

Un filtro selectivo de velocidad variable para exploración sísmica de reflexión

N. F. Hernández-Reyes y R. Fernández

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Depto. de Geofísica Aplicada

Recibido: 29 de noviembre, 1990, aceptado: 28 de enero de 1991.

RESUMEN

El filtrado de velocidad de secciones sísmicas tiene como objeto eliminar la presencia de ruidos que enmascaran los arribos asociados a horizontes reflectores de interés. Se plantea una técnica de filtrado de velocidad que consiste en aplicar un filtro Butterworth en el dominio de la frecuencia, con un ancho de banda de rechazo constante, el cual es trasladado a lo largo de una pendiente previamente determinada en el plano f-k. Los filtros tradicionales en forma de abanico utilizan filtros rectangulares con banda de rechazo variable. El filtro de velocidad aquí desarrollado puede ser bastante selectivo, dependiendo del ancho de la banda de rechazo, y su implementación es sencilla en paquetes de procesado que operan en el dominio f-k simulando trazas. Demostramos la utilidad del filtro selectivo de velocidad variable mediante un ejemplo con datos sintéticos y de campo.

PALABRAS CLAVE: filtros de velocidad, procesado sísmico, sísmica de reflexión.

ABSTRACT

Velocity filters are applied to seismic sections in order to eliminate noise having a tendency to mask arrivals associated to reflecting horizons of interest. We present a technique of velocity filtering based on a simple idea. We designed a Butterworth filter operating on frequency, with a constant rejecting bandwidth, which is translated along a predetermined slope in the f-k plane (frequency-wave number domain). Fan filters use rectangular filters with variable rejecting bandwidth. Our velocity filter can be very selective depending on the rejecting bandwidth used and can be easily implemented in seismic processing packages which work in the f-k domain simulating seismic traces. The usefulness of this variable velocity filter is demonstrated with examples from a synthetic model and real data.

KEY WORDS: velocity filters, seismic processing, reflection seismics.

INTRODUCCION

En una sección sísmica, los efectos de la onda sonora (proveniente de la fuente sísmica) aunados al de las ondas superficiales, se presentan superpuestos a las reflexiones cuyos tiempos de arribo son comparables a éstas. Estos ruidos se caracterizan por su mayor amplitud (de 2 a 10 veces la amplitud de las reflexiones) y en general por su bajo contenido de frecuencias. Se han diseñado para su eliminación varios algoritmos numéricos y/o técnicas de campo. Por ejemplo, para el filtrado o eliminación de las ondas superficiales en el campo (Smith, 1956), es común utilizar un grupo o arreglo de n detectores (geófonos) distribuidos a lo largo de un perfil tal que la longitud del arreglo corresponda a un múltiplo de la longitud de onda predominante en las ondas superficiales. La suma de las respuestas de los geófonos en el arreglo tiende a cancelar la onda superficial en un amplio rango de longitudes de onda, mientras que la señal deseada se incrementa linealmente. Queda claro que, para longitudes de ondas mayores que la utilizada al diseñar la disposición del arreglo de geófonos, la efectividad del filtrado se reduce considerablemente.

En ocasiones, además de utilizar las técnicas de campo, es necesario procesar numéricamente los datos. A este proceso se le conoce como "filtrado de velocidad". El proceso consiste en diseñar filtros digitales óptimos para discrimi-

nar el ruido de la señal con base en sus velocidades aparentes, sea en el plano tiempo-distancia en forma de convolución o en el dominio de Fourier mediante una multiplicación en el plano de la frecuencia-número de onda (f-k). Los métodos más conocidos son el filtrado en Abanico (Fail and Grau, 1963), "Pie-Slice" (Embre *et al.*, 1963) y filtro "f-k" (Wiggins, 1966), entre otros (Yilmaz, 1987).

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño de una técnica numérica para resolver el problema del ruido producido por la onda de aire y las ondas superficiales, utilizando un filtro f-k, es decir, actuando en el dominio de la frecuencia (f) y el número de onda (k). El diseño del filtro surge como una variante de la forma propuesta por Sako e Hirano (1984). Estos autores diseñaron un filtro bidimensional con el objeto de rechazar una velocidad en particular en el plano f-k. Utilizan para ello un filtro unidimensional actuando a lo largo del eje f y otro a lo largo del eje k, ambos con ancho de banda de rechazo angosta. Combinan las funciones de transferencia de ambos para así crear un filtro bidimensional, mediante un operador de rotación en el plano f-k. Para rechazar una velocidad en particular (una trayectoria recta en el plano f-k), el ángulo de rotación corresponde a la pendiente de dicha recta, la cual es previamente escogida por el interpretador. Una simplificación al

método de Sako e Hirano (1984) consiste en aplicar un filtro unidimensional con ancho de banda de rechazo constante a lo largo del eje f y trasladarlo en la trayectoria recta correspondiente a la velocidad que deseamos rechazar. En esta forma evitamos el tener que rotar los coeficientes de un filtro bidimensional que, para el caso de sismica de reflexión, implica utilizar matrices de dimensiones prohibitivas. Esta simplificación del método de Sako e Hirano (1984) es la base del diseño del filtro de velocidad variable que presentamos en este trabajo. Demostramos la eficiencia del método propuesto mediante un ejemplo con datos sintéticos y una aplicación a datos de campo.

DESCRIPCION DEL METODO

Sabemos que eventos como son las ondas de aire y ondas superficiales, que en el plano $t-x$ describen trayectorias rectas (velocidad constante), se mapean en el plano $f-k$ con la misma pendiente, pero pasando por el origen ($f = 0, k = 0$). Eventos con pendientes diferentes que en el dominio $t-x$ aparecen mezclados, se presentan separados en el plano $f-k$, lo cual permite identificarlos y eliminarlos. Las señales de interés (reflexiones) que describen trayectorias hiperbólicas en $t-x$ tienen números de onda relativamente bajos y se mapean en regiones muy cercanas al eje de las frecuencias.

Al emplear la transformada rápida de Fourier en el tiempo y posteriormente en el espacio (distancia) podemos incurrir en problemas de "aliasing" o desdoblamiento. En el dominio del tiempo, las frecuencias desdobladas son fáciles de eliminar, puesto que en el campo se pueden emplear filtros electrónicos con dicho propósito. El problema estriba en los datos espaciales. Es por ello que hoy en día, en levantamientos sísmicos, se utilizan espaciamientos cada vez más pequeños entre los receptores. Un excelente análisis del efecto de "aliasing" en el plano $f-k$ se presenta en Yilmaz (1987).

El método de filtrado que presentamos a continuación tiene limitaciones por causa del "aliasing" espacial, como cualquiera de los demás métodos basados en filtrado de velocidad.

El diagrama de bloques en la figura 1 muestra el principio de aplicación de filtrado de velocidad. Los datos a filtrar pueden ser de tres tipos: datos "crudos", los provenientes de un arreglo en punto medio común (PMC), o bien, datos apilados.

Tomando cualquiera de estos tipos de datos, se procede a realizar la transformación de Fourier en dos dimensiones para definir en el plano " $f-k$ " la región de rechazo. En este plano se diseña un filtro que ayude a eliminar la presencia de componentes espectrales no deseadas y finalmente, aplicando la transformada inversa de Fourier en dos dimensiones, se obtienen los datos filtrados sin la presencia de las ondas superficiales ni la onda de aire.

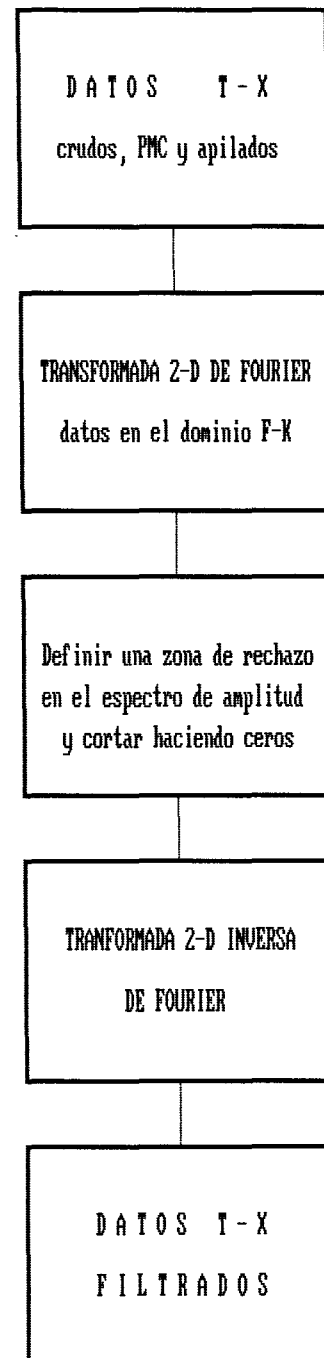


Fig. 1. Diagrama de bloques que muestra el principio de aplicación del filtrado de velocidades $f-k$.

El procedimiento que planteamos se ilustra en la figura 2 y se realiza en dos etapas: (a) primero se diseña un filtro Butterworth de banda de corte (pasa altos) y (b) se aplica el filtro diseñado, trasladándolo sobre la región de interés. El incremento en frecuencia (Δf) del filtro para la traslación (Δk), está gobernado por la velocidad V del evento como: $\Delta f = V \cdot \Delta k$. Hemos utilizado un filtro Butterworth paso-alto de ganancia unitaria de orden 8, esto es, con una pendiente de rechazo de 48 db/octava (Stearns, 1983).

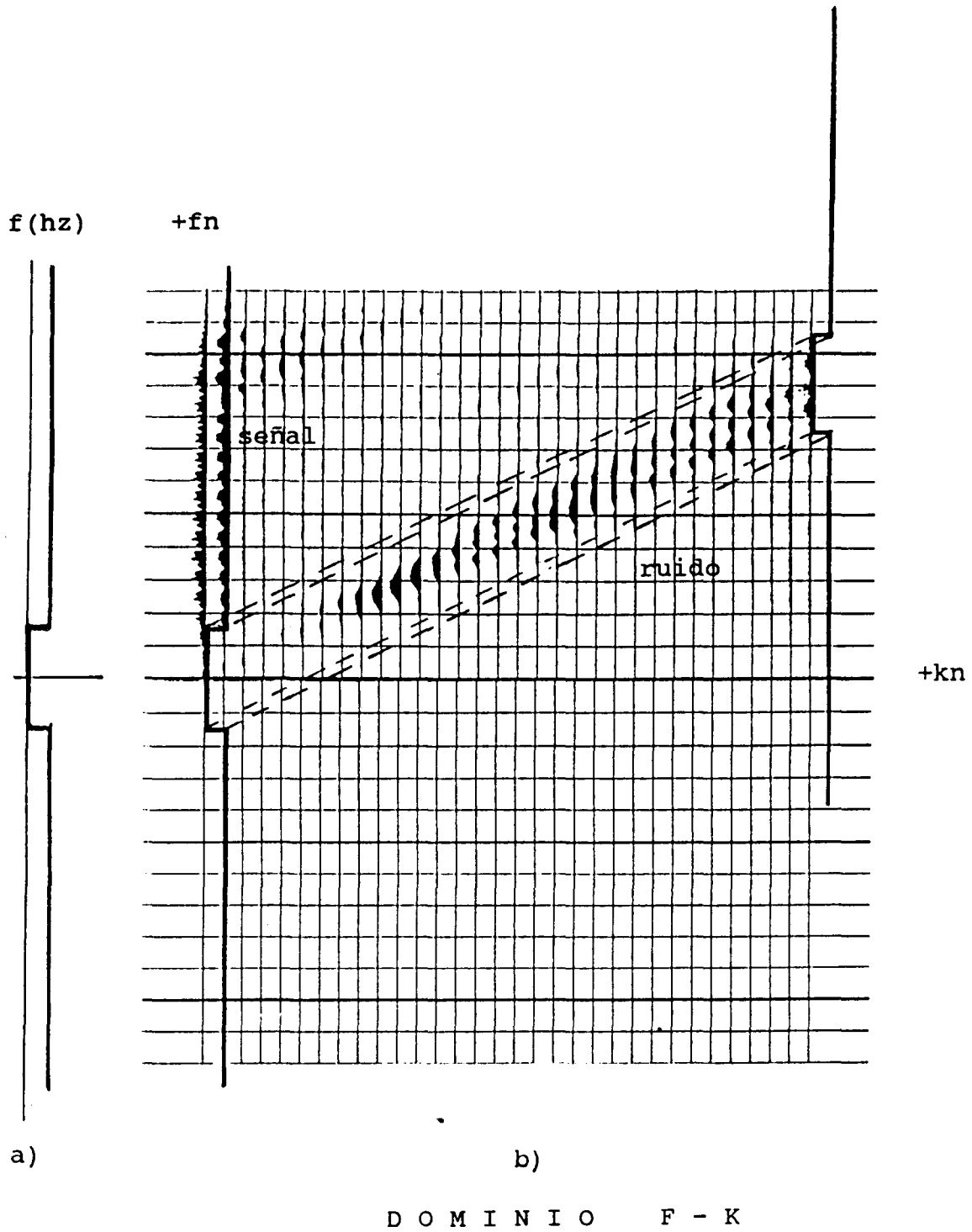


Fig. 2. Aplicación gráfica del filtrado selectivo de velocidad variable. a) filtro Butterworth 1-d; b) traslación del filtro en el dominio f-k.

IMPLEMENTACION NUMERICA

El emplear matrices de datos en forma vectorial facilita el procedimiento, ya que las grabaciones sísmicas se realizan traza a traza; de aquí que la implementación numérica de este filtrado en cualquier paquete de procesado que trabaje por trazas es relativamente fácil.

En este trabajo se utilizó el paquete de procesado de datos sísmicos SIOSEIS (Henkart, 1985). El diagrama de flujo de la figura 3 describe la adaptación hecha en este paquete de procesado. El procedimiento se realiza por tiros. Para poder aplicar la transformada de Fourier se completan los datos con ceros en ambas direcciones hasta obtener cantidades que sean potencias de dos. En seguida se transforma y se filtra columna por columna hasta tener todos los datos filtrados en el dominio f-k, $S(f, k)$. Se aplican ventanas cosenoidales apropiadas para evitar efectos de esquina en ambas direcciones. Para obtener los datos filtrados se realiza la transformación inversa de manera análoga, transformando renglón por renglón para obtener $S(f, x)$, y finalmente se transforma columna por columna, obteniendo la señal en el dominio tiempo-distancia ya filtrada $S(t, x)$. Este algoritmo fue implementado en la computadora PRIME 750 y el procesador de arreglos FPS 120B del Centro de Cómputo del CICESE.

EXPERIMENTO CON DATOS SINTETICOS

Con el objeto de probar el algoritmo se empleó un modelo sintético para generar datos de un levantamiento sísmico con eventos que incluyeran ondas de aire y ondas superficiales.

Los parámetros de campo y el modelo de capas utilizado se muestran en la figura 4. El tendido es lateral, consta de 24 detectores con una distancia de la fuente al primer detector de 120 m y una separación entre geófonos (Δx) de 5 m, un intervalo de muestreo (ΔT) de .004 seg y un tiempo total de grabación de 2 seg (500 muestras).

La respuesta sísmica sintética obtenida para estos parámetros se muestra en el registro de la figura 5, donde se han marcado los diferentes tipos de eventos. Las letras A, B y C representan reflexiones y, simulando las ondas superficiales, se encuentran los eventos marcados con las letras D, E y F, respectivamente. Los datos están libres de ruido alcatorio. Nótese que el arribo de menor velocidad corresponde a los eventos D, E y F. En los datos sintéticos no se incluyó el efecto dispersivo de las ondas superficiales. Sin embargo, difieren en sus frecuencias espaciales (longitudes de onda) y es esta diferencia la que se va a aprovechar para eliminarlas.

Al utilizar la Transformada Rápida de Fourier, es necesario que el número de datos, tanto en tiempo como en espacio, sea potencia de 2. Para ello se agregaron ceros para completar 512 muestras temporales y 104 trazas muertas con el fin de completar a 128 el número de puntos espa-

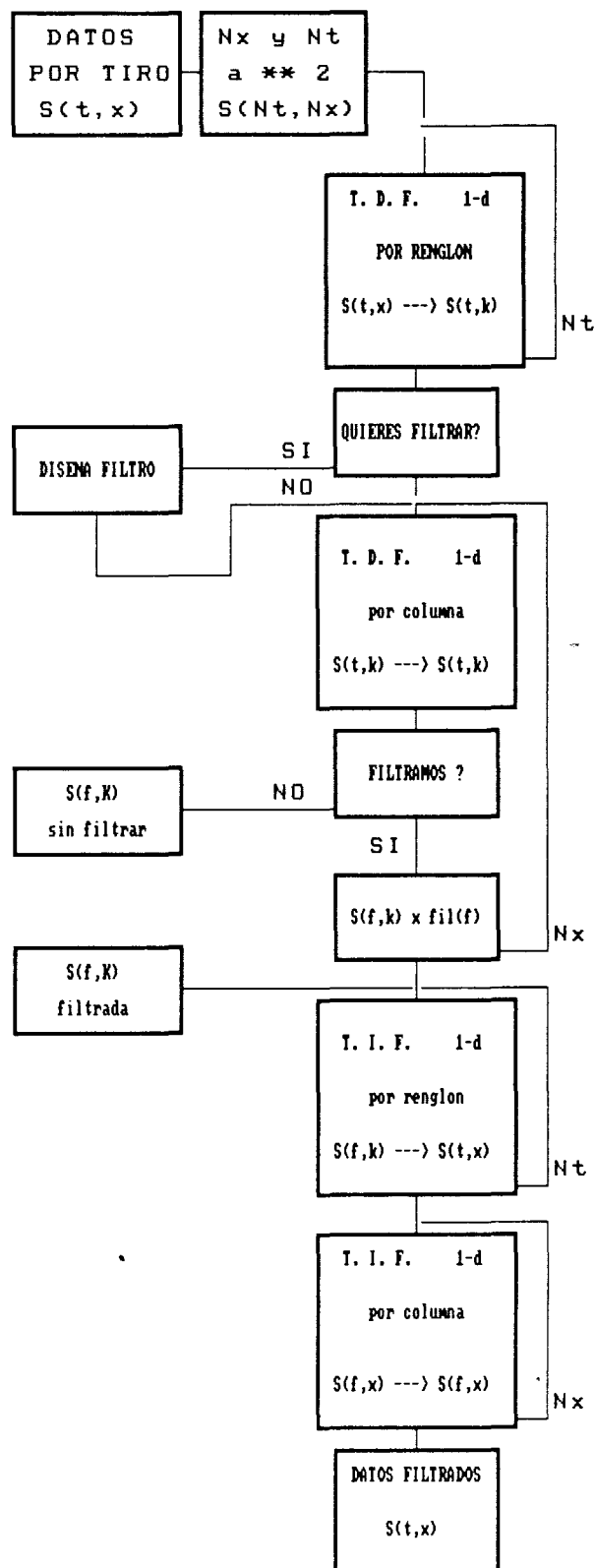


Fig. 3. Diagrama de flujo del filtrado de velocidad variable.

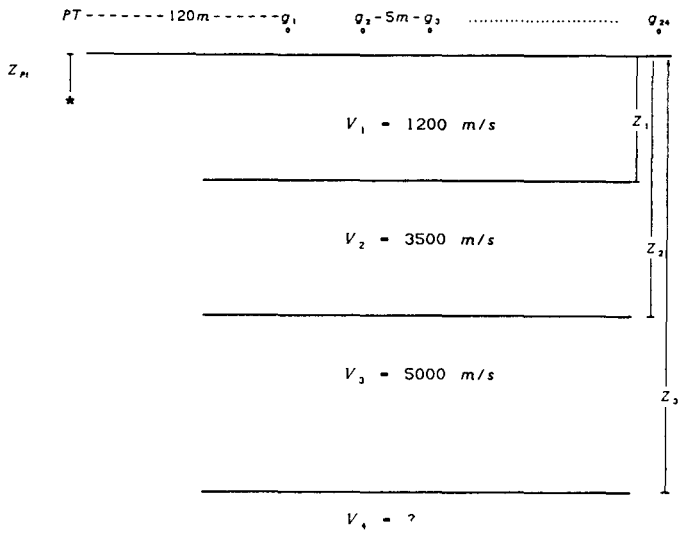


Fig. 4. Parámetros del modelo geológico de cuatro capas, con un tendido lateral de 24 detectores.

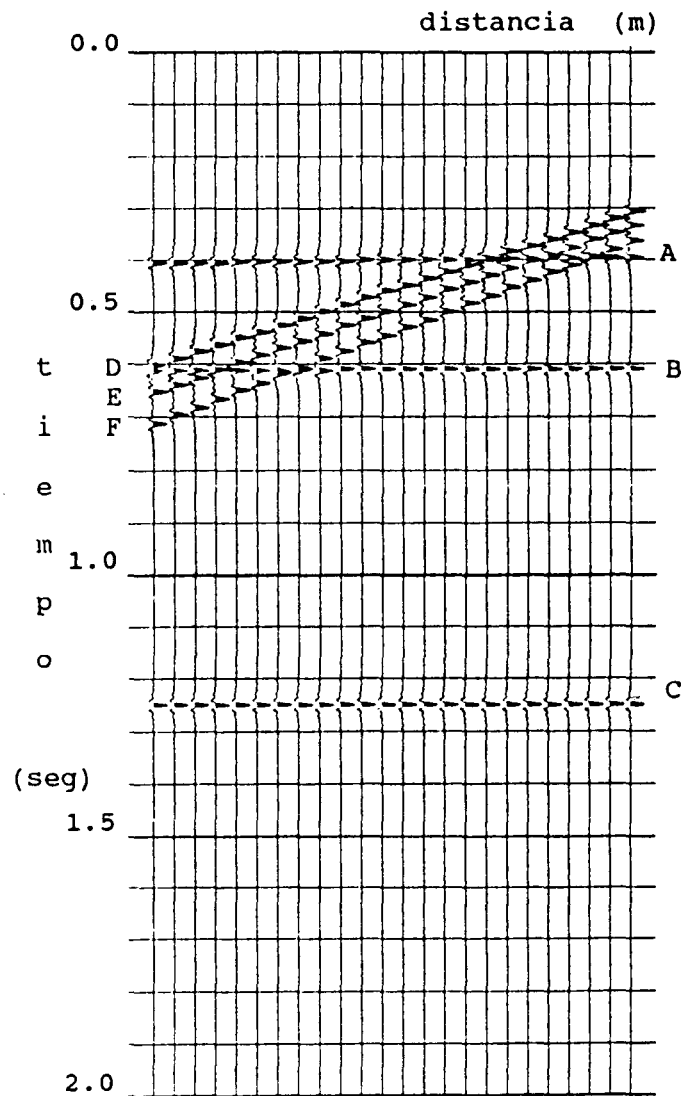


Fig. 5. Registro sísmico correspondiente al modelo de la figura 4. Los eventos aquí representados son: las reflexiones (A, B y C) y las ondas superficiales (D, E y F).

La figura 6 muestra el espectro de amplitud en el plano f-k del registro sísmico de los datos sintéticos. La Frecuencia de Nyquist (f_n) es de 125 Hz, por lo que $\Delta f = 0.244 \text{ Hz}$; mientras que k_n resulta de 100 c/km, y Δk de 0.781 c/km. En el plano f-k (figura 6), se han identificado los diferentes eventos marcados con las mismas letras señaladas con anterioridad. La razón $f/k = V$ nos da la velocidad aparente de las señales.

En la Tabla 1 se muestra el rango de velocidad estimado y se describen además las regiones de influencia de cada uno de los eventos con las letras a-a', b-b' y c (figura 6).

Tabla 1

Rango de velocidades aparentes y regiones de influencia en el plano f-k.

Onda	Velocidades (m/s)		Región de influencia	
	máx.	mín.	vel-máx.	vel-mín.
superficial	600	200	a'	a
directa	1700	700	b'	b
reflejada	∞	1500		c

Las regiones trazadas forman un abanico; de aquí el nombre "filtrado en abanico". Una vez identificados los diferentes eventos, se procede a determinar los parámetros óptimos del filtrado utilizando los siguientes pasos (ver figura 7):

- se traza una línea que defina la pendiente de la región del ruido.
- en la región más dispersa, se estima el ancho de banda.

- en seguida se traza una línea paralela a la trazada en el inciso "a", partiendo del límite superior estimado en "b".
- el punto donde esta línea corte el eje vertical nos dará la frecuencia de corte (f_c).
- el ancho de banda del filtro será entonces dos veces la frecuencia de corte.

Los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

división en el eje vertical	(Δf) 0.9 (27 Hz)
división en el eje horizontal	(Δk) 128 (100 c/km)
frecuencia de corte f_c	5.5 Hz

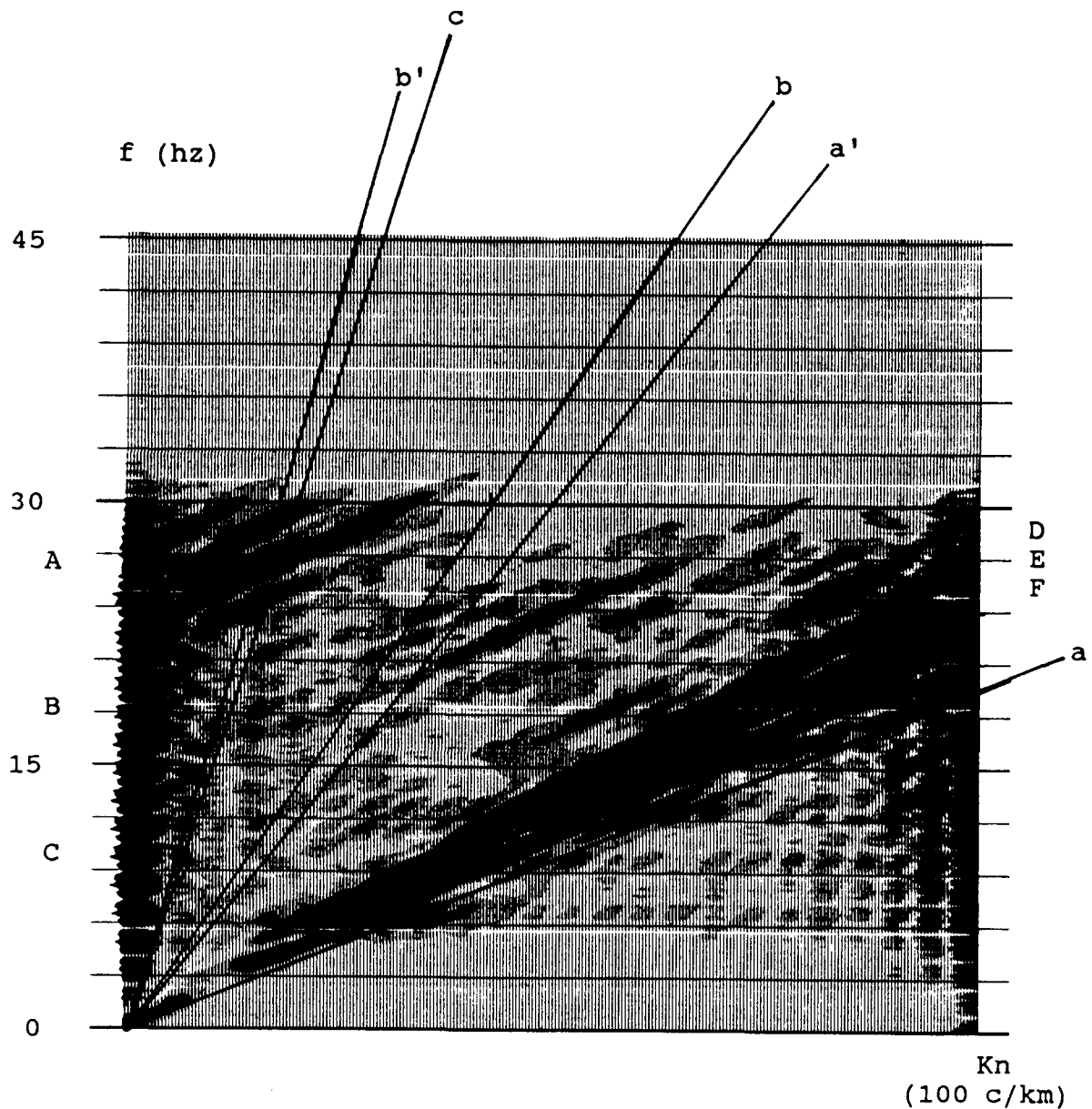


Fig. 6. Espectro de amplitud del registro sísmico de los datos sintéticos para el modelo de la figura 4. Marcadas con las mismas letras identificamos las reflexiones (A, B y C) y las ondas superficiales (D, E y F).

ancho de banda ($2 f_c$) 11.0 Hz

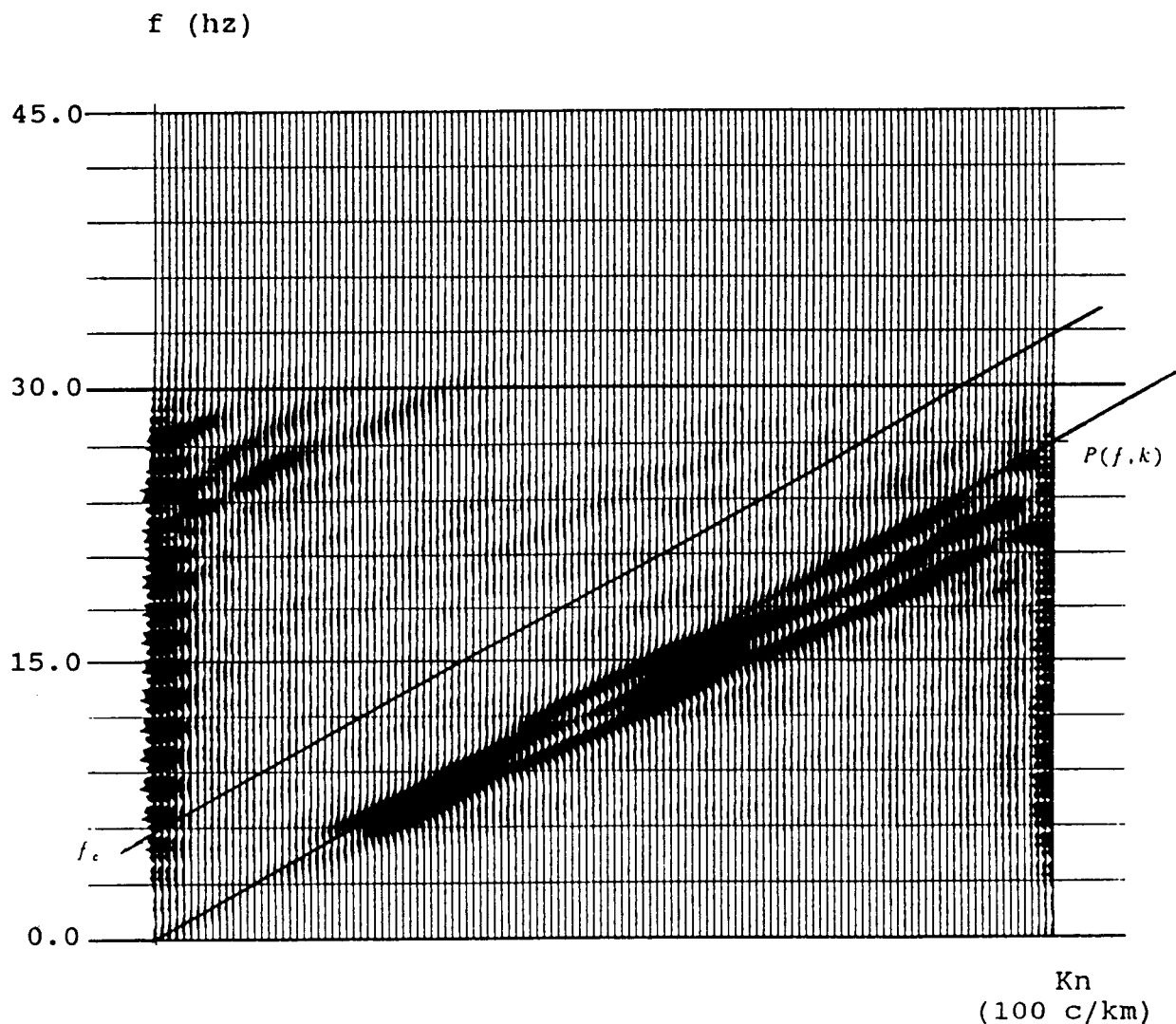
Utilizando estos parámetros se procede a la aplicación del filtro selectivo de velocidad.

En la figura 8 se muestra el resultado de la aplicación del filtrado a los datos sintéticos. Es importante señalar que la operación del filtrado no comienza en la primera división (traza) del eje horizontal, así como tampoco termina en la última. Esto es debido a que la señal de interés se encuentra mezclada con el ruido en estas dos regiones del plano $f-k$. En la figura 9 se presentan los datos en el dominio tiempo-distancia ya filtrados. Como se puede observar, el ruido fue

eliminado casi en su totalidad. Aparecen bastante bien definidos los reflectores A, B y C, aunque la sección se ve contaminada con eventos espúreos, producto de efectos de esquina en la transformación.

APLICACION A DATOS DE CAMPO

El método de filtrado de velocidad descrito fue aplicado a datos de campo recabados durante un curso de verano, impartido por un grupo de universidades de los Estados Unidos con el CICESE de Ensenada, B. C. El levantamiento fue realizado en el año de 1986 en la cuenca Española,



ANÁLISIS DE RUIDO DOMINIO F - K

Fig. 7. Análisis en el dominio f-k para determinar los parámetros óptimos del filtrado; frecuencia de corte (f_c) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, Δf (divisiones) y Δk (número de traza).

Nuevo México y los resultados principales se presentan en Bichler *et al.* (1991). En la figura 10 se muestra el área en estudio y la ubicación de la línea sísmica utilizada.

Los parámetros de campo del levantamiento fueron recabados en el sistema inglés de medida y por razones prácticas se conservan estas unidades.

La grabación de las señales se llevó a cabo mediante un equipo EG&G Geometrics ES-2420, usando como fuente de energía un sistema de detonación de gas Dinoseis. El levantamiento comprendió un total de 110 tiros, cubriendo una longitud aproximada de 8200 ft. La geometría del

tendido fue del tipo lateral con 24 geófonos, con una distancia fuente-detector de 220 ft y una separación entre detectores de 55 ft. El desplazamiento entre puntos de tiros fue de 55 ft a lo largo de toda la línea, con excepción de los tiros 43 (110 ft) y el 61 (605 ft). Con esta geometría se alcanzó una cobertura máxima de 1200% en un arreglo de PMC (Yilmaz, 1987).

En la figura 11 se muestran los registros correspondientes a los tiros 1, 33, 70 y 100. La definición de las reflexiones no es muy clara; en algunos tiros, como el 70 y el 100, no se logra identificar ningún reflector. Esto es debido a la gran cantidad de ruido que se presenta en la

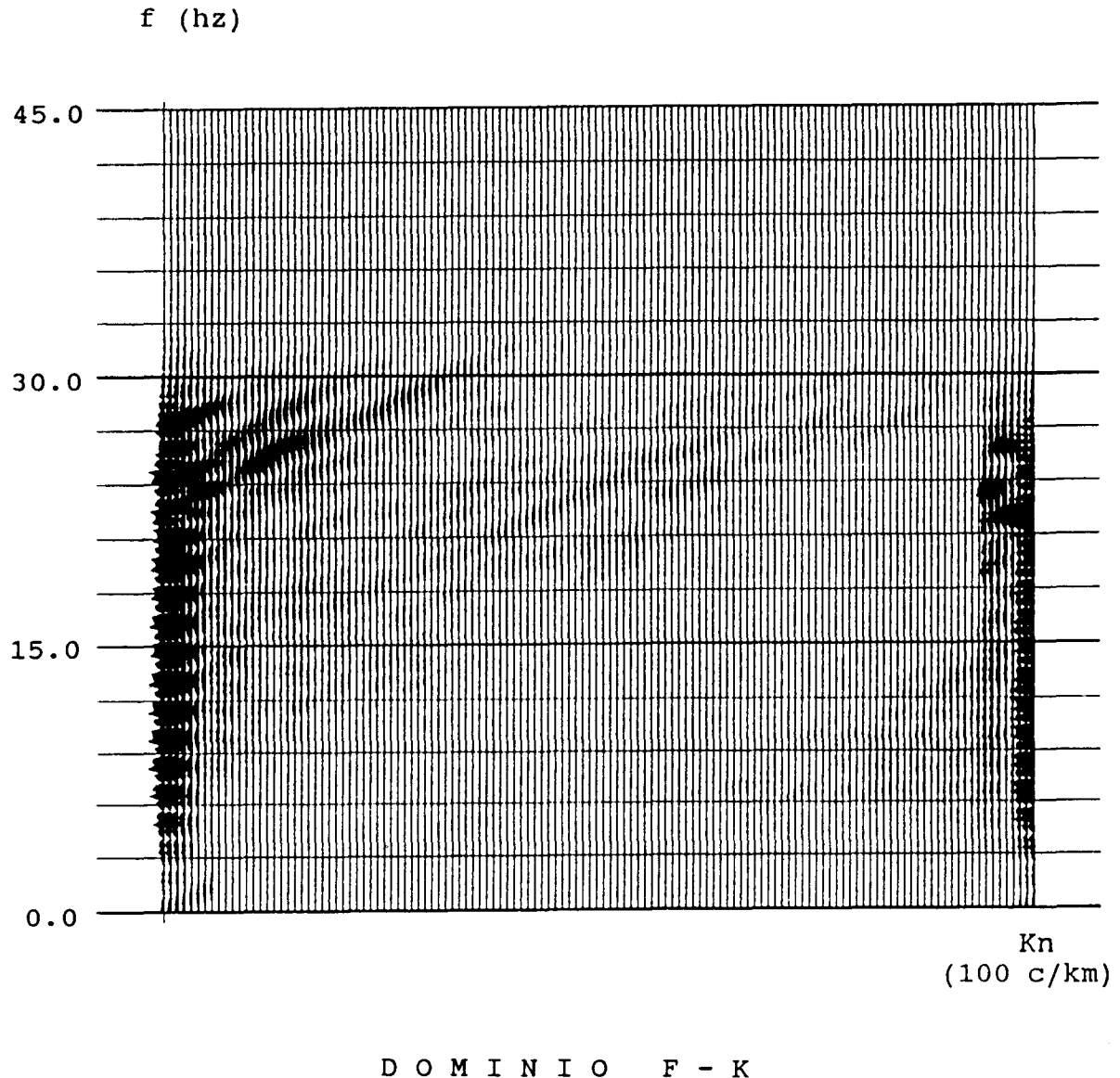


Fig. 8. Datos en el dominio f-k después de aplicado el filtrado selectivo de velocidad para los datos sintéticos.

mayoría de los datos, originado por el efecto de las ondas superficiales (onda de Rayleigh y onda sonora) junto con efectos provocados por heterogeneidades laterales en el terreno (Biehler *et al.*, 1990). Como se verá posteriormente, sin filtrado sería imposible obtener una sección sísmica confiable. Cuando los datos se encuentran contaminados con esta clase de ruido, la mejor opción es aplicar un método de filtrado de velocidad.

Antes de poder utilizar el filtro de velocidad variable es necesario un tratamiento preliminar a los datos. El procesamiento completo de datos se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 12, y se resume a continuación:

FORMATO: los datos originales habían sido grabados en un formato que no era compatible con el nuestro, por lo que fue necesario elaborar un traductor de formato SEG D a SEG Y (SEG, 1980).

GEOMETRIA: se introdujeron los parámetros geométricos del tendido, esto es, se definió la posición de cada tiro y detector respecto al primer punto de tiro, así como también se correlacionó cada detector con cada punto de reflexión en el subsuelo (PMC).

CORRECCION ESTATICA: esta corrección se realizó con el fin de eliminar las variaciones topográficas en todo

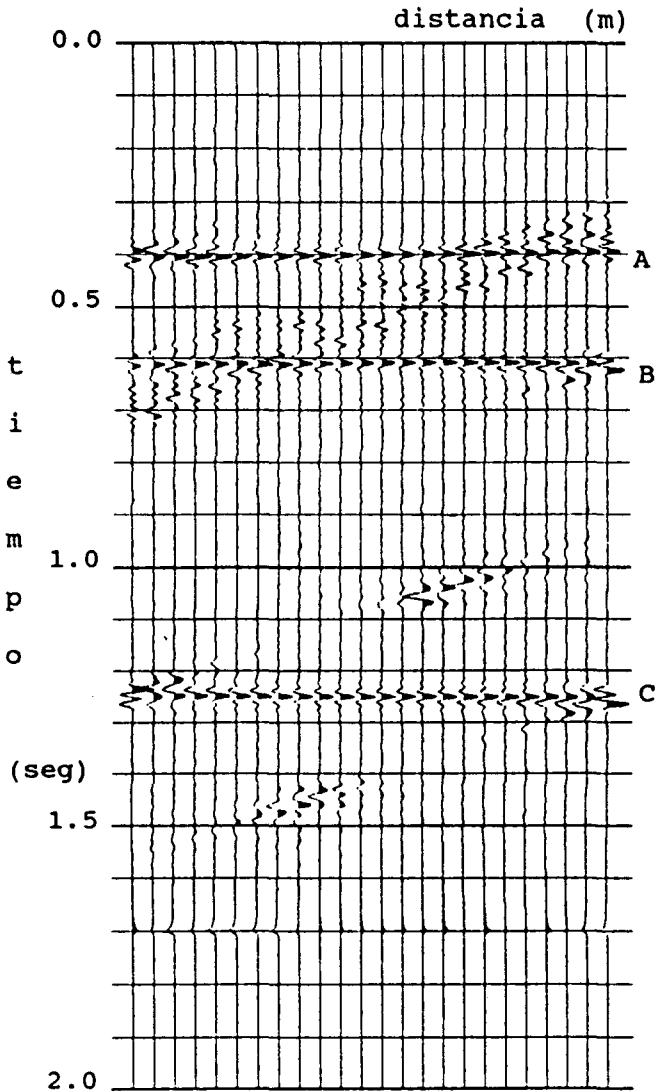


Fig. 9. Datos en el dominio tiempo-distancia filtrados. Nótese el ruido "residual" producido por el aliasing en el lugar donde estaban las ondas superficiales y los efectos de la transformada en las trazas de las orillas.

el tendido. Se optó por escoger una altura de 6500 ft sobre el nivel medio del mar, como referencia.

PESOS: este proceso de edición de datos se realizó con el objeto de eliminar las trazas que no contribuyen con ninguna información (geófono o canal defectuoso). En la figura 11 se puede observar que las 12 primeras trazas se encuentran mal grabadas (existe un ruido de carácter electrónico), por lo que solamente se utilizaron los 12 últimos canales de cada tendido. Esto, desafortunadamente, trae como consecuencia una reducción en los datos en el agrupamiento de PMC, lográndose únicamente una cobertura de 600%.

ANALISIS f-k se procedió a realizar un análisis en el dominio f-k el cual es mostrado en la figura 13. En este plano se identificaron los ruidos R₁ y R₂, señalados previamente en la figura 11 con líneas rectas. Se calcularon las velocidades aparentes respectivas, que fueron de 562 m/s y 352 m/s para R₁ y R₂, respectivamente. Son aproximadamente iguales a las obtenidas anteriormente en el dominio t-x, V_{R1} = 542 m/s y V_{R2} = 346 m/s. A partir de este análisis, se determinaron los parámetros óptimos a usar en el filtrado de velocidad, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Primero definimos mediante una línea recta el ruido predominante R₂ y en la región donde el ruido es más disperso se calculó el ancho de banda. De este, en el límite superior se trazó una línea paralela a la que define el ruido R₂, prolongándola hasta cortar el eje de las frecuencias y obteniendo en este cruce la frecuencia de corte f_c. Los parámetros óptimos obtenidos fueron los siguientes:

división en el eje vertical	(Δf) 0.1 (3 Hz)
división en el eje horizontal	(Δk) 18.0 (8 c/km)
frecuencia de corte f _c	4.5 Hz
ancho de banda (2 f _c)	9.0 Hz

FILTRADO DE VELOCIDAD: con base en los parámetros de diseño obtenidos en el proceso anterior se aplicó el filtro de velocidad a cada tiro (figura 13b).

PUNTO MEDIO COMUN: después de haber filtrado los 110 tiros, se agruparon los datos en PMC. De acuerdo con la geometría se hizo una cobertura al 600% para los puntos medios comunes del 16 al 267.

ANALISIS DE VELOCIDAD: en este análisis obtuvimos las velocidades asociadas a posibles reflectores para realizar la corrección dinámica (NMO). Utilizamos el método espectral de Tanner (1969). Se obtuvieron las siguientes velocidades:

evento A (.2 seg)	6300 ft/seg	(1900 m/s)
evento B (.4 seg)	7500 ft/seg	(2300 m/s)
evento C (.75 seg)	12000 ft/seg	(3600 m/s)

CORRECCION DINAMICA: en este proceso se corrigieron los datos por el sobretiempo por distancia (NMO) con las velocidades obtenidas anteriormente.

APILADO: en este proceso se suman las trazas de cada PMC ya corregidas, obteniendo una sección sísmica semifinal.

PROCESOS DE MEJORAMIENTO A LA SECCION: se aplicó una ganancia automática de .3 seg y un filtro variable en tiempo con un pasabanda de 3 a 50 Hz con el objeto de dar un acabado final a la sección sísmica.

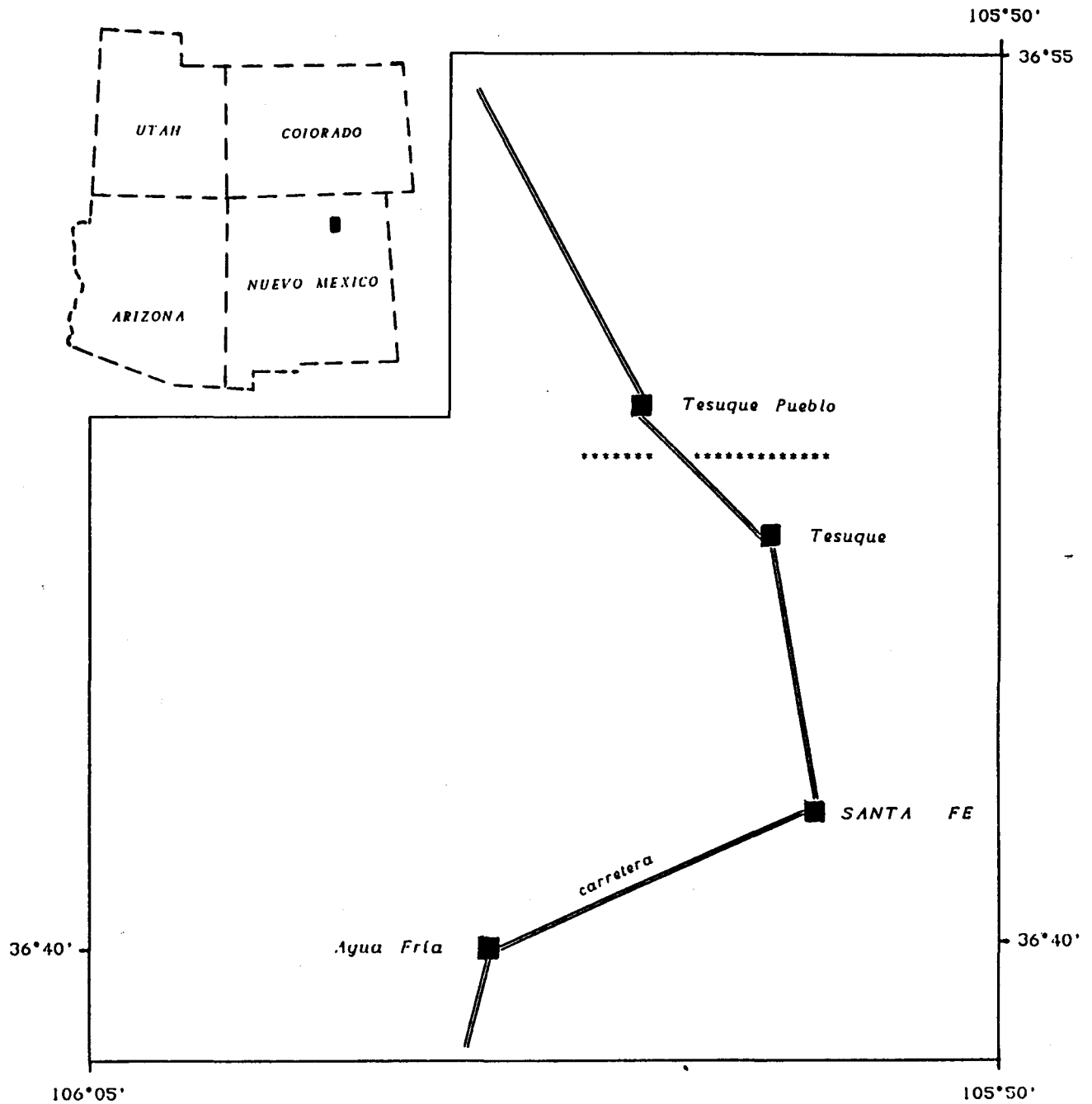


Fig. 10. Area en estudio, del prospecto Tesuque Pueblo, en Nuevo México.
La línea sísmica en estudio se encuentra marcada con asteriscos.

Después de llevar a cabo estos procesos se obtuvo la sección mostrada en la figura 14. Con el fin de poder comparar esta sección se obtuvo otra realizando los mismos procesos, con excepción del filtrado de velocidad, la cual se presenta en la figura 15.

Haciendo una comparación de las dos secciones, figuras 14 y 15, se puede observar que en la sección filtrada el evento (A), correspondiente al tiempo de .2 seg, se encuen-

tra definido en su totalidad en toda la sección, mientras que en la sección sin filtrar la definición es parcial. Por otra parte, el reflector (B), que se encuentra a .4s en la primera sección, es difícil de seguir en la sección sin filtrar.

Es importante hacer notar que este tipo de filtrado proporciona resultados excelentes cuando existen reflectores que son cubiertos en su totalidad por el ruido superficial y que con el procesado convencional difícilmente podrían ser

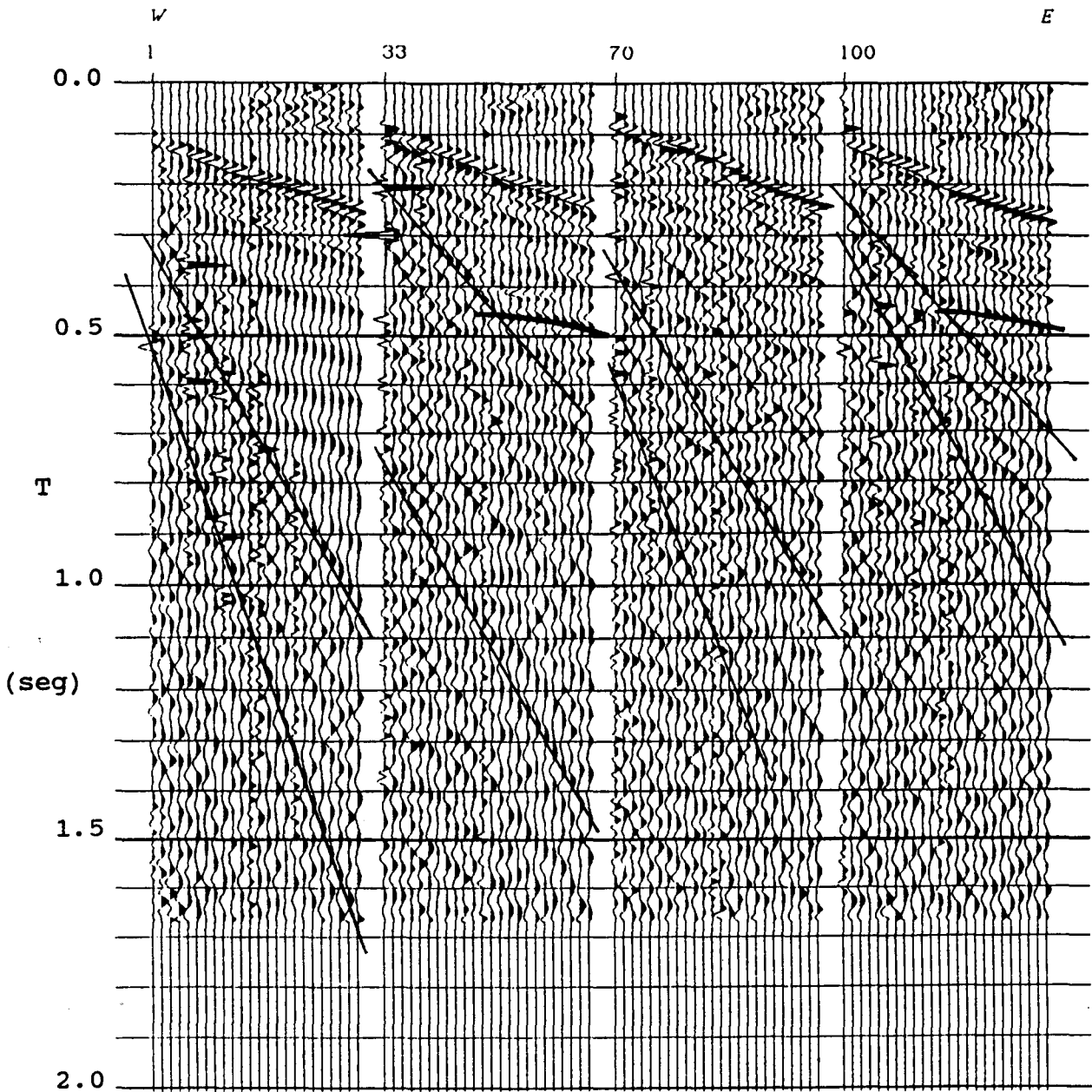


Fig. 11. Registros sísmicos de campo en el dominio t-x correspondientes a los tiros 1, 33, 70 y 100. Nótese la mala grabación de las 12 primeras trazas, así como la presencia de las ondas superficiales en casi todo el registro (trayectorias rectas, mientras que las reflexiones se presentan con trayectorias hiperbólicas).

Tabla 2

Profundidad, velocidad e interfase de los reflectores A, B y C

detectados. Tal es el caso del reflector (C), que aparece en la parte izquierda de la figura 14 marcado con un tiempo de arribo de .75 seg.

El siguiente paso después de haber realizado el procesamiento de los datos es la interpretación. Se identificaron tres reflectores, los cuales son congruentes con el patrón estratigráfico del área (Pérez, 1986 y Biehler *et al.*, 1990) y se presentan en la Tabla 2.

Reflector	Profundidad seg	ft	Velocidad (ft/seg)	Interfase formación
A	.2	565	6100	aluvión - Tesuque
B	.4	1580	7900	Tesuque - Galisteo
C	.75	5400	12000	Galisteo(?) - basamento

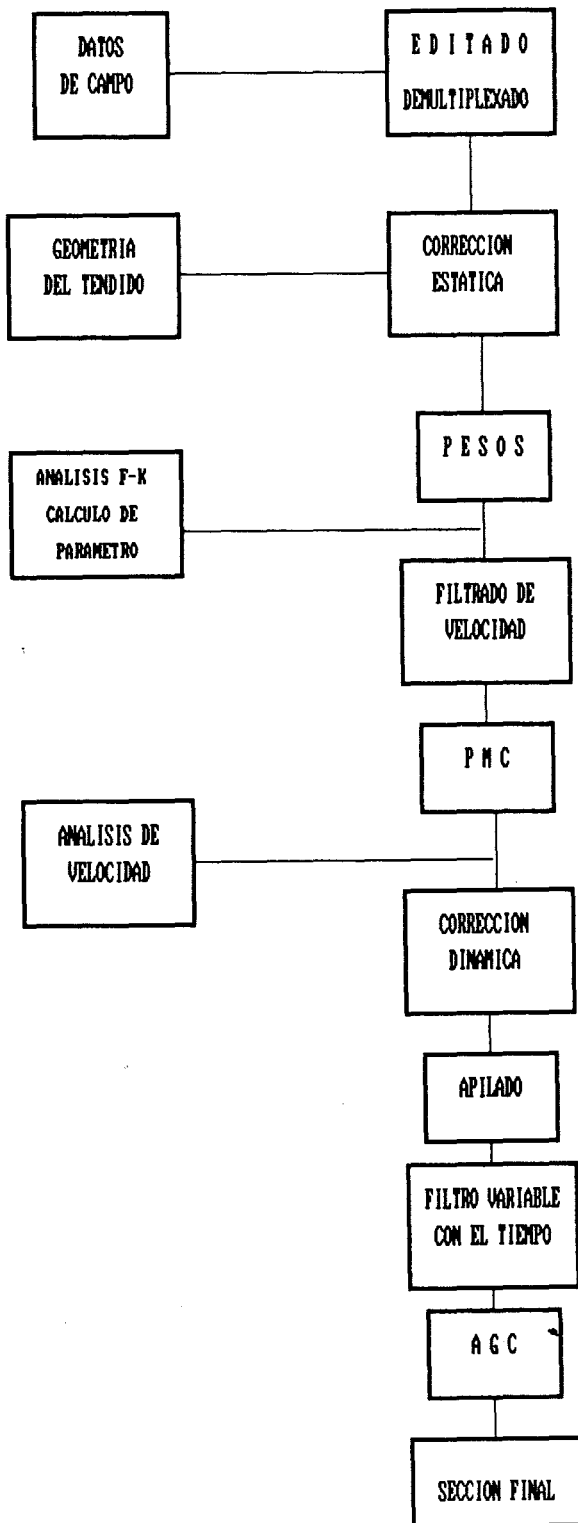


Fig. 12. Secuencia de procesos aplicados a la línea sísmica del prospecto Tesuque Pueblo.

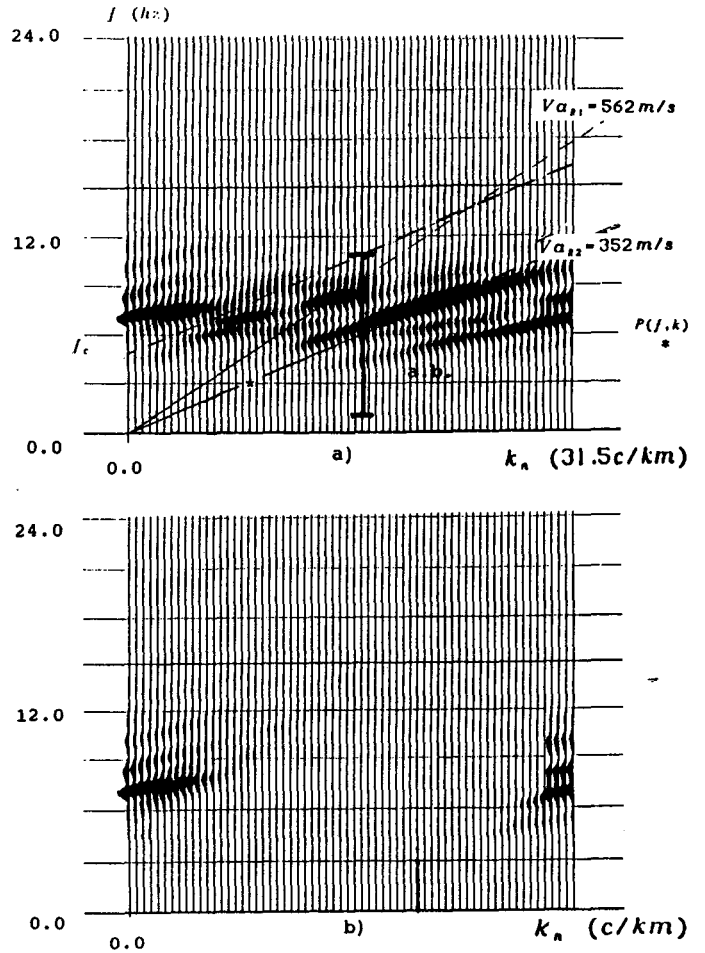


Fig. 13. a) Análisis en el dominio $f-k$ para determinar los parámetros óptimos del filtrado realizado en el tiro 1; frecuencia de corte (f_c) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, P_f (divisiones) y P_k (número de traza). b) Datos en dominio $f-k$ filtrados.

CONCLUSIONES

La transformada bidimensional de Fourier descompone las señales sísmicas en sus componentes de onda plana, de tal manera que eventos con velocidades diferentes, que en el dominio del tiempo aparecen mezclados, son graficados en el plano $f-k$ en forma aislada, permitiéndonos la discriminación entre la señal de interés y el ruido. Diseñamos un filtro de velocidad variable bastante sencillo. Utilizamos un filtro Butterworth unidimensional de ganancia unitaria, el cual es aplicado sobre los datos en la región de interés, mediante una traslación de este filtro en el plano $f-k$. La implementación de este proceso de filtrado en cualquier paquete de procesamiento de datos sísmicos que trabaje por tiros, traza a traza, es relativamente fácil.

El tiempo de operación en una computadora PRIME 750 utilizando un procesador de arreglos FP20B para filtrar un tiro de 24 canales con 2 segundos de grabación y a un

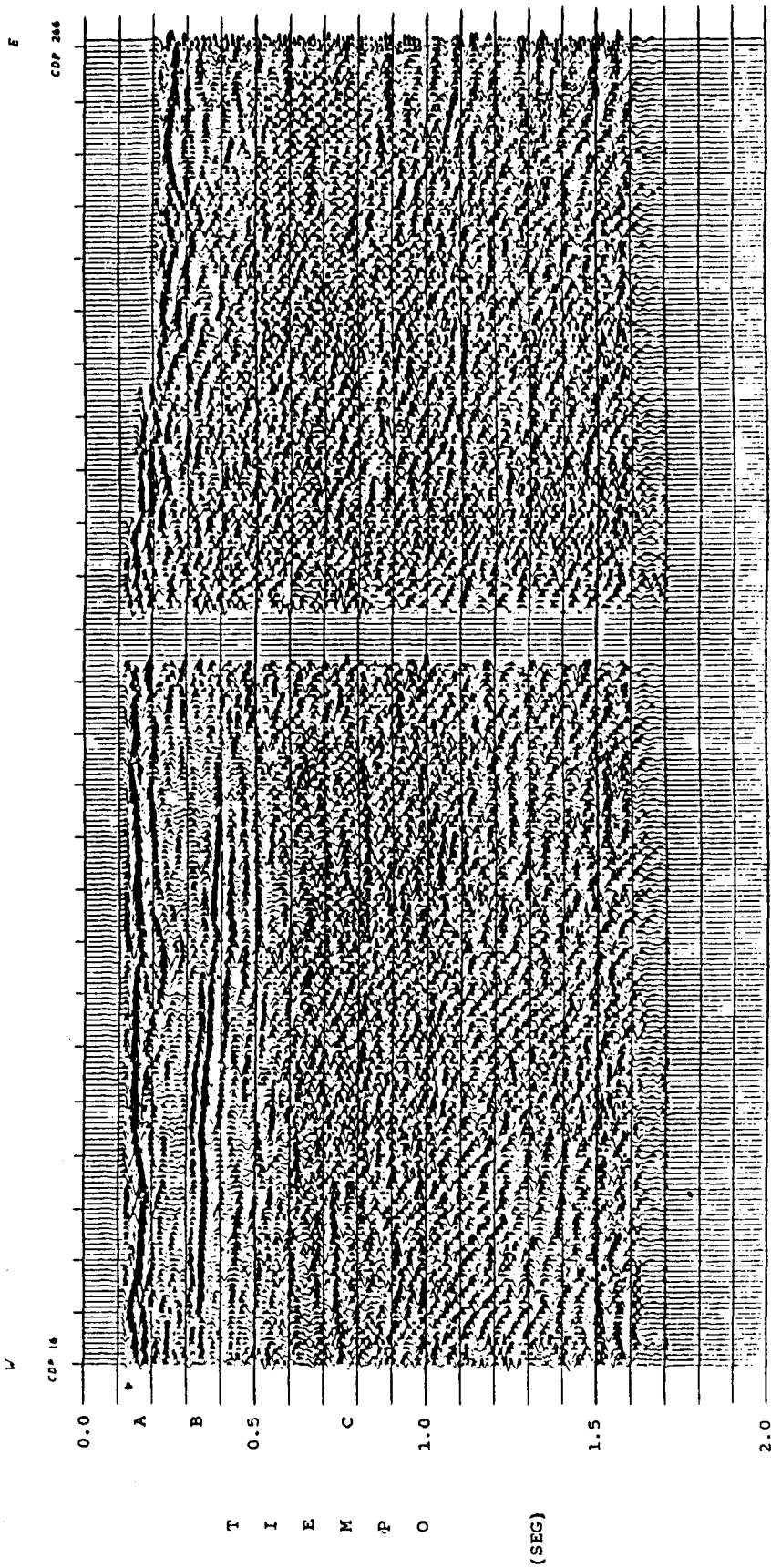


Fig. 14. Sección final al 600% obtenida después de aplicarle los procesos descritos en la figura 13, incluyendo el filtrado de velocidad variable.

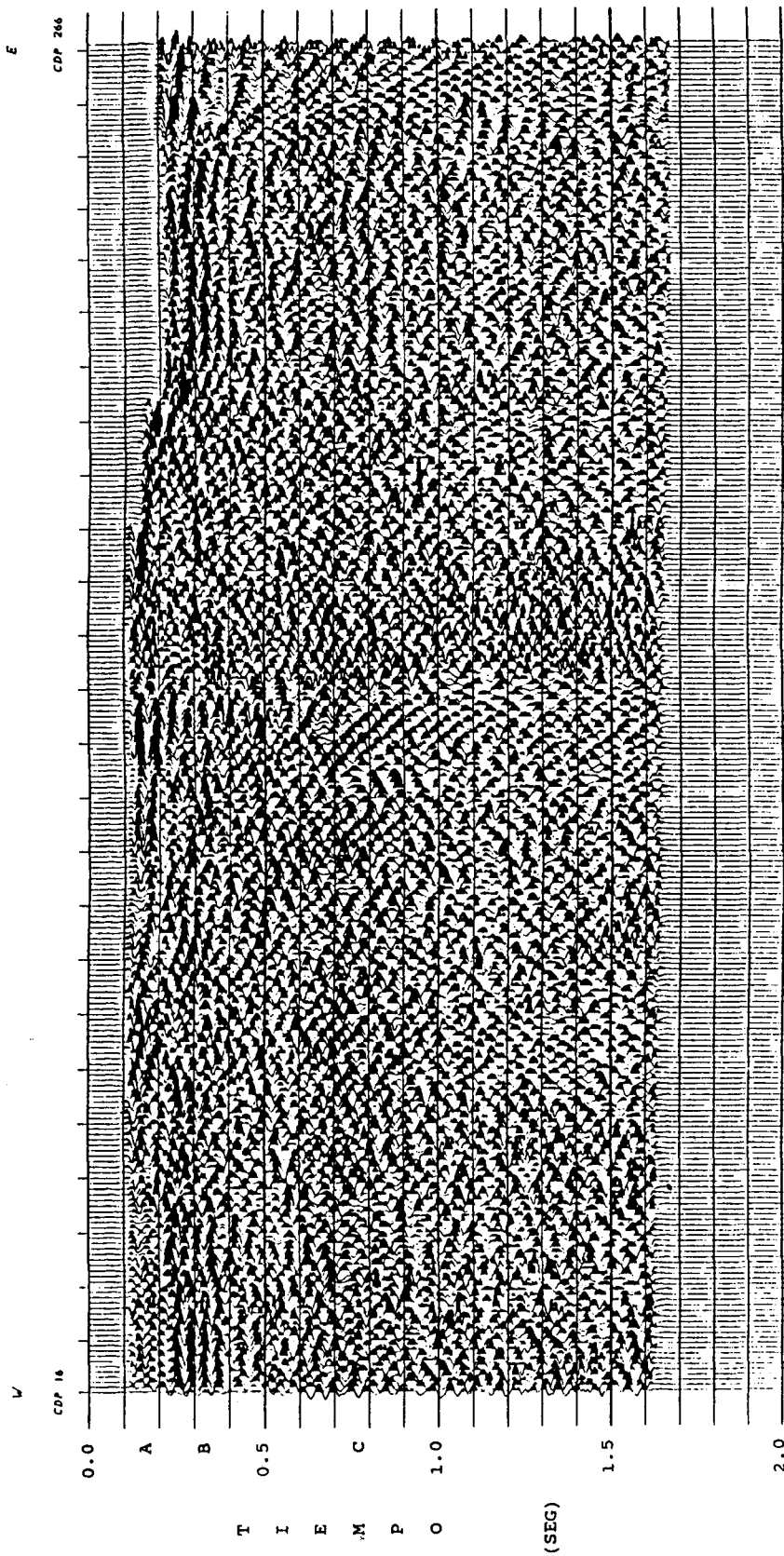


Fig. 15. Sección final a 1200% procesada de la misma manera que la figura 14 pero sin el filtrado de velocidad variable.

intervalo de muestreo de 4 milisegundos, es de aproximadamente 60 segundos de duración.

La aplicación a datos sintéticos y datos reales demuestra que la influencia de la onda de aire y las ondas superficiales fue reducida en una buena medida, demostrando que esta técnica de filtrado de velocidad es aceptable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del Centro de Cómputo del CICESE y a P. Henkart, por proporcionarnos una copia de SIOSEIS. Los datos de campo fueron recabados por J. Ferguson, a quien agradecemos por habernos proporcionado una copia. Parte de este trabajo se realizó durante la estancia sabática de R. F. en el Instituto de Geofísica de la UNAM. N. F. H. R. agradece el apoyo brindado por CONACYT. Agradecemos a G. González la ayuda en la edición de este trabajo. Finalmente, agradecemos los comentarios del Editor y de dos revisores anónimos que contribuyeron a mejorar la presentación de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- BIEHLER, S., J. FERGUSON, W. S. BALDRIGE, G. R. JIRACEK, J. L. ALDERN, M. MARTINEZ, R. FERNANDEZ, J. ROMO, B. GILPIN, L. W. BRAILE, D. R. HERSEY, B. P. LUYENDYK y C. L. AIKEN, 1991. A geophysical model of the Española basin, Rio Grande rift, New Mexico. *Geophysics*, 56, 340-353.
- SEG, Society of Exploration Geophysicists, 1968, Digital Tape Standards, Tulsa, Ok., 65 pp.
- EMBREE, P., J. P. BURG y M. M. BACKUS, 1963. Wide-band velocity filtering: the pie-slice process. *Geophysics*, 28, 948-974.
- FAIL, J. P. y G. GRAU, 1963. Les filtres en éventail. *Géophysique*, 11, 9-163.
- HENKART, P., 1985. SIOSEIS seismic analysis package. SIO. Computer algorithm.
- PEREZ-FLORES, M. y A. GARCIA-AGUILAR, 1986. Reporte técnico de curso de verano en Santa Fe, Nuevo México. CICESE, 37 pp.
- SAKO, B. and K. HIRANO, 1984. Design of recursive digital filters for the selection or rejection of a particular velocity in seismic signals. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 3, 2, 177-191.
- SMITH, M. K., 1956. Noise analysis and multiple seismometer theory. *Geophysics*, 21, 342.
- STEARNS, S. D., 1983. Digital signal analysis. Hayden Book Company, Inc., New Jersey, 280 pp.
- TANER, T. T. y KOEHLER, 1969. Velocity spectral-digital computer derivation and applications of velocity functions. *Geophysics*, 34, 6, 859-881.
- WIGGINS, R. A., 1966. F-K filter design. *Geophys. Prospecting*, 14, 427-440.
- YILMAZ, O., 1987. Seismic data processing. (S. M. Dorothy, ed.). Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 526 pp.

N. F. Hernández Reyes
R. Fernández
Depto. de Geofísica Aplicada
Espinoza 843
Ensenada, B. C., 22830
México.