5
2 ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ALGORITMO PARA EL ANALISIS DE POLARIZACION EN REGISTROS SISMICOS DE 3 COMPONENTES

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A :

ROBERTO ORTEGA RUIZ

México, D. F. 1991

INDICE

RESUMEN.

Se presenta una metodología en el dominio del tiempo que extrae algunos atributos del movimiento de la partícula que sirven para caracterizar el estado de polarización de las ondas de cuerpo principalmente. El análisis en señales reales resulta ser bastante complejo debido a la ambigüedad que presentan los parámetros de polarización para las ondas de cuerpo, y a la dificultad del análisis en el dominio del tiempo para un estudio más detallado en su contenido de frecuencias. Se calculan los parámetros de polarización en los registros del sismo del 25 de abril de 1989 (Ms=6.8) utilizando los registros de aceleración de la Red de Guerrero del Instituto de Ingeniería de la UNAM y se observan algunos resultados preliminares en el análisis de polarización. La ventana de tiempo resulta ser un parámetro muy delicado y se recomienda cautela en su manejo. La confiabilidad de los resultados se basa críticamente en la calidad del registro, especialmente en la relación señal a ruido.

I.- INTRODUCCION

Actualmente los datos sismicos se registran en tres componentes ortogonales. Existe una gran cantidad de información que puede ser analizada a través de técnicas que utilizan de manera conjunta estos tres componentes y mejoran la calidad de la información. Una de estas técnicas es el análisis de polarización, es decir, el estudio del movimiento de las particulas debido a la incidencia de ondas sismicas. Los algoritmos de polarización han tenido finalidades muy diversas, entre algunas de sus aplicaciones se encuentran: la localización de la fuente sismica utilizando una sola estación detectora de tres componentes (Magrota et al., 1987), estudios para conocer las direcciones preferentes del fracturamiento en las rocas (Crampin 1985, 1990), implicaciones para predicción sismica de movimientos fuertes (Bernard y Zollo, 1989; Crampin et al., 1980), y diversas técnicas aplicadas a la sismologia de exploración (Greenhalgh et al., 1986, Chiou-Fen y Herrmann, 1990).

Existen diversos métodos para estimar las propiedades de polarización, unos tienen la finalidad de encontrar parámetros que ayuden a resaltar características del estado de polarización de una señal dada y otros están dirigidos al modelado sísmico a partir de parámetros iniciales para observar su respuesta y compararla con señales reales. Algunos ejemplos de algoritmos de polarización: Mims y Sax (1965), Flinn (1965), Simsons (1968), Montalbetti y Kanasewich (1970), Samson y Olson (1980, 1981), Vidale (1986), Jurkevics (1988), Samson (1973), Jeffrey (1987) y Chiou-Fen y Herrmann(1990) entre otros.

La metodología en el dominio del tiempo a través de una ventana deslizable, fué introducida por Flinn (1965), para elaborar filtros a partir de una serie de operadores variables en el tiempo que sirven para incrementar la relación señal a ruido, sobre todo cuando ambos tienen características espectrales similares y no es posible un filtrado en frecuencias. Desafortunadamente los filtros de polarización son procesos que varían en el tiempo, por lo que no es posible aplicarse de manera recursiva, y requieren de bastante tiempo de cómputo.

El objetivo de este trabajo es presentar un algoritmo de polarización propuesto inicialmente por Flinn (1965) y continuado por Jurkevics (1988) que resuelve el problema característico de la matriz de covarianza en una ventana deslizable en el tiempo. Se aplica sobre un registro filtrado en una serie de bandas de frecuencias y puede extenderse a un arreglo de estaciones.

A diferencia del método de Jurkevics (1988),el presente algoritmo está diseñado para equipos de cómputo sencillos, pudiendo escoger los parámetros necesarios para el análisis de polarización.

Recientemente se han utilizado este tipo de técnicas de manera automática, analizando los registros instantáneamente, pero existen algunas variables que alteran sensiblemente la calidad de los resultados, por lo que en este trabajo se pretende comentar sus alcances y limitaciones y además se proponen algunas alternativas para la interpretación de resultados.

II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ELIPSOIDE DE MOVIMIENTO

II.1 ELIPSOIDE DE MOVIMIENTO EN 2 DIMENSIONES. ONDAS PLANAS CUASI MONOCROMÁTICAS.

Consideremos una onda plana cuasi monocromática propagándose en la dirección z, donde la mayor parte de la energía se encuentra confinada en un pequeño ancho de banda ΔF, sobre la frecuencia media $\bar{f}$. Entonces,

$$\frac{\Delta F}{\bar{f}} << 1$$

Tomando por simplicidad el caso bidimensional las expresiones de los registros como funciones del tiempo se pueden escribir como

$$Ex(t)= Ax(t)\, e^{i(\phi x(t)-2\pi \bar{f} t)} \qquad ...(1)$$

$$Ey(t)= Ay(t)\, e^{i(\phi y(t)-2\pi \bar{f} t)} \qquad ...(2)$$

donde

$Ex(t)$= Expresión del registro en el componente horizontal,

$Ey(t)$= Expresión del registro en el componente vertical,

$Ax(t)$= Amplitud,

$\phi(t)$= Fase compleja

Para observar las propiedades de polarización en cualquier punto, se requiere que la amplitud y fase compleja sean relativamente constantes sobre un tiempo T.

De esta manera, si la onda es monocromática e invariable con el tiempo, su campo se encuentra perfectamente polarizado.

Si τ=$-2\pi\bar{f}t$, y tomando la parte real, tenemos

$$Ex= Ax \cos(\tau+\phi x) \qquad ...(3)$$

$$Ey= Ay \cos(\tau+\phi y) \qquad ...(4)$$

y para eliminar τ hacemos uso de las siguientes identidades trigonométricas

$$\cos(\tau+\phi)=\cos\tau\,\cos\phi - \operatorname{sen}\tau\,\operatorname{sen}\phi$$
$$\operatorname{sen}(\tau-\phi)=\operatorname{sen}\tau\,\cos\phi - \cos\tau\,\operatorname{sen}\phi$$

Haciendo uso de estas expresiones tenemos de 3 y 4

$$E_x/A_x= \cos\tau\,\cos\phi_x - \operatorname{sen}\tau\,\operatorname{sen}\phi_x \qquad \ldots(5)$$
$$E_y/A_y= \cos\tau\,\cos\phi_y - \operatorname{sen}\tau\,\operatorname{sen}\phi_y \qquad \ldots(6)$$

y multiplicando por $\operatorname{sen}\phi_y$ la ec. (5) y por $\operatorname{sen}\phi_x$ la ec. (6); por $\cos\phi_x$ la ec. (5) y $\cos\phi_y$ la ec. (6) y restándolas respectivamente, tenemos

$$\operatorname{sen}\phi_y \frac{E_x}{A_x} - \operatorname{sen}\phi_x \frac{E_y}{A_y} = \cos\tau\,\operatorname{sen}(\phi_y-\phi_x)$$

$$\cos\phi_y \frac{E_x}{A_x} - \cos\phi_x \frac{E_y}{A_y} = \operatorname{sen}\tau\,\operatorname{sen}(\phi_y-\phi_x)$$

Ahora, elevando al cuadrado y sumándolas

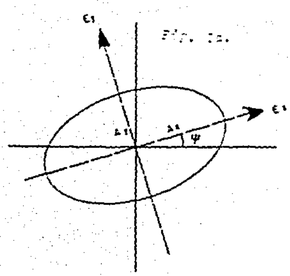
$$\frac{E_x^2}{A_x^2}+\frac{E_y^2}{A_y^2} - 2\frac{E_x\,E_y}{A_x\,A_y}\cos(\phi_y-\phi_x) = \operatorname{sen}^2(\phi_y-\phi_x) \qquad \ldots(7)$$

o bien, en forma matricial

$$[E_x\ E_y]\begin{bmatrix} A_x^2 & -A_x A_y\cos(\phi_y-\phi_x) \\ -A_x A_y \cos(\phi_y-\phi_x) & A_y^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_y \\ E_x \end{bmatrix} = A_x^2A_y^2\,\operatorname{sen}(\phi_y-\phi_x)$$

$$E\ S\ E^T = A_x^2\ A_y^2\ \operatorname{sen}(\phi_y-\phi_x)$$

que matemáticamente representa a una elipse como la que se muestra en la Figura 1a.



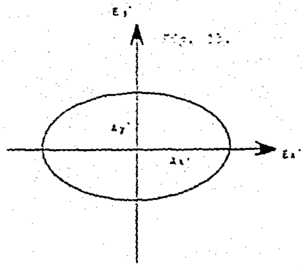


Fig. 1a. Elipse de movimiento referida al sistema Ex Ey.

Fig. 1b. Elipse de movimiento rotada mediante la transformación
$R^T S\, R = S'$

Finalmente, sea la matriz de rotación

$$R=\begin{bmatrix} \cos\psi & \operatorname{sen}\psi \\ -\operatorname{sen}\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$$

que convierte la matriz S en S' mediante la transformación

$$R^T\, S\;\; R = S'$$

Entonces, la expresión en el nuevo sistema Ex' Ey' es

$$[E_y' \;\; E_x'] \begin{bmatrix} A_x^2 & 0 \\ 0 & A_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_y' \\ E_x' \end{bmatrix} = A_x^2\, A_y^2$$

por lo que ahora se tiene una elipse en el nuevo sistema que se ilustra en la Figura 1b. A partir de ella se pueden derivar algunos parámetros de polarización (Wolf ,1959) como el ángulo ψ dado por

$$\tan 2\psi = \frac{2\ A_x\ A_y}{A_x^2 - A_y^2} \cos(\phi_y - \phi_x)$$

la elipticidad o relación entre el eje menor y el eje mayor dada por

$$\tan \beta = \frac{A_y'}{A_x'}$$

donde

$$\operatorname{sen} 2\beta = \frac{2 A_x A_y}{A_x^2 + A_y^2} - \operatorname{sen}(\phi_y - \phi_x)$$

Las ondas que presentan variaciones en la amplitud y en la fase con respecto al tiempo, como las ecuaciones (1) y (2) no se pueden estudiar fácilmente a partir de la expresión (7) pero se resolvió mediante la matriz de covarianza para una ventana de N puntos deslizable en el tiempo.

II.2 ELIPSOIDE DE MOVIMIENTO EN 3 DIMENSIONES. MATRIZ DE COVARIANZA

Sea $X=[X_{ij}]$; $i=1,2,3,4,5,\ldots,N$, $j=1,2,3$ la matriz de datos en una ventana de tiempo, donde X_{ij} es la i-ésima muestra del componente j. La matriz de covarianza S se evalúa de la manera siguiente

$$S_{jk} = \frac{X\ X^T}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_{ij}\ X_{ik} \qquad k=1,2,3$$

donde T significa transpuesta.

La matriz de covarianza es de orden 3, real y simétrica. La convención de índices usada es: z= vertical =1, n= norte-sur =2, e= este-oeste =3

$$S = \begin{bmatrix} S_{zz} & S_{zn} & S_{ze} \\ S_{zn} & S_{nn} & S_{ne} \\ S_{ze} & S_{ne} & S_{ee} \end{bmatrix} \qquad \begin{array}{l} S_{mm} = \text{auto varianza en } m \\ S_{mn} = \text{varianza cruzada } mn \end{array}$$

S es la matriz de coeficientes para una forma cuadrática cuya superficie representa un elipsoide (Jurkevics, 1986a.) y sus ejes principales se calculan resolviendo el problema característico (Fig. 2)

$$(S-\lambda^2 I)u=0 \qquad \begin{array}{l} \lambda_i=\text{eigenvalores} \\ u=\text{eigenvector asociado} \end{array}$$

Los tres ejes principales del elipsoide de polarización están dados por λ_j u_j; $j=1,2,3$. Los eigenvectores representan la orientación de los semiejes y los eigenvalores nos dan la amplitud de los semiejes.

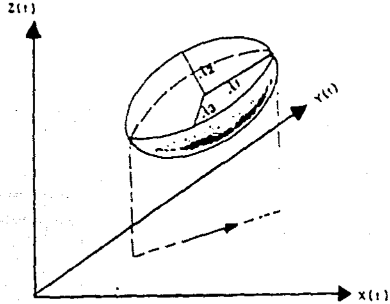


Fig. 2. Elipsoide de movimiento en 3 dimensiones. λ_1, λ_2, λ_3 indican los eigenvalores.

Se ordenan λ_1, λ_2 y λ_3 de tal manera que $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$.

En el caso de fases polarizadas en forma rectilineal pura tenemos un sólo eigenvalor no nulo $\lambda_1=0$, $\lambda_2=\lambda_3=0$, para polarización elíptica pura, dos eigenvalores son distintos de cero $\lambda_1 \geq \lambda_2$, $\lambda_3=0$. Para aplicaciones reales los tres eigenvalores son distintos de cero, de manera que la polarización es elipsoidal.

II.3 PARAMETROS DE POLARIZACIÓN

Una vez calculados los ejes principales del elipsoide de movimiento se obtienen algunos parámetros (Jurkevics, 1988) que describen características del movimiento de la partícula como

$$\text{Rectilinealidad} = 1 - \frac{\lambda_2+\lambda_3}{2\lambda_1}$$

$$\text{Planaridad} = 1 - \frac{2\lambda_3}{\lambda_1+\lambda_2}$$

$$\text{Amplitud} = \sqrt{\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2}$$

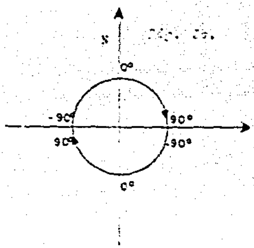
$$\text{Azimut-}_p = \tan^{-1}\frac{u_{21}}{u_{31}} \qquad u_1 = (u_{11},u_{21},u_{31})$$

$$\text{Incidencia-}_p = \operatorname{sen}^{-1}|u_{11}|$$

Los grados de rectilinealidad, planaridad y amplitud dependen de los eigenvalores de la matriz de covarianza y el azimut e incidencia de propagación de las ondas P se estiman a partir de la orientación del primer eigenvalor λ_1, que está dada por el eigenvector u_1. Las orientaciones del azimut presentan un problema de ambigüedad para direcciones ±180° y varían de -90° a 90° en la parte sur y norte (fig. 3a).

El ángulo de incidencia o echado se toma a partir del plano horizontal (Fig. 3b). La amplitud de los tres componentes es simplemente la raíz cuadrada de la traza de la matriz de covarianza para cada ventana de tiempo.

La planaridad y rectilinealidad, son dos relaciones que expresan el grado de similitud entre el movimiento de la partícula a través de su elipsoide de movimiento, y un movimiento rectilinal puro (una sola dimensión), o un movimiento polarizado exclusivamente en un plano (dos dimensiones) respectivamente. Esta relación la calcula comparando los eigenvalores.



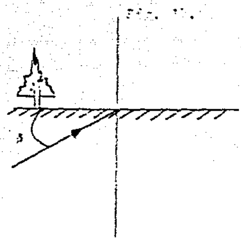


Fig. 3a. Esquema de orientación del azimut para el plano horizontal.
Fig. 3b. Representación de la incidencia sobre el plano vertical.

La rectilinealidad relaciona el eigenvalor máximo con los otros dos. Si este es mucho mayor su valor será cercano a uno. En cambio si los tres eigenvalores son iguales, la rectilinealidad será cero (caso de una esfera). La planaridad relaciona el eigenvalor más corto con los otros dos, y si es mucho menor tenderá al valor de uno.

Un movimiento rectilineal puro se encuentra polarizado en una sola línea y en un plano al mismo tiempo, por lo que valores altos de rectilinealidad también corresponden a valores altos de planaridad. En cambio la planaridad alta puede corresponder a valores altos o valores bajos de rectilinealidad.

En la Figura 4 se muestran ejemplos de elipsoides de movimiento con distintos valores de rectilinealidad y planaridad. Estos parámetros sirven principalmente para caracterizar ondas de cuerpo (ondas P y ondas S).

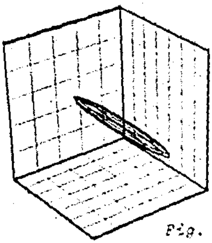


Fig. 4a.

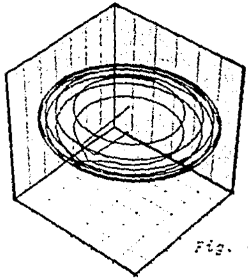


Fig. 4b.

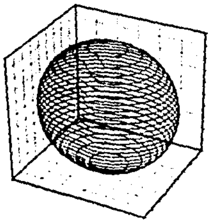


Fig. 4c.

Fig. 4. Elipsoides de movimiento con a) rectilinealidad = 0.9 planaridad = 0.8, b) rectilinealidad = 0.5, planaridad = 0.9 y c) rectilinealidad = 0.2, planaridad = 0.25.

III.- ALGORITMO DE POLARIZACIÓN

III.1.- SECUENCIA DEL ALGORITMO

El algoritmo realiza lo siguiente:

(a) Lee simultáneamente tres componentes.

(b) Filtra en bandas cada señal.

(c) Abre una ventana de tiempo.

(d) Construye la matriz de covarianza para cada banda de frecuencia.

(e) Resuelve el problema caracteristico.

(f) Calcula las trazas de cada matriz de covarianza

(g) Efectúa un balance espectral.

(h) Calcula una matriz de covarianza para todo el ancho de banda.

(i) Resuelve los valores y vectores caracteristicos de la nueva matriz de covarianza.

(j) Calcula los parámetros de polarización.

(k) Avanza la ventana.

El algoritmo calcula cinco parámetros de polarización del ellpsoide de movimiento (planaridad, rectilinealidad, amplitud de semiejes, azimut de ondas P e incidencia de ondas P) que son registrados en función del tiempo.

Se requiere de una señal con tres componentes así como del tamaño de la ventana para calcular la matriz de covarianza, el algoritmo filtra la señal en una serie de bandas mediante un filtro de Butterworth bidireccional de fase cero, hace un balance espectral promediando cada matriz de covarianza, resuelve su problema caracteristico mediante un algoritmo que tridiagonaliza la matriz y resuelve sus valores y vectores caracteristicos con un método QL, en seguida evalúa los parámetros de polarización y desliza la ventana de tiempo al siguiente punto para calcular nuevamente su matriz de covarianza hasta terminar con la señal.

III.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA

FILTRADO BIDIRECCIONAL

Se optó por un filtro recursivo de Butterworth debido a su estabilidad y a que sólo responde en valores positivos de tiempo. A pesar de que el espectro de fase del filtro por lo general es distinto de cero, existen técnicas sencillas que producen filtros de fase cero (Shanks, 1967).

Si tenemos un filtro con la siguiente función de transferencia

$$F(z)= \frac{a_0+a_1 z}{1+ b_1 z+ b_2 z^2}$$

donde X(z) es la entrada del filtro y Y(z) la salida, definida por

$$Y(z) = F(z)X(z)$$

$$Y(z) = \frac{a_0+a_1 z}{1+ b_1 z+ b_2 z^2} X(z)$$

Entonces multiplicando ambos lados por $1+ b_1 z+ b_2 z^2$

$$Y(z) + z\, Y(z)\, [b_1+b_2 z] = [a_0 + a_1 z]\, X(z)$$

Y

$$Y(z) = [a_0 + a_1 z]\, X(z) - z\, Y(z)\, [b_1 + b_2 z]$$

Esta ecuación dice que la salida Y(z) es igual a la convolución de la entrada con la serie discreta (a_0, a_1) menos la salida retrasada una muestra convolucionada con la serie (b_1, b_2). La ecuación de recursión general se representa por

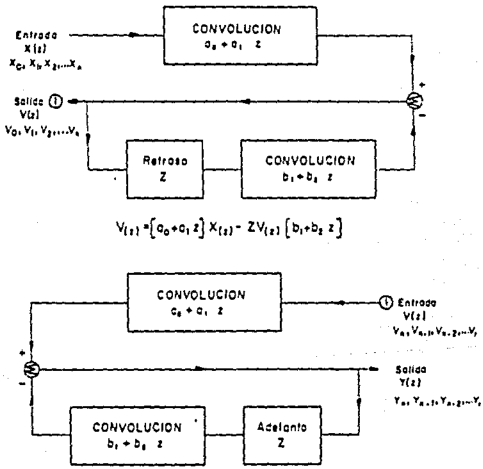
$$y_n = \sum_{i=0}^{N} a_i\, x_{n-i} - \sum_{j=1}^{M} b_i\, y_{n-j}$$

Una técnica muy sencilla para elaborar filtros de fase cero es filtrando la señal a través de un filtro recursivo en forma normal. La salida que produce se invierte en el tiempo y se filtra con el mismo filtro de recursión produciendo otra salida que se invierte nuevamente para obtener la señal deseada (Fig. 5). Aunque no es necesario invertir la serie de datos para el filtrado reversible, ya que el filtro F(z) es equivalente con reemplazar z en F(z) con 1/z. Por lo que el filtro en modo reversible tiene la forma

$$y_n = \sum_{i=0}^{N} a_i \, v_{n+i} - \sum_{j=1}^{N} b_j \, y_{n+j}$$

n=K, K-1, K-2, K-3,...3, 2, 1

Donde V_K es el último valor de la serie de entrada.



$$V_{(z)} = \left[a_0 + a_1 z\right] X_{(z)} - Z V_{(z)} \left[b_1 + b_2 z\right]$$

$$Y_{(z)} = \left[a_0 + a_1 z\right] V_{(z)} - Z Y_{(z)} \left[b_1 + b_2 z\right]$$

Fig 5. Diagrama de un filtro bidireccional de fase cero.

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA CARACTERISTICO.

La matriz de covarianza es el método que actualmente ofrece mayores ventajas para el análisis de polarización. Debido a que reduce el cálculo computacional para encontrar la dirección preferente de movimiento, es menos sensible a fuentes externas de ruido y es factible a implantarse analógicamente (Means 1972). La matriz de covarianza es una matriz de orden 3, Hermitiana (ó simétrica para el caso real) con eigenvalores reales, distintos de cero y eigenvectores ortogonales.
Por otra parte se dice que $\bar{x}$ es el eigenvector de una matriz **A** y λ su eigenvalor correspondiente cuando

$$A \bar{x} = \lambda \bar{x}$$

Cualquier transformación similar de la matriz **A** se representa como

$$A \longrightarrow Z^{-1} A \quad Z$$

Se puede demostrar fácilmente que las transformaciones similares no alteran los eigenvalores de la matriz original (Wilkinson y Reinsch, 1971). Esta propiedad es la que da lugar a las rutinas modernas de soluciones caracteristicas convirtiendo la matriz **A** en una matriz diagonal mediante una secuencia de transformaciones similares.

$$A \longrightarrow P_1^{-1} A \; P_1 \longrightarrow P_2^{-1} P_1^{-1} A \; P_1 \; P_2$$
$$\longrightarrow P_3^{-1} P_2^{-1} P_1^{-1} A \; P_1 \; P_2 \; P_3 \longrightarrow \text{etc.}$$

Si continuamos hasta llegar a la forma diagonal, entonces los eigenvectores son las columnas de las transformaciones acumuladas

$$X_R = P_1 \; P_2 \; P_3 \ldots$$

En general ésta rutina puede tener conflicto para calcular la matriz diagonal y se mejora con una técnica que reduce la matriz a la forma de *Hessenberg* o matriz *tridiagonal*, y se resuelve a través del método QL. (Wilkinson y Reinsch, 1971)
La idea básica de los algoritmos QR y QL es que cualquier matriz real puede descomponerse en la forma

$$A = Q\,R \qquad\qquad A = Q\,L$$

donde Q es ortogonal, R es triangular superior y L triangular inferior. Aprovechando que Q es ortogonal una ecuación en el siguiente orden

$$A' = R\,Q \qquad ó \qquad A' = L\,Q$$

dan transformaciones ortogonales del tipo

$$A' = Q^T A \; Q$$

Por lo que las transformaciones QR y QL mantienen las siguientes propiedades de las matrices: Simetría y Forma tridiagonal.

Un algoritmo QL es una secuencia de transformaciones ortogonales de la siguiente forma

$$A_s = Q_s L_s$$

$$A_{s+1} = L_s Q_s = Q_s^T A_s Q_s$$

Si la matriz A tiene eigenvalores de diferente valor absoluto λ_i $A_s \longrightarrow$[triangular inferior] cuando $s \longrightarrow \infty$. Entonces los eigenvalores aparecen en la diagonal en magnitud absoluta.

La secuencia de una matriz A de orden 3 simétrica, para encontrar sus eigenvalores es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \xrightarrow[\textit{Hessenberg}]{} \begin{bmatrix} d_1 & e_1 & 0 \\ e_1 & d_2 & e_2 \\ 0 & e_2 & d_3 \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{QL}]{} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

BALANCE ESPECTRAL

Debido a que las amplitudes de la señal varían fuertemente con la frecuencia, los resultados en toda la banda de frecuencias nos dan estimaciones de polarización sobre la frecuencia dominante.

Una señal sísmica posee arribos de fases en distintos instantes de tiempo con diversos contenidos espectrales. En la primera parte de la señal, las ondas P contienen frecuencias altas pero en amplitudes menores que las ondas S y las ondas superficiales, que se encuentran en frecuencias más bajas. Cuando se trabaja en el dominio del tiempo, como en este caso, resulta difícil poder identificar en que instante la señal ha variado en su contenido de frecuencias (Fig. 6) para ajustar el tamaño de la ventana de análisis; por esta razón se realiza un balance en el dominio de la frecuencia a través de ventanas que estiman en cada instante los intervalos de frecuencias que predominan en la señal.

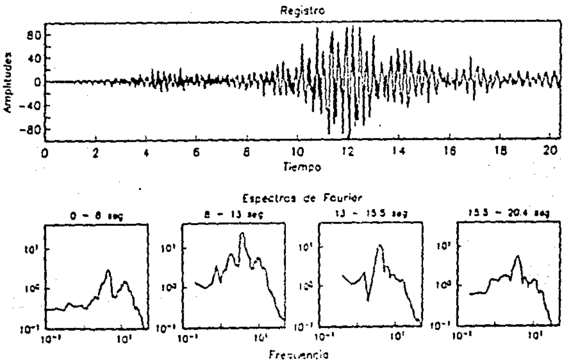


Fig 6. Espectros de Fourier de un registro para diferentes intervalos en el tiempo.

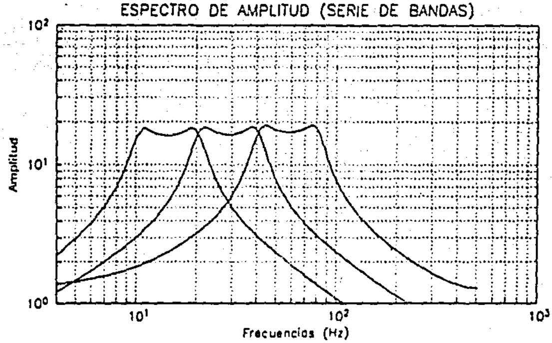


Fig 7. Respuestas de amplitud en series de bandas para un filtro de Butterworth de 8 polos.

Se realiza un balance espectral mediante el cálculo separado de matrices de covarianza en una serie de bandas de frecuencia (Fig 7) normalizándolas y promediándolas, la traza de la covarianza se utiliza como factor de normalización. En una matriz de covarianza S^k para la k-ésima banda se calcula en la forma usual y la estimación en un espectro amplio se obiene mediante

$$S = \left\{ \sum_{k=1}^{K} \text{traza } (S^k) \right\} \sum_{k=1}^{K} \frac{S^k}{\text{traza } (S^k)}$$

donde K es el número de bandas.

III.3 PRUEBA DEL ALGORITMO

Se probaron los resultados usando señales sintéticas. Por ejemplo, descomponiendo una señal senoidal en los tres ejes coordenados para comprobar su orientación a partir del azimut e incidencia (Fig 8). Se calcularon los tamaños de ventana necesarios para estimar los parámetros en señales polarizadas de manera rectilineal pura y se observaron las variaciones que sufren los resultados al sumarle diferentes relaciones de ruido blanco (Fig. 9).En la Fig. 8 los resultados obtenidos en señales sintéticas para comprobar el azimut y la incidencia con una ventana de dos puntos resultaron ser bastante satisfactorios. En cambio se observó una gran sensibilidad en los parámetros de polarización al sumarle ciertas relaciones de ruido blanco (Fig. 9).

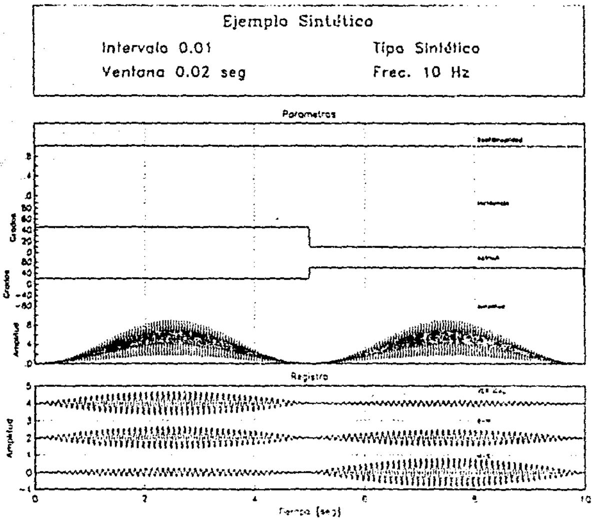


Fig. 8. Comprobación del algoritmo mediante una senoide en tres componentes con un azimut de 45 grados y una incidencia de 20 grados en los primeros cinco segundos, y un azimut de 45 grados e incidencia de 5 grados hasta el final. Se utilizaron dos puntos en la ventana de tiempo.

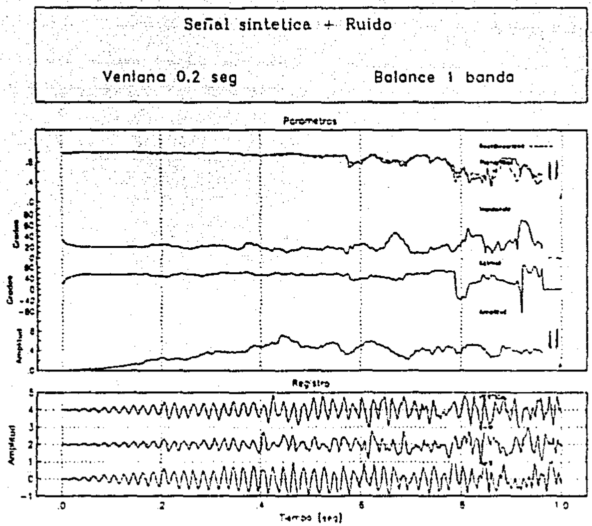


Fig 9. Resultados de polarización para un registro sintético en el que se ha adicionado un nivel de ruido blanco. Los primeros 0.2 seg no presentan ruido, de 0.2 a 0.4 seg se le sumó un 20%, de 0.4 a 0.6 un 40%, de 0.6 a 0.8 un 60% y de 0.8 a 1.0 un 100%.

IV.- RESULTADOS

La teoría descrita anteriormente se aplica a señales que presentan arribos múltiples, cada uno con diferentes características de polarización y contenido de frecuencias. La mayoría de los algoritmos de polarización son métodos automáticos que analizan cualquier registro sísmico, sobretodo de campo cercano o señales sismotelemétricas, especialmente registros de velocidad.

Un registro real contiene información indiscriminada del tipo de señal que recibe, de la fuente, de los efectos topográficos y efectos debidos a la estructura por ejemplo, reflexiones y refracciones, ruido microsísmico y efectos locales debidos a inhomogeneidades en la superficie. Todos estos efectos se registran en la señal y los resultados generados resultan difíciles de analizar.

Dependiendo del tipo de registro y sus objetivos, a veces es necesario analizar señales en todo el espectro de frecuencias y en otros casos sólo en un ancho de banda. En otras ocasiones se tienen registros en un arreglo de estaciones que se pueden utilizar de manera conjunta. Por estas razones, se proponen alternativas para cada caso en particular.

a) Señales filtradas en bandas

Se analizan las señales filtradas en bandas en caso de señales que tienen fases sísmicas con diferentes características espectrales.En caso de que se requiera un análisis detallado en frecuencias, se propone estimar los parámetros de polarización para cada banda en particular y compararlos entre sí.

b) Señales en un espectro amplio de frecuencias

Se calcula el espectro de amplitud de la señal en sus tres componentes a fin de estimar la frecuencia que corresponde a la amplitud máxima y se establecen los intervalos para el filtrado en bandas (aproximadamente una octava por banda), tomando como centro la amplitud máxima.

c) Arreglos de estaciones.

Se resalta la calidad de información de la señal para ciertas bandas de frecuencias con base en la utilización de arreglos de estaciones, los registros de un mismo arreglo se utilizan de manera conjunta promediando las matrices de covarianza para cada ventana de tiempo utilizando los registros sísmicos corregidos por velocidad de fase. De esta manera los registros de varias estaciones contribuyen para encontrar parámetros de polarización para un sólo sitio, siempre y cuando la distancia entre los registros no exceda de 1.5 kms (Jurkevics, 1988).

Para poder interpretar los resultados de polarización es muy importante conocer las características de propagación así como el comportamiento que presentan las fases sísmicas al desplazarse sobre el terreno.

Debido al tipo de parámetros escogidos, que resaltan exclusivamente características del movimiento de la partícula de naturaleza rectilineal, las fases sísmicas que mejor se resuelven, son las ondas que se polarizan de esta manera, principalmente las ondas de cuerpo (ondas P y ondas S), las ondas P no presentan ningún problema en su identificación debido a que son las primeras que se registran en una señal sísmica, además el movimiento de la partícula es en la misma dirección que la trayectoria de la onda, en cambio, las ondas S no siempre se encuentran polarizadas de manera lineal (Apéndice I) y su identificación en algunos casos es bastante difícil.

ELECCIÓN DE LA VENTANA.

La parte más delicada del algoritmo es la estimación de una ventana de tiempo que sea capaz de contener todas las propiedades de polarización de una fase sísmica, pero sin superponer información de otros arribos que contienen otras propiedades distintas. Existe una cantidad de muestras para construir la matriz de covarianza en la cual los parámetros de polarización dejan de ser tan sensibles al tamaño de la ventana de análisis (Ortega y Rodriguez, 1991), pero esto se aplica únicamente para el caso general en el que se desea obtener los parámetros de polarización de toda la señal sísmica. En el caso de un análisis a detalle, esos resultados dejan de ser tan confiables.

Existen algoritmos automáticos (Jurkevics 1988, Suteau-Henson 1990) en los que la longitud de la ventana de tiempo es función de la frecuencia, debido a que frecuencias altas requieren un menor tiempo de resolución que las frecuancias bajas. Desafortunadamente los parámetros son muy sensibles a las variaciones de la longitud de la ventana, y dependiendo del criterio de variación los resultados pueden llegar a ser muy distintos a pesar de utilizar una sola señal.

Una alternativa que se propone es el análisis de toda la señal con una sola longitud de ventana, y compararla con los resultados de otra longitud, escogiéndolas a partir de las características espectrales del registro.

RELACIÓN SEÑAL-RUIDO.

El ruido sísmico tiene diversos origenes. Puede deberse a causas naturales o artificiales y tiene una gran variedad de fuentes de energía (tráfico vehicular, maquinarias, explosiones subterráneas, fracturamientos de roca, etc). Además el ruido sísmico se presenta en un amplio intervalo de frecuencias.

La relación señal a ruido se calcula dividiendo la amplitud máxima de una banda de la señal entre el nivel máximo de ruido detectado.

RSR = Ampl máx señal / Ampl máx ruido

Los resultados del análisis de polarización muestran que los parámetros dependen críticamente de la calidad de los registros. Suteau Henson (1990) compara el algoritmo de 3 componentes presentado en este trabajo con un análisis en el dominio f-k, y encuentra una fuerte dependencia de los parámetros de polarización a partir de la relación señal a ruido (RSR) para el algoritmo de 3 componentes que para el análisis f-k.

La relación señal a ruido normalmente es una variable que no se tiene control, por lo que es muy difícil mejorar la calidad de los registros y únicamente se estima un grado de confiabilidad en los resultados.

Existe un interés muy grande en poder reducir la fuerte dependencia de este tipo de análisis debido a las relaciones señal a ruido (Harris, 1990; Bame et al., 1990; Bannister et al., 1990; Suteau Henson, 1990) y proponen algunas relaciones (RSR) en las que se pueden confiar los resultados y algunas técnicas alternativas para mejorarlo, como análisis estadísticos y técnicas de inversión que separan efectos de la fuente y de sitio.

PROCESO DE CÓMPUTO.

El programa de cómputo (Apéndice II) fué realizado en lenguaje FORTRAN 77, para computadoras personales PC de configuración sencilla. Requiere de un registro sismico en tres componentes almacenados en archivos binarios. El problema que presenta es el tiempo de procesado, que depende primordialmente del tamaño de la señal, del tamaño de la ventana y de la calidad de la señal. Se optó por hacer el desplazamiento de la ventana de tiempo punto a punto, debido a la gran sensibilidad que muestra, esto provoca que el algoritmo tenga que calcular casi el mismo número de matrices de covarianza que de puntos hay en la señal.

APLICACIÓN AL SISMO DEL 25 DE ABRIL DE 1989.

Se analizaron los acelerogramas del sismo del 25 de abril de 1989 ($Ms = 6.8$) localizado a unos 50 km de Acapulco a 16.579° lat. N y a 99.462° long. W a una profundidad de 17.3 km. En la Fig. 10 se muestra la localización del epicentro y áreas de réplicas de algunos temblores fuertes ocurridos en la zona. Además, se muestran las localizaciones de las estaciones en las que se realizó el análisis de polarización.

Se utilizaron registros de aceleración sin corrección instrumental, debido a que dicha corrección se realiza mediante filtros en frecuencia que alteran el espectro de fase de la señal. Se utilizó el mismo algoritmo de polarización para corrección de linea base mediante el filtro pasa bandas utilizado para el balance espectral (Fig. 7) y en los casos necesarios se diezmó el registro para utilizar el valor de 0.01 seg. como valor minimo de muestreo para de evitar señales muy grandes que consuman gran tiempo de proceso en la computadora.

Algunos resultados preliminares en el análisis de polarización nos muestran las relaciones entre la localización del registro y la calidad de información de los parámetros de polarización (Apéndice III, los parámetros de polarización se encuentran referidos a el último punto de la ventana de tiempo). Se analizaron algunas estaciones a lo largo de la costa como: ATYC, CAYA, COYC, OCLL, ACAR, VNTA, CPDR, VIGA y COPL, siendo la más cercana al epicentro la estación CPDR; otras en la cercanias dentro de la zona continental MSAS y OCTT; lejos del evento PARS, FICA y TEAC, y sobre el Valle de México TACY (Fig. 10).

Los eventos a lo largo de la costa y los cercanos al epicentro dentro de la zona continental son los que tienen los resultados más claros en los parámetros de polarización, especialmente los valores de rectilinealidad y planaridad, observándose que ambos parámetros son muy altos en la primera parte del registro y se encuentran casi sobre la misma linea, pero después el valor de rectilinealidad decrece manteniéndose asi hasta el final del registro. Los parámetros angulares (incidencia y azimut) son más sensibles, pero en los registros cercanos presentan pocas variaciones. El azimut presenta gráficas con contrastes muy marcados debido al alcance de la escala y a la ambigüedad que presenta este parámetro con sus ángulos suplementarios (Fig 3a) y se interpreta eliminando dichos contrastes, analizando únicamente las partes suaves de la curva todas referidas sobre un mismo nivel.

El registro OCTT presenta un comportamiento de azimut muy interesante en la parte de la fase S, que al parecer varia de manera continua en un ciclo completo.

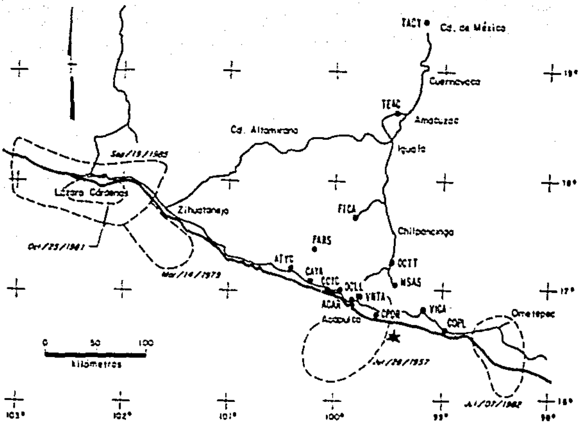


Fig 10. Localización de los registros utilizados en el análisis de polarizacion, y del epicentro del sismo del 25 de abril de 1989.

Los registros lejanos y sobre el valle de México presentan resultados muy dificiles de analizar, los parámetros de rectilinealidad y planaridad son muy inestables al igual que los parámetros angulares. La calidad de información deja de ser tan confiable y es muy dificil establecer algunas caracteristicas que permitan comparar los resultados.

IDENTIFICACIÓN DE FASES SÍSMICAS

Se hace uso de los parámetros obtenidos para poder identificar ondas de cuerpo a partir de un análisis de polarización.

Para el instante de arribo de las ondas P, se esperan valores de rectilinealidad y planaridad cercanos a uno, los valores de azimut e incidencia reflejan las direcciones de propagación de la fase P. El arribo de las ondas S es más claro en los cambios de azimut e incidencia, debido a que el movimiento en las fases P y S podría reflejarse con valores semejantes de rectilinealidad y planaridad. A partir del arribo de la fase S los valores de incidencia y azimut dejan de tener sentido físico, porque solo están definidos para la fase P, aunque sirven para marcar cambios en la forma de movimiento.

CONCLUSIONES

El algoritmo de polarización se presenta como una herramienta para el análisis de señales en registros de tres componentes.
La metodología propuesta en este trabajo presenta múltiples ventajas como son el procesado de señales en equipos de cómputo sencillos, el desplazamiento de la ventana de tiempo es punto a punto y se pueden elegir todos los parámetros de polarización.
En este caso el procesado de las señales no es automático, debido a la gran sensibilidad que presentan estos algoritmos al variar sus parámetros, o bien al tipo de señal que se desea procesar.
La elección de la ventana en el dominio del tiempo es el parámetro más sensible en el procesado de la señal, y se mantiene constante a lo largo de todo el análisis.
Los parámetros de polarización son una ayuda para identificar fases sísmicas, pero sobre todo para analizar algunos comportamientos específicos del movimiento de la partícula en el lugar.
La confiabilidad de los resultados depende primordialmente de las relaciones señal a ruido que se tienen en el registro.
La calidad de los resultados para registros lejanos al epicentro se reduce notablemente en los registros de acelerción analizados.
Los resultados observados para el sismo del 25 de abril de 1989 muestran la complejidad del análisis para el estudio del Valle de México para sismos lejanos, en cambio se observa que el análisis de polarización es bastante confiable en registros de aceleración en campo cercano y se propone como una herramienta para el estudio de la anisotropía de la corteza en la estimación de parámetros físicos y geométricos de rocas de yacimientos o bien para estudiar las rupturas sísmicas, a partir de la polarización de la fase S.
Se puede mejorar este algoritmo utilizando trazas sísmicas complejas, esta técnica hace más estable las variaciones debidas a la ventana de tiempo y es capaz de encontrar otros parámetros que caracterizan a las ondas superficiales.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunudad de una formación profesional.

Quiero agradecer sinceramente al M. en C. Miguel Rodriguez González por su amable asesoría durante el inicio del presente trabajo.

Además mi más profundo agradecimiento al Ing. Emilio Nava Alatorre por sus valiosa colaboración en la dirección de la presente tesis y su por su amistad brindada.

Agradezco los comentarios del Dr. Mario Chávez G. y de una manera muy especial al M. en C. Sergio Chávez P. por su invaluable contribución para la realización de éste trabajo.

Además agradezco las observaciones del Dr. Francisco J. Sánchez Sesma y del Ing. Javier Lermo Samaniego.

A mis compañeros y amigos: David Escobedo, Jorge Díaz , Antelmo Becerra, Raúl Cabrera, Guillermo Cesati, Vicente García, Carlos Calderón, Laura E. Diaz, Reynaldo Castellanos, J. Martin Gómez, F. Javier Hernández y Evangelina Romero, gracias por su amistad y apoyo.

Los registros digitales de aceleración fueron proporcionados amablemente por el Ing. Leonardo Alcántara N. y por el Ing. Marco A. Macias de la Coordinación de Sismología e Instrumentación Sismica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La presente tesis formó parte de los proyectos 9739 y 0754 "Análisis de polarización en registros sísmicos de tres componentes" de la coordinación de Sismologia e Instrumentación Sismica del Instituo de Ingeniería de la UNAM.

REFERENCIAS.

Bame D. A., M. C. Walck , K. Hiebert-Dodd, (1990). Azimuth estimation capabilities of the NORESS regional seismic array, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 1999-2015.

Bannister S. C., E. S. Husebye y B. O. Ruud (1990). Teleseismic P coda analyzed by three component and array techniques: Deterministic location of topographic P-to-Rg scattering near the noress array, *Bull.Seism. Soc. Am.*, 80, 1969-1986.

Bath Markus (1961). Polarization of transverse seismic waves, *Geophys. J. Roy. Ast. Soc.*, 4, 106-123

Bernard P. y A. Zollo (1989). Inversion of near source S polarization for parameters of double-couple point sources, *Bull. Seis. Soc. Am*, 79, 1779-1809.

Booth D. C. y S. Crampin (1985). Shear-Wave Polarizations on a Curved Wavefront at an Isotropic Free Surface, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 83, 31-45.

Crampin S., R. Evans , B. Üçer , M. Doyle , J. P. Davis , C. V. Yegorkina , A. Miller (1980). Observations of dilatancy-induced polarization-anomalies of earthquake prediction, *Nature*, 286, 874-877.

Crampin S. (1985). Evaluation of Anisotropy by Shear-Wave Splitting, *Geophysics*, 50, 142-152.

Crampin (1990) Utility of automatic techniques for estimating the effects of anisotropy in VSP data. *GSRG Report WL8934*.

Chiou-Fen S. y R. B. Herrmann (1990). Ground roll: Rejection using polarization filters, *Geophysics*, 55, 1216-1222.

Flinn E. A. (1965). Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, *Proc. IEEE*, 53, 1874.

Fowler R. A., B. J. Kotick y R. D. Elliot (1967). Polarization of natural and artificially induced geomagnetic micropulsations, *Journal of Geophy. Res.*, 72, 2871-2883.

Greenhalgh S. A., D Burns y I.Mason (1986). A cross-hole and face to borehole in seam seismic experiment at Invincible Colliery, Australia, *Geophys. Prosp.*, 34, 30-55.

Gutenberg B. (1952). SV & SH. *EOS Trans. Am. Geophys Union*, 33, 573-584.

Harris D. (1990). Comparison of the direction estimation performance of high-frequency seismic arrays and three-component station. *Bull Seism. Soc. Am.*, 80, 1951-1968.

Jepsen D. C. y B. L. Kennett B. L. (1990). Three component analysis of regional seismograms, *Bull. Am. Seis. Soc. Am.*, 80, 2032-2052

Jurkevics A. (1986a), Polarization analysis using an array of three-component sensor: Part I -Theory, SAIC Quarterly Technical Report for July-September 1986, Center for seismic Studies Technical Report. Arlington, Virginia.

Jurkevics A. (1986b), Polarization analysis using an array of three-component sensor: Part II -Application to Noress, SAIC Quarterly Technical Report for July-September 1986, Center for seismic Studies Technical Report C86-07, Arlington, Virginia.

Jurkevics A. (1988). Polarization Analysis of Three-Component Array Data, *Bull. of the Seism. Soc. of Am.*, 78, 1725-1743.

Kanasewich E. (1981). *Time sequence anslisys in geophysics.* University of Alberta Press. Edmonton Canada.

Magrota N., N. Ahmed y E. Chael (1988). Seismic event detection and source location using single-station (3 component), *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 958-971.

Means D. J. (1972). Use of the Three-Dimensional Covariance Matrix in analyzing the polarization properties of plane waves, *J. Geophys. Res.*,77, 5551-5559.

Mims, C. H. y R. L. Sax (1965). Rectilinear motion direction (REMODE), AD-460-631, Seismic Data Laboratory Report 118, Teledyne Geotech, Alexandria Virginia.

Montalbetti J. F. y E. R. Kanasewich (1970). Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 21, 119-129.

Nuttli O. y J. D. Whitmore (1962). On the determination of the polarization angle of the S wave. *Bull. of the Seism. Soc. of Am.*, 52, 95-107.

Nuttli Otto. (1964). The determination of S wave polarization angles for earth model with crustal layering. *Bull Seism. Soc. of Am.*, 54, No 5 Part A, 1429-1440.

Ortega R. y Rodriguez M. (1991). Implantación y prueba de un algoritmo para el análisis de polarización. Informe interno del Instituto de Ingeniería. Proyecto 9739. Enero 1991.

Park J. (1987). Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms. *J. Geophys. Res.*, 92, 12664-12674.

Samson J. C. (1973). Descriptions of the polarization states of vector processes. *Geophys. J. R. astr. Soc.*,**34** , 403-419.

Samson J. C. y J. V. Olson (1980). Some Comments on the Descriptions of the Polarization State of Waves. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 61, 115-129

Samson y Olson (1981) Data adaptive polarization filters for multichanel geophysical data, *Geophysics*, **46**, 1423-1431.

Shanks J. (1967). Recursion filters for digital processing. *Geophysics*, 32, 35-51.

Simsons (1968). A surface-wave particle motion discrimination process, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 58, 629-638.

Steau-Henson (1990).Estimating azimuth and slowness from three-component and array stations, *Bull Seis. Soc. Am.*, 58, 1987-1998

Smith B. (1976) *Matrix Eigensystem Routines* -EISPACK Guide vol 6. New York (Springer-Verlay).

Vidale John E. (1986). Complex polarization analysis of particle motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 1393-1405.

Wilkinson J. y C. Reinch (1971). *Linear Algebra Vol II of Handbook of Automatic Computation*, N.Y. Springer Verley, 418.

Wolf, E. (1959), Coherence of partially polarized electromagnetic radiation, *Il Novo Cimiento*, 13, serie 10, 1165-1181.

APENDICE I

POLARIZACION DE LAS ONDAS DE CUERPO

Debido a que el presente algoritmo analiza las propiedades de la señal que son de naturaleza rectilineal sus resultados son aplicados preferentemente a las ondas de cuerpo que cumplen con estas caracteristicas. Resulta evidente el caso de propagación de ondas P, debido a que la trayectoria de propagación siempre coincide con la dirección de movimiento, pero el caso de las ondas S es más complicado y se resuelve a través de sus componentes SV y SH que corresponden a la polarización vertical y horizontal, de la onda S.

Para el caso de las ondas S existe la posibilidad de que se polaricen de manera eliptica. Esto depende principalmente del ángulo de incidencia.

Sean Φ y Ψ los potenciales del campo de desplazamiento que cumplen

$$u = \frac{\delta\phi}{\delta x} - \frac{\delta\Psi}{\delta z} \quad y \quad w = \frac{\delta\Phi}{\delta z} + \frac{\delta\Psi}{\delta x}$$

donde

x,y,z = coordenadas rectangulares, y las ondas se propagan en el plano xz y z=0 coincide con la superficie de discontinuidad.

u, v, w= desplazamientos sobre x, y, z, respectivamente.

Cualquier expresión de ϕ, ψ, v, puede representarse como

$$\begin{aligned} \phi &\sim A\, e^{[ik(\alpha z+x-wt)]} \\ \psi &\sim B\, e^{[ik(\beta z+x-wt)]} \qquad ..(1) \\ v &\sim C\, e^{[ik(\gamma z+x-wt)]} \end{aligned}$$

donde

A,B,C = Funciones de amplitud para P, SV y SH, respectivamente.

ϕ, ψ, v satisfacen las ecuaciones de movimiento

$$\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\, \nabla^2 \phi$$

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \lambda\, \nabla^2 \psi \qquad ..(2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \lambda\, \nabla^2 v$$

e = ángulo emergente

λ, μ = constantes de Lamé

ρ = densidad

c_p, c_s = velocidades de ondas p y s

Notación. ondas incidentes: sin acento ó subíndice (B, C, etc.)
ondas reflejadas: subíndice unitario (B_1, C_1, etc.)
ondas transmitidas: apóstrofe (B', C', etc.)

Y vemos que α = tan e (ondas P), β = tan e (ondas SV), γ = tan e (ondas SH).

Definimos el plano de vibración a lo largo de la dirección de propagación de la onda y está orientado de tal manera que la vibración ocurre sobre ese lugar en específico. El ángulo de vibración δ es el ángulo entre el plano de vibración y el plano vertical de propagación. Así, observando la dirección de propagación tenemos que para las ondas S polarizadas de manera lineal

$$\tan \delta = \frac{A_{SH}}{A_{SV}} \qquad ..(3)$$

Para las ondas S tenemos las siguientes expresiones

$$\text{(SV)} \qquad \psi = B\, e^{[ik(\beta z + x - vt)]} \qquad ..(4)$$

$$\text{(SH)} \qquad v = C\, e^{[ik(\gamma z + x - vt)]}$$

Las amplitudes para las ondas incidentes serán

$$A_{SV} = ikB(1+\beta^2)^{1/2}$$
$$A_{SH} = C \qquad ..(5)$$

A_{SV} es la amplitud máxima de $(u^2 + w^2)^{1/2}$.

Sustituyendo (5) en (3)

$$\tan \delta = \frac{C}{ik\ B(1+\beta^2)^{1/2}} \qquad ..(6)$$

De manera similar para ondas reflejadas

$$\begin{aligned} &(SV) \quad \Psi_1 = B_1\ e^{[ik(\beta z + x - wt)]} \\ &(SH) \quad v_1 = C_1\ e^{[ik(\gamma z + x - wt)]} \end{aligned} \qquad ..(7)$$

que nos da

$$\tan \delta_1 = \frac{A_{SH1}}{A_{SV1}} = \frac{C_1}{ik\ B_1(1+\beta^2)^{1/2}} \qquad ..(8)$$

y

$$\frac{\tan \delta_1}{\tan \delta} = \frac{C_1/C}{B_1/B} \qquad ..(9)$$

Suponiendo que las onas incidentes S están polarizadas de manera rectilineal, entonces las ondas reflejadas y transmitidas dependerán de las relaciones B_1/B y B'/B si toman valores complejos, entonces estarán polarizados de manera eliptica. En cambio si toman valores reales entonces estarán polarizados de manera rectilineal. Todo esto dependerá del angulo emergente.

El grado de polarización para las ondas de cuerpo aumenta para aquellas fases que inciden de manera directa y que no presentan problemas con el ángulo emergente y normalmente son las fases que se tratan de enfatizar mediante el filtrado de polarización, debido a su caracteristica de movimiento rectilineal.

```
$debug
$large
      program main
c****************************************************************************
c NAME
c       MAIN.FOR
c
c SYNOPSIS
c       MAIN PROGRAM FOR POLARIZATION ANALYSIS BASED ON JURKEVICS ALGORITHM
c       REF. BULL. SEISM. SOC. AM., 78, 1725-1743.
c       THIS PROGRAM IS A PC VERSION ADAPTED AT THE INSTITUTO DE INGENIERIA,
c       UNAM.  IT COMPUTE POLARIZATION ATRIBUTES FROM A SINGLE STATION OF
c       THREE-COMPONENT DATA.
c
c FILES
c       INPUT FILES .BINARY DATA FOR EACH COMPONENT
c       OUTPUT FILES. POLARIZATION ATRIBUTES WITH THE SAME NAME OF THE INPUT
c       DATA BUT EXTENSION CHANGED.
c NOTES
c       THE INITIAL PARAMETERS CAN BE READ BY AN INPUT FILE OR BY TERMINAL
c       IN THE COMMAND LINE.
c       NEEDS THE FORMAT OF THE INITIAL DATA, NUMBER OF POINTS, PARAMETERS
c       OF THE FILTER, AND LENGHT OF THE TIME WINDOW.
c       THE ALGORITHM CAN BE SUMMARIZED AS FOLLOWS:
C       FOR A GIVEN ARRIVAL, A DATA SEGMENT CENTERED ON THE ARRIVAL TIME IS
C       PROCESSED.
C       THE DATA ARE FILTERED ON A SET OF FREQUENCY BANDS.
C       FOR EACH WINDOW, THE COVARIANCE MATRIX IS COMPUTED IN EACH BAND.
C       THE COVARIANCE MATRICES ARE AVERAGED OVER THE SELECTED
C       BANDS (USING SPECTRAL BALANCING, TO INSURE EACH BAND CONTRIBUTES EQ.
C       REGARDLESS OF ITS AMPLITUDE LEBEL).
C       WRITE ATRIBUTES IN DIFFERENTS FILES.
C AUTHOR
C       ROBERTO ORTEGA (1991) INSTITUTO DE INGENIERIA. COORDINACION DE SISM.
C       E INSTRUMENTACION SISMICA, UNAM
C       V1.0
C VARIABLES
C       IOPC.................... FORMAT OF INPUT DATA
C       LEER.................... FLAG TO KNOW IF DATA HAS BEEN READ
C       DELT.................... TIME INTERVAL
C       NMS..................... NUMBER OF POINTS
C       VER..................... DATA ARRAY FOR VERTICAL COMPONENT
C       RNO..................... DATA ARRAY FOR NORTH-SOUTH COMPONENT
C       EST..................... DATA ARRAY FOR EAST-WEST COMPONENT
C       NBAN.................... NUMBER OF BANDS
C       ARCH1................... FILE NAME
C
C****************************************************************************
      common/forma/iopc,leer,delt,nmm
      common/senal3/ver(16000),rno(16000),est(16000)
      common/filt/nban
      common/arch/arch1
      character*10 arch1
c
c       CALL THE PRINCIPAL SUBROUTINES
c
```

```
      call lectu
      call filtrar
      call covar
c
c         CALL END MAIN PROGRAM
c
4000  end
c*************************************************************************
c
c NAME SUBROUTINE
c         LECTU
c
c SYNOPSIS
c         READ INPUT DATA FROM BINARY AND ASCII FILES AND STORES THEM
c AUTHOR
c         ROBERTO ORTEGA 1991. INSTITUTO DE INGENIERIA COORD. SISMOLOGIA.
c
c VARIABLES
c         I . . . . . . . . . . . . . COUNTER
c         ARCH2 . . . . . . . . . . . DATA FILENAME FOR N-S COMPONENT
c         ARCH3 . . . . . . . . . . . DATA FILENAME FOR E-W COMPONENT
c
c*************************************************************************
      subroutine lectu
      common/forma/iopc,leer,delt,nms
      common/senal3/ver(16000),rno(16000),est(16000)
      common/arch/arch1
      character*10 arch1,arch2,arch3
      leer=1
      write(*,'(2(/))')
      write(*,'(4x,a)')'LECTURA DE SENALES'
      write(*,'(4x,a)')'formato:'
      write(*,'(1(/))')
      write(*,'(4x,a)')'(1) Binario 1 componente'
      write(*,'(4x,a)')'(2) Binario x,y '
      write(*,'(4x,a)')'(3) Senal en ascii '
      write(*,'(4x,a\)')'opcion : '
      read(*,'(i2)')iopc
      write(*,'(4x,a\)')'Intervalo de muestreo '
      read(*,'(f6.4)')delt
      write(*,'(4x,a\)')'Numero de muestras '
      read(*,*)nms
      write(*,'(4x,a)')'Nombre del archivo de la componente vertical'
      read(*,'(a)')arch1
      write(*,'(4x,a)')'Nombre del archivo de la componente N-S'
      read(*,'(a)')arch2
      write(*,'(4x,a)')'Nombre del archivo de la componente E-W'
      read(*,'(a)')arch3
      if(iopc.le.2)goto 1000
      if(iopc.gt.2)goto 2000
1000  open(5,file=arch1,form='binary')
      open(6,file=arch2,form='binary')
      open(7,file=arch3,form='binary')
      do 11 i=1,NMS
      read(5,end=6300)  ver(i)
      read(6,end=6300)  rno(i)
```

```
      read(7,end=6300)  est(I)
11    CONTINUE
      goto 4000
6300  write(*,'(a)')'Faltan numero de valores'
2000  open(5,file=arch1)
      open(6,file=arch2)
      open(7,file=arch3)
      DO 12 I=1,NNS
      read(5,*,end=6300) ver(I)
      read(6,*,end=6300) rno(I)
      read(7,*,end=6300) est(I)
12    CONTINUE
4000  continue
      close (5)
      close (6)
      close (7)
      return
      end
c*****************************************************************************
c
c NAME SUBROUTINE
c        FILTRAR
c
C SYNOPSIS
c        MAIN SUBROUTINE FOR A BUTTERWORTH EIGHT POLES BIDIRECTIONAL FILTER
c        FOR THREE-COMPONENT DATA.
C NOTES
c        THIS FILTER CALCULATE THE POLES IN THE S PLANE AND TRANSFORM THEM
c        INTO THE Z PLANE WITH TWO DIFFERENT SUBROUTINES.
C AUTHOR
c        ROBERTO ORTEGA (1991). INSTITUTO DE INGENIERIA. COORD SISMOLOGIA.
c        UNAM.
c
C VARIABLES
c        G . . . . . . . . . . . . . . GAIN OF FILTER
c        I . . . . . . . . . . . . . . COUNTER
c        II. . . . . . . . . . . . . . COUNTER
c        CEN . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
c        DNS . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
c        IOP . . . . . . . . . . . . . FORMAT OF INPUT DATA
c        N1. . . . . . . . . . . . . . COUNTER
c        D . . . . . . . . . . . . . . ARRAY CONTAINING POLES
c        DEN . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
c        EX. . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY FOR DATA VECTOR
c        F1. . . . . . . . . . . . . . LOW CUT FREQUENCY
c        F2. . . . . . . . . . . . . . UPPER CUT FREQUENCY
c        FILENN. . . . . . . . . . . . NAME OF INPUT DATA FILE
c        IOPC. . . . . . . . . . . . . INPUT DATA FORMAT
c        LEER. . . . . . . . . . . . . FLAG TO KNOW IF DATA HAS BEEN READ
    0004
c        DELT. . . . . . . . . . . . . TIME INTERVAL
c        NNS . . . . . . . . . . . . . NUMBER OF POINTS
c        VER . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR VERTICAL VCMPONENT
c        RNO . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR NORTH-SOUTH COMPONENT
c        EST . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR EAST-WEST COMPONENT
c        NBAN. . . . . . . . . . . . . NUMBER OF BANDS TO BE FILTERED
```

```
c
c*****************************************************************************
      subroutine filtrar
      common/forma/iopc,leer,delt,nmm
      common/senal3/ver(16000),rno(16000),est(16000)
      common/filt/nban
      real*4 f1(8),f2(8),EX(16000),d(8),den(8)
      character*4 filemn(21)
      data filemn/'ve00','ve01','ve02','ve03','ve04','ve05','ve06',
     & 'ns00','ns01','ns02','ns03','ns04','ns05','ns06',
     & 'eo00','eo01','eo02','eo03','eo04','eo05','eo06'/
      if(leer.eq.0)then
      write(*,'(a)')'NECESITAS LEER UN ARCHIVO ANTES DE
     & FILTRARLO '
      RETURN
      ENDIF
      write(*,'(2(/))')
      write(*,'(4x,a)')'FILTRO TIPO BUTTERWORTH DE 8 POLOS
     & BIDIRECCIONAL'
      write(*,'(4x,a)')'opciones:'
      write(*,'(4x,a\)')'Numero de bandas para filtrar: '
      read(*,'(i2)')nban
      write(*,'(1(/))')
      do 1 i=1,nban
      write(*,'(4x,a,i2)')'Frecuencia minima y maxima de la
     &  banda ',nban
      read(*,*)f1(i),f2(i)
      write(*,'(1(/))')
      open(i+7,status='scratch',form='binary')
      open(i+14,status='scratch',form='binary')
      open(i+21,status='scratch',form='binary')
    1 continue
      write(*,'(4x,a\)')'Salvar archivos de senales filtradas ?:
     &  (1)Si (2)No '
      read(*,'(i2)')iop
      write(*,'(1(/))')
      dmm=delt*1000
      goto (1000,2000),iop
 1000 return
 2000 do 2 ni=1,nban

        CALL BNDPASS(F1(ni),F2(ni),dmm,D,G)
        CALL CAMBIA(VER,ex,d,g,den,gen)
        CALL FILTER(ex,nmm,den,gen,1)
        write(ni+7)(ex(i),i=1,nmm)
        CALL CAMBIA(rno,ex,d,g,den,gen)
        CALL FILTER(ex,nmm,den,gen,1)
        write(ni+14)(ex(i),i=1,nmm)
        CALL CAMBIA(est,ex,d,g,den,gen)
        CALL FILTER(ex,nmm,den,gen,1)
        write(ni+21)(ex(i),i=1,nmm)
    2   CONTINUE


        do 3 ii=1,nban
        rewind ii+7
```

```
      rewind ii+14
      rewind ii+21
    3 continue
      return
      end


      subroutine cambia(ant,suev,d,g,den,gen)
      common/forma/iopc,leer,delt,nmm
      REAL*4 ant(16000),suev(16000),d(8),den(8)
      do 1 i=1,nmm
      suev(i)=ant(i)
    1 continue
      do 2 i=1,8
      den(i)=d(i)
    2 continue
      gen=g
      return
      end


      subroutine bndpass(f1,f2,delt,d,g)
C**************************************************************************
C
C NAME
C       BNDPASS
C
C SYNOPSIS
C
C       RECURSIVE BUTTERWORTH BAND PASS FILTER (KANSEWICH, TIME SERIES
C       ANALYSIS IN GEOPHYSICS, UNIVERSITY OF ALBERTA PRESS, 1975; SHANKS,
C       J. L., RECURSION FILTERS FOR DIGITAL PROCESING, GEOPHYSICS, V.32
C       No.1, FEBRUARY 1967, 33-51
C        FILTER. THE FILTER WILL HAVE 8 POLES IN THE S PLANE AND IS APPLIED
C        IN FORWARD AND REVERSE DIRECTIONS TO HAVE ZERO PHASE SHIFT.
C        THE GAIN AT THE TWO FRECUENCIES SPECIFIED AS CUT-OFF FRECUENCIES WILL

C        BE - 6dB AND THE ROLL OFF WILL BE ABOUT ABOUT THE FILTER TO PREVENT
C        ALIASING PROBLEMS.
C AUTHOR
C       DAVE GANLEY ON MARCH 5, 1977
C       GAIN REVISION BY ROBERTO ORTEGA (1991). INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM.
C VARIABLES
C       G . . . . . . . . . . . . . . GAIN OF FILTER
C       I . . . . . . . . . . . . . . COUNTER
C       II. . . . . . . . . . . . . . COUNTER
C       GEN . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
C       DNS . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
C       IOP . . . . . . . . . . . . . FORMAT OF INPUT DATA
C       N1. . . . . . . . . . . . . . COUNTER
C       D . . . . . . . . . . . . . . ARRAY CONTAINING POLES
C       DEN . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY
C       EX. . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY FOR DATA VECTOR
C       F1. . . . . . . . . . . . . . LOW CUT FREQUENCY
```

```
C         F2. . . . . . . . . . . . . . UPPER CUT FRECUENCY
C         FILEDN. . . . . . . . . . . . NAME OF INPUT DATA FILE
C         IOPC. . . . . . . . . . . . . INPUT DATA FORMAT
C         LEER. . . . . . . . . . . . . FLAG TO KNOW IF DATA HAS BEEN READ
    0004
C         DELT. . . . . . . . . . . . . TIME INTERVAL
C         NMS . . . . . . . . . . . . . NUMBER OF POINTS
C         VER . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR VERTICAL VCMPONENT
C         RNO . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR NORTH-SOUTH COMPONENT
C         EST . . . . . . . . . . . . . DATA ARRAY FOR EAST-WEST COMPONENT
C         NBAN. . . . . . . . . . . . . NUMBER OF BANDS TO BE FILTERED
C
C*********************************************************************
      complex p(4),s(8),z1,z2
      dimension d(8),x(16000),xc(3),xd(3),xe(3)
      data iew/0/,twopi/6.2831853/
C
C*********************************************************************
C
C COMMENTS.
C THIS SECTION CALCULATES THE FILTER AND MUST BE CALLED BEFORE FILTER
C SUBROUTINE IS CALLED
C
C         F1=LOW FRECUENCY CUT-OFF. 6dB DOWN
C         F2=HIGH FRECUENCY CUT-OFF. 6dB DOWN
C         DELT= INTERVAL SAMPLE IN MILLISECONDS
C         D= WILL CONTAIN 8 Z DOMAIN COEFICIENTS OF RECURSIVE FILTERS
C         G= WILL CONTAIN THE GAIN OF THE FILTERS.
C*********************************************************************
      dt=delt/1000.0
      tdt=2.0/dt
      fdt=4.0/dt
      iew=1
      p(1)=cmplx(-.3826834,.9238795)
      p(2)=cmplx(-.3826834,-.9238795)
      p(3)=cmplx(-.9238795,.3826834)
      p(4)=cmplx(-.9238795,-.3826834)
      w1=twopi*f1
      w2=twopi*f2
      w1=tdt*tan(w1/tdt)
      w2=tdt*tan(w2/tdt)
      hwid=(w2-w1)/2.0
      ww=w1*w2
      do 19 i=1,4
      z1=p(i)*hwid
      z2=z1*z1-ww
      z2=csqrt(z2)
      s(i)=z1+z2
   19 s(i+4)=z1-z2
      g=.5/hwid
      g=g*g
      g=g*g
      do 29 i=1,7,2
      b=-2.0*real(s(i))
      z1=s(i)*s(i+1)
      c=real(z1)
```

```
      a=tdt+b+c/tdt
      g=g*a
      d(i)=(c*dt-fdt)/a
   29 d(i+1)=(a-2.0*b)/a
      return
      end

      subroutine filter(x,n,d,g,ig)
C***********************************************************************
C
C COMMENTS
C X= DATA VECTOR OF LENGTH N CONTAINIG DATA TO BE FILTERED
C D= FILTER COEFFICIENTS CALCULATED BY BNDPASS
C G= FILTER GAIN
C IG=1 REMOVE THE FILTER GAIN SO THAT THE GAIN IS UNITY.
C
C***********************************************************************

      dimension x(16000),xc(3),xd(3),xe(3),d(8)

      xm2=x(1)

C APPLIED FILTER IN FOREWARD DIRECTION.
      xm1=x(2)
      xm=x(3)
      xc(1)=xm2
      xc(2)=xm1-d(1)*xc(1)
      xc(3)=xm-xm2-d(1)*xc(2)-d(2)*xc(1)
      xd(1)=xc(1)
      xd(2)=xc(2)-d(3)*xd(1)
      xd(3)=xc(3)-xc(1)-d(3)*xd(2)-d(4)*xd(1)
      xe(1)=xd(1)
      xe(2)=xd(2)-d(5)*xe(1)
      xe(3)=xd(3)-xd(1)-d(5)*xe(2)-d(6)*xe(1)
      x(1)=xe(1)
      x(2)=xe(2)-d(7)*x(1)
      x(3)=xe(3)-xe(1)-d(7)*x(2)-d(8)*x(1)
      do 39 i=4,n
      xm2=xm1
      xm1=xm
      xm=x(i)
      k=i-((i-1)/3)*3
      go to(34,35,36),k
   34         m=1
           m1=3
           m2=2
      go to 37

   35           m=2
              m1=1
              m2=3
        go to 37
   36           m=3
              m1=2
              m2=1
   37    xc(m)=xm-xm2-d(1)*xc(m1)-d(2)*xc(m2)
```

```
      xd(m)=xc(m)-xc(m2)-d(3)*xd(m1)-d(4)*xd(m2)
      xe(m)=xd(m)-xd(m2)-d(5)*xe(m1)-d(6)*xe(m2)
      x(i)=xe(m)-xe(m2)-d(7)*x(i-1)-d(8)*x(i-2)
   39   continue
c APPLIED FILTER IN REVERSE FORM
      xm2=x(n)
      xm1=x(n-1)
      xm=x(n-2)
      xc(1)=xm2
      xc(2)=xm1-d(1)*xc(1)
      xc(3)=xm-xm2-d(1)*xc(2)-d(2)*xc(1)
      xd(1)=xc(1)
      xd(2)=xc(2)-d(3)*xd(1)
      xd(3)=xc(3)-xc(1)-d(3)*xd(2)-d(4)*xd(1)
      xe(1)=xd(1)
      xe(2)=xd(2)-d(5)*xe(1)
      xe(3)=xd(3)-xd(1)-d(5)*xe(2)-d(6)*xe(1)
      x(n)=xe(1)
      x(n-1)=xe(2)-d(7)*x(1)
      x(n-2)=xe(3)-xe(1)-d(7)*x(2)-d(8)*x(1)
      do 49 i=4,n
      xm2=xm1
      xm1=xm
      j=n-i+1
      xm=x(j)
      k=i-((i-1)/3)*3
      GO TO (44,45,46),K
  44        m=1
            m1=3
            m2=2
      GO TO 47
   45           m=2
                m1=1
                m2=3
        GO TO 47
   46           m=3
                m1=2
                m2=1
   47 xc(m)=xm-xm2-d(1)*xc(m1)-d(2)*xc(m2)
      xd(m)=xc(m)-xc(m2)-d(3)*xd(m1)-d(4)*xd(m2)
      xe(m)=xd(m)-xd(m2)-d(5)*xe(m1)-d(6)*xe(m2)
   49 x(j)=xe(m)-xe(m2)-d(7)*x(j+1)-d(8)*x(j+2)
  50   continue
      if(ig.eq.1)then
      g=g*g
      do 59 i=1,n
   59 x(i)=x(i)/g
      else
      endif
      return
      end
c**************************************************************************
c NAME
c       COVAR
c SYNOPSIS
c       MAIN SUBROUTINE FOR CALCULATING COVARIANCE MATRIX IN A TIME
```

```
C       WINDOW
C VARIABLES
C
C       X . . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY FOR N-S COMPONENT
C       Y . . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY FOR E-W COMPONENT
C       Z . . . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ARRAY FOR VERTICAL COMPONENT
C       TRAZ. . . . . . . . . . . . . TRACE OF MATRIX
C       NMATR . . . . . . . . . . . . NUMBER OF MATRICES TO CALCULATE
C       AMPLIT. . . . . . . . . . . . AMPLITUDES OF EIGENVALUES
C       SUTRA . . . . . . . . . . . . ADDED TRACES
C       PINC. . . . . . . . . . . . . INCIDENCE OF P WAVES
C       PAZ . . . . . . . . . . . . . AZIMUT OF P WAVES
C       PLANA . . . . . . . . . . . . PLANARITY
C       PDIR. . . . . . . . . . . . . DIRECTION OF P WAVES
C       REACT . . . . . . . . . . . . RECTILINEARITY
C       SUMA. . . . . . . . . . . . . TEMPORARY ADDITION
C       NVEN. . . . . . . . . . . . . NUMBER OF WINDOWS
C       XE. . . . . . . . . . . . . . VECTOR DATA
C**************************************************************************
      subroutine covar
      common/forma/iopc,leer,delt,n
      common/filt/nban
      common/senal3/x1(16000),y1(16000),z1(16000)
      common/arch/arch1
      character*10 arch1,NEMB1,NEMB2,NEMB3,NEMB4,NEMB5,NEMB6
      real*4 x(1000,8),y(1000,8),z(1000,8),s(3,3),t(3,3),e(3),d(3),
     & sum(3,3),XE(3,1000),pr(3,3,8)

       NEMB1=arch1
       NEMB2=arch1
       NEMB3=arch1
       NEMB4=arch1
       NEMB5=arch1
       NEMB6=arch1
       DO 1001 I=1,10
       IF(ARCH1(I:I).EQ.'.')THEN
       NEMB1(I+1:I+3)='PLA'
       NEMB2(I+1:I+3)='REC'
       NEMB3(I+1:I+3)='AMP'
       NEMB4(I+1:I+3)='AZI'
       NEMB5(I+1:I+3)='INC'
       NEMB6(I+1:I+3)='DIR'
 1001 endif
       OPEN(NBAN+22,FILE=NEMB1,FORM='BINARY')
       OPEN(NBAN+23,FILE=NEMB2,FORM='BINARY')
       OPEN(NBAN+24,FILE=NEMB3,FORM='BINARY')
       OPEN(NBAN+25,FILE=NEMB4,FORM='BINARY')
       OPEN(NBAN+26,FILE=NEMB5,FORM='BINARY')
       OPEN(NBAN+27,FILE=NEMB6,FORM='BINARY')

c
c     VALORES DE ENTRADA
c
      WRITE(*,*)'TAMANO DE LA VENTANA [SEG]'

      READ(*,*)SEG
```

```
c
c
      NVEN=SEG/DELT
      NMATR=N-NVEN
      do 28 it=1,nban

      DO 17 I=1,NVEN+1
      read(it+7)Z(I,it)
      read(it+14)X(I,it)
      read(it+21)Y(I,it)
 17   continue
 28   continue
c
c
      DO 33 N=1,NMATR
      do 41 iy=1,nban
      DO 18 I=1,NVEN
      XE(1,I)=Z(I,iy)
      XE(2,I)=X(I,iy)
      XE(3,I)=Y(I,iy)
   18 CONTINUE
c
c  C
c
      DO 44 I=1,3
      DO 45 K=1,3
      SUMA=0
      DO 46 J=1,NVEN
      SUMA=XE(I,J)*XE(K,J)+suma
   46 CONTINUE
      FAT=NVEN
      S(I,K)=SUMA/FAT
   45 CONTINUE
   44 CONTINUE
c

        CALL CAMB2(S,T)
c
        CALL TRED2(T,3,3,D,E)
        CALL TQLI(D,E,3,3,T)
        TRAZ=(D(1)**2+D(2)**2+D(3)**2)
        SUTRA=TRAZ+SUTRA

        DO 51 I=1,3
        DO 52 K=1,3
        pr(i,k,iy)=m(i,k)/traz
 52   CONTINUE
 51   CONTINUE
 41   CONTINUE
      DO 78 I=1,3
      DO 79 K=1,3
      smat=0
      do 77 iu=1,nban
      smat=smat+pr(i,k,iu)
   77 continue
```

```
      sum(i,k)=smat*sutra
   79 CONTINUE
   78 CONTINUE
C
      SUTRA=0
      CALL TRED2(SUM,3,3,D,E)
      CALL TQLI(D,E,3,3,SUM)
      CALL EIGSRT(D,SUM,3,3)
c
c
      REACT=1-((D(2)+D(3))/(2*D(1)))
      PLANA=1-((2*D(3))/(D(1)+D(2)))
      AMPLIT=((D(1)**2+D(2)**2+D(3)**2))**0.5
      ARGU=SUM(2,1)
      ARG2=SUM(3,1)
      PDIR=ATAN(ARG2/ARGU)
      PAZ=ATAN2(ARG2,ARGU)
      PINC=ASIN(ABS(SUM(1,1)))
      PAZ=PAZ*360./(2.*3.141592654)
      PDIR=PDIR*360./(2.*3.141592654)
      PINC=PINC*360./(2.*3.141592654)
      WRITE(nban+22)plana
      WRITE(nban+23)REACT
      WRITE(nban+24)AMPLIT
      WRITE(nban+25)PAZ
      WRITE(nban+26)PINC
      WRITE(nban+27)PDIR
C
C
      DO 92 II=1,NBAN
      DO 24 I=1,NVEN
      X(I,II)=X(I+1,II)
      Y(I,II)=Y(I+1,II)
      Z(I,II)=Z(I+1,II)
   24 CONTINUE
   92 CONTINUE
C
C
      DO 31 IR=1,3
      DO 32 K=1,3
      SUM(IR,K)=0
   32 CONTINUE
   31 CONTINUE
      IF(N.EQ.NMATR)THEN
      GOTO 88
      ELSE
      do 86 it=1,nban
      read(it+7)x(1,it)
      read(it+14)y(1,it)
      read(it+21)z(1,it)
  86  continue
      ENDIF
   88  CONTINUE
   33 CONTINUE
c
c
```

```
      return
      END


      subroutine camb2(s,t)
      real*4 s(3,3),t(3,3)
      do 1 k=1,3
      do 2 j=1,3
      t(j,k)=s(j,k)
    2 continue
    1 continue
      return
      END

C***************************************************************************
C
C NAME SUBROUTINE
C         TRED2
C
C SYNOPSIS
C         CALCULATE ANY REAL SYMETRIC MATRIX INTO ITS TRIDIAGONAL FORM
C
C REFERENCE
C         NUMERICAL RECIPES SOFTWARE 1986 CAMBRIGE UNIVERSITY PRESS.
C
C AUTHOR
C        VETTERLING T. WILLIAM
C        REVISION FOR CONVERGENCE EIGENSYSTEM BY ROBERTO ORTEGA I DE I. UNAM
C
C***************************************************************************
      SUBROUTINE TRED2(A,N,NP,D,E)
      DIMENSION A(NP,NP),D(NP),E(NP)
      IF(N.GT.1)THEN
        DO 18 I=N,2,-1
          L=I-1
          H=0.
          SCALE=0.
          IF(L.GT.1)THEN
            DO 11 K=1,L
              SCALE=SCALE+ABS(A(I,K))
11          CONTINUE
            IF(SCALE.EQ.0.)THEN
              E(I)=A(I,L)
            ELSE
              DO 12 K=1,L
                A(I,K)=A(I,K)/SCALE
                H=H+A(I,K)**2
12            CONTINUE
              F=A(I,L)
              G=-SIGN(SQRT(H),F)
              E(I)=SCALE*G
              H=H-F*G
              A(I,L)=F-G
              F=0.
              DO 15 J=1,L
                A(J,I)=A(I,J)/H
```

```
                  G=0.
                  DO 13 K=1,J
                     G=G+A(J,K)*A(I,K)
13                CONTINUE
                  IF(L.GT.J)THEN
                     DO 14 K=J+1,L
                        G=G+A(K,J)*A(I,K)
14                   CONTINUE
                  ENDIF
                  E(J)=G/H
                  F=F+E(J)*A(I,J)
15             CONTINUE
               HH=F/(H+H)
               DO 17 J=1,L
                  F=A(I,J)
                  G=E(J)-HH*F
                  E(J)=G
                  DO 16 K=1,J
                     A(J,K)=A(J,K)-F*E(K)-G*A(I,K)
16                CONTINUE
17             CONTINUE
            ENDIF
         ELSE
            E(I)=A(I,L)
         ENDIF
         D(I)=H
18    CONTINUE
      ENDIF
      D(1)=0.
      E(1)=0.
      DO 23 I=1,N
         L=I-1
         IF(D(I).NE.0.)THEN
            DO 21 J=1,L
               G=0.
               DO 19 K=1,L
                  G=G+A(I,K)*A(K,J)
19             CONTINUE
               DO 20 K=1,L
                  A(K,J)=A(K,J)-G*A(K,I)
20             CONTINUE
21          CONTINUE
         ENDIF
         D(I)=A(I,I)
         A(I,I)=1.
         IF(L.GE.1)THEN
            DO 22 J=1,L
               A(I,J)=0.
               A(J,I)=0.
22          CONTINUE
         ENDIF
23    CONTINUE
      RETURN
      END
C
C*********************************************************************************
```

```
C
C NAME SUBROUTINE
C        TQLI
C
C SYNOPSIS
C        CALCULATE EIGENSYSTEM OF A MATRIX FROM ITS TRIDIAGONAL FORM
C
C REFERENCE
C        NUMERICAL RECIPES SOFTWARE 1985 CAMBRIGE UNIVERSITY PRESS.
C
C AUTHOR
C        VETTERLING T. WILLIAM
C        REVISION FOR CONVERGENCE EIGENSYSTEM BY ROBERTO ORTEGA (1991).
C
C*****************************************************************************
C
C
      SUBROUTINE TQLI(D,E,N,NP,Z)
      DIMENSION D(NP),E(NP),Z(NP,NP)
      IF (N.GT.1) THEN
        DO 11 I=2,N
          E(I-1)=E(I)
11      CONTINUE
        E(N)=0.
        DO 15 L=1,N
          ITER=0
1         DO 12 M=L,N-1
            DD=ABS(D(M))+ABS(D(M+1))
            IF (ABS(E(M))+DD.EQ.DD) GO TO 2
12        CONTINUE
          M=N
2         IF(M.NE.L)THEN
            IF(ITER.EQ.30)PAUSE 'too many iterations'
            ITER=ITER+1
            G=(D(L+1)-D(L))/(2.*E(L))
            R=SQRT(G**2+1.)
            G=D(M)-D(L)+E(L)/(G+SIGN(R,G))
            S=1.
            C=1.
            P=0.
            DO 14 I=M-1,L,-1
              F=S*E(I)
              B=C*E(I)
              IF(ABS(F).GE.ABS(G))THEN
                C=G/F
                R=SQRT(C**2+1.)
                E(I+1)=F*R
                S=1./R
                C=C*S
              ELSE
                S=F/G
                R=SQRT(S**2+1.)
                E(I+1)=G*R
                C=1./R
                S=S*C
              ENDIF
```

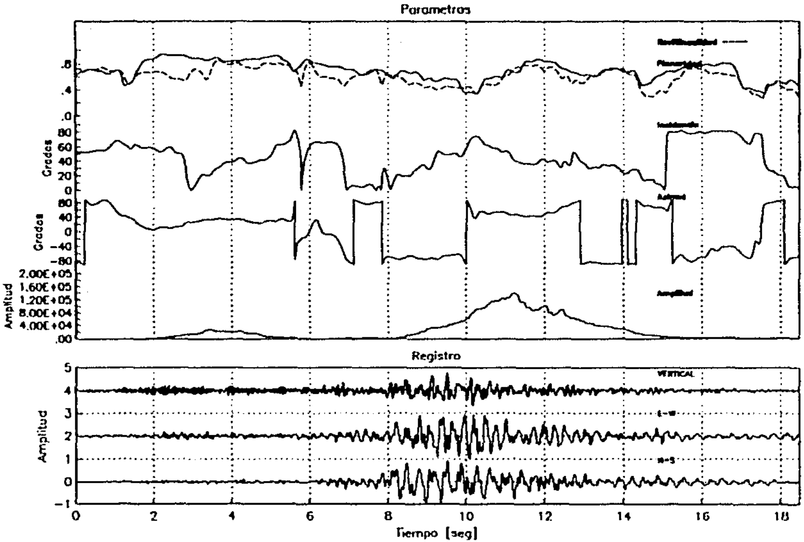
```
                  G=D(I+1)-P
                  R=(D(I)-G)*S+2.*C*B
                  P=S*R
                  D(I+1)=G+P
                  G=C*R-B
                  DO 13 K=1,N
                    F=Z(K,I+1)
                    Z(K,I+1)=S*Z(K,I)+C*F
                    Z(K,I)=C*Z(K,I)-S*F
13                CONTINUE
14              CONTINUE
                D(L)=D(L)-P
                E(L)=G
                E(M)=0.
                GO TO 1
              ENDIF
15          CONTINUE
        ENDIF
        RETURN
        END
C
C ORDER OF EIGENVALUES AND EIGENVECTORS.
C
        SUBROUTINE EIGSRT(D,V,N,NP)
        DIMENSION D(NP),V(NP,NP)
        DO 13 I=1,N-1
          K=I
          P=D(I)
          DO 11 J=I+1,N
            IF(D(J).GE.P)THEN
              K=J
              P=D(J)
            ENDIF
11        CONTINUE
          IF(K.NE.I)THEN
            D(K)=D(I)
            D(I)=P
            DO 12 J=1,N
              P=V(J,I)
              V(J,I)=V(J,K)
              V(J,K)=P
12          CONTINUE
          ENDIF
13      CONTINUE
        RETURN
        END
```

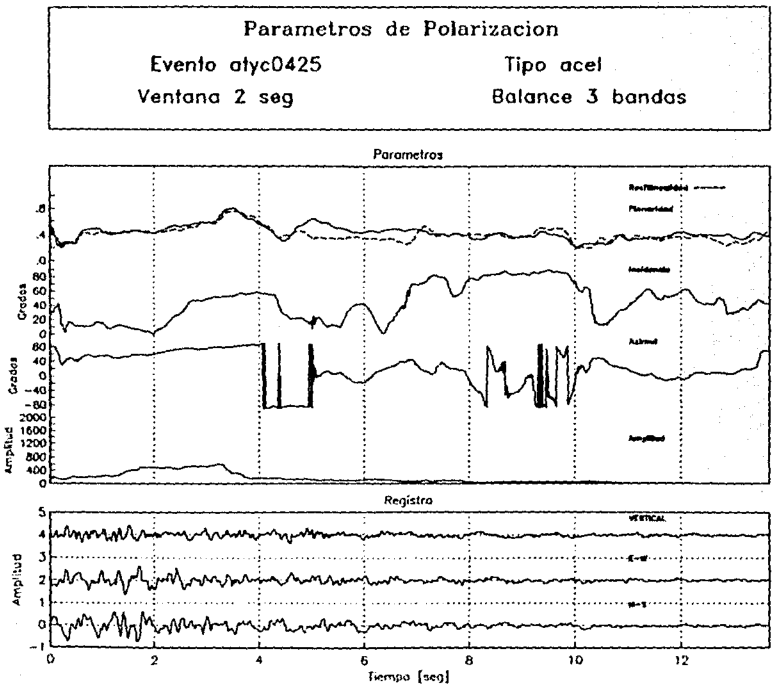
RESULTADOS PARA EL SISMO DEL 25 de ABRIL de 1969

Parametros de Polarizacion

Evento acar0425 Tipo acel

Ventana 2 seg Balance 3 bandas

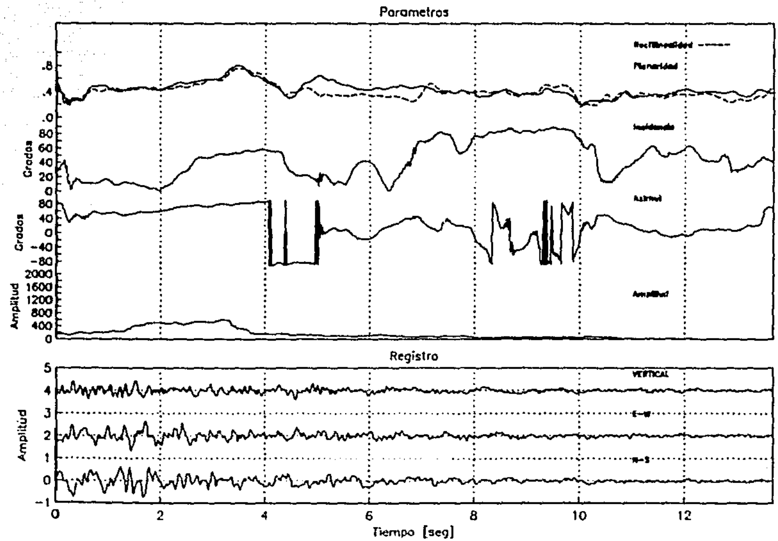



Parametros de Polarizacion
Evento atyc0425
Tipo acel
Ventana 2 seg
Balance 3 bandas
Parametros
.8
.4
.0
Grados
80
60
40
20
0
Grados
80
40
0
-40
-80
Amplitud
2000
1600
1200
800
400
0
Registro
Amplitud
5
4
3
2
1
0
-1
0
2
4
6
8
10
12
Tiempo [seg]

Parametros de Polarizacion

Evento atyc0425 — Tipo acel

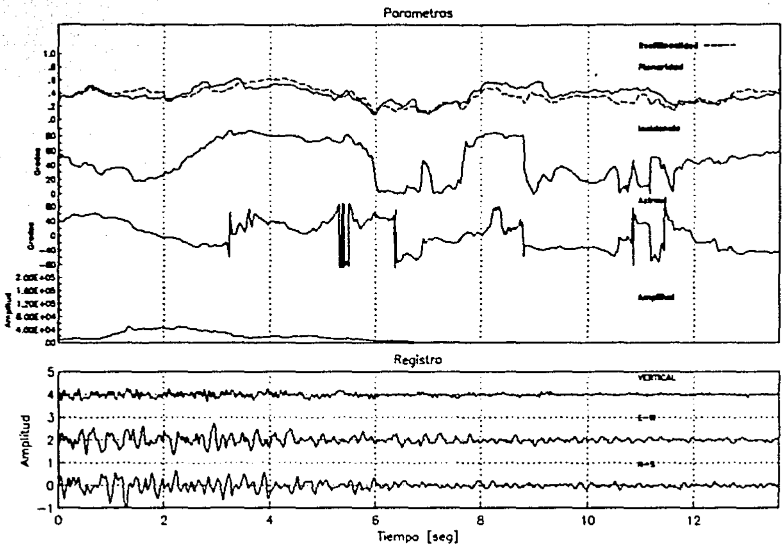
Ventana 2 seg — Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento caya0425 Tipo acel

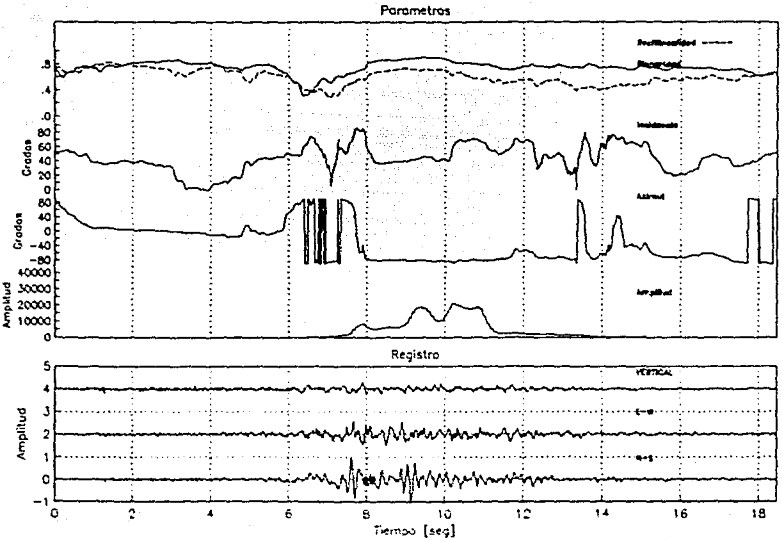
Ventana 2 seg Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento copl0425 — Tipo acel

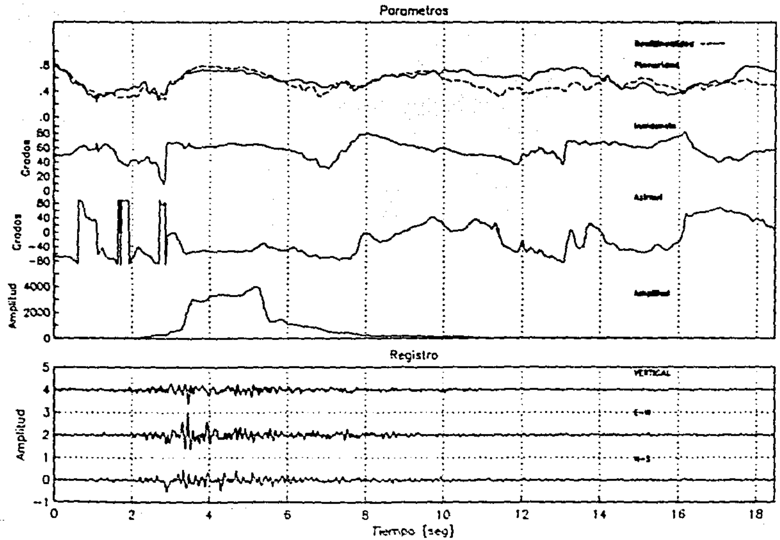
Ventana 2 seg — Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento coyc0425 Tipo acel

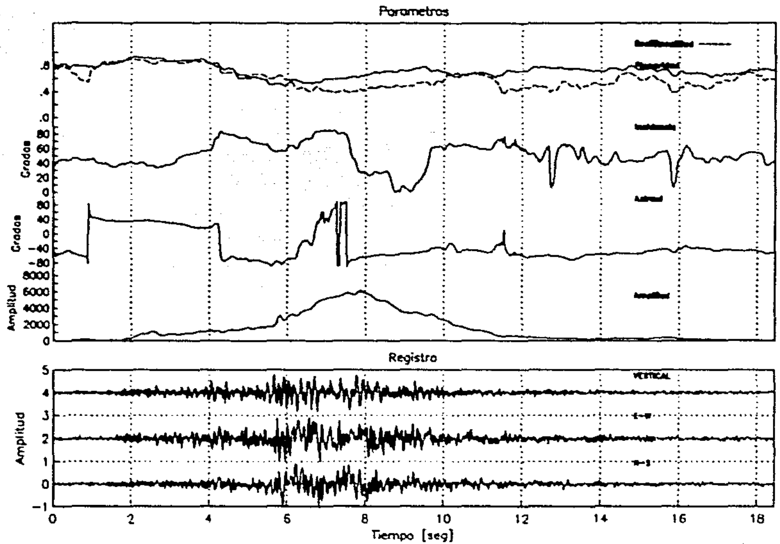
Ventana 2 seg Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento cpdr0425 Tipo acel

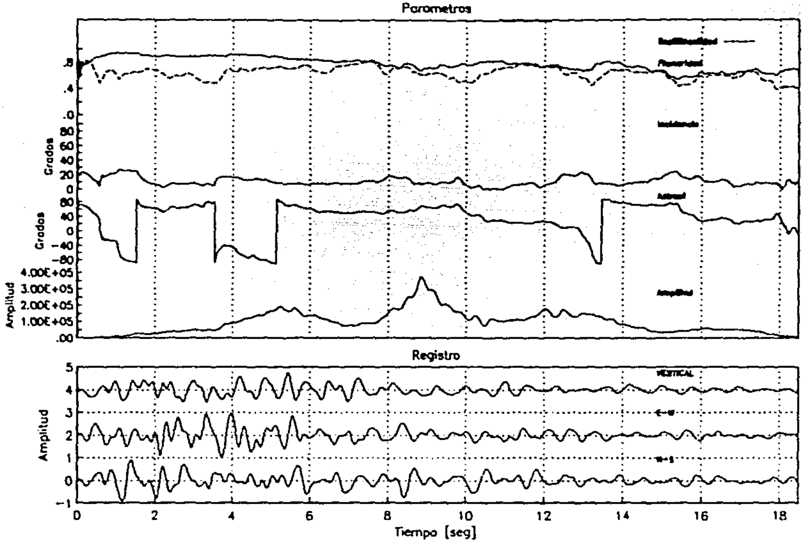
Ventana 2 seg Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento fica0425 Tipo acel

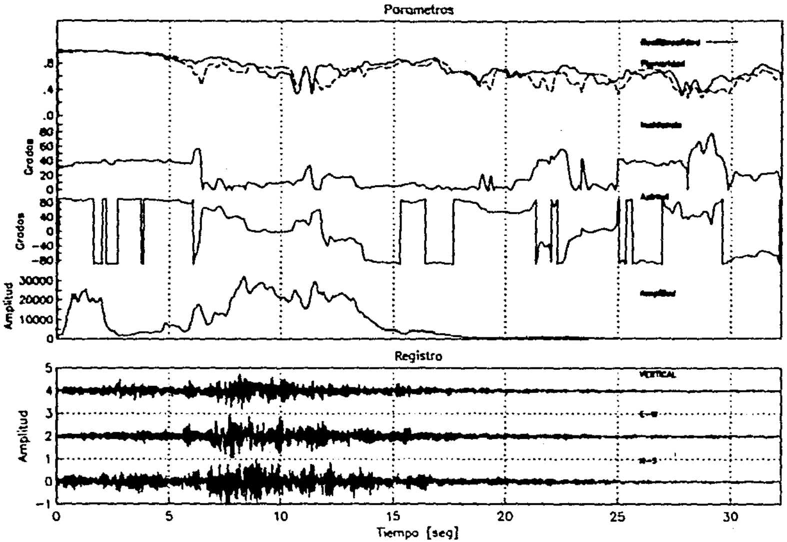
Ventana 2 seg Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento msas0425 Tipo acel

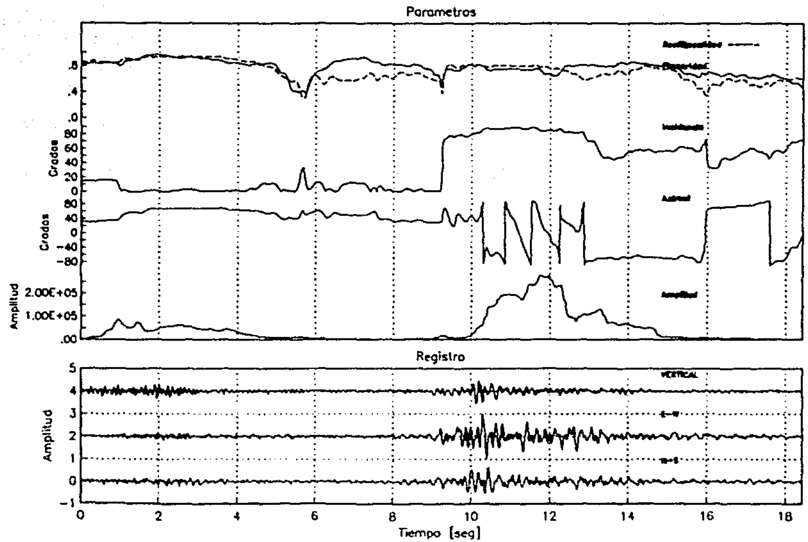
Ventana 2 seg Balance 3 bandas



Parametros de Polarizacion

Evento oct10425 Tipo acel

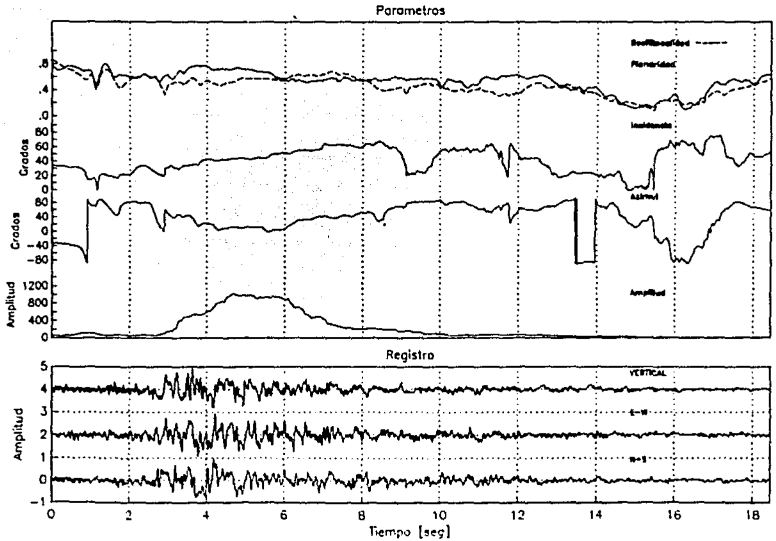
Ventana 2 seg Balance 3 bandas

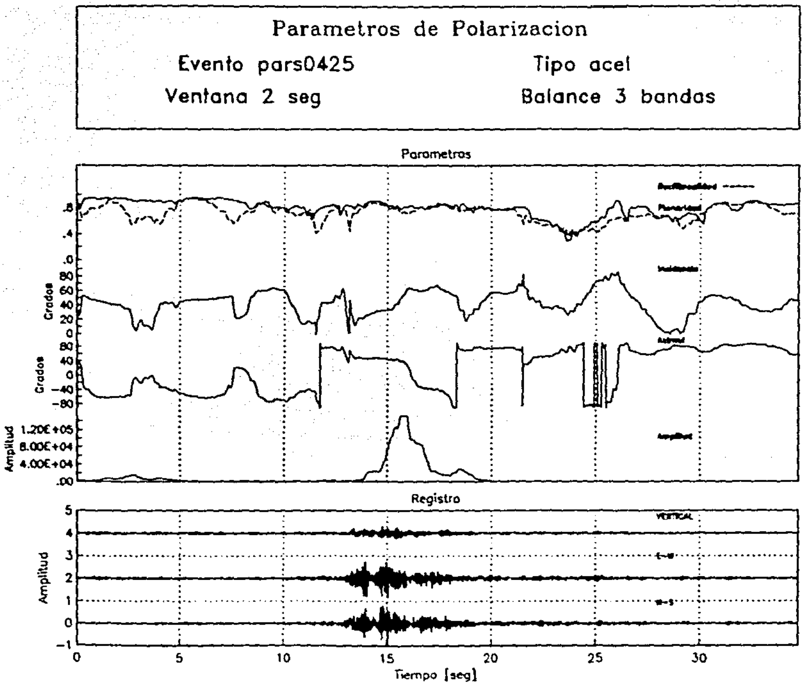


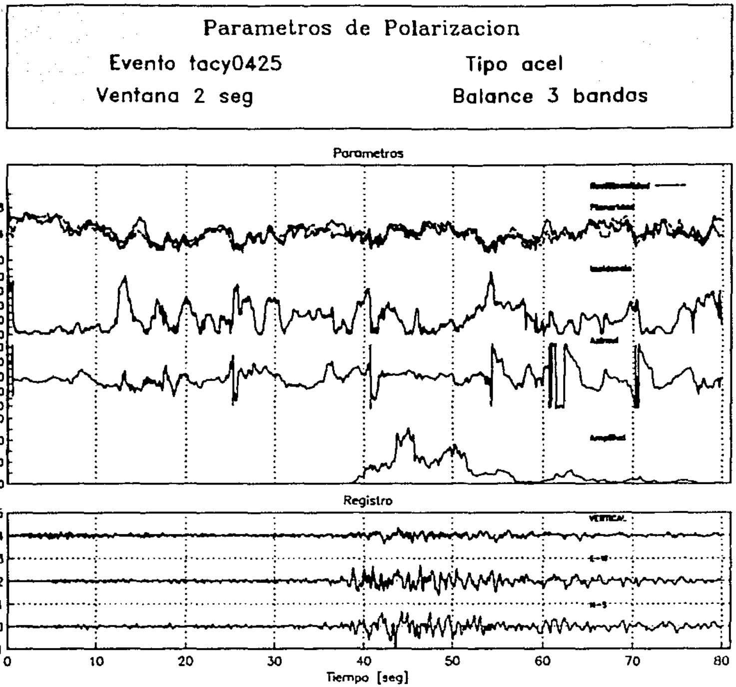
Parametros de Polarizacion

Evento ocll0425 Tipo acel

Ventana 2 seg Balance 3 bandas




Parametros de Polarizacion
Evento pars0425
Tipo acel
Ventana 2 seg
Balance 3 bandas
Parametros
Grados
Grados
Amplitud
1.20E+05
8.00E+04
4.00E+04
Registro
Amplitud
Tiempo [seg]

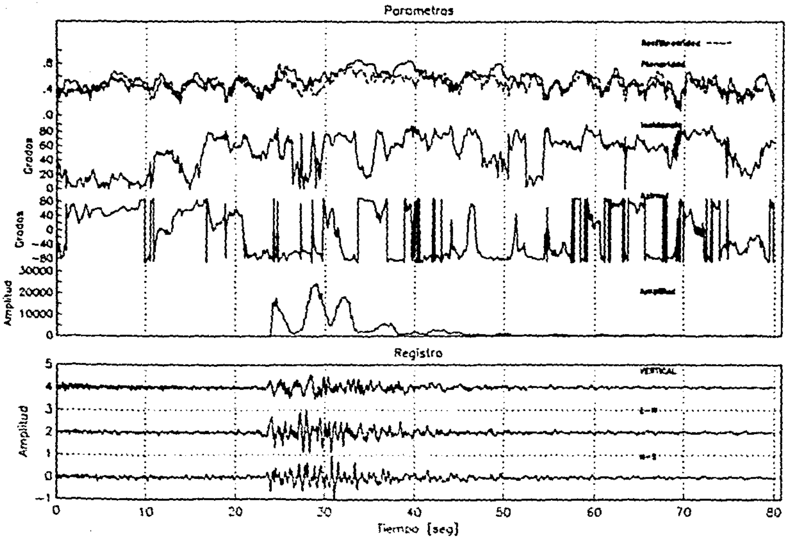


Parametros de Polarizacion
Evento tacy0425
Tipo acel
Ventana 2 seg
Balance 3 bandas
Parametros
Grados
Grados
Amplitud
Registro
Amplitud
Tiempo [seg]

Parametros de Polarizacion

Evento teac0425 Tipo acel

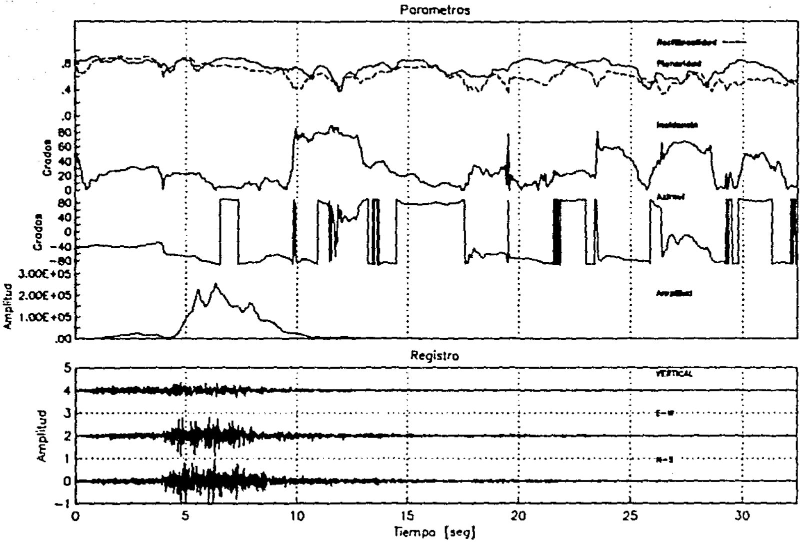
Ventana 2 seg Balance 3 bandas

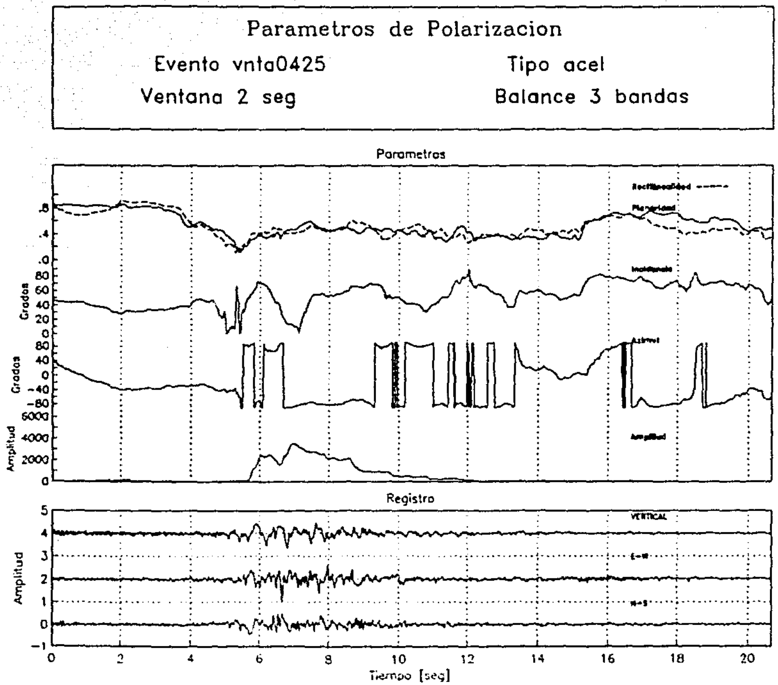


Parametros de Polarizacion

Evento viga0425 Tipo acel

Ventana 2 seg Balance 3 bandas




Parametros de Polarizacion
Evento vnta0425
Tipo acel
Ventana 2 seg
Balance 3 bandas
Parametros
Grados
Grados
Amplitud
Registro
VERTICAL
Amplitud
Tiempo [seg]