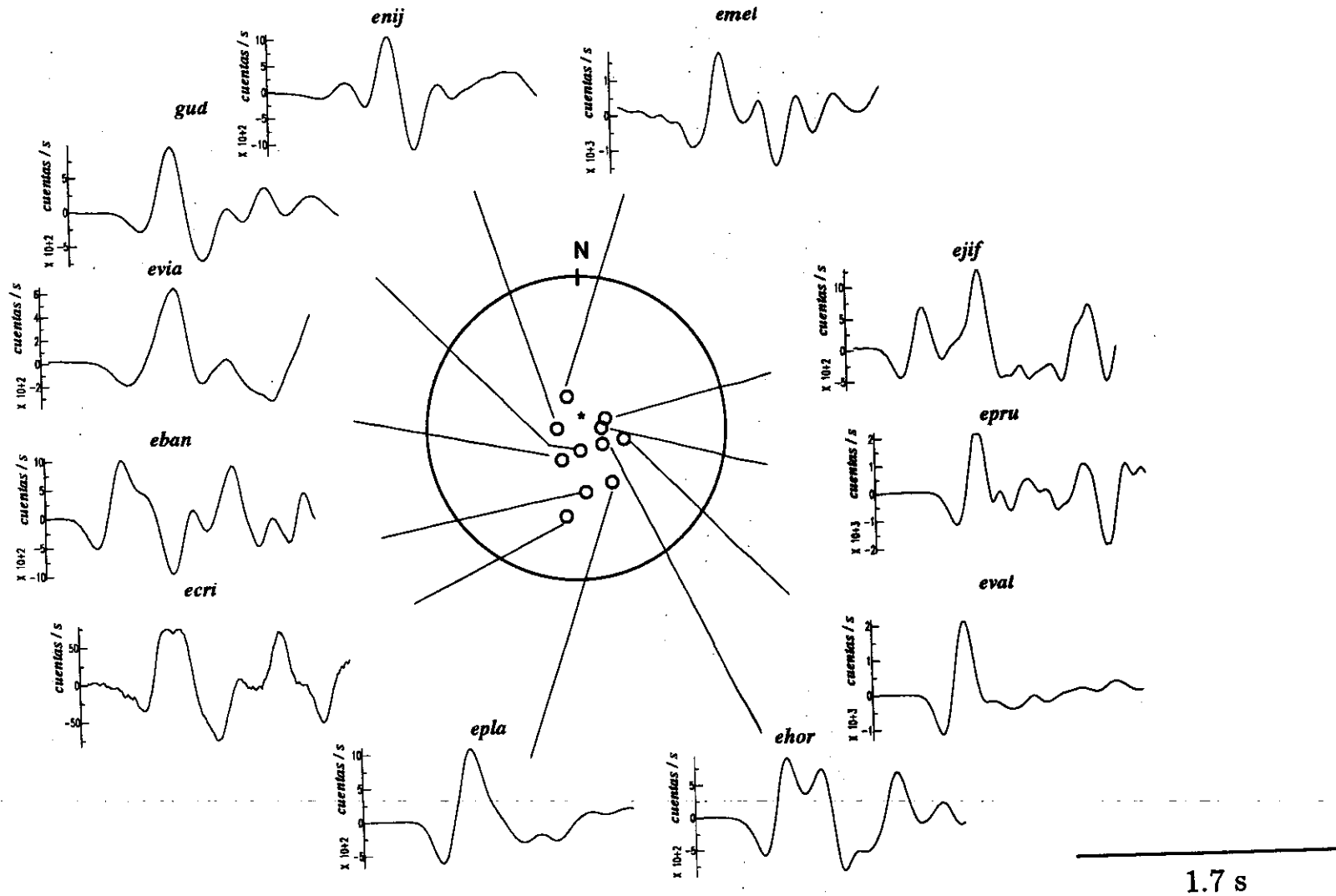
### Granada, 8- Marzo-1990

Este terremoto (nº 4 de la Tabla 4.1) está situado al sur de Granada, su profundidad es de 637 km. (I.G.N.) y su magnitud es 5.0. Debido a que su magnitud es mayor que la de los otros terremotos estudiados, el número de estaciones que lo han registrado es también mayor. Los registros sísmicos utilizados para realizar la inversión, se han representado sobre la esfera focal en la Fig. 4.28, como se observa cubren totalmente la esfera focal. En dicha figura sólo se han representado las 11 estaciones utilizadas en la inversión, frente a las 17 utilizadas para la modelización en la primera función y 11 estaciones para la segunda. Esta reducción se debe a que en las 6 estaciones eliminadas la segunda llegada no es tan clara como en el resto de las estaciones, y perturbaría la inversión. En la Tabla 4.15 se muestra la localización de las estaciones utilizadas en la inversión.

**Tabla 4.15.** Estaciones utilizadas en la inversión. Terremoto 8-Marzo-1990.

estación	acimut (°)	ángulo de incidencia en el foco (°)	distancia epicentral (km)	atenuación anelástica (Q)
ejif	71	16	175	600
eval	104	26	287	600
epru	90	13	145	600
ehor	123	16	174	600
epla	148	35	407	300
eban	173	12	134	450'
gud	173	35	412	600
ecri	189	49	635	400
evia	208	19	209	300
enij	270	11	124	600
emel	343	18	195	600

8 Marzo 1990



193

Fig. 4.28. Terremoto 8-Marzo-1990. Sismogramas utilizados en la inversión. Los círculos blancos representan dilataciones. La escala horizontal (tiempo) es de 1.7s e igual en todas las estaciones. La escala vertical viene dada en cuentas/s. Las flechas indican la longitud de registro elegida para la inversión.

Se han utilizado como ventana temporal de inversión los primeros 2.56s de las señales, debido a la mayor magnitud del sismo. Para este terremoto se han realizado diferentes inversiones con distintas profundidades, y no se ha observado variación del mecanismo focal por la variación de la profundidad, debido a su gran profundidad.

A partir de la inversión realizada utilizando 637 km de profundidad, con los registros de las 11 estaciones utilizadas en el método de inversión, se han obtenido las componentes del tensor momento sísmico, que se muestran con el criterio de positividad en la Fig. 4.29. En dicha figura se han representado primeramente las componentes  $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{13}$  que son muy semejantes entre si y luego se han representado las cinco componentes, donde se observa que  $m_{12}$ ,  $m_{23}$  son diferentes a las otras tres, sobretodo en la segunda, tercera y cuarta función temporal.

En dicha figura se observa que aparecen 4 funciones temporales con forma de triángulo (a partir de los puntos de unión de todas las componentes), una función inicial con mayores amplitudes, seguida de otras 3 funciones con menores amplitudes. La primera función tiene una duración de 0.20s, la segunda de 0.25 s, tercera de 0.23 s y la cuarta 0.22, dando un total de 0.90 s de duración de la función temporal para este terremoto. Dichas cuatro funciones, se observan en los registros digitales de todas las estaciones (Fig. 4.28).

En las Tablas 4.16 se muestran los resultados numéricos de la inversión para cada una de las cuatro funciones temporales consideradas, obtenidas a partir de las máximas amplitudes de las componentes del tensor momento sísmico. En la Tabla 4.17 se muestra la descomposición espectral de las componentes mostradas en la Tabla 4.16, mediante los ejes de esfuerzos, el momento sísmico escalar y el porcentaje de aciertos en polaridades. Los ejes de esfuerzos obtenidos, se ha representado sobre la esfera focal, los planos de falla (DC) como las superficies nodales del CLVD junto con las estaciones utilizadas, en la Fig. 4.30. Los dos primeros mecanismos focales correspondientes a la dos primeras funciones temporales, presentan un mecanismo focal de desgarre, el eje de T horizontal está en dirección E-O, y la tercera y cuarta tienen un mecanismo de desgarre con el eje T situado en dirección NE-SO. Las dos primeras soluciones tienen un porcentaje de aciertos de polaridad del 100% si se utiliza el mecanismo focal correspondiente al CLVD. Cuando se utiliza el mecanismo focal de doble par el porcentaje no alcanza el 100%. La tercera y cuarta soluciones no obtienen en ningún caso el porcentaje de aciertos del 100%. Las cuatro soluciones presentan un porcentaje de CLVD pequeño, para la primera función es del 10%, para la segunda 13%, 16% para la tercera y 9% para la cuarta.

# 080390, h=637 Km

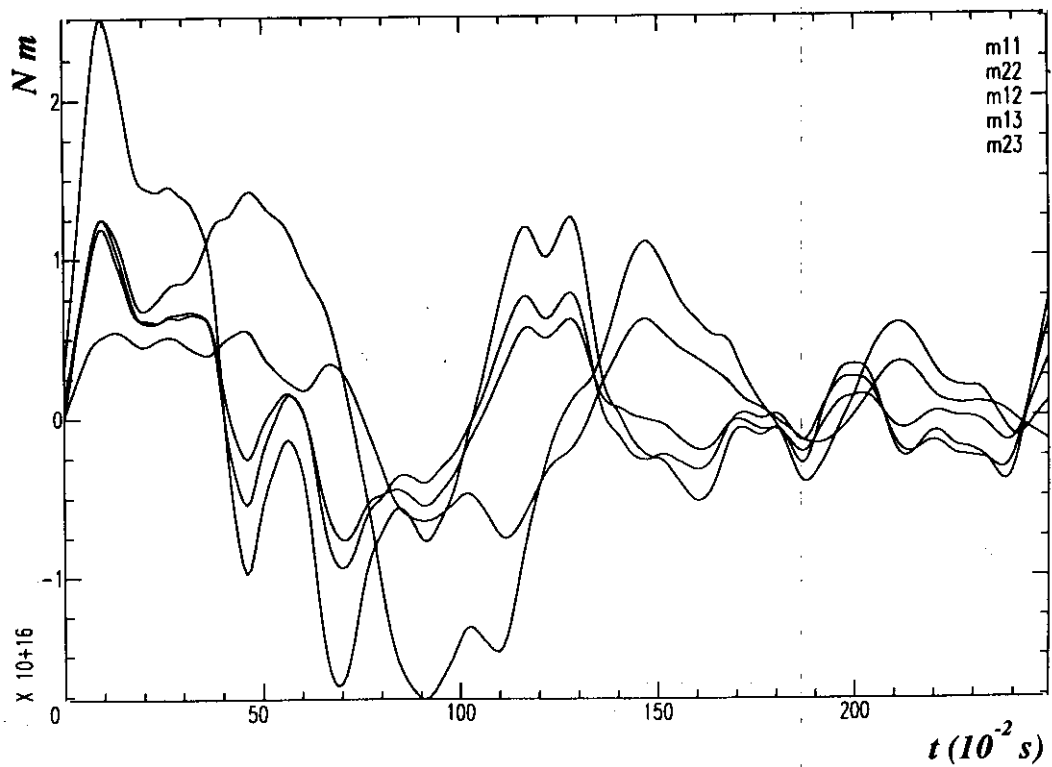
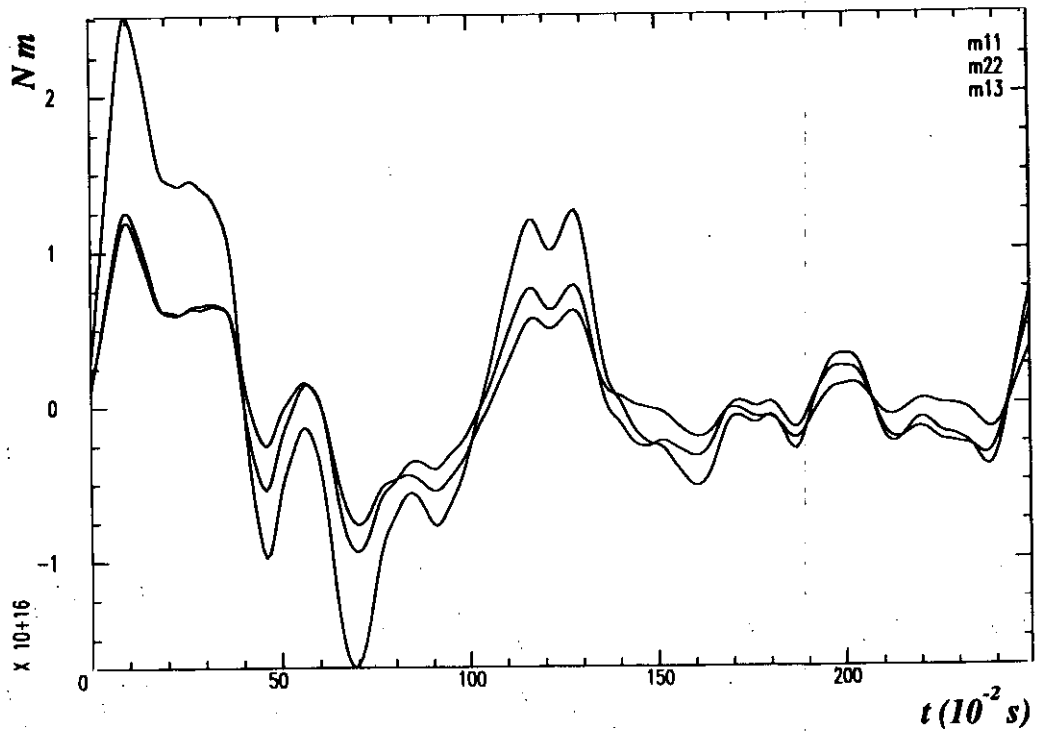


Fig. 4.29. Terremoto 8-Marzo-1990. Componentes del tensor momento sísmico

## 080390, h=637 Km

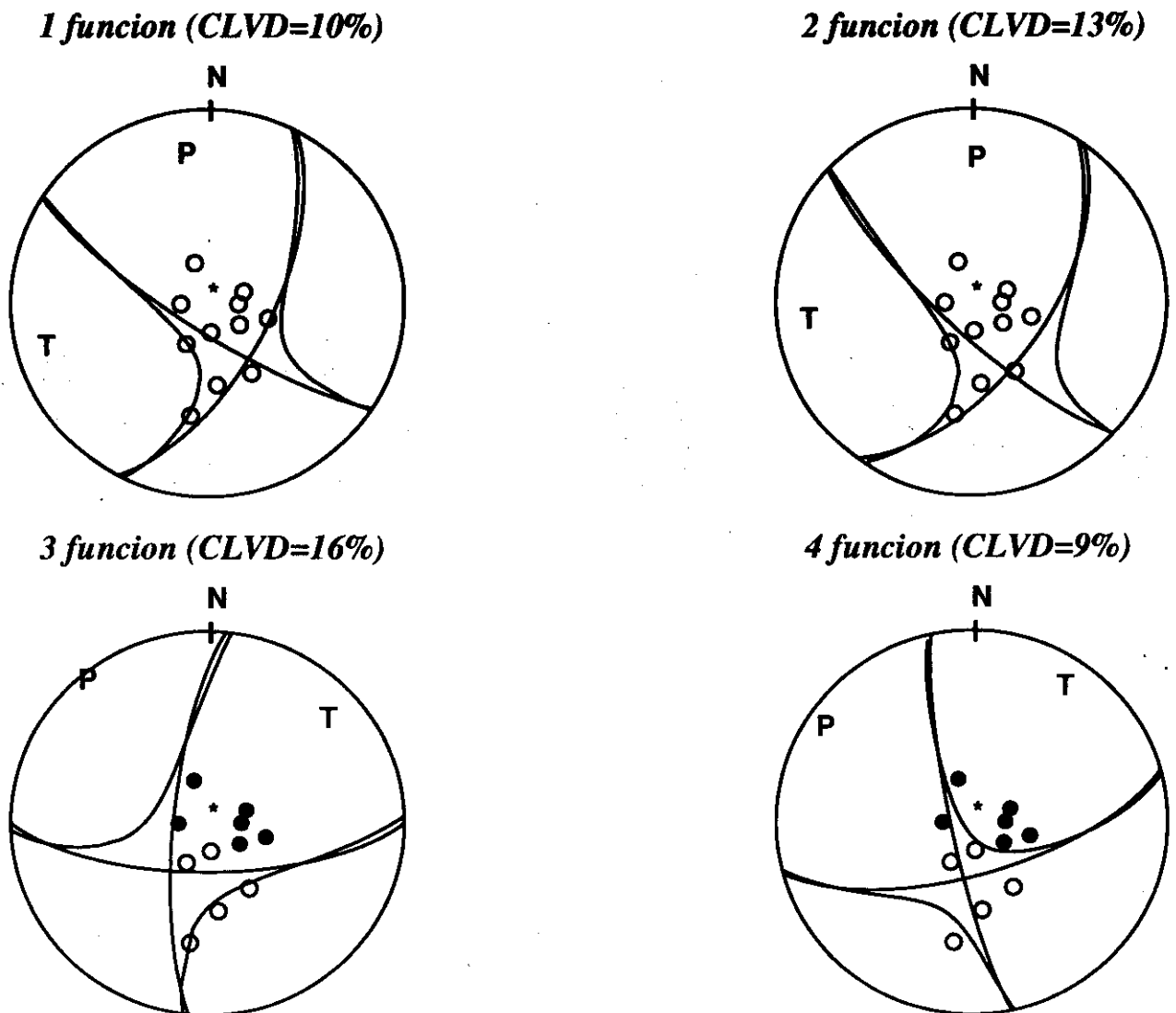


Fig. 4.30. Terremoto 8-Marzo-1990. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión.

**Tabla 4.16.** Tensor momento sísmico, porcentaje de CLVD y función temporal del terremoto 8-Marzo-1990, obtenidos tras la inversión.

h (km)	$M_{11}$ (*)	$M_{22}$ (*)	$M_{12}$ (*)	$M_{13}$ (*)	$M_{23}$ (*)	CLVD (%)	f(t)
637	-3.64±0.04	4.98±0.05	2.56±0.06	-2.01±0.02	-0.45±0.02	10±3	0.20
637	-1.88±0.04	2.70±0.05	0.50±0.06	-1.06±0.02	-0.67±0.02	13±3	0.25
637	-0.33±0.04	0.09±0.05	1.29±0.06	0.17±0.02	0.39±0.02	16±4	0.23
637	0.87±0.04	-0.99±0.05	1.82±0.06	0.60±0.02	0.97±0.02	9±2	0.22

(\*) multiplicado por  $10^{16}$  expresado en Nm

**Tabla 4.17.** Parámetros focales del terremoto 8-Marzo-1990 obtenidos tras la inversión

h (km)	eje de Tensión ( $\theta$ , $\phi$ )	eje de Presión ( $\theta$ , $\phi$ )	$M_0$ (*)	score CLVD	score DC	rms
637 (1ª función)	80±0 253±0	63±0 348±0	5.63±0.13	100	73	0.189
637 (2ª función)	78±0 261±0	59±1 359±0	2.68±0.14	100	64	0.263
637 (3ª función)	65±1 49±1	86±0 317±0	1.39±0.15	82	82	---
637(4ª función)	67±0 38±1	76±0 298±0	2.26±0.15	91	82	---

(\*) multiplicado por  $10^{16}$  expresado en Nm

Para calcular la función temporal, se han construido los sismogramas sintéticos utilizando las soluciones obtenidas tras la inversión, patrón de radiación y cada función temporal obtenida. Dichos ajustes se muestran en las Fig. 4.31-4.32, según corresponde a la primera función sola o a la primera y la segunda función temporal juntas, respectivamente. El ajuste de los sismogramas observados y los sintéticos utilizando sólo la primera función temporal de duración 0.20s, es casi perfecto en especial para las estaciones EHOR, EPLA Y ENIJ. Cuando se utilizan las dos primeras funciones temporales (0.45 s de duración), el ajuste empeora, produciéndose un retardo en la segunda llegada del sismograma teórico respecto al sismograma observado. Se ha calculado el rms para cada ajuste (Tabla 4.17) y el rms menor se produce para la primera función de 0.20s, con un error de 0.189, como era de esperar a la vista de los ajustes mostrados en las Fig. 4.31-4.32.

# 8 Marzo 1990, h=637 Km (rms=0.189, 1ª función temporal)

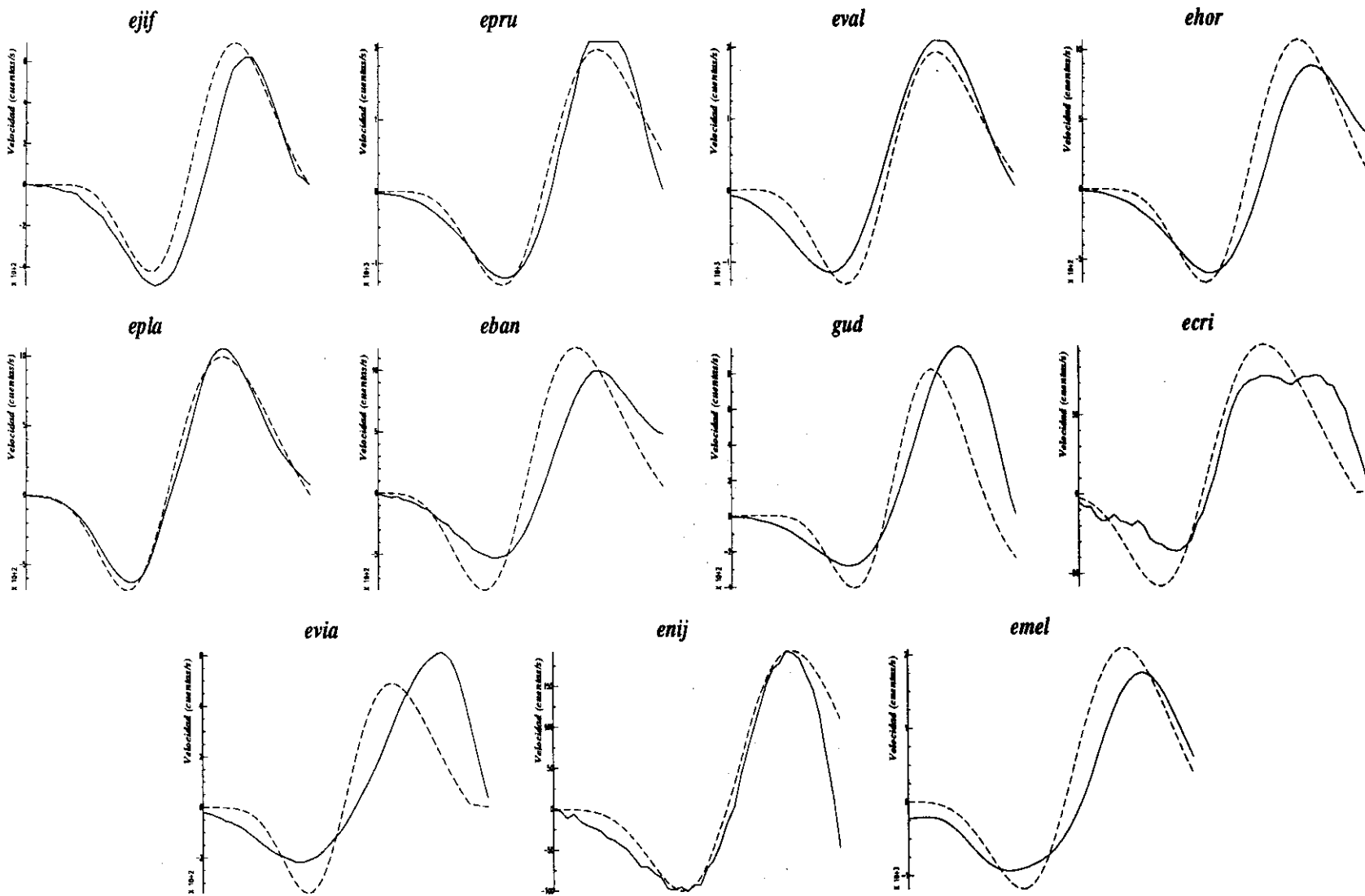


Fig. 4.31. Terremoto 8-Marzo-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.20s.

# 8 Marzo 1990, h=637 Km (rms=0.263, 1ª + 2ª función temporal)

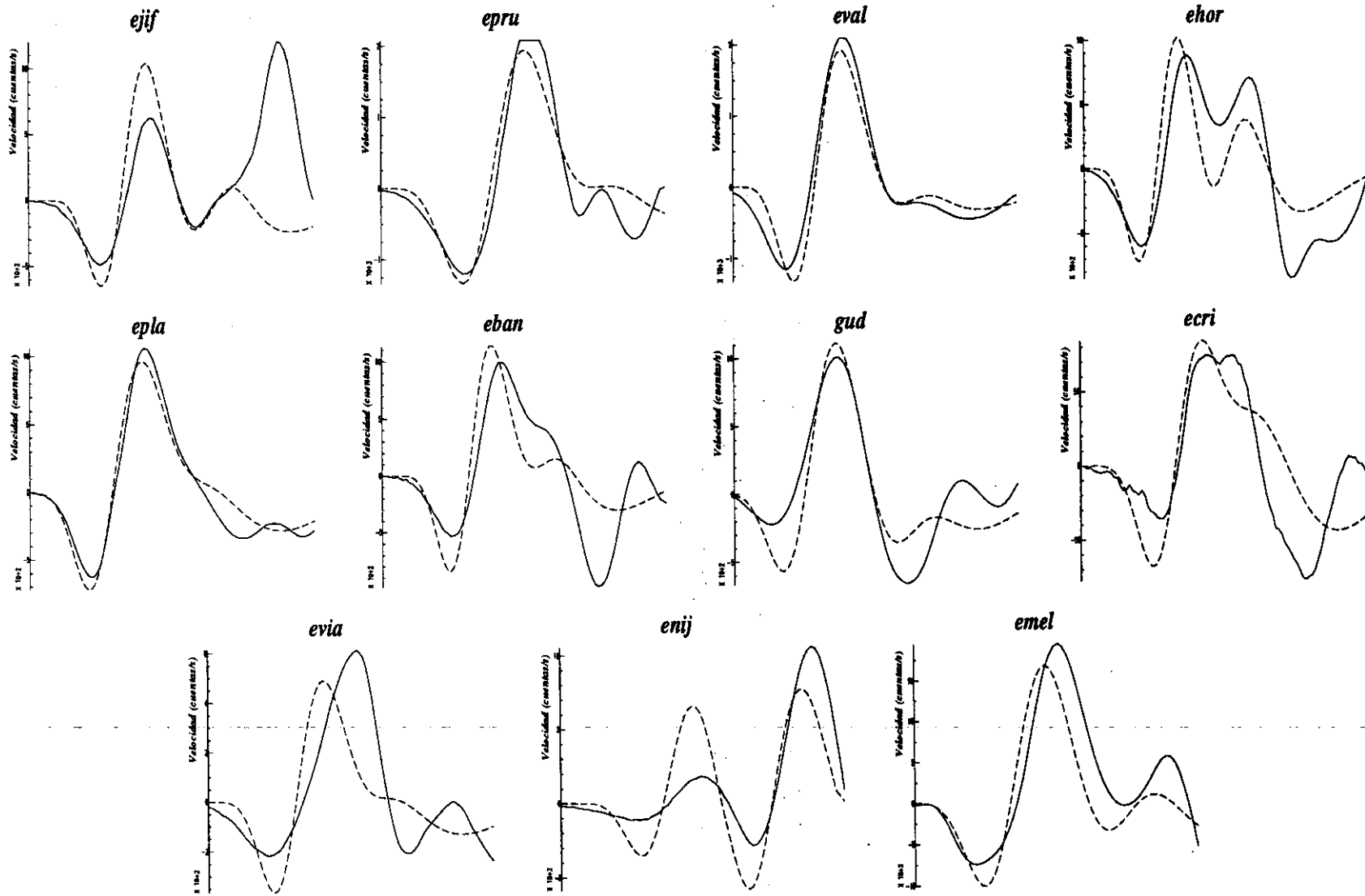


Fig. 4.32. Terremoto 8-Marzo-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.45s.

No se han generado los sismogramas teóricos para la tercera y cuarta función, ya que los sismogramas teóricos creados utilizando la función temporal compleja (primera y segunda función temporal, 0.45s de duración) empeoran el resultado de los ajustes. Por lo tanto, la primera llegada es clara, sin embargo el resto es más difícil de conseguir debido a la complejidad del terremoto.

Este resultado coincide con las componentes del tensor momento sísmico obtenidas, ya que como se muestra en la Fig. 4.29, dos de las cinco componentes tienen una evolución temporal diferente del resto a partir de la segunda función temporal, a partir de los primeros 0.20s.

De las soluciones obtenidas mediante el método de inversión, se deduce que este terremoto presenta una función temporal de 0.20s, y su mecanismo focal presenta un movimiento de desgarre con un porcentaje de CLVD del 10%. El porcentaje de CLVD indica que este terremoto posee un mecanismo focal que se aleja un 10% del doble par puro, sin embargo este porcentaje de CLVD es fundamental ya que el porcentaje de aciertos en polaridades (score) es del 100% sólo cuando utilizamos el mecanismo focal de no doble par, frente al 68% obtenido al utilizar el mecanismo focal de doble par.

Se ha comparado la primera función temporal obtenida por el método de la inversión (0.20s), con la obtenida por la modelización (Buforn et al., 1997) que utiliza una función temporal de 0.30 s (ver Fig. 4.33). Se observa que son semejantes en la primera función temporal, el resto de las funciones temporales no pueden justificarse por el método de la inversión posiblemente debido a la complejidad del terremoto. El mecanismo focal obtenido tanto en la inversión como en la modelización, indican que este terremoto profundo corresponde a un movimiento extensional, en este estudio los planos nodales tienen dirección NO-SE, y presenta una componente alta de desgarre. Sin embargo, en el caso de la modelización corresponde a planos verticales orientados NS, el eje de Tensión buzando unos 45° hacia el E y el movimiento es totalmente extensional. El momento sísmico escalar es de  $5.63 \times 10^{16}$  Nm para el método de inversión, frente a  $1.46 \times 10^{16}$  Nm de la modelización.

## Mecanismo focal utilizado en la modelización

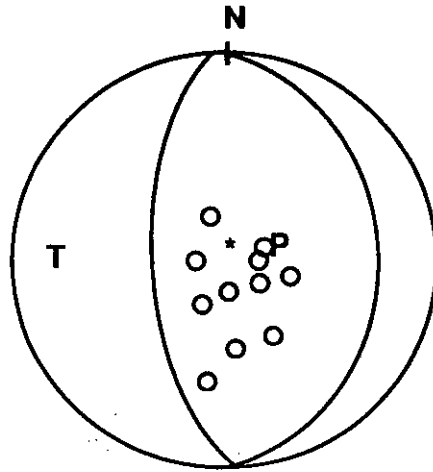


Fig. 4.33. Mecanismo focal utilizado en el método de la modelización Buforn et al. (1997).

Con el fin de conocer cuál de los mecanismo focales obtenidos en ambos métodos, el de la inversión o de la modelización, es el más adecuado para este terremoto, se han construido los sismogramas teóricos utilizando el mecanismo focal de doble par utilizado en la modelización (Tabla 4.2). Dichos ajustes se muestran en la Fig. 4.34, junto con el rms existente entre los sismogramas observados y teóricos, cuyo valor es de 0.232. Comparando este rms frente al obtenido utilizando el mecanismo de no doble par obtenido en la inversión, 0.189, se deduce que el mecanismo focal de no doble par con un 10% de CLVD ajusta mejor los sismogramas observados. Sin embargo, la diferencia de rms es inapreciable para los dos mecanismos focales, de no doble par de la inversión y de doble par utilizado en la modelización, y ambas son válidos como solución para este terremoto.

# 8 Marzo 1990, $h=637$ Km (rms=0.232, modelización)

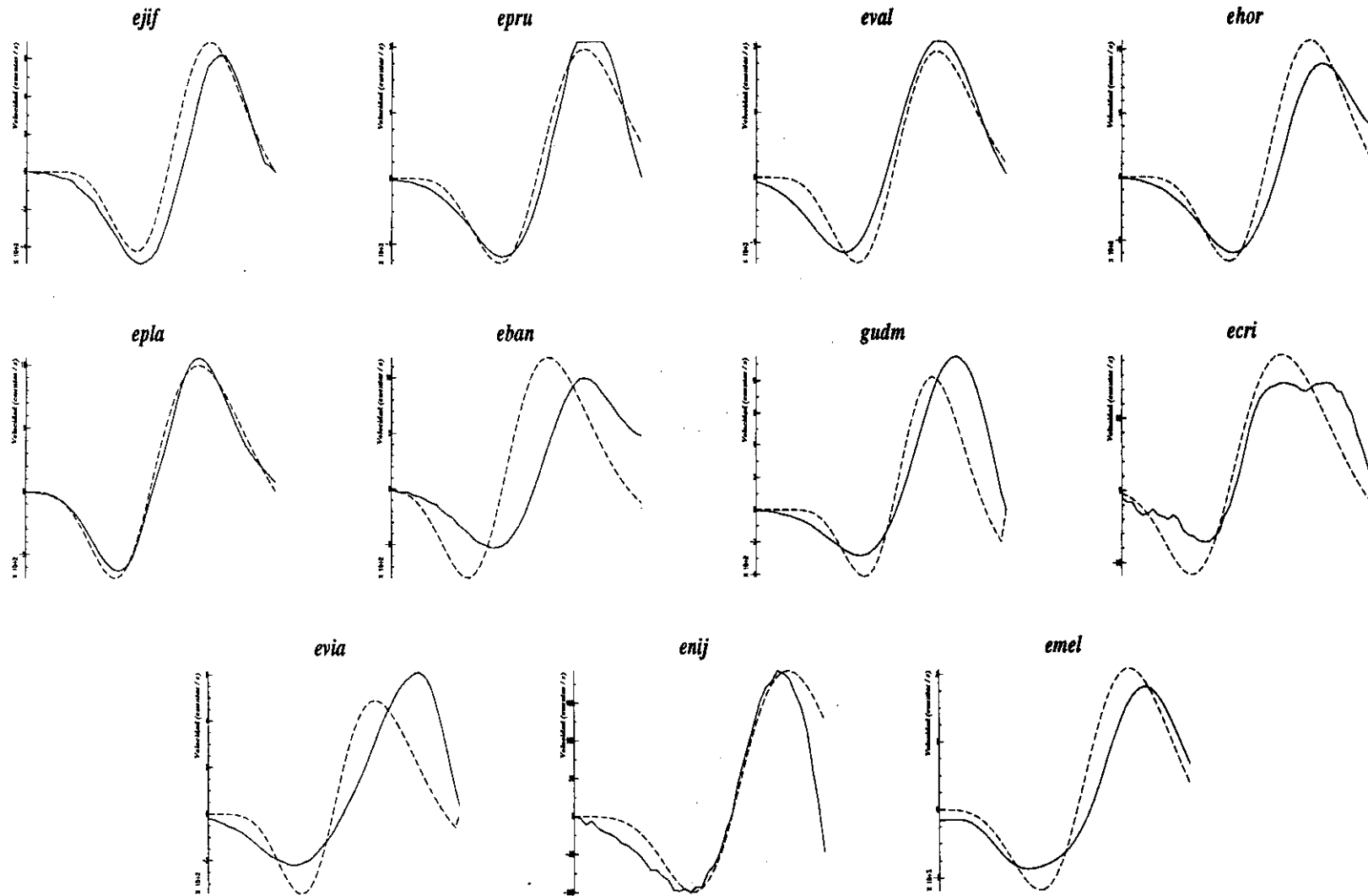


Fig. 4.34. Terremoto 8-Marzo-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando la solución de la modelización.

## Capítulo 5

### Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de los casos teóricos y de los terremotos del sur de España, que se muestran en los capítulos 3 y 4, al aplicar el método desarrollado para obtener las componentes del tensor momento sísmico, se puede concluir que éste permite obtener:

- evolución de las componentes del tensor momento sísmico con el tiempo,
- función temporal de la fuente sísmica,
- tensor momento sísmico:
  - doble par (eje de Tensión, Presión), y momento sísmico escalar,
  - CLVD y porcentaje de CLVD,
- errores de cada parámetro obtenido,

Debido a que el método considera la profundidad fija, hay que construir los sismogramas sintéticos para calcular:

- rms existente entre sismogramas observados y teóricos,
- profundidad del centroide del terremoto, calculada a partir del mínimo rms, y
- dependencia de la parte de CLVD con la profundidad.

## **Aplicación a casos teóricos**

A partir de los resultados obtenidos tras haber efectuado las inversiones para los terremotos teóricos con mecanismo focal de desgarre, normal y vertical, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

### **1 - Efecto de la atenuación anelástica**

Para todas las inversiones realizadas a diferentes profundidades, las componentes del tensor momento sísmico son bastante estables y similares entre sí, tanto para el caso en que sí se efectúa la corrección anelástica en los sismogramas sintéticos como en los que no se ha efectuado dicha corrección. Sin embargo, al no realizar la corrección por el efecto de la atenuación anelástica, las componentes del tensor momento sísmico se deforman, redondeándose y en lugar de dar un triángulo perfecto (como debería ser en realidad), la solución obtenida es un triángulo redondeado, y por lo tanto modifican también los valores numéricos de dichas componentes. Este último hecho repercute en los valores obtenidos al realizar su descomposición espectral, tanto en la parte de doble par del patrón de radiación como en la de no doble par.

La forma de la función temporal de la fuente sísmica se ve modificada al no efectuar la corrección de la atenuación anelástica y en lugar de obtenerse un triángulo perfecto como la función real, se obtiene un triángulo redondeado. Sin embargo, su duración no se ve modificada por el efecto de la no corrección de la atenuación anelástica.

Todos los tipos de mecanismo focal, en el caso de la corrección de la atenuación anelástica, presentan discrepancias semejantes respecto al valor original en los ejes de esfuerzos. Sin embargo, el mecanismo focal de desgarre (en especial el que posee el 15% de CLVD) presenta la máxima desviación, en el eje T discrepa del mecanismo focal original  $13^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical, mientras que en el acimut se obtiene girado  $180^\circ$ , para el eje P es de  $9^\circ$  en el ángulo que forma con la vertical. La máxima desviación en el acimut para el eje P se presenta en el mecanismo focal de deslizamiento en la dirección de buzamiento, movimiento normal o inverso de 0% de CLVD, hasta  $53^\circ$ . Cuando no se efectúa la corrección anelástica, no se producen grandes diferencias entre los distintos tipos de mecanismos focales, y tampoco es evidente una diferencia cuando todas las estaciones tienen la misma atenuación que cuando varía entre estaciones.

El momento sísmico escalar es del mismo orden de magnitud que el original, sin influir en él la corrección o no por la atenuación anelástica, ni el tipo de mecanismo focal.

El porcentaje de CLVD se ve afectado por la no corrección de la atenuación anelástica, ya que se aleja hasta un 25% (caso de mecanismo focal de desgarre con 34% de CLVD) de la solución correcta. Para todos los tipos de mecanismo focal se obtiene un punto crítico (máximo o mínimo) en el CLVD en la profundidad correcta cuando se corrige la atenuación anelástica, sin embargo cuando dicha corrección no se efectúa, este punto crítico se obtiene en otras profundidades diferentes a la correcta, 5 km mayor, para mecanismo focal vertical 15%, 33% de CLVD, 10 km mayor a la correcta, para mecanismo focal con movimiento normal o inverso con 15%, y 35% o incluso llega a desaparecer como ocurre para mecanismo focal de desgarre con 15%, 34% de CLVD.

Los errores estimados en todos los parámetros obtenidos son pequeños, 2 órdenes de magnitud inferior en el caso de las componentes del tensor momento sísmico y el momento sísmico escalar, para los ejes de esfuerzos es de 3° en el caso menos favorable y para el porcentaje de CLVD en general es menor de 4%, pero en el caso más desfavorable (mecanismo focal normal con 0% de CLVD) es del 15%.

En conclusión, se puede resumir que cuando se corrige la atenuación anelástica, las soluciones obtenidas son muy semejantes a la correcta, tanto en la forma como en valor numérico, con independencia del mecanismo focal utilizado. Cuando se utiliza la profundidad correcta se obtiene una solución igual a la original. Por lo tanto, la no corrección de la atenuación anelástica en los sismogramas que se utilizan para realizar las inversiones, produce soluciones erróneas. No se han encontrado grandes diferencias entre las soluciones obtenidas cuando no se utiliza la corrección anelástica y ésta es igual en todas las estaciones y cuando se varía entre ellas.

## 2 - Efecto de la profundidad

La utilización de profundidades diferentes de la correcta en la inversión, influye en los parámetros que se obtienen alejándolos de la solución correcta, sin embargo no se aprecia ninguna diferencia en su forma para diferentes profundidades. Se produce una variación de los valores de las componentes del tensor momento sísmico, que por lo tanto al realizar su descomposición espectral, influye en la parte de doble par obtenida (eje de Tensión, eje de Presión y momento sísmico escalar), y en el porcentaje de CLVD.

La función temporal de la fuente sísmica no se ve afectada por la utilización o no de la profundidad correcta.

La profundidad correcta puede obtenerse mediante el método desarrollado, ya que al representar el porcentaje de CLVD frente a la profundidad, éste posee un punto crítico (máximo o mínimo dependiendo del mecanismo focal) en la profundidad correcta.

### **Aplicación a terremotos del sur de España**

El método desarrollado se ha aplicado a cinco terremotos, cuatro de profundidad intermedia ( $h < 100 \text{ km.}$ ) , y uno profundo ( $h = 637 \text{ km.}$ ), ocurridos en el sur de España, que se listan a continuación:

27-Marzo-1987

19-Julio-1989

6-Febrero-1990

14-Marzo-1992

8-Marzo-1990 (profundo)

Las soluciones obtenidas para los cinco terremotos seleccionados, estudiados a partir de la inversión lineal de registros de velocidad de período corto de la componente vertical de la onda P directa, presentan las siguientes características:

- a) Los mecanismos focales obtenidos son similares, correspondiendo a mecanismo focal vertical para los terremotos 2, 3, 4 que tienen porcentajes de CLVD inferiores al 6% (mecanismos focales de doble par). El terremoto 1 presenta un porcentaje más elevado del 20%, lo que implica que su mecanismo se aleja más del doble par. El terremoto profundo presenta un 10% de CLVD, porcentaje que es importante ya que permite obtener buenos ajustes entre observados y teóricos, frente a la parte de doble par que no lo consigue, por lo tanto su parte de CLVD es fundamental.
- b) En todos los terremotos seleccionados, el rms y el CLVD obtenidos presentan su punto crítico en la misma profundidad, que representa la profundidad del centroide como sucede en los casos teóricos. Esto permite obtener la profundidad del terremoto.
- c) La profundidad obtenida con el método de la inversión (profundidad del centroide, mínimo rms) coincide con el cálculo del hipocentro realizado por el IGN, salvo para el terremoto 19-Julio-1989 que es de 80 km frente a 95 km. Esto indica que hipocentro y centroide se identifican, lo que es razonable para terremotos pequeños.
- d) Las características que presentan las inversiones del tensor momento sísmico de los terremotos del sur de España, coinciden con las de los casos teóricos que tienen un mecanismo focal similar, mecanismo focal vertical con 0% de CLVD, y 15% de CLVD.
- e) La duración de la función temporal es muy semejante en todos los terremotos entre 0.07-0.10s y sólo está formada por un triángulo simple. La duración es de 0.07s para los terremotos 1 y 5 y de 0.10s para los terremotos 2 y 3. El terremoto 4 (terremoto profundo) tiene 0.20s de duración, ya que su momento sísmico escalar es del orden de  $10^{16}$ Nm frente a  $10^{14}$ Nm de los terremotos de profundidad intermedia.

En resumen, el método desarrollado permite obtener las componentes del tensor momento sísmico, la función temporal de la fuente sísmica, parte de doble par y CLVD, y permite ajustar la profundidad. Es de esperar que en el futuro, con la instalación que ya está en marcha de las estaciones de banda ancha con 3 componentes, será posible utilizar las componentes transversales (no disponibles en la actualidad) lo que permitirá mejorar la calidad de las soluciones obtenidas.

## Bibliografía

- **Aki, K. and Richards, P. G. (1980).** Quantitive Seismology, 932 pp. W H. Freeman, San Francisco, California.
- **Barker, J. S. and Langston, C. A. (1982).** Moment tensor inversion of complex earthquakes, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 68, 777-803
- **Bufofn E.; Udías A., and Mezcua, J. (1988).** Seismicity and focal mechanisms in south Spain. *Bull. Seis. Soc. Am.* 78, 2008-2024.
- **Bufofn, E.; Coca, P.; Udías, A. and Lasa, C. (1997).** Source mechanism of intermediate and deep earthquakes in souther Spain. *Journal of Seismology* 1, 113-130.
- **Carpenter, E. W. (1967).** Teleseismic signals calculated from under-ground, underwater and atmospheric explosions. *Geophysics*, 32, 17-32.
- **Coca, P. y Bufofn E. (1994).** Mecanismos focales en el sur de España. Periodo 1965-85. *Estudios Geológicos* 50, 33-45.
- **Deschamps A.; H. Lyon-Caen; R. Madariaga. (1980).** Mise au point des méthodes de calcul de sismogrammes synthétiques de longue période, *Ann. Géophys.* 36, 167-178.
- **Dreger, D. S. And Helmberger (1993).** Determination of source at regional distances with single stations or space network data. *J. Geophys. Res.*, 98, 8107-8125.
- **Dziewonski, A and Woodhouse, J. (1983).** An experiment in systematic study of global seismicity: centroid moment tensor solutions *J. Geophys. Res.*, 84, 3247-3271.
- **Futterman, W. J. (1962).** Dispersive body waves. *J. Geophys. Res.*, 67, 5279-5291.
- **Gilbert, F. (1971).** Excitations of the normal modes of the Earth by earthquakes sources. *Geoph. Jour. Roy. Astron. Soc.*, 22, 223-226.
- **Gilbert, F. and Dziewonski, A. (1975).** An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanism, *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, 278, 186-269.

- **Honda, H. (1957).** Earthquake mechanism and seismic waves. *J. Phys. Earth.*, 10, 2, 1-98.
  
- **Honda, H. (1962).** The mechanism of the earthquakes. *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. Ser. 9 (supplement)* 1-46.
  
- **Ichinose, G. A.; Smith, K. D. and Anderson J.G. (1998).** Moment tensor solutions of the 1994 double spring flat, Nevada, earthquake sequence and implications for local tectonics models. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 88, 6, 1363-1378.
  
- **Jost, M. L. and Herrman, R. B. (1989).** A student's guide to and review of moment tensor. *Seism. Res. Letters*, 60, 2, 37-57.
  
- **Julian, B. R. (1983).** Evidence for dryke intrusion earthquake mechanisms near Lonmg Valley caldera, California. *Nature*, 303, 323-325.
  
- **Julian, B. R. and Sipkin, S. A. (1985).** Earthquakes processes in the Long Valley Caldera Area, California. *J. Geophys. Res.*, 90, 11155-11169.
  
- **Julian, B. R. And Foulger, G. R. (1986).** Earthquake mechanisms form linear programming inversion of seismic-wave amplitude rates. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 86, 4, 972-980.
  
- **Julian, B. R.; Miller A. D. and Foulger G. R. (1998).** Non-double-couple earthquakes.1. Theory. *Reviews of Geophysics*, 36, 4, 525-549.
  
- **Kanamori, H. and Stewart, G. S. (1976).** Seismological aspects of the Guatemala earthquakes of February, 1976. *J. Geophys. Res.* 83, 3427-3434.
  
- **Kawasaki, J. (1982).** A method for the near-source anisotropy by the pair-event inversion of Rayleigh-wave radiation patterns, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 71, 395-424.
  
- **Knopoff, L. and Randall M. J. (1970).** The Compensated Linear Vector Dipole: A possible mechanism for deep earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 75, 4957-4965.

- **Langston, C. A. and Helmbelger, D. V. (1975).** A procedure for modelling shallow dislocation source. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 42, 117-130.
  
- **Lanczös, C. (1961).** Linear Differential Operators. Van Nostrand, London, 564 pp.
  
- **Madariaga R. (1985).** Dinámica de la fuente sísmica. Barreras y asperezas. *En A. Udías, D. Muñoz y E. Buforn. Mecanismo de los terremotos y tectónica. Editorial Complutense. Madrid.* (61-100).
  
- **Mao, W. J.; Panza, G. F. and Suhadolc P. (1994).** Linearized waveform inversion of local and near-regional events for source mechanism and rupturing processes. *Geophys. Journ. Int.*, 116, 784-798.
  
- **Miller A. D.; Foulger G. R. and Julian, B. R. (1998).** Non-double-couple earthquakes.2. Observations. *Reviews of Geophysics*, 36, 4, 551-568.
  
- **Menke, W. (1984).** Geophysical data analysis discrete inverse theory. *Oregon State University. Oregon. Academic Press, Inc.* 260 pp.
  
- **De Natale, G. and Zollo, A. (1993).** Earthquake focal mechanisms from inversion of first P and S wave motions. 399-419.
  
- **Press, W. H.; Hannery, B. P.; Teukoslsky, S. A. and Vetterling, W. T. (1987).** Numerical Recipes: The art of scientific Computing. *Cambridge University, Cambridge,* 818 pp.
  
- **Riedsel, M. A. and Jordan, T. H. (1989).** Display assement of seismic moment tensors. *Bull. Soc. Seis. Am.*, 79, 1, 85-100.
  
- **Satake, K. (1985).** Effects of station coverge on moment tensor inversion. *Bull. Soc. Seis. Am.*, 75, 6, 1657-1667.
  
- **Sileny, J.; Panza, G. F. and Campus P. (1992).** Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model. *Geophys. Journ. Int.* 109, 259-274.

- **Sipkin, S. A. (1982).** Estimation of earthquakes source parameters by the inversion of waveform data: synthetic waveforms. *Phys. Earth Plan. Inter.*, 30, 242-259.
  
- **Sipkin, S. A. (1986).** Interpretation of non-double couple earthquakes. Mechanisms derived from moment tensor inversion. *J. Geophys. Res.*, 91, 531-547.
  
- **Sipkin, S. A. (1987).** Moment tensor solutions estimated using optimal filter theory for 51 selected earthquakes, 1980-1984. *Phys. Earth Plan. Inter.*, 47, 67-79.
  
- **Sipkin, S. A. and Needham, R. E. (1994).** Moment-tensor solutions estimated using optimal filter theory : global seismicity, 1993. *Phys. Earth Plan. Inter.*, 86, 245-252.
  
- **Strelitz, R. A. (1980).** The fate of downgoing slab: a study of the moment tensors from body waves of complex deep-focus earthquakes. *Phys. Earth Plan. Int.*, 21, 83-96.
  
- **Strelitz, R. A. (1989).** Choosing the " best double couple" from a moment-tensor inversion. *Geophys. Journ. Int.*, 99, 811-815.
  
- **Tejedor, J. M. y García, O. (1993).** Función de transferencia de las estaciones de la Red Sísmica Nacional. *Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. Sub. General de Astronomía y Geofísica. Madrid.*
  
- **Vasco, D. W. (1990).** Moment tensor invariants searching for non-double-couple earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 80, 354-371.
  
- **Udías, A. (1985).** Mecanismo focal de los terremotos. *En A. Udías, D. Muñoz y E. Buforn. Mecanismo de los terremotos y tectónica. Editorial Complutense. Madrid. (41-60).*

## Anexo 1

En este apartado se muestran las superficies nodales de DC y CLVD de los casos teóricos estudiados en el capítulo 3.

Las figuras A1.1 a A1.9 corresponden a los casos teóricos de mecanismo focal de desgarre con 0%, 14% y 34% de CLVD respectivamente. Las figuras A1.10 a A1.18 corresponden a los casos teóricos de mecanismo focal con deslizamiento en la dirección de buzamiento (normal) con 0%, 15% y 35% de CLVD, respectivamente y las figuras A1.19 a A1.27 corresponden a los casos teóricos de mecanismo focal vertical con 0%, 14%, y 33% de CLVD, respectivamente.

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=0%

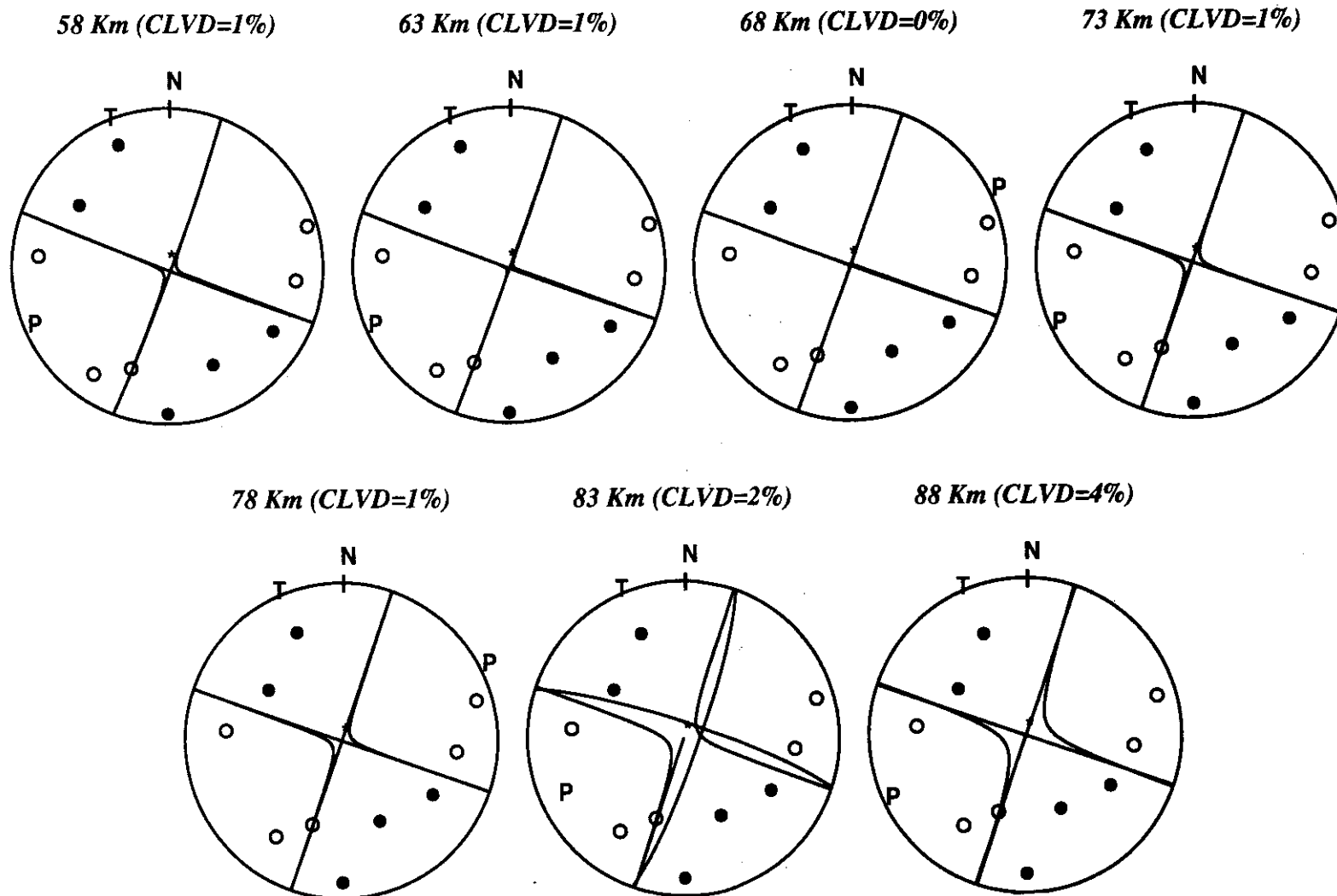


Fig. A1.1. Mecanismo de desgarre con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=0%

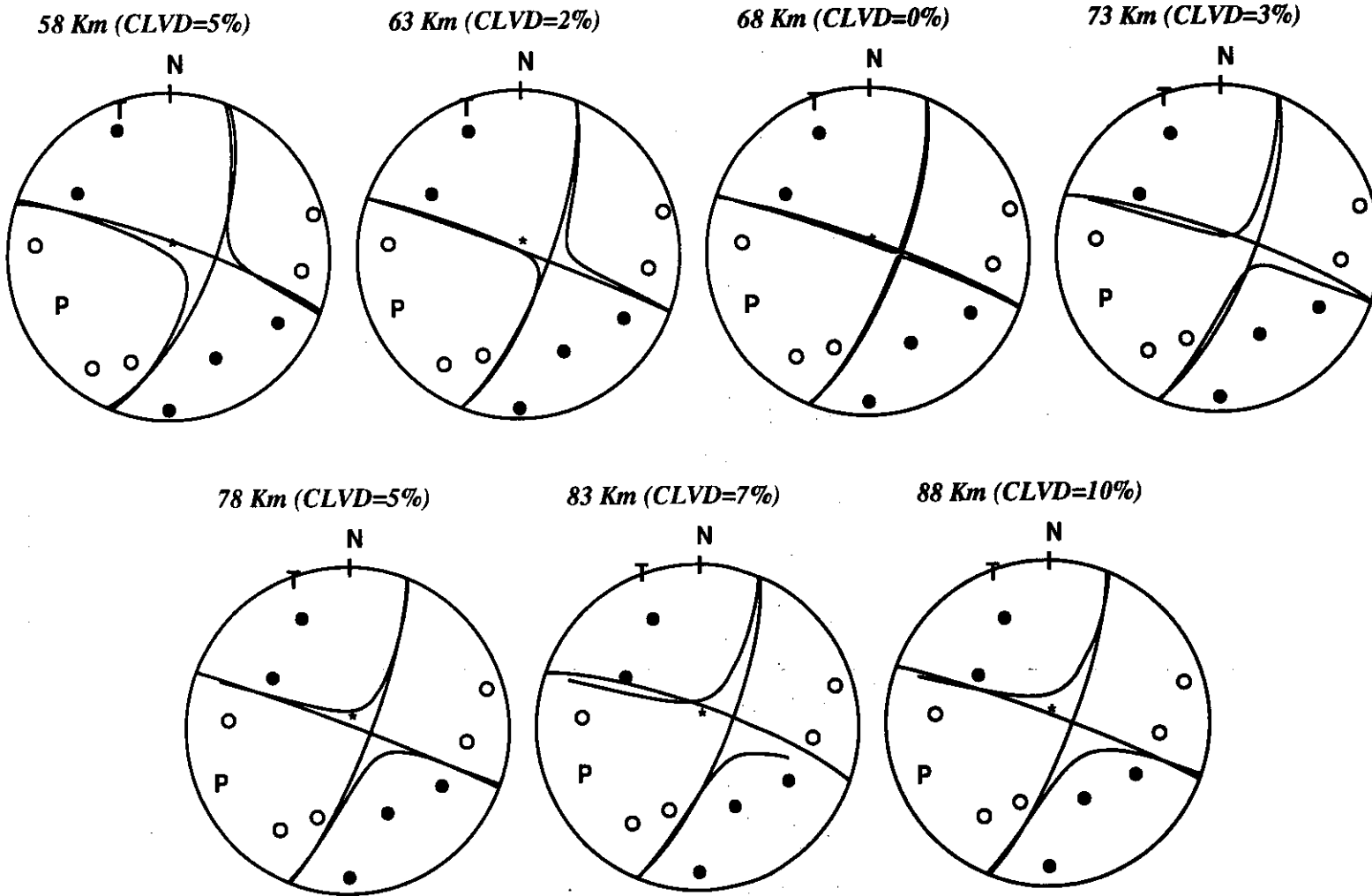


Fig. A1.2. Mecanismo de desgarre con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la Inversión sin corregir la atenuación anelástica. (igual atenuación anelástica en todas estaciones).

## Mecanismo focal desgarré, CLVD=0%

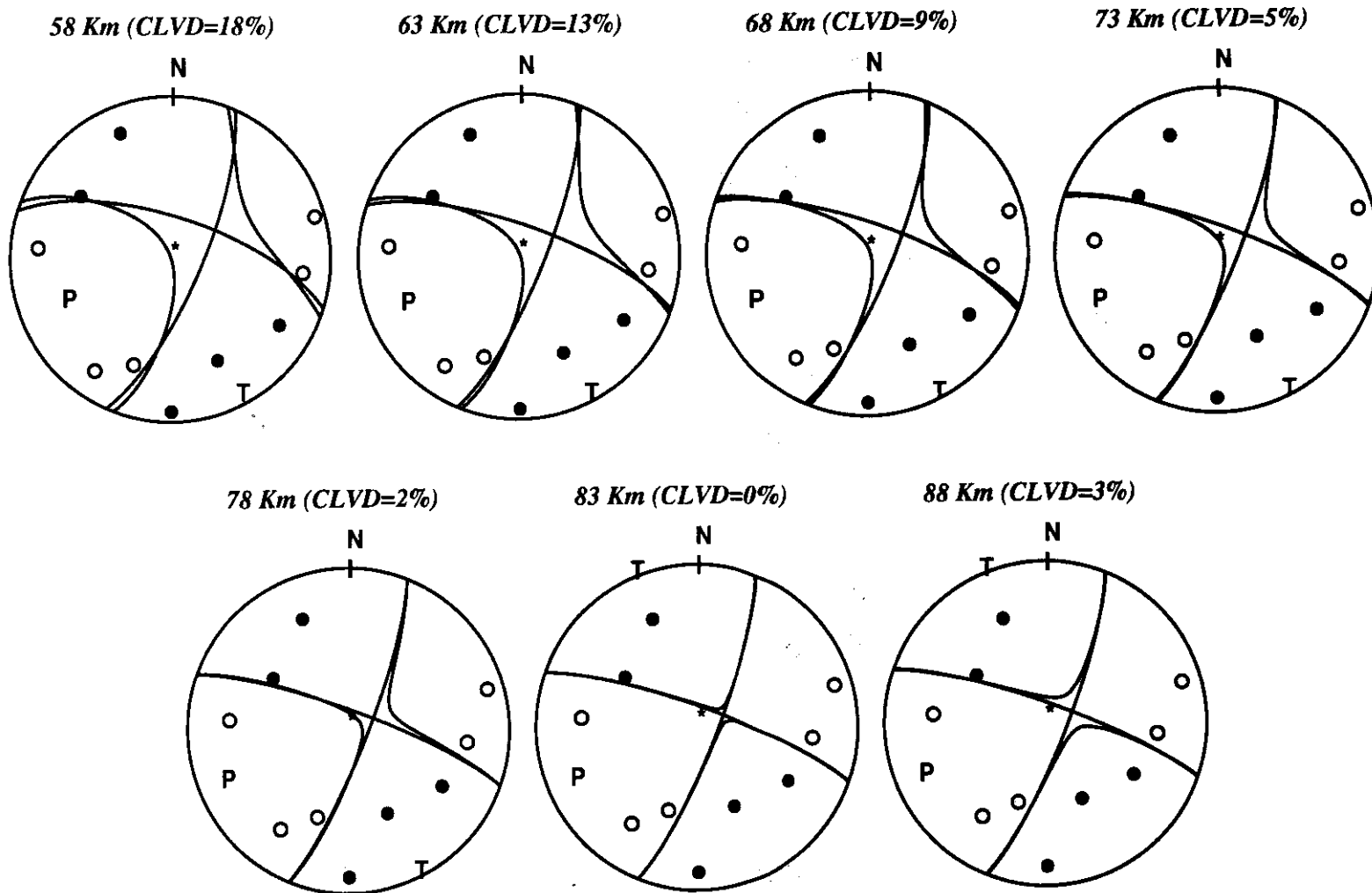
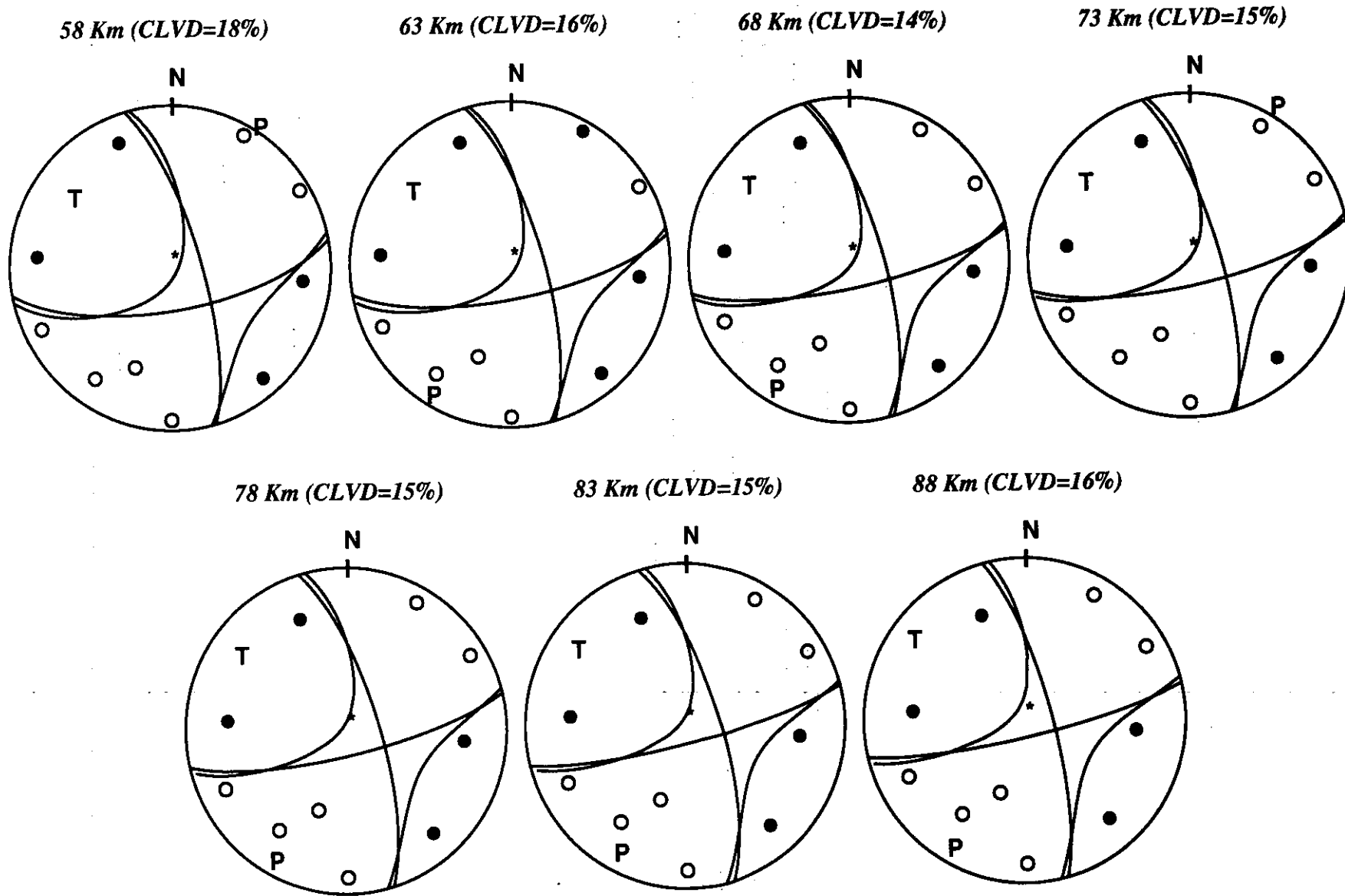


Fig. A1.3. Mecanismo de desgarré con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=14%



217

Anexo 1

Fig. A1.4. Mecanismo de desgarre con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica.

# Mecanismo focal desgarré, CLVD=14%

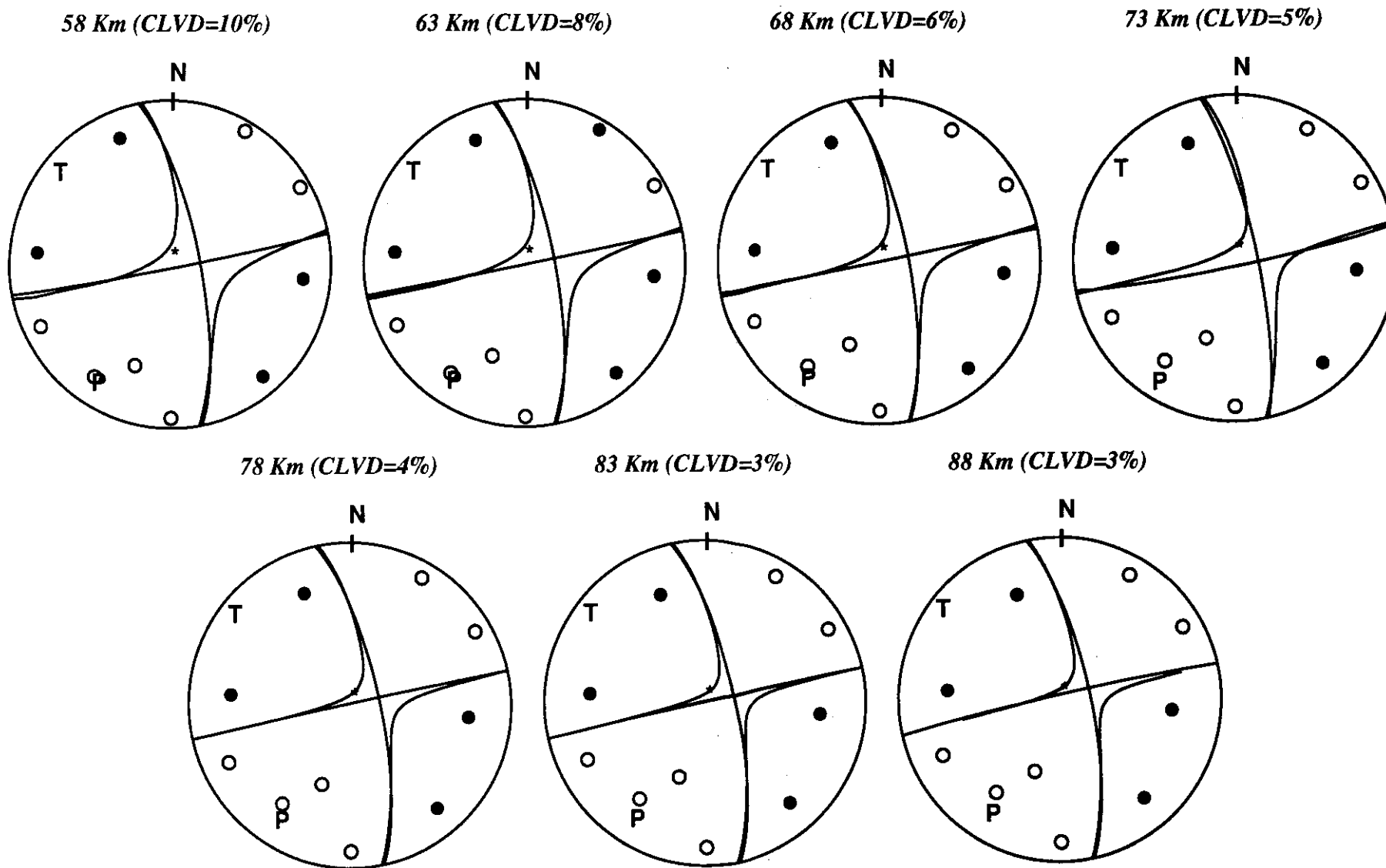
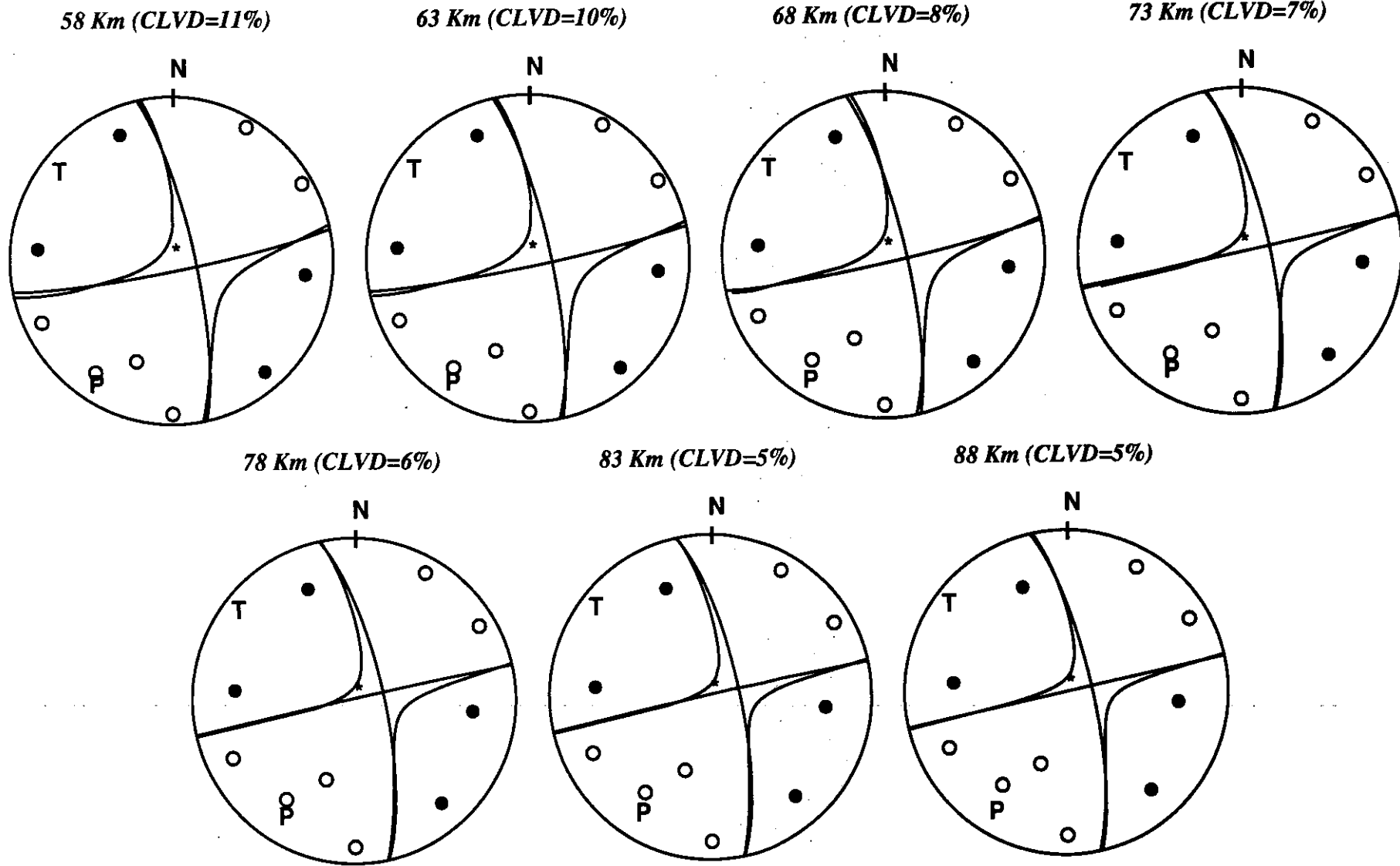


Fig. A1.5. Mecanismo de desgarré con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal desgarrar, CLVD=14%

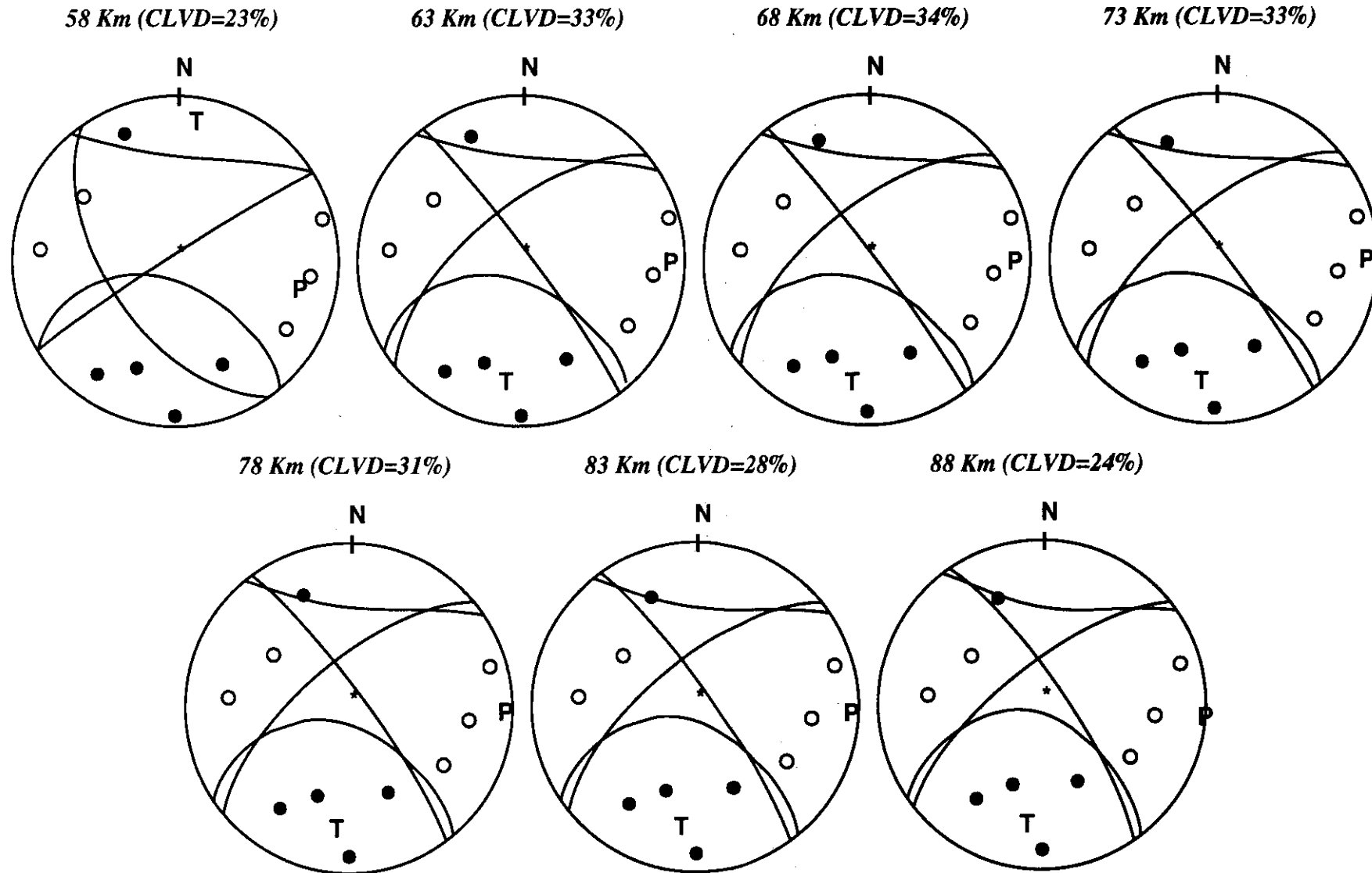


219

Anexo 1

Fig. A1.6. Mecanismo de desgarrar con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=34%

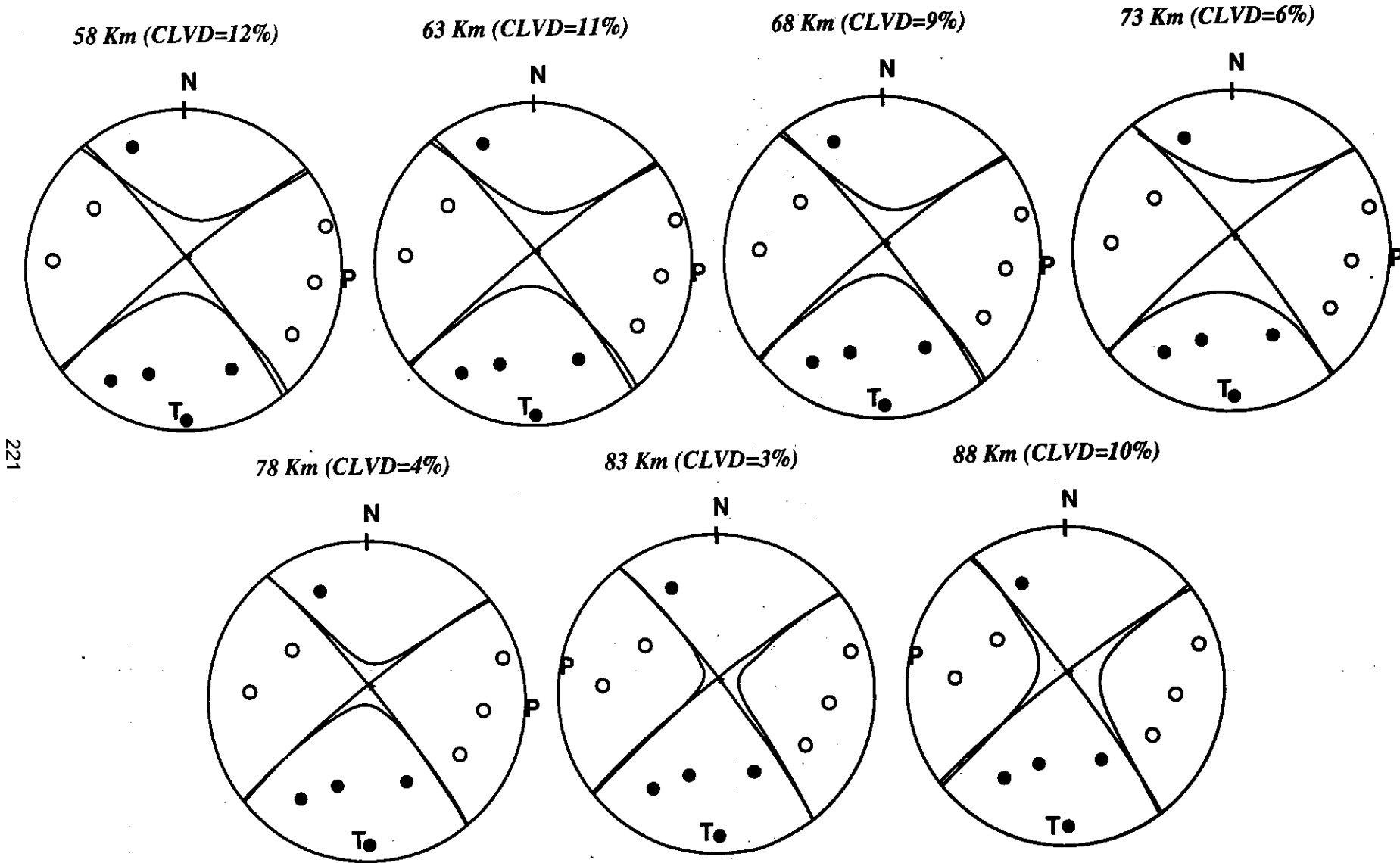


220

Anexo 1

Fig. A1.7. Mecanismo focal de desgarre con 34% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal desgarrre, CLVD=34%

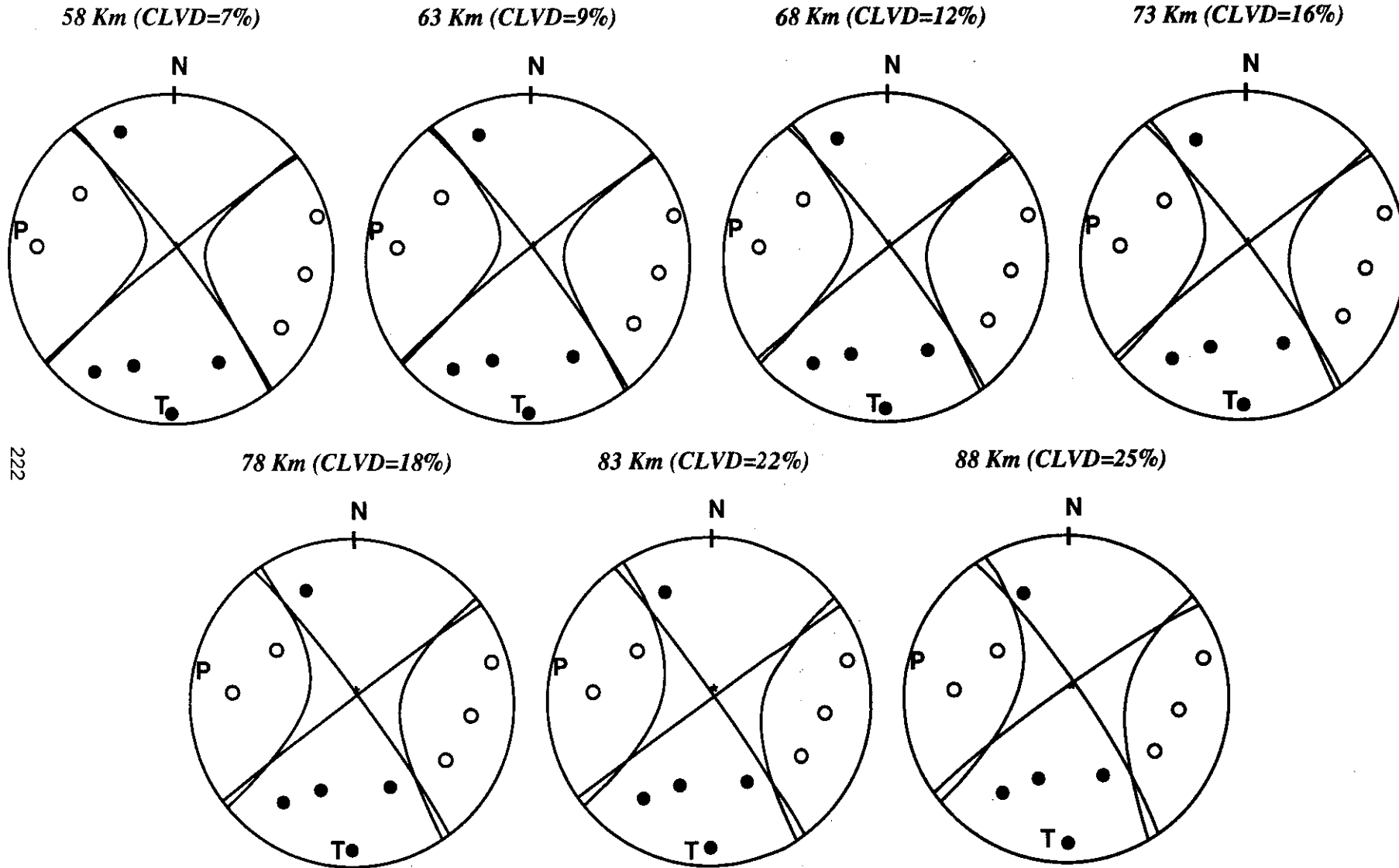


221

Anexo 1

Fig. A1.8. Mecanismo focal de desgarrre con 34% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal desgarre, CLVD=34%



222

Fig. A1.9. Mecanismo focal de desgarre con 34% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=0%

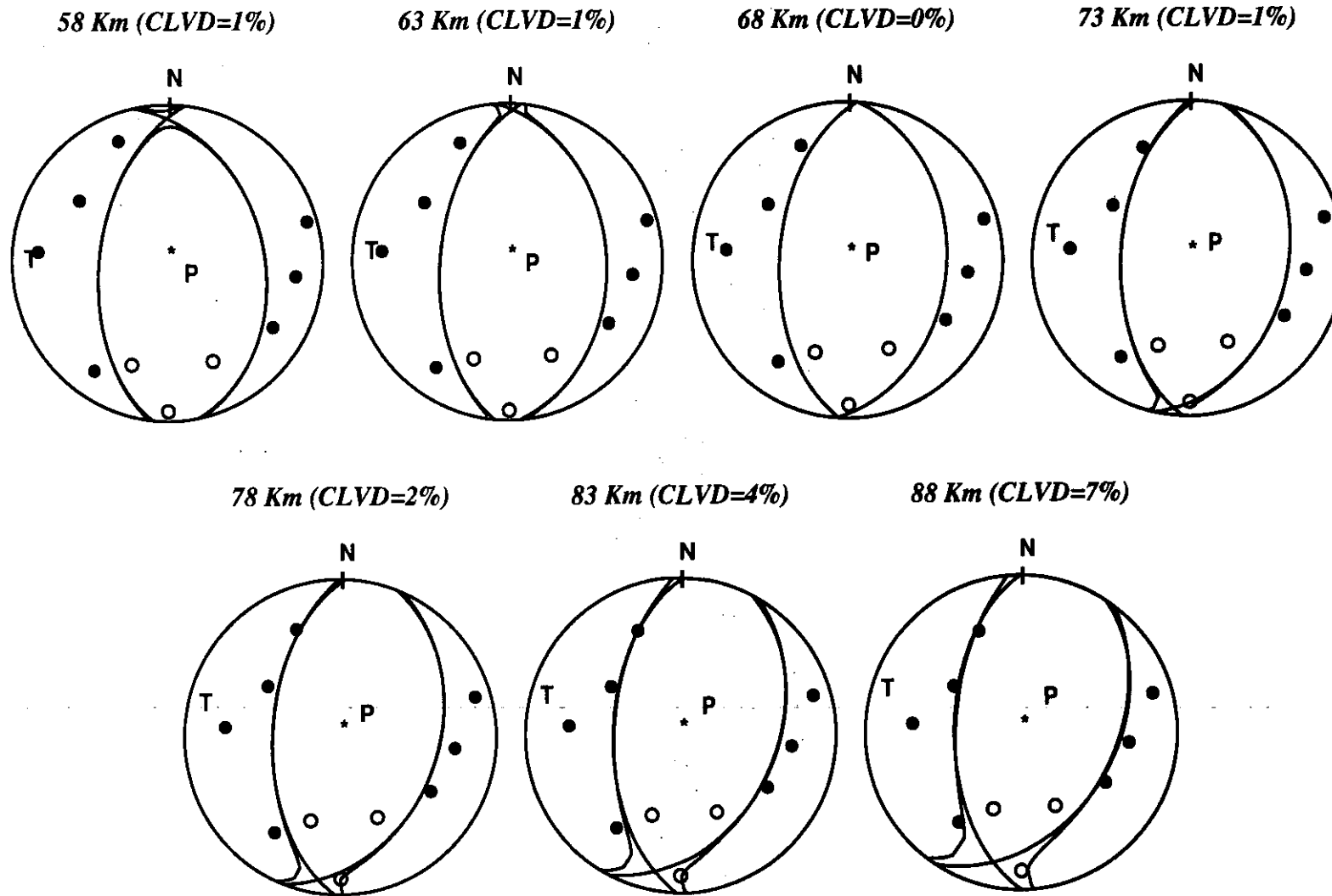


Fig. A1.10. Mecanismo focal normal con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica.

# Mecanismo focal normal, CLVD=0%

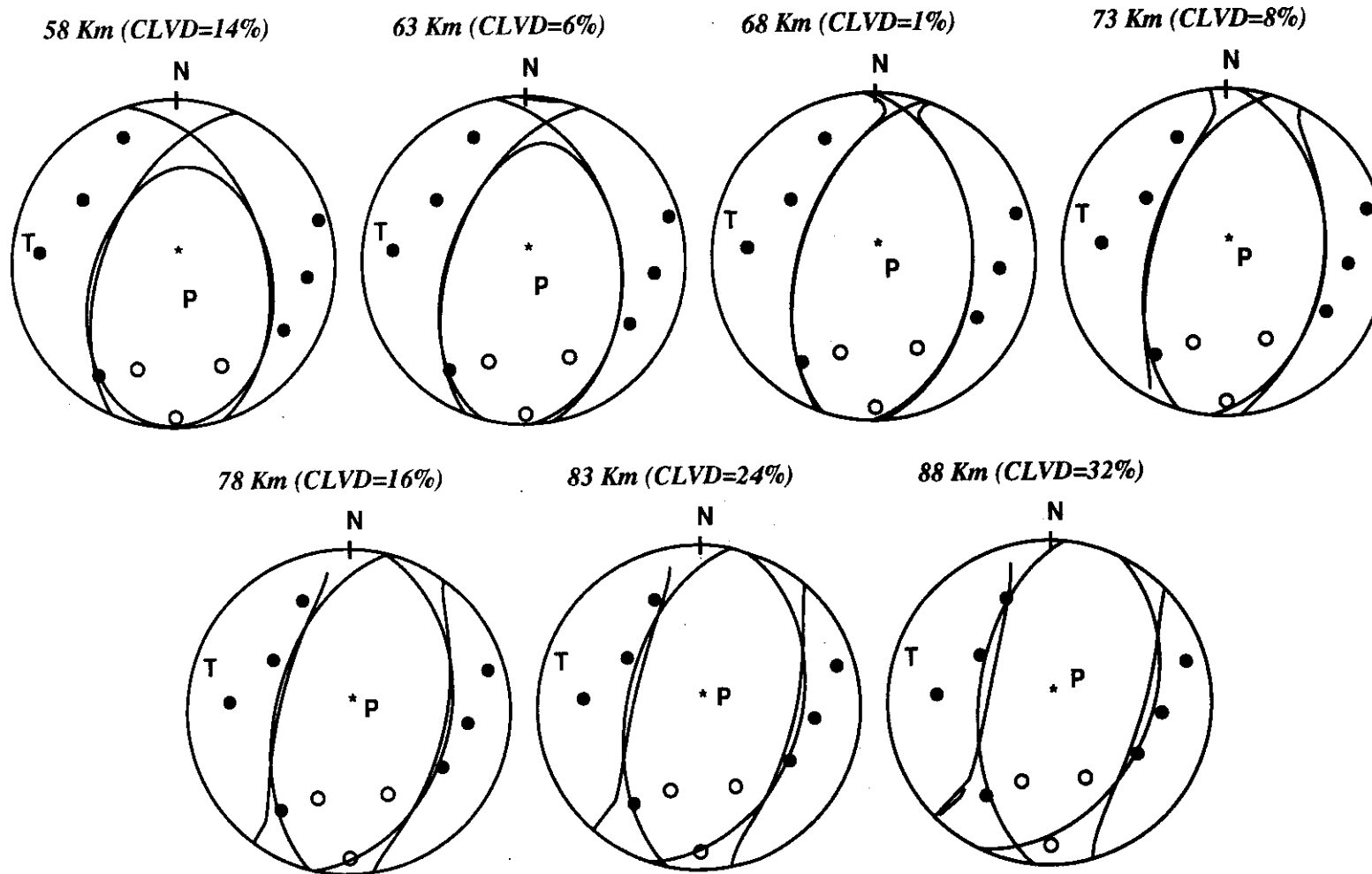


Fig. A1.11. Mecanismo focal normal con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=0%

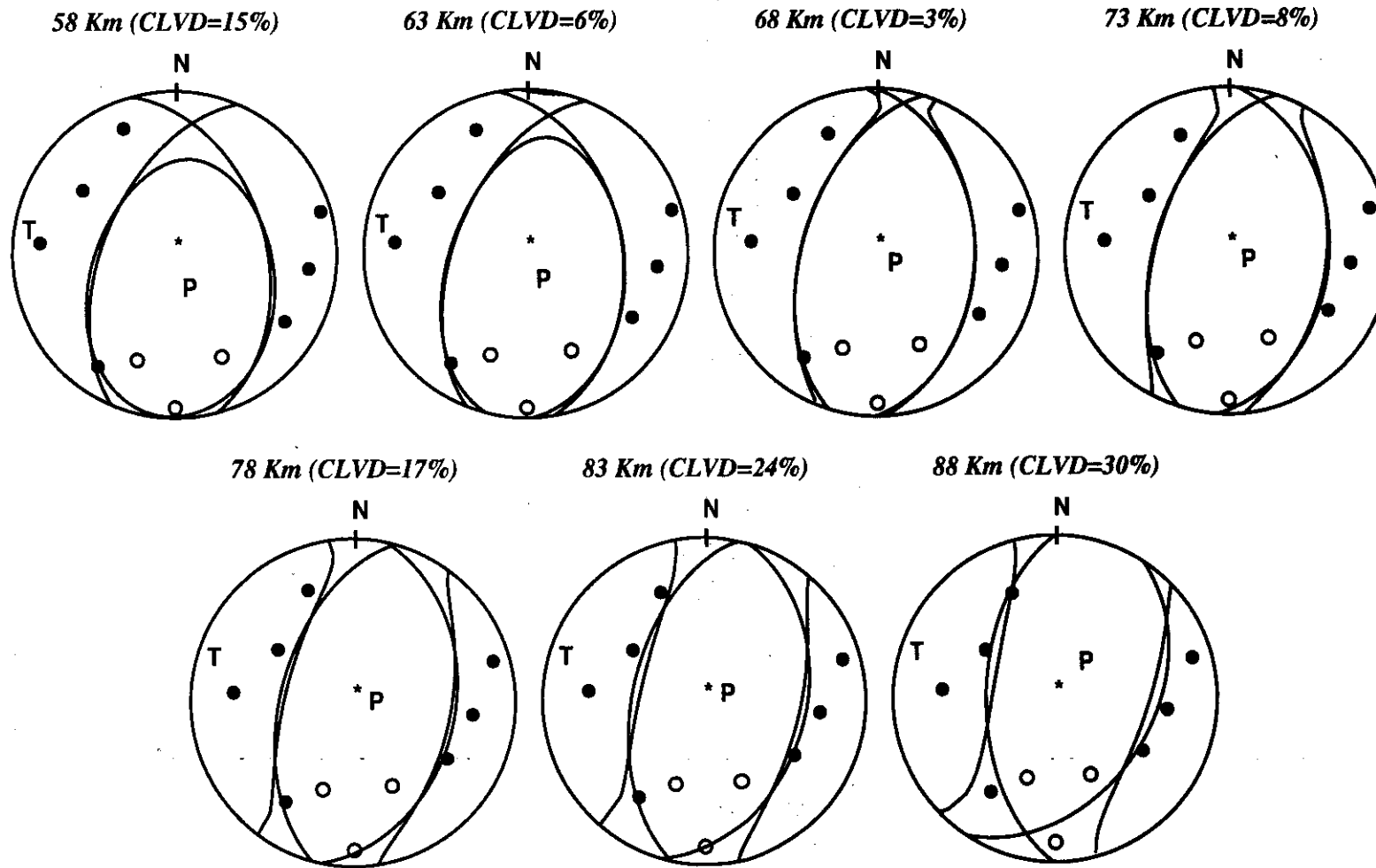
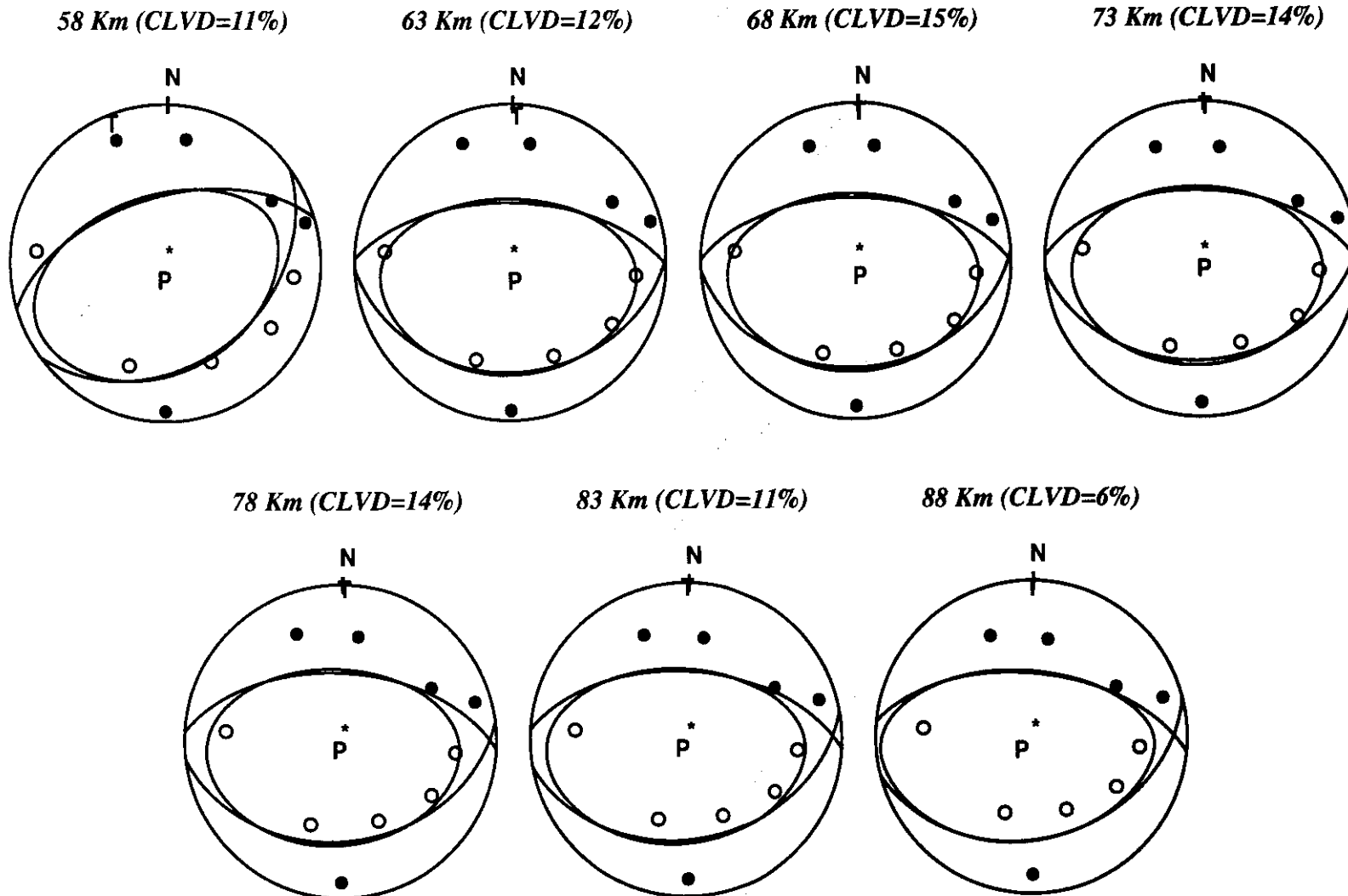


Fig. A1.12. Mecanismo focal normal con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=15%



226

Fig. A1.13. Mecanismo focal normal con 15% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal normal, CLVD=15%

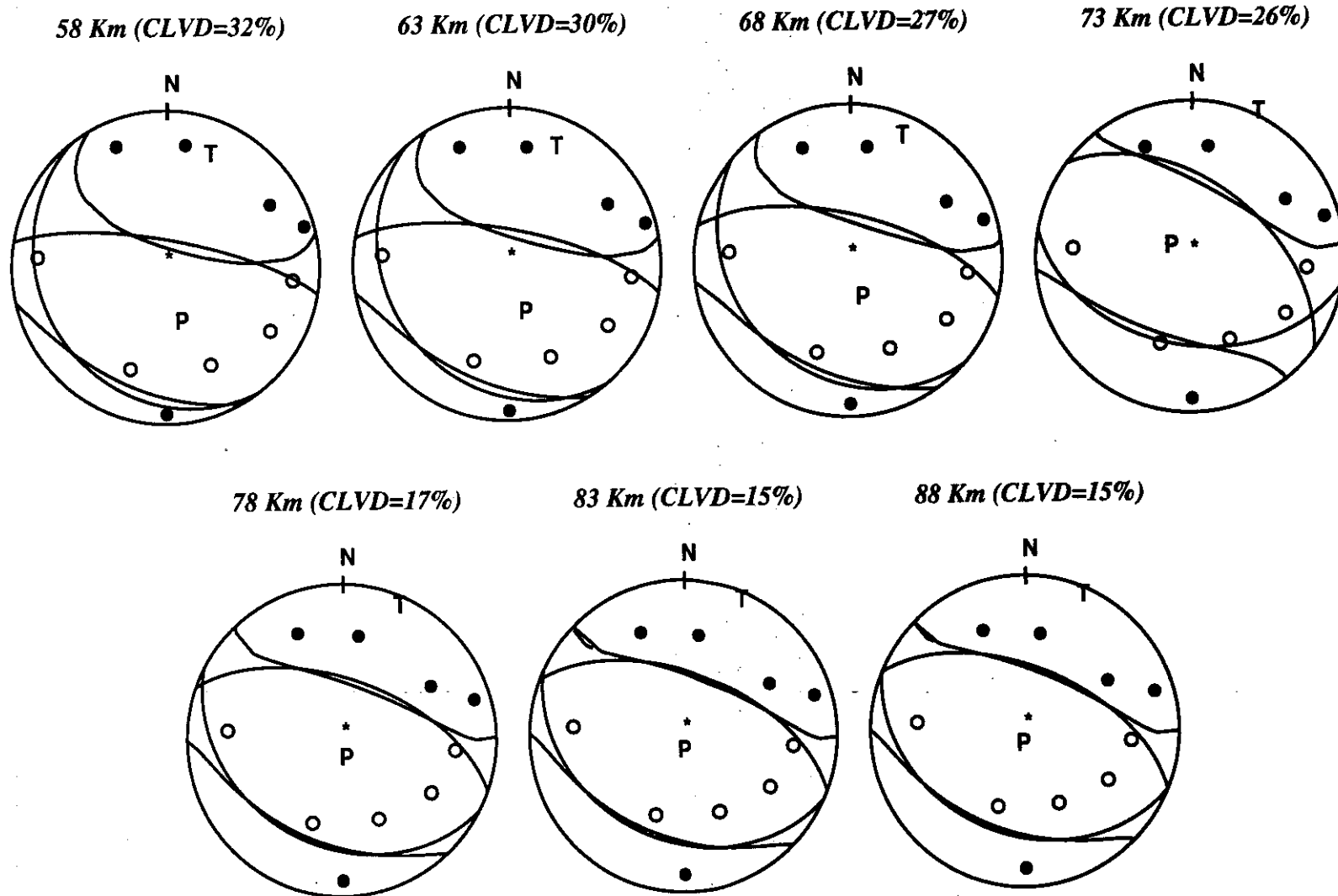
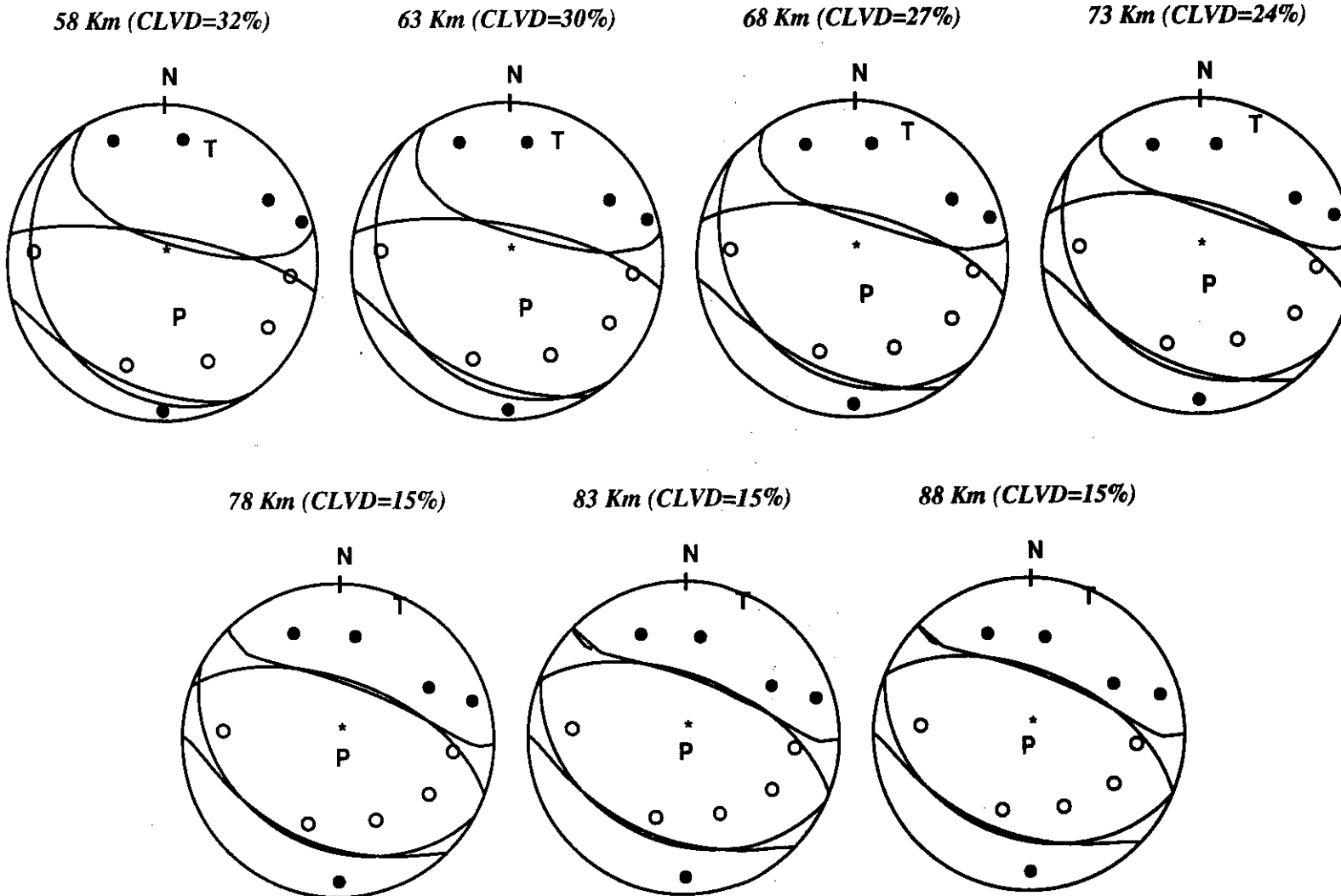


Fig. A1.14. Mecanismo focal normal con 15% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=15%



228

Fig. A1.15. Mecanismo focal normal con 15% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=35%

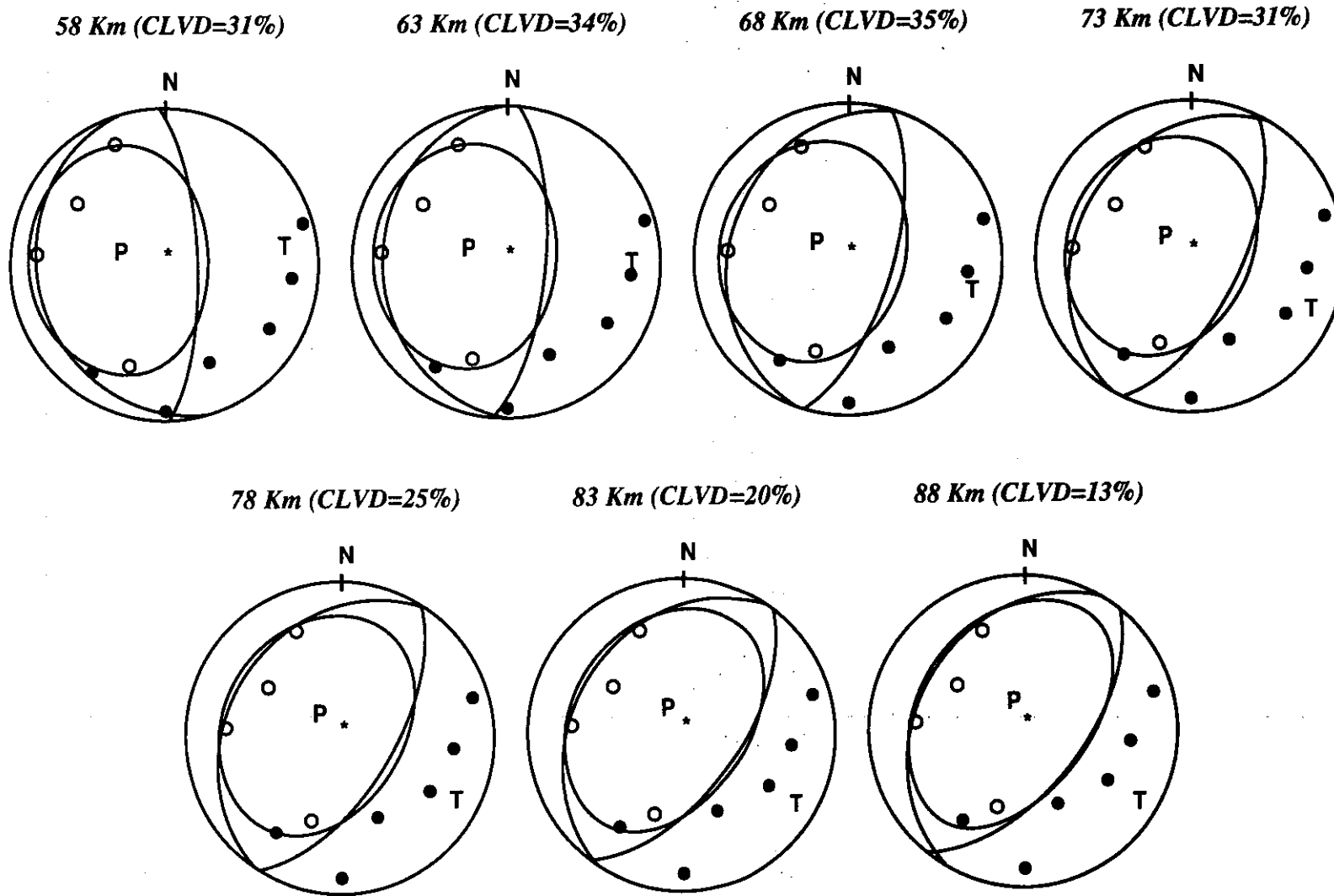
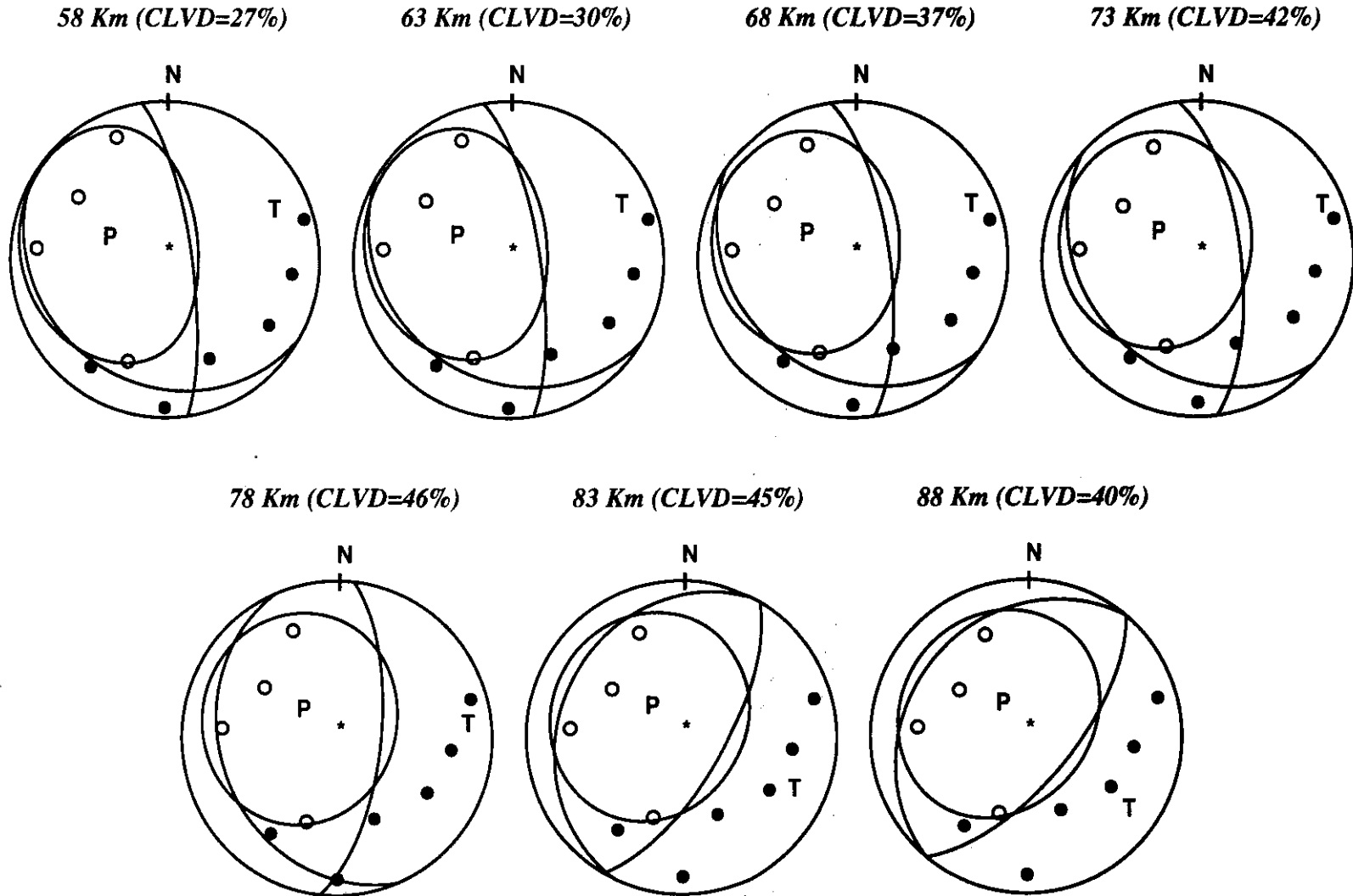


Fig. A1.16. Mecanismo focal normal con 35% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal normal, CLVD=35%



230

Fig. A1.17. Mecanismo focal normal con 35% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal normal, CLVD=35%

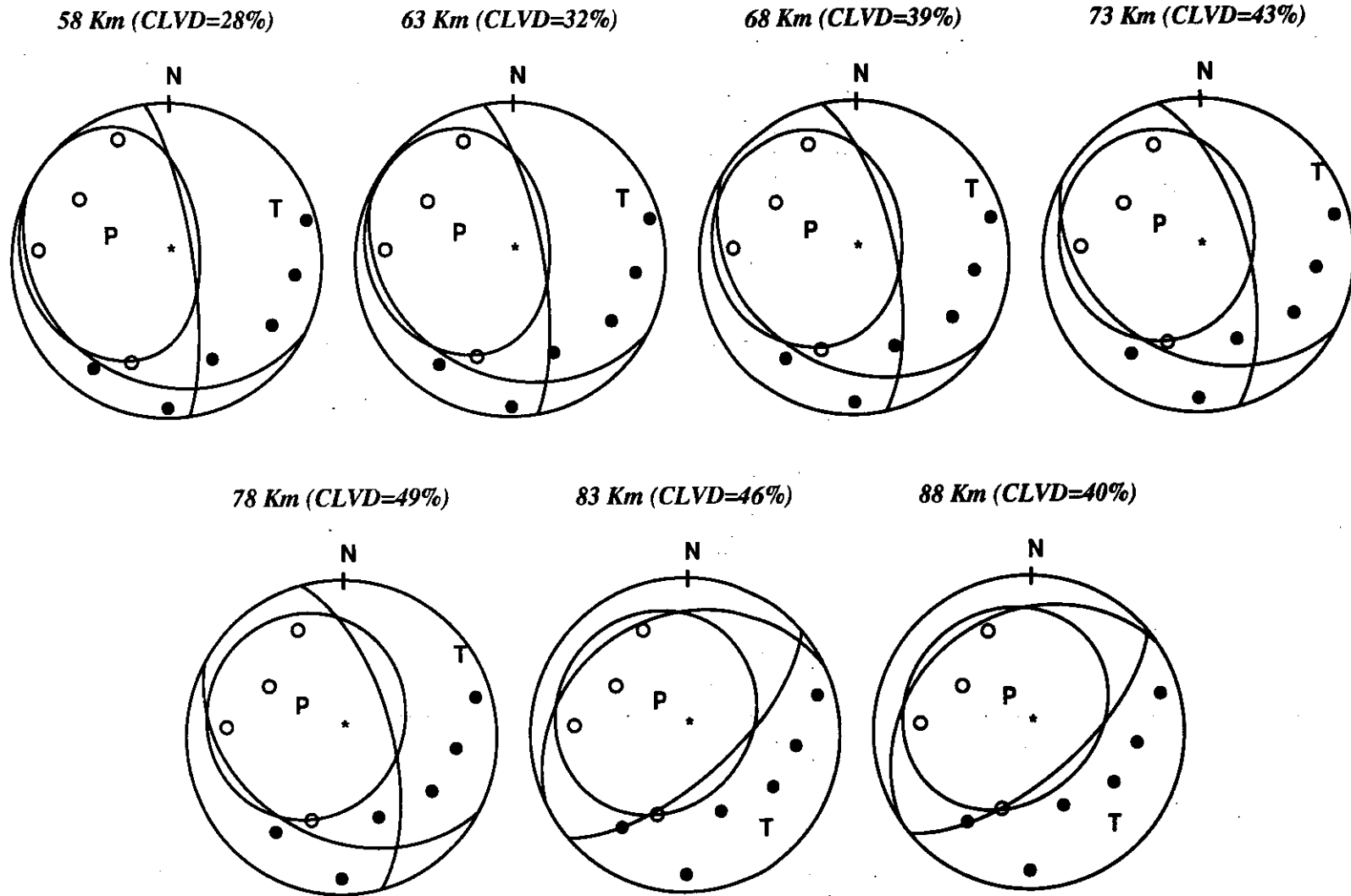
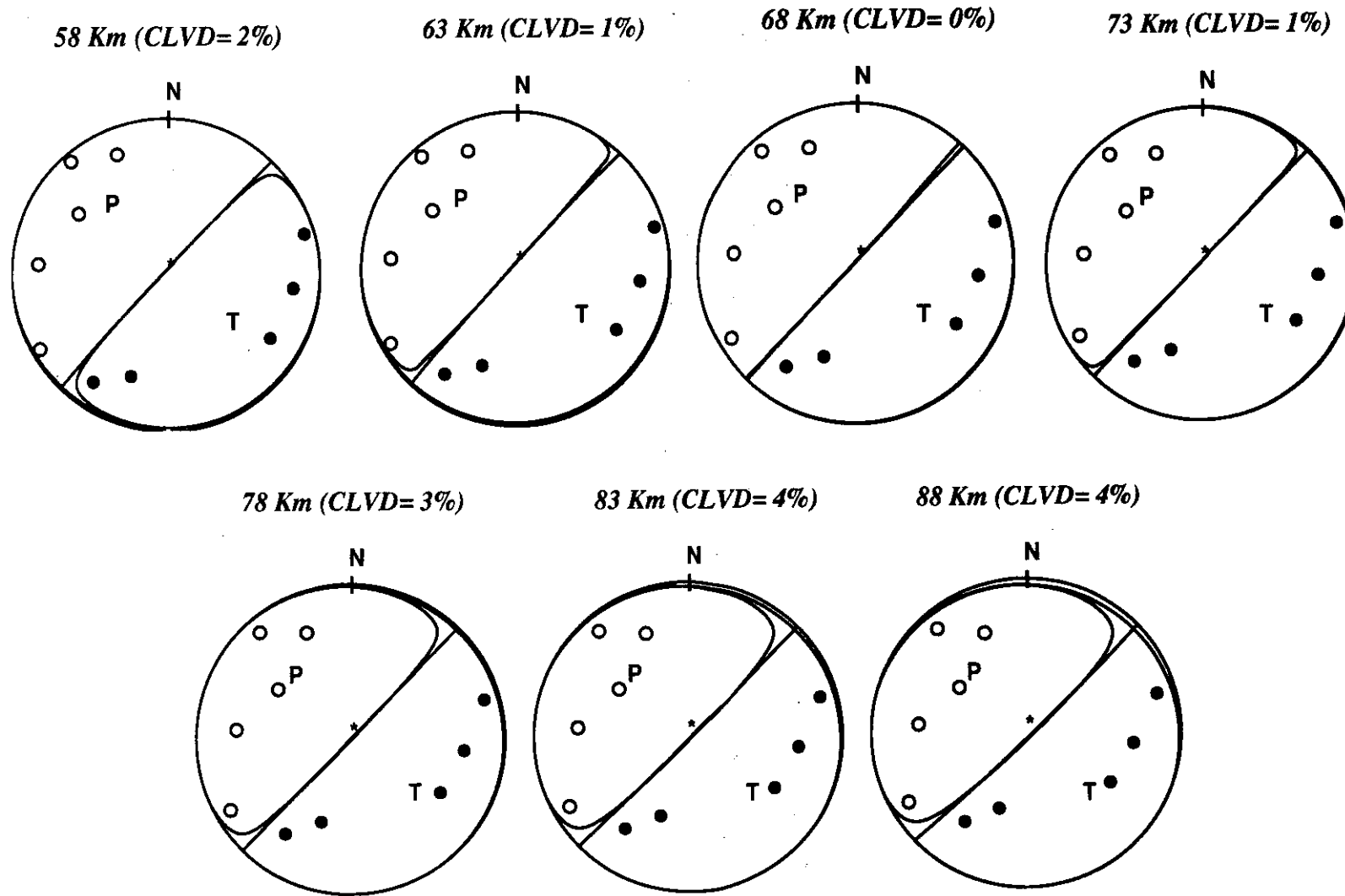


Fig. A1.18. Mecanismo focal normal con 35% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=0%



232

Anexo 1

Fig. A1.19. Mecanismo focal vertical con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal vertical, CLVD=0%

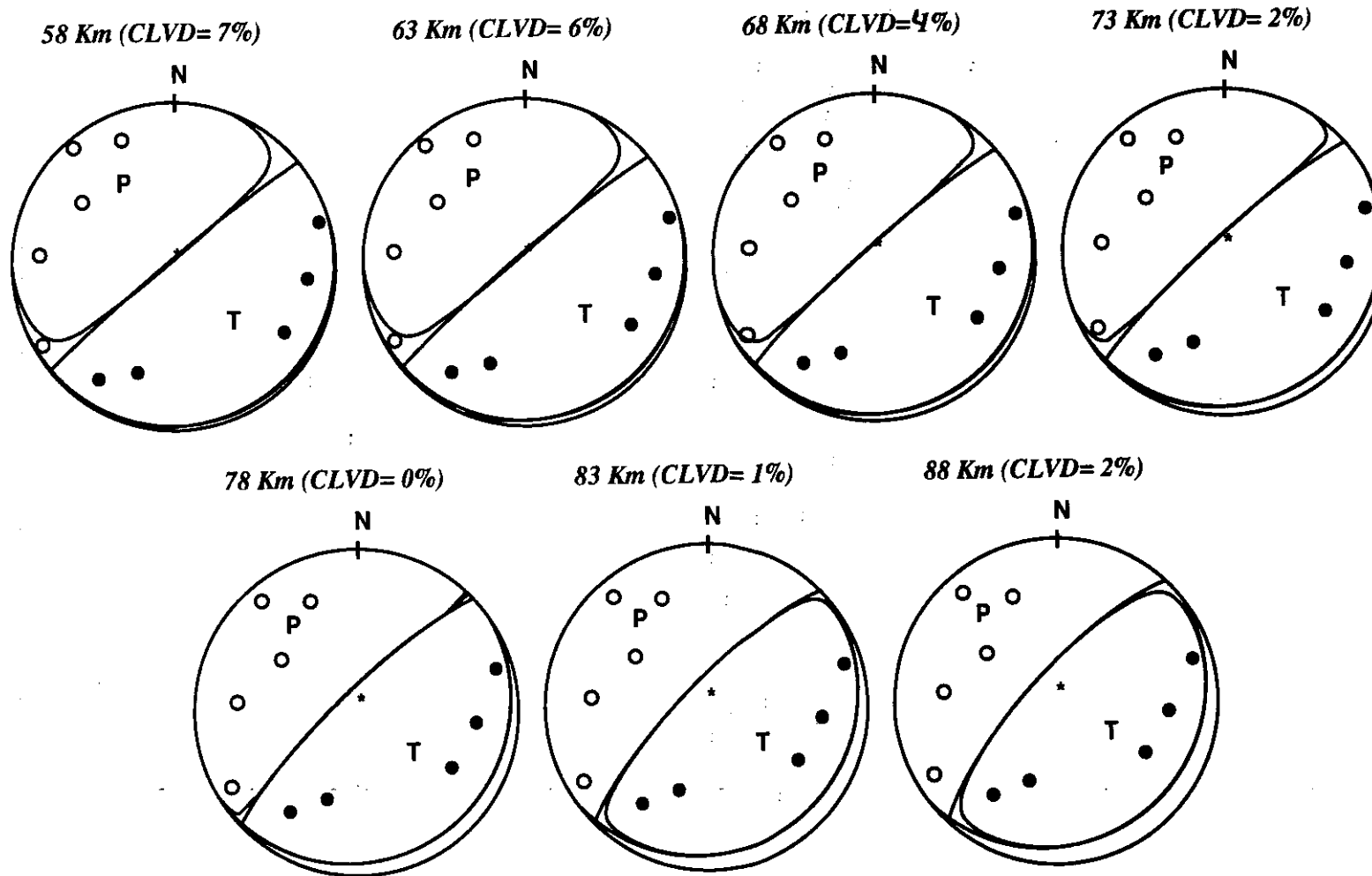


Fig. A1.20. Mecanismo focal vertical con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=0%

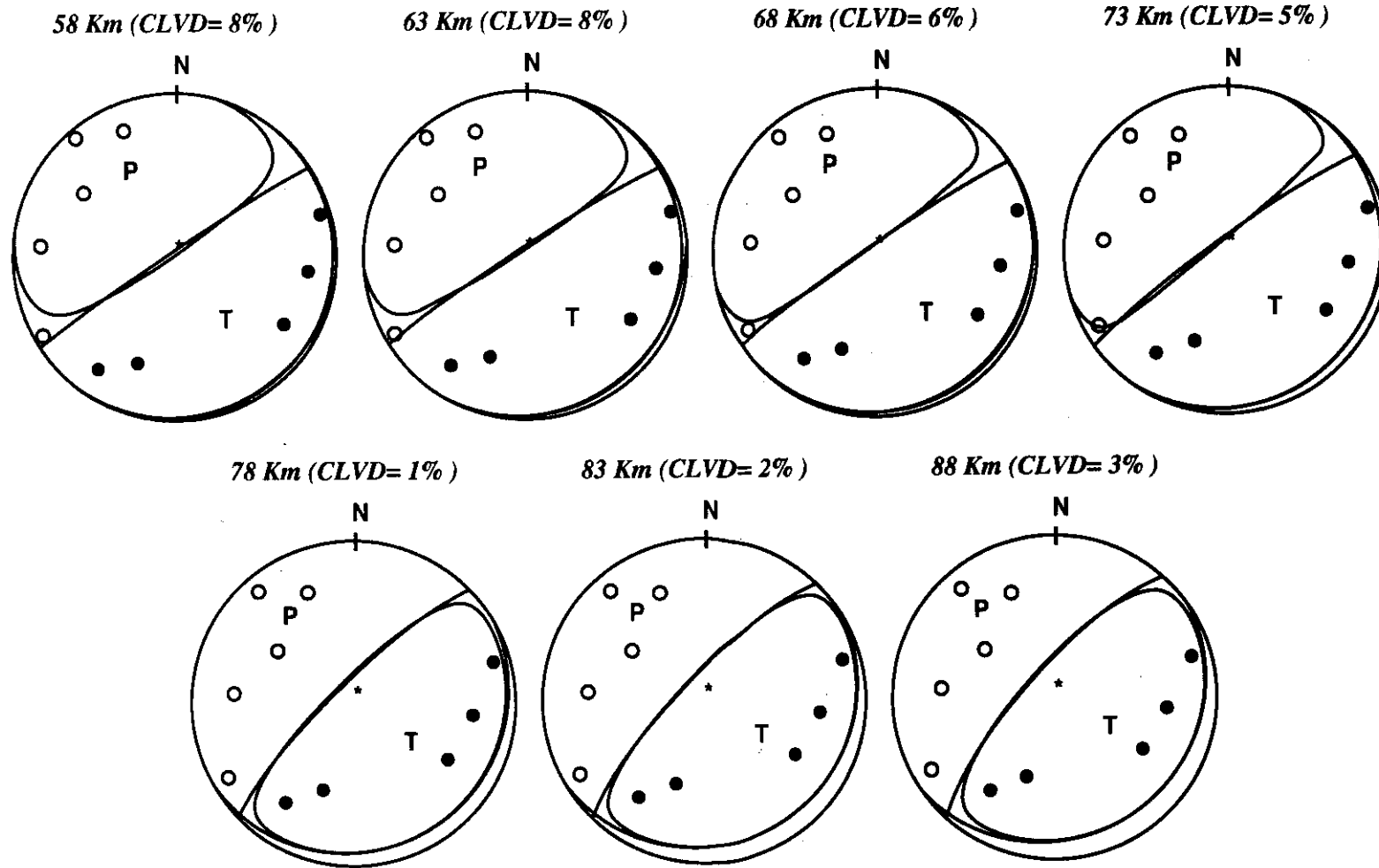


Fig. A1.21. Mecanismo focal vertical con 0% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

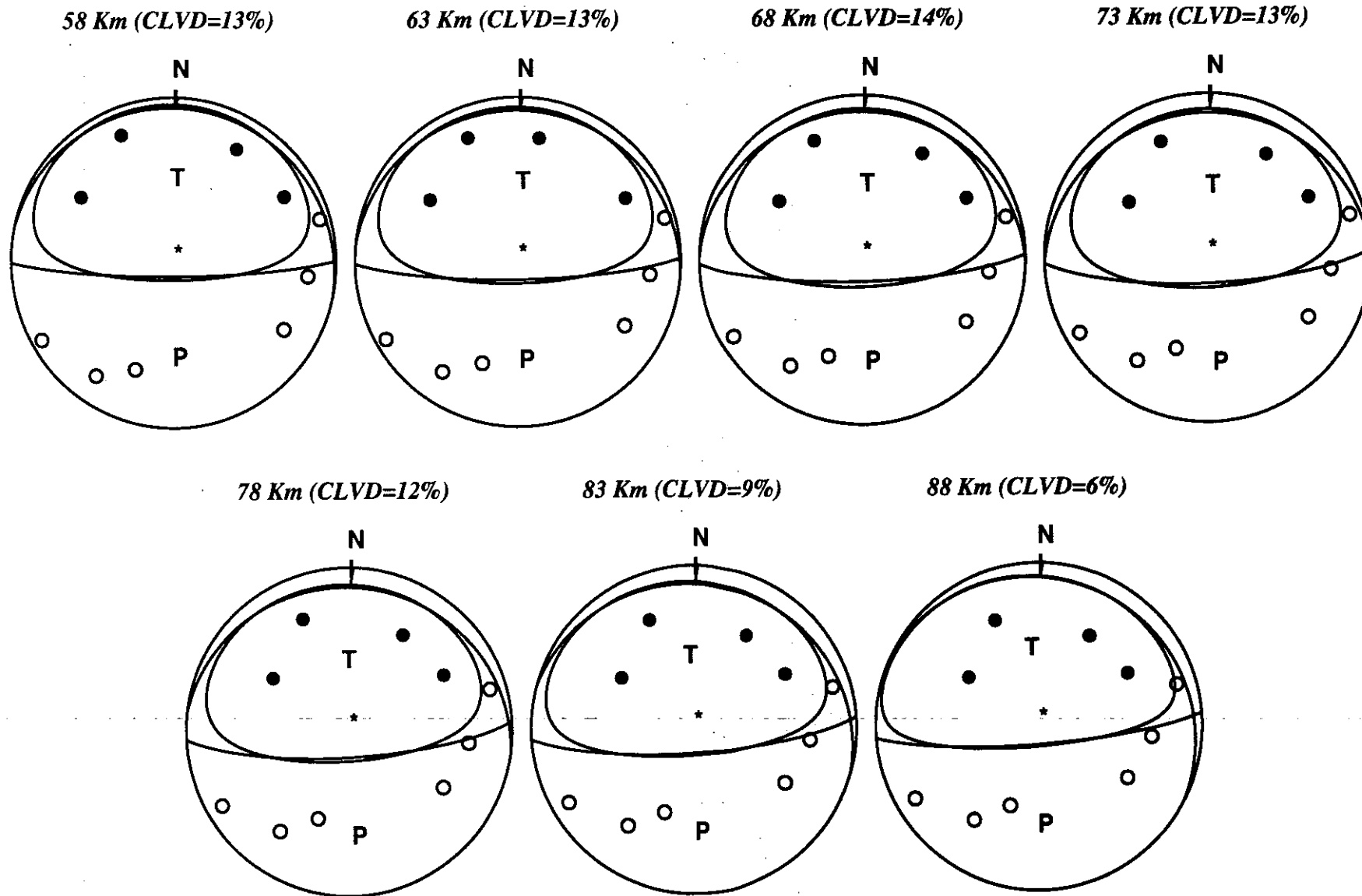
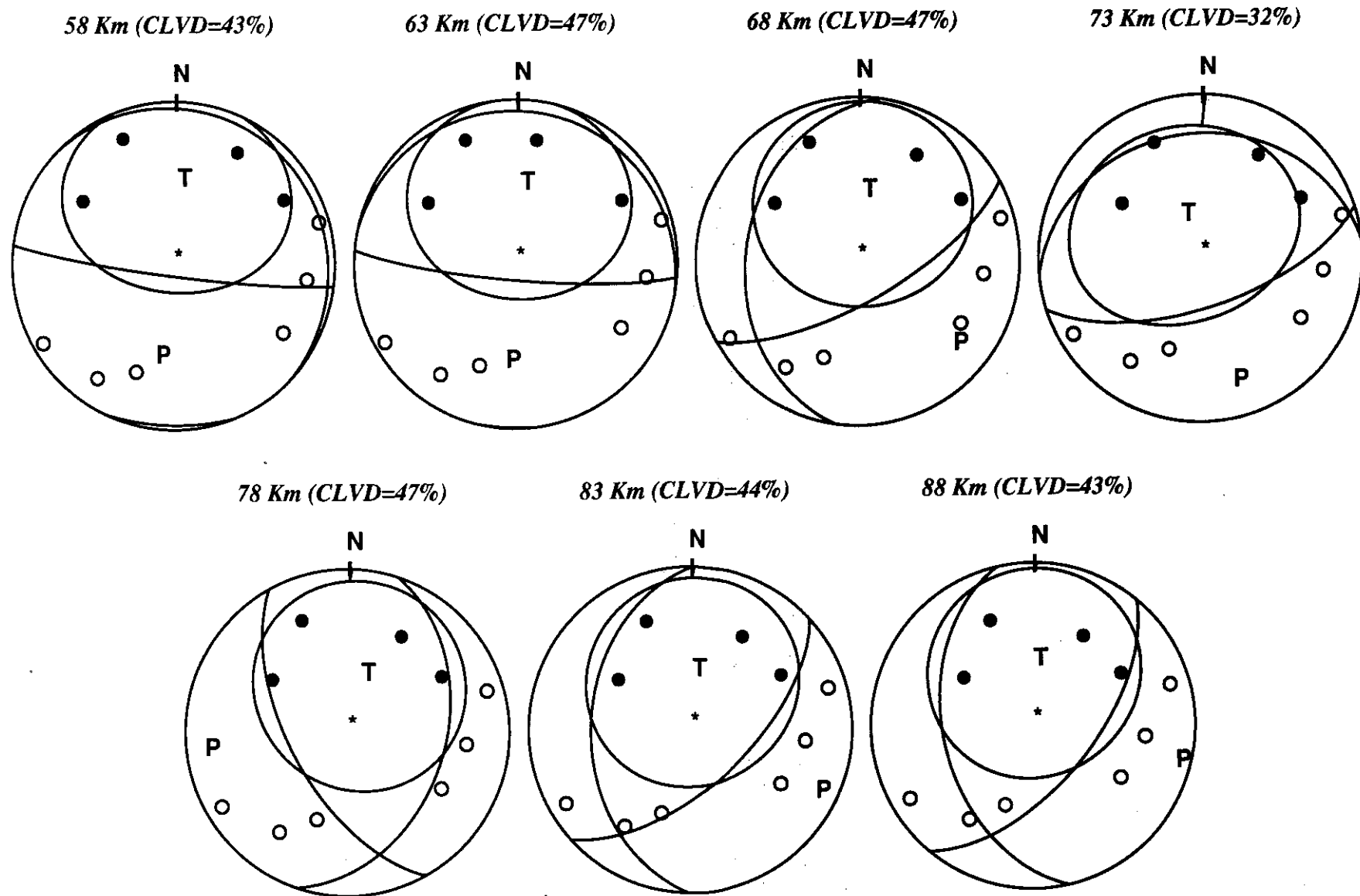


Fig. A1.22. Mecanismo focal vertical con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la Inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica.

# Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

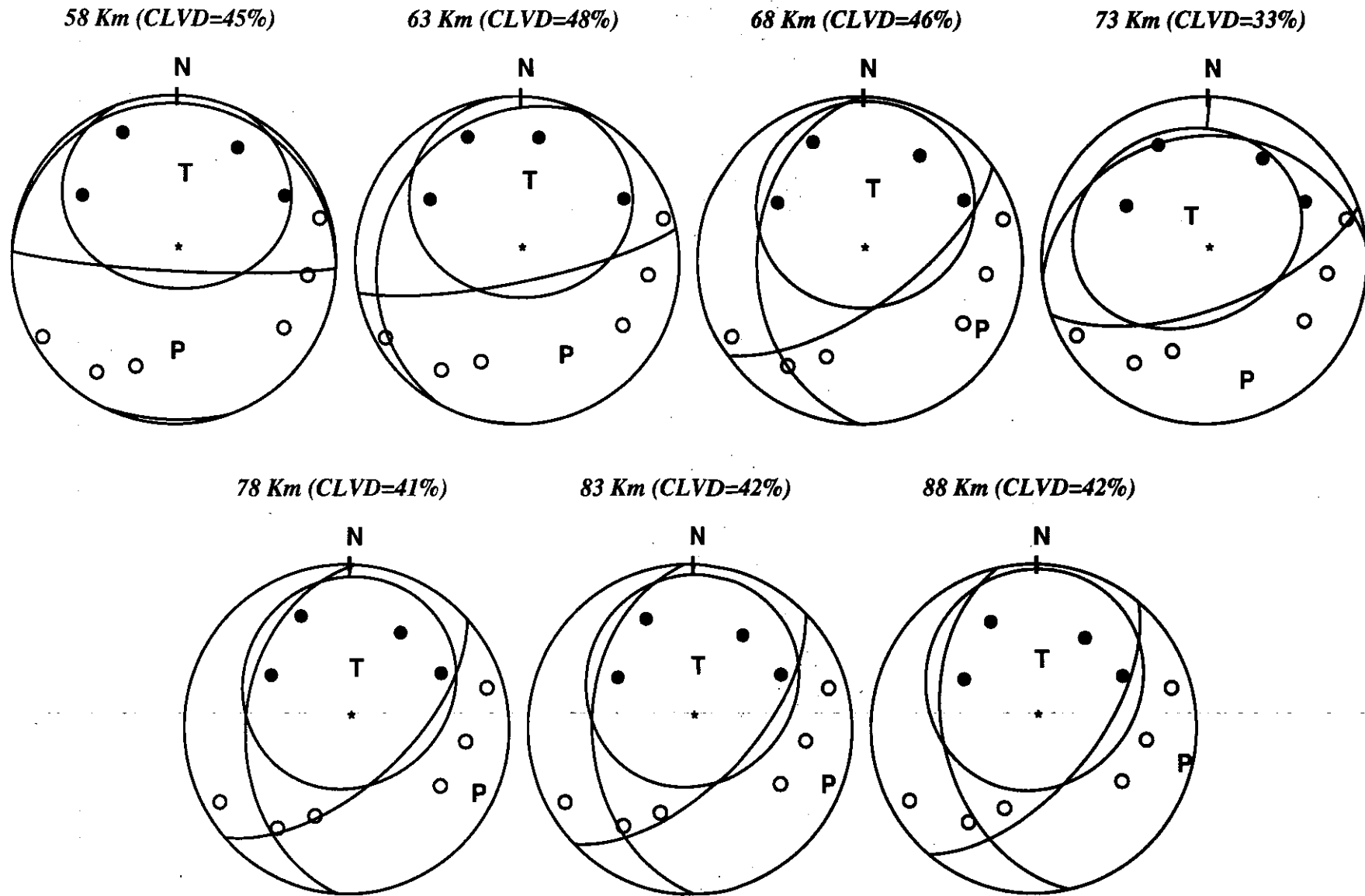


Anexo 1

236

Fig. A1.23. Mecanismo focal vertical con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=14%

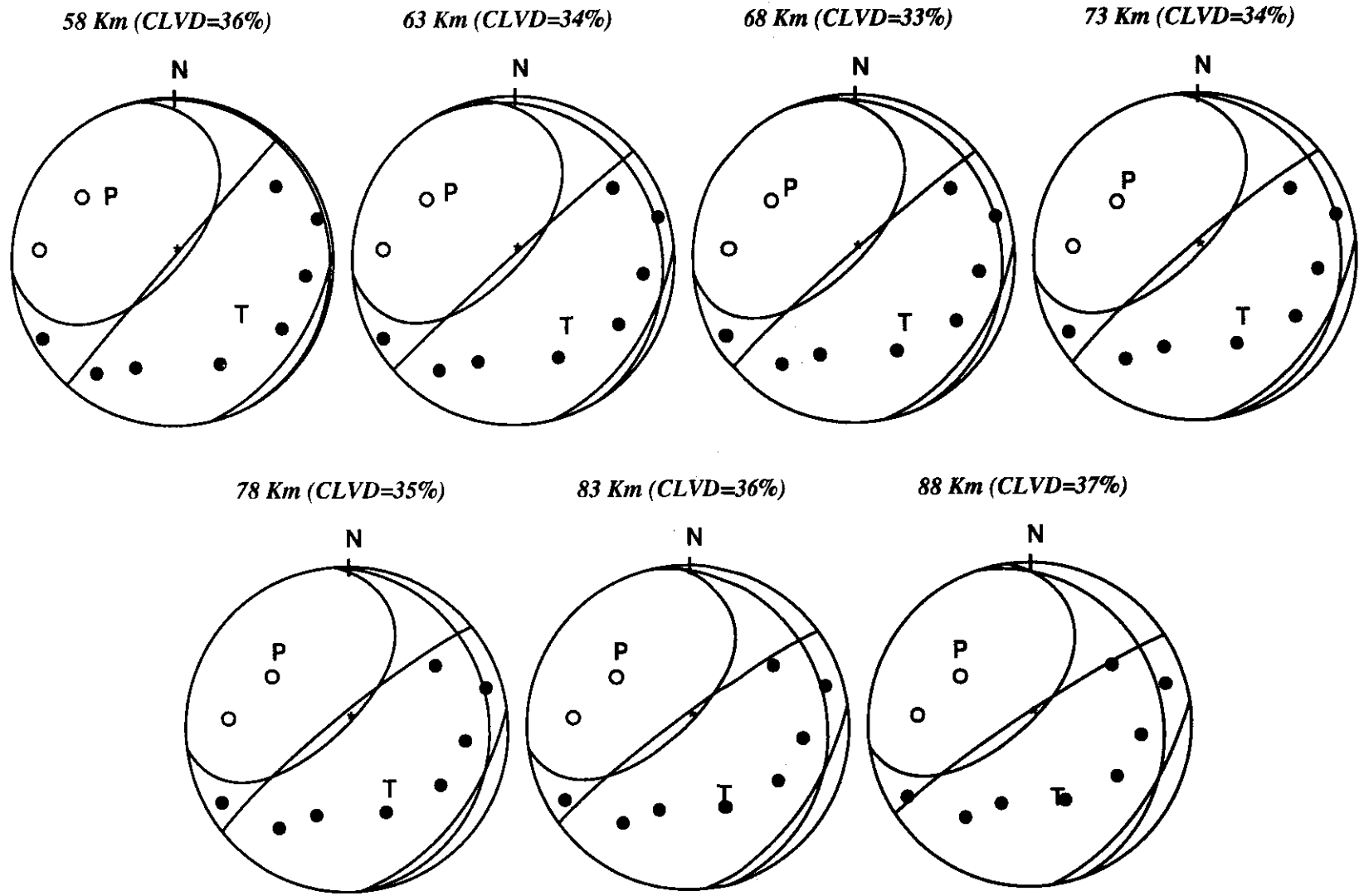


Anexo 1

237

Fig. A1.24. Mecanismo focal vertical con 14% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

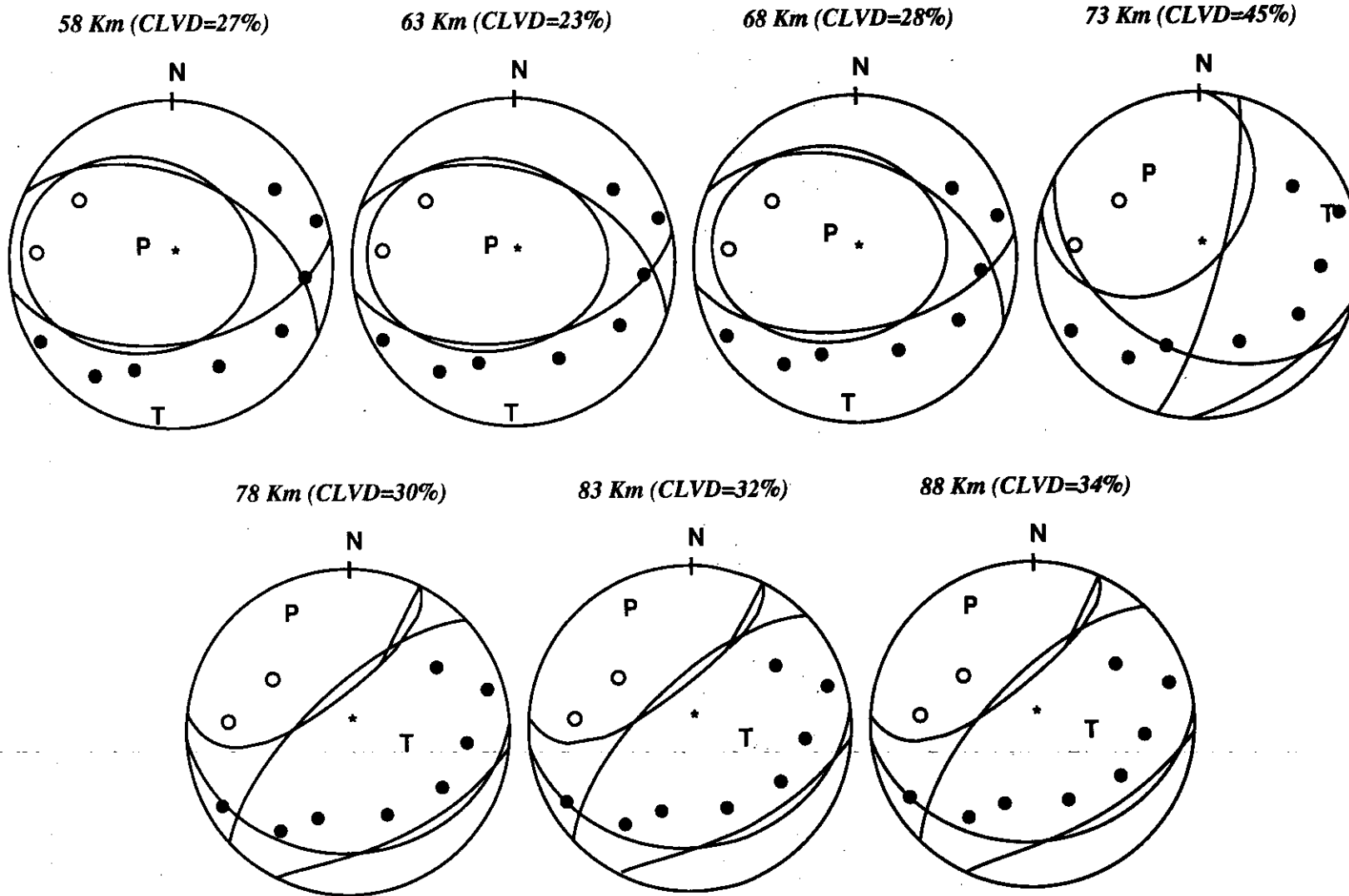
# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%



238

Fig. A1.25. Mecanismo focal vertical con 33% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la inversión corrigiendo el efecto de la atenuación anelástica

# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%



239

Anexo 1

Fig. A1.26. Mecanismo focal vertical con 33% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la Inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (igual en todas las estaciones).

# Mecanismo focal vertical, CLVD=33%

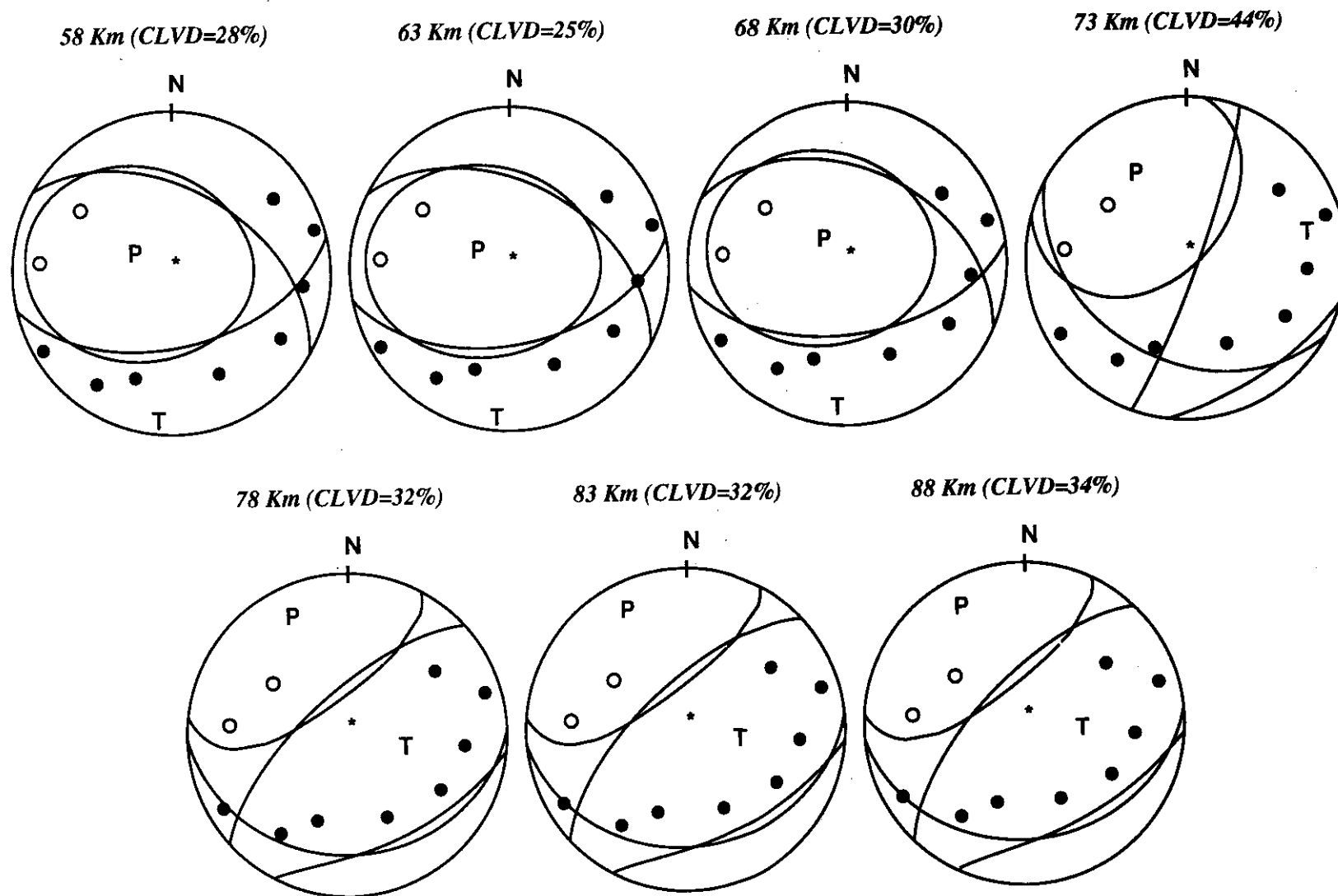


Fig. A1.27. Mecanismo focal vertical con 33% de CLVD. Superficies nodales (DC+CLVD) obtenidos tras la Inversión sin corregir el efecto de la atenuación anelástica (varía entre estaciones).

## Anexo 2

En este apartado se muestran los ajustes realizados entre los sismogramas observados correspondientes a los terremotos del sur de España seleccionados, y los sismogramas teóricos, contruidos utilizando las soluciones obtenidas en las diferentes inversiones realizadas en el capítulo 4. También se muestra el valor del rms existente entre sismogramas observados y teóricos.

Las figuras A2.1 a A2.14 corresponden al terremoto del 27-Marzo-1987, las figuras A2.15 a A2.38 al terremoto del 19-Julio-1989, las figuras A2.39 a A2.49 al terremoto del 6-Febrero-1990, y las figuras A2.50 a A2.58 al sismo del 14-Marzo-1992.

27 Marzo 1987 (h=39 Km, rms=0.423)

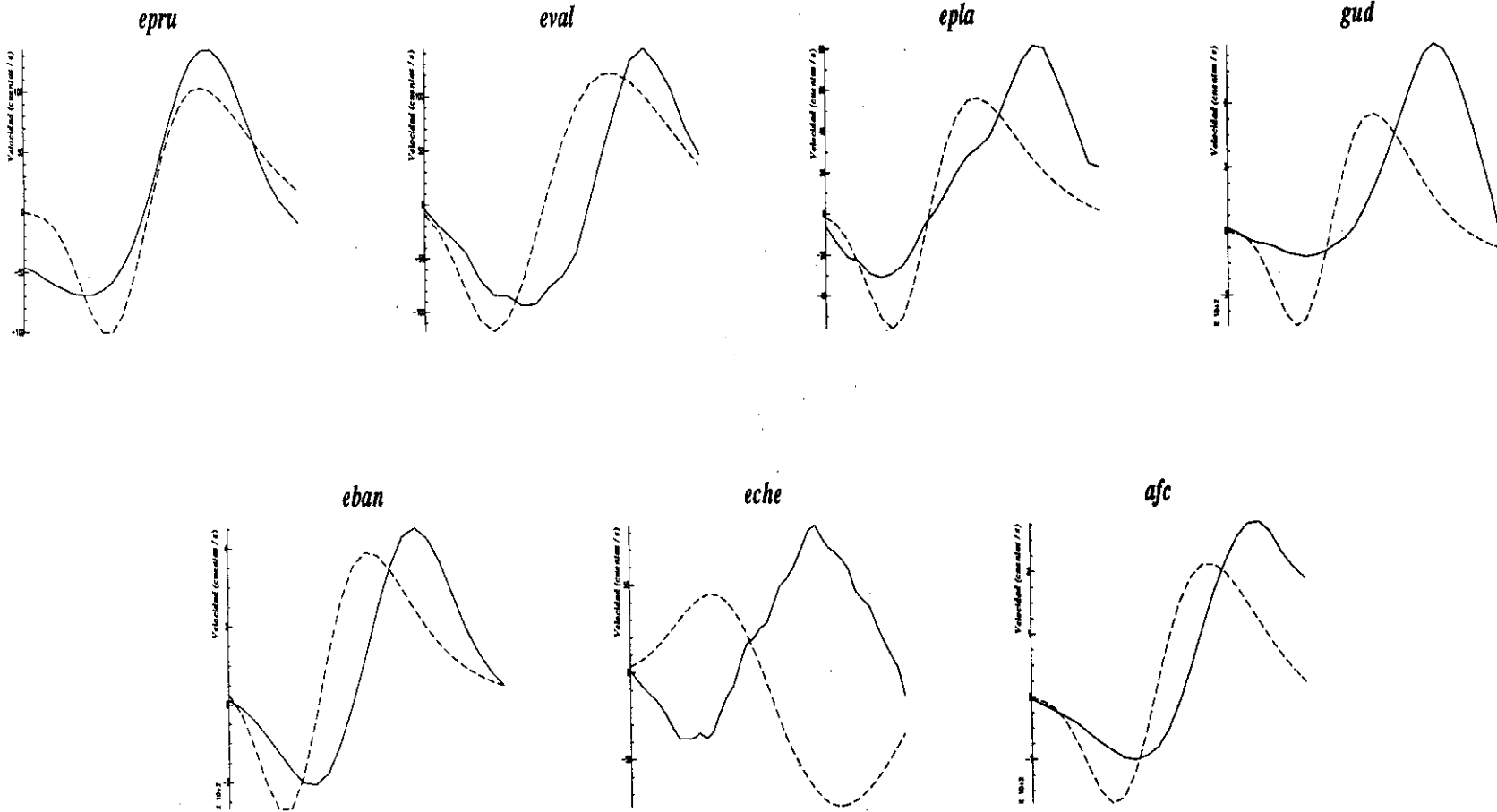


Fig. A2.1. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 39km.

# 27 Marzo 1987 (h=49 Km, rms=0.348)

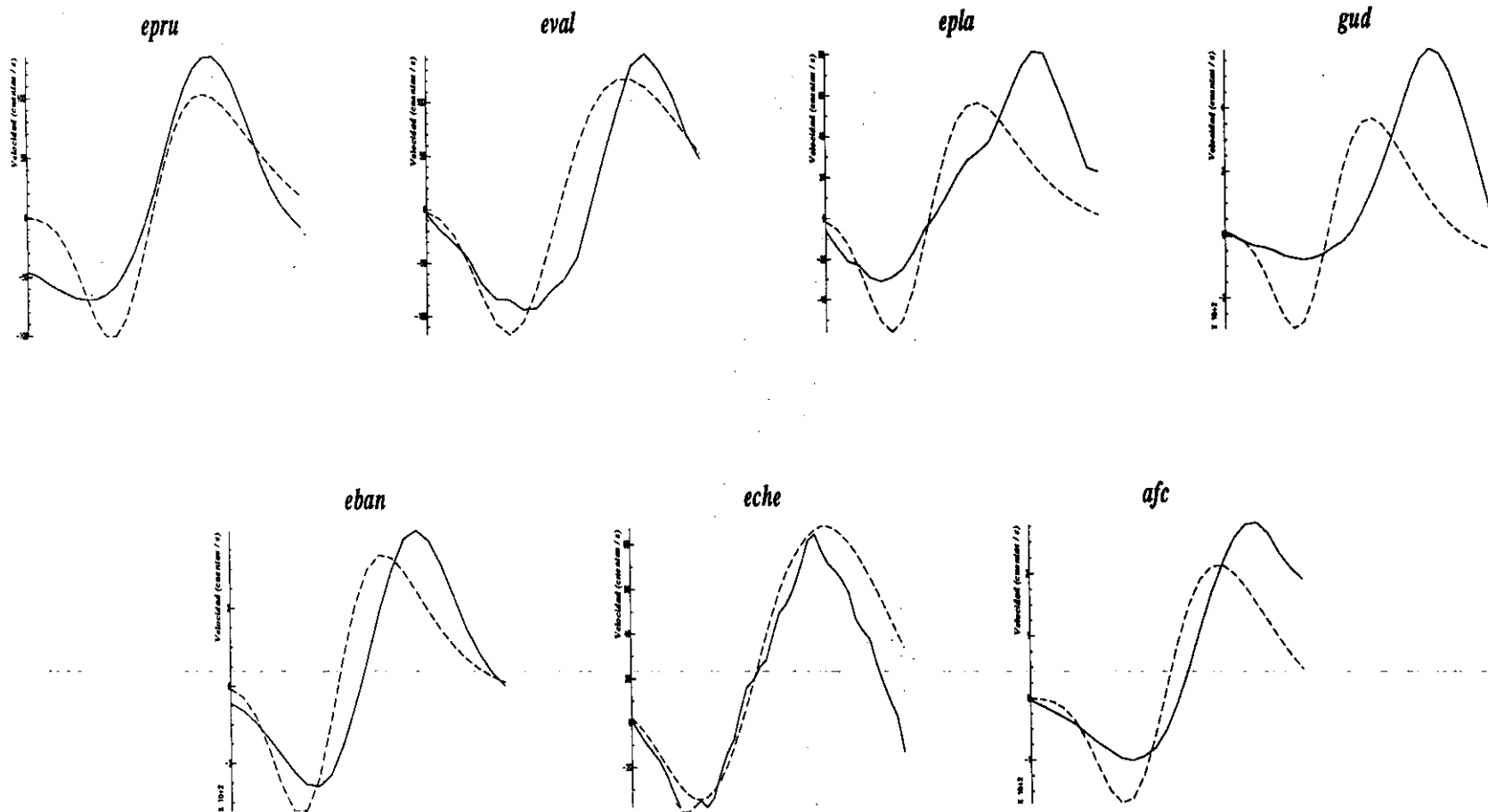


Fig. A2.2. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 49km.

# 27 Marzo 1987 (h=59 Km, rms=0.347)

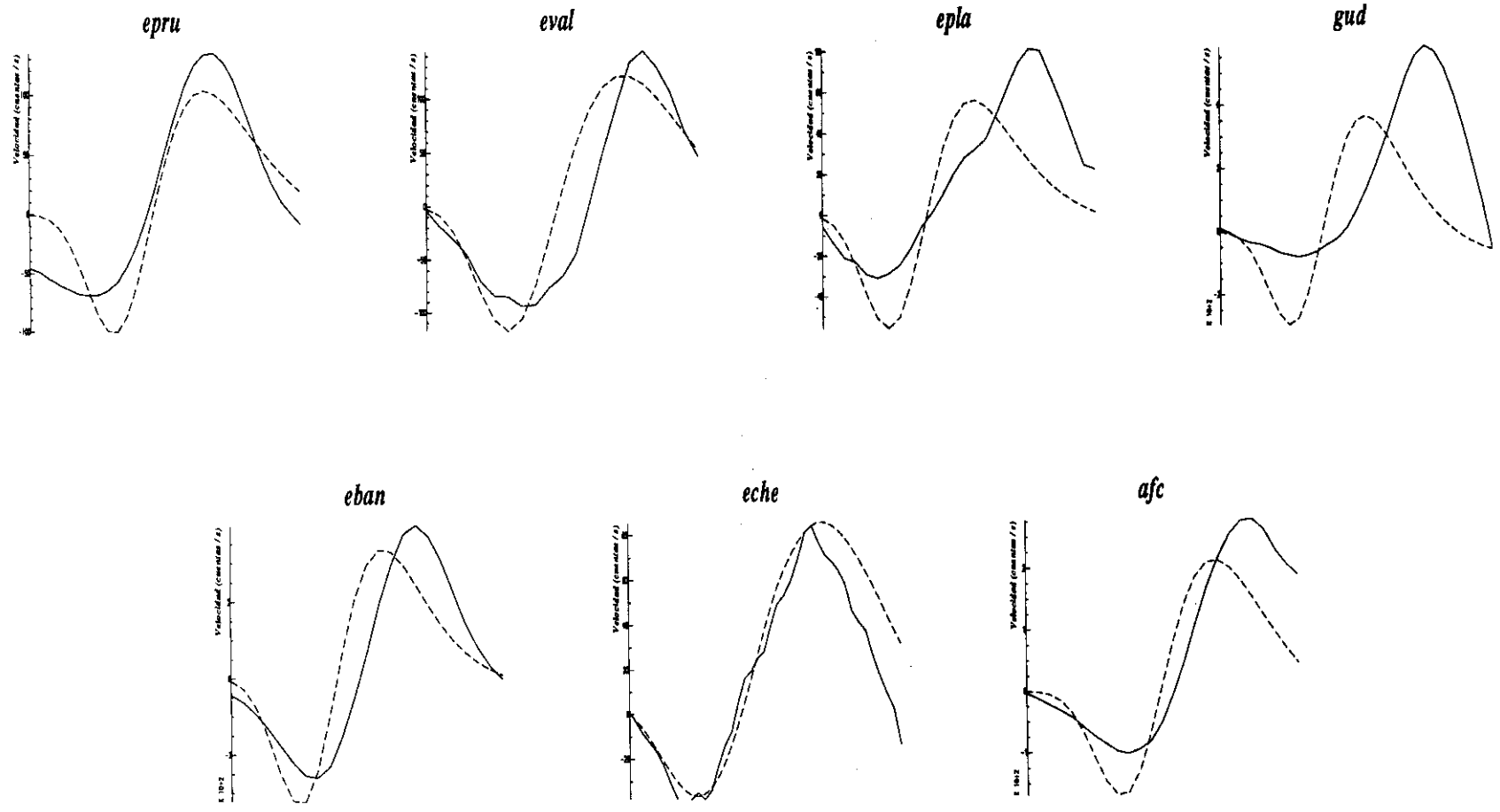


Fig. A2.3. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramás observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 59km.

27 Marzo 1987 (h=69 Km, rms=0.339)

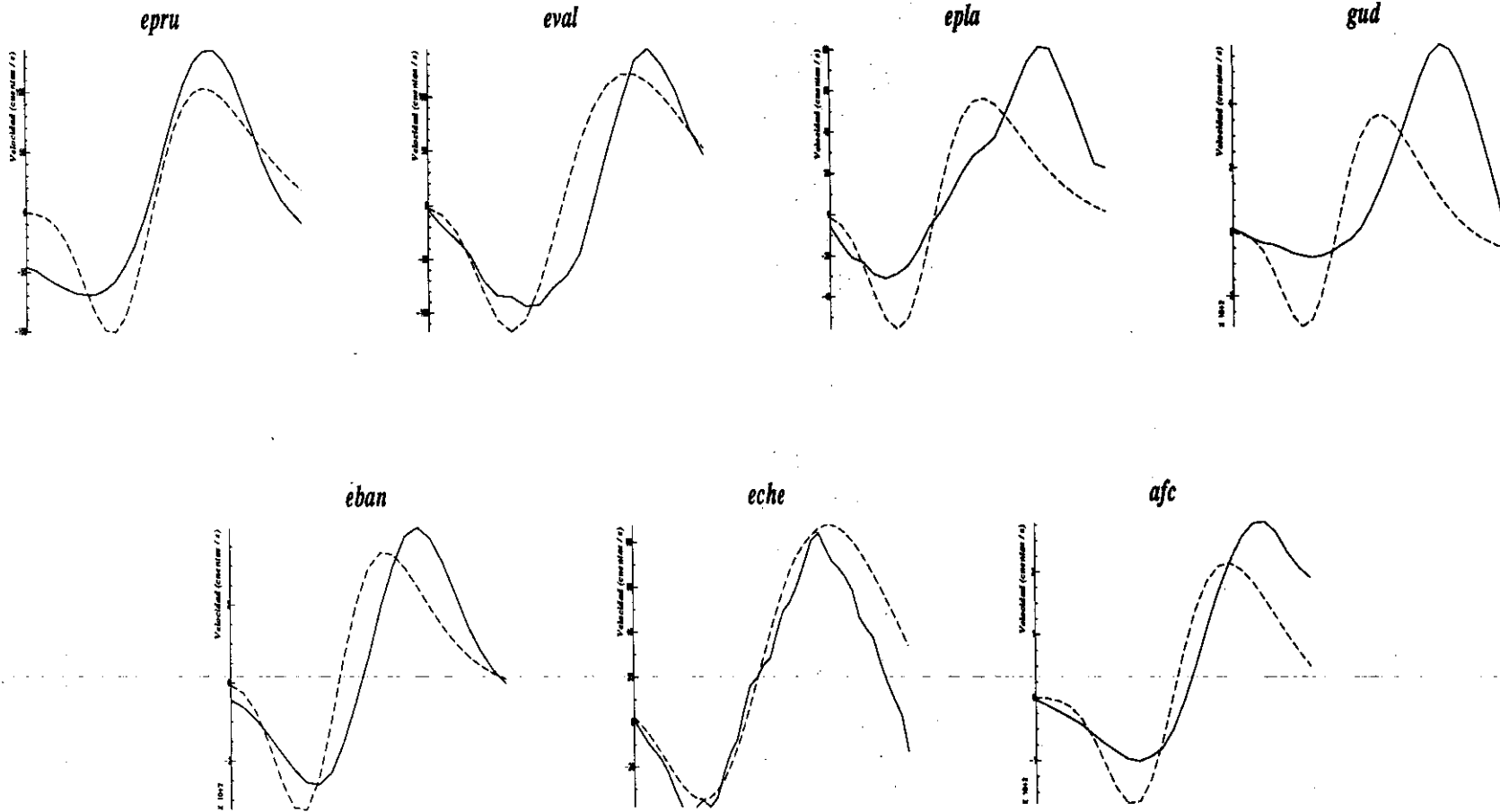


Fig. A2.4. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 69km.

27 Marzo 1987 (h=79 Km, rms=0.343)

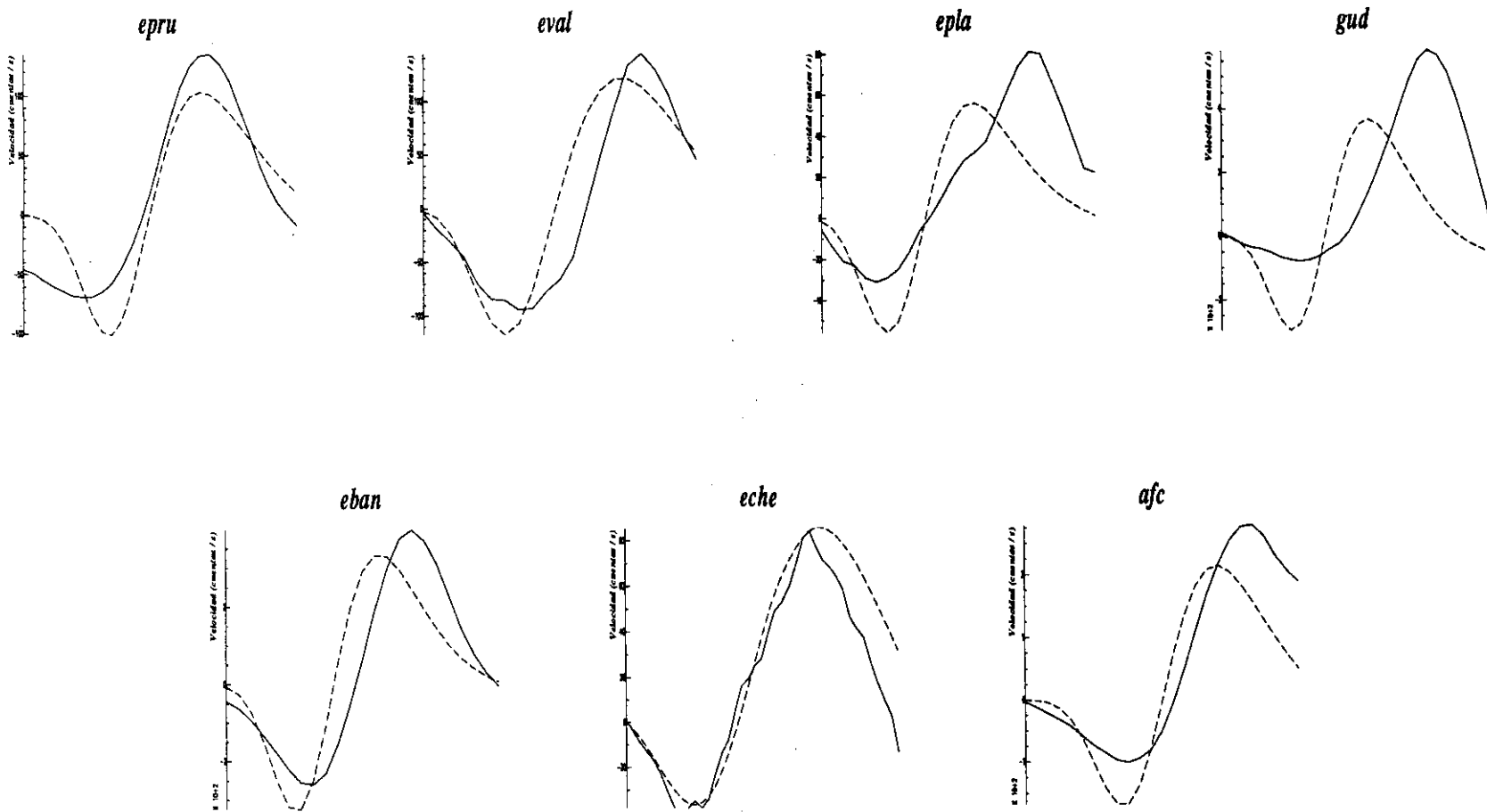
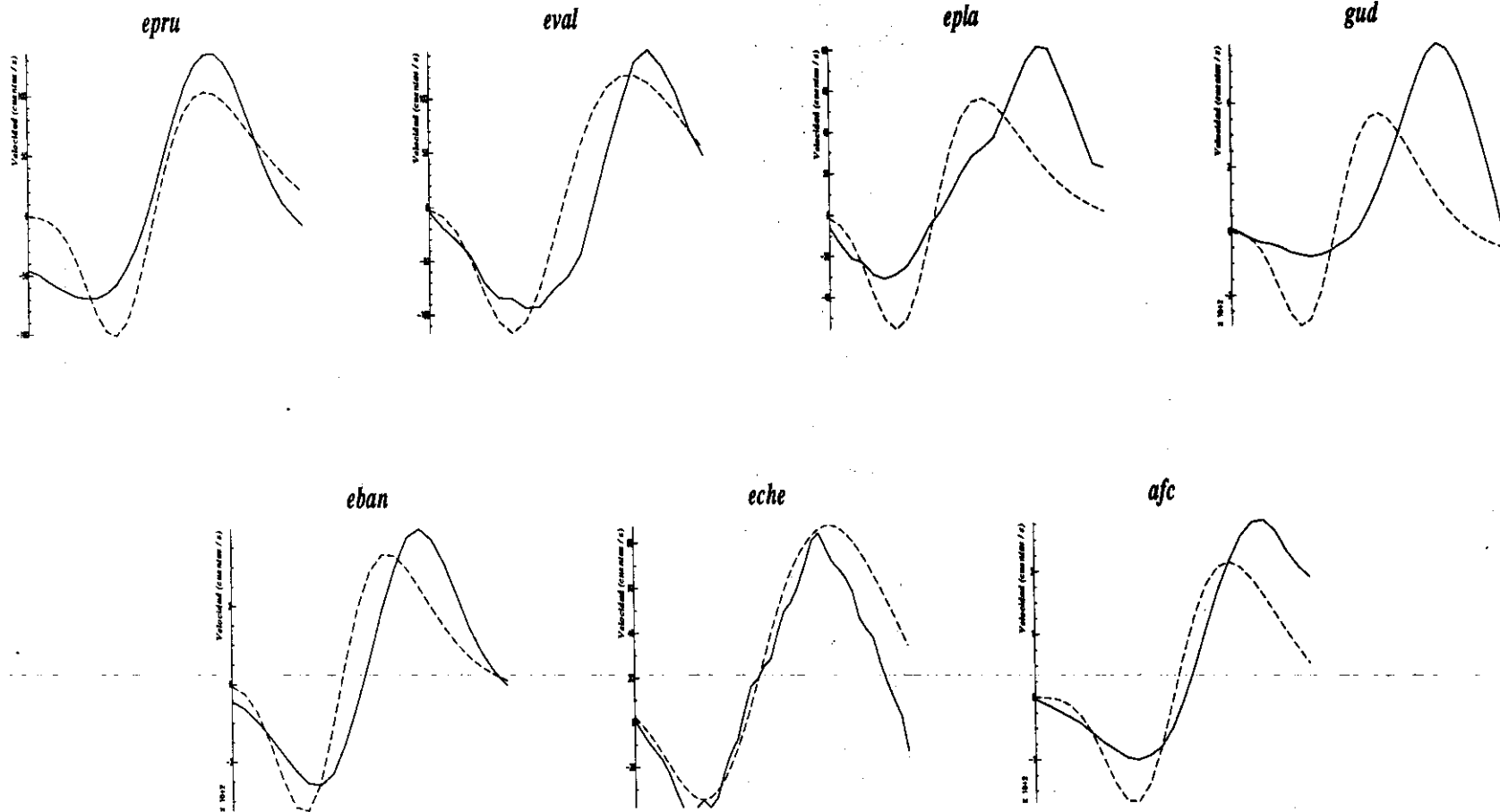


Fig. A2.5. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 79km.

# 27 Marzo 1987 (h=89 Km, rms=0.340)



247

Fig. A2.6. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 89km.

27 Marzo 1987 (h=99 Km, rms=0.341)

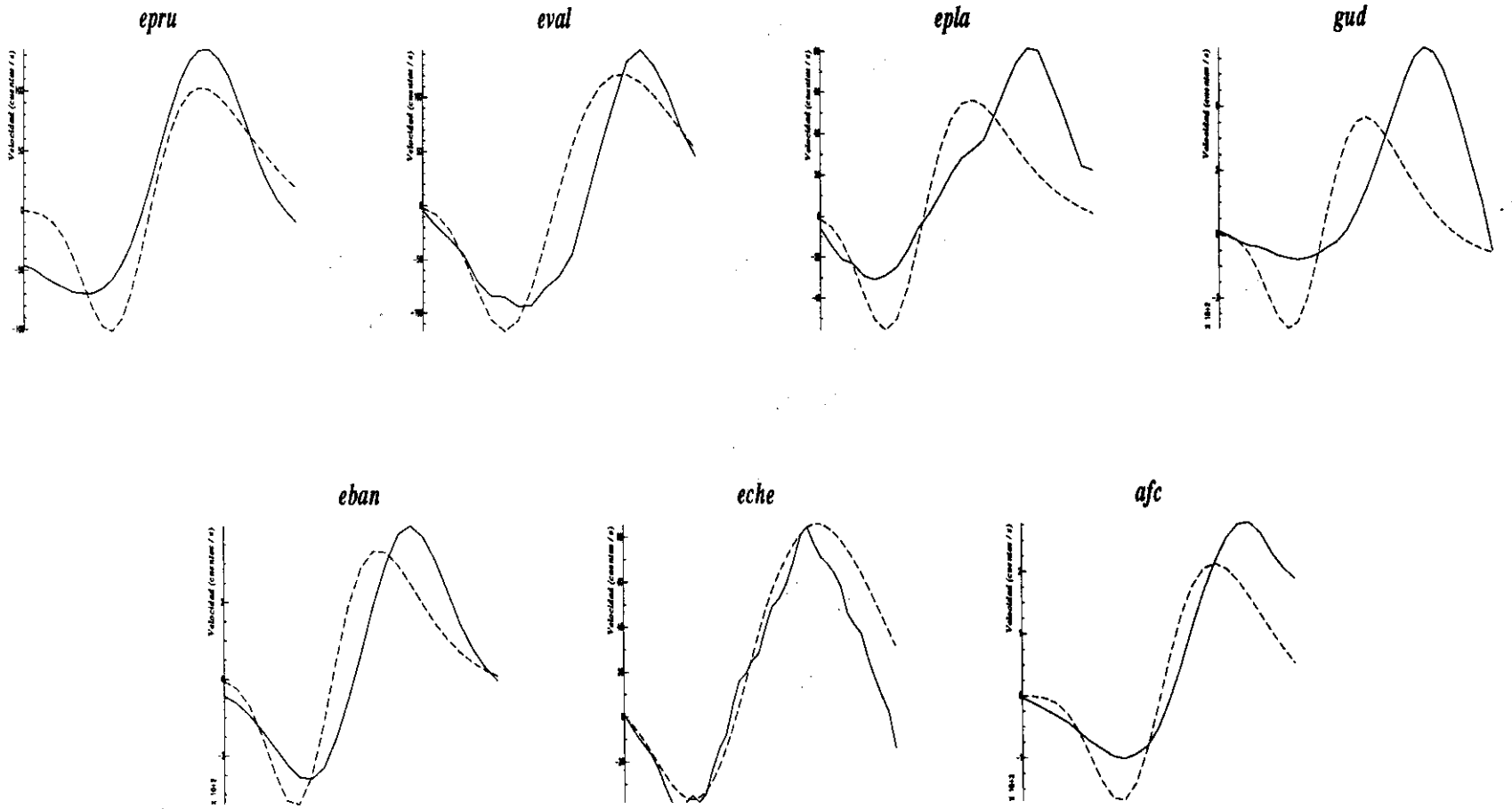


Fig. A2.7. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 99 km.

27 Marzo 1987 (h=39 Km, rms=0.442)

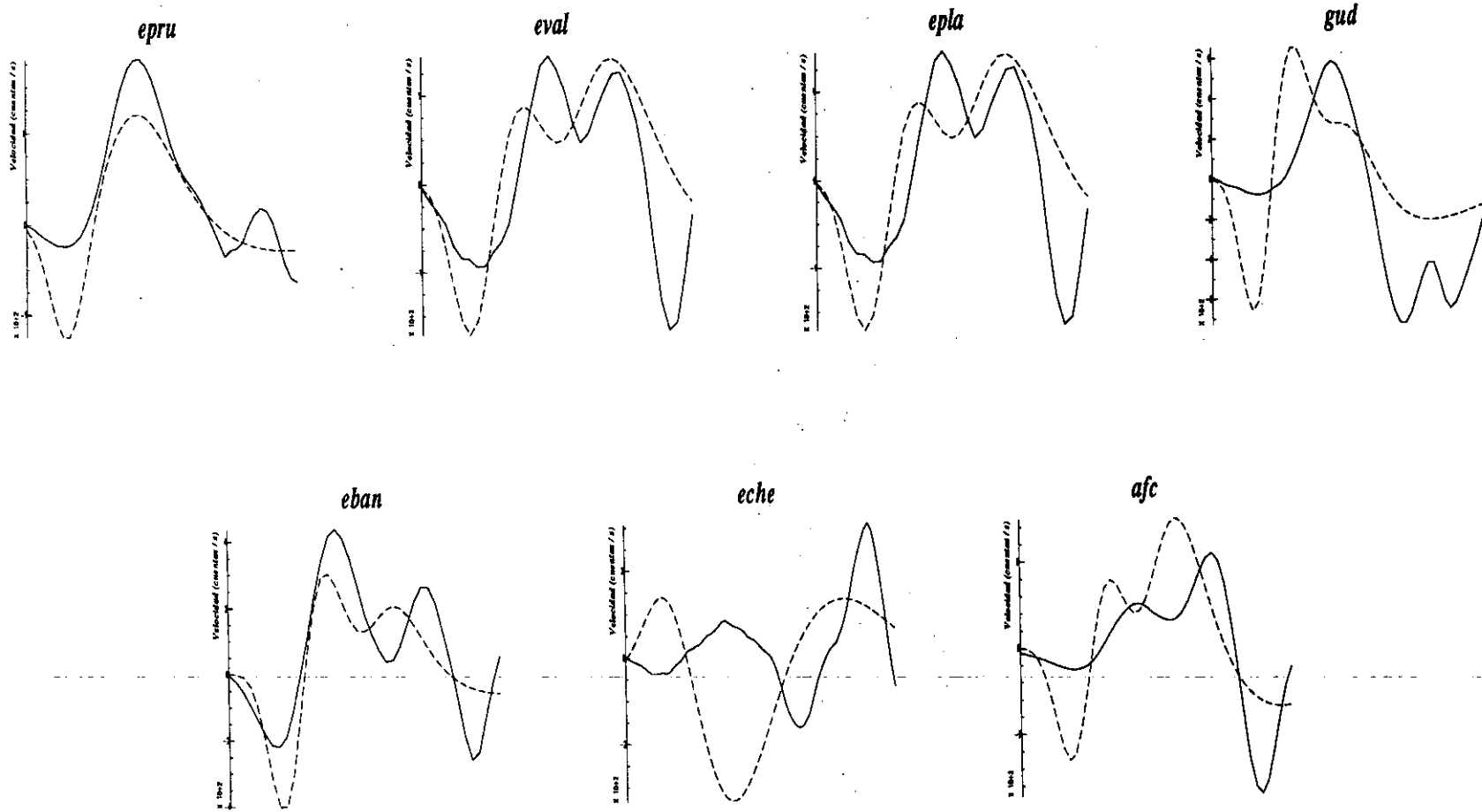


Fig. A2.8. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 39km.

27 Marzo 1987 (h=49 Km, rms=0.438)

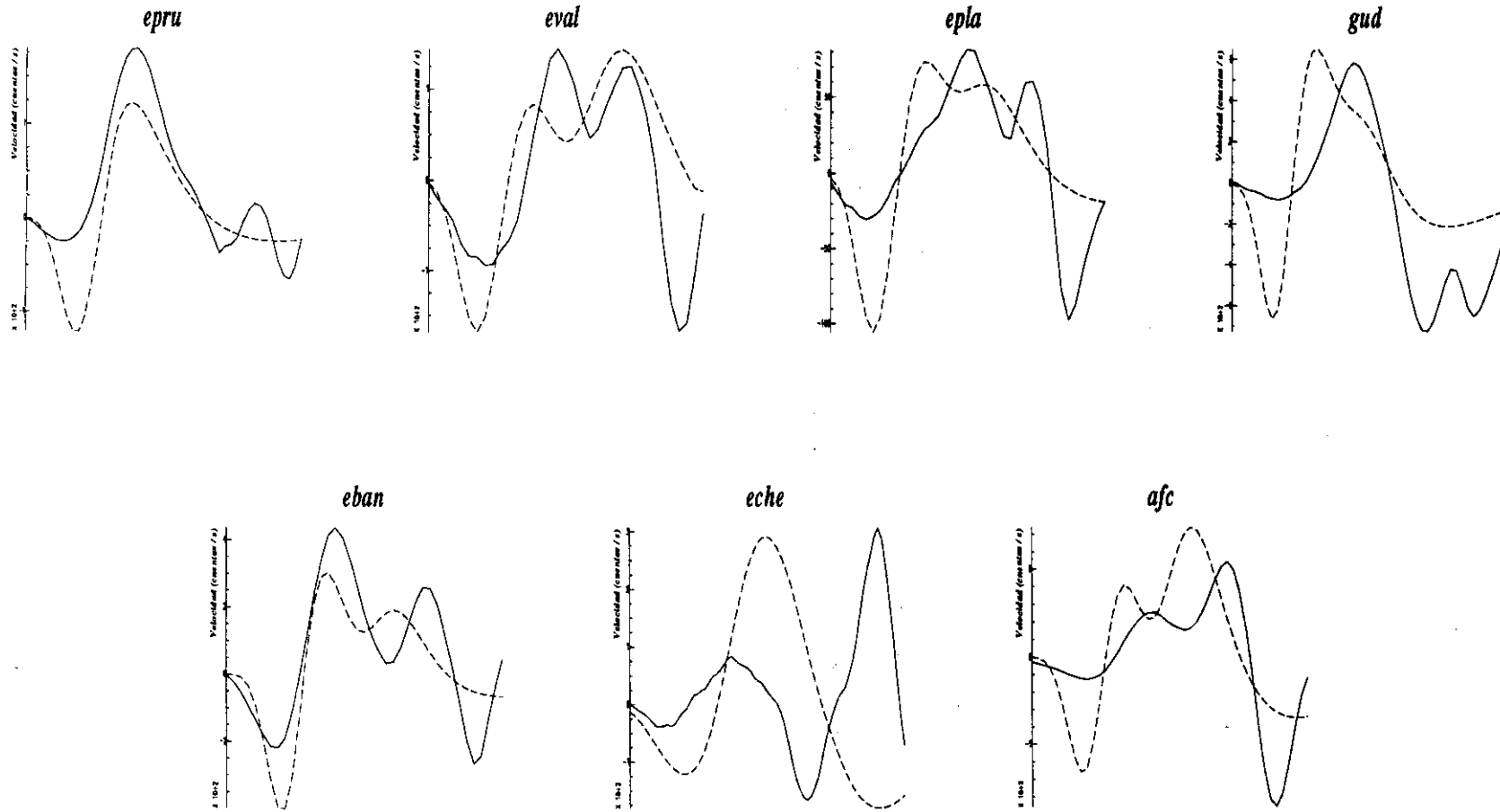
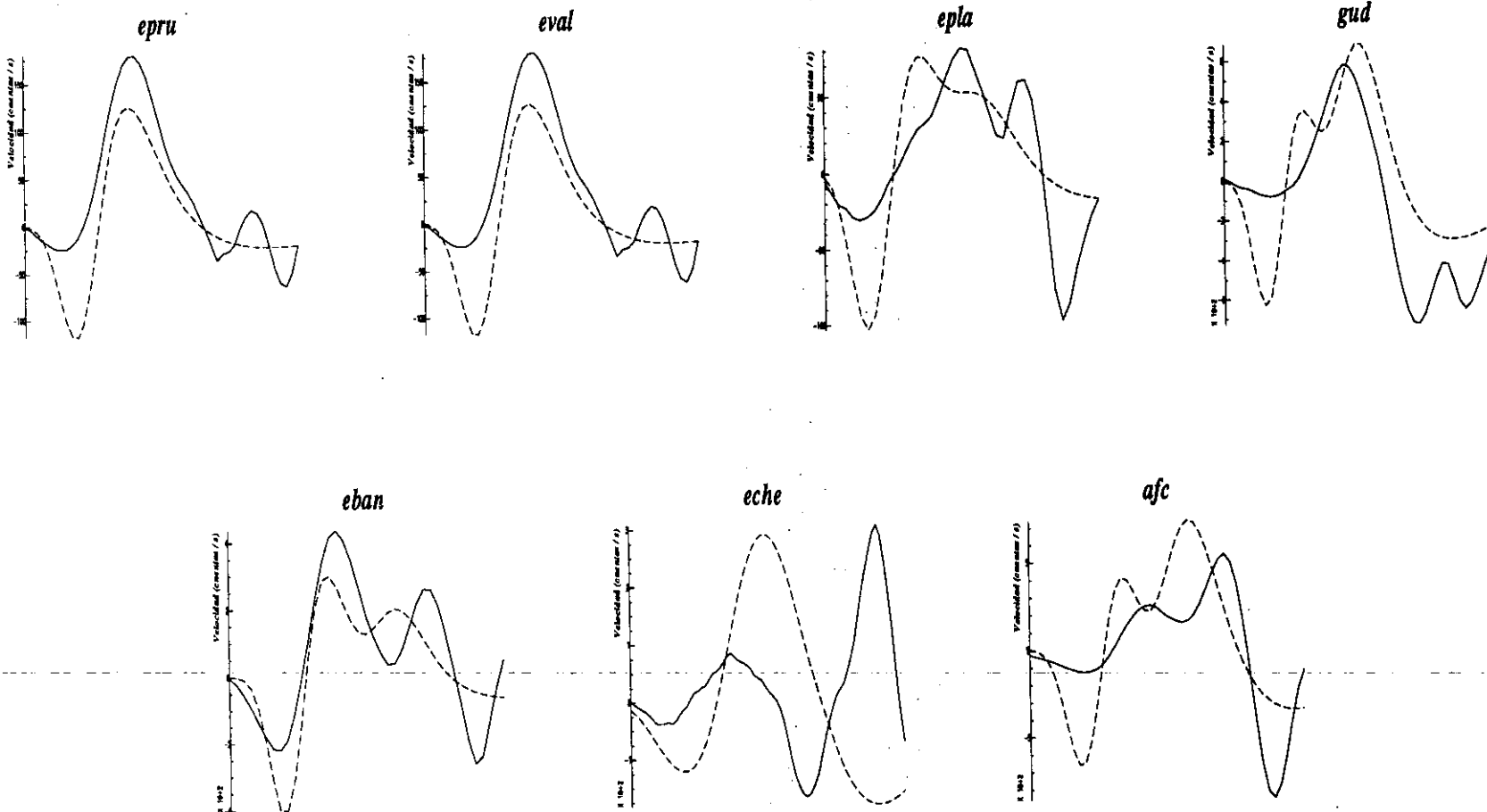


Fig. A2.9. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 49km.

27 Marzo 1987 (h=59 Km, rms=0.436)



251

Fig. A2.10. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 59km.

27 Marzo 1987 (h=69 Km, rms=0.430)

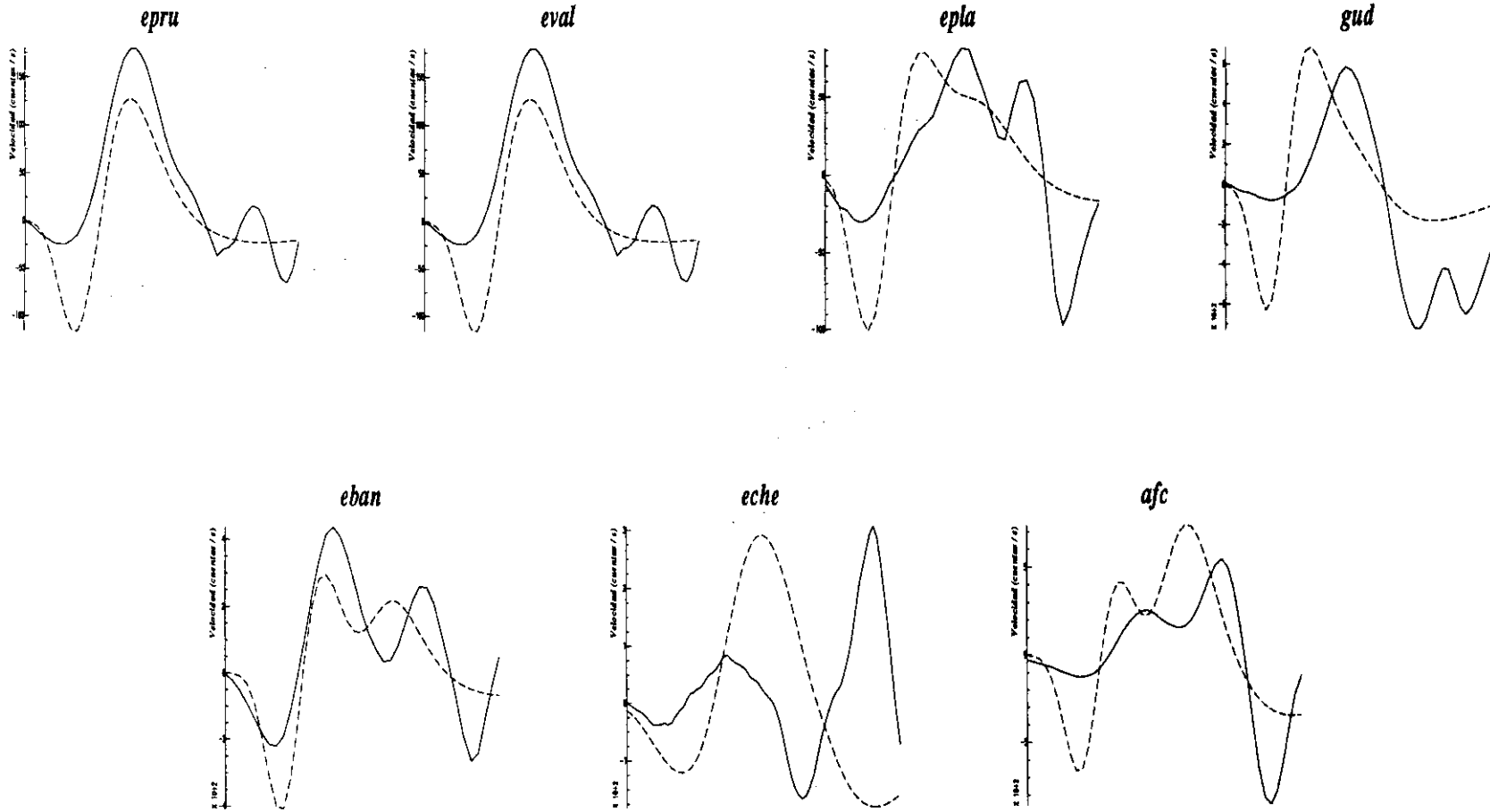


Fig. A2.11. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 69km.

27 Marzo 1987 (h=79 Km, rms=0.438)

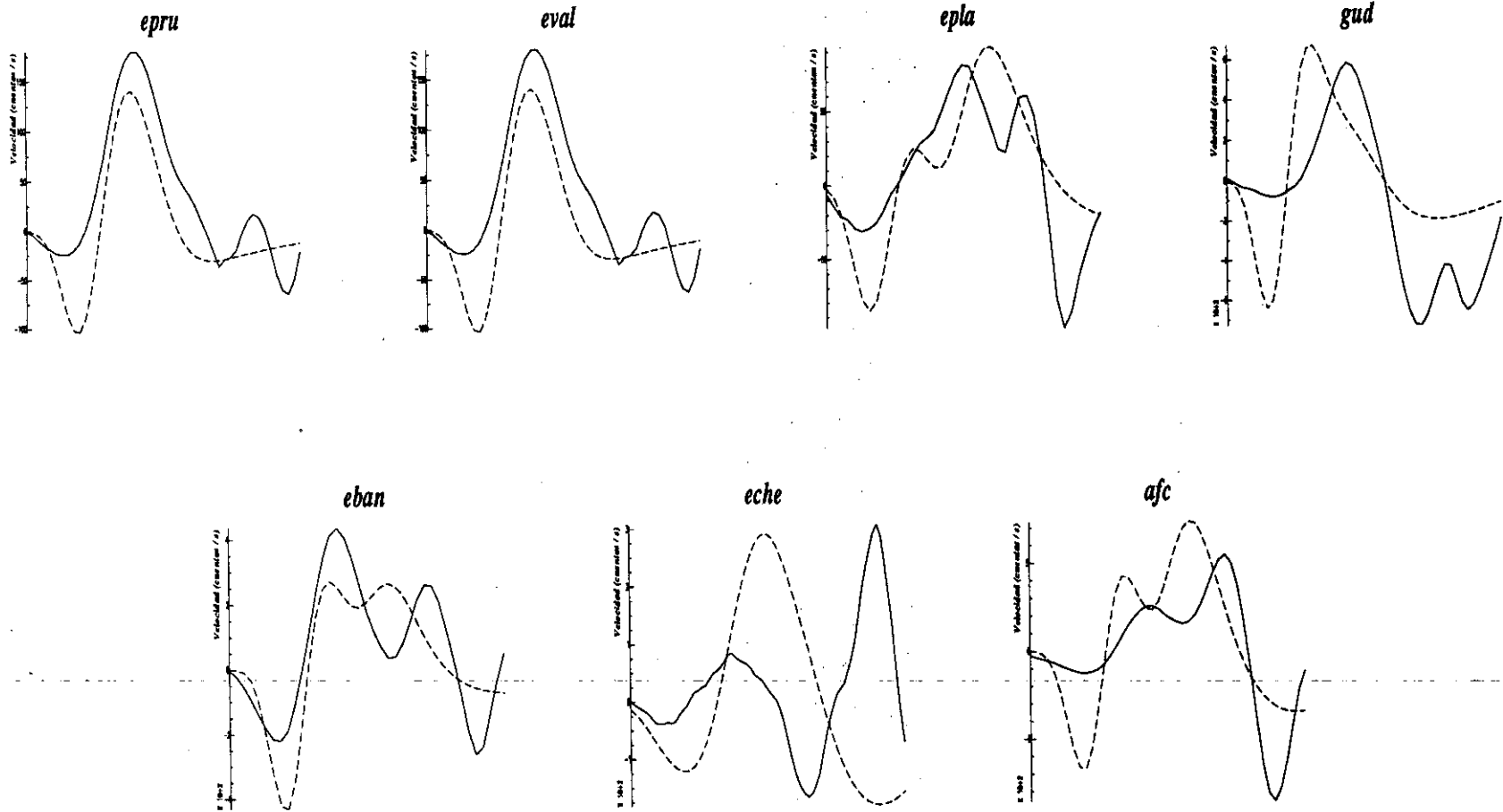


Fig. A2.12. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 79km.

27 Marzo 1987 (h=89 Km, rms=0.466)

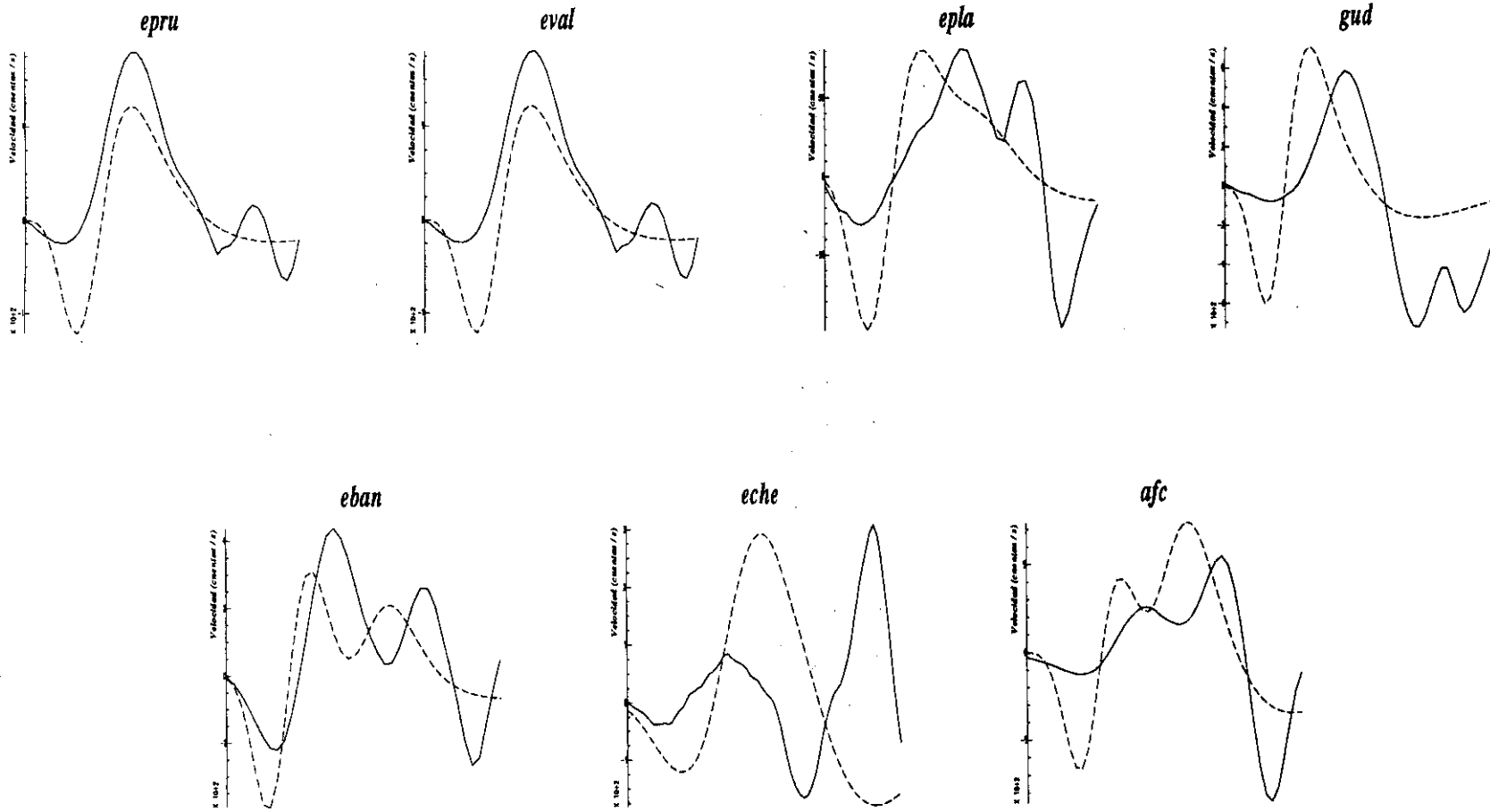


Fig. A2.13. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 89km.

27 Marzo 1987 (h=99 Km, rms=0.453)

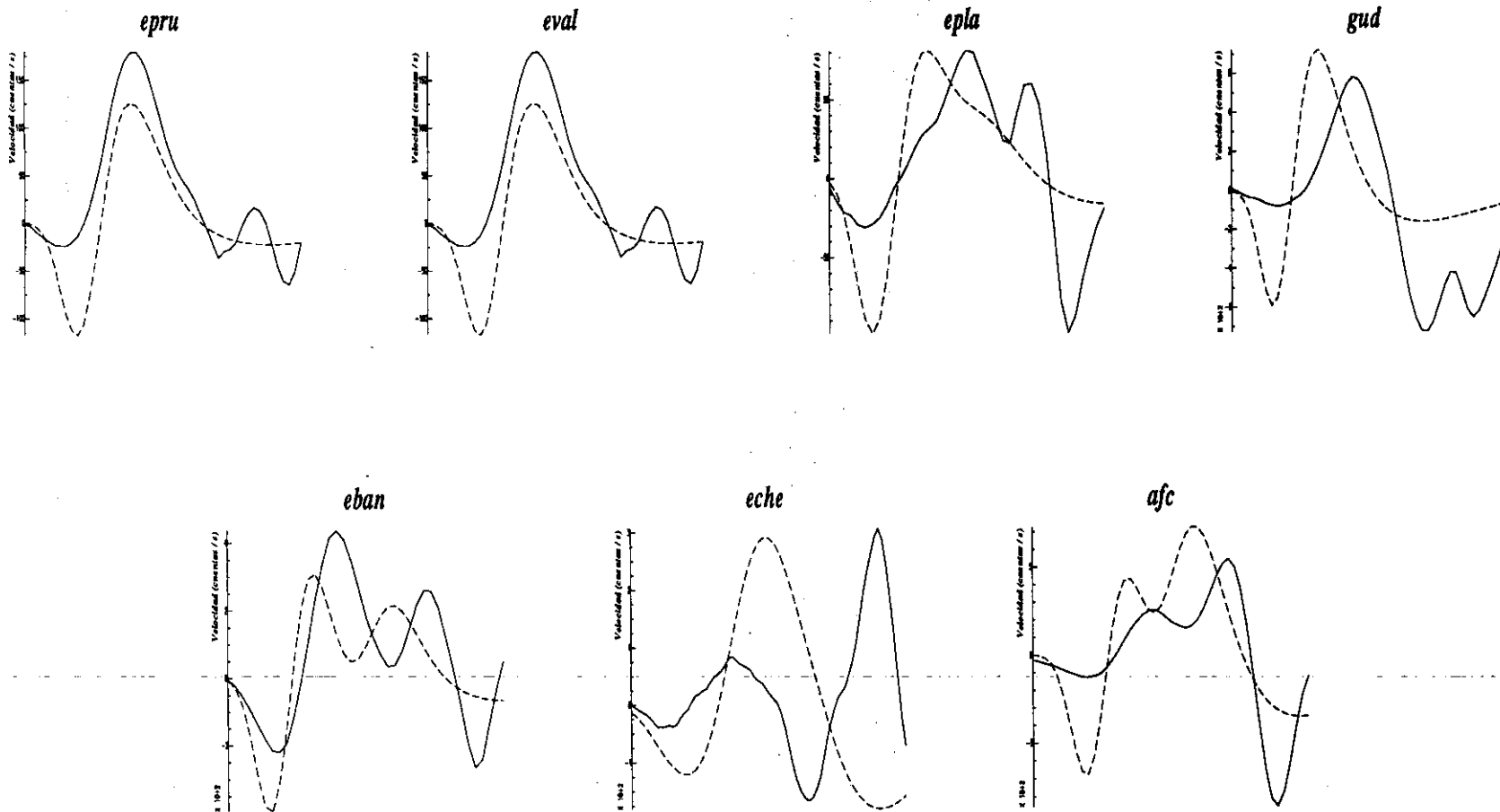


Fig. A2.14. Terremoto 27-Marzo-1987. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.14s y 99 km.

# 19 Julio 1989 (h=50 Km, rms=0.547)

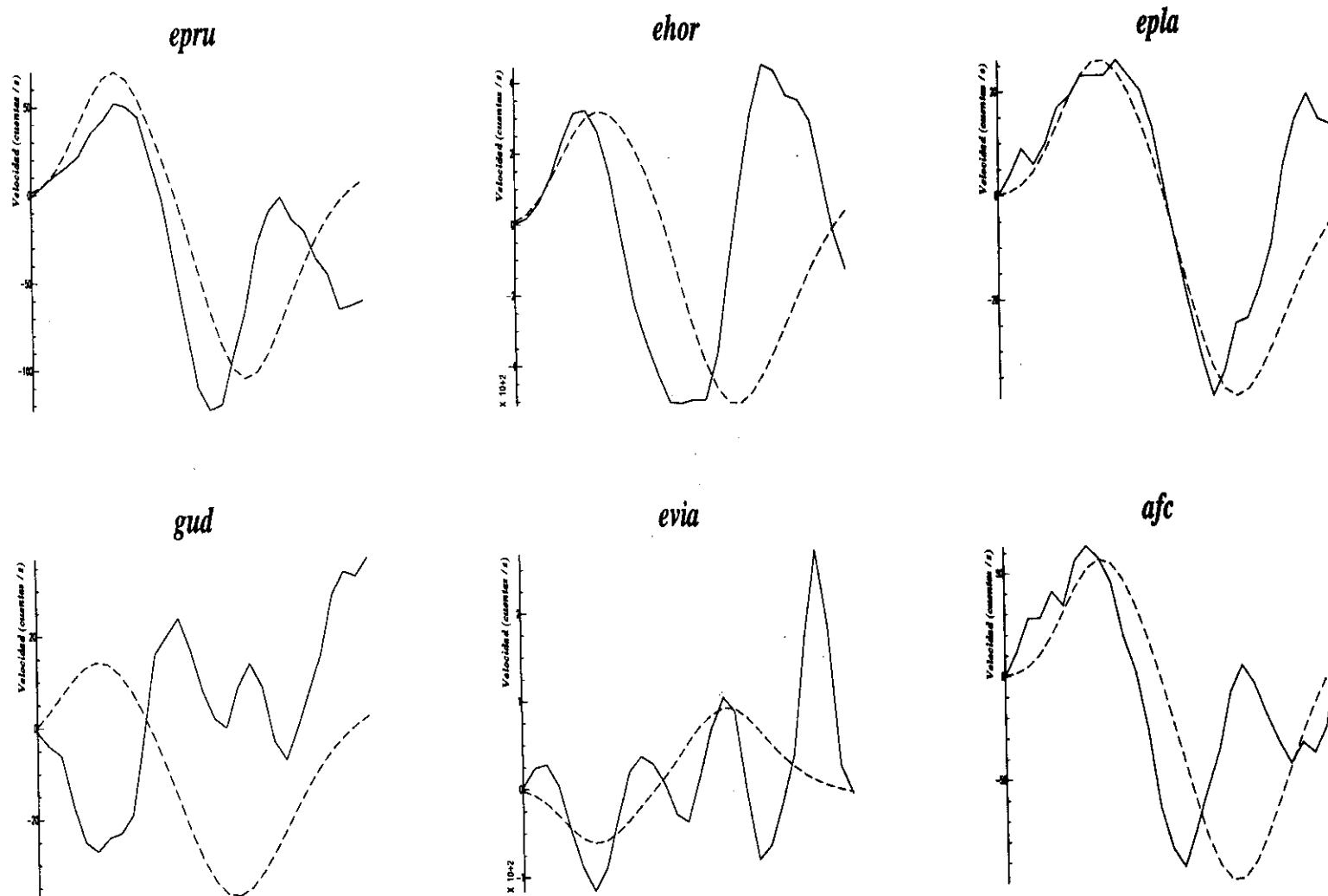


Fig. A2.15. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 50 km.

# 19 Julio 1989 (h=65 Km, rms=0.546)

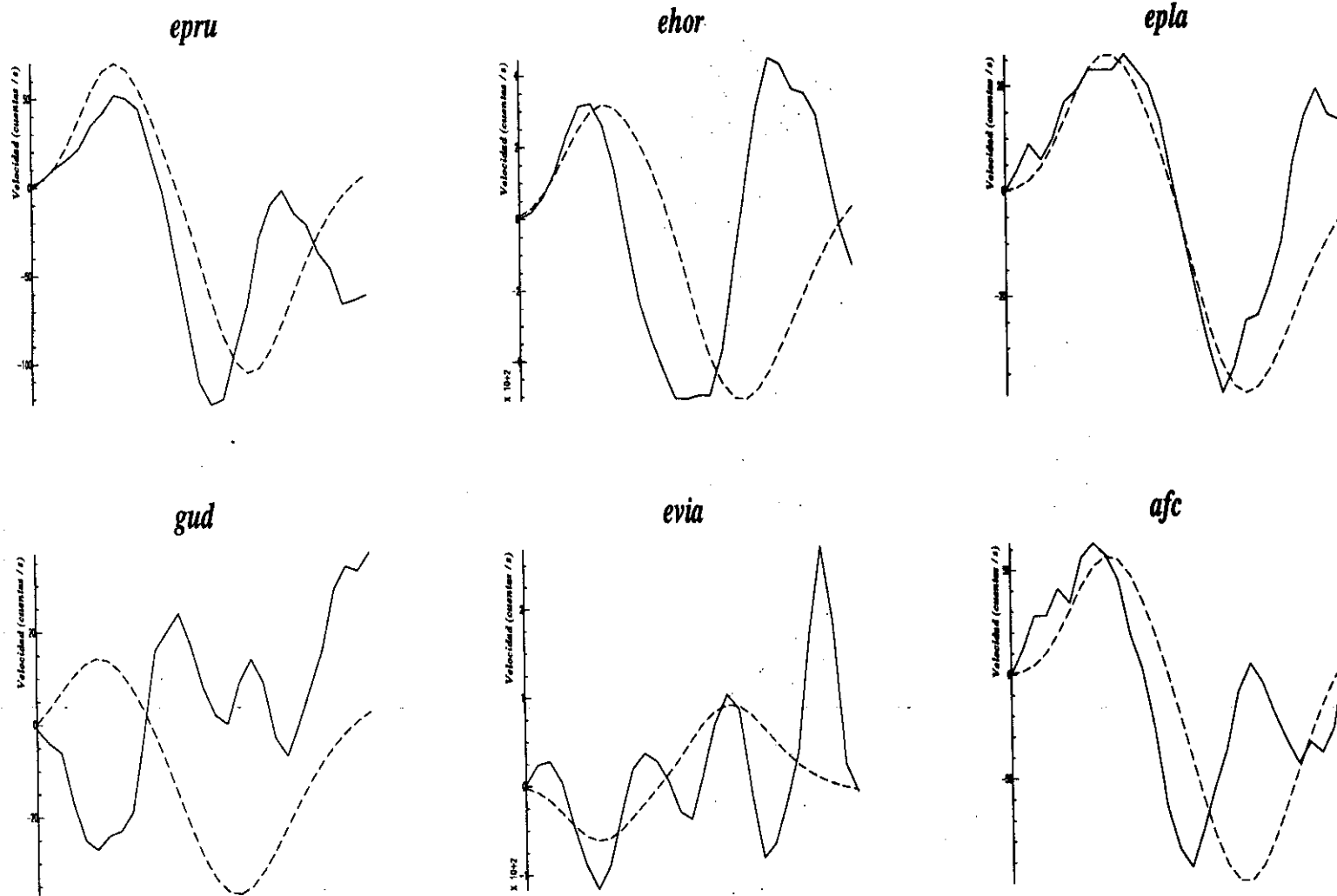


Fig. A2.16. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 65 km.

# 19 Julio 1989 (h=70 Km, rms=0.545)

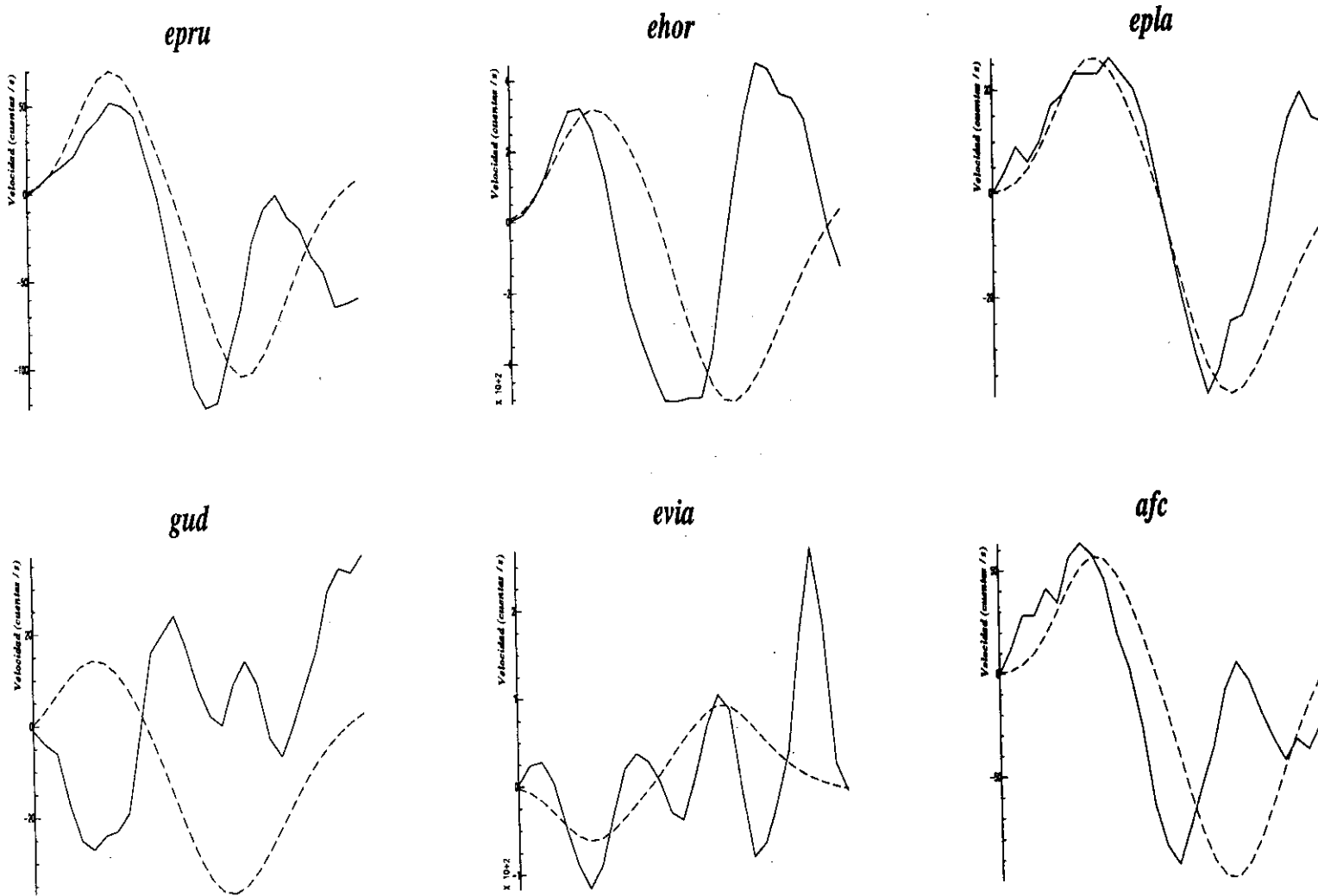


Fig. A2.17. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 70 km.

# 19 Julio 1989 (h=75 Km, rms=0.544)

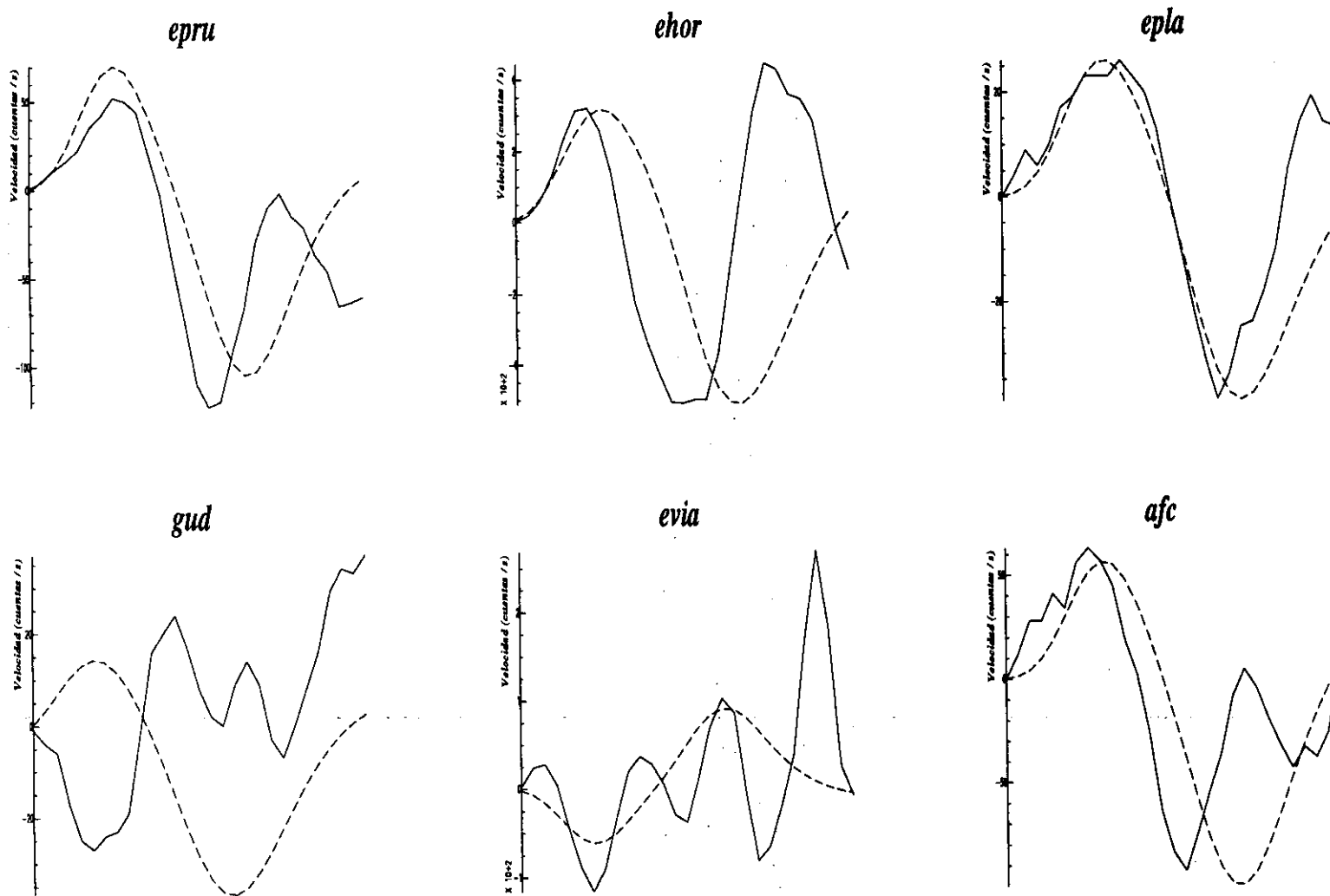


Fig. A2.18. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 75 km.

# 19 Julio 1989 (h=80 Km, rms=0.352)

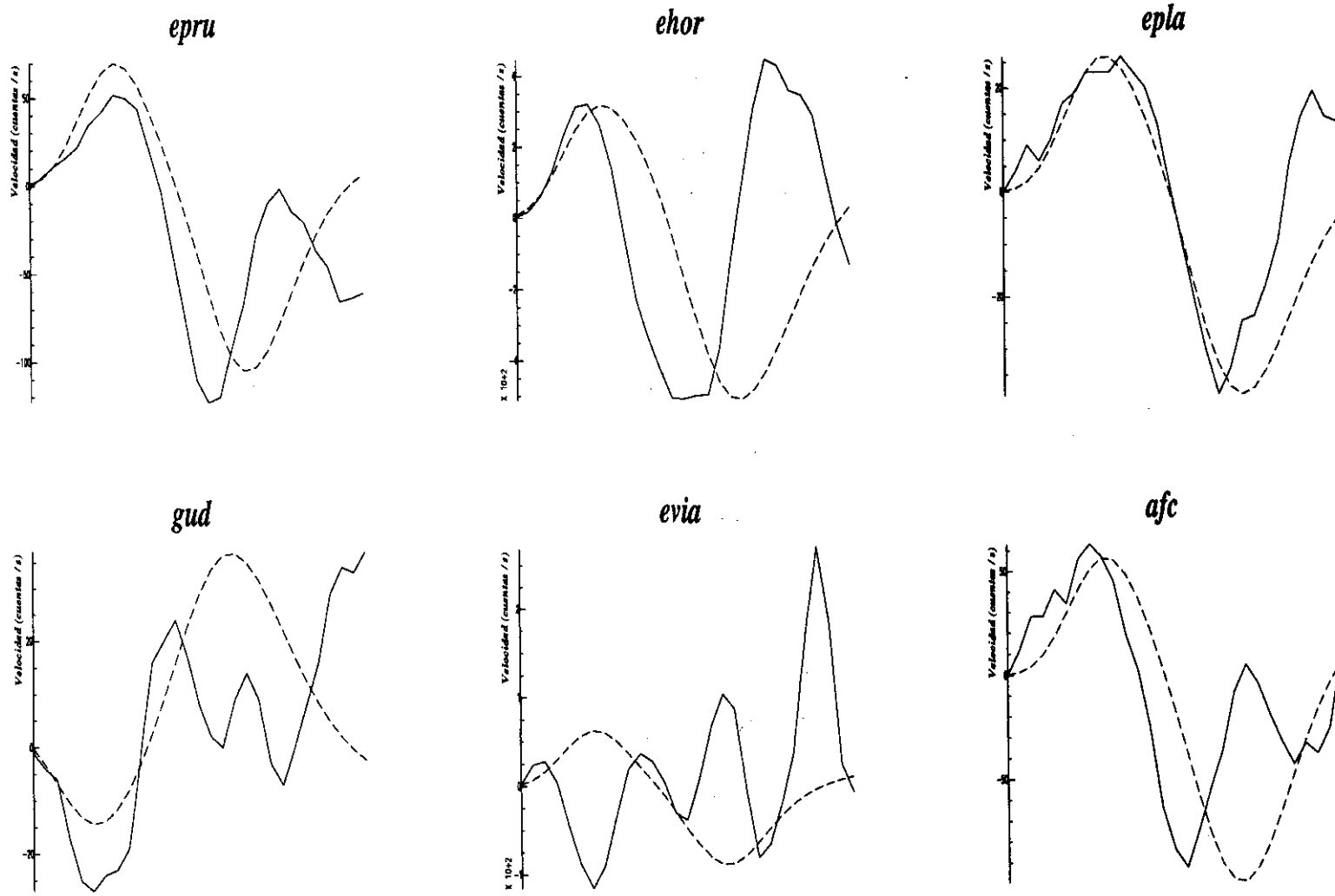


Fig. A2.19. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 80 km.

# 19 Julio 1989 (h=85 Km, rms=0.418)

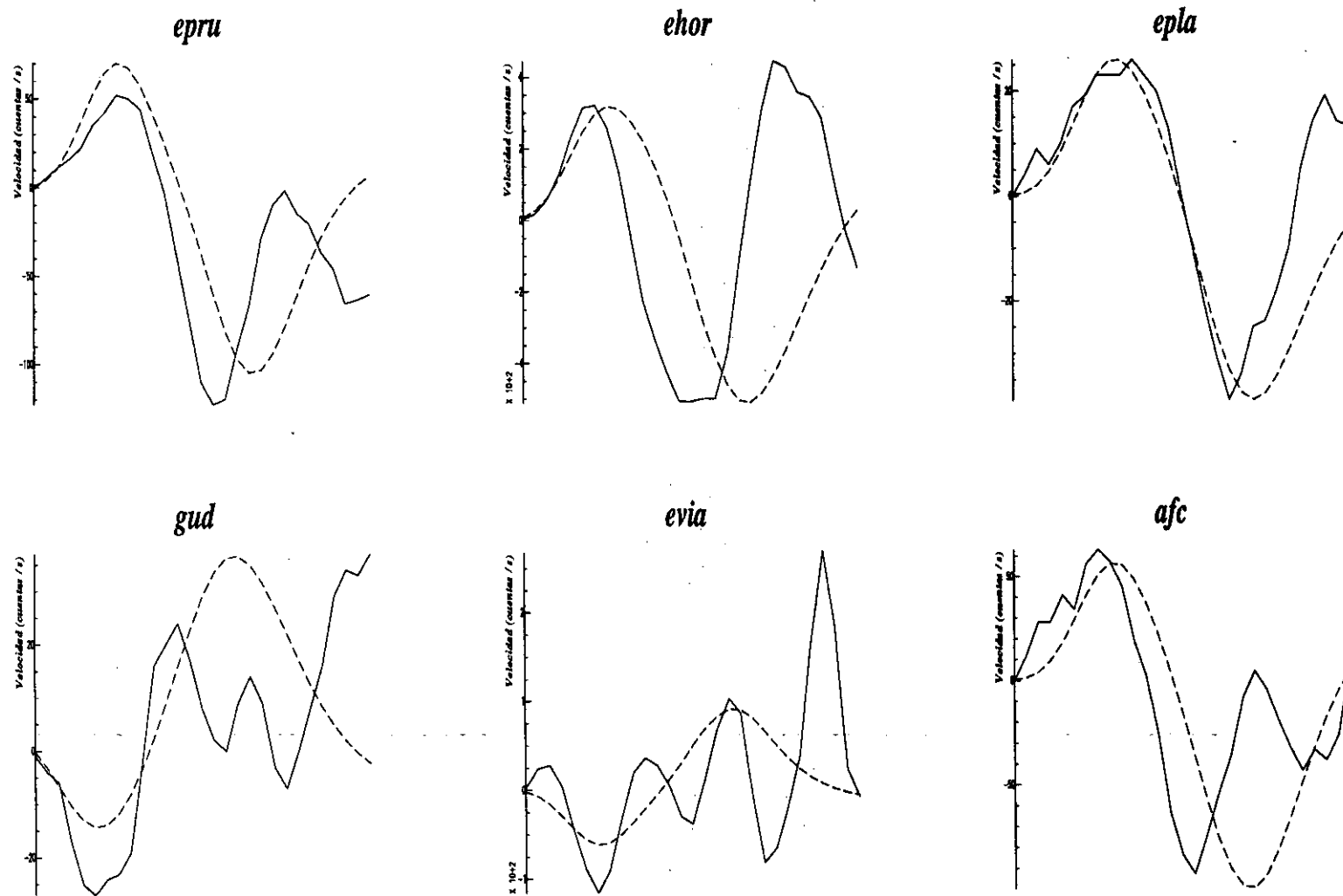


Fig. A2.20. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 85 km.

# 19 Julio 1989 (h=90 Km, rms=0.418)

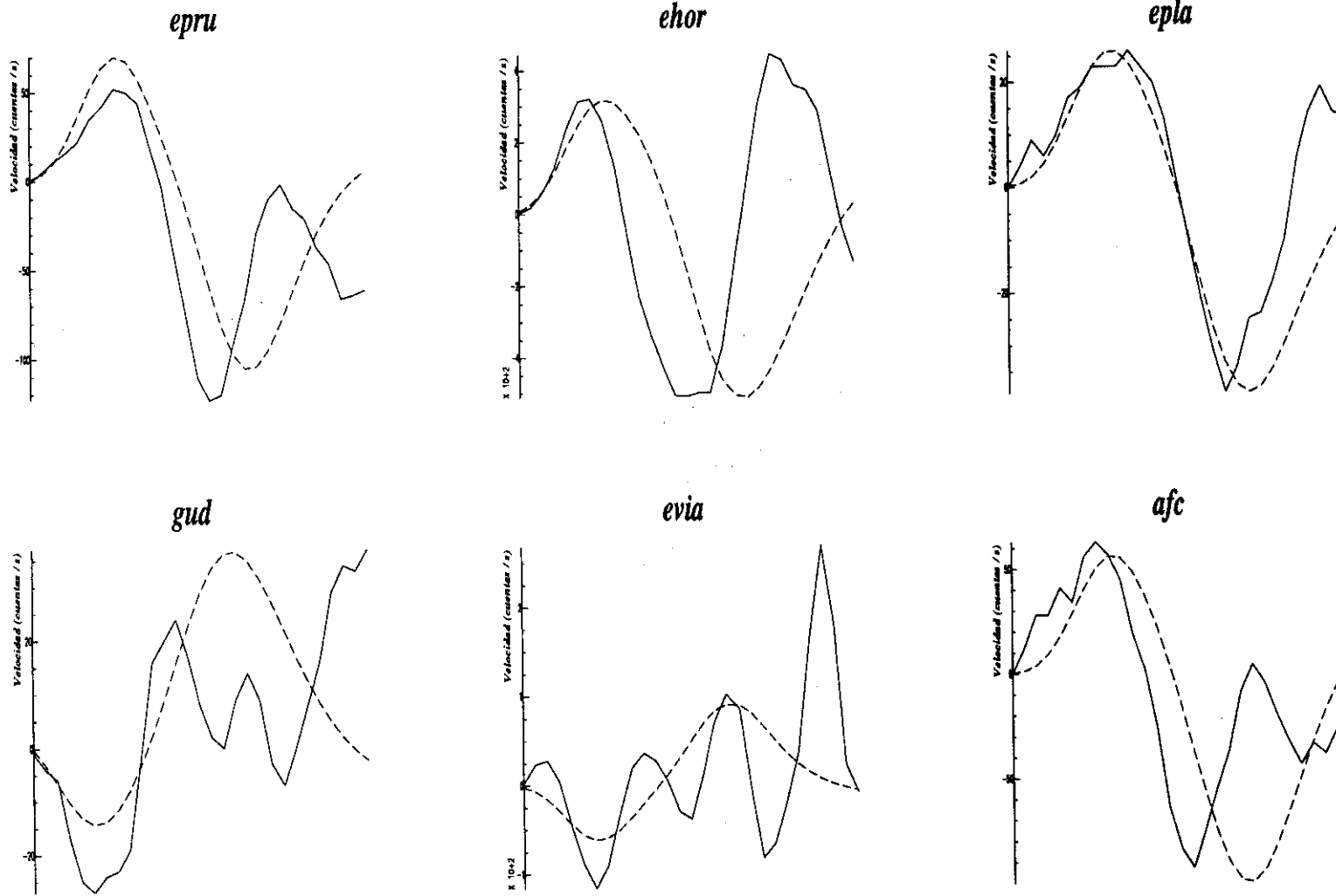


Fig. A2.21. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 90 km.

19 Julio 1989 (h=95 Km, rms=0.419)

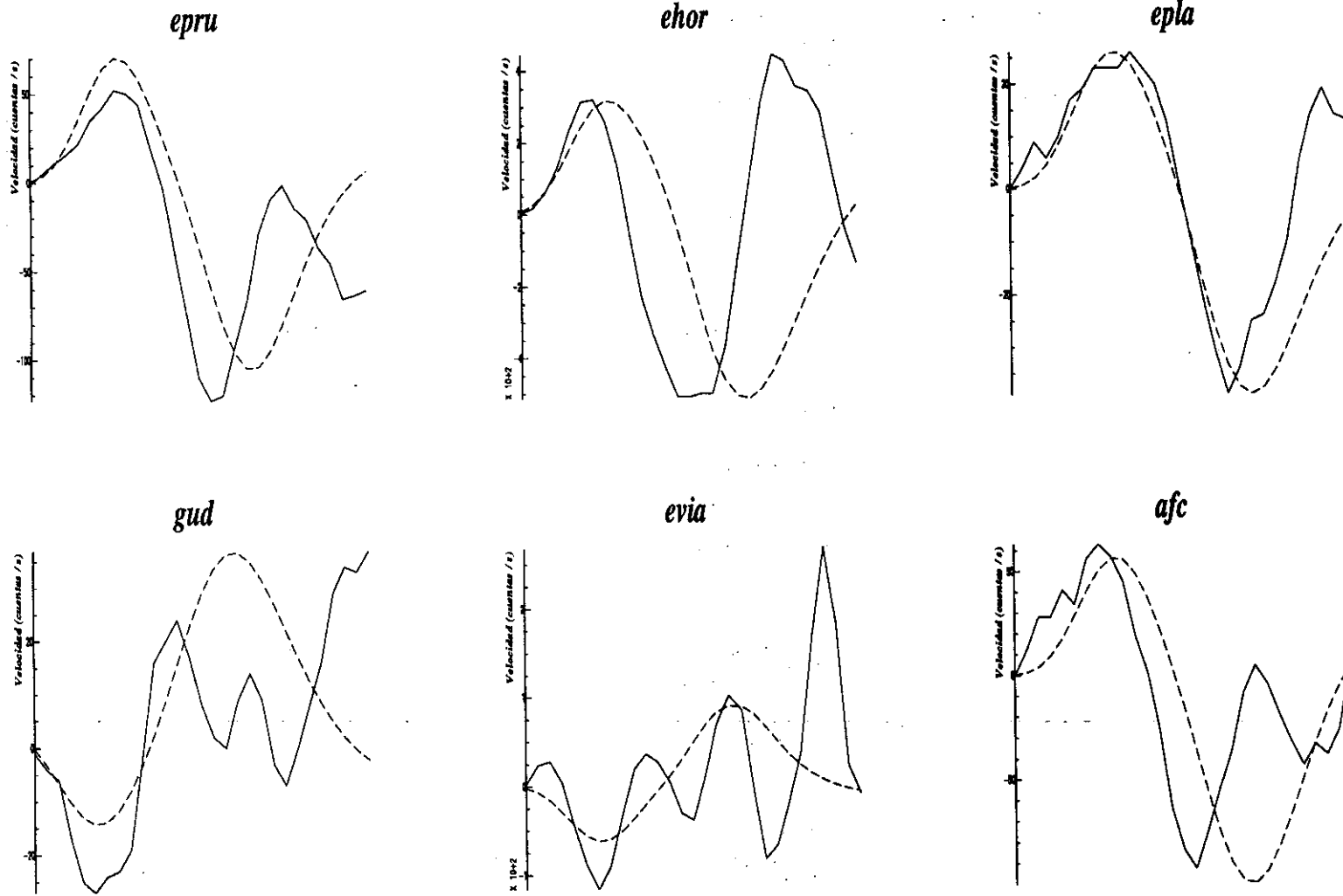


Fig. A2.22. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 95 km.

# 19 Julio 1989 (h=100 Km, rms=0.419)

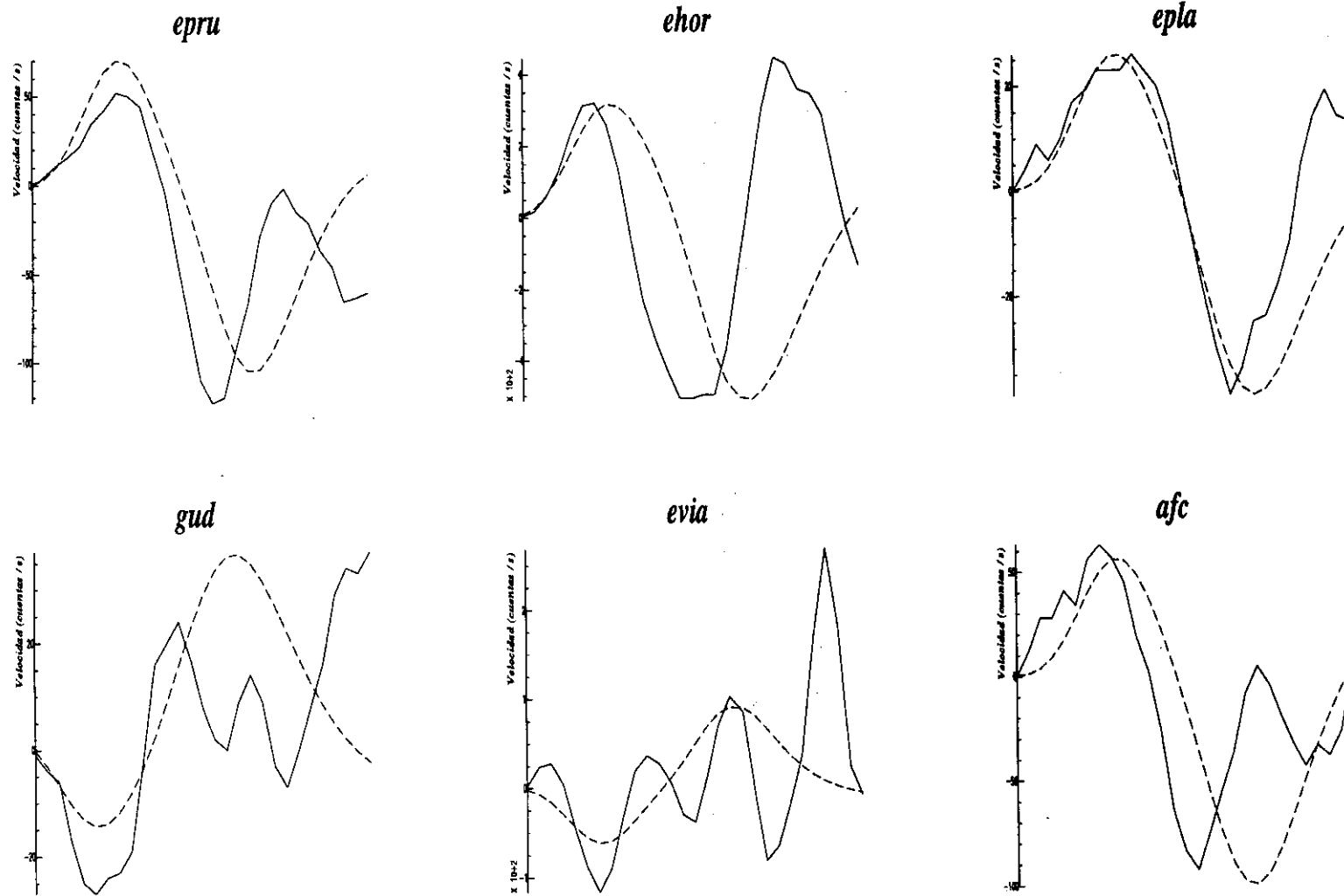


Fig. A2.23. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 100 km.

# 19 Julio 1989 (h=115 Km, rms=0.354)

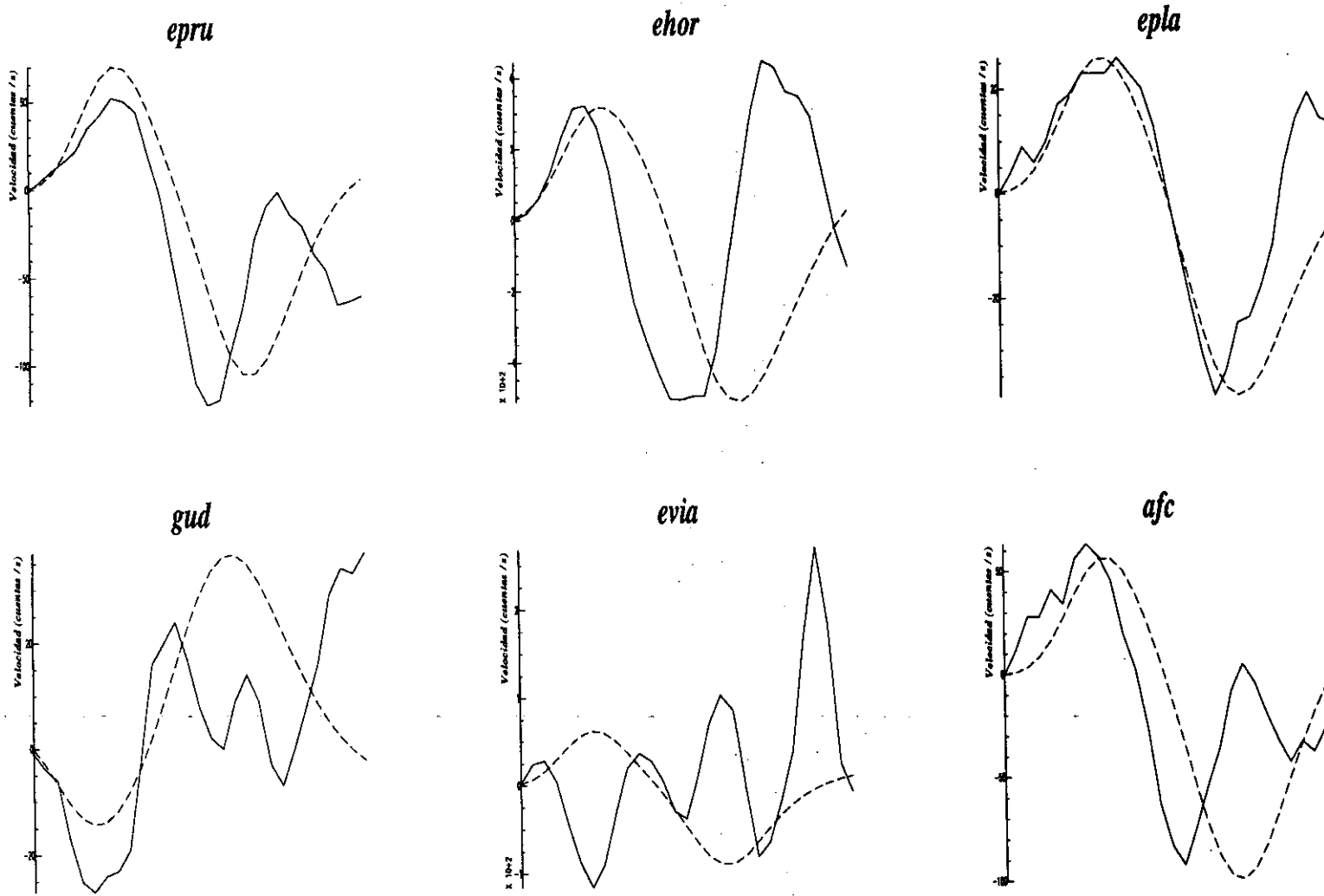


Fig. A2.24. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 115 km.

# 19 Julio 1989 (h=130 Km, rms=0.355)

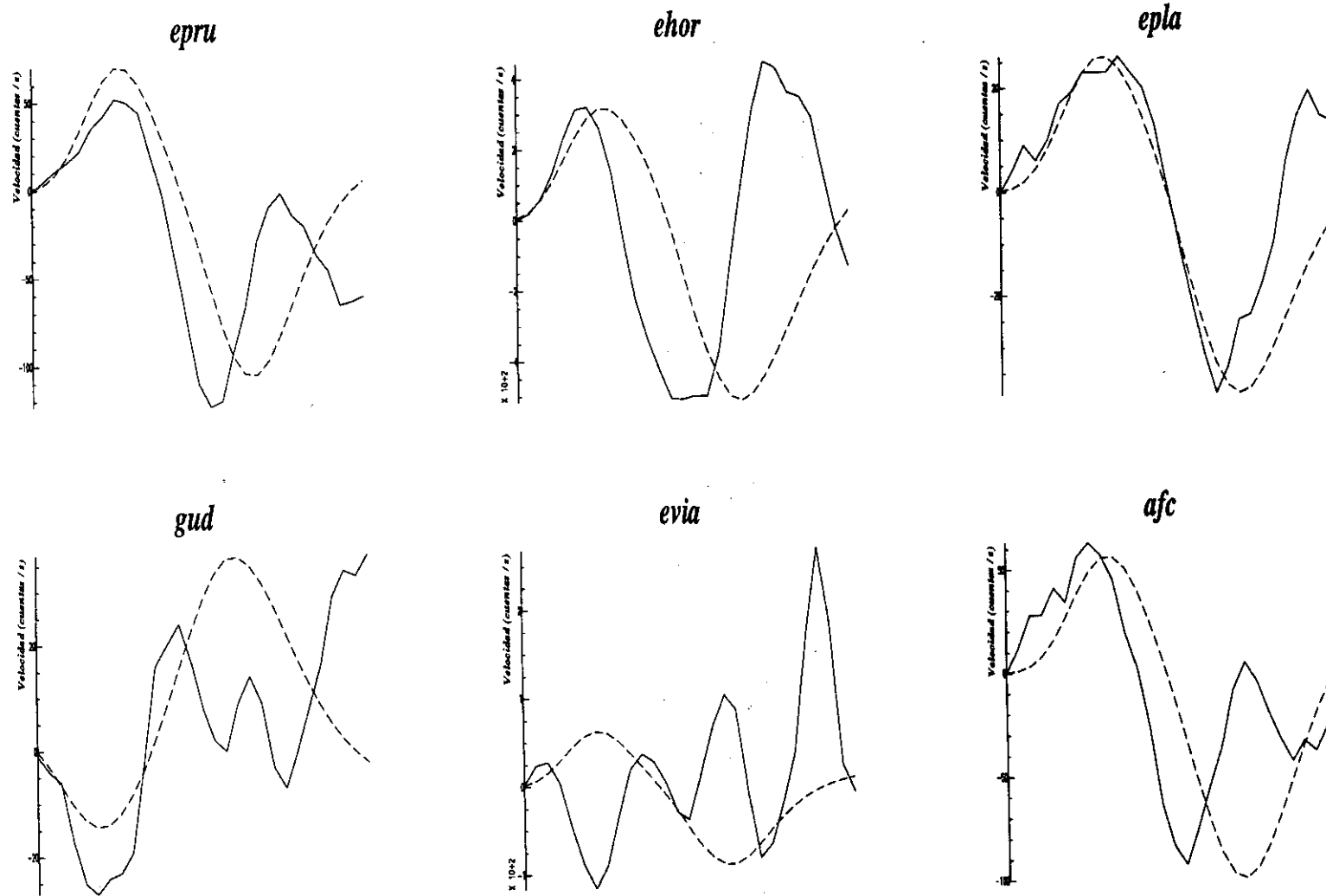


Fig. A2.25. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 130 km.

19 Julio 1989 (h=150 Km, rms=0.365)

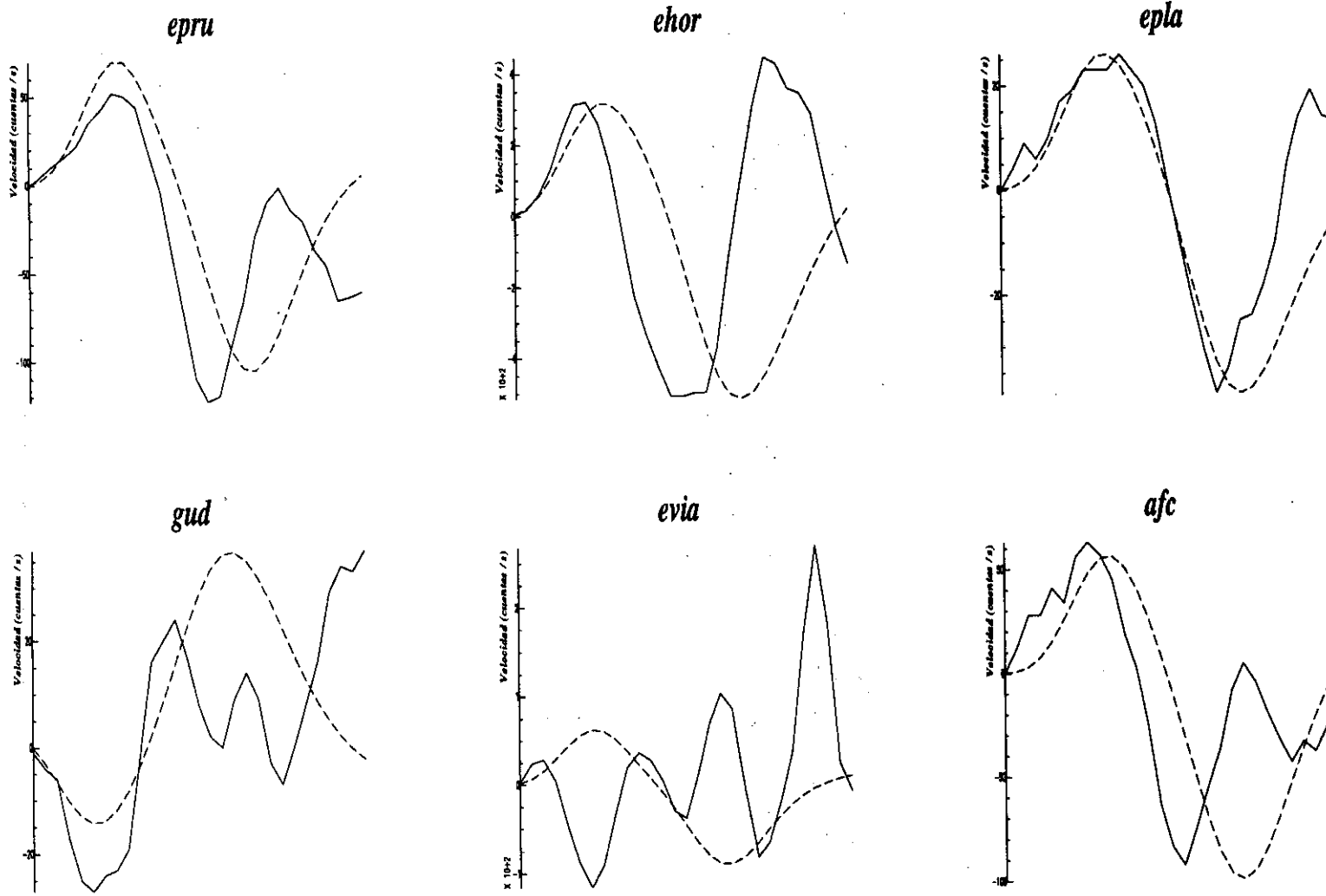


Fig. A2.26. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 150 km.

# 19 Julio 1989 (h=50 Km, rms=0.556)

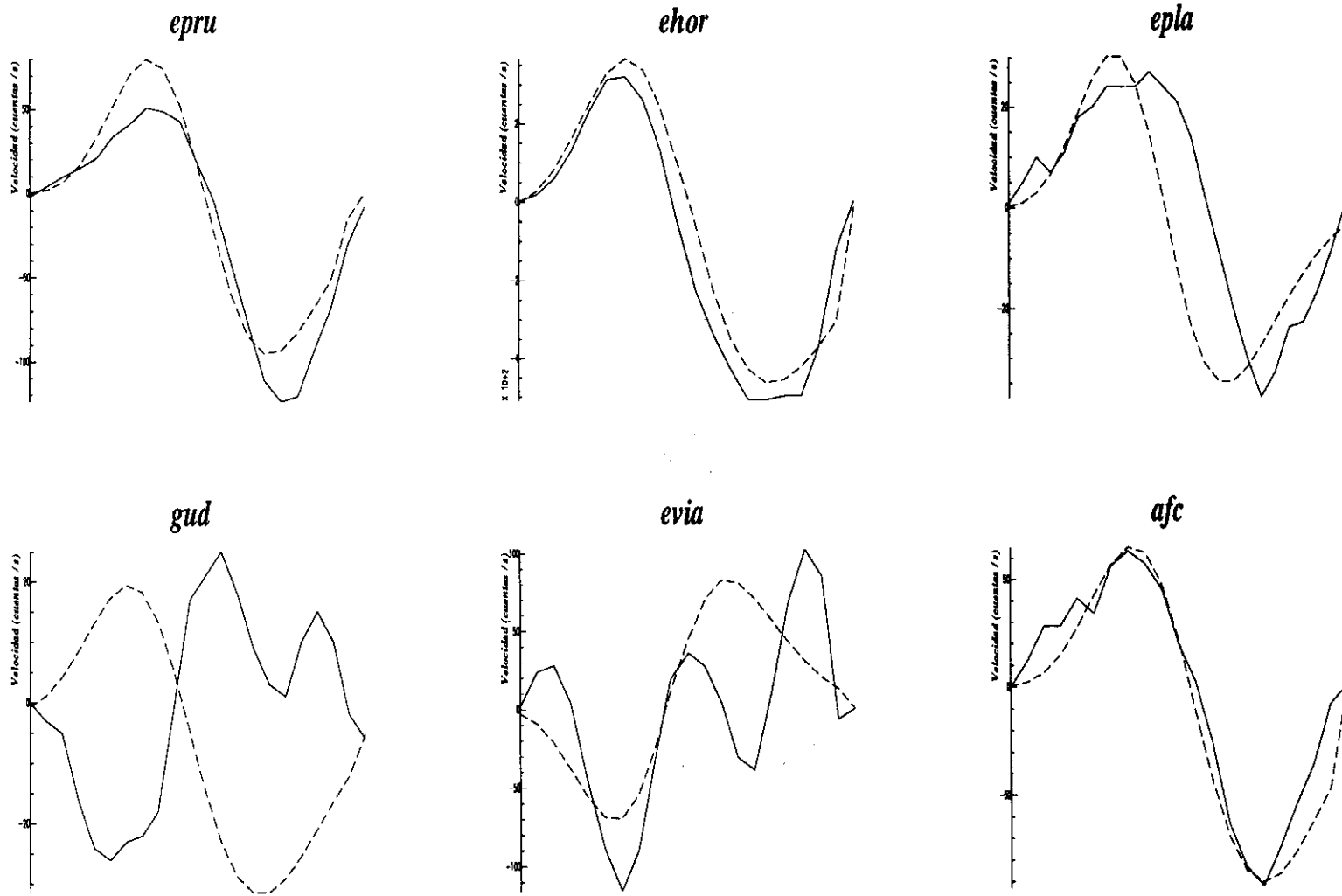


Fig. A2.27. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas-observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 50 km.

# 19 Julio 1989 (h=65 Km, rms=0.555)

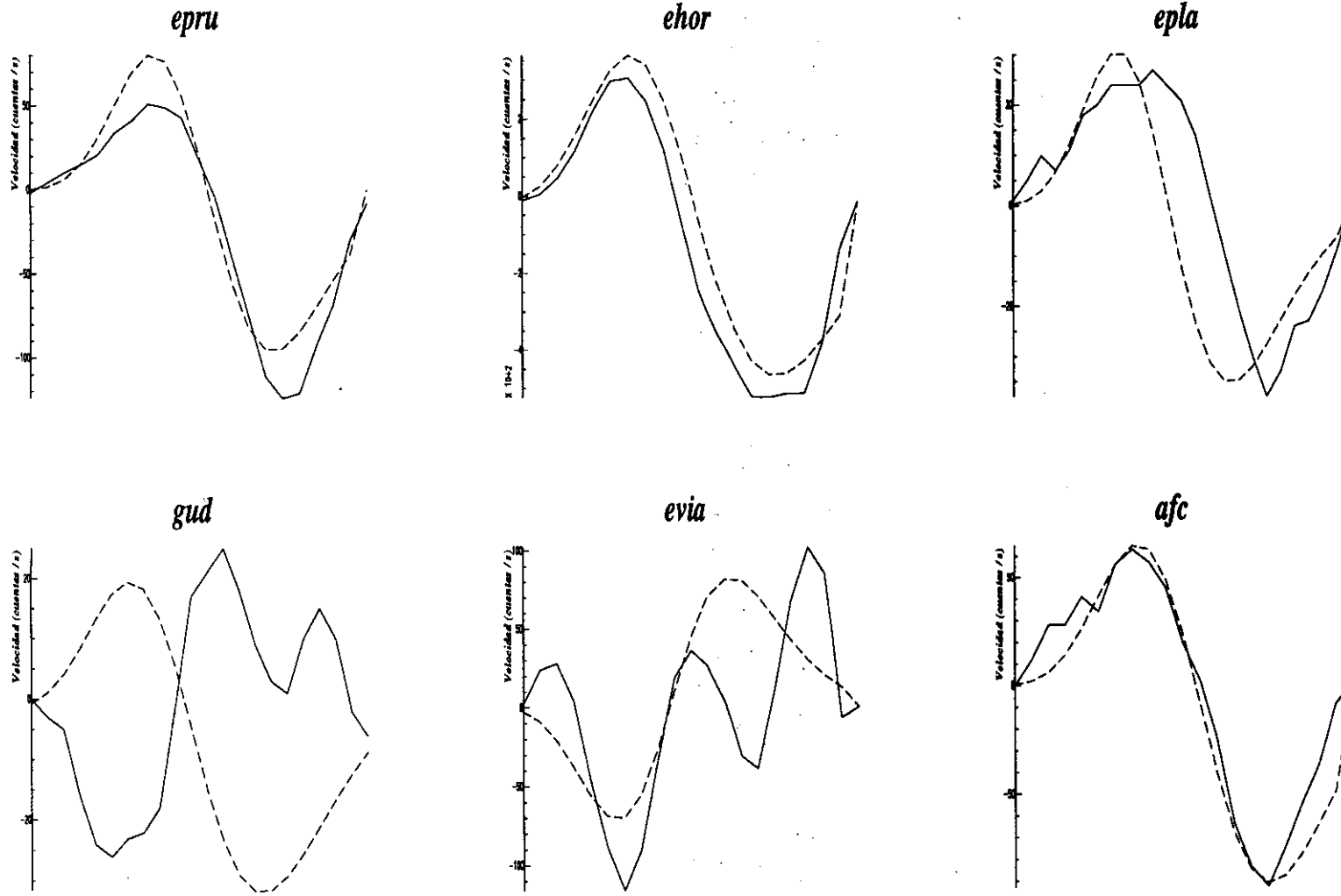
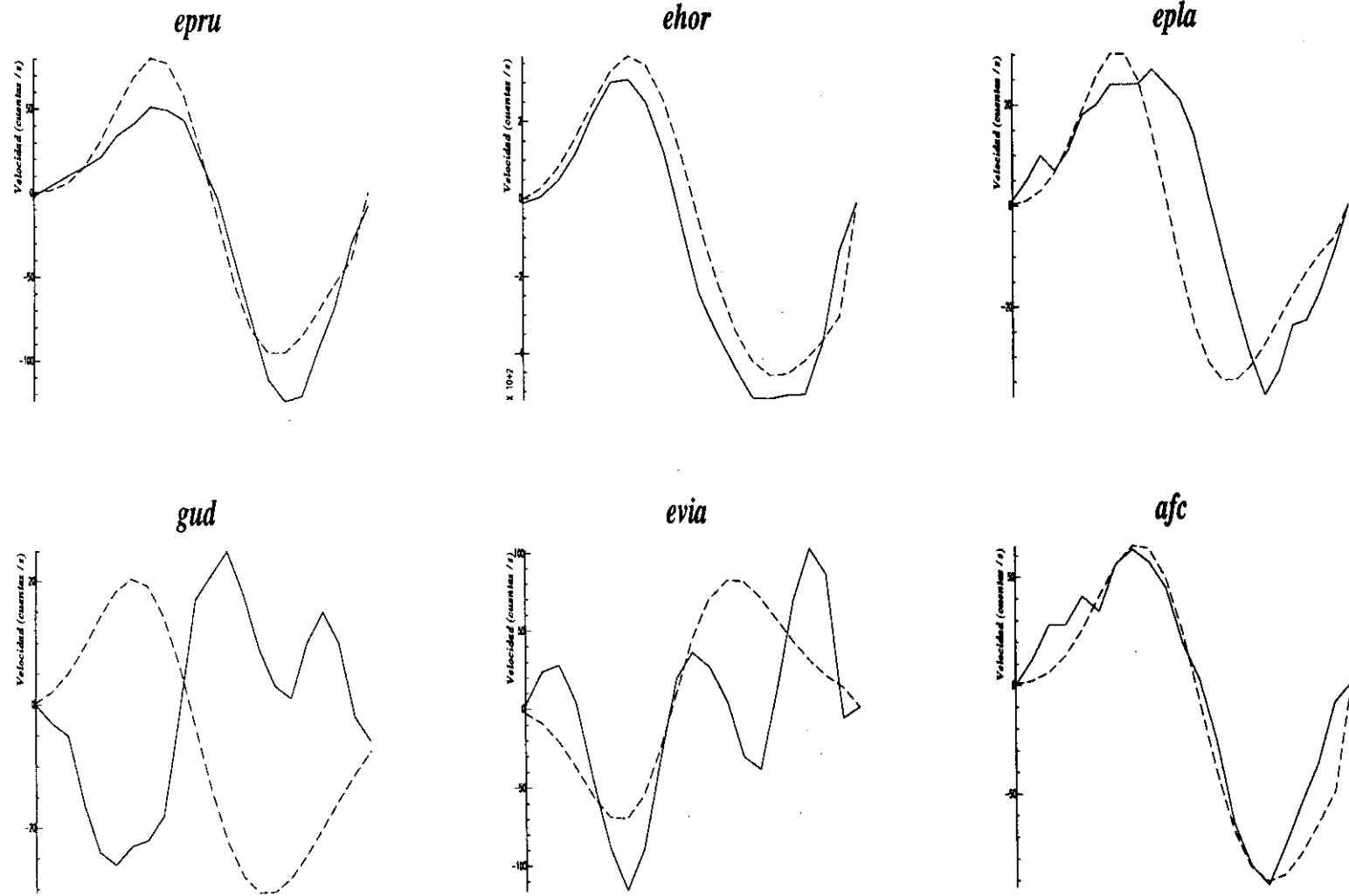


Fig. A2.28. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 65 km.

# 19 Julio 1989 (h=70 Km, rms=0.557)



270

Fig. A2.29. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 70 km.

# 19 Julio 1989 (h=75 Km, rms=0.557)

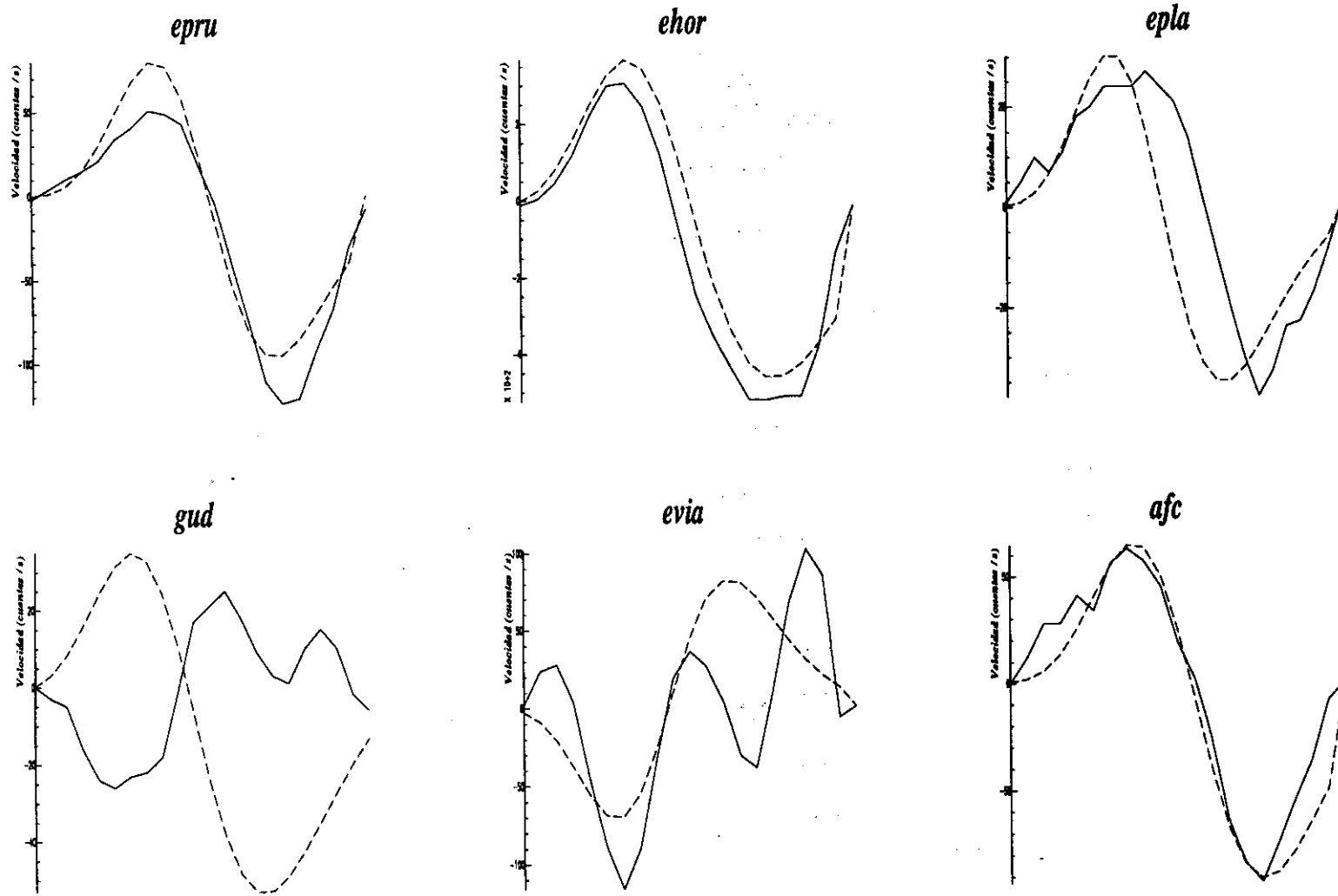
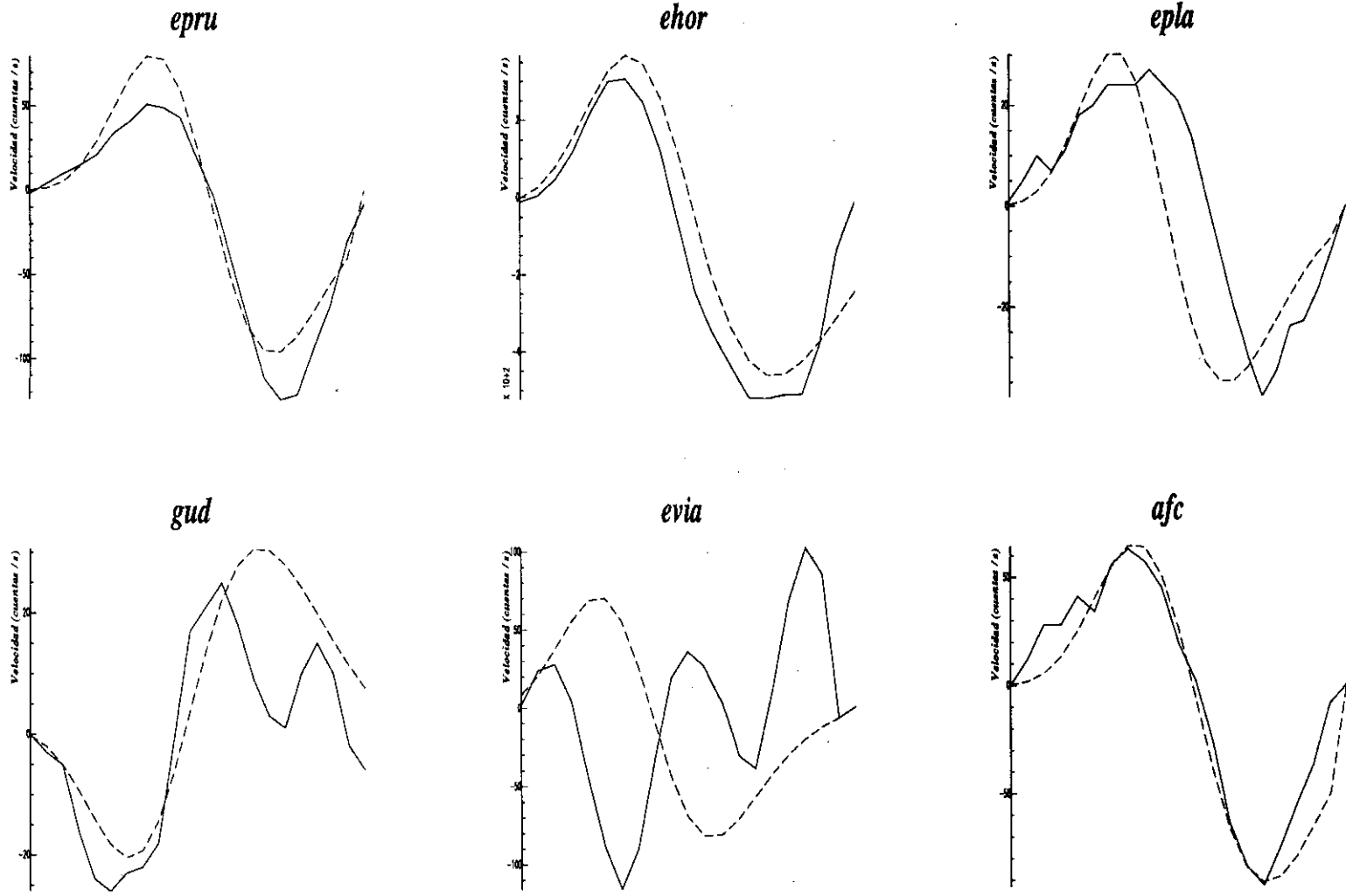


Fig. A2.30. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 75 km.

# 19 Julio 1989 (h=80 Km, rms=0.514)



272

Fig. A2.31. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 80 km.

# 19 Julio 1989 (h=85 Km, rms=0.515)

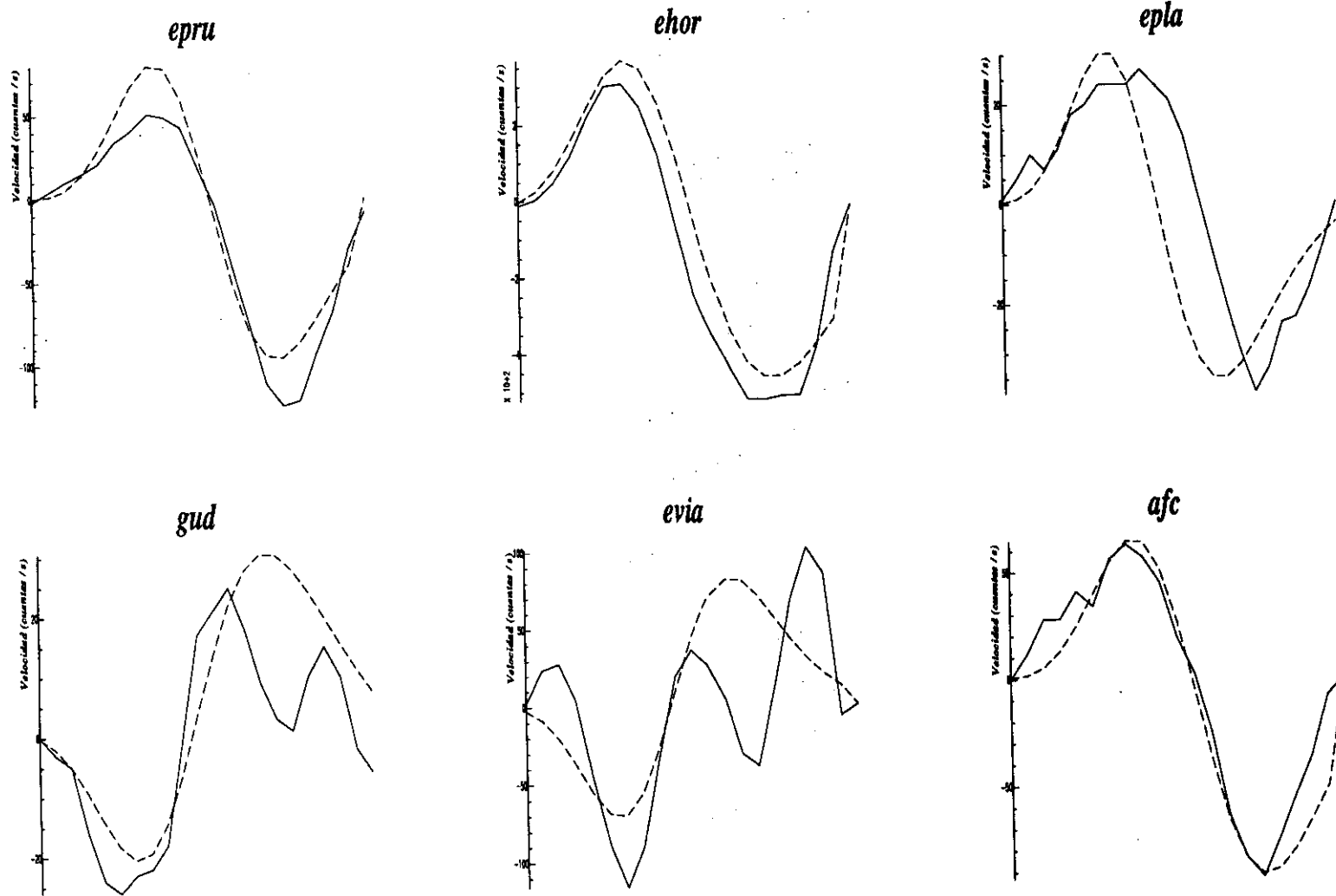


Fig. A2.32. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 85 km.

# 19 Julio 1989 (h=90 Km, rms=0.516)

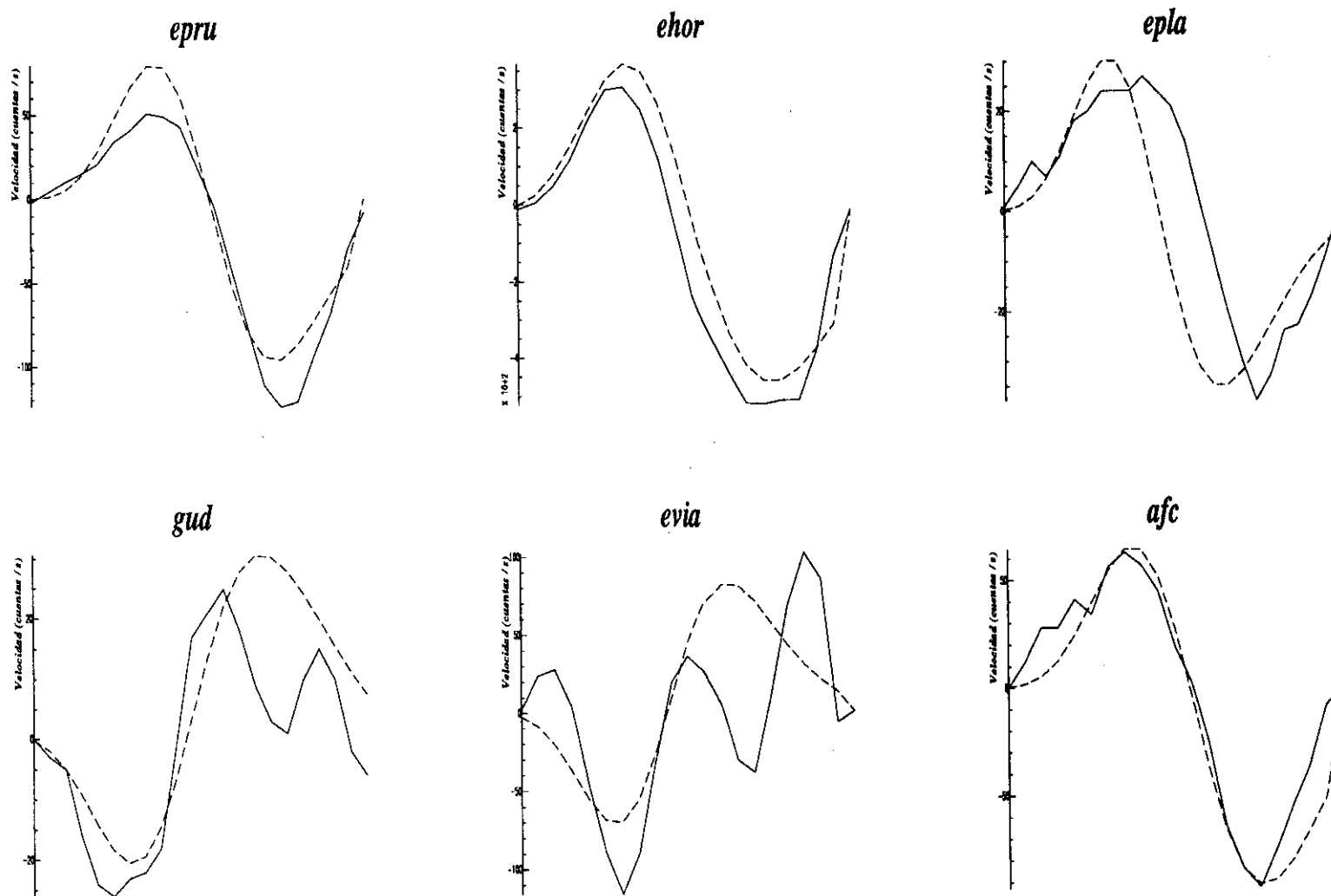


Fig. A2.33. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 90 km.

# 19 Julio 1989 (h=95 Km, rms=0.517)

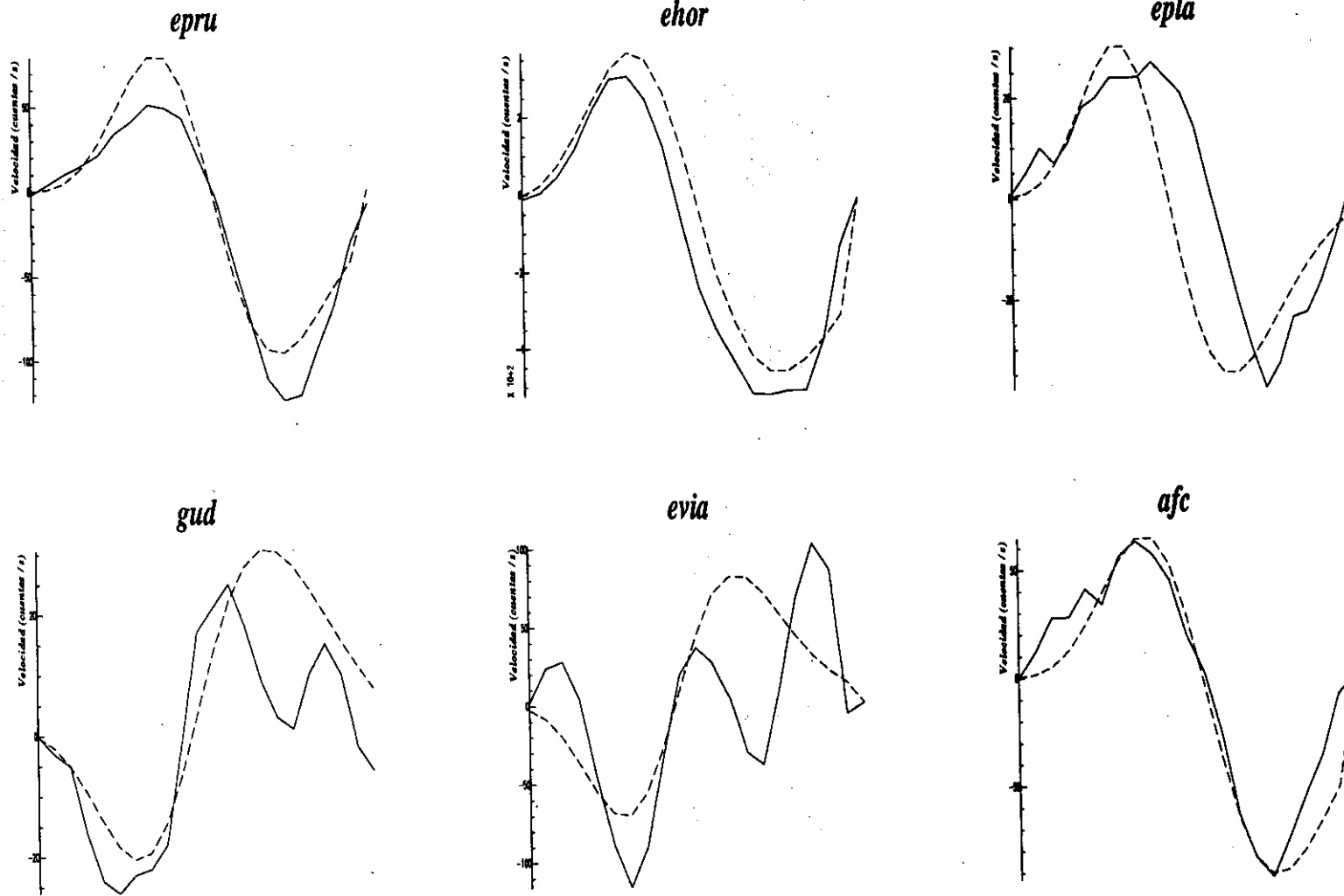


Fig. A2.34. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 95 km.

# 19 Julio 1989 (h=100 Km, rms=0.518)

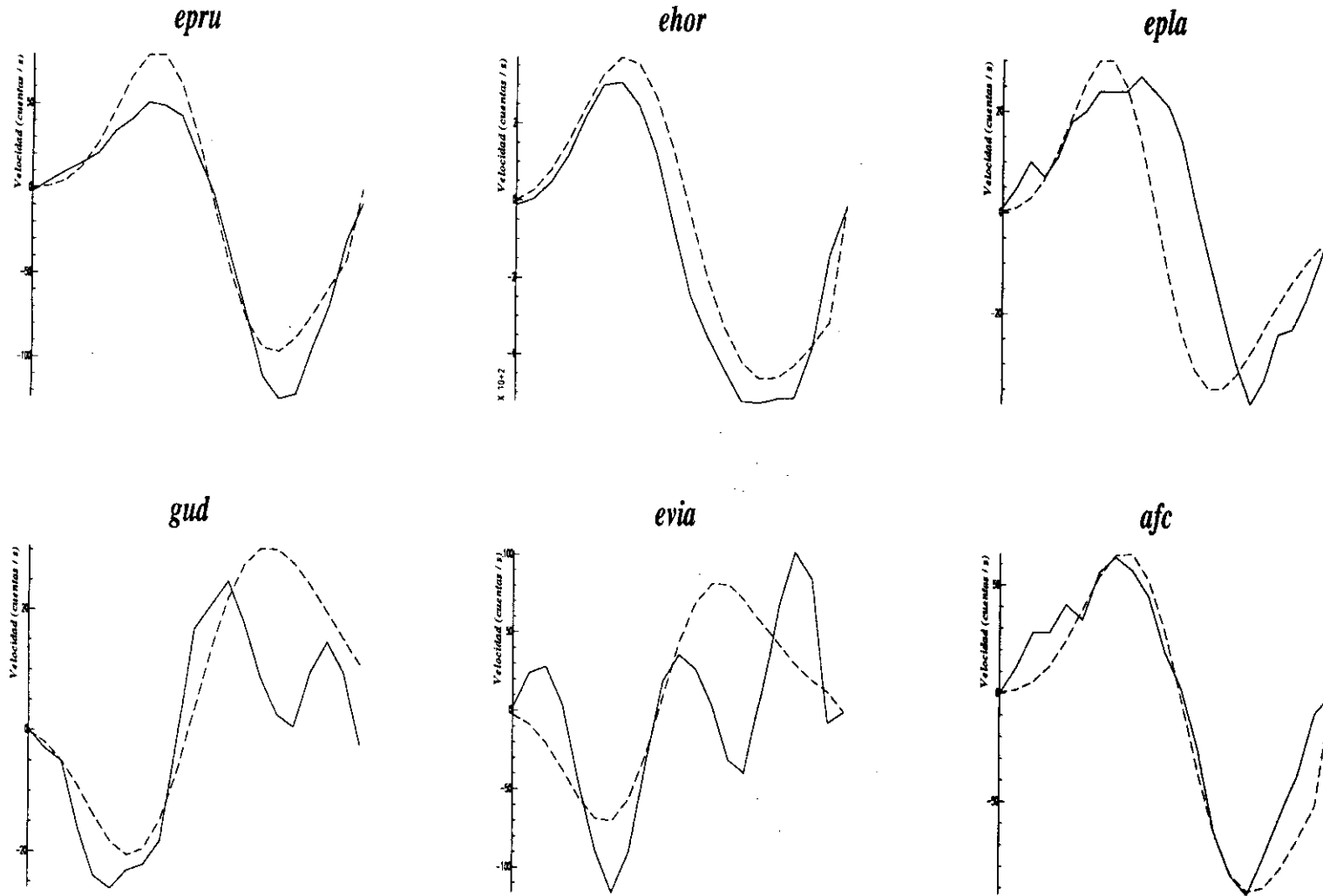


Fig. A2.35. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 100 km.

# 19 Julio 1989 (h=115 Km, rms=0.519)

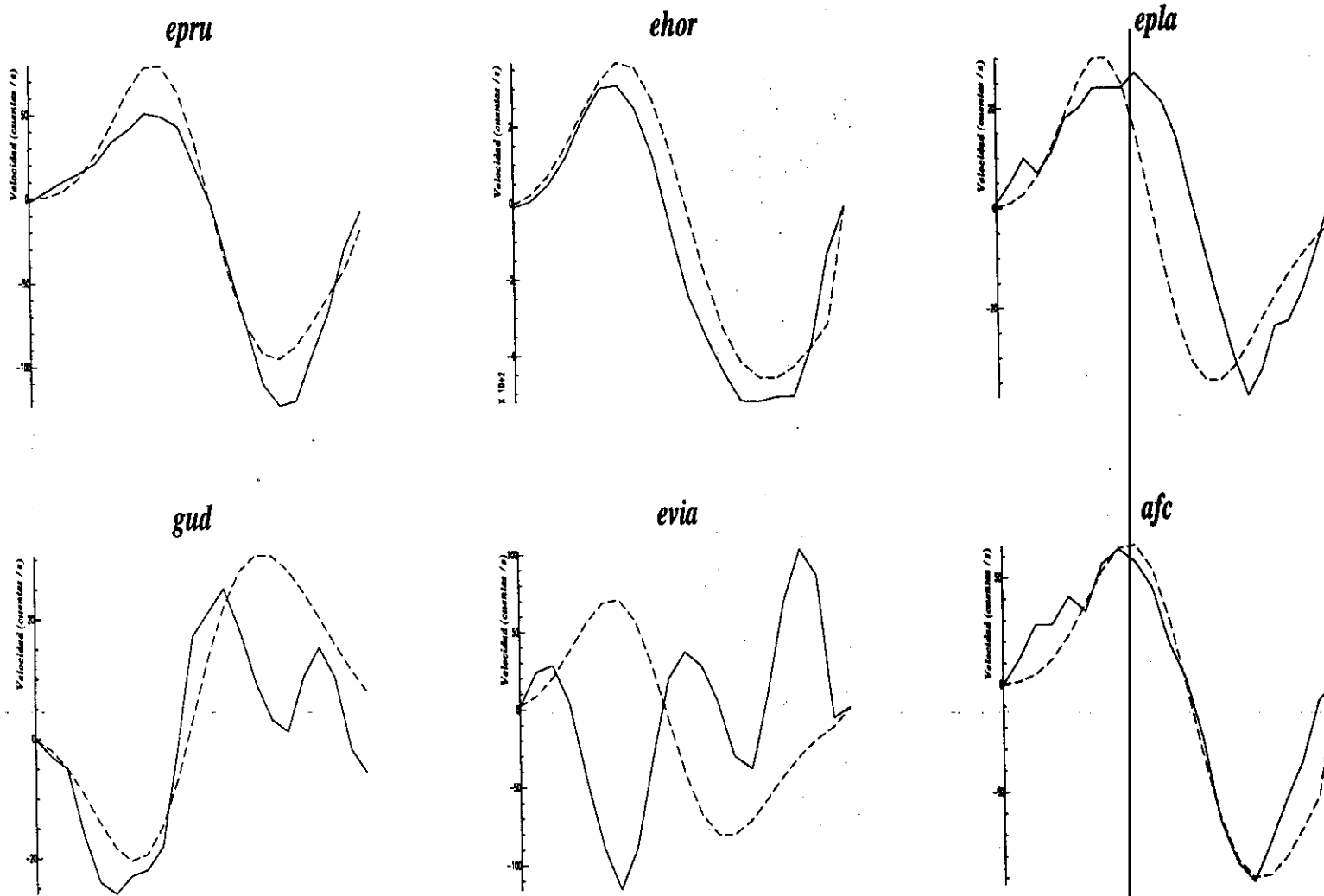


Fig. A2.36. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas-observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 115 km.

# 19 Julio 1989 (h=130 Km, rms=0.522)

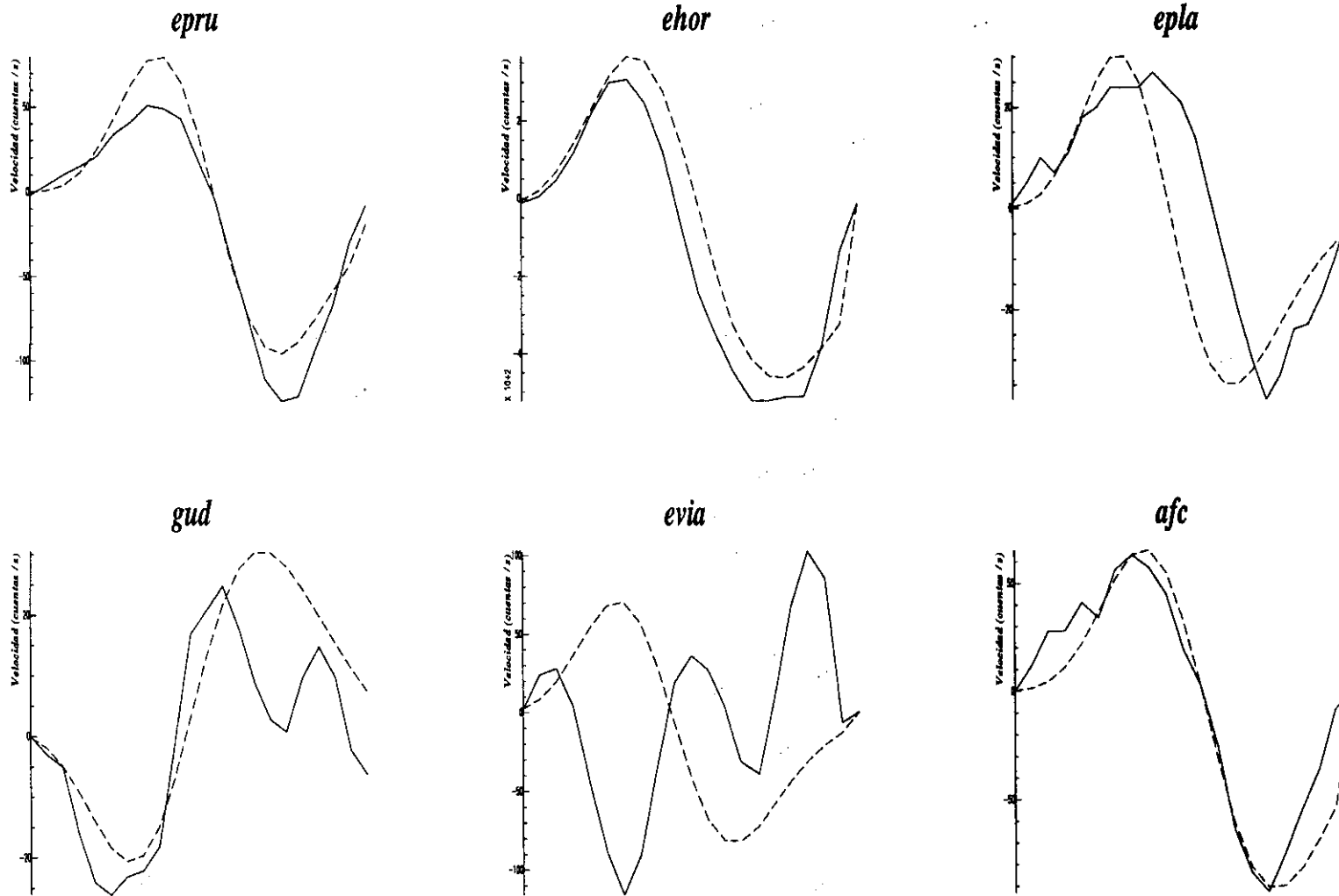


Fig. A2.37. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 130 km.

# 19 Julio 1989 (h=150 Km, rms=0.524)

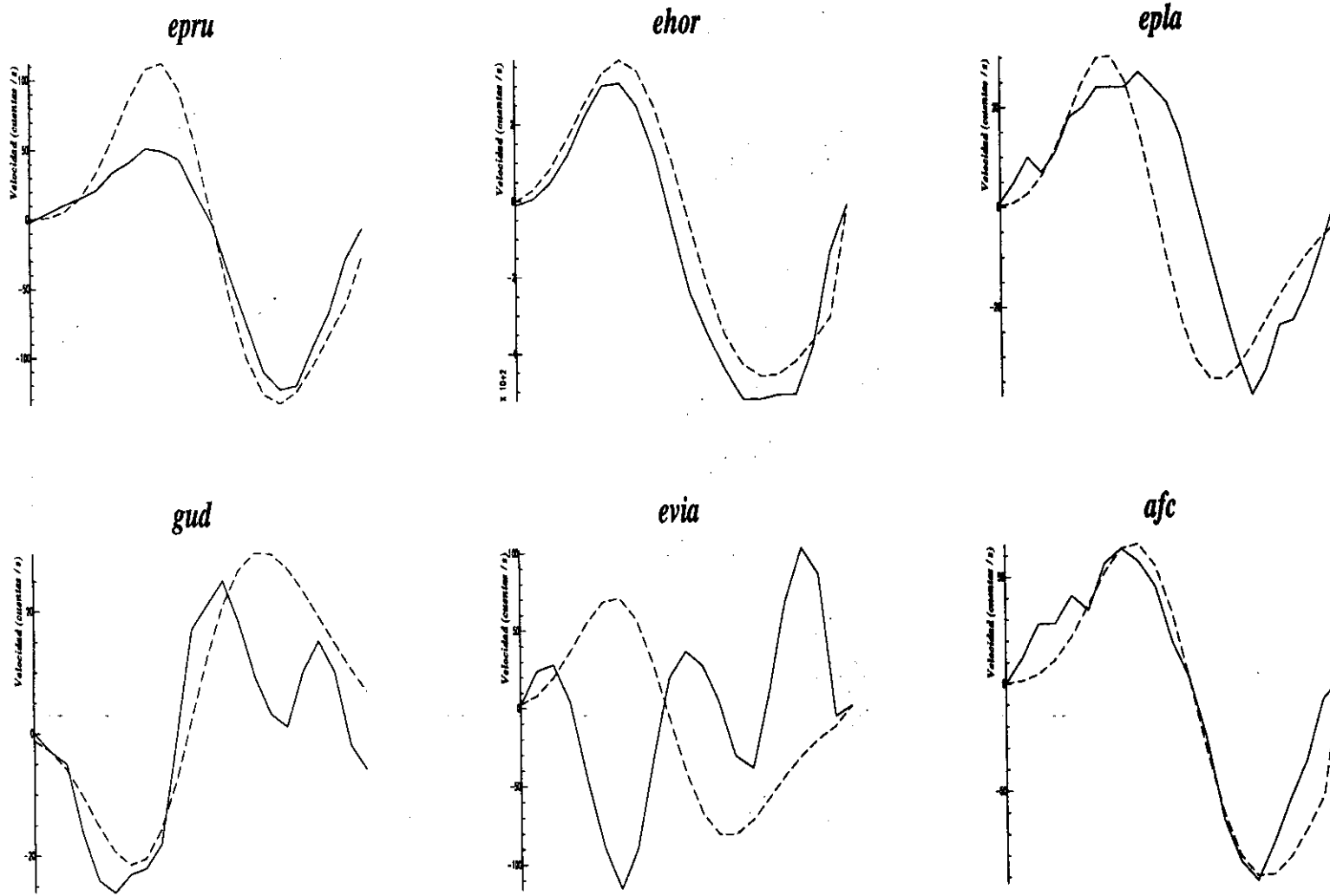


Fig. A2.38. Terremoto 19-Julio-1989. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.16s y 150 km.

# 6 Febrero 1990 (h=38 Km, rms=0.403)

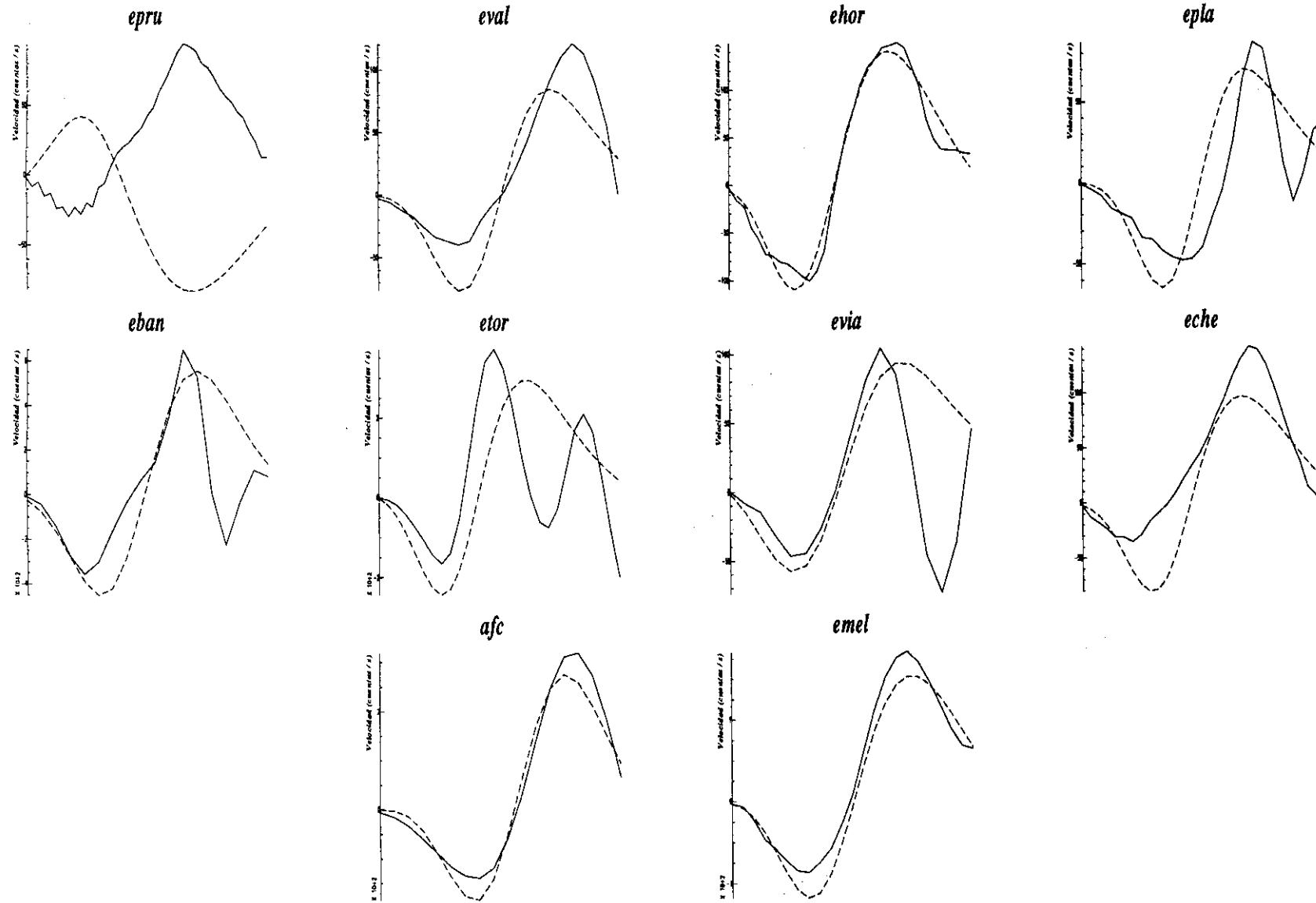


Fig. A2.39. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 38 km.

# 6 Febrero 1990 (h=50 Km, rms=0.407)

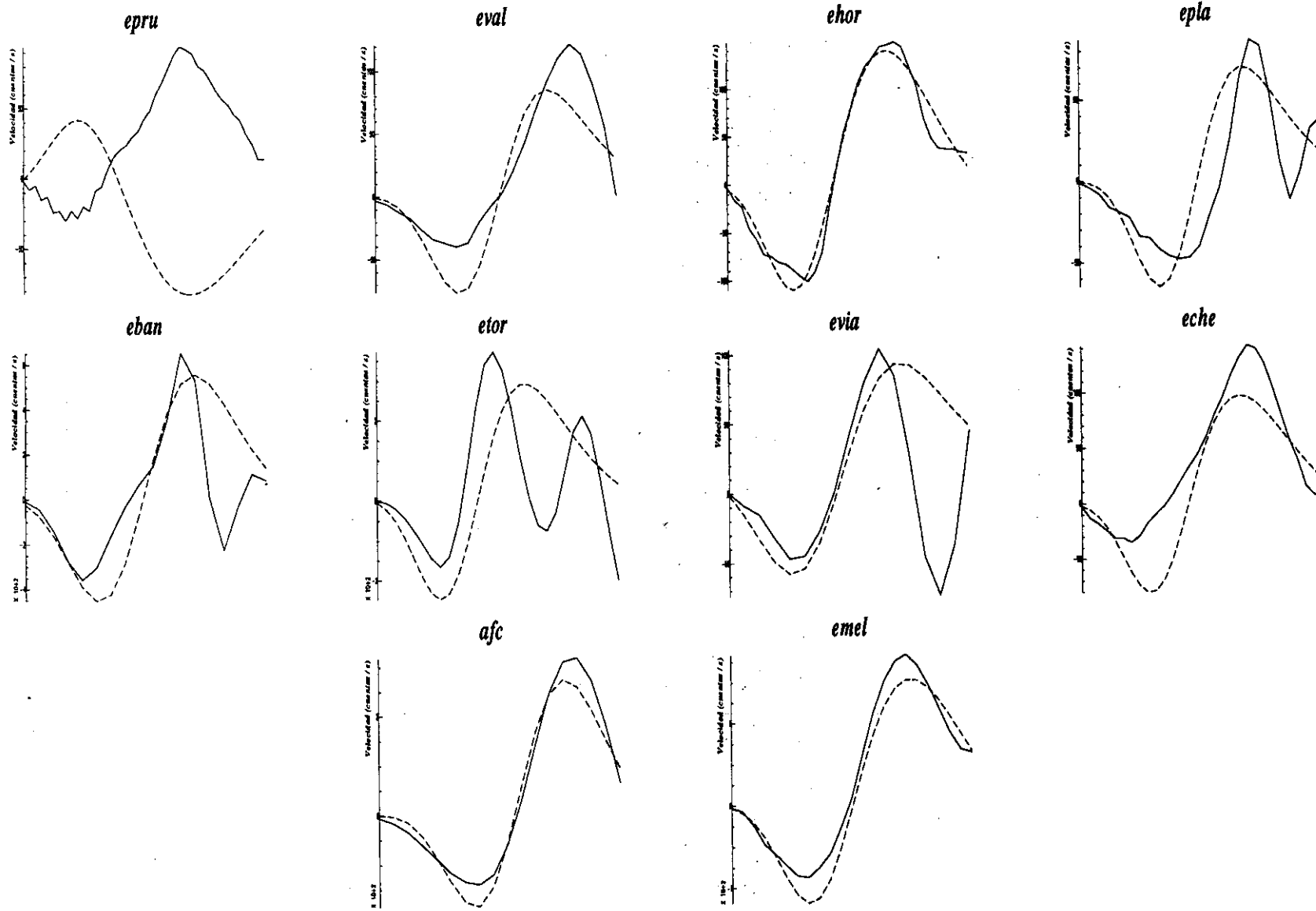


Fig. A2.40. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 50 km.

# 6 Febrero 1990 (h=58 Km, rms=0.395)

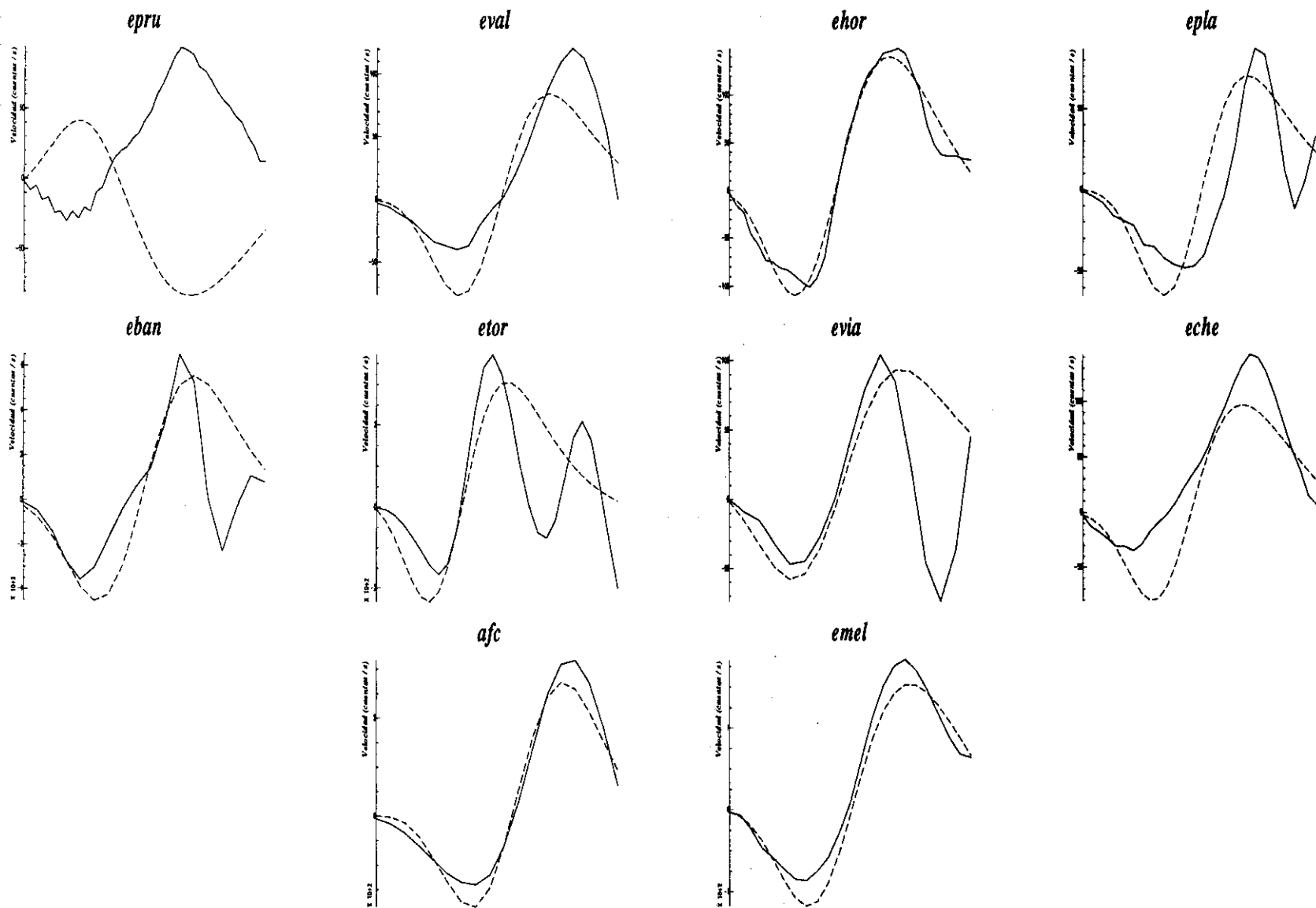


Fig. A2.41. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 58 km.

# 6 Febrero 1990 (h=63 Km, rms=0.407)

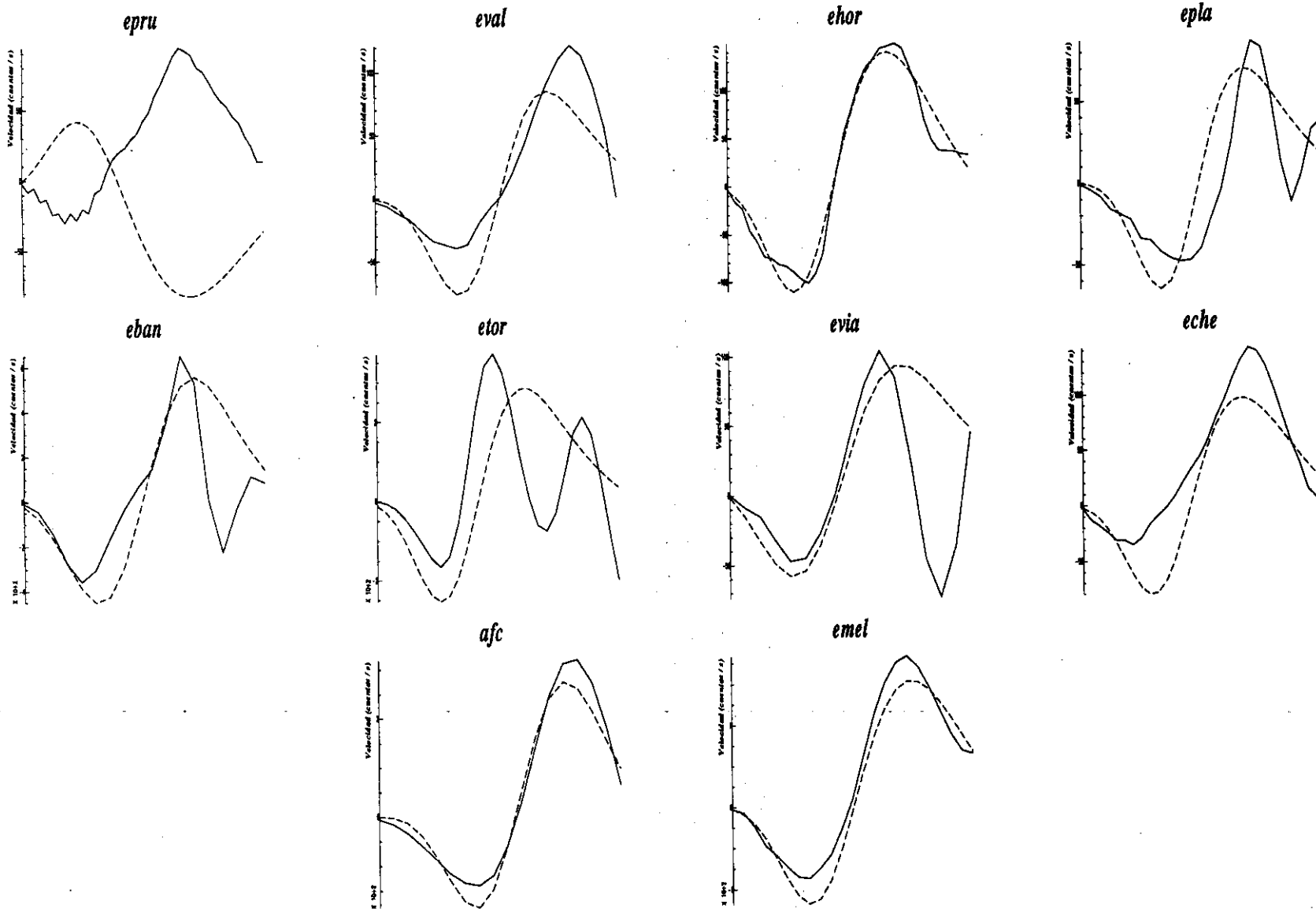


Fig. A2.42. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 63 km.

# 6 Febrero 1990 (h=66 Km, rms=0.407)

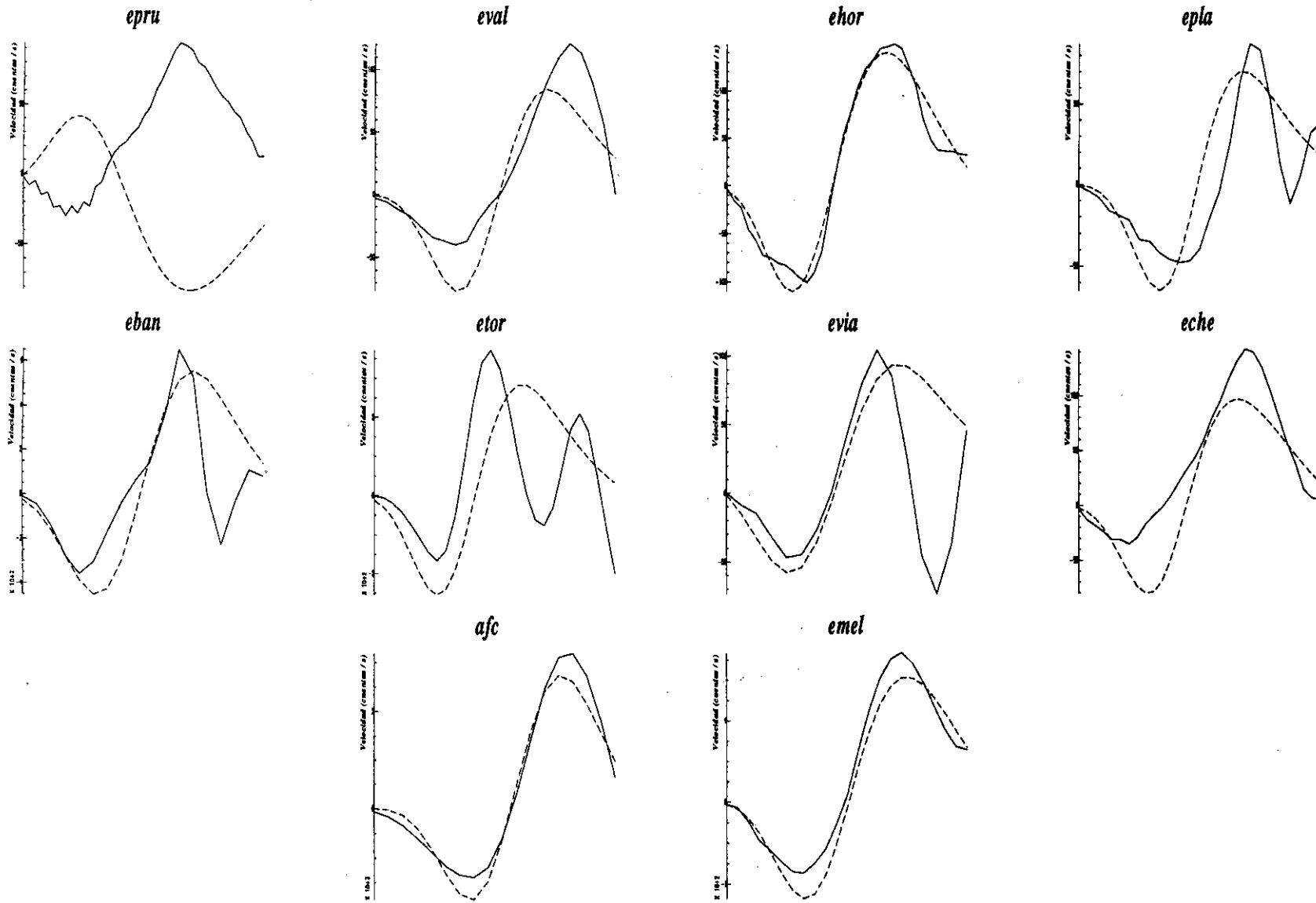


Fig. A2.43. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 66 km.

# 6 Febrero 1990 (h=68 Km, rms=0.303)

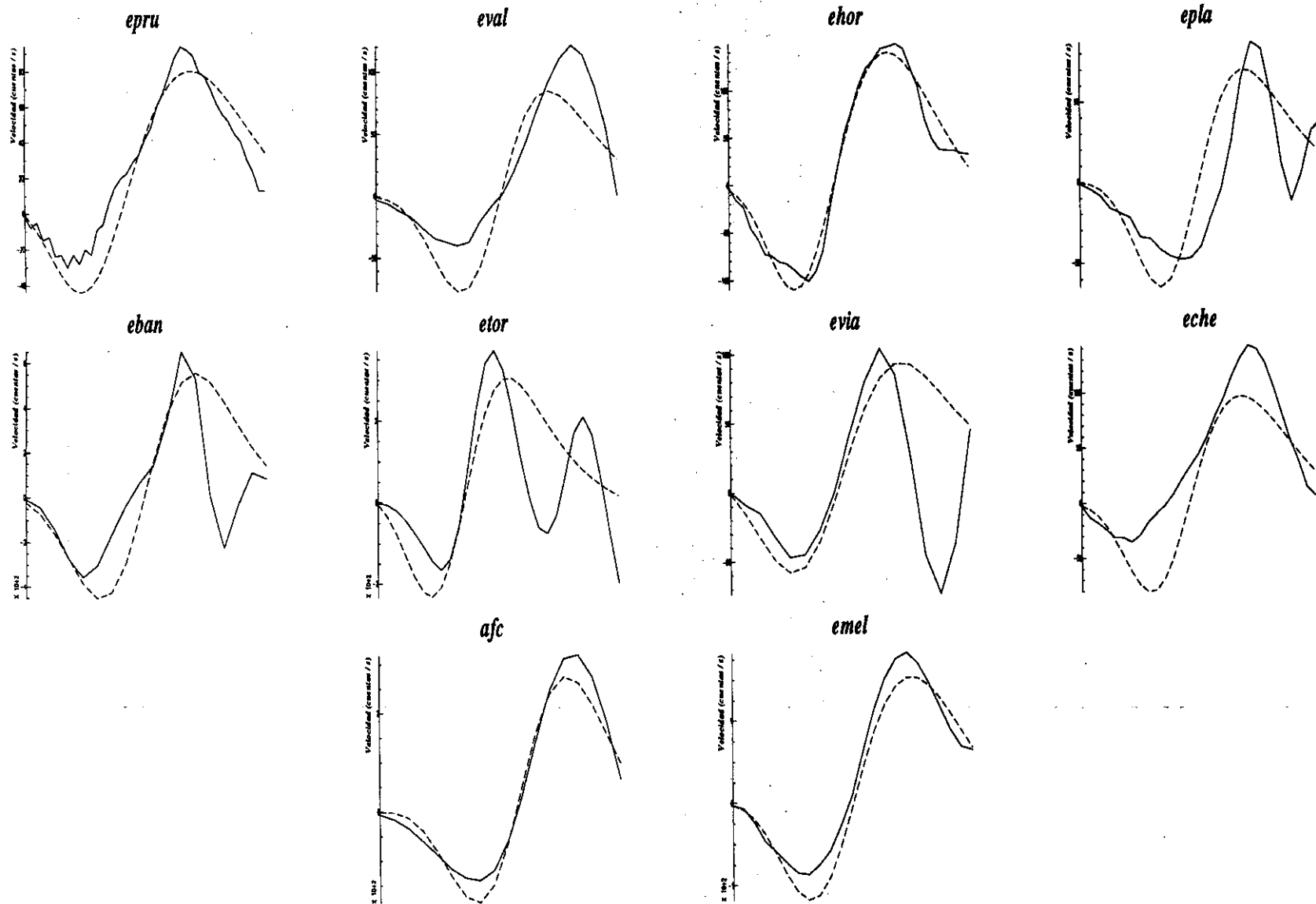


Fig. A2.44. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 68 km.

# 6 Febrero 1990 (h=70 Km, rms=0.409)

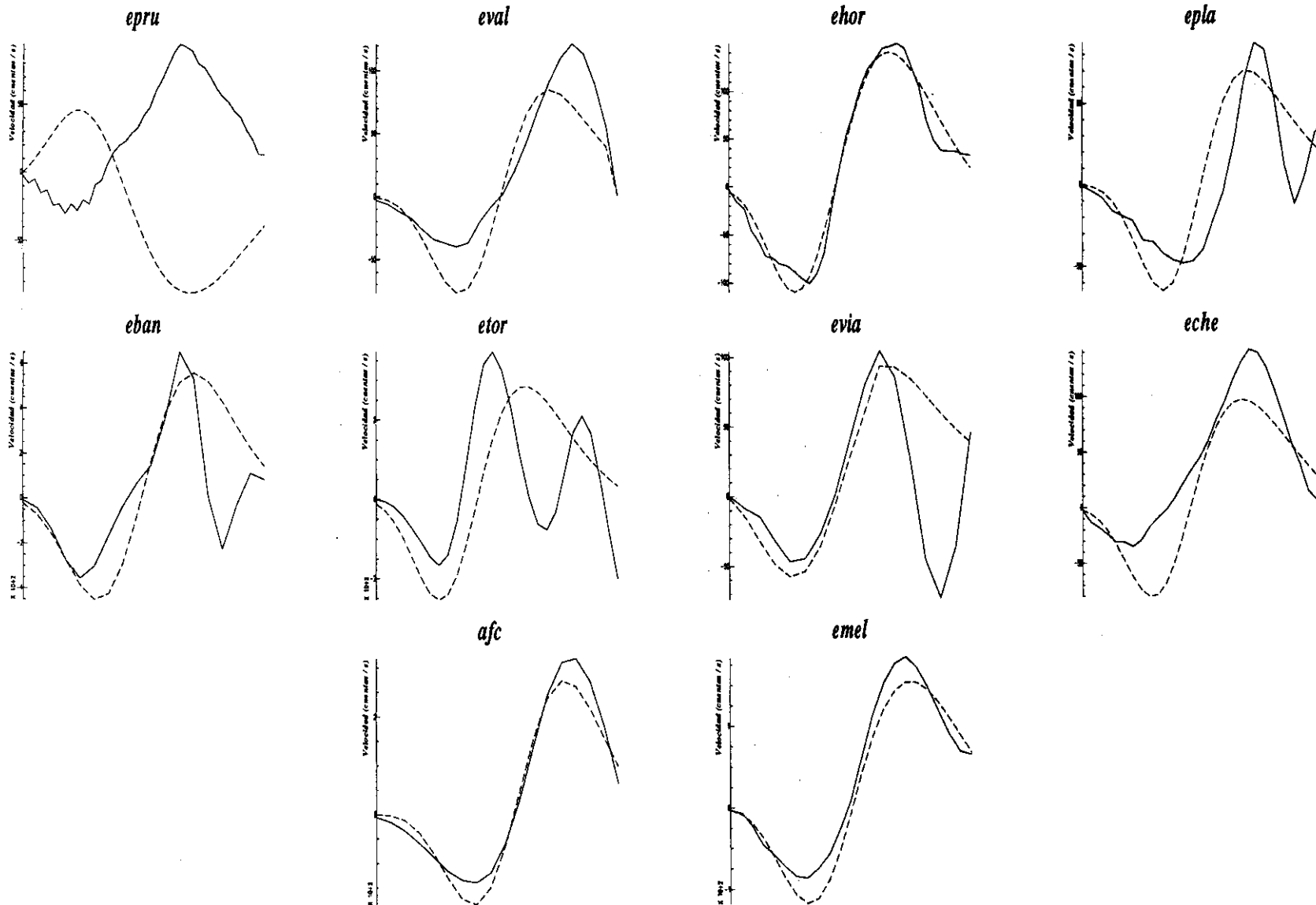


Fig. A2.45. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 70 km.

# 6 Febrero 1990 (h=73 Km, rms=0.407)

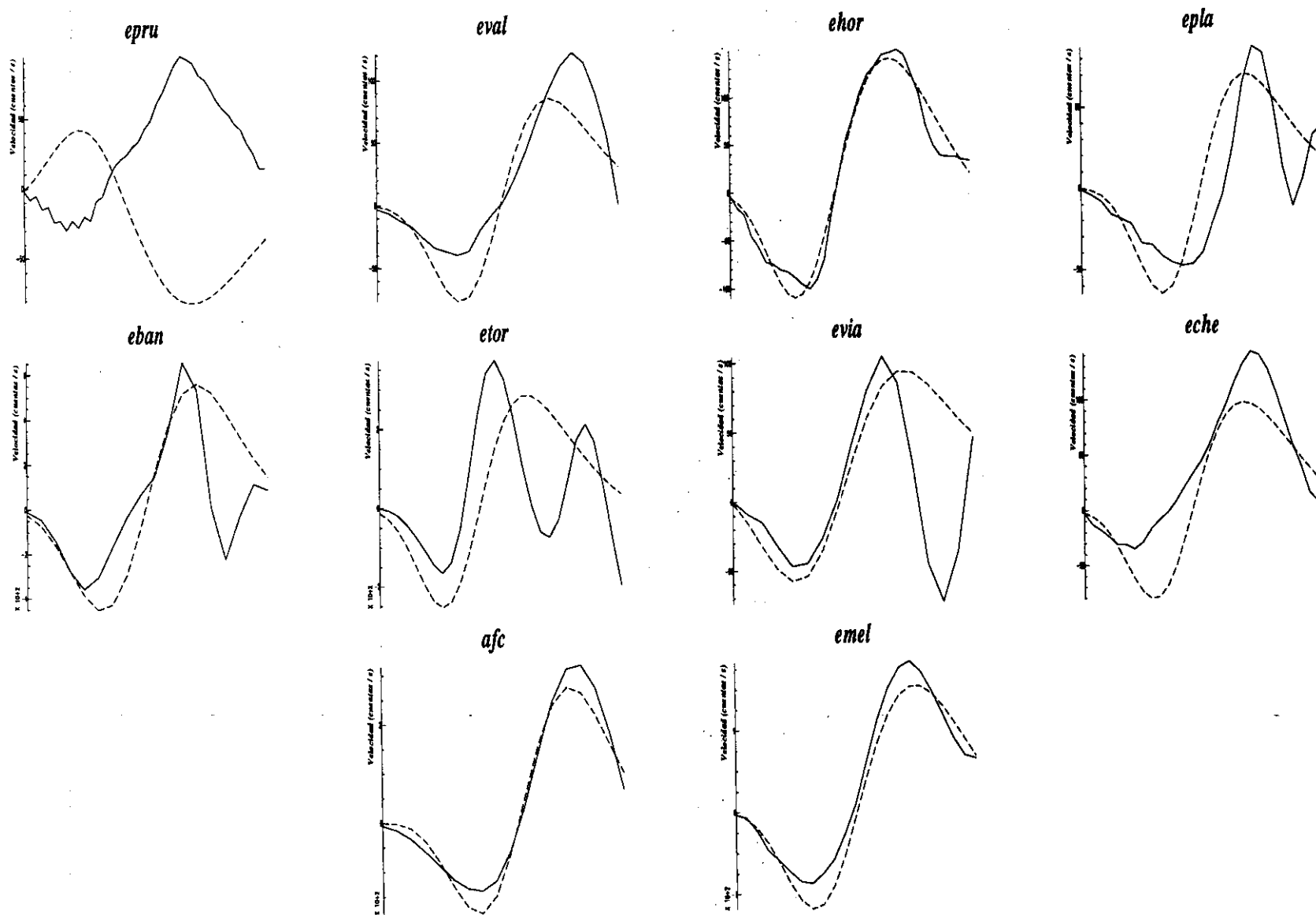
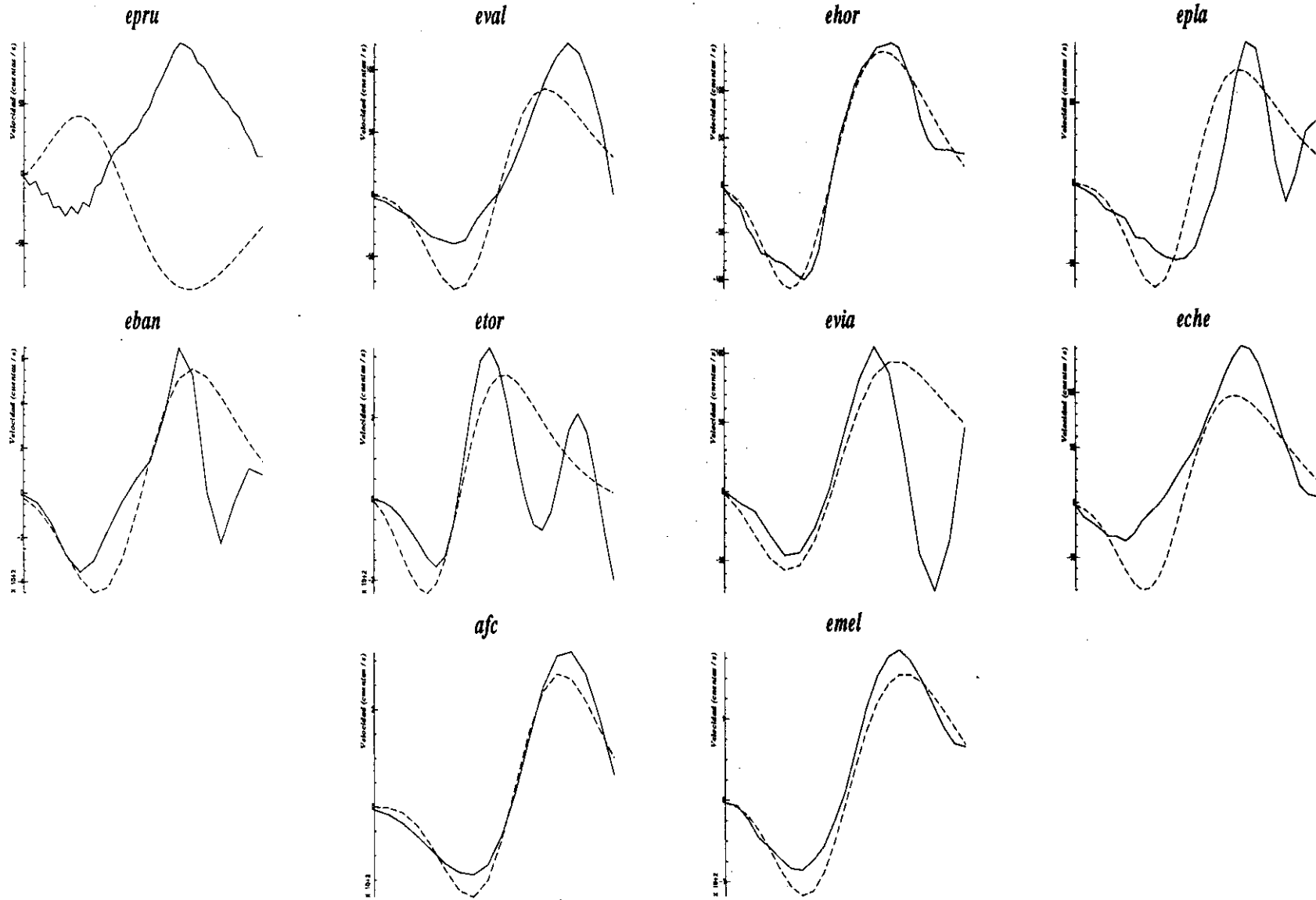


Fig. A2.46. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 73 km.

# 6 Febrero 1990 (h=78 Km, rms=0.396)



288

Fig. A2.47. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 78 km.

# 6 Febrero 1990 (h=88 Km, rms=0.395)

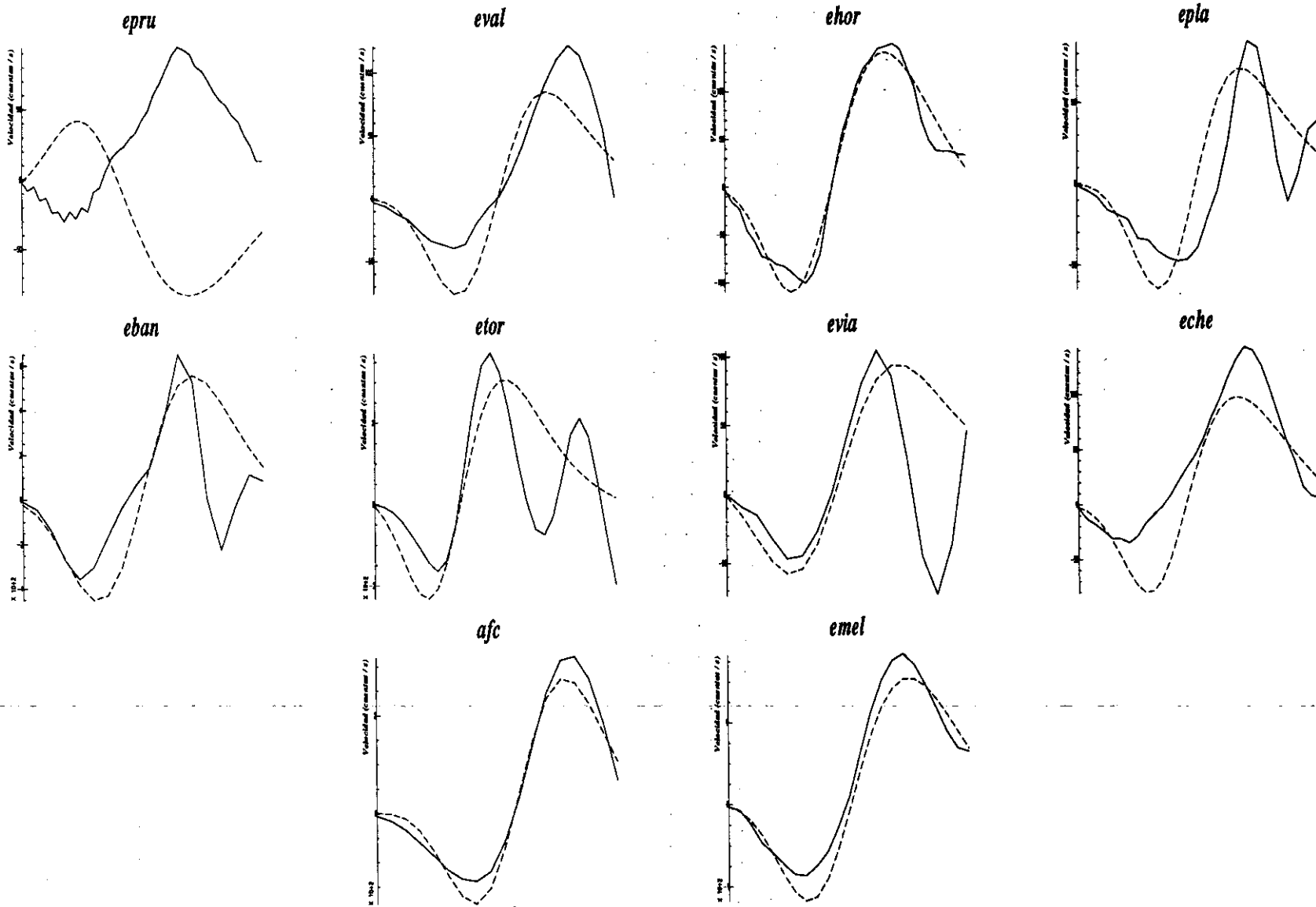
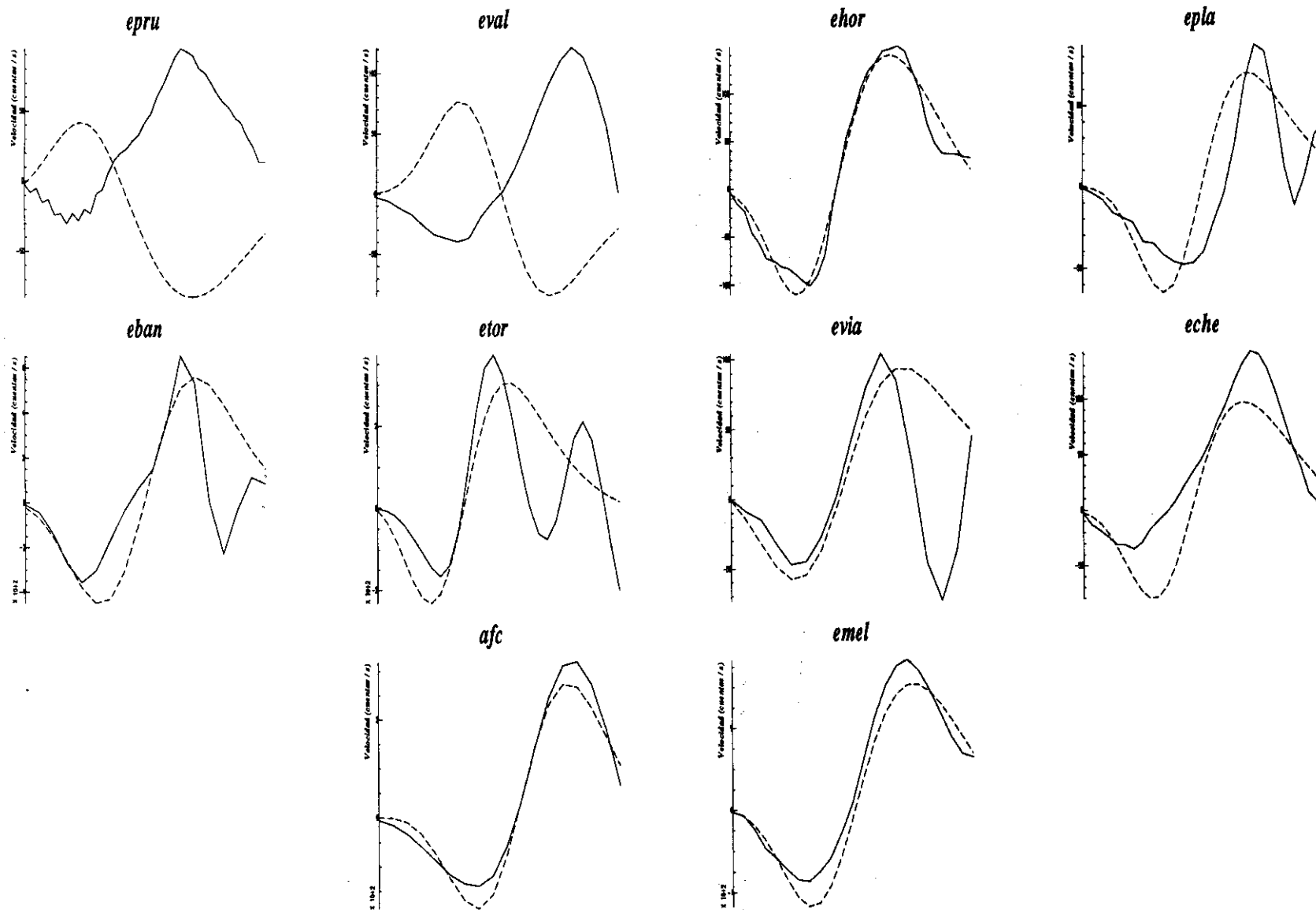


Fig. A2.48. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 88 km.

# 6 Febrero 1990 (h=98 Km, rms=0.475)



290

Fig. A2.49. Terremoto 6-Febrero-1990. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.10s y 98 km.

# 14 Marzo 1992 (h=44 Km, rms=0.558)

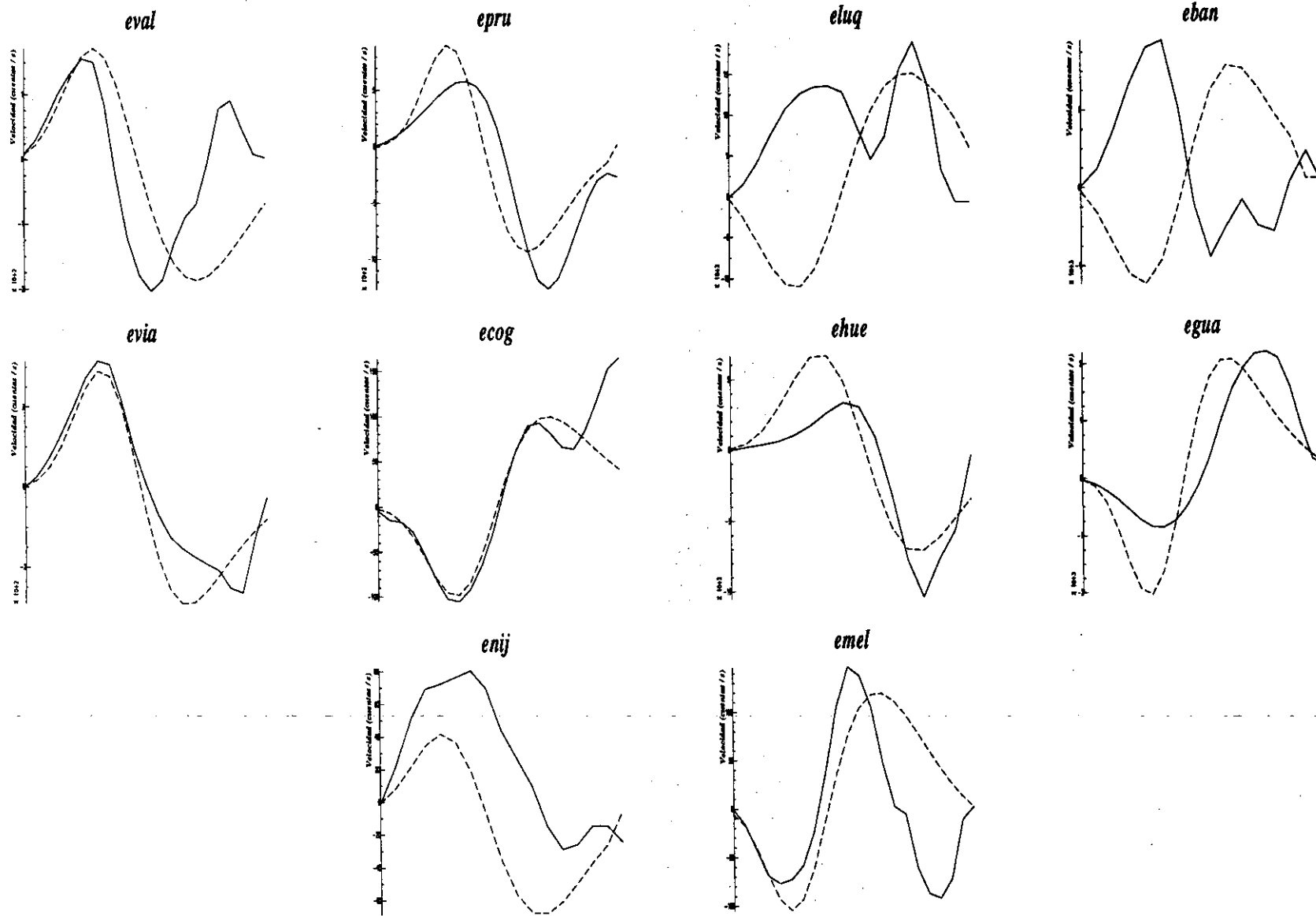
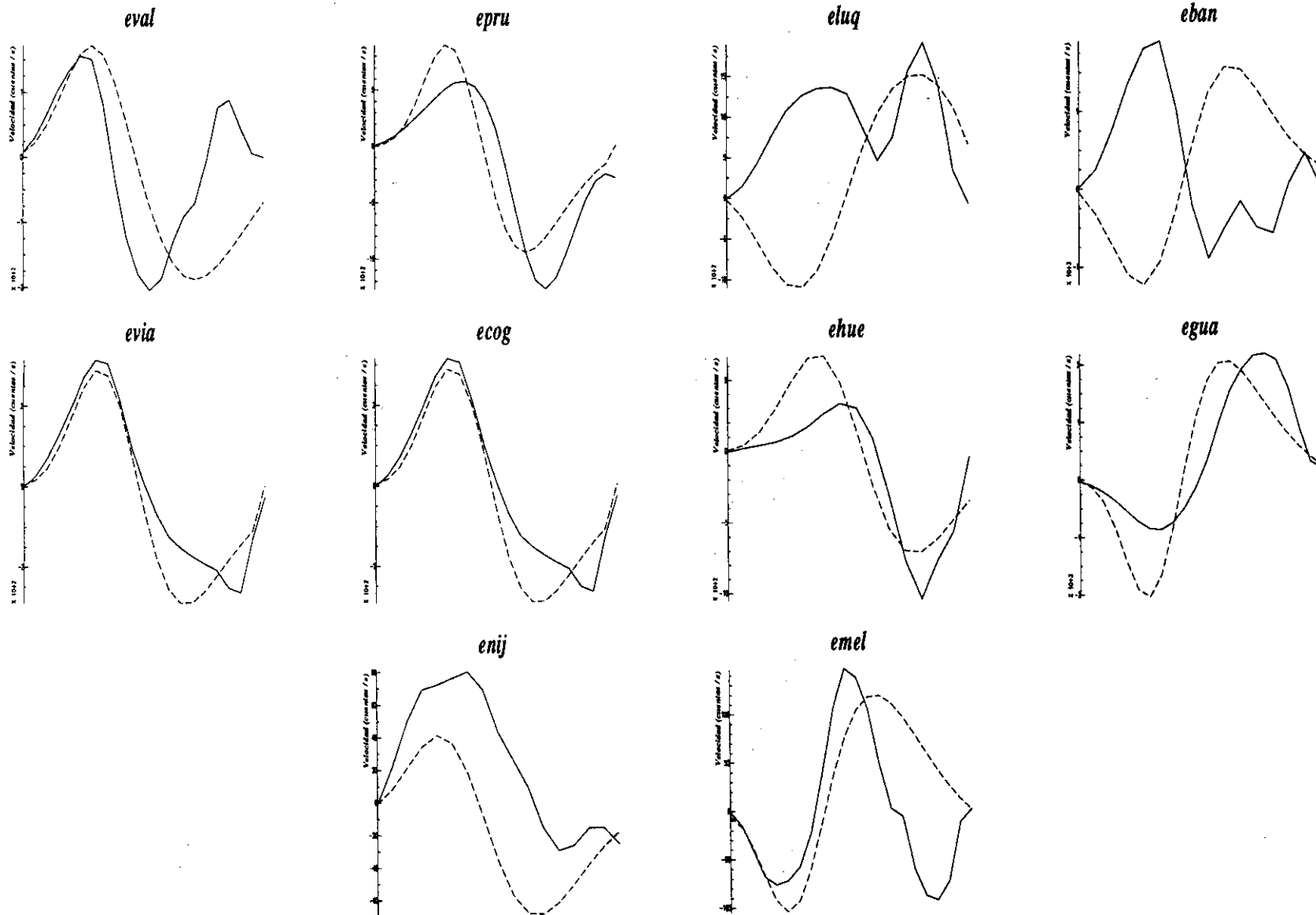


Fig. A2.50. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 44 km.

# 14 Marzo 1992 (h=54 Km, rms=0.555)



292

Fig. A2.51. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 54 km.

# 14 Marzo 1992 (h=62 Km, rms=0.487)

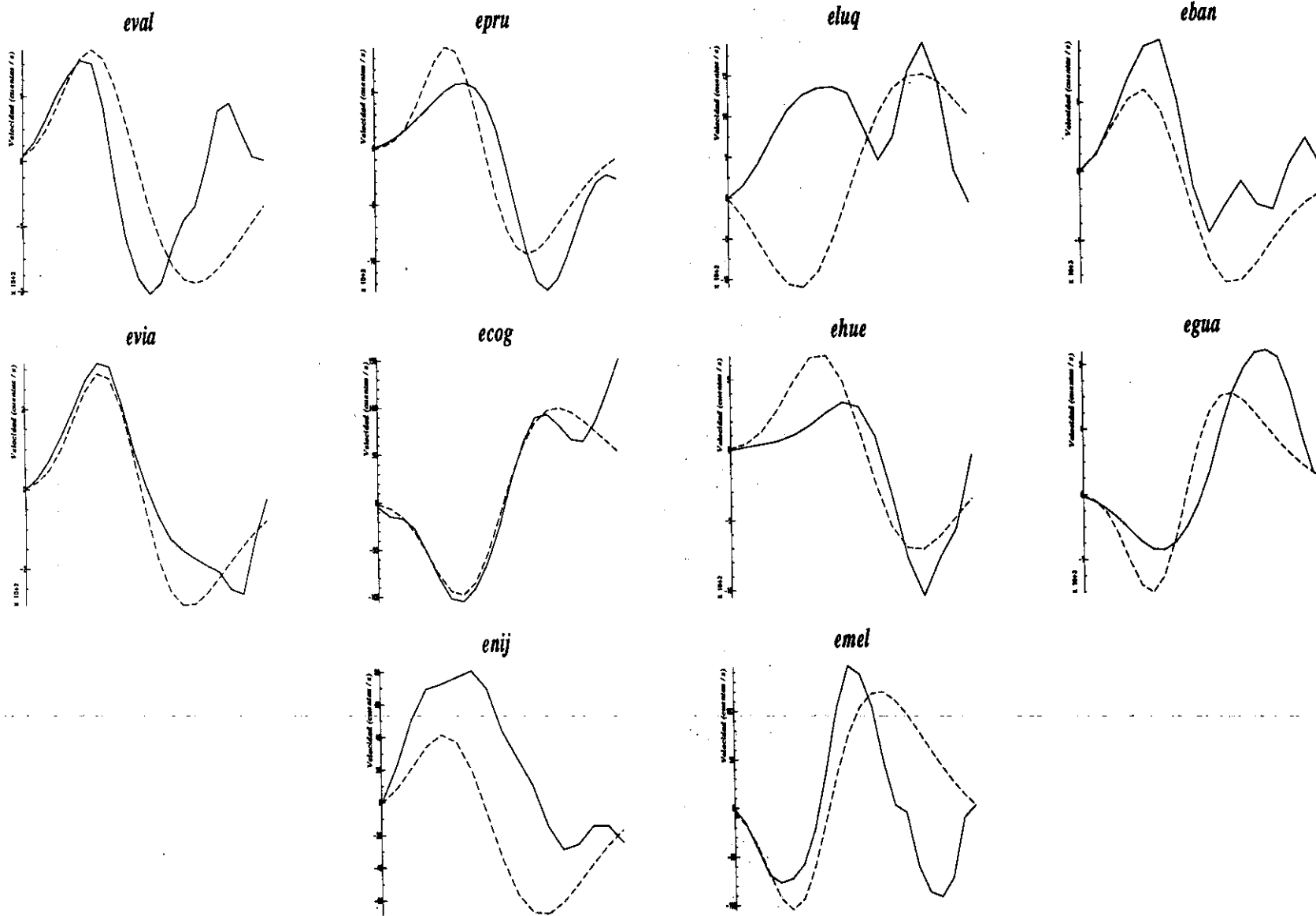


Fig. A2.52. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 62 km.

# 14 Marzo 1992 (h=64 Km, rms=0.435)

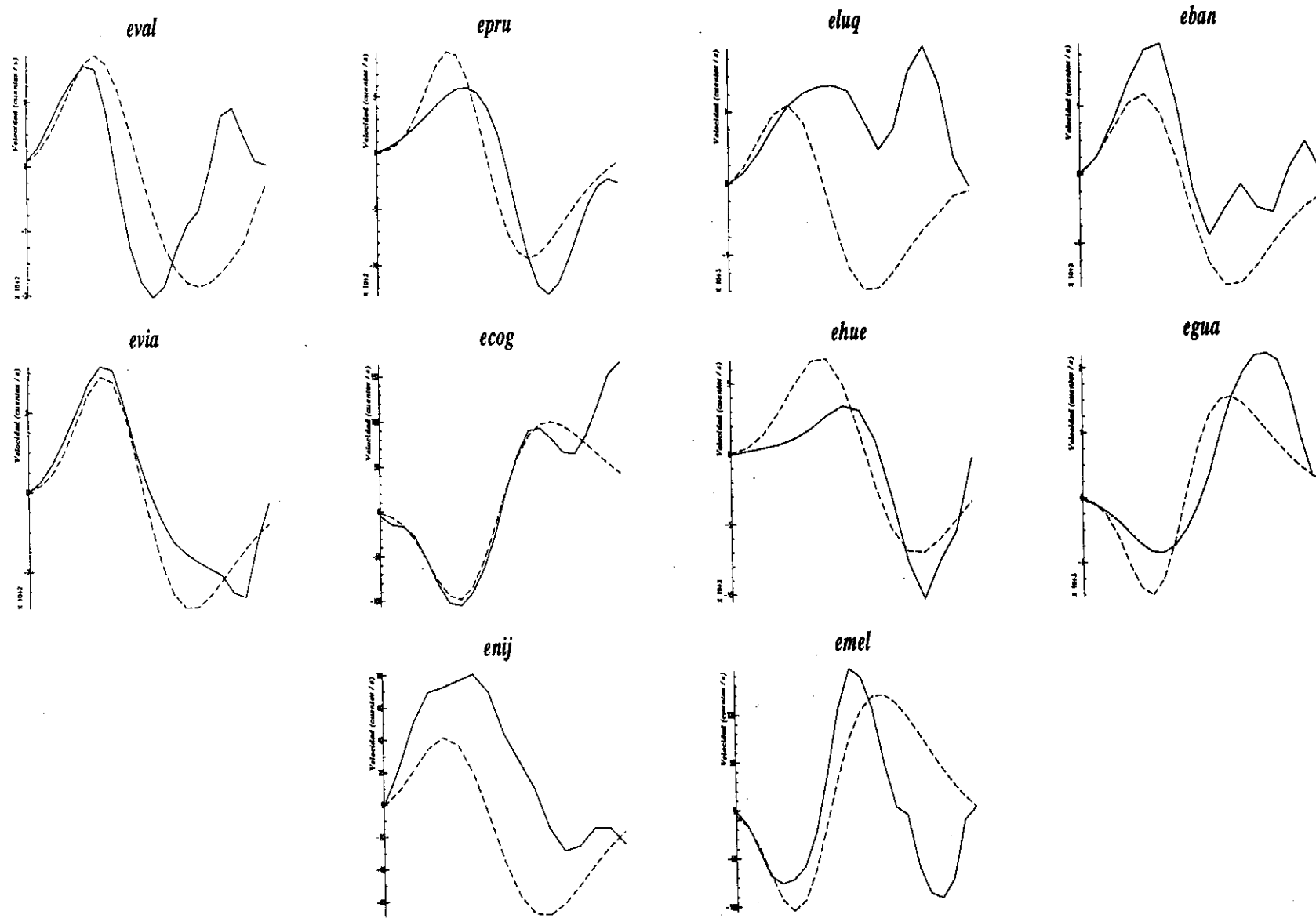


Fig. A2.53. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 64 km.

# 14 Marzo 1992 (h=66 Km, rms=0.486)

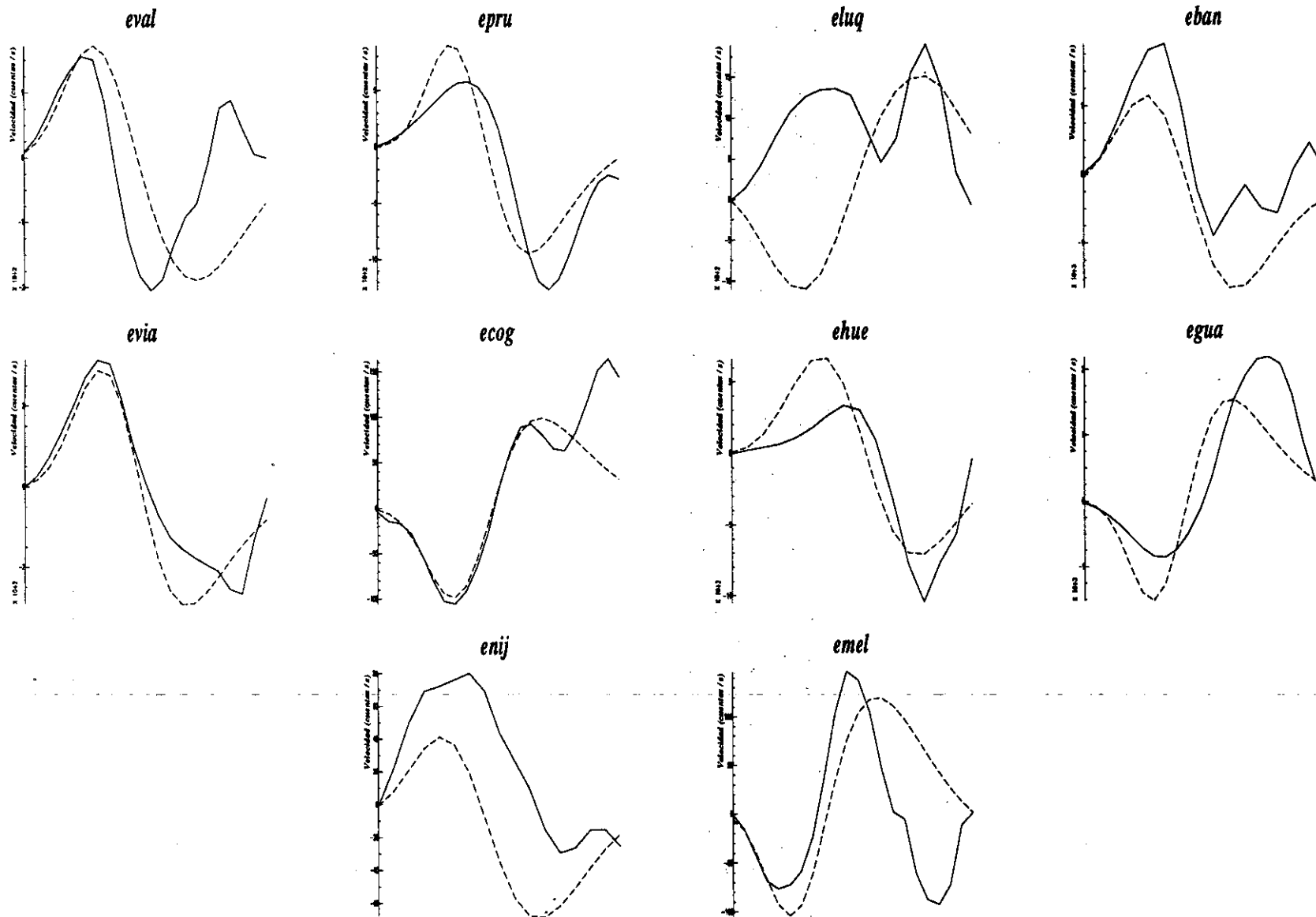


Fig. A2.54. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 66 km.

# 14 Marzo 1992 (h=74 Km, rms=0.552)

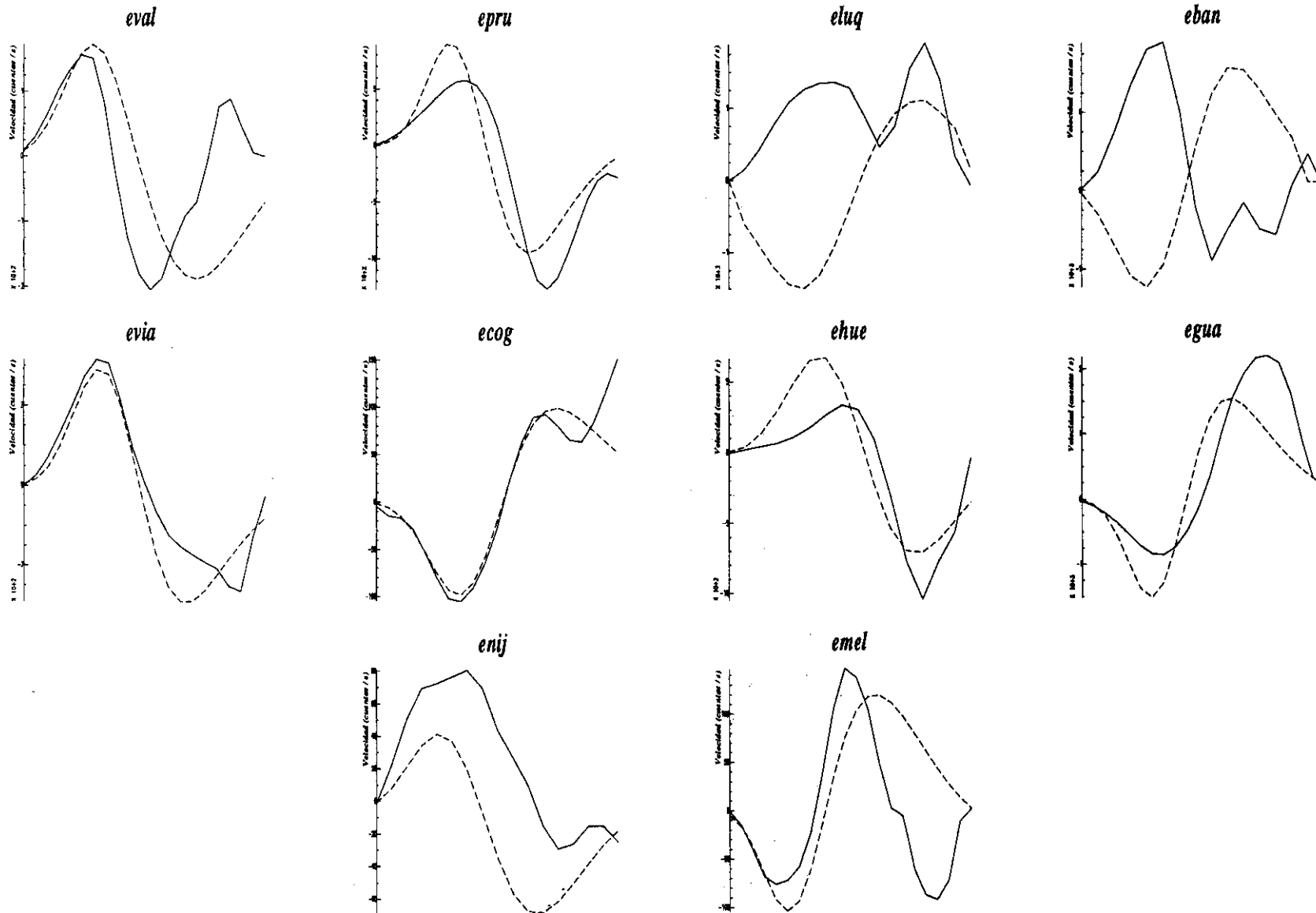
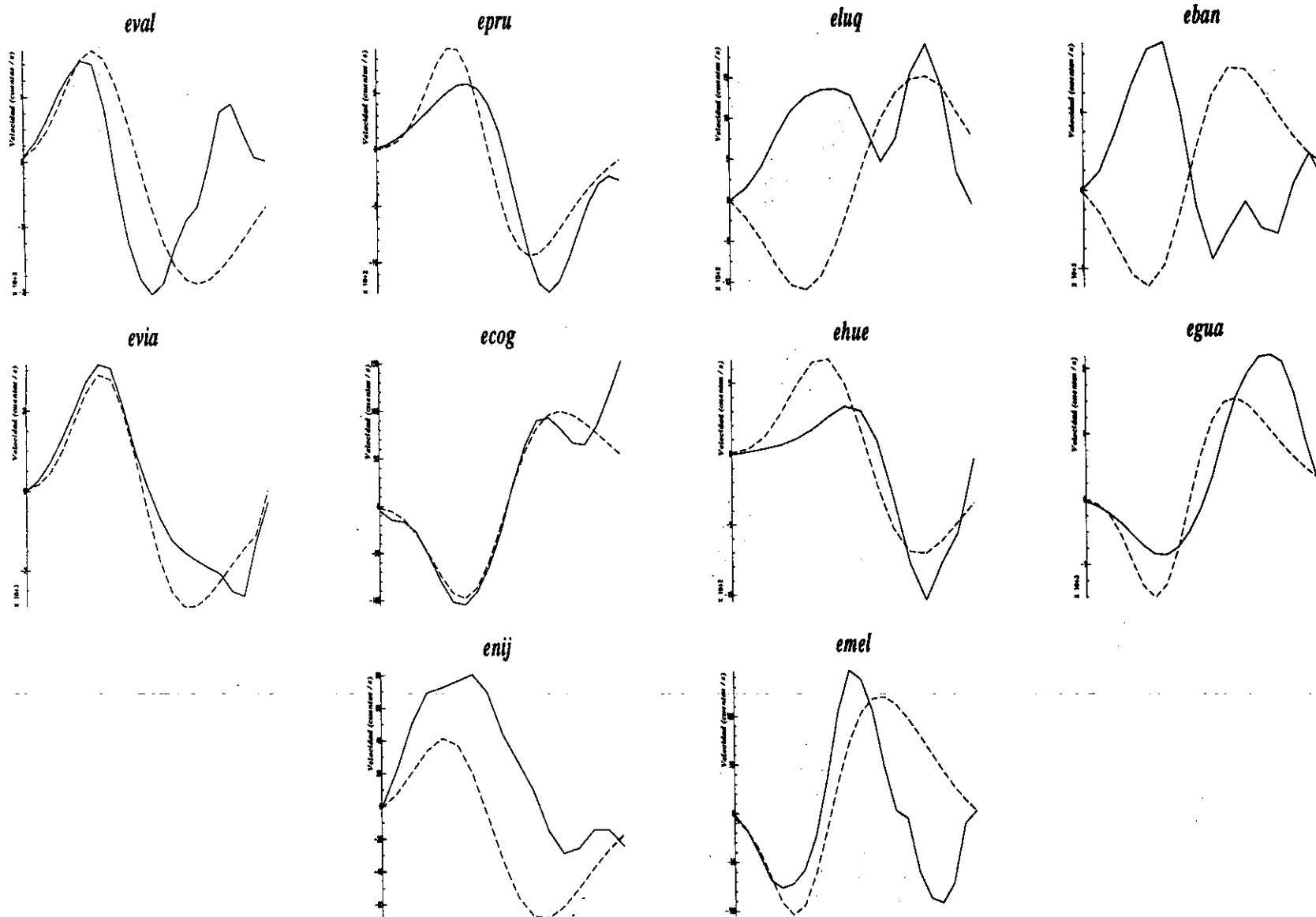


Fig. A2.55. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 74km.

# 14 Marzo 1992 (h=84 Km, rms=0.549)



297

Fig. A2.56. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 84 km.

# 14 Marzo 1992 (h=94 Km, rms=0.548)

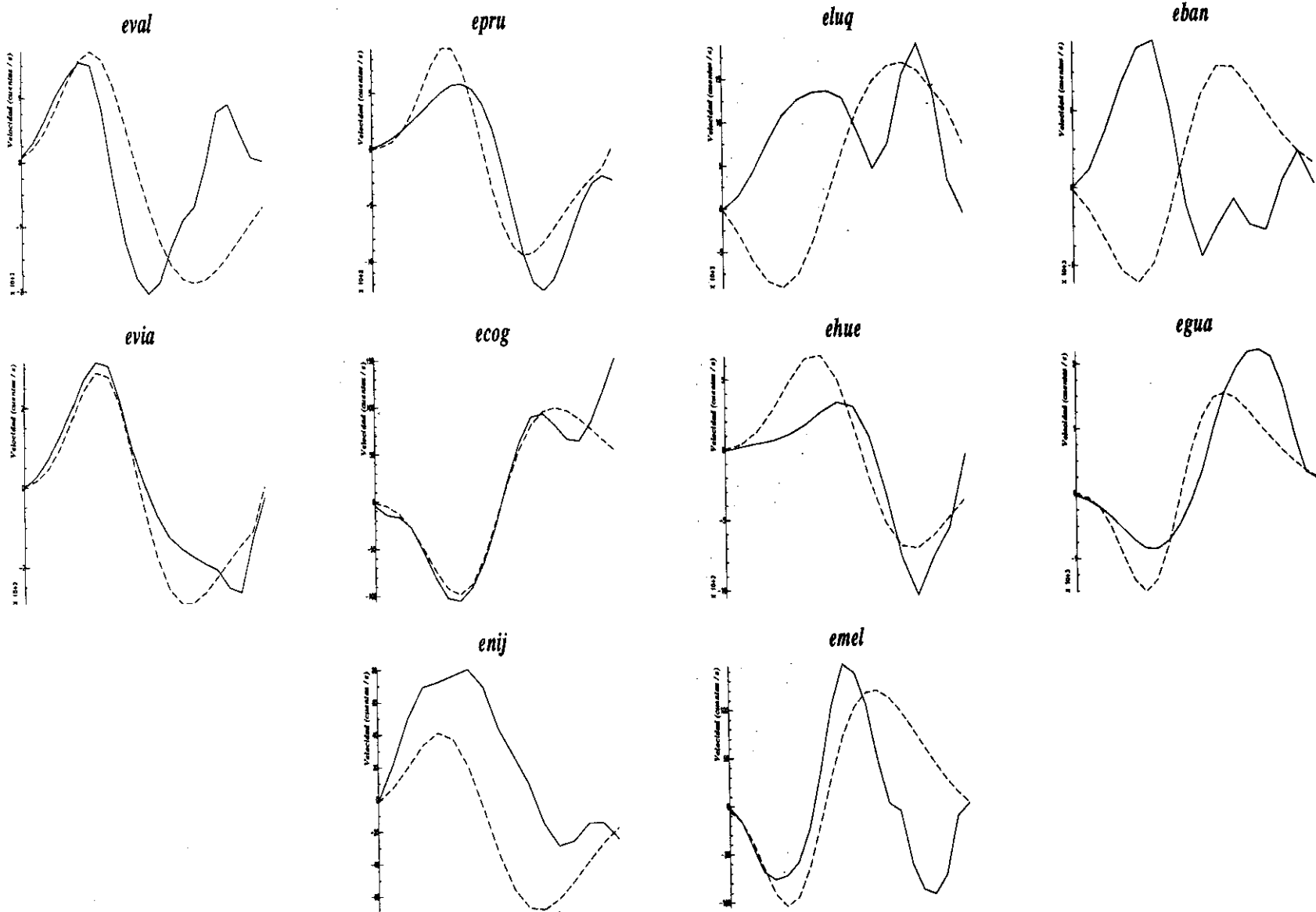


Fig. A2.57. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 94 km.

# 14 Marzo 1992 (h=104 Km, rms=0.546)

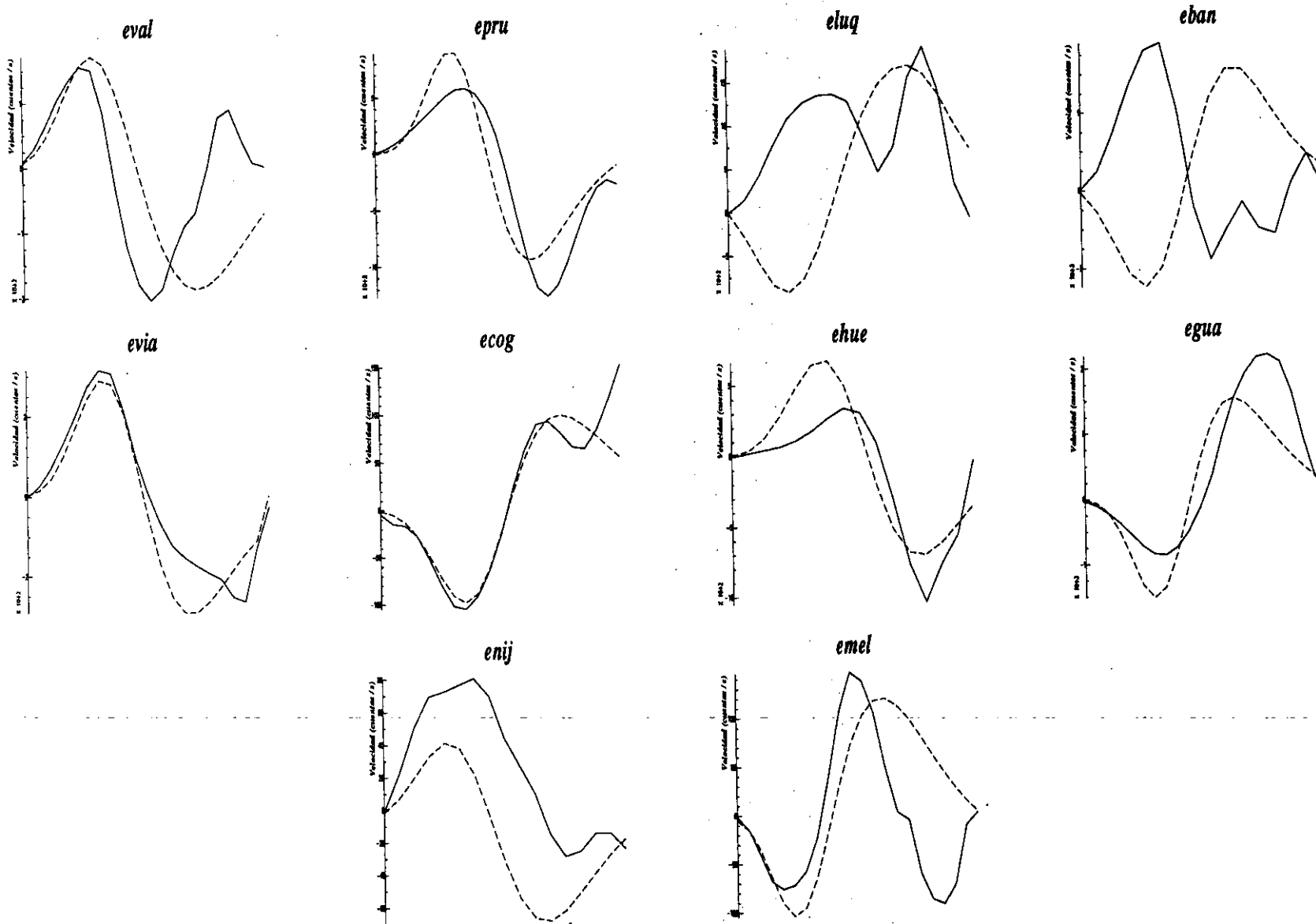


Fig. A2.58. Terremoto 14-Marzo-1992. Ajustes sismogramas observados-sismogramas teóricos utilizando función temporal de 0.07s y 104 km.

