

SOBRE LA GENERACION DE SISMOGRAMAS SINTETICOS EN UN MEDIO SEMIINFINTIO

J. Batllo y A. M. Correig (*)

RESUMEN

En base a un estudio sobre el modelado de la generación, transmisión y registro de seísmos se ha construido un paquete de programas que permite la generación de sismogramas sintéticos en un medio semiinfinito a partir de cuatro tipos principales de fuentes canónicas, válidas para simular un amplio espectro de mecanismos focales.

Palabras clave: *Sismicidad, software.*

ABSTRACT

On the basis of a study of earthquakes pattern, transmission and register modeling, we have written a software package capable to generate synthetic seismograms in a half space from four canonic sources capables to simulate a large quantity of focal mechanisms.

Key words: *Sismicity, software.*

Introducción

Para la sismología, el sismograma representa la principal fuente de adquisición de datos susceptible de ser manipulada para cualquier estudio posterior, sea cual sea su objetivo. Así pues, aparte del estudio de estos para obtener información sobre el medio y la fuente, será de sumo interés su generación a partir de modelos teóricos para diferentes medios y focos sísmicos conduciéndonos a la obtención de sismogramas sintéticos válidos para realizar una comparación con los reales que permita, a partir de un ajuste de los modelos utilizados, un mejor conocimiento del medio en que se producen los seísmos y de sus causas.

Debido al complicado formulismo que comportan aun los más sencillos modelos teóricos utilizados, se hace imprescindible el uso del cálculo numérico y de recursos informáticos considerables para su generación. En los últimos diez años se han desarrollado diversas técnicas numéricas para su cálculo (Herrmann and Wang, 1985). Por otra parte, debido al perfeccionamiento del material de registro sísmico, nos es posible disponer de un número cada vez mayor de registros digitales, lo

cual permite optimizar y agilizar grandemente su tratamiento informatizado y su comparación con los generados sintéticamente.

En la generación de sismogramas sintéticos podemos distinguir tres factores principales: El tipo de fuente que produce el sismo, la respuesta del medio por el que se transmiten las ondas elásticas que provoca y su registro mediante un sismógrafo adecuado (que tendrá unas características propias determinadas) por un observador que se halla a una determinada distancia del epicentro. De un modo formal podemos representar este proceso como sigue:

$$\bar{u}(\bar{x}, t) = \bar{G}(\bar{x}, t; \bar{x}', t') \otimes S(t) \otimes I(t) \quad //$$

donde \bar{u} representa el registro que obtenemos. \bar{G} la respuesta del medio, S el tipo de fuente que produce el sismo, I la función de respuesta del sismógrafo, (\bar{x}, t) las coordenadas de la fuente, (\bar{x}', t') las coordenadas del observador y \otimes el producto de convolución. Por tanto, evaluando estos tres factores, podremos generar sismogramas sintéticos, objetivo de este trabajo.

(*) Departament de Física de la Terra i del Cosmos. Universitat de Barcelona. Diagonal 647, 08028 Barcelona.

Formulación del problema

Comenzaremos nuestro estudio investigando la forma que tendrá la función de respuesta o transmisión \bar{G} del medio. Para ello supongamos un medio elástico, infinito, isótropo y homogéneo. Podemos escribir la ecuación de conservación del momento lineal en el medio como (Aki and Richards, 1980):

$$\rho \cdot \frac{\delta^2}{\delta t^2} \bar{u}(\bar{x},t) = \bar{f}(\bar{x},t) + (\lambda + \mu) \cdot \nabla [\nabla \bar{u}(\bar{x},t)] + \mu \cdot \nabla^2 \bar{u}(\bar{x},t) \quad /2/$$

en donde t es el tiempo, \bar{x} el vector posición, \bar{u} el vector desplazamiento, \bar{f} la fuerza que provoca una perturbación elástica, ρ la densidad del medio y λ y μ sus constantes de Lamè.

Supongamos que tomamos un espacio semiinfinito limitado por una superficie libre situada en $x_3=0$ con el eje x_3 positivo en la dirección que apunta hacia el interior del medio (ver fig. 1).

Supongamos, asimismo, que en este semiespacio actúa una fuerza localizada en el tiempo y el espacio como:

$$\bar{f}(\bar{x},t) = (f_1 \bar{e}_1 + f_2 \bar{e}_2 + f_3 \bar{e}_3) \delta(x_1 - x'_1) \cdot \delta(x_2 - x'_2) \cdot \delta(x_3 - x'_3) \cdot \delta(t - t') \quad /3/$$

y que los esfuerzos se anulan en la superficie, es decir, suponemos que los elementos de tensor de esfuerzos cumplen (Burrige, 1976)

$$T_{13} = T_{23} = T_{33} = 0 \quad /4/$$

Si substituimos /3/ en /4/ y aplicamos la transformada de Fourier

$$U(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\alpha x) \cdot u(x) \cdot dx \quad /5/$$

a las coordenadas espaciales y la transformada de Laplace

$$U(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) \cdot u(t) \cdot dt \quad /6/$$

a la coordenada temporal, llegaremos a la ecuación:

$$\begin{matrix} E_1 E_2 & E_1 E_3 \\ E_1 E_2 & E_2^2 + \frac{\mu}{\lambda + \mu} (E_3^2 - V_B^2) & E_2 E_3 \\ E_1 E_3 & E_2 E_3 & E_3^2 + \frac{\mu}{\lambda + \mu} (E_3^2 - 2V_B^2) \end{matrix}$$

$$x \bar{G}(\bar{E}, s; 0, 0, x'_3, 0) = \frac{-\exp(-E_3 x'_3)}{\lambda + \mu} \bar{F} \quad /7/$$

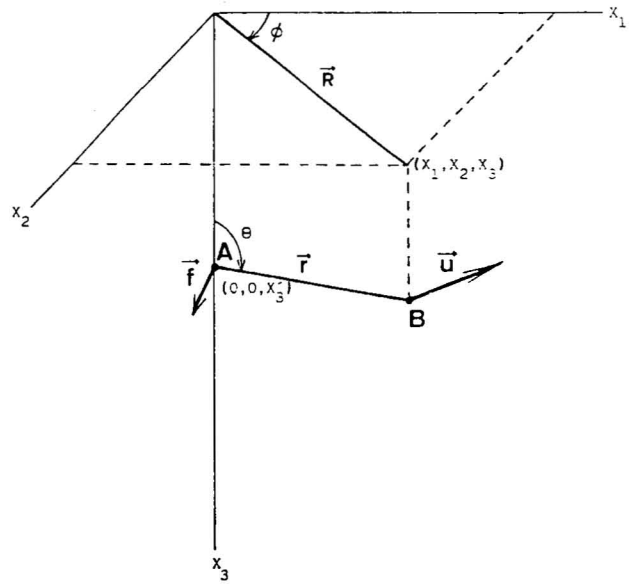


Fig. 1.—Sistema de ejes coordenados utilizados como sistema de referencia para el estudio de la transmisión del medio. Se puede simular un evento como una fuerza elemental \bar{f} aplicada al punto A que genera unas ondas que se transmiten por el camino \bar{r} hasta un observador situado en B y que registra un desplazamiento \bar{u} . El plano X_1, X_2 representa la superficie libre del medio. ϕ es el ángulo que se forma entre el eje X_1 y el vector \bar{R} que, a su vez, es la proyección del vector \bar{r} sobre la superficie. En el caso que el observador se halle sobre la superficie, \bar{R} es la distancia epicentro-observador.

en donde

$$\alpha = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2} \quad \beta = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$\begin{matrix} K_\alpha = s/\alpha & K_\beta = s/\beta \\ \text{Re} [(K_\alpha^2 - E_1^2)^{1/2}] \geq 0 & \text{Re} [(K_\beta^2 - E_1^2)^{1/2}] \geq 0 \\ V_\alpha = (K_\alpha^2 - E_1^2 - E_2^2)^{1/2} & \text{Re}[V_\alpha] \geq 0 \\ V_\beta = (K_\beta^2 - E_1^2 - E_2^2)^{1/2} & \text{Re}[V_\beta] \geq 0 \end{matrix} \quad /8/$$

y el vector \bar{E} representa la transformada de \bar{x} , s la de t y:

$$\bar{G}(\bar{E}, s; 0, 0, x_3, 0) = \begin{Bmatrix} g_1(\bar{E}, s; 0, 0, x_3, 0) \\ g_2(\bar{E}, s; 0, 0, x_3, 0) \\ g_3(\bar{E}, s; 0, 0, x_3, 0) \end{Bmatrix}; F = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad /9/$$

siendo g_1, g_2 y g_3 las llamadas funciones de Green (Rey Pastor, 1955) que, dadas las condiciones del problema, se puede probar que siempre existen y son la solución del mismo (Goursat and Bergmann, 1964).

La solución de /7/ es un simple problema algebraico. Para nuestros fines nos interesa conocer

los desplazamientos que se producirán en la superficie libre del medio, ya que usualmente es ahí donde tomaremos registros de desplazamientos. Para conseguirlo impondremos a /7/ la condición de superficie libre (ver fig. 1).

El problema principal ahora consiste en retornar la solución /7/ al dominio de las antitransformadas. Para ello utilizaremos técnica de Cagniard-de Hoop (de Hoop, 1960; Batlló, 1985) que, en síntesis, consiste en realizar varias transformaciones en /7/ a fin de obtener una integral en campo complejo a lo largo de un camino llamado "de Cagniard" de forma que su integración resulta inmediata.

La solución obtenida es la siguiente:

$$\begin{aligned} \hat{G}(x_1, x_2, 0, t; 0, 0, x_3, 0) = & \\ \frac{1}{\pi^2 \mu r} \frac{\delta}{\delta t_0} & ((t/r)^2 - \alpha^{-2})^{1/2} H(t-r/\alpha) \\ \times \operatorname{Re} [\eta_b \sigma^{-1} ((t/r)^2 - \alpha^{-2} - p^2)^{-1/2} \underline{M}(q, p, 0, t, x_3)] \bar{F} dp & \\ + \frac{1}{\pi^2 \mu r} \frac{\delta}{\delta t} & \int_0^{\rho_2} H(t-t_2) \\ \times \operatorname{Re} [\eta_b \sigma^{-1} ((t/r)^2 - \beta^2 - p^2)^{-1/2} \underline{N}(q, p, 0, t, x_3)] \bar{F} dp & \quad /10/ \end{aligned}$$

En donde H(t) es la función unitaria de Heavyside y:

$$\begin{aligned} & ((t/r)^2 - \beta^2)^{1/2} \sin(\theta) \leq \beta/\alpha \\ p_2 = & \left[\left(\frac{t/r - (\beta^2 - \alpha^{-2})^{1/2} \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right)^2 - \alpha^{-2} \right]^{1/2} \quad \sin(\theta) > \beta/\alpha \quad /11/ \\ t_2 = & \begin{cases} r/\beta & \sin(\theta) \leq \beta/\alpha \\ r/\alpha \sin(\theta) + r(\beta^2 - \alpha^{-2})^{1/2} \cos(\theta) & \sin(\theta) > \beta/\alpha \quad /12/ \end{cases} \\ \gamma = & \begin{cases} \eta_b^2 + p^2 - q^2 \\ \gamma^2 + 4 \cdot \eta_a \cdot \eta_b \cdot (q^2 - p^2) \end{cases} \quad /13/ \end{aligned}$$

y en la primera integral

$$q = -t/r \cdot \sin\theta + i[(t/r)^2 - \alpha^{-2} - p^2]^{1/2} \cdot \cos\theta \quad /14/$$

mientras que en la segunda

$$q = -t/r \cdot \sin\theta + i[(t/r)^2 - \beta^2 - p^2]^{1/2} \cdot \cos\theta \quad /15/$$

y finalmente, los elementos de las matrices M y N son

$$\begin{aligned} M_{11} &= 2 \cdot \eta_b [(q^2 + p^2) \cdot \cos^2\theta - p^2] \\ M_{12} &= 2 \cdot \eta_b [(q^2 + p^2) \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta] \\ M_{13} &= 2 \cdot q \eta_a \cdot \eta_b \cdot \cos\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{21} &= M_{12} \\ M_{22} &= 2 \cdot \eta_b [(q^2 + p^2) \cdot \sin^2\theta - p^2] \\ M_{23} &= 2 \cdot q \cdot \eta_a \cdot \eta_b \cdot \sin\theta \\ M_{31} &= q \cdot \gamma \cdot \cos\theta \\ M_{32} &= q \cdot \gamma \cdot \sin\theta \\ M_{33} &= \eta_a \cdot \gamma \end{aligned} \quad /16/$$

$$\begin{aligned} N_{11} &= 1/\eta_b \cdot \{ \Pi_B^2 \cdot \gamma - (\gamma - 4\eta_a \eta_b) [(q^2 - p^2) \cdot \sin\theta - p^2] \} \\ N_{12} &= 1/\eta_b \cdot (p^2 + p^2) \cdot (\gamma - 4\eta_a \eta_b) \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \\ N_{13} &= -q \cdot \gamma \cdot \cos\theta \\ N_{21} &= N_{21} \\ N_{22} &= 1/\eta_b \cdot \{ \eta_b^2 \cdot \gamma - (\gamma - 4\eta_a \eta_b) \cdot [(q^2 - p^2) \cdot \cos^2\theta - p^2] \} \\ N_{23} &= -q \cdot \gamma \cdot \sin\theta \\ N_{31} &= -2 \cdot q \cdot \eta_a \cdot \eta_b \cdot \cos\theta \\ N_{32} &= -2 \cdot q \cdot \eta_a \cdot \eta_b \cdot \sin\theta \\ N_{33} &= 2 \cdot \eta_a \cdot (q^2 - p^2) \end{aligned} \quad /17/$$

La principal ventaja que se obtiene con la aplicación de este método de solución es que obtenemos una solución completa, es decir, sin haber realizado ningún tipo de simplificación y, por tanto, con toda la precisión que esto nos puede aportar.

Como vemos, la solución /10/ se puede descomponer en dos partes bien diferenciadas. El primer sumando de la derecha representa la contribución a la solución de las ondas de tipo P o de comprensión, mientras que el segundo nos da la contribución que aportan a la solución las ondas de tipo S o de cizalla. Según el ángulo θ que se forma entre la fuente y el observador (ver fig. 1 obtendremos que, según /12/, la primera llegada debida a este término corresponderá a ondas S directas o PS difractadas (Pilar 1979).

Una vez realizado este cálculo hemos pasado a modelar diferentes tipos de fuentes o focos sísmicos —representados en /1/ la función S(t)—, habiendo elegido cuatro tipos diferentes de focos que hemos llamado fuentes canónicas

1. Falla vertical de desgarre.
2. Falla normal vertical.
3. Dipolo vertical lineal compensado.
4. Explosión simétrica.

que en virtud de los teoremas de representación de Knopoff— de Hoop (Burrige and Knopoff, 1964), podremos representar como

$$\begin{aligned} \text{a) } R, z & \begin{bmatrix} g_{n1,1} & -g_{n2,2} \\ T & g_{n1,2} + g_{n2,2} \end{bmatrix} \\ \text{b) } R, z & \begin{bmatrix} -g_{n1,3} & -g_{n3,1} \\ T & -g_{n2,3} + g_{n3,2} \end{bmatrix} \\ \text{c) } R, z & 1/2 (g_{n1,1} + g_{n2,2}) - g_{n3,3} \\ \text{d) } R, z & g_{n1,1} + g_{n2,2} + g_{n3,3} \end{aligned} \quad /18/$$

en donde R indica la componente radial, T transversal, z vertical y el subíndice

$$g_{i,j,k} = \frac{\delta}{\delta x_k} g_{i,j} \quad /19/$$

Como es natural, no existe componente transversal de radiación en los casos c) y d) debido a la simetría del problema. La evaluación de las funciones $g_{i,j,k}$ es prácticamente trivial a partir del proceso de solución que nos lleva a obtener /10/ (Johnson, 1974).

En principio, hemos tomado como respuesta del sismógrafo I(t) la obtenida para un aparato de la WWSSN calculada por Herrmann (Herrmann, 1978).

Aplicación numérica

A partir de las expresiones /18/ halladas en el apartado anterior para los diferentes tipos de fuentes canónicas, hemos elaborado un paquete de programas que nos permiten la obtención de sismogramas sintéticos. Consta de dos programas principales y otros secundarios que nos permiten diversas opciones.

El primer programa principal DSLCAN, cuya diagrama de flujo hemos representado en la fig. 2, evalúa los desplazamientos que se obtienen para cada tipo de fuente canónica (10 en total si sumamos todas las componentes que podemos obtener). Está construido de forma que evalúa independientemente las dos integrales que aparecen en /10/ y, para calcularlas, hemos utilizado el algoritmo de la cuadratura de Romberg-Neville (Carnahan et al., 1979) introducido en la subrutina ROMS por dos motivos: El primero porque nos da más precisión que otros algoritmos más utilizados como el de Newton-Cotes y la segunda porque nos permite calcular simultáneamente las 10 componentes del desplazamiento necesarias para nuestro cálculo.

Asimismo, y para evitar las derivadas respecto al tiempo que aparecen en /10/ hemos utilizado una función temporal de la fuente en forma de rampa.

DER1 y DER2 calculan respectivamente las derivadas primera y segunda de los desplazamientos obtenidos por DSLCAN con lo cual, a partir de DER1 y una vez realizada la convolución con la función de respuesta de un sismógrafo y debido a las propiedades de la convolución, que nos permite mover una derivada de un término de /1/ a

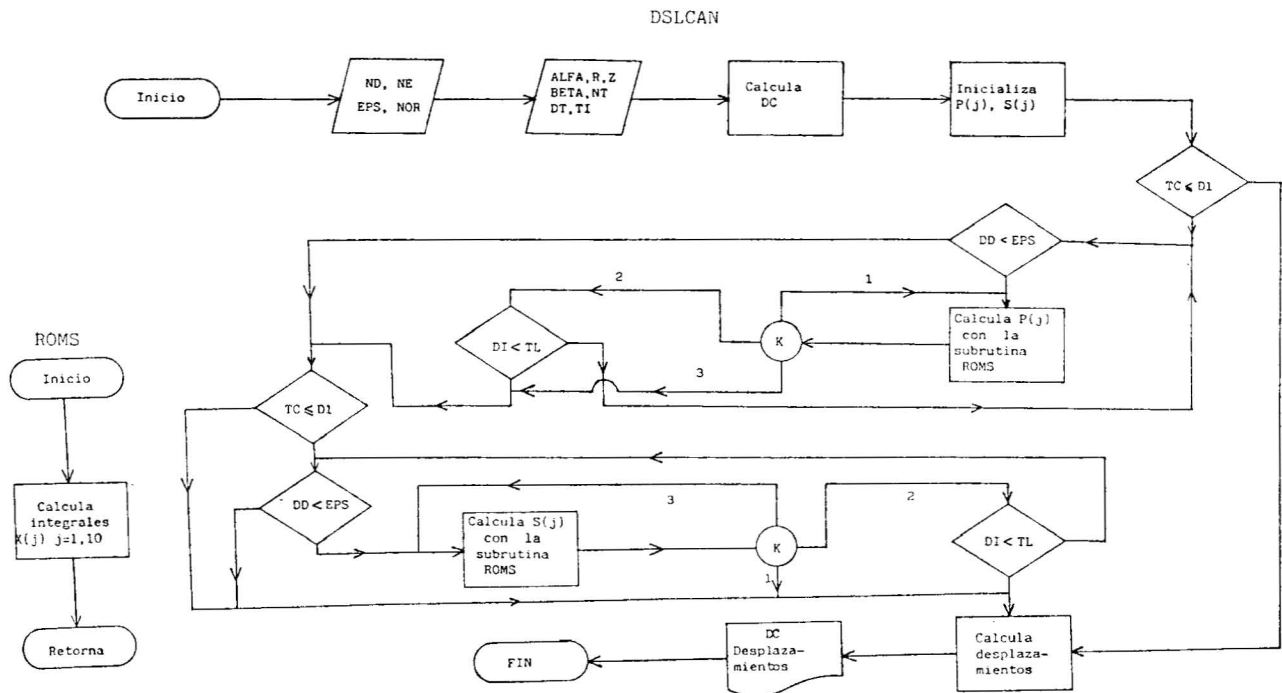


Fig. 2.—Diagrama de flujo del programa DSLCAN y la subrutina ROMS.

cualquier otro miembro, podemos obtener indistintamente los desplazamientos para una fuente con función temporal escalón (delta de Heaviside) o las velocidades para una fuente con función temporal rampa y nuevas combinaciones con DER2.

EXTENS nos permite calcular los desplazamientos que obtendremos para una función temporal de la fuente finita en forma de triángulo o trapecio a base de sumar o restar los desplazamientos obtenidos para fuentes con función temporal rampa obtenidas por DSLCAN y con tiempos de origen en t_0 diferentes como podemos ver en la fig. 3. Si a los desplazamientos obtenidos para una fuente con una función temporal rampa con orient en t_0 le restamos los obtenidos para

otra fuente idéntica a la anterior con origen en t_b obtenemos los desplazamientos para una fuente con una función temporal como la dibujada en la fig. 3b y si iteramos el proceso con sucesivas sumas y restas llegaremos a obtener una fuente con una función temporal en forma de trapecio como en la fig. 3d.

El segundo programa principal SYNCAN toma los desplazamiento obtenidos por DSLCAN, DER1, DER2 o EXTENS y calcula los desplazamientos para un tipo de fuente y un observador orientados independientemente y en cualquier dirección. Por ejemplo, nos permite calcular los desplazamientos obtenidos para una falla orientada en cualquier posición y con cualquier tipo de desplazamiento y registrados por un observador

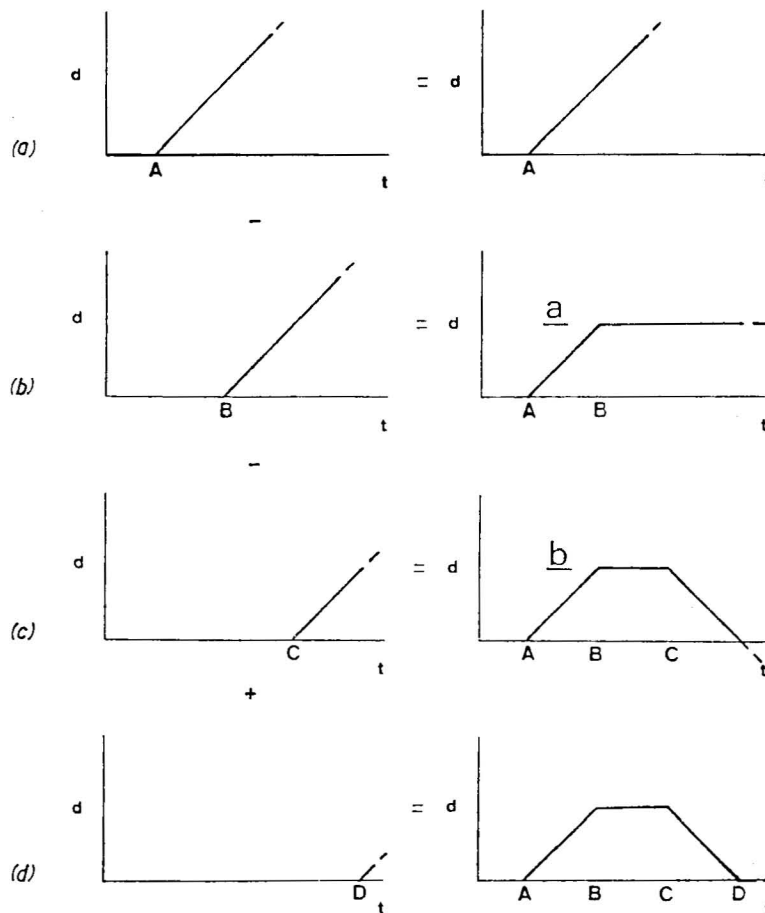


Fig. 3.—Obtención de desplazamientos para fuentes con funciones temporales finitas en base a la suma o resta de los desplazamientos obtenidos para fuentes con funciones temporales rampa infinita situadas en un mismo punto del espacio; pero con distintos orígenes de tiempo t_0 . En la coordenada vertical hemos dibujado desplazamientos y en las abscisas la coordenada temporal. Como ejemplo, si al desplazamiento mostrado en a) le restamos el dibujado en b), obtendremos el desplazamiento a y así sucesivamente para b), c) y d).

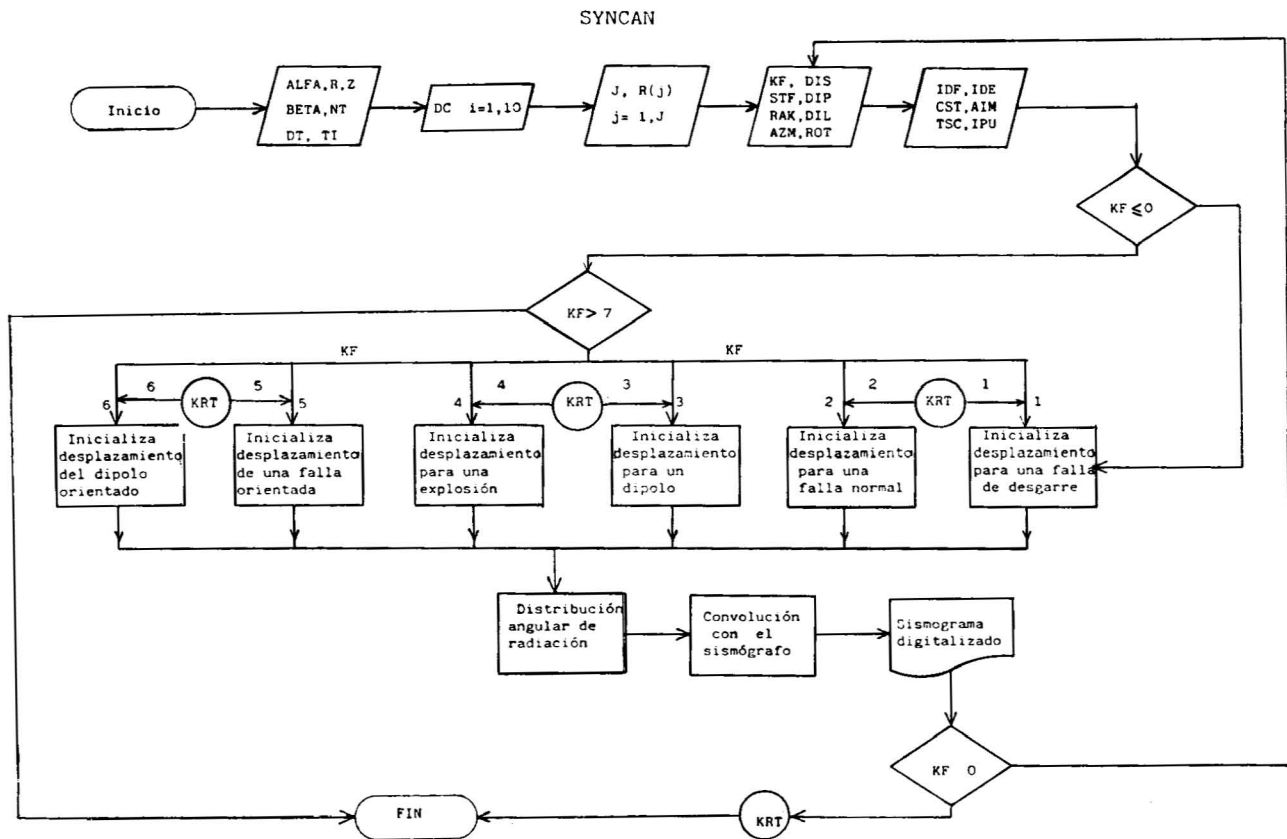


Fig. 4.—Diagrama de flujo del programa SYNCAN.

que, a su vez, se halla en cualquier posición y orientación con respecto a la misma. En la fig. 4 podemos ver el organigrama de dicho programa. También permite la introducción de la respuesta digitalizada de una sísmógrafo y realiza su convolución con los desplazamientos obtenidos.

Otros programas subsidiarios son RESSIS, que calcula la respuesta de un sísmógrafo que introduciremos posteriormente en SYNCAN; FFT, que calcula la transformada de Fourier de la misma y DISIS, un programa de dibujo que actúa como salida gráfica del paquete de programas y nos permite obtener dibujos de cualquiera de los desplazamientos propuestos. En la fig. 5 hemos dibujado un gráfico de las distintas opciones de programación de que disponemos para el cálculo de sismogramas sintéticos.

Ejemplos

Comentaremos en este apartado alguno de los resultados que se obtienen con este paquete de programas.

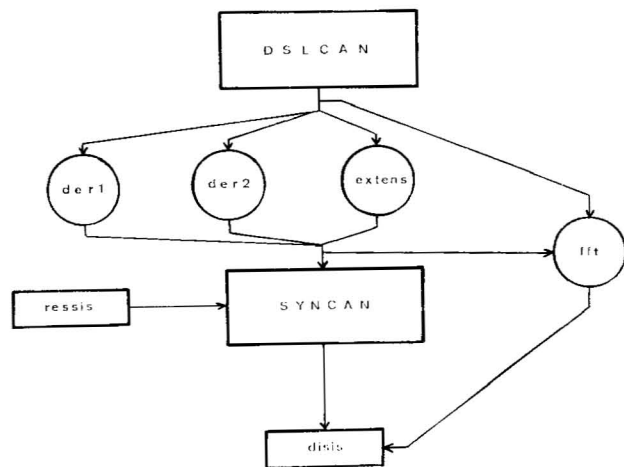


Fig. 5.—Diagrama en el que se muestran las distintas opciones de programación que permite el paquete elaborado para el cálculo de sismogramas sintéticos.

En las fig. 6, 7, 8 y 9 vemos los desplazamientos obtenidos con DSLCAN para cada una de las componentes de las diferentes fuentes canónicas elegidas, para un foco elemental que se halla a 10 km. del observador y 2 km. de profundidad y un medio con velocidades $\alpha=8$ km/s. y $\beta=4.62$ km/s, densidad $\rho=3.3$ g/cm³, un intervalo de digitalización de 0.01 s. y una función temporal de la fuente en forma de función escalón o delta de Heaviside.

Como podemos ver, aparecen las ondas P, PS difractada, S y las superficiales R. Asimismo, aparece algún pico no identificable con las mis-

mas debido a la existencia de los llamados "leaking modes" (Chapman, 1972).

En los desplazamientos obtenidos para una falla vertical normal (fig. 7) se observa claramente, en la componente vertical la existencia de una componente de periodo largo. En la fig. 8 hemos representado los resultados obtenidos para el tercer tipo de fuente canónica, es decir, un dipolo vertical lineal en donde no hay radiación de tipo transversal debido a su simetría. También, para una explosión esférica simétrica (fig. 9) no hallamos ondas de tipo S como era de esperar. Tanto en la fig. 8 como en la fig. 9 hemos supuesto una

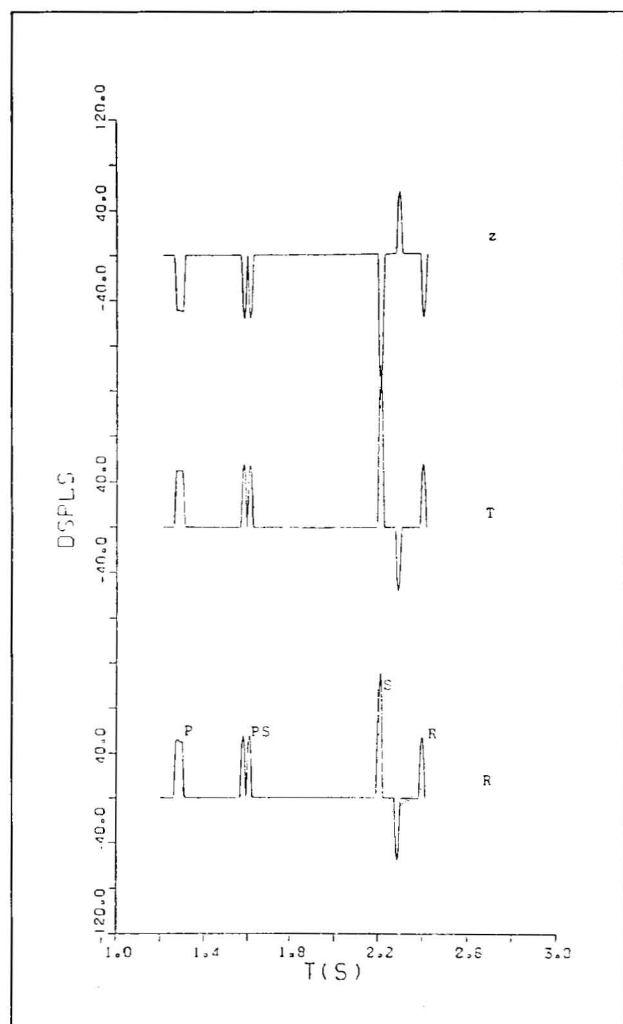


Fig. 6.—Desplazamientos obtenidos para una falla vertical de desgarre (falla de desplazamiento) elemental situada a 2 km. de profundidad y a una distancia epicentral del observador de 10 km. con un intervalo de digitalización de 0.01s y un medio con velocidades $\alpha=8$ km/s y $\beta=4.62$ km/s.

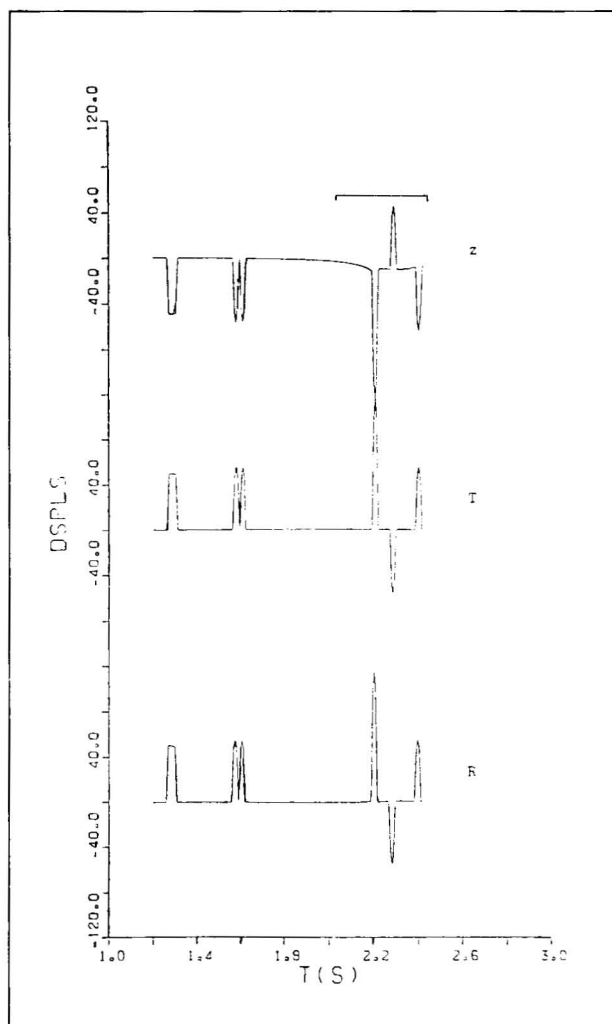


Fig. 7.—Desplazamientos obtenidos para una falla normal vertical con situación y características del medio iguales a las dadas para la fig. 6. Podemos observar la presencia de una componente de periodo largo en la componente z del desplazamiento marcada con un corchete.

dislocación en la fuente 10 veces mayor que para los casos anteriores y, como vemos, obtenemos exactamente el mismo resultado; pero con unos desplazamientos máximos 10 veces mayores.

En la fig. 10 observamos los desplazamientos obtenidos para una fuente con las mismas características que en los casos anteriores; pero con una función temporal de la fuente finita, en forma de trapecio y con una duración de 0.06 s. y para el caso concreto de una falla vertical de desgarre. En la fig. 11 obtenemos el sismograma sintético generado por estos desplazamientos registrados por un sismógrafo de la red standard

(WWSSN) con un pico de amplificación de 700 y que se halla en un punto que forma un ángulo de 45° con el eje de la falla medido desde el epicentro. En este caso no aparece la componente transversal del desplazamiento debido a la distribución angular de la radiación en la fuente.

En la fig. 12 vemos los desplazamientos producidos por un terremoto de carácter regional cuyo hipocentro se halla a una distancia de 150 km.—del observador y a una profundidad de 5 km.— en medio con las siguientes características: $\alpha=6$ km/s, $\beta=3.5$ km/s, $\rho=3.3$ g/cm³, con un intervalo de digitalización de 0.1s y para el caso de una fa-

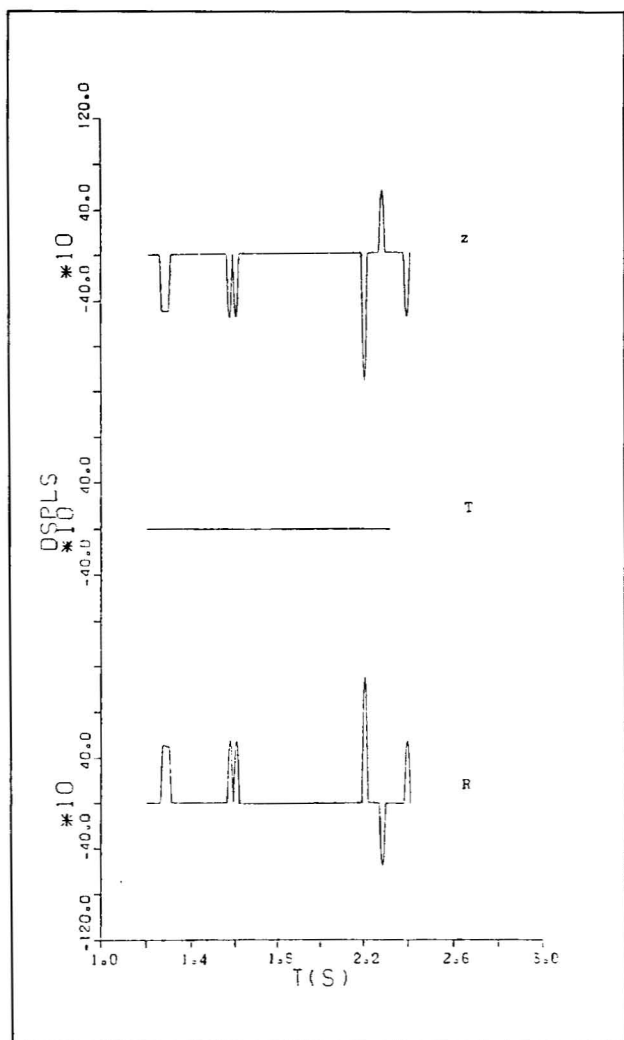


Fig. 8.—Desplazamientos obtenidos para un dipolo lineal vertical compensado con situación y características del medio iguales a las dadas para la fig. 6; pero con una dislocación en la fuente 10 veces mayor.

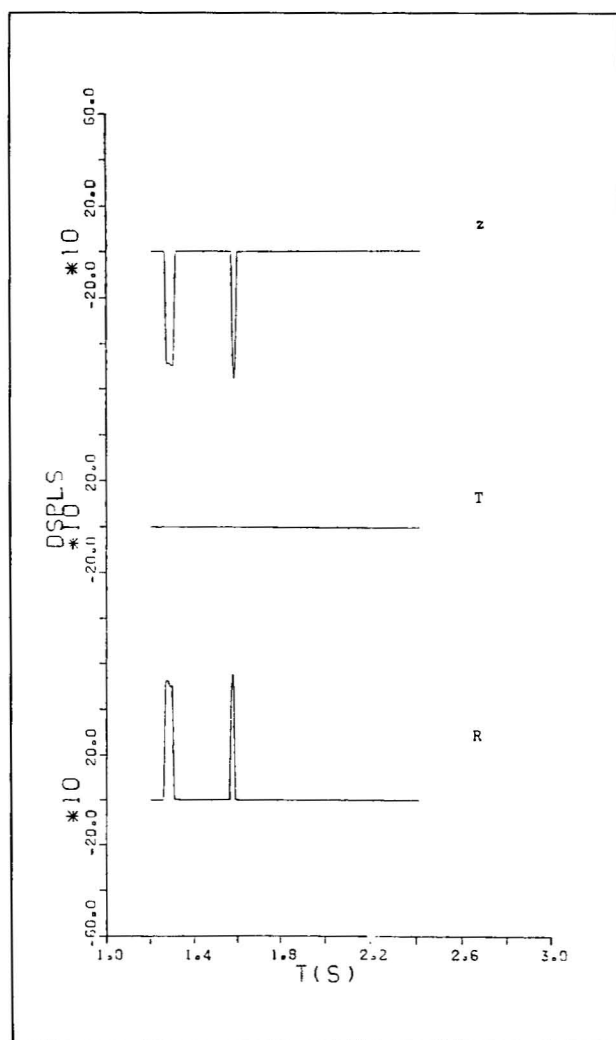


Fig. 9.—Desplazamientos obtenidos para una explosión con simetría esférica con situación y características del medio iguales a las dadas para la fig. 6; pero con una dislocación en la fuente 10 veces mayor.

lla normal vertical con una función temporal escalón. En la fig. 13 nos encontramos con el mismo caso que representamos en la fig. 12; pero para una fuente con función temporal finita en forma de trapecio y con una duración de 0.6s y en la fig. 14 hemos dibujado los desplazamientos registrados por un sísmógrafo de la WWSSN con un pico de amplificación de 1.500 para el caso de la fig. 13.

Conclusiones

Resumiendo, hemos construido un paquete de programas a partir de la solución matemática exacta del problema de Lamb mediante el uso de las funciones de Green. La principal ventaja que obtenemos con el uso de esta solución, matemáticamente más complicada que otras soluciones aproximadas existentes, es que el resultado obte-

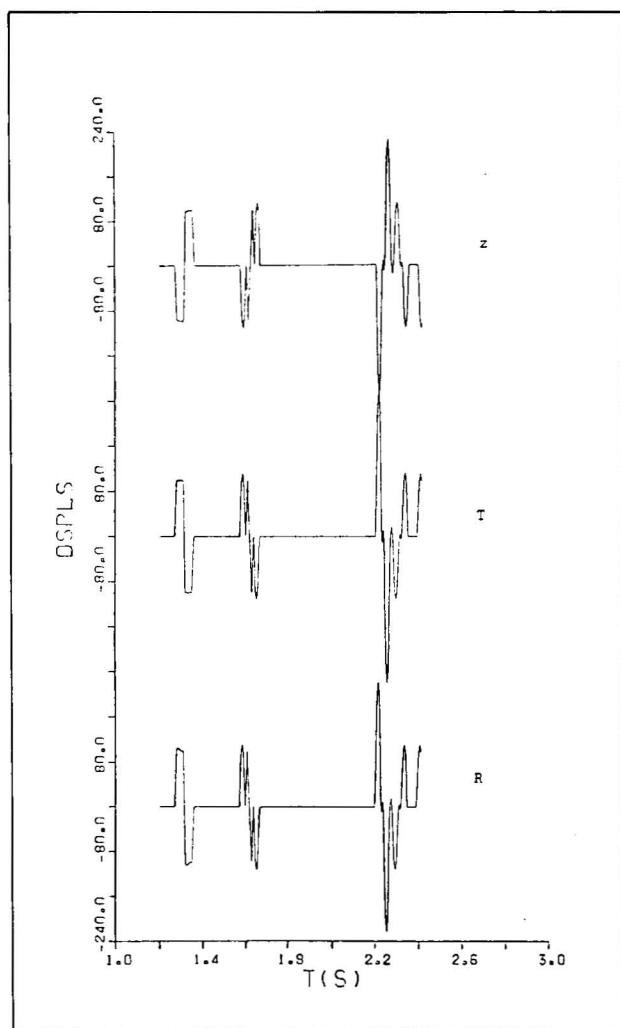


Fig. 10.—Desplazamientos obtenidos para el caso de una fuente consistente en una falla vertical de desgarre con una función temporal finita en forma de trapecio regular con una duración de 0.06s. La distancia y profundidad a la que se halla la fuente y las características del medio son las mismas que para la fig. 6. El intervalo de digitalización es de 0.01s.

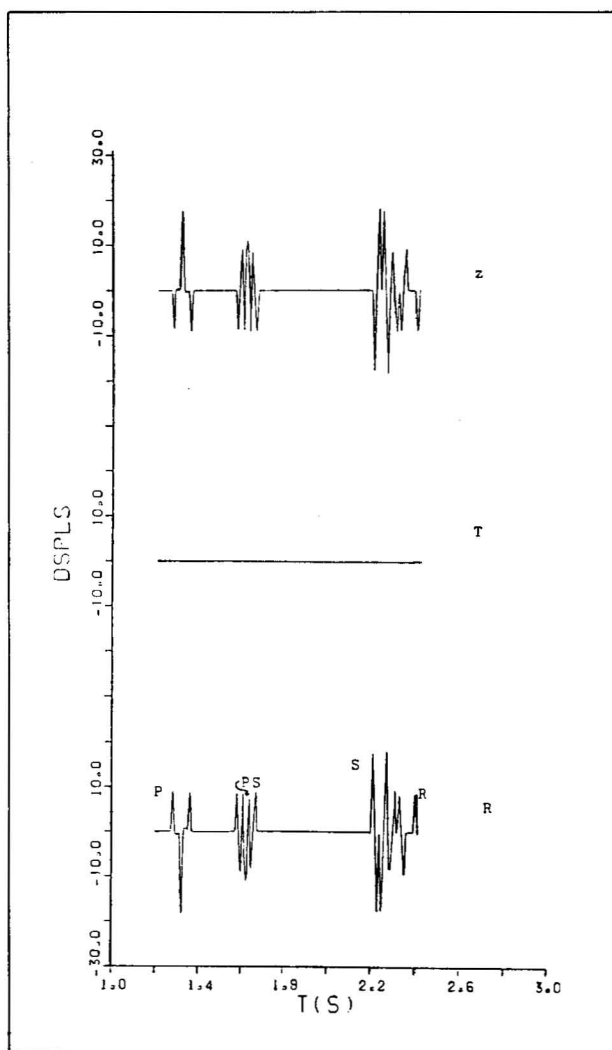


Fig. 11.—Sismograma sintético obtenido al convolucionar los desplazamientos de la fig. 10 con la respuesta de un sísmógrafo de la WWSSN con un pico de amplificación de 700. El observador se halla en una posición que forma un ángulo de 45° con respecto al eje de la falla.

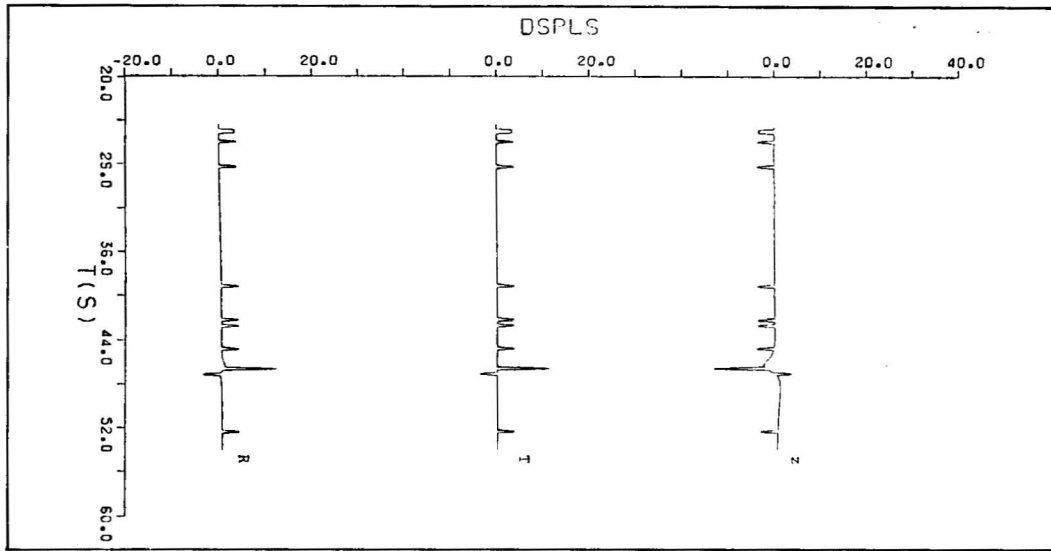


Fig. 12.

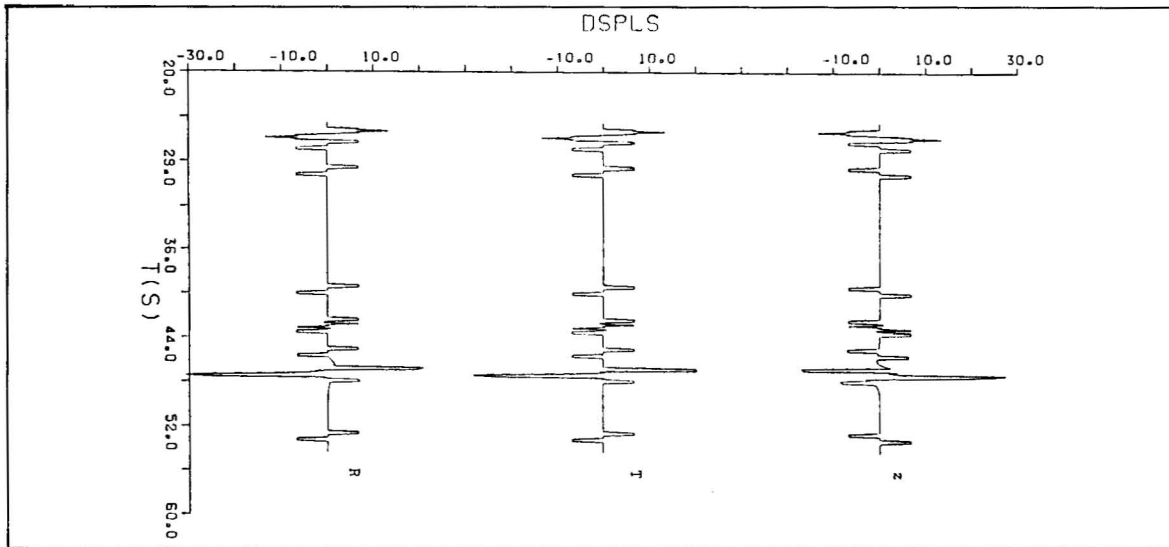


Fig. 13.

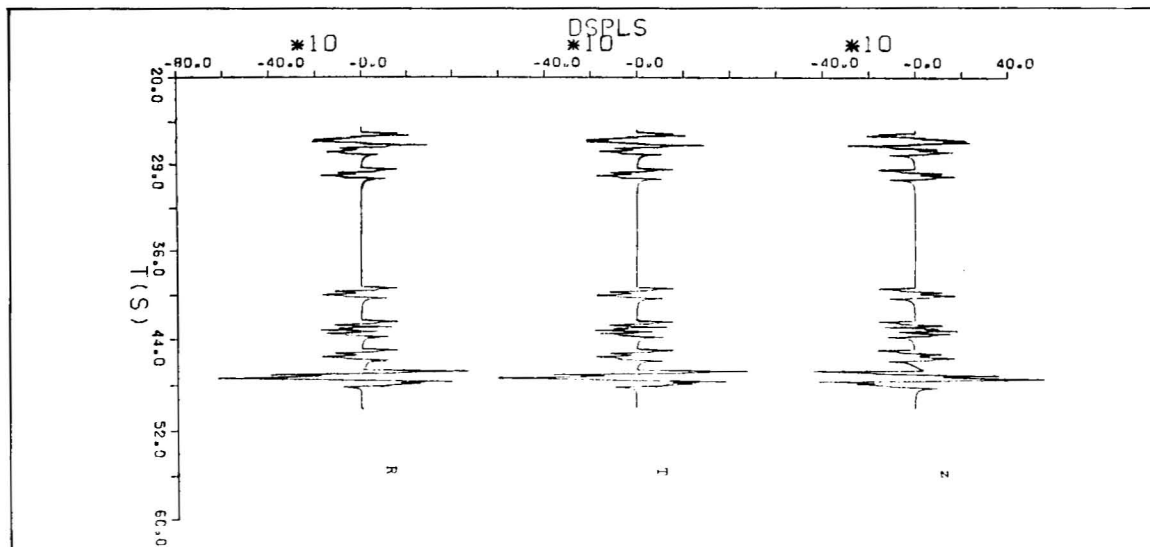


Fig. 14.

nido contiene absolutamente toda la información que se puede extraer del modelo inicial como es la presencia de todas las llegadas registrables, incluyendo los "leaking modes". Asimismo, esta solución debe contener toda la información en frecuencias debida al modelo de fuente sísmica utilizada, sin perdida alguna de resolución.

La principal aplicación de este formulismo reside en el tratamiento de seismos producidos a muy poca distancia del observador (a muy pocas decenas de kilómetros), en donde podemos suponer de mucha mayor cuantía los efectos debidos al mecanismo focal del terremoto que los debidos a la inhomogeneidad y anisotropía del medio en que se propaga.

Referencias

- Aki, K. and Richards, P.G. (1980). *Quantitative Seismology*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Batló, J. (1985). *Generació d'ones sísmiques en un medi semiinfinit*. Memoria presentada para optar al grado de Licenciatura, Facultat de Física, Universitat de Barcelona.
- Burridge, R. and Knopoff, L. (1964). Body force equivalents for seismic dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1875-1888.
- Burridge, R. (1976). *Some mathematical topics in Seismology*, Courant Institute of mathematical sciences, New York University.
- Carnahan, B., Luther, H.A. y Wilkes, J.O. (1979). *Cálculo Numérico*, Editorial Rueda, Madrid.
- Chapman, C.H. (1972). Lamb's Problem and comments on the Paper "On Leaking Modes" by Usha Gupta. *Pure Appl. Geophys.*, 94, 233-247.
- Goursat, E. and Bergmann, H.G. (1964). *A course of mathematical analysis* (vol III-part one), Dover publications, New York.
- Herrmann, R.B. (1978). *Computer programs in earthquake seismology*. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Saint Louis University.
- Herrman, R.B. and Wang, C.Y. (1985). A comparison of synthetic seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 41-56.
- Hoop, A.T. de (1960). A modification of Cagniard's method for solving seismic pulse problems. *Appli. sci. Res. Section B*, 8, 349-356.
- Johnson, L.R. (1974). Green's function for Lamb's problem, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 37, 99-131.
- Pilant, W.L. (1979). *Elastic waves in the Earth*, Developments in solid earth geophysics 11, Elsevier, Amsterdam.
- Rey-Pastor, J. (1955). *Los problemas lineales de la física*. Instituto nacional de técnica aeronáutica Esteban Terrades, Madrid.

Recibido el 14 de Julio de 1986
Aceptado el 10 de Abril de 1987

Fig. 12.—Desplazamientos obtenidos para un terremoto producido por el movimiento de una falla normal vertical y cuyo epicentro se halla a 15 km. del observador y a una profundidad de 5 km. Las características del medio son $\alpha=6$ km./s, $\beta=3.5$ km/s y $\rho=3.3$ gr/cm³. El intervalo de digitalización es de 0.1s y la función temporal de la fuente es del tipo delta de Heaviside.

Fig. 13.—El mismo caso que en la fig. 12; pero con una función temporal de la fuente finita del tipo trapecio regular con una duración de 0.6s.

Fig. 14.—Sismograma sintético obtenido por un sismógrafo de la WWSSN con un pico de amplificación de 1.500 que registra los desplazamientos representados en la fig. 13.