

METODO INTERACTIVO PARA LA EXTRAPOLACION DE ONDAS SISMICAS. APLICACION A LA PROSPECCION GEOFISICA (PARTE I).

J. Gazdag *

P. Halpern *

E. Alarcón \$

* IBM Scientific Center. Palo Alto. California.

\$ E.T.S.I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.

1. INTRODUCCION

En los análisis sísmicos por reflexión existe una creciente demanda de estimaciones geológicas y geométricas más precisas y sofisticadas. En último término se pretende extraer estimaciones fiables de las secciones de reflexión, estimaciones que afectan a parámetros tales como la velocidad de propagación, densidad y, por supuesto, contenido de hidrocarburos.

Ello exige gran precisión en las técnicas de procesado y representación gráfica, pudiendo decirse que los métodos gráficos interactivos son clave en las tendencias futuras de prospección.

Un área de investigación actual es el procesado y representación de datos representados por "horizontes".

Un horizonte sísmico se define como la superficie que separa dos capas diferentes de roca. Estas interfases están asociadas a reflexiones que se pueden identificar claramente en las secciones sísmicas.

Usando una pantalla gráfica adecuada estos horizontes aparecen coloreados en la sección, pudiendo tomarse puntos selectos para definirlas. Si se utilizan

secciones concentradas ("stacked") es preciso determinar la posición correcta de las interfases. Es el proceso llamado "emigración". Tradicionalmente se han aplicado fórmulas de representación o transformaciones integrales para realizar este proceso. Sin embargo es suficiente hacer emigrar las curvas seleccionadas (superficies en el caso 3-D) que representan menos del 1% del total de los datos, con lo que el tiempo de CPU se reduce considerablemente. Si se desprecia la información sobre amplitudes, fases y frecuencias la teoría de rayos es el método más rápido y simple para la conversión en profundidad, poniéndose todo el énfasis en el proceso interactivo y en la representación gráfica.

Puesto que en estructuras complejas, como las del Mar del Norte o las del Norte de Alemania, las funciones de velocidad nunca se conocen con precisión, es preciso repetir la emigración mediante diferentes velocidades especificadas por el usuario en forma interactiva.

En lo que sigue se presenta la aplicación del procedimiento para horizontes de separación nula (zero-offset sections) y al final se indica la posibilidad de extensión del estudio a casos con separación constante y al análisis de velocidad.

2. Conceptos elementales en prospección sísmica por reflexión

El esquema de la figura 1 corresponde a una situación típica de prospección en el mar. En un foco de ondas S se produce una explosión que, tras reflejarse en el fondo es recogida en una cadena de geófonos espaciados regularmente. Es el caso de velocidad constante y reflector horizontal.

Se llama longitud total a $(n-1)d$ y cobertura al espacio

$$AB = \frac{n-1}{2} d$$

máximo que puede recorrerse hasta la siguiente detonación si se pretende obtener

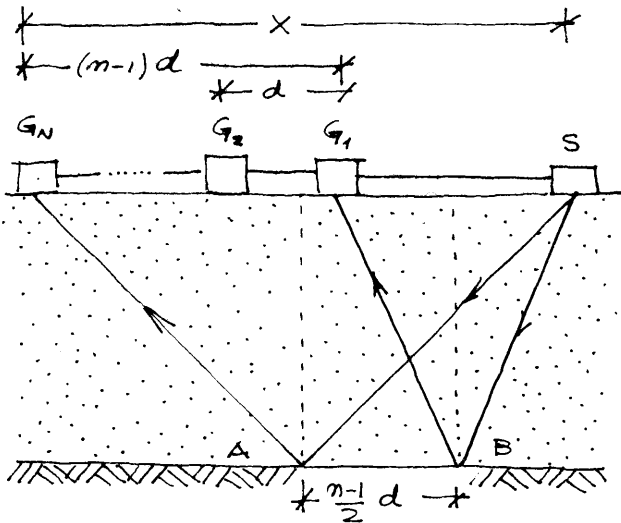


Fig. 2.1

un registro continuo del reflector.

La distancia x suele ser del orden de la profundidad del reflector, esto es, 1 a 3 km, mientras que, por razones de resolución d se escoge inferior a 100 metros.

Si se producen detonaciones en intervalos inferiores a la cobertura, se obtienen informaciones repetidas sobre puntos comunes, pudiendo agruparse los datos en puntos de profundidad común, tal como se indica en la Fig. 2. donde se han colocado los focos S y geófonos G que cumplen tal circunstancia.

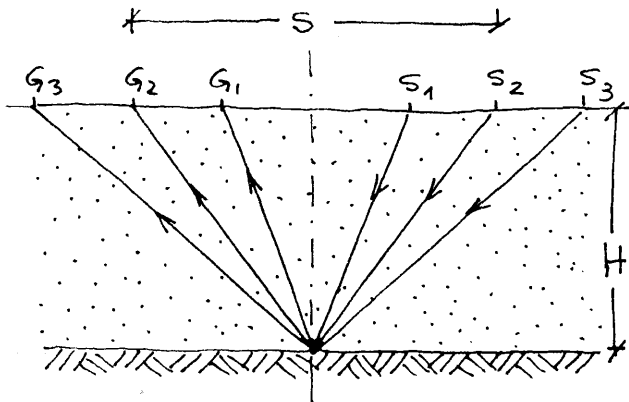


Fig. 2.2

Si V es la velocidad de las ondas en la capa en cuestión, evidentemente el tiempo invertido para un par de separación S es:

$$t = \frac{2L}{V} = \sqrt{\left(\frac{S}{V}\right)^2 + \left(\frac{2H}{V}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{S}{V}\right)^2 + t_0^2} \quad (2.1)$$

donde

$$t_0 = \frac{2H}{V} \quad (2.2)$$

corresponde al tiempo teórico del rayo central (separación nula).

Se llama "desplazamiento normal" (NMO) al incremento de tiempo, sobre t_0 , debido a la separación de foco y receptor, y se obtiene de (1), poniendo:

$$t^2 - t_0^2 = \left(\frac{S}{V}\right)^2 \quad (2.3)$$

$$\Delta t = (t - t_0) = \frac{1}{t + t_0} \left(\frac{S}{V}\right)^2 \quad (2.4)$$

Para valores pequeños de $t - t_0$ se puede escribir:

$$t + t_0 \approx 2t \quad (2.5)$$

con lo que:

$$NMO = \Delta t = \frac{1}{2t} \left(\frac{S}{V}\right)^2 \quad (2.6)$$

Como se ve la ecuación 3 corresponde a una hipérbola (fig. 3a), que se -

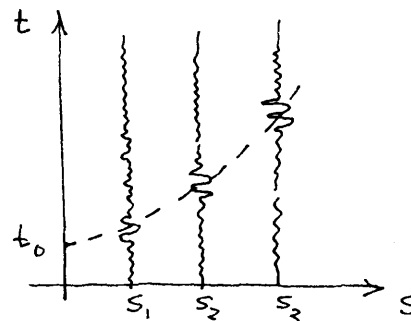


Fig. 2.3a

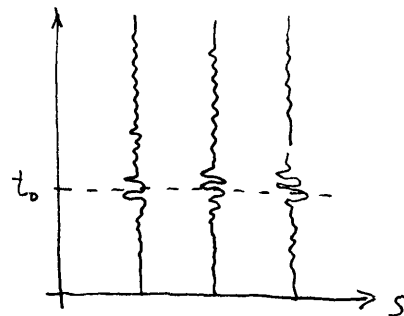
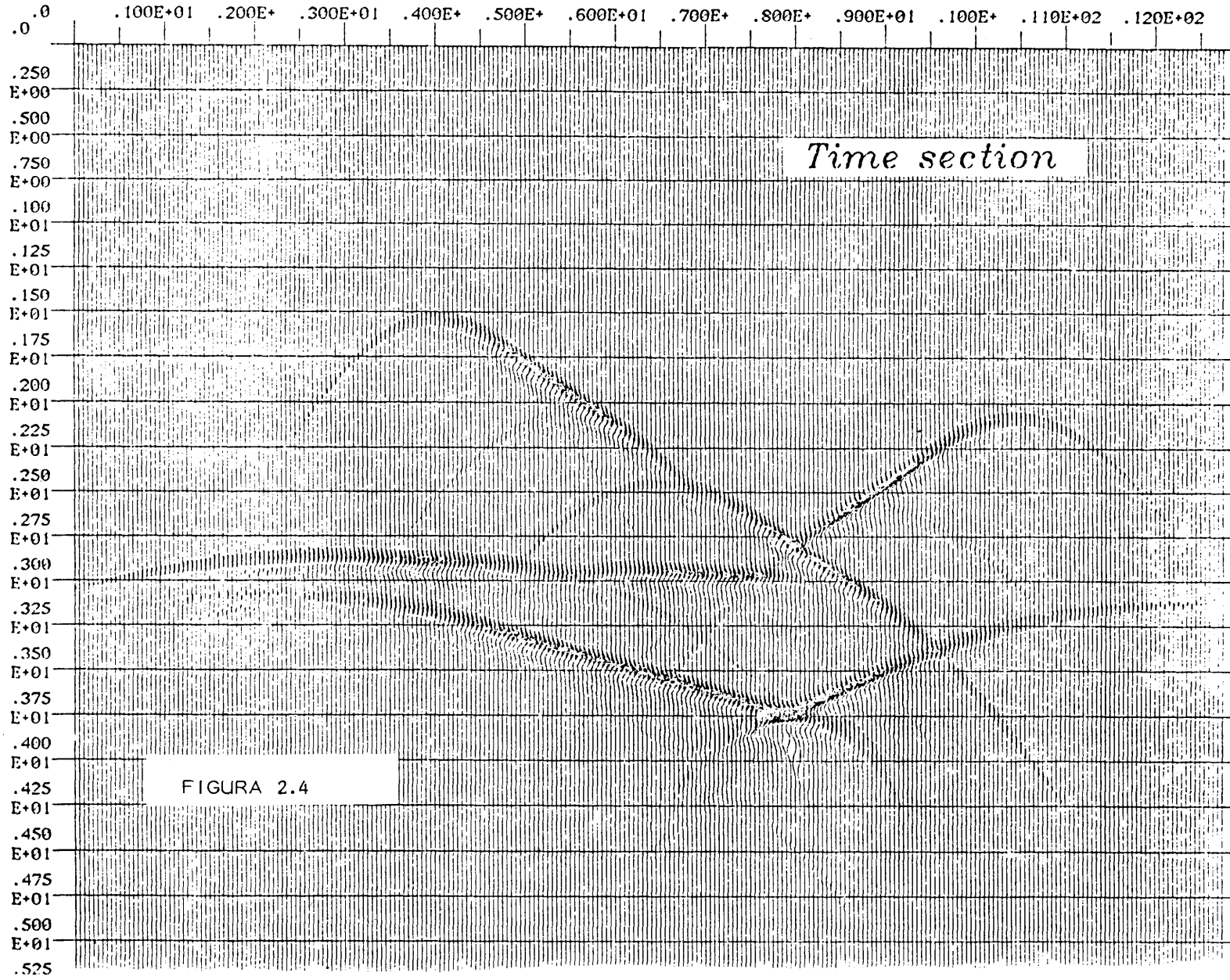


Fig. 2.3b



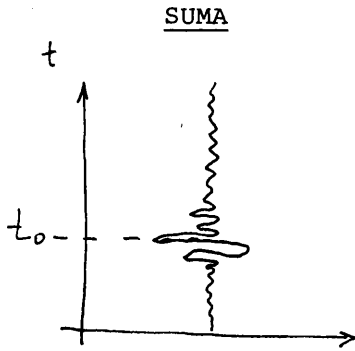


Fig. 2.3.c

puede obtener colocando los registros en vertical a sus correspondientes distancias y uniendo los puntos en los que se registra la reflexión. Si ahora, a cada sección, se le aplica el desplazamiento normal (NMO) correspondiente, todas las perturbaciones deberían estar alineadas (fig. 3b). Una idea inmediata que se ocurre es la suma o "concentración" (stacking) de los registros para reforzar la señal. Con ello esta se intensifica N veces mientras el ruido aleatorio tan sólo aumenta \sqrt{N} veces, obteniéndose de esta forma una mayor resolución.

Si el proceso se repite para diferentes estimaciones de V se supone correcta aquella que provoca un mayor reforzamiento de la señal.

Puesto que se ha hecho el NMO cada registro concentrado se adjudica a la coordenada espacial correspondiente a la posición teórica del punto con separación nula. El conjunto produce una sección concentrada del tipo de la fig. 4., donde el eje horizontal expresa distancias x a una cierta referencia y el vertical tiempos de recorrido t .

Este tipo de secciones es el que debe transformarse a un sistema (x, z) donde z es la profundidad incógnita del reflector. A este proceso se le llama "emigración".

3. Emigración de reflectores

Puesto que los datos se obtienen en el contorno del dominio es lógico pensar en la posibilidad de aplicar una fórmula de representación integral. En particular sabemos que para la ecuación de ondas:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \phi \quad (3.1)$$

es posible encontrar una solución del tipo:

$$\phi = \frac{f(t - \frac{r}{c})}{r} \quad (3.2)$$

o potencial retardado, tal que si ϕ y $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ son conocidos en todos los puntos del contorno en cualquier instante, los valores de ϕ pueden calcularse en todos los puntos interiores en cualquier momento, mediante la llamada fórmula de Kirchoff.

$$4\pi \phi_P = \int_{\partial \Omega} G(t - \frac{r}{c}) ds$$

$$G(t) = \left\{ -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} + \phi \frac{\partial^2 r}{\partial n^2} - \frac{1}{cr} \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial r}{\partial n} \right\} \quad (3.3)$$

En nuestro caso el dato es ϕ en la superficie de un semiespacio y $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ no se mide. Para eliminarlo se puede recurrir al método de las imágenes (fig.3.1) con lo que la componente $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ se anula y es posible escribir el valor deseado.

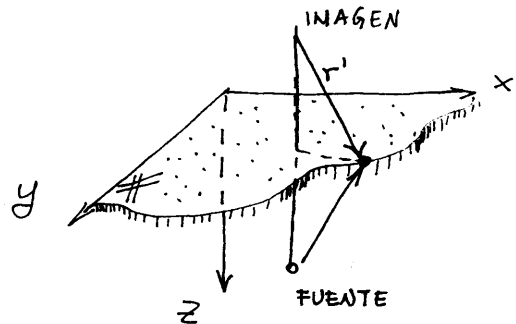


Fig. 3.1

De esta forma se van escribiendo los valores de ϕ a diferentes profundidades que, para $t=0$, sólo pueden ser distintos de cero en los puntos donde se originó la perturbación. Como puede verse el método es simple, pero operativamente muy costoso.

Un avance importante respecto al enfoque anterior lo constituyó la interpretación de las fórmulas anteriores como productos de convolución y el paso al campo de la frecuencia. Mediante una transformación de Fourier se puede escribir:

$$\phi^*(k_x, k_y, z, \omega) = \phi^*(k_x, k_y, z_0, \omega) \cdot H(k_x, k_y, \Delta z, \omega)$$

$$H = e^{\pm i|\Delta z| \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (3.4)$$

que indica el método de extrapolación a emplear: un simple cambio de fase y transformación inversa para obtener los resultados a la nueva profundidad.

El método es muy elegante y está perfectamente asumido en el campo práctico, pero el tiempo de cálculo sigue siendo lo suficientemente importante y los datos de partida están tan influenciados por la interpretación personal que es costosísimo un proceso interactivo.

Además se comprende que el método sólo es utilizable para medios estratificados horizontalmente en los que la velocidad permanezca constante en cada capa. Si existe variación de propiedades en horizontal, es posible todavía un desarrollo en serie, con lo que el precio se multiplica.

Por ello el tratamiento directo de los rayos en un medio gráfico interactivo, como se verá más abajo, es del mayor interés.

4. Dibujo de rayos

Pese a las enormes ventajas de los métodos armónicos frente al de las ecuaciones integrales, el tratamiento de la tremenda cantidad de datos contenidos en una sección de separación nula es enormemente costoso. Puesto que, en realidad, interesa solamente la geometría del reflector, es posible reducir el tiempo de cálculo emigrando punto a punto un número limitado de ellos, juiciosamente escogidos.

Esto puede conseguirse mediante una integración paso a paso de las ecuaciones del rayo, hasta que se agote el tiempo indicado en la sección (x,t).

Como es sabido la ecuación de un rayo puede ponerse en la forma:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{v} \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \text{grad} \frac{1}{v} \quad (4.1)$$

donde \vec{r} es el vector posición y ds el elemento de longitud.

Mediante unas simples transformaciones para hacer aparecer el parámetro "tiempo", la ecuación anterior se transforma en:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{2}{v} \frac{dv}{dt} \frac{d\vec{r}}{dt} - v \text{ grad} v \quad (4.2)$$

o también

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \left(\frac{2}{v} \right) \left(\text{grad} v \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \frac{d\vec{r}}{dt} - v \text{ grad} v \quad (4.3)$$

que, finalmente, para el caso de dos dimensiones es:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} = \frac{2}{v} \left[(v_x, v_z) \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} - v \begin{Bmatrix} v_{,x} \\ v_{,z} \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Evidentemente en el caso $v=\text{cte}$, $\ddot{x}=\ddot{z}=0$ y el rayo es recto.

En un medio general, sin embargo, es preciso recurrir a los valores locales de la velocidad y sus gradientes, y ello implica una integración paso a paso de la ecuación (4.4).

Para que el proceso sea completo - es preciso indicar los valores de arranque de \vec{r} en superficie (esto es, el ángulo de emergencia) así como el proceso de transformación en una interfase.

Puesto que:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} = v \begin{Bmatrix} \text{sen} \theta \\ \text{cos} \theta \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

la ley de Snell ofrece el resultado deseado en las interfaces:

$$\frac{\text{sen} \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen} \theta_2}{v_2} \quad (4.6)$$

es decir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{v_2}{v_1} \text{sen} \theta_1 = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \dot{x}_1 \\ \dot{z}_2 &= \sqrt{v_2^2 - \dot{x}_2^2} \end{aligned} \quad (4.7)$$

El ángulo de emergencia se puede estimar a partir del gradiente de la imagen del reflector. Un caso sencillo se indica en la figura 4.1., que corresponde a la capa de velocidad constante y un flector con buzamiento θ .

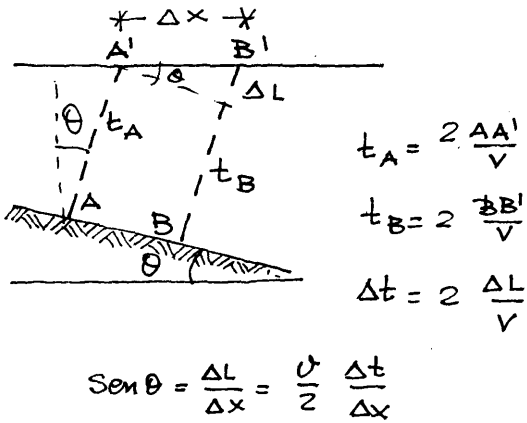


Fig. 4.1

La fórmula

$$\text{sen } \theta_0 = \frac{v}{2} \frac{\partial t}{\partial x} \quad (4.8)$$

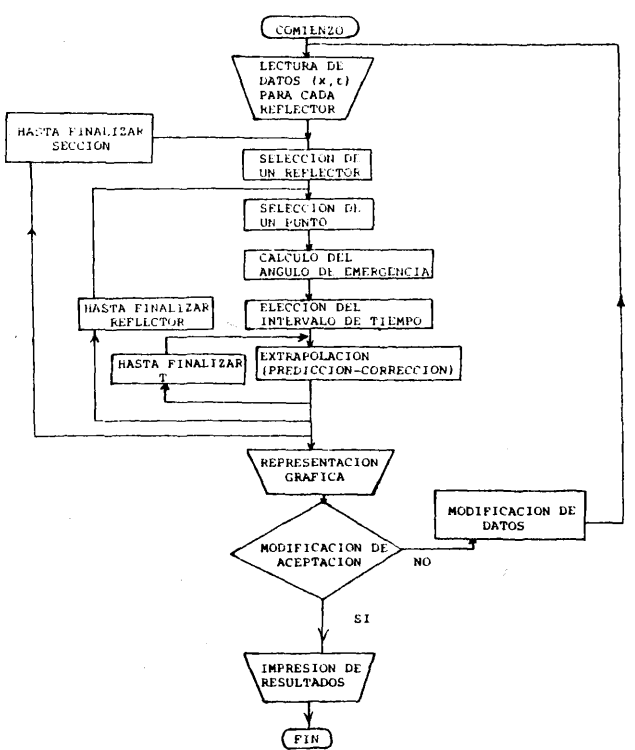
es general y permite iniciar el proceso de integración desde el punto (x,0) hasta el agotamiento del tiempo indicado en la sección.

Dicha integración puede hacerse por cualquier procedimiento clásico. Si, por ejemplo, se utiliza el método de la aceleración media, las estimaciones en cada intervalo se hacen mediante:

$$\begin{aligned} \dot{r}_{\sim t} &= \dot{r}_{\sim t-1} + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{r}_{\sim t-1} + \ddot{r}_{\sim t}) \\ r_{\sim t} &= r_{\sim t-1} + \Delta t \dot{r}_{\sim t-1} + \\ &+ \left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2 (\ddot{r}_{\sim t-1} + \ddot{r}_{\sim t}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

que, en unión de (4.3) permiten resolver el problema.

En la columna siguiente se representa un organigrama simplificado del proceso. Puede escogerse el trabajo simultáneo con todos los reflectores o bien el tratamiento individual de los mismos.



5. Ejemplos

Los problemas más importantes que presenta el método se refieren a la estimación correcta del gradiente de horizonte en el diagrama (x,t), ya que la ley de SNELL mantiene el valor de esta primera estimación a lo largo del recorrido (con las variaciones correspondientes a los valores de v). Un ejemplo muy sencillo es el de la figura 5.1. que corresponde a una fuente puntual cuyo diagrama (x,t) es la hipérbola de la figura 5.1a.

La emigración por el proceso descrito produce el reflector de la figura 5.1b (donde las líneas punteadas representan los rayos). Puede observarse que, pese a haber muestreado la curva en puntos correctos del diagrama (x,t), el método no reproduce el foco puntual y que el error es superior en el primero y último rayo. Ello es debido como decíamos a la estimación de la pendiente que, en este caso, se ha hecho mediante diferencias centradas en los puntos intermedios y mediante diferencias progresiva y regresiva en los puntos inicial y final respectivamente.

No cabe duda, sin embargo, que un operador experimentado, en un proceso interactivo sería capaz de interpretar correctamente la imagen obtenida.

El segundo ejemplo corresponde a la sección (x,t) que se ofrece en la figura 5.2.a.

En una de las imágenes (la intermedia) se han seleccionado 15 puntos mediante el cursor luminoso en un terminal con pantalla gráfica. Como puede observarse en la figura 5.2.b. no se ha tenido un especial cuidado en la exactitud del procedimiento y se han incluido en el muestreo puntos correspondientes a las colas de refracción, cosa que, en un caso práctico no se haría.

La figura 5.2.c. ofrece el resultado de la emigración, donde se observan de nuevo los errores correspondientes a los extremos que, sin embargo, no impiden identificar claramente la solución real.

Un resultado muchísimo mejor se obtendría mejorando la precisión en el muestreo o aplicando cualquier técnica de filtrado. La más elemental usada tradicionalmente en sismología es del tipo $1/2+1/2+1/4$, esto es la suma de los valores ponderados de tres coordenadas sucesivas.

Ello tiene el inconveniente de -- aplicar alisados irrealistas a casos en los que realmente se presenten vértices, por lo que es recomendable una solución directa del problema (y la posterior comparación con el horizonte real), siempre que se acude a una técnica de alisado.

6. Conclusiones y desarrollo futuro

Como se ha visto la emigración de secciones con separación nula es muy sencilla. Una prolongación natural de estas técnicas es a secciones de separación constante. Posteriormente se podrían generalizar los métodos a superficies definidas en el sistema punto medio separación.

Las secciones con separación múltiple conducen a tratamientos teóricos rigurosos donde la emigración y la corrección NMO se realizan simultáneamente.

No existe un método teóricamente correcto para la emigración aislada de secciones con separación no nula. Sin embargo es posible recurrir a métodos heurísticos en los que los errores son considerablemente inferiores a los debidos a las estimaciones de la velocidad. Son en particular interesantes las siguientes alternativas:

- a. Seguimiento del rayo como en los esquemas de separación nula, - aplicando correcciones que ten-

gan en cuenta la diferencia en el tiempo de ida y vuelta. Estas correcciones dependen de la dirección aparente de propagación de la onda, la separación y la velocidad.

- b. Dibujo de rayos de ida y vuelta, estimando los ángulos de emergencia según el gradiente del horizonte, la separación y la velocidad.

La estimación de la velocidad en áreas estructuralmente complejas es, según se vió, de importancia crucial. En dichas zonas, los métodos convencionales de estimación producen a menudo resultados absurdos puesto que parten de la hipótesis de terreno horizontalmente estratificado.

Por ello, el desarrollo de técnicas precisas para la determinación de velocidades es uno de los temas más atractivos de la investigación actual. El método más prometedor para obtener estimaciones adecuadas de la velocidad consiste en derivar esta información de las relaciones entre varias secciones de separación no nula. La emigración simultánea de secciones de separación múltiple es una atractiva posibilidad.

Los errores en la emigración debidos a estimaciones incorrectas de la velocidad también dependen de la variable "separación", por lo que las energías asociadas con separaciones grandes o pequeñas se proyectan a profundidades distintas cuando la velocidad no es correcta. Una forma de conseguir buenas estimaciones puede ser el establecimiento de etapas sucesivas de emigración y corrección de velocidad, lo que, con el método de rayos, puede hacerse a un coste muy asequible por las razones expuestas en los artículos previos.

Naturalmente un requisito básico para estas técnicas es el establecimiento de una filosofía tipo "workstation" dotada de unos dispositivos interactivos gráficos de alta resolución.

REFERENCIAS

1. J.F. CLAERBOUT: "Fundamentals of geophysical data processing". 1976. McGraw-Hill.
2. J. GAZDAG: "Wave Equation Migration with the phase shift method". 1978. Geophysics. V. 43.
3. J. GAZDAG & P. SGUAZZERO: "An interpretation of multiple offset migration in the frequency domain". IBM. International Report. 1982. Rome - Scientific Center.

4. A. DUBRULLE: "Frequency-Domain Migration of zero-offset sections and related time domain considerations". Internal Report. IMB. Palo Alto Scientific Center. 1982.
5. E. ALARCON: "Seismic Migration by the ray Tracing Method". Internal Report. IBM. Palo Alto Scientific Center. 1982.
6. E. BERKHOUT: "Migration of Seismic Sections". Elsevier. 1982.

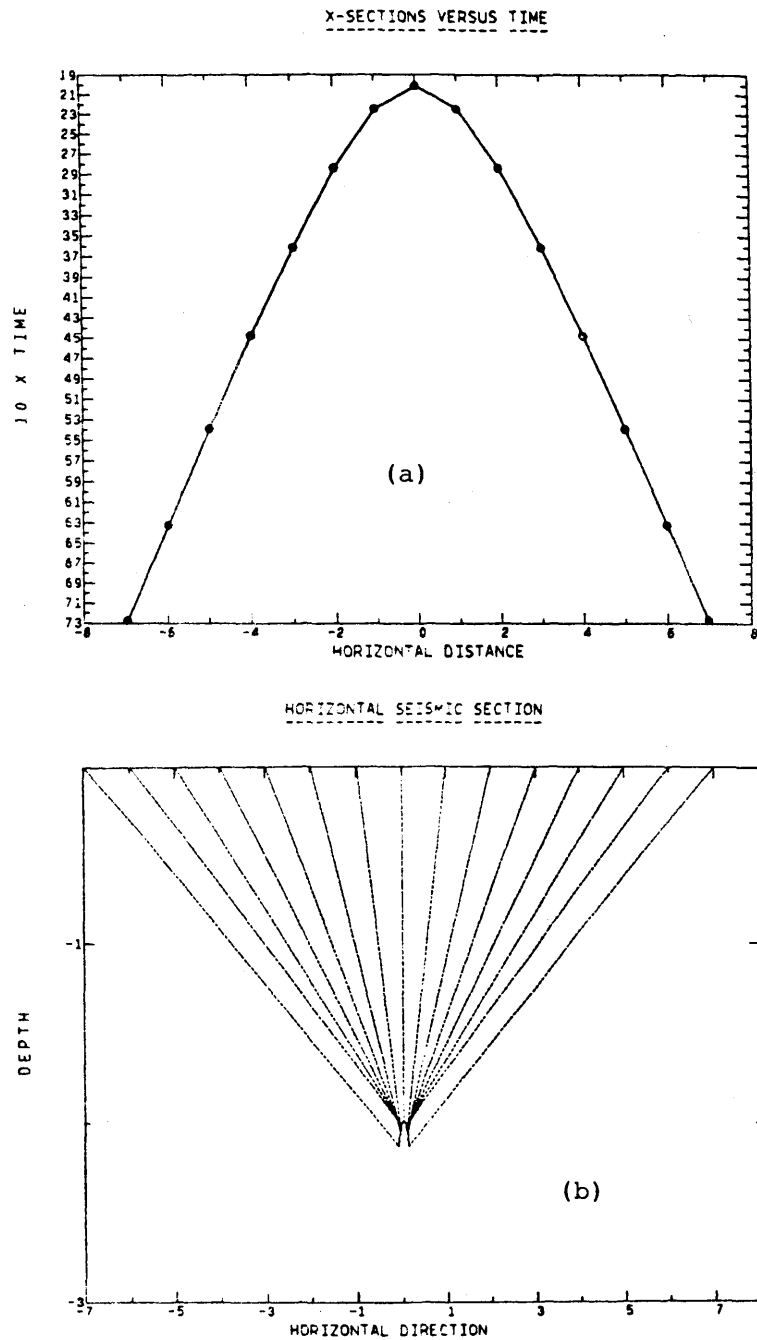
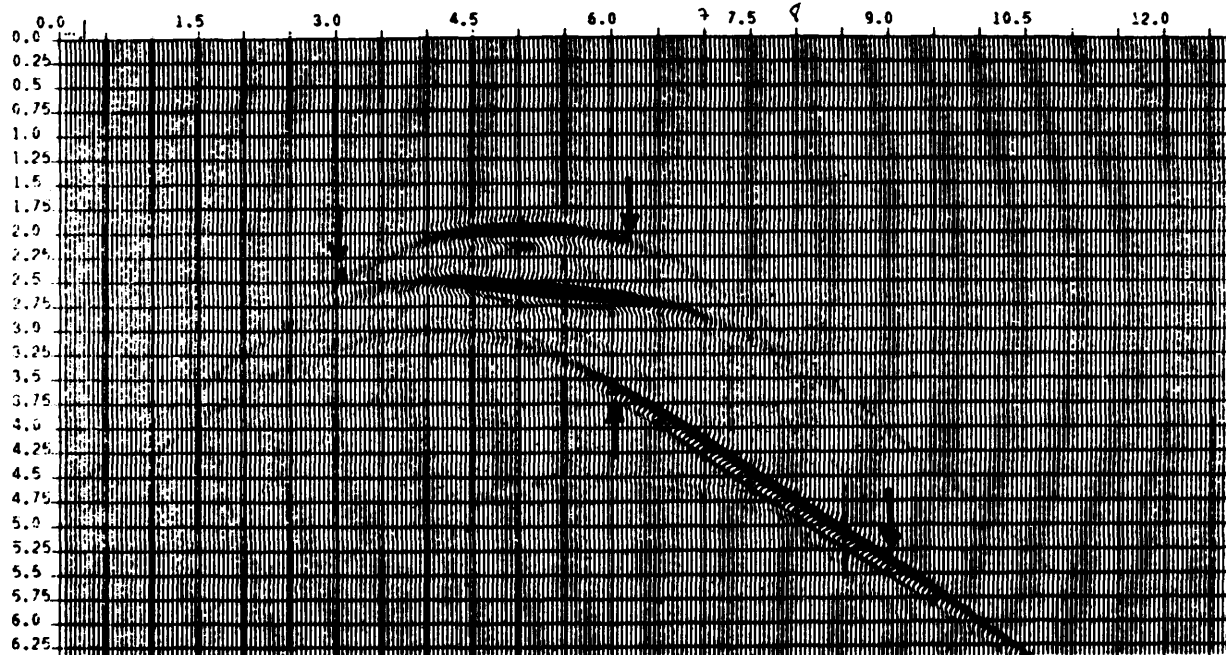


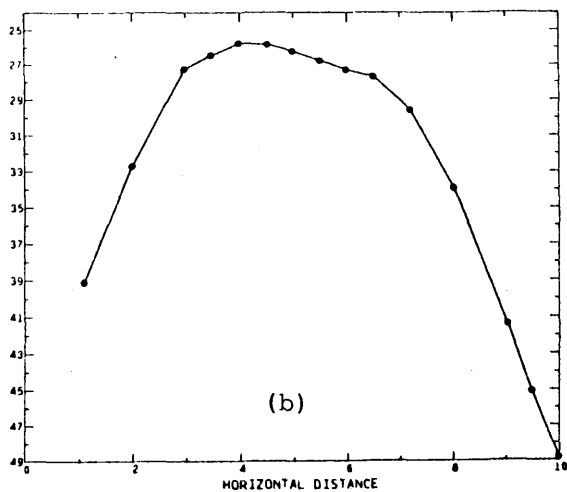
Fig. 5.1

EXTRAPOLACION DE ONDAS SISMICAS



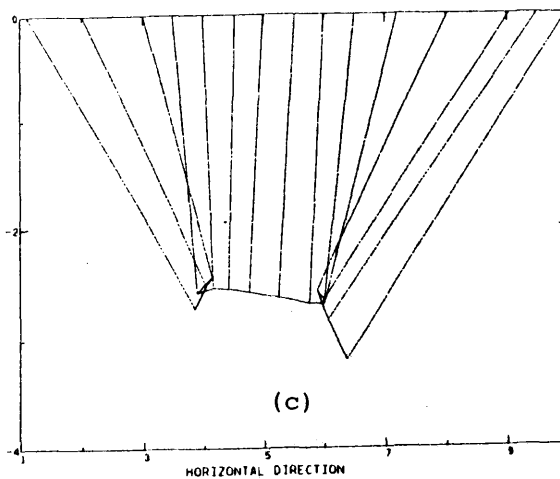
(a)

X-SECTIONS VERSUS TIME



(b)

HORIZONTAL SEISMIC SECTION



(c)

Fig. 5.2