



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

ANALISIS Y PROCESO DE DATOS
SISMICOS DE REFLEXION DE LA
ISLA DE BACUTA (Huelva)

AÑO 1996

40453



Secretaría de Estado de Aguas y Costas
Ministerio de Medio Ambiente

**ANALISIS Y PROCESO DE DATOS SISMICOS DE REFLEXION
DE LA ISLA DE BACUTA (Huelva)**

INDICE

	Pag
1. INTRODUCCION	1
2. INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE REGISTRO EN LOS RESULTADOS	4
2.1 RANGO DE FRECUENCIAS	4
2.2 GEOMETRIA DE REGISTRO Y COBERTURA	6
2.3 ALIASING ESPACIAL	7
3. INFORMACION PREVIA SOBRE EL CORTE GEOLOGICO	8
3.1 SEDIMENTOLOGIA	8
3.2 DATOS DISPONIBLES SOBRE VELOCIDADES	10
4. SOFTWARE UTILIZADO EN EL PROCESO	14
5. PREPROCESO DE DATOS	15
5.1 SEPARACION DE FICHEROS	15
5.2 IMPLANTACION DE LA GEOMETRIA	17
5.3 EDICION	18
6. ANALISIS DE LOS SUCESOS REGISTRADOS	19
7. SECCIONES EN COBERTURA SIMPLE	25
8. CONTENIDO FRECUENCIAL	26
8.1 REGISTROS COMPLETOS	26
8.2 ESPECTROS DE LA SEÑAL Y DEL RUIDO	27
9. IDENTIFICACION DE SUCESOS EN FRECUENCIAS TEMPORALES Y ESPACIALES	28
10. OBTENCION DE CONJUNTOS DE CDP PARA ANALISIS DE VELOCIDAD	30
11. APLICACION DE FILTROS EN EL DOMINIO F-K	32
11.1 PRIMER FILTRO (FK1)	32
11.2 SEGUNDO FILTRO (FK2)	33
11.3 OBTENCION DE CONJUNTOS CDP DE TRAZAS FILTRADAS EN FK	34
12. SECCIONES DE OFFSET COMUN	35
13. INTERPRETACION	38
14. RESUMEN Y CONCLUSIONES	41

1. INTRODUCCION.

ANALISIS Y PROCESO DE DATOS SISMICOS DE REFLEXION
DE LA ISLA DE BACUTA (Huelva)

1. INTRODUCCION

Este Informe pertenece al Proyecto PUESTA A PUNTO DE LA SISMICA DE REFLEXION DE ALTA RESOLUCION TERRESTRE, acogido al Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, Programa Nacional de Medio Ambiente y subvencionado a través de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) con la referencia AMB94-0160-C04-02.

El objetivo primordial del Proyecto es el desarrollar y contrastar con otros métodos no destructivos, las técnicas de campo y de proceso de datos que permiten utilizar desde tierra la sísmica de alta resolución, para obtener información del terreno hasta una profundidad de 50 m.

Pretende aplicarse esta técnica fundamentalmente en los casos relacionados con la degradación del medio ambiente, como son la disminución del espesor de sedimentos en el delta del río Ebro por falta de aportes sólidos de su cauce, que puede dejar improductivas amplias zonas de su entorno y modificar la morfología del litoral de gran parte de la costa levantina, y la degradación de las marismas y pérdida de navegabilidad de la costa de Huelva por causa del relleno de los sistemas estuarinos en el sector delimitado por la desembocadura de los ríos Guadiana y Tinto.

Para llevar a cabo este objetivo, el Proyecto se subdivide en cuatro Subproyectos:

- 1/ Puesta a punto de las técnicas de campo.
- 2/ Desarrollo de las técnicas de interpretación y proceso de datos.
- 3/ Uso de técnicas complementarias de campo.
- 4/ Uso de técnicas complementarias de laboratorio.

participando en el mismo:

- . Laboratorio de geotécnica del CEDEX, Ministerio de Fomento, responsable del subproyecto 3/ y prestando apoyo al 4/.

- ITGE, Ministerio de Medioambiente, responsable del subproyecto 2/ y prestando apoyo al 1/.
- SGC, Instituto Cartográfico de Cataluña, responsable del subproyecto 1/ y prestando apoyo al 2/.
- Dept. Sedimentología, Unv. de la Rábida (Huelva), responsable del subproyecto 4/ y prestando apoyo al 3/.

En junio de 1995 se llevó a cabo la primera fase de ensayos de campo, en la desembocadura del río Tinto - Odiel, trabajos sobre los que se han presentado hasta ahora los siguientes informes técnicos :

- "Estudio teórico preliminar para la puesta a punto del dispositivo experimental de sísmica de reflexión de alta resolución en la Isla Bacuta (Huelva)" (SGC,ITGE).1995.
- "Informe del trabajo de campo de sísmica de reflexión realizado en la Isla Bacuta" (SGC, ITGE).1995.
- "Ensayos de Down-Hole y perfiles de sísmica de refracción en la Isla Bacuta (Huelva)" (CEDEX).1995.
- "Informe sobre los materiales estratificados del estuario bajo del Odiel (Sector Bacuta)" (Unv. Huelva).1995.

A estos Informes se remite para una mayor información de los aspectos que serán tenidos en cuenta en la elaboración del presente trabajo, que trata de describir el análisis y el proceso de datos llevado a cabo para obtener las secciones sísmicas de reflexión del experimento efectuado en la Isla Bacuta.

En síntesis, dicho experimento consistió en la realización de dos perfiles o líneas sísmicas de reflexión (SGC/ITGE), trazadas junto a un sondeo mecánico, sobre el que se llevaron a cabo mediciones de velocidad con la técnica de down-hole y se efectuaron una serie de perfiles de sísmica de refracción próximos al sondeo (CEDEX). Los testigos del sondeo fueron estudiados desde el punto de vista sedimentológico por la Universidad de Huelva.

La toma de datos de reflexión se efectuó con dos tipos de geófonos, de 40 Hz y de 100 Hz, así como con dos tipos de fuente de energía: maza de 8 kg golpeando sobre una placa metálica y rifle de calibre 12 con cartuchos de posta, disparando a unos 20-40 cm de profundidad.

Se han registrado dos líneas sísmicas, combinando sobre una de ellas ambas fuentes de energía y tipos de geófonos, resultando así en cinco perfiles sísmicos.

Los parámetros de registro comunes fueron:

- . Registros de 24 trazas.
- . Distancia entre trazas de 1 m.
- . Longitud de registro de 200 ms.
- . Intervalo de muestreo de 0.1 ms/0.05 ms.
- . Filtro pasa-baja de 100 Hz.
- . Filtro pasa-alta de 4000 Hz.
- . Offset mínimo 6 m.
- . Cobertura 12.

El objetivo de este análisis y proceso de datos es por tanto obtener las secciones sísmicas correspondientes a cada uno de los dispositivos empleados, efectuando un estudio comparativo de los resultados.

**2. INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE REGISTRO
EN LOS RESULTADOS.**

2. INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE REGISTRO EN LOS RESULTADOS

Con vistas a obtener la mejor resolución posible, los aspectos más importantes a considerar son el contenido frecuencial de los registros, que nunca podrá superar el proporcionado por la fuente de energía y vendrá limitado por la acción de filtro que imponga el terreno y la capacidad de ser registrado por el sistema, junto con la adecuada geometría del dispositivo de registro.

2.1 RANGO DE FRECUENCIAS

Como resultado de los ensayos llevados a cabo en este Proyecto, en fases previas a la toma de datos en campo, se dispone de información específica de las respuestas frecuenciales de los geófonos y de las fuentes de energía utilizadas, recogida en el Informe Anual de 1995 preparado por el equipo investigador del Servicio Geológico de Cataluña (véase el Informe "Estudio teórico preliminar para la puesta a punto del dispositivo experimental de sísmica de reflexión de alta resolución en la Isla Bacuta (Huelva)").

Los geófonos empleados han sido de la marca Mark, tipo L-40A de 40 Hz y L-40A2 de 100 Hz, cuyas características y curvas teóricas de respuesta son las mostradas en la figura 1. A partir de la frecuencia nominal, ambos tipos de geófonos tienen una respuesta plana hasta al menos 600 y 1000 Hz respectivamente.

En la calibración efectuada en laboratorio, se ha obtenido para los geófonos de 100 Hz el resultado indicado en la figura 2:

- Antes de la frecuencia nominal la señal viene atenuada:

-35dB para 10 Hz

-30dB para 20 Hz

-20dB para 30 Hz

-5 dB para 70 Hz

- Después de la frecuencia nominal, la señal se atenúa -5 dB para 740 Hz, con una pendiente que indica una atenuación de -10 dB para unos 1100 Hz y -30 dB para 2100 Hz.

Por tanto, el comportamiento de los geófonos L-40A2 de 100 Hz puede aceptarse válido en la gama de 70 Hz a 1000 Hz, y el de los geófonos L-40A de 40 Hz entre 10 Hz y 600 Hz, actuando como filtros pasa alta para frecuencias inferiores a 10/20 Hz.

Las fuentes de energía empleadas han sido una maza de 8 kg golpeando sobre una placa metálica de 20 cm x 20 cm, y un "rifle" o escopeta sísmica de calibre 12, con cartuchos de posta. En los experimentos previos llevados a cabo se obtuvieron los espectros de amplitud de la señal registrada a 10 m de la fuente, con geófonos de 40 Hz, que para cada tipo de fuente son:

. Para 4 golpes con maza (fig. 3):

pico máximo desde 30 a 100 Hz
-20 dB a 180 Hz
-50 dB a 450 Hz y más de 1000 Hz

. Para escopeta con cartuchos de posta (fig. 4)

pico máximo desde 50 a 100 Hz
-20 dB a 190 Hz
-50 dB a 650 Hz

conteniendo por tanto mayores frecuencias los cartuchos de posta que los golpes de maza, al menos hasta los 600 Hz, aunque el decaimiento en las altas frecuencias es algo mayor en los registros obtenidos con la escopeta. En la banda de hasta -30 dB, las frecuencias útiles de ambas fuentes no parecen superar mucho los 200 Hz.

Durante el registro de los datos en campo de los perfiles en la Isla de Bacuta, se han utilizado los siguientes intervalos de muestreo:

. Para todos los perfiles de la Línea Sísmica 1, el muestreo fue de 0.0001 s, con frecuencia de Nyquist de 5000 Hz.

. En la Línea Sísmica 2, el muestreo fue de 0.00005 s, con frecuencia de Nyquist de 10000 Hz.

sirviendo de filtro antialiasing el margen superior de un filtro pasa-banda empleado en registro de 100-4000 Hz.

En consecuencia, con los geófonos, fuentes de energía y muestreo utilizado en los registros de la Isla Bacuta, puede esperarse un contenido frecuencial útil (frecuencias amortiguadas menos de 50 dB antes de intervenir el filtro que ejerce el propio terreno), con un límite superior de:

450 Hz para la maza

650 Hz para la escopeta

con independencia de los geófonos utilizados; el límite inferior, con independencia de la fuente de energía se tiene en 10/20 Hz por los geófonos o en la respuesta real del filtro de 100 Hz.

El rango registrado viene en cualquier caso limitado por el rango dinámico del registrador (120 dB).

2.2 GEOMETRIA DE REGISTRO Y COBERTURA

Se ha efectuado un registro de 24 canales con avance de la fuente de 1 intervalo entre trazas, consiguiéndose por tanto una cobertura máxima de 12, sin que existan anomalías significativas en el diagrama de explotación.

El offset mínimo del dispositivo empleado es de 6 m (ver figura 5), y el máximo de 29, recibándose información en cada registro de un segmento del subsuelo de 11.5 m; la distancia entre puntos de reflexión es por tanto 0.5 m, con una distancia mínima entre punto de tiro y geófono de 6 m y máxima de 28 m para el conjunto de las trazas de un CDP; para registros cuyos objetivos están a menos de 50 m de profundidad, las dimensiones del dispositivo empleado indican que las trayectorias de reflexión se apartan bastante de la vertical, al recorrerse una distancia horizontal casi igual que la vertical o profundidad del objetivo. Por otra parte, el n.m.o (normal move out) de las reflexiones en los conjuntos de trazas de un CDP resulta equivalente al de los registros. Una cobertura simple se conseguirá con tiros distanciados 12 m (PT1, PT13, PT25, etc).

Algunos cambios de polaridad debido a los sistemas de conexión de geófonos y cables, así como algún efecto de cross-feed entre trazas y la aparición de trazas

muertas provocados por las conexiones del Rotalong han sido las únicas incidencias de registro que pudieran tener alguna repercusión sobre el proceso, aunque han tratado de minimizarse con la adecuada edición de los registros.

La posición de los perfiles, su cruce y su situación respecto del sondeo mecánico queda reflejado en el esquema de la fig. 6.

2.3 ALIASING ESPACIAL

Siendo la distancia entre geófonos de 1 m, la frecuencia espacial de Nyquist es de 0.5 ciclos/m (500 ciclos/km), lo que se produce a partir de una frecuencia máxima que depende de la velocidad del suceso:

para $v = 300 \text{ m/s} \dots \dots f_{\text{max}} = 150 \text{ Hz}$

para $v = 2000 \text{ m/s} \dots \dots f_{\text{max}} = 1000 \text{ Hz}$

Tendrá lugar aliasing preferentemente para señales de baja velocidad con componentes de alta frecuencia.

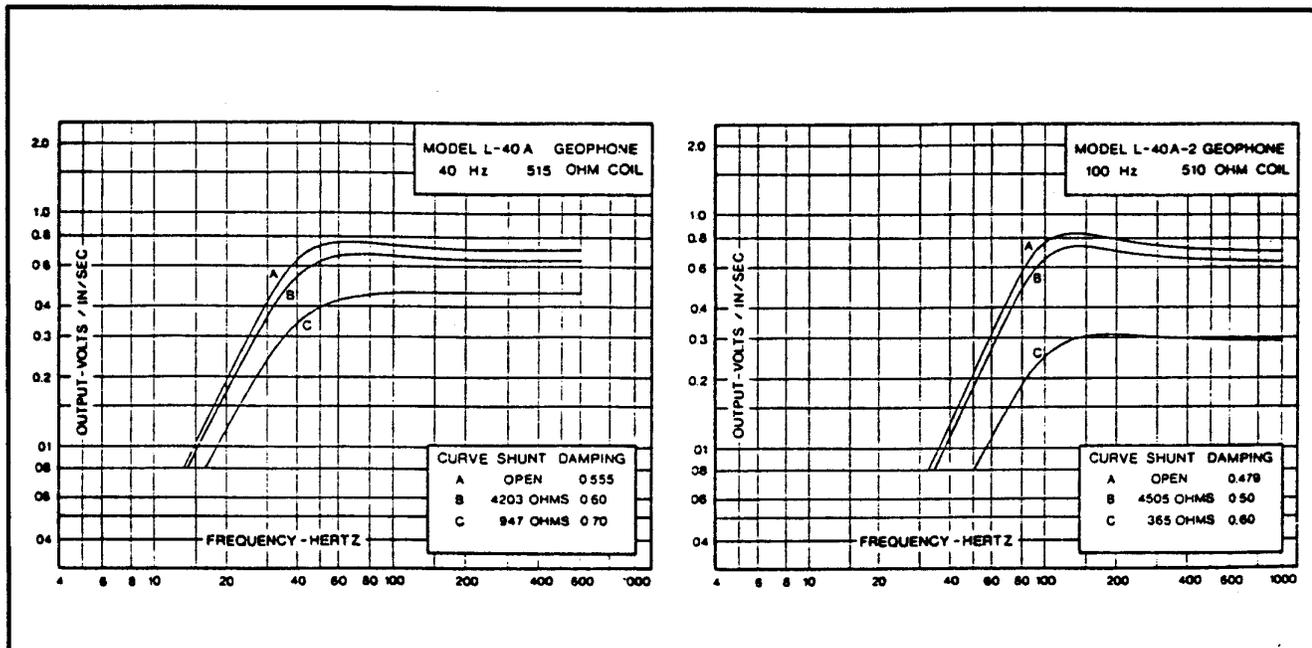


Fig. 1 Curvas de respuesta nominal de los geófonos utilizados en la toma de datos

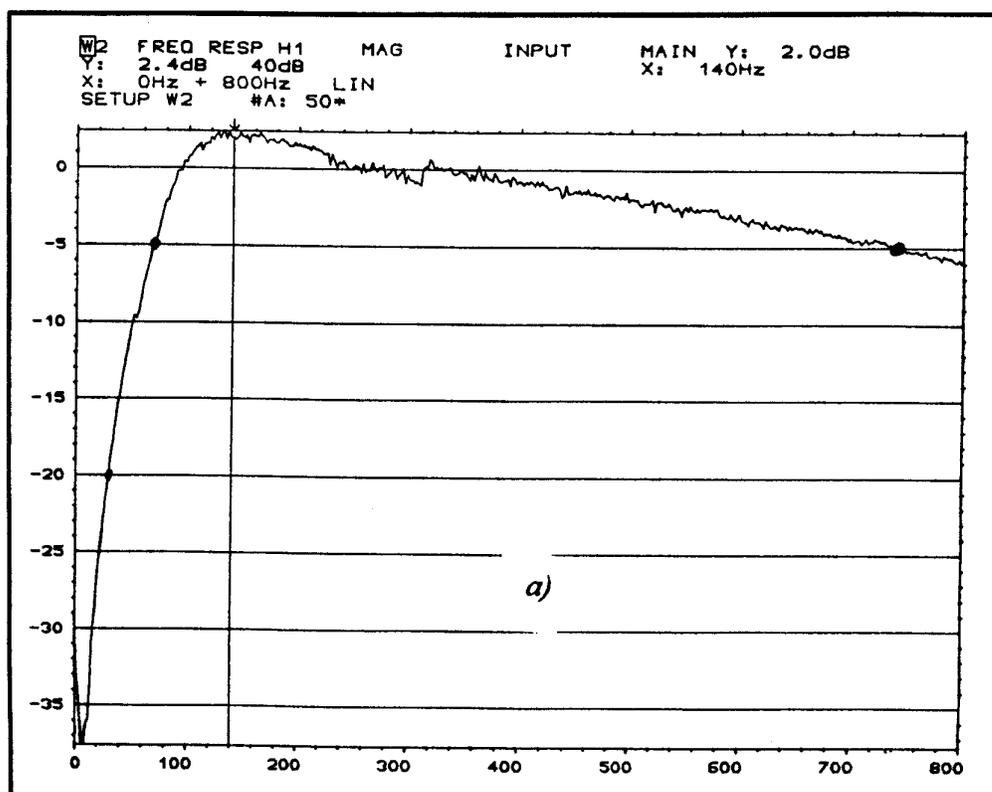


Fig. 2 Curva de respuesta obtenida por calibración en laboratorio para los geófonos Mark L40A2 de 100 Hz (fuente: Informe anual de 1995 del SGC)

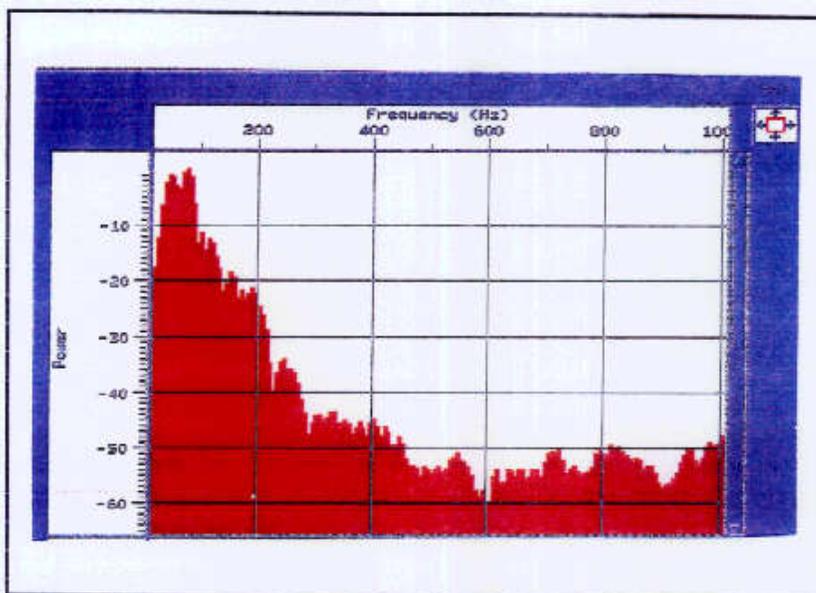


Fig.3 Espectro del registro obtenido a 10 m del punto de tiro, utilizando un stack de cuatro golpes con maza de 8 kg (fuente: Informe 1995 SGC)

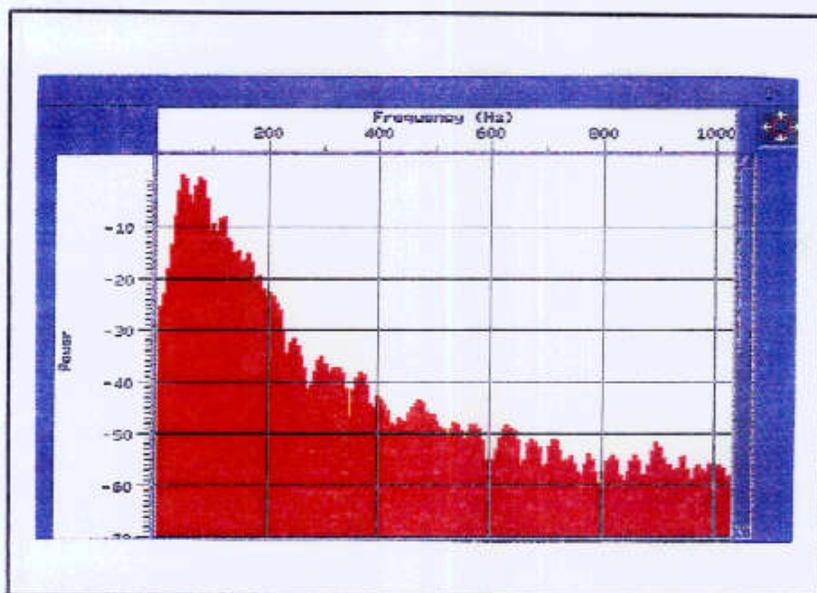


Fig. 4 Espectro del registro obtenido a 10 m del punto de tiro, utilizando un disparo de escopeta con cartucho de posta. (fuente: Informe 1995 SGC)

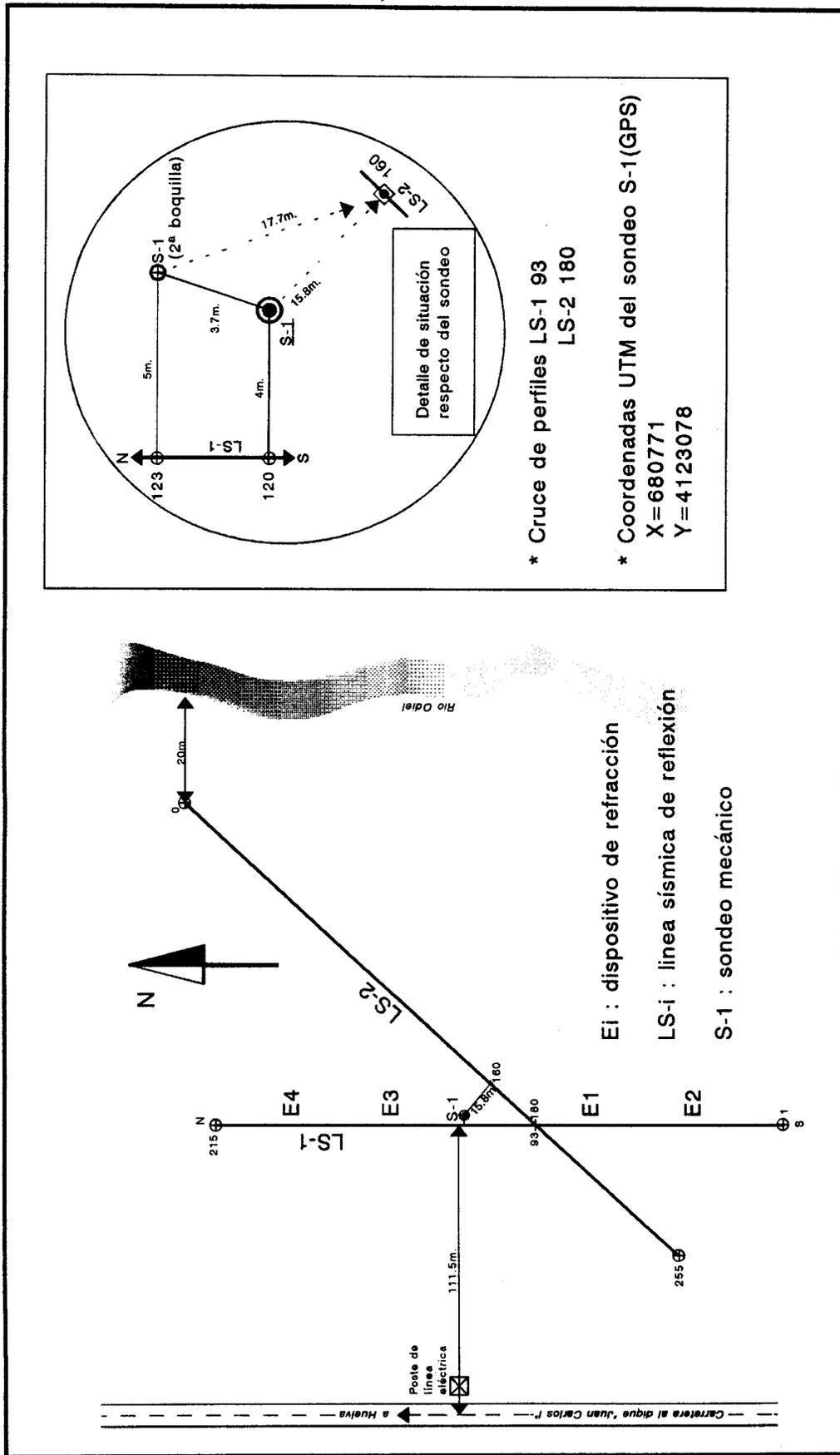


Fig. 6 Esquema de situación de los trabajos sísmicos en ISLA BACUTA (HUELVA)

3. INFORMACION PREVIA SOBRE EL CORTE GEOLOGICO.

3. INFORMACION PREVIA SOBRE EL CORTE GEOLOGICO

3.1 SEDIMENTOLOGIA

La columna litoestratigráfica facilitada del sondeo mecánico se reproduce en la fig. 7, que junto con el Informe de Sedimentología realizado por el equipo investigador de la Universidad de Huelva, permite su estudio clasificándola en los siguientes tramos de sedimentos:

- Basal, a partir de 38 m, de margas miocénicas.
- Tramo 1, de 38 a 31.8 m, con 6.2 m de gravas, de matriz arenosa.
- Tramo 2, hasta los 21 m, con 10.8 m de limos arcillosos.
- Tramo 3, hasta los 9.5 m, con potencia de 11.5 m de arenas de matriz limosa.
- Tramo 4, hasta 5.8 m, con 3.7 m de arenas de matriz arenosa.
- Tramo 5, hasta los 4 m, con 2.18 m de potencia de limos arcillosos.
- Tramo 6, hasta la superficie, con 4 m de limos arenosos.

Desde el punto de vista sísmico hay que tener en cuenta además los siguientes datos, extraídos del mencionado informe de sedimentología:

- El tramo 6, el más próximo a la superficie, está formado en realidad por una base de 1 m de potencia de fangos y raíces, sobre la que se deposita un relleno artificial de material de dragados y vegetación; además, según observaciones directas sobre el terreno durante la ejecución de los trabajos, al menos los primeros 50 cm del suelo están formados por una capa de limos extremadamente finos y sueltos, que constituyen un auténtico "colchón" amortiguador de la energía. Por esta razón, el acoplamiento de las fuentes de energía y de los geófonos con el suelo no ha sido bueno.

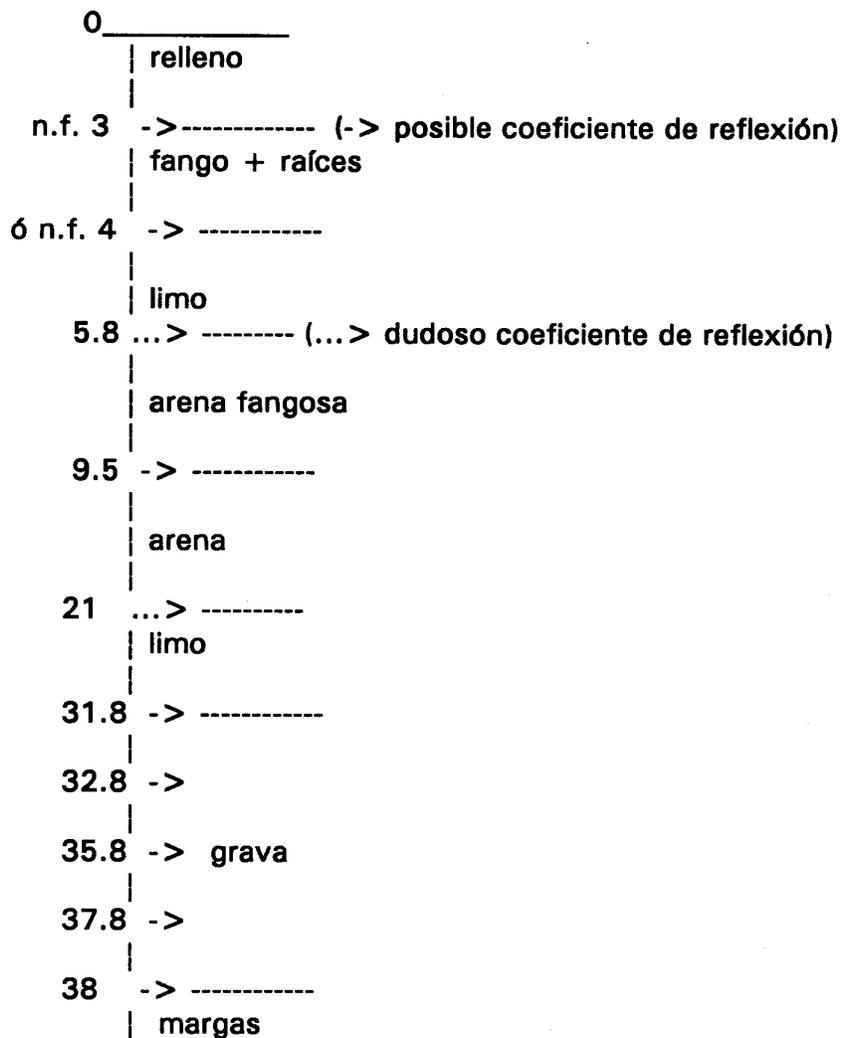
- El contacto entre los tramos 3 y 2 (arenas y limos) es transicional, pudiendo ser que no se constituya en un horizonte sísmico neto. Esto ocurre aún en mayor medida entre los tramos 4 y 5 (ver curvas de variación de % de arenas-limos en la fig. 7).

- El tramo de gravas 1, está formado en realidad por 4 subtramos, con potencias de 0.5 a 3 m; la resolución o diferenciación de las reflexiones en techo y muro de estos tramos requeriría la presencia de frecuencias útiles a esta profundidad

(32-38 m) superiores a los 2000 Hz, para capas de 0.5 m y de más de 300 Hz para capas de 3 m.(utilizando el criterio de longitud de onda igual o inferior al doble de la potencia de capa, y para velocidades de 2000 m/s).

- El nivel freático, se ha establecido en 4 m para la columna en el momento de perforar el sondeo y a 3 m durante la realización de los ensayos del CEDEX; este nivel debe actuar como un nuevo horizonte de reflexión, y posiblemente ser más somero tras las lluvias.

Por tanto, en principio, según criterios meramente litológicos, el corte sísmico sería:



Un aspecto importante a tener en cuenta es que para las granulometrías indicadas en el Informe de Sedimentología, el coeficiente de absorción de la energía de las ondas sísmicas puede llegar a ser del orden de hasta -13 dB/longitud de onda para zonas no saturadas, como ocurre en los primeros metros del suelo de estos perfiles; esto significa que si existiera un primer tramo de 6 m de potencia y con este coeficiente de atenuación, para una velocidad media de 600 m/s las frecuencias de 100 Hz (6 m de longitud de onda) se habrían atenuado -13 dB al atravesarlo, las de 500 Hz (1.2 m) se atenúan -65 dB y las de 1000 Hz (0.6 m) se atenúan más de 120 dB, imposibilitando la alta resolución por debajo de dicha capa.

Para zonas saturadas dicho coeficiente puede ser inferior a -1 dB/longitud de onda. La línea sísmica LS2 fue realizada tras unas importantes lluvias, que pueden haber modificado las características de transmisión de la energía de la primera porción del terreno.

3.2 DATOS DISPONIBLES SOBRE VELOCIDADES

Estos datos se han obtenido básicamente del Informe "Ensayos de "down hole" y perfiles de sísmica de refracción en la Isla de Bacuta" preparado por el equipo investigador del CEDEX en junio de 1995.

Los dispositivos de refracción fueron realizados según los cuatro segmentos E_i que se indican en la fig. 6; cada segmento es de 60 m, con 12 geófonos y tiros en centro y en extremos, mostrándose en la fig. 8a un ejemplo del tipo de resultados obtenidos para el dispositivo E₁.

La interpretación del conjunto de los segmentos registrados se indica en el esquema de la fig. 8b:

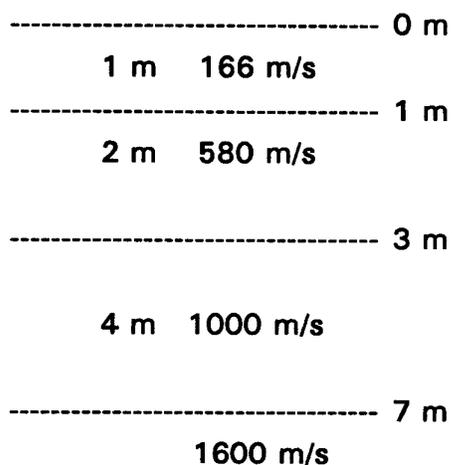
- . Se detecta una capa superficial de 1-2 m de potencia, y 350 m/s de velocidad de las ondas P, es decir, prácticamente igual que la velocidad de las ondas en el aire.
- . Se detecta un refractor a 4-6 m de profundidad, situándose en el tramo de limos arcillosos (5).

. No se detecta ningún refractor más profundo, teniendo la capa inferior una velocidad de 1500-1600 m/s.

Con los mismos registros presentados en el mencionado Informe se ha realizado una nueva interpretación exclusivamente para el punto de tiro, tomando los siguientes datos en el dispositivo de refracción E1 (fig. 9):

onda directa	166 m/s			
dromocrona 1	580 m/s	tiempo de interceptación	12 ms	
dromocrona 2	1000 m/s	"	"	17 ms
dromocrona 3	1600 m/s	"	"	24 ms

de donde se obtiene el siguiente corte:



En la misma fig. 9 se presenta el registro sintético obtenido con este modelo y su buena comparación con los datos registrados en campo, lo que da cierta validez a la hipótesis interpretativa, que sobre la interpretación anterior presenta las siguientes características:

. Se localiza una primera capa métrica de velocidad extremadamente lenta, más acorde con las observaciones sobre el terreno, y que coincide con el primer tramo de limos provenientes de material de dragados.

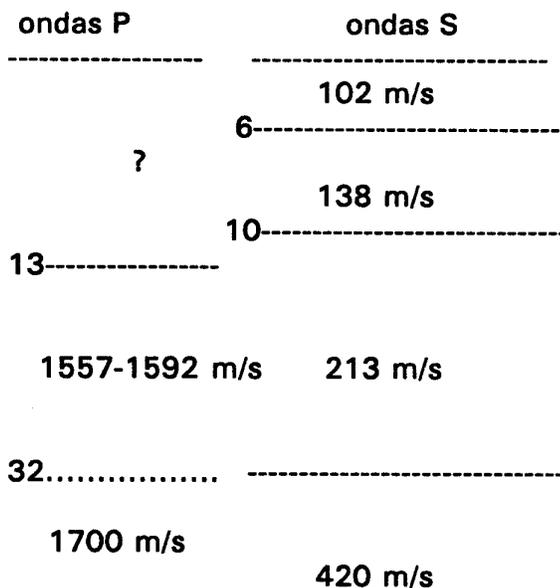
. La segunda capa, de 580 m/s y 2 metros de potencia, tiene como base los fangos rojos con raíces de inicio del tramo 6.

. El último refractor, situado en el tramo 4 de arenas fangosas, coincide bien con un cambio brusco en el contenido de % en peso de arenas y limos.

Cada una de estas interfases presenta un contraste de impedancia acústica que dará lugar a una reflexión; su posición se ha señalado en la columna de la fig. 7, indicándolo como "interpretación de refracción".

Del conjunto de los dispositivos de refracción E1, E2, E3 y E4 estudiados por el Informe del CEDEX, se deduce que la variación de velocidades y potencias de la primera capa a lo largo de la línea sísmica, aunque no es importante, puede producir variaciones de hasta 6 ms en los tiempos de tránsito entre el norte y sur de la zona, no siendo previsible que se produzcan problemas importantes de correcciones estáticas.

Los resultados del ensayo de down-hole se encuentran recogidos en la fig. 10, de donde se deduce el siguiente esquema del subsuelo:



Aunque hay tramos donde no existen variaciones en la velocidad de las ondas P, si que se producen coeficientes de reflexión para las ondas S, y por tanto cabe la posibilidad de recibir ondas convertidas PS. Sobre el gráfico de ondas P de la fig.10, se puede distinguir un tramo de variación de velocidad aproximadamente a partir de 32 m, que marcaría la entrada en las gravas (1), con una velocidad superior a 1700 m/s. Estos valores se han llevado también a la fig. 7, junto a la columna del sondeo mecánico.

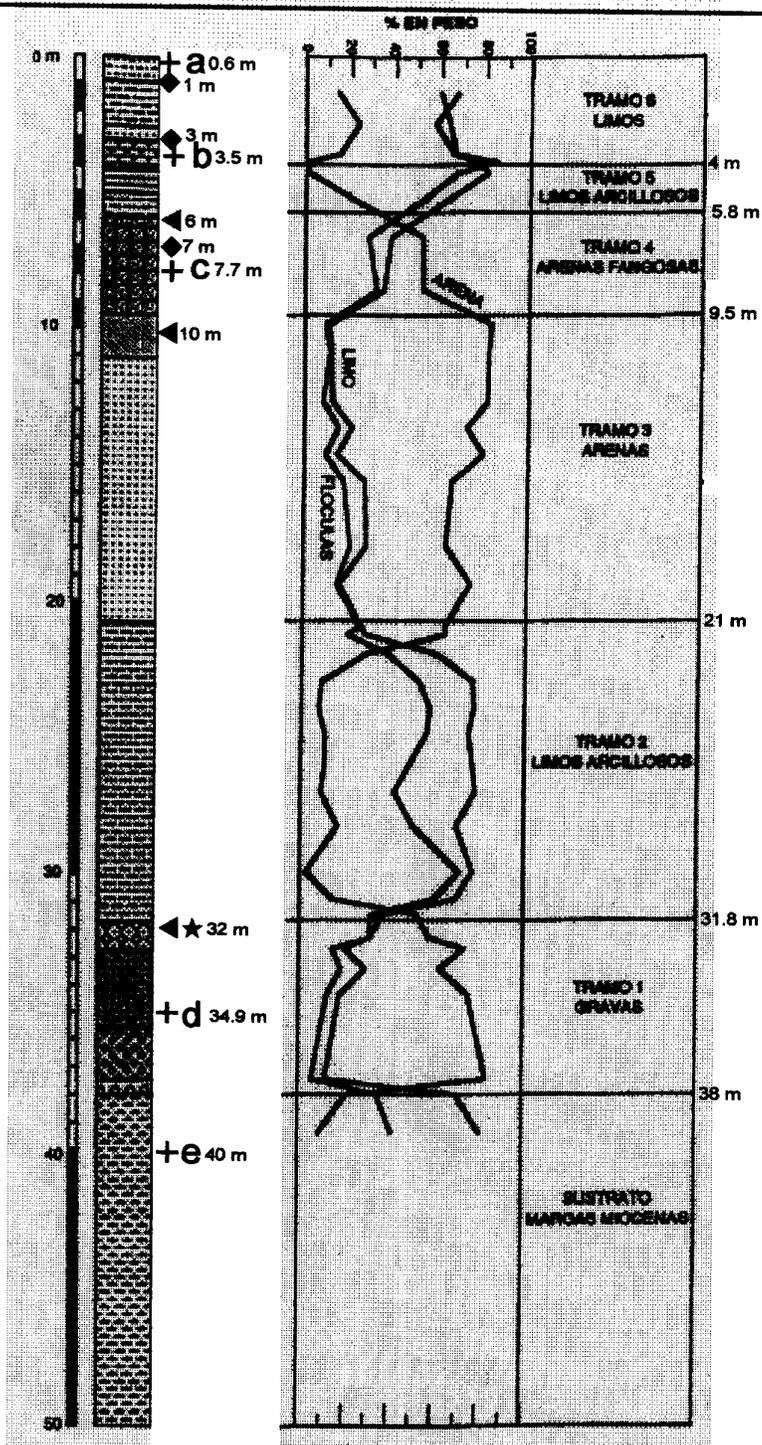
En conclusión:

. Los datos de velocidad disponibles no permiten asegurar la existencia de coeficientes de reflexión en las interfases entre todos los tramos que definen la secuencia estratigráfica del sondeo; según puede apreciarse en la fig. 7, la información es algo contradictoria:

. Según la interpretación de la refracción, pueden existir algunos cambios de velocidad asociados a cambios estratigráficos (a 1 m, 3 m y 7 m de profundidad).

. Según la interpretación de los datos del down hole, no existen tales variaciones en ondas P, excepto para el paso del tramo 1 al 2 (a los 32 m), pero sí en ondas S (a los 6 m, 10 m y 32 m de profundidad).

En estas condiciones no parece recomendable la construcción de modelos sintéticos para trazas sísmicas, ya que puede servir más de confusión que de ayuda en la interpretación. No obstante toda esta información será tenida en cuenta en la interpretación u obtención de un modelo geológico del subsuelo a partir de los datos de reflexión registrados.



- ◆ Interpretación de refracción
- ★ Interpretación de down-hole ondas P
- ◄ Interpretación de down-hole ondas S
- +a Interpretación registro de reflexión

Fig. 7 Columna estratigráfica del sondeo S1, con indicación de la posición del posible origen de los sucesos sísmicos identificados en los ensayos de refracción, down-hole y reflexión. (fuente de la columna: Informe Univ. Huelva)

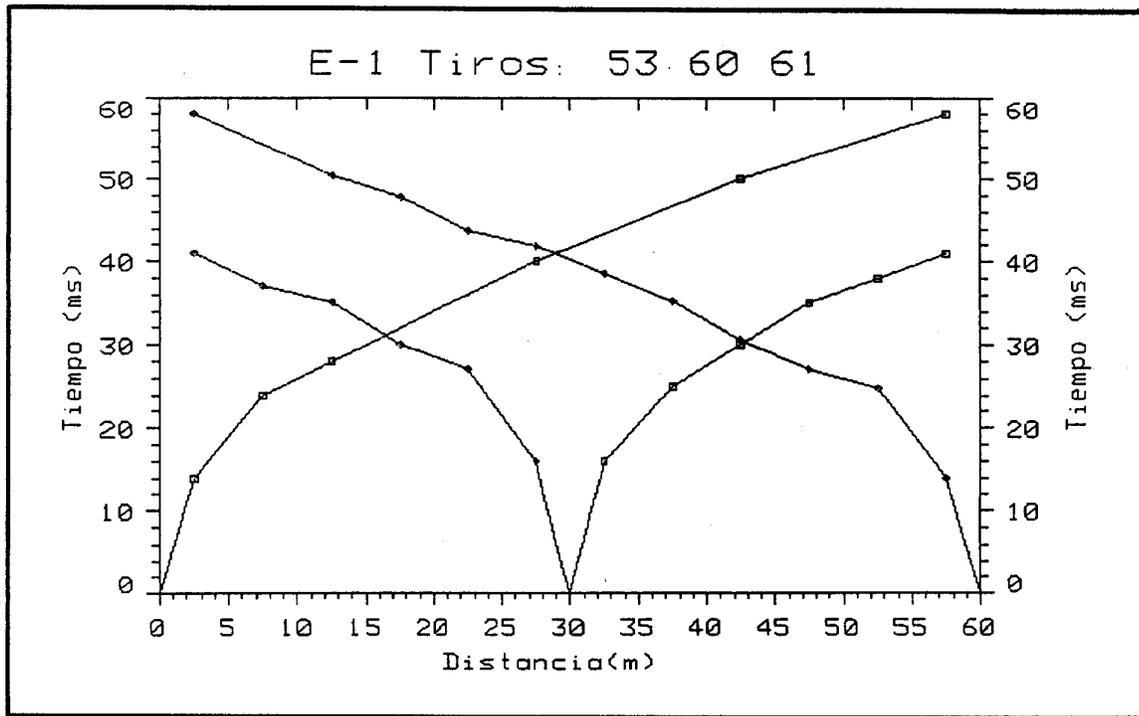


Fig. 8a Resultado del dispositivo de refracción E1 (fuente: Informe CEDEX)

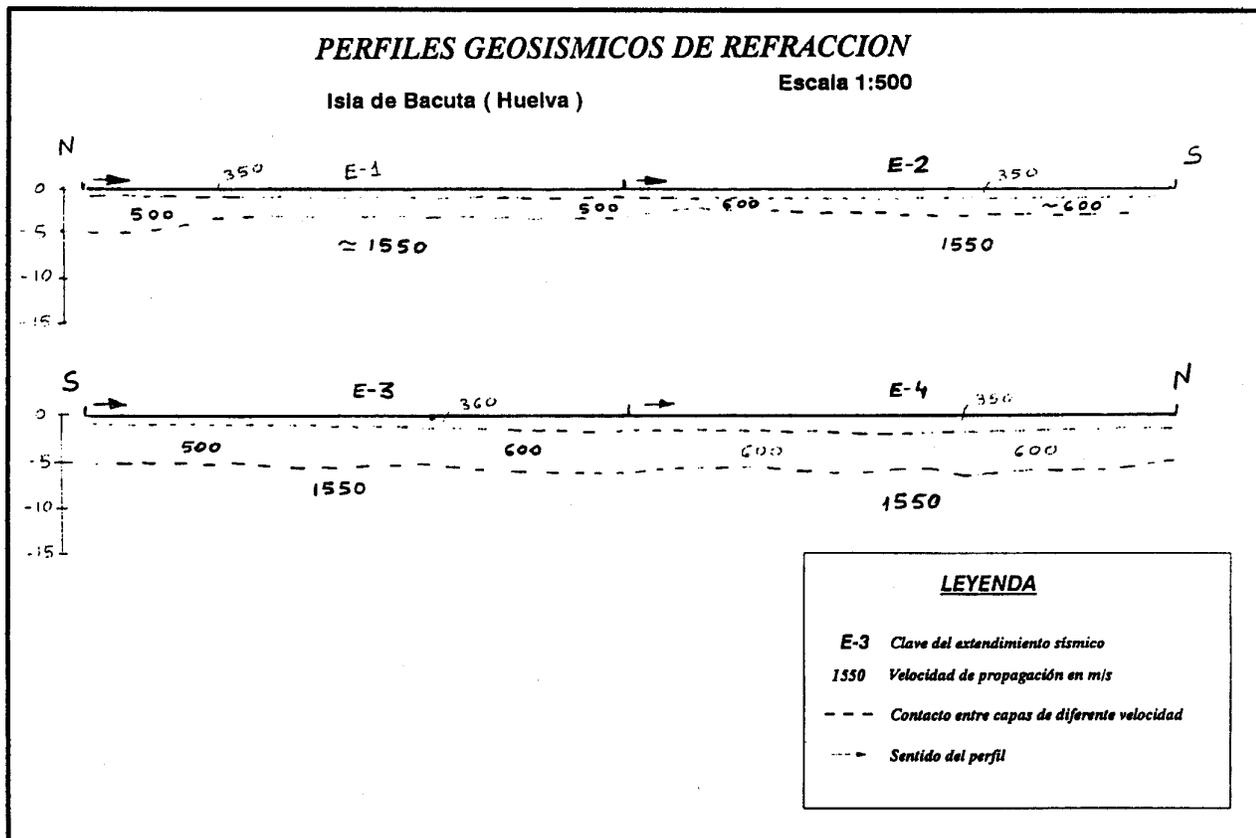
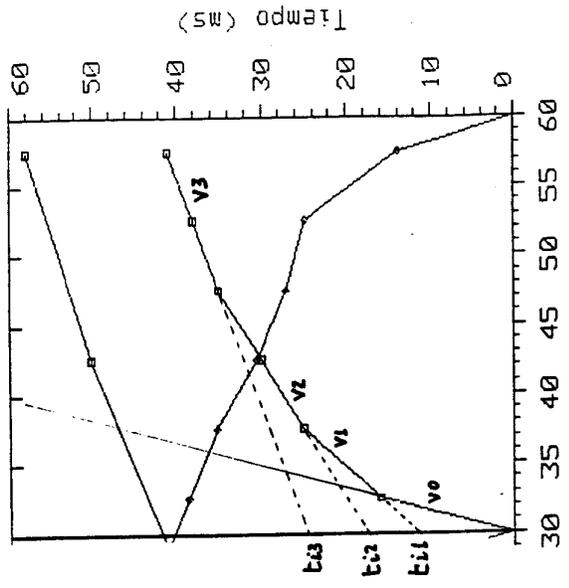
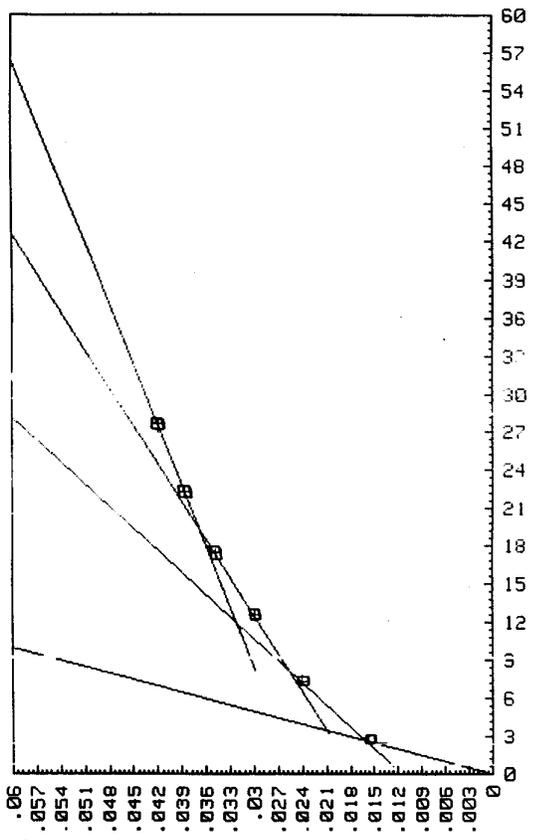
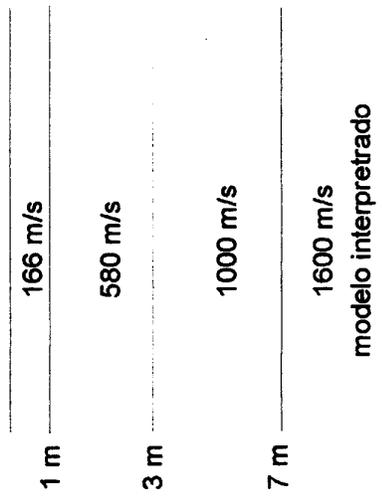


Fig. 8b Esquema de interpretación de los dispositivos de refracción (fuente: Informe CEDEX)



reinterpretación del segmento E1:

- v0=166 m/s
- v1=580 m/s t11=12 ms
- v2=1000 m/s t12=17 ms
- v3=1600 m/s t13=24 ms



TRAZADO DE BONDORUNAS PARA 4 CAPAS

- V(1)= 166
- V(2)= 580
- V(3)=1000
- V(4)=1600

TIEMPOS DE INTERCPTACION EN EL ORIGEN, DISTANCIA Y ANGULO CRITICO:

Ti(1)= 0.000	Xc(1)= 0	Ac(1)=18.48	grados
Ti(2)= .012	Xc(2)= 1	Ac(2)=39.39	grados
Ti(3)= .017	Xc(3)= 3	Ac(3)=42.98	grados
Ti(4)= .024	Xc(4)= 8	Ac(4)= 0.00	grados

Sismograma teórico del modelo interpretado, con posición de los tiempos leídos

Fig. 9 Reinterpretación de los datos de sísmica de refracción para un tiro del segmento E1

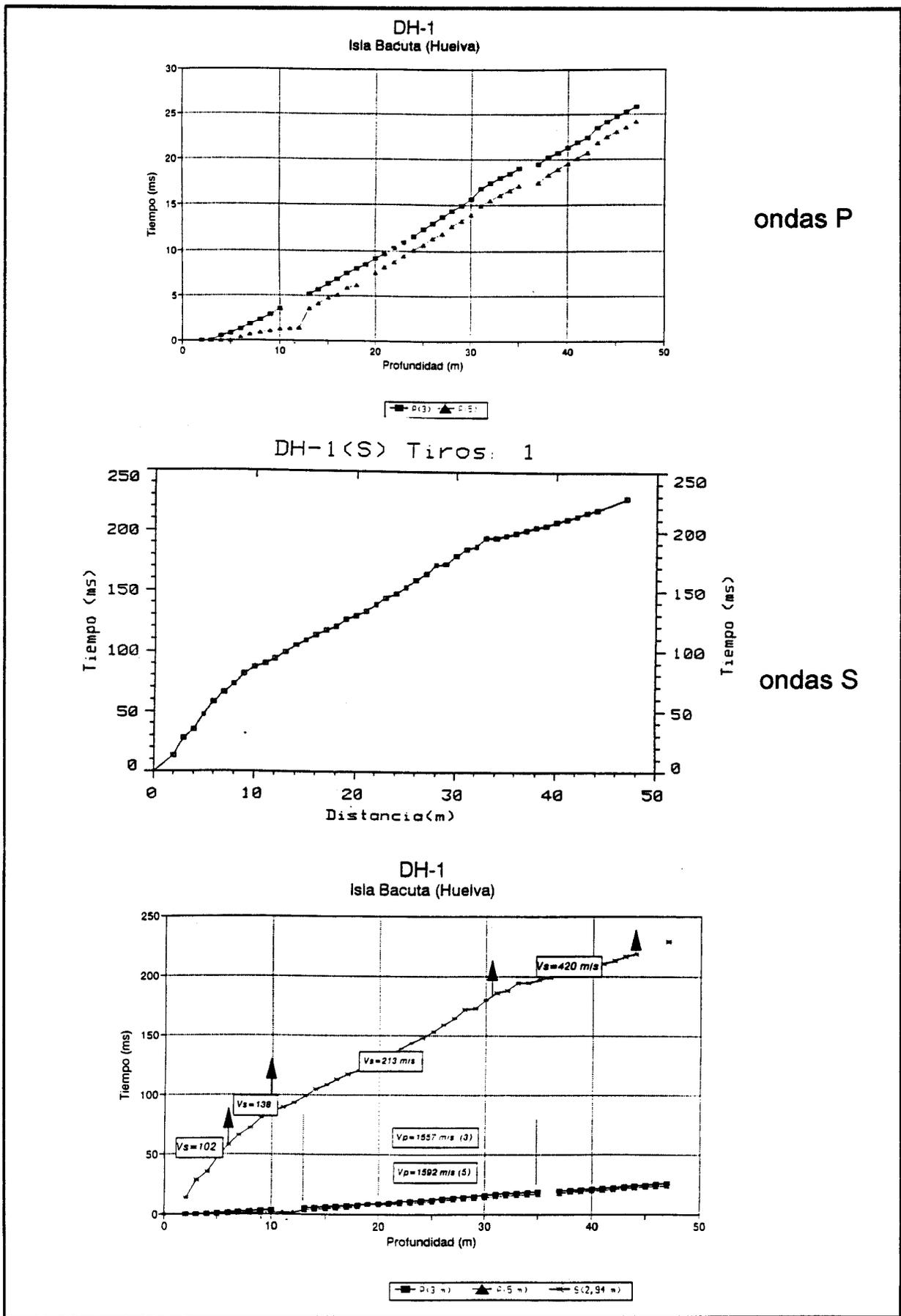


Fig. 10 Resultados del ensayo de "down-hole" en el sondeo S1, para ondas P y ondas S (fuente: Informe CEDEX)

4. SOFTWARE UTILIZADO EN EL PROCESO.

4. SOFTWARE UTILIZADO EN EL PROCESO.

El proceso de datos que va a ser descrito en los párrafos siguientes, ha sido realizado en el Servicio Geológico de Cataluña (I.C.C), en Barcelona, con los siguientes medios:

Programa: Paquete de programas para proceso de sísmica de reflexión en 2D "PROMAX" 2D ver. 5.1 (Advanced Geophysical Corporation, Landmark Graphics Company)

Ordenador: Estación de trabajo SPARK II (SUN), con 64 Mbytes de memoria RAM y 1.4 Gbytes de disco duro

Periféricos: - Lectora de cintas exabyte.

- Plotter HP de inyección de tinta DESINGJET 650C.

- Conexión en red mixta (PC-UNIX).

5. PREPROCESO DE DATOS.

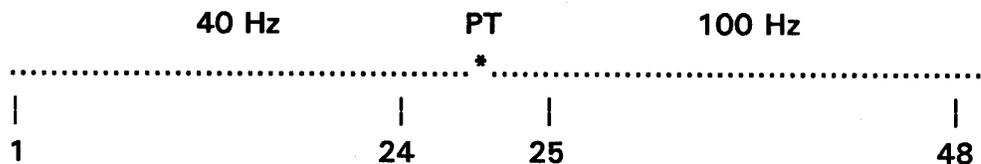
5. PREPROCESO DE DATOS

5.1 SEPARACION DE FICHEROS

Sobre las dos líneas sísmicas LS1 y LS2 estaquilladas, se han registrado cinco perfiles sísmicos, para los que se va a utilizar la siguiente nomenclatura:

P1T40 en LS1, fuente tiros de escopeta, geófonos de 40 Hz
P1T100 en LS1 " " " " 100 Hz
P1G40 en LS1 " , fuente golpes de maza, geófonos de 40 Hz
P1G100 en LS1 " , " " " " 100 Hz
P2T100 en LS2, fuente tiros de escopeta, geófonos de 100 Hz

La labor inicial del proceso ha consistido en separar los ficheros de campo de la línea LS1, que fue explotada registrando en 48 canales y tiro central, utilizando los canales 1-24 para los geófonos de 40 Hz (dispositivo hacia atrás) y los canales 25-48 para los geófonos de 100 Hz (dispositivo hacia adelante), según el siguiente esquema:



Se ha procedido además a renombrar los registros de tal forma que resultaran correlativos en puntos de tiro para cada tipo de dispositivo de geófonos-fuente de energía. En la descripción del proceso de datos se va a utilizar como nomenclatura para los puntos de tiro la secuencial, empleándose no obstante la numeración real en campo de las trazas para las secciones finales.

El esquema de registro y configuración de cada perfil es el siguiente::

* Sobre el estaquillado de dirección S-N, de 1 a 215:

**LS1
P1T40 / P1G40**

	S		N

estaciones	1		215
PT	30.....		215
CDP	15.5.....		212
CDP 12%	26.5.....		201

- P1G40:**
- . primer punto de tiro: estación 30
 - . último punto de tiro: estación 215
 - . geófonos de 40 Hz
 - . fuente: maza
 - . tiro en cabeza o dispositivo hacia atrás

- P1T40:**
- . primer punto de tiro: estación 30
 - . último punto de tiro: estación 215
 - . geófonos de 40 Hz
 - . fuente: escopeta
 - . tiro en cabeza o dispositivo hacia atrás

**LS1
P1G100 / P1T100**

	S		N

estaciones	1		215
PT	30.....		209
CDP	33.....		212
CDP 12%	44.....		215

- P1G100:**
- . primer punto de tiro: estación 30
 - . último punto de tiro: estación 209
 - . geófonos de 100 Hz
 - . fuente: maza
 - . tiro en cola o dispositivo hacia adelante

- P1T100:**
- . primer punto de tiro: estación 30
 - . último punto de tiro: estación 209
 - . geófonos de 100 Hz
 - . fuente: escopeta
 - . tiro en cola o dispositivo hacia adelante

El PT 186 es el último para el que se han registrado 24 trazas.

Para toda la LS1, en número de estación de cada punto de tiro se obtiene sumando 29 al número de orden secuencial.

* Sobre el estaquillado de dirección NE-SW, de 0 a 255:

- P2T100 :
- . primer punto de tiro: estación 0
 - . último punto de tiro: estación 243
 - . geófonos de 100 Hz
 - . fuente: escopeta
 - . tiro en cola o dispositivo hacia adelante

		LS2		
		P2T100		
		S	N	

estaciones	255			0
PT		243.....		0
CDP		249.....		3
CDP 12%		245.5.....		14

El PT 226 es el último para el que se han registrado 24 trazas.

El número de estación de cada punto de tiro se obtiene restando una unidad al número de orden secuencial.

5.2 IMPLANTACION DE LA GEOMETRIA

Para cada línea sísmica se han preparado los ficheros con la geometría de los dispositivos mediante las coordenada X,Y,Z de cada estaquilla del terreno donde se han ido realizando los puntos de tiro y posición de geófonos; se ha adoptado el valor de cota Z=0 para toda la zona, dada la horizontalidad (aparente) del suelo; así mismo se ha declarado la coordenada Y=0 para todos los casos, es decir, se ha tomado como única variable de la geometría la distancia desde cada estaquilla a la primera de cada línea.

Para los perfiles P1T100, P1G100 y P2T100, puesto que han sido explotados con tiro en cabeza (dispositivo hacia adelante), se han declarado más trazas de terreno que las realmente implantadas, a fin de tener en cuenta la terminación en "escalón" de la cobertura; estas falsas trazas son eliminadas posteriormente.

5.3 EDICION

Se ha procedido a revisar sobre pantalla de ordenador uno a uno todos los registros efectuados, a fin de eliminar las trazas ruidosas, muertas y llevar a cabo los cambios de polaridad detectados.

Los ruidos han sido el resultado de algún geófono mal acoplado al suelo, personal andando por la línea y tráfico ó trabajos en la carretera próxima; las trazas muertas fueron debidas principalmente al sistema de registro seguido en la terminación de la cobertura.

En la fig. 11 se da un ejemplo de registros con trazas muertas debido a la anulación de canales por llevar el punto de tiro más allá de lo que permitiría el registro de 24 trazas sobre el terreno; pertenecen al perfil P1G100, PT 189, 190 y 191 (la numeración para la fuente que aparece en estas figuras se refiere al orden secuencial; por tanto el primer tiro dado (source = 1) es el efectuado en la estación 30 para este perfil); en efecto, en la explotación de este perfil, el último PT registrado con 24 trazas fue el dado en la estación 186, debiendo anularse las tres últimas trazas para el registro del tiro 189, etc.

En la fig. 12 se da un ejemplo del mismo perfil con registros con trazas ruidosas, que afecta a los geófonos de las estaciones 67 y 68, y que por lo tanto para el tiro dado en la estación 46 (source = 17), se manifiesta en las trazas 16 y 17, pero para el siguiente tiro pasa a las trazas 15/16, etc. Este tipo de ruidos es posiblemente debido a falsos contactos en la conexión de los cables.

En la fig. 13 se da un ejemplo, también del mismo perfil, en donde en la estaquilla 75 hay un geófono con polaridad cambiada, por lo que en el tiro dado en la estación 61 (source = 32), que registra los geófonos de las estaciones 67 a 90, hay que anular la traza 9, mientras que en el tiro siguiente pasa a ser la traza 8, etc.

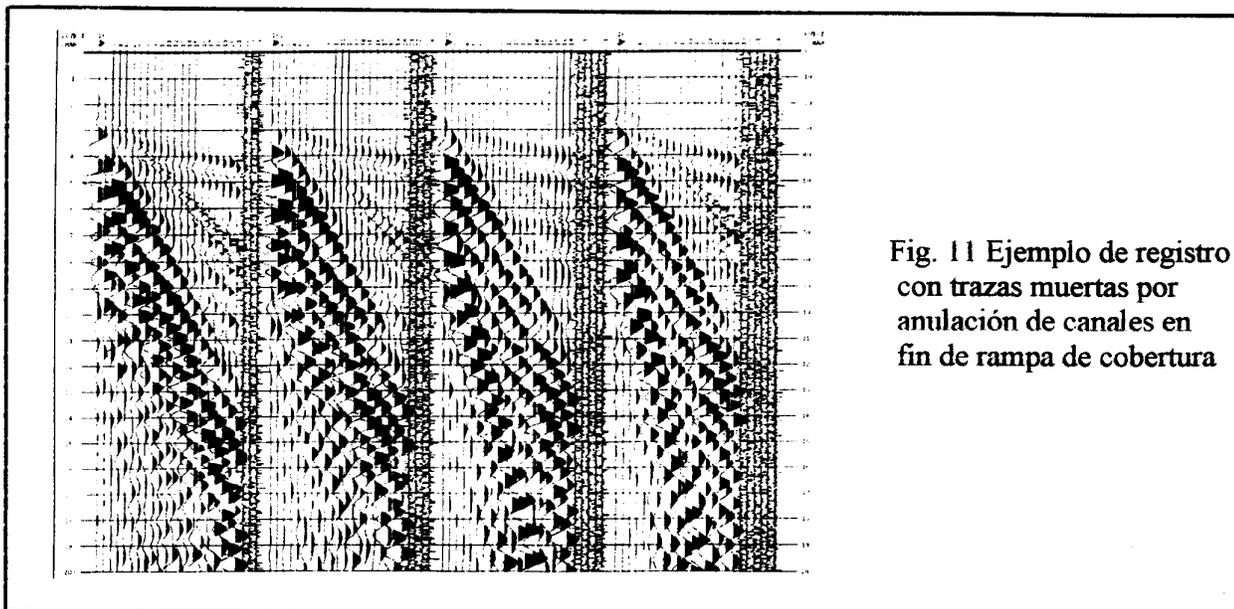


Fig. 11 Ejemplo de registro con trazas muertas por anulación de canales en fin de rampa de cobertura

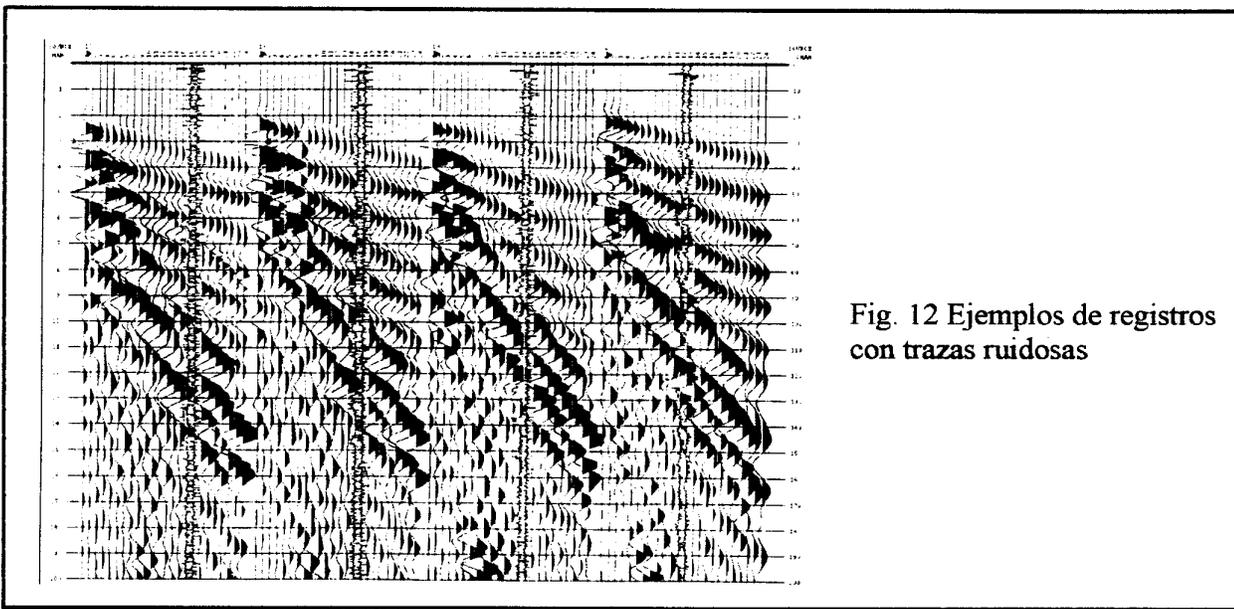


Fig. 12 Ejemplos de registros con trazas ruidosas

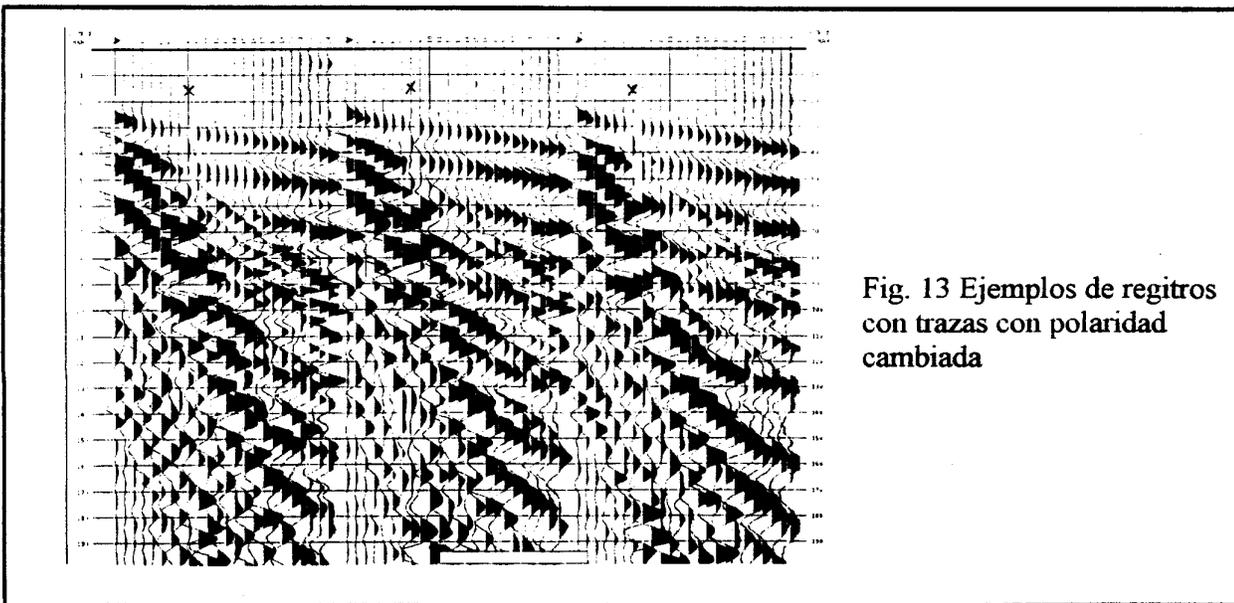


Fig. 13 Ejemplos de registros con trazas con polaridad cambiada

6. ANALISIS DE LOS SUCESOS REGISTRADOS.

6. ANALISIS DE LOS SUCESOS REGISTRADOS

Para obtener una primera información sobre los sucesos sísmicos registrados, se ha procedido a analizar una colección de registros brutos (con aplicación de AGC) a lo largo del perfil P2T100, correspondientes a los PT 1, 2, 3, 4, 120, 121, 122, 123 y 220, 221, 222, 223 (número de orden secuencial; la estación correspondiente a donde pertenece cada tiro se obtiene restando una unidad a su número de orden, ya que se comenzó disparando en la estación 0).

Estos registros están recogidos en la fig. 14a; en todos ellos aparecen los mismos sucesos, habiéndose señalado y tomado los datos de aquellos en los que resultaban más evidentes. En la nomenclatura empleada para sucesos de refracción y de reflexión, se utilizan dos letras: la primera identifica la interfase de procedencia y la segunda el tipo de suceso (r=refracción, x=reflexión). Los sucesos identificados se han sintetizado en el registro de la fig. 15, y son los siguientes:

A/ ONDA AEREA, con velocidad aparente, medida en el registro, $v = 354$ m/s; contiene altas frecuencias.

D/ ONDA DIRECTA, con velocidad aparente, medida en el registro $V = 88$ m/s; se produce en los primeros decímetros del suelo.

ar/ REFRACCION, de velocidad aparente, medida en el registro $V = 347$ m/s; tiempo de interceptación en el origen de $t_i = 3.5$ ms; interpretada como refracción en la base de la primera capa de 88 m/s (suceso D), permite calcular una potencia para dicha capa de $z = 0.16$ m.

br/ REFRACCION, con velocidad, basada en los datos de refracción y modificada por la velocidad aparente medida en registro, de $V = 1070$ m/s; en algunos casos la velocidad aparente llega a 1500 m/s posiblemente por solape con otro suceso; el tiempo de interceptación en el origen es de $t_i = 22$ ms; junto con los suceso D (como onda directa) y ar, se obtiene una potencia para la capa de 340 m/s de $z = 3.3$ m.

GR/ GROUNDROLL, de velocidad aparente, medida en registro $V = 277$ m/s. Contiene repeticiones cada 17 ms que ocupan toda la porción del registro desde 60 ms hasta el final, en todos los canales. Producido posiblemente en la capa (6) de limos.

cx/ REFLEXION, con un tiempo aproximado para offset cero de $t_0 = 30$ ms. Los tiempos de tránsito de las capas anteriores son:

zona de 88 m/s $t = 2.7$ ms
zona de 340 m/s $t = 19.5$ ms (total 22.2 ms)

por lo que esta reflexión puede provenir de la base de la capa de 1070 m/s, con un tiempo de tránsito de 7.8 ms ($30 - 22.2$), lo que supone una potencia de 4.2 m y una profundidad de 7.5 m. La velocidad aparente de estos sucesos asignados a reflexiones es del orden de 1500 m/s.

dx/ REFLEXION, con $t_0 = 64$ ms, lo que supone un tiempo de tránsito desde la interfase anterior de $64 - 30 = 34$ ms; adoptando una velocidad de 1600 m/s, según los datos de refracción y de down-hole, supone una potencia de 27.2 m, y una interfase a una profundidad de 34.9 m.

ex/ REFLEXION, con $t_0 = 70$ ms; el tiempo de tránsito desde la interfase anterior es de 6 ms; asumiendo la velocidad de 1700 m/s deducida del down-hole para las ondas P, supone una potencia de 5.1 m y una profundidad de 40 m.

S/ ONDAS S: del modelo de distribución de velocidad de las ondas S obtenido por down-hole, se deduce que pueden aparecer reflexiones de estas ondas a partir de 125-175 ms, con velocidades aparentes de 140-220 m/s, afectando a la primera mitad de las trazas del registro. En la fig. 14a se han identificado algunos sucesos que pueden pertenecer a este tipo, que en ningún caso suponen un ruido perjudicial para las reflexiones.

Con estos datos se puede hacer la siguiente hipótesis sobre el corte geosísmico:

<u>interfase</u>	<u>cota</u>	<u>potencia</u>	<u>velocidad</u>	<u>t tránsito</u>	<u>tw</u>	<u>suceso</u>
						aérea <u>A</u>
0	0					
		0.16	88	2.7		directa <u>D</u>
a	0.16				2.7	reflexión <u>ax</u> refracción <u>ar</u>
		3.3	340	19.5		ground roll
b	3.5				22.2	reflexión <u>bx</u> refracción <u>br</u>
		4.2	1070	7.8		
c	7.7				30	reflexión <u>cx</u> refracción <u>cr</u>
		27.2	1600	34		
d	34.9				64	reflexión <u>dx</u>
		5.1	1700	6		
e	40				70	reflexión <u>ex</u>

2000 (supuesto)

El registro teórico debido a este modelo se representa en la fig. 16, dándose una buena coincidencia con los sucesos realmente registrados, como se puede ver por comparación con el tiro PT4 del perfil P2T100 mostrado como ejemplo:

. La primera llegada es la refracción ar para las primeras trazas, pasando luego a una interferencia de la reflexión cx con la refracción br, y debiéndose a la refracción cr para las últimas trazas. La reflexión es la que produce la onda coherente situada como suceso posterior a la primera llegada, siendo su tiempo real algo mayor al considerado en el modelo ($t_0 = 40$ ms).

. En llegada posterior, la refracción ar se ve interferida por la reflexión bx.

. La onda directa del modelo es claramente coincidente con la registrada, pudiendo estar superpuesta a la reflexión ax.

. La reflexión dx tiene buena coincidencia con el siguiente suceso coherente en el registro, aunque su tiempo de inicio real es algo menor que el del modelo.

. La reflexión ex coincide con el siguiente suceso coherente del registro, aunque hay que tener en cuenta que el suceso registrado es una clara interferencia entre las reflexiones dx y ex, situándose el pico de la onda del suceso ex por debajo de los 80 ms.

. Pudiera existir un suceso de reflexión, de poca amplitud, intermedio entre el cx y el dx.

Estas interfases se han marcado también en la fig. 7, como "interpretación del registro de reflexión":

- . a) Representa la potencia de los primeros decímetros de limos muy finos, secos.
- . b) Es la base del material de dragados y/o nivel freático.
- . c) Es una interfase en el tramo 4 de arenas fangosas, que marca la transición en los contenidos de arena/limo.
- . d) Se sitúa en el tramo 1 de gravas.
- . e) Se sitúa a 2 m del inicio del substrato de margas.

Este modelo no pretende ser más que una base de partida, siendo evidente que una diferencia entre las velocidades reales y las interpretadas supondría una variación en el inicio de las reflexiones (t_0) de estas interfases y su asignación a horizontes litológicos; por ejemplo, con mayores velocidades superficiales, se situarían a tiempos menores, y por tanto a menor profundidad las interfases marcadas d) y e), que podrían entonces identificarse como el paso del tramo 2 al 1, y del 1 al substrato respectivamente.

El modelo es en todo caso válido para tener una primera idea del origen de los sucesos registrados, pudiendo además obtenerse las siguientes conclusiones para orientar el proceso de datos:

* Resultan identificables por reflexión al menos las interfases denominadas c, d y e en el modelo establecido.

* No debe efectuarse la supresión (muting) de la primera llegada, ya que es muy probable su interferencia con reflexiones, y sitúa la interfase b, aunque como dromocrona.

* Un filtro pasa alta o un filtro de velocidad debe eliminar los sucesos de Ground Roll y onda aérea; dada la interferencia del GR con las señales de reflexión, los filtros pueden también perjudicar la coherencia de estas señales útiles.

* La interferencia (continuidad aparente) del GR y de reflexiones de gran move out como la bx, con reflexiones posteriores, produce en el registro la formación de sucesos con apariencia de curvatura inversa a la normal.

* A pesar de haber enterrado los geófonos, se recibe una onda directa aérea; es no obstante bastante posible que dicho suceso se vea potenciado por una onda directa que ha viajado por los primeros decímetros del terreno y de velocidad semejante a la del aire.

* El Ground Roll es de muy alta amplitud, por lo que a pesar del rango dinámico y de la técnica de amplificación IFP utilizada por el registrador Bison empleado, la señal de reflexión se ve perjudicada por las siguientes razones:

- . El GR puede ser muy perturbador en los resultados de AGC en proceso según la ventana elegida para cálculo de esta amplificación.
- . Se solapa en gran parte con el registro útil, sobre todo en los primeros canales.
- . No se puede eliminar en campo, con "filtros de terreno", al haberse utilizado un sólo geófono por traza, como exige la corta intertraza elegida de acuerdo con la resolución buscada.

Estos mismos sucesos son observables en cualquiera de los registros efectuados; en la fig. 17 se muestran como ejemplo los registros del perfil P1T100 y P1G40 para los puntos de tiro 4,51,121,151 (número de orden, correspondientes a las estaciones 33, 80, 150 y 180), en registro bruto y con aplicación de AGC en ventana de 40 ms.

En el registro 51 del perfil P1G40 se aprecia la presencia de una serie de sucesos de baja frecuencia, con carácter aparentemente cíclico y velocidades aparentes entre 800-1500 m/s, variable con el offset, pero con curvatura o moveout contrario al de una reflexión (efecto anteriormente aludido); aunque superpuestos a las reflexiones (de hecho, el suceso de 1513 m/s que se presenta sobre los 115 ms, puede ser una reflexión) se diferencian de estas por aparecer a lo largo de todo el tiempo de registro.

La aplicación de amplificaciones por AGC permite realzar más las señales de bajas amplitudes, obscurecidas por el GR, aunque como puede observarse en la fig. 17, resulta bastante ineficaz en las porciones de registro con superposición de sucesos.

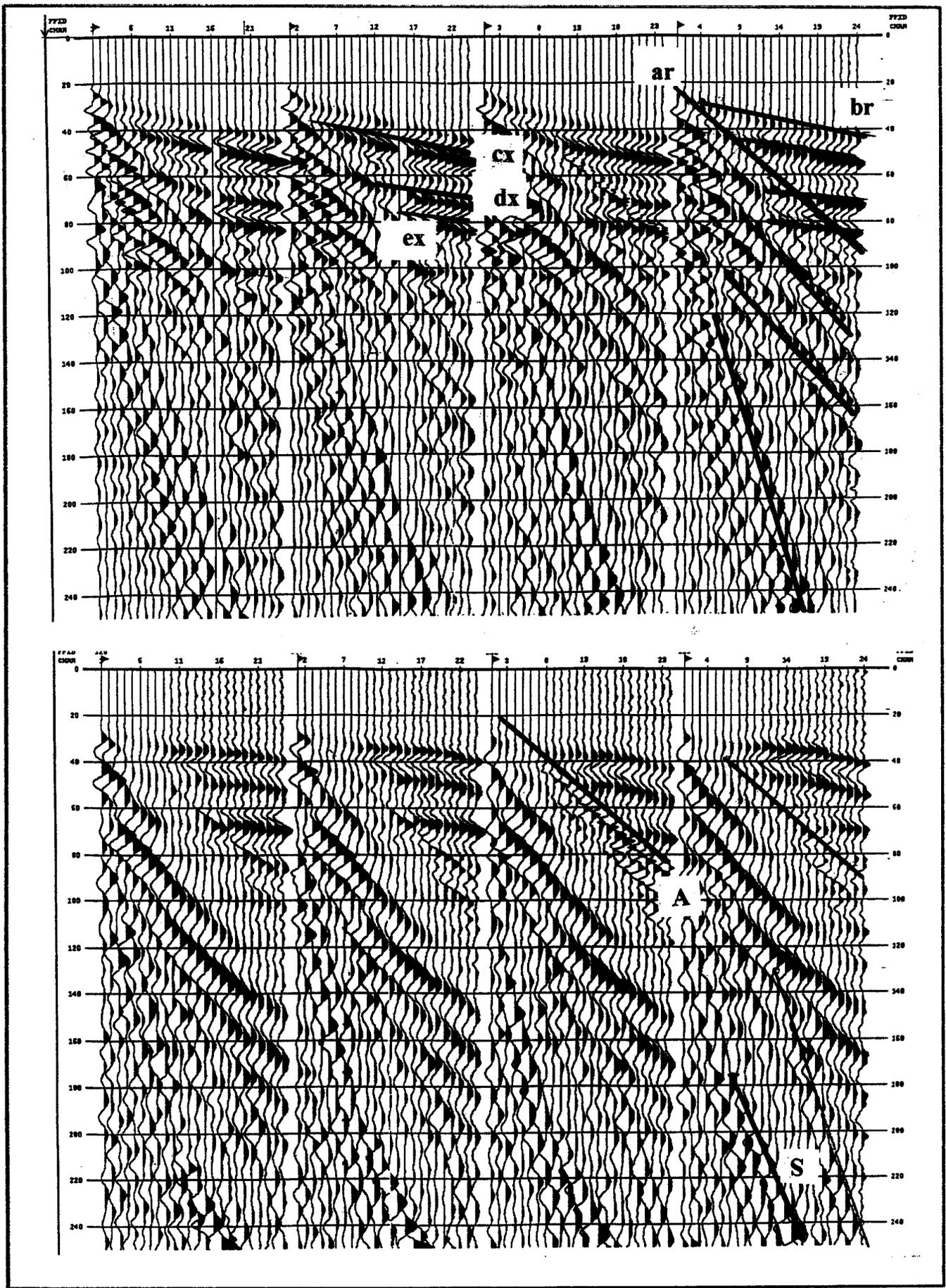
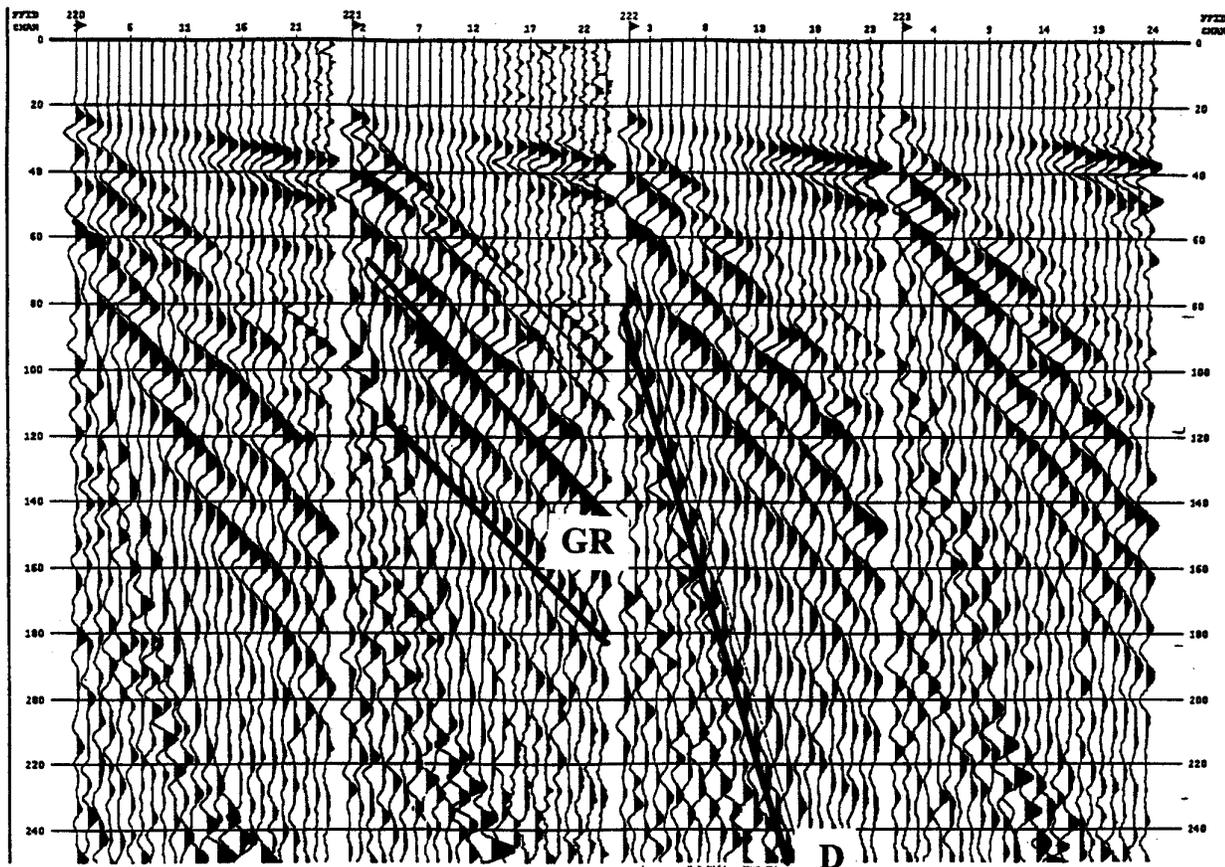


Fig. 14a Identificación de sucesos sísmicos en registros del perfil P2T100 (leyenda en fig. 14b)



sucesos sísmicos

A onda aérea; $v=354$ m/s
 D onda directa; $v=88$ m/s
 GR ground roll
 S onda S

ar refracción; $v=347$ m/s, $t_i=3.5$ ms
 br refracción; $v=1070$ m/s, $t_i=22$ ms

cx reflexión; $t_o=30$ ms
 dx reflexión; $t_o=64$ ms
 ed reflexión; $t_o=70$ ms

modelo del subsuelo

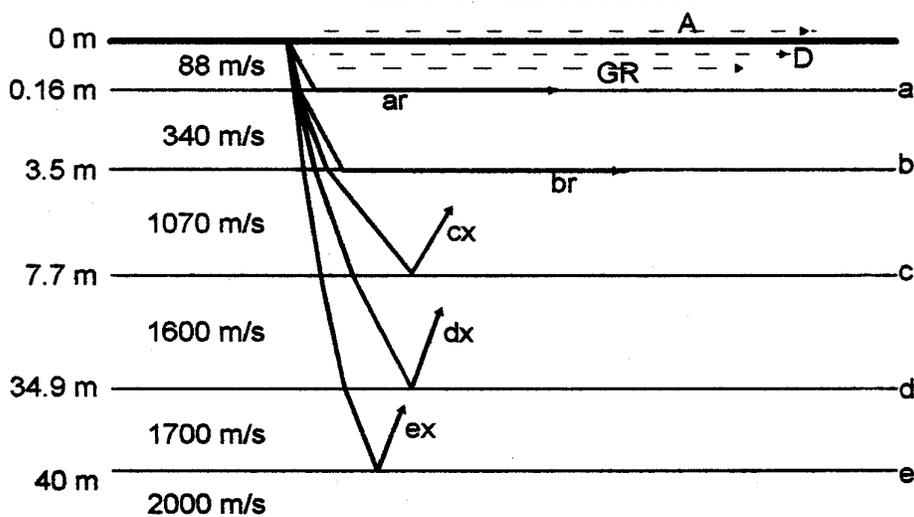


Fig. 14b Identificación de sucesos sísmicos en registros del perfil P2T100, con modelo interpretado

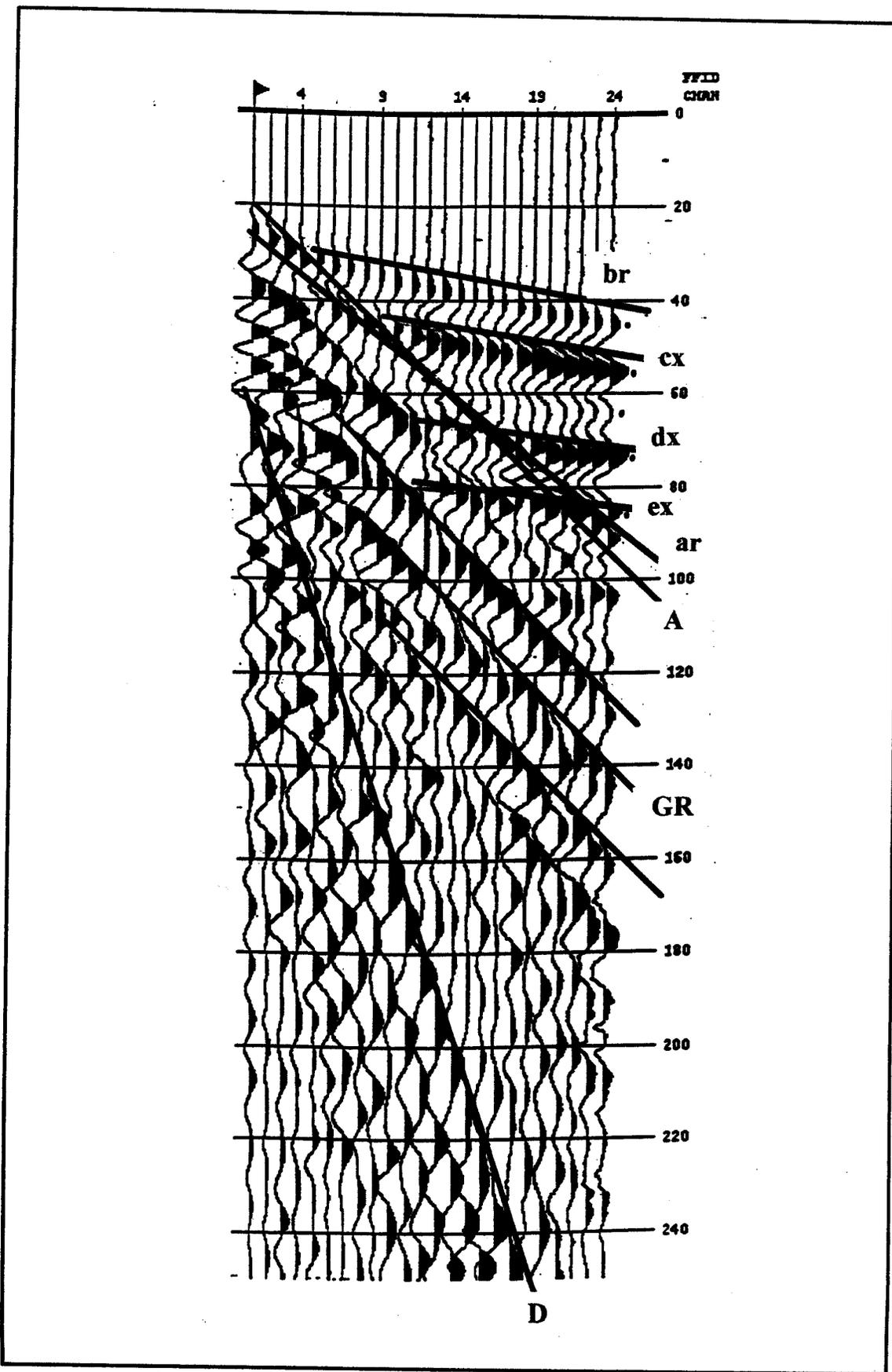


Fig. 15 Síntesis de sucesos sísmicos identificados en los registros
 D : onda directa; A: onda aérea; GR: ground roll;
 ir: dromocrona de refracción; ix: hiperbola de reflexión

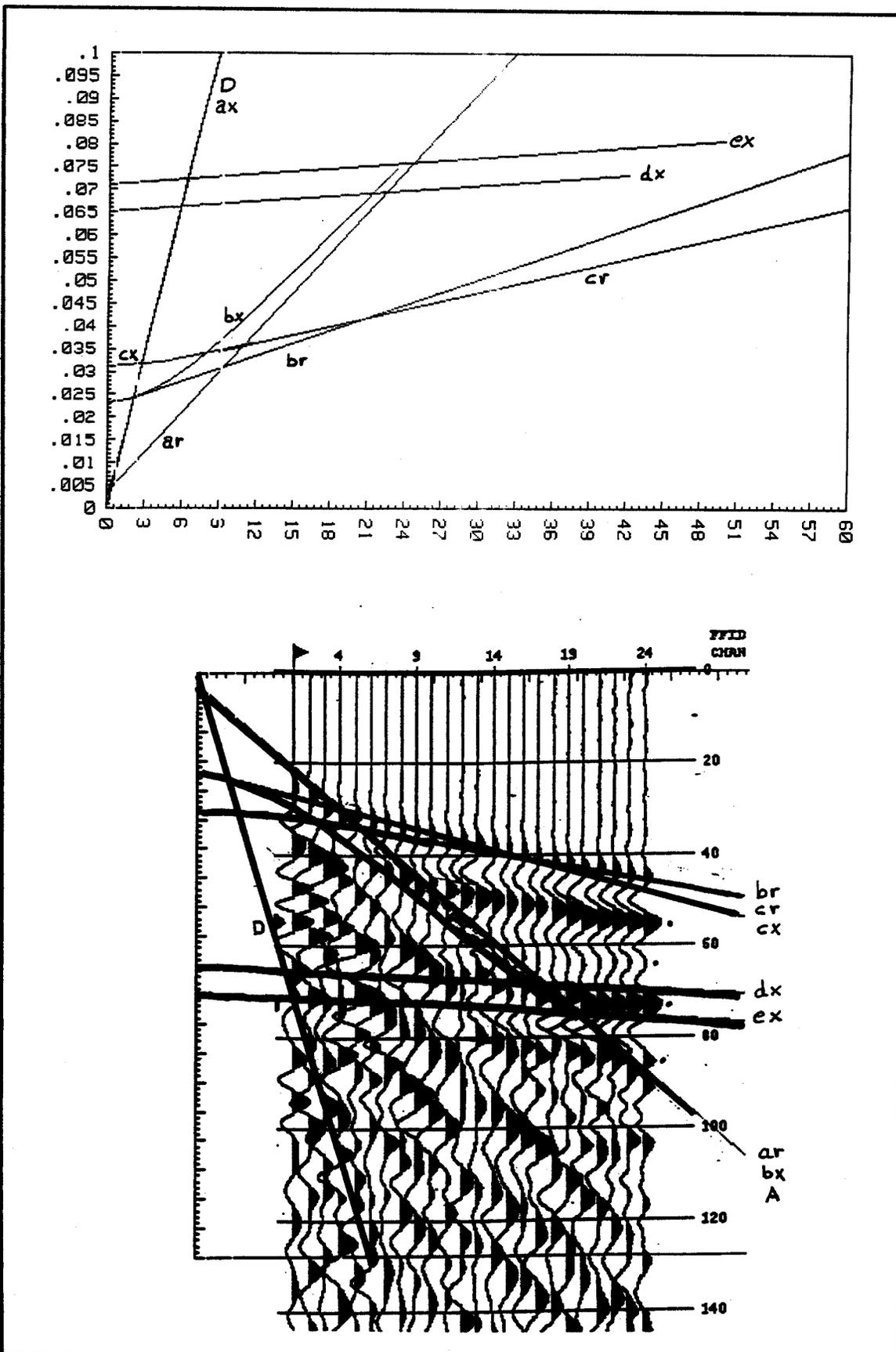
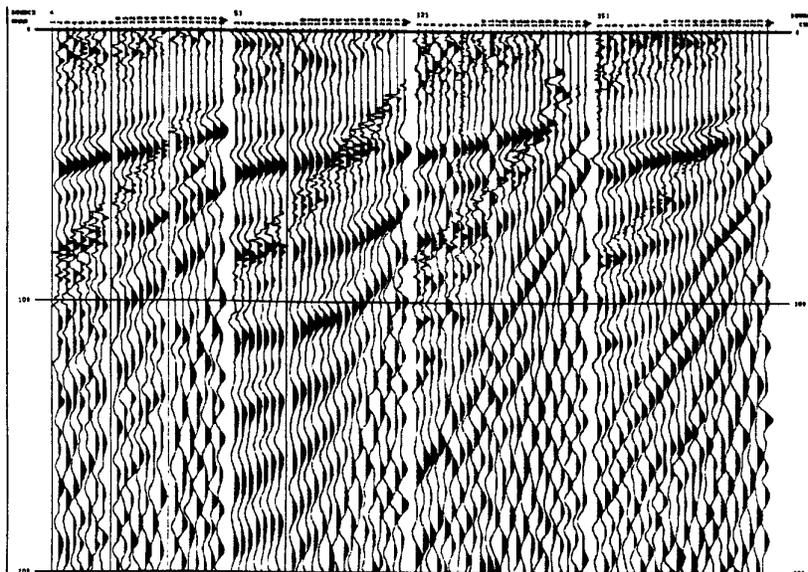
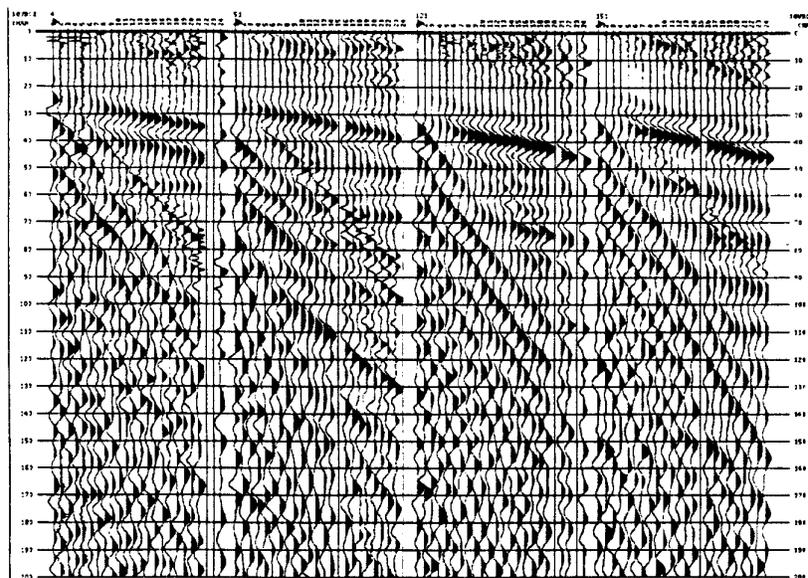


Fig. 16 Registro teórico obtenido con el modelo del subsuelo deducido por interpretación de los registros. En la parte inferior de la figura, la porción del registro teórico entre 0-130 ms y 0-35 m se ha superpuesto a un registro real.

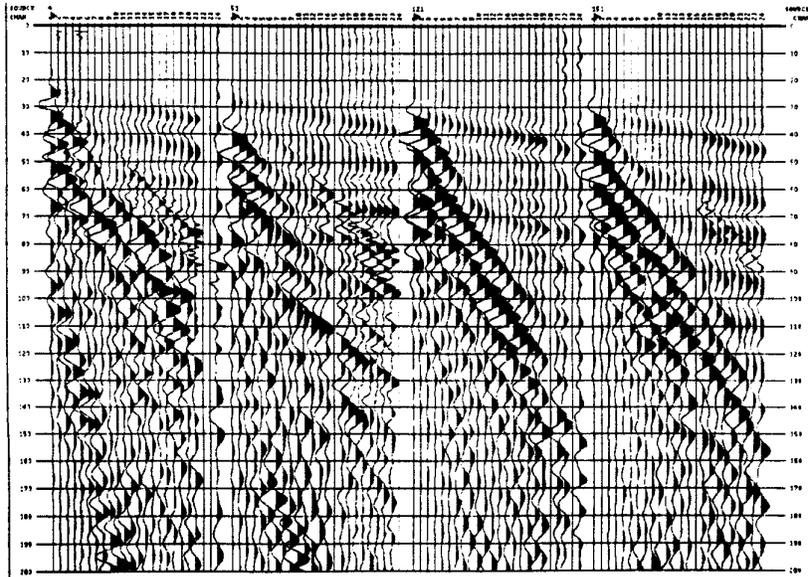
D: onda directa; ix : reflexión en la interfase i; ir: refracción en la interfase i.



registros del perfil P1G40
con AGC



registros del perfil P1T100
con AGC



registros del perfil P1T100
sin AGC

Fig. 17 Ejemplos de registros para identificación de sucesos sísmicos

7. SECCIONES EN COBERTURA SIMPLE.

7. SECCIONES EN COBERTURA SIMPLE

Para obtener una visión de la calidad conjunta y de la variación de las señales a lo largo de los perfiles, se ha procedido a obtener una sección en cobertura simple, situando continuamente un registro de cada 12. En la fig. 18 se pueden ver las secciones para los perfiles P2T100, P1T100 y P1G40.

La numeración de estos registros es en orden secuencial, por lo que las estaciones a las que corresponden se obtienen sumando 29 para la LS1 y restando 1 para la LS2. Es preciso además tener en cuenta que en la LS1 la situación del dispositivo de geófonos para un mismo punto de tiro no es la misma para los de 40 Hz que para los de 100 Hz, de tal forma que para los de 40 Hz se está registrando la porción del subsuelo desde el PT hacia el sur y para los de 100 Hz hacia el norte, por lo que el mismo subsuelo es visto con el punto de tiro 49 y geófonos de 40 Hz que con el punto de tiro 29 y geófonos de 100 Hz.

La mitad norte de la línea LS1 tiene un ground-roll bien manifestado (p.e. PT 133 y 145) y de más alta frecuencia e inferior velocidad aparente que en la parte sur (p.e. PT 37 y 49), dejando de ser apreciable en la primera porción del perfil; esta misma situación se observa en la línea LS2, donde entre los puntos de tiro PT 193 y 133 el carácter del ruido en los registros difiere del observable en la parte norte.

La comparación de los registros de la línea LS1, tanto entre los obtenidos con escopeta y con maza, como entre los registrados con diferentes geófonos, permite concluir que las variaciones fundamentales que se observan a lo largo del perfil deben atribuirse a las condiciones del terreno y no a las de registro, ya que están presentes en ambos dispositivos y perfiles.

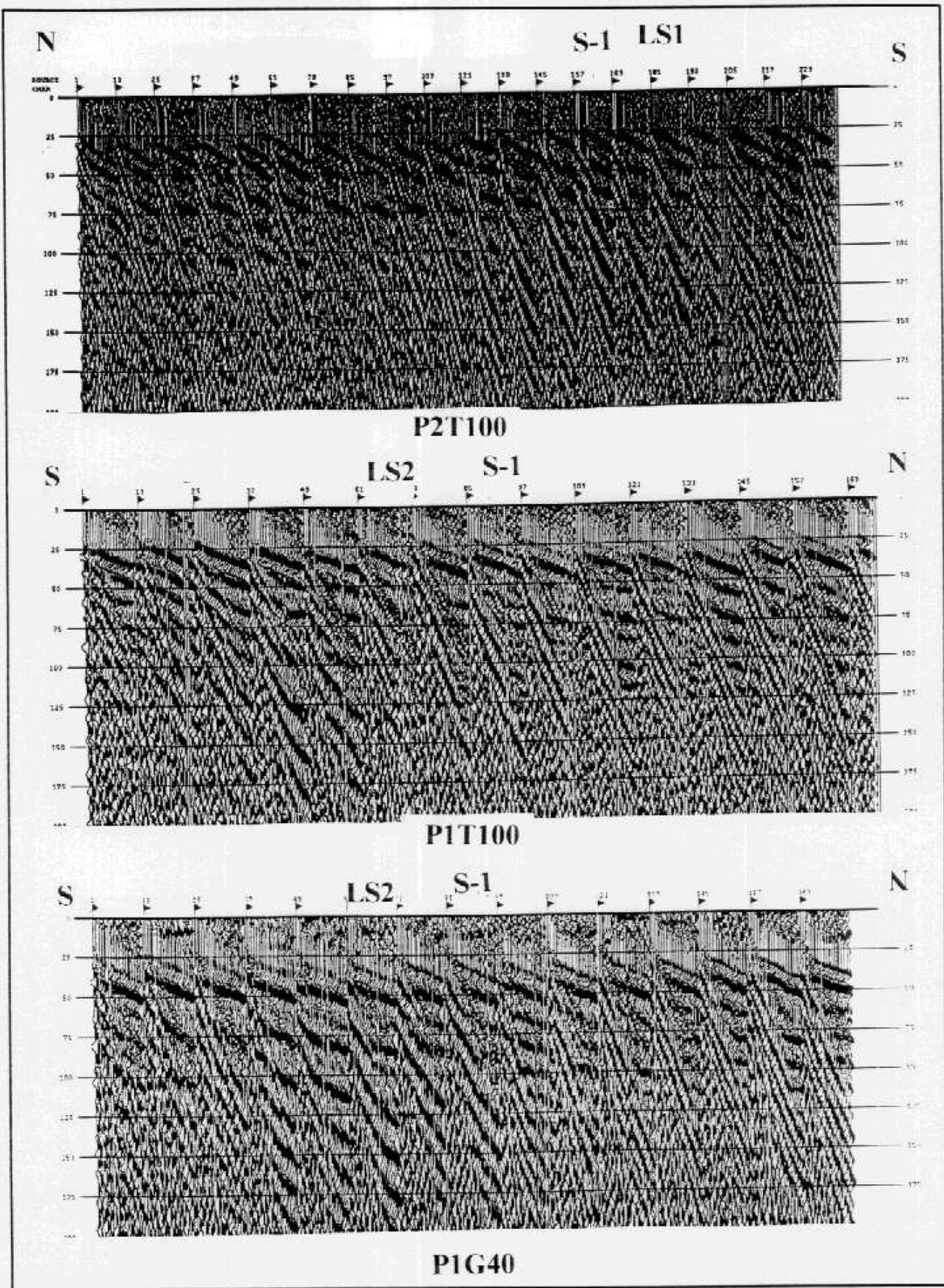


Fig. 18 Secciones en cobertura simple (sucesión de un registro de cada 12)

8. CONTENIDO FRECUENCIAL.

8. CONTENIDO FRECUENCIAL

Parte importante de este experimento es deducir con que tipo de geófonos y fuente de energía se consigue la máxima resolución; el factor fundamental que controla la capacidad de resolución de las ondas sísmicas es la gama de frecuencias útiles que se haya generado y conseguido registrar. En párrafos precedentes ya se ha hecho mención al planteamiento de estos aspectos, pasando ahora a analizar la realidad registrada.

8.1 REGISTROS COMPLETOS

Para una selección de registros formada por los puntos de tiro 4, 91, 122 y 222 del perfil P2T100 y de los 4,50,120 y 150 de la LS1 en todas las combinaciones de fuente de energía y geófonos, se ha obtenido el espectro de frecuencias en la banda 0-2000 Hz y hasta -60 dB, de los primeros 120 ms, estando representados en la fig. 19.

Para fuente de energía escopeta y geófonos de 100 Hz, la comparación entre los espectros de los perfiles P2T100 y P1T100 deja apreciar una ligera mayor amplitud de los armónicos de alta frecuencia en el P1T100, siendo el contenido frecuencial para geófonos de 40 Hz (P1T40) muy poco diferente del obtenido con geófonos de 100 Hz. El pico de mayor amplitud en estos tres espectros de registros obtenidos con escopeta se produce para 80 Hz; a los 600 Hz para P2T100 y a los 500 Hz para P1T100 Y P1T40 se produce un pico que debe estar asociado a la firma de la fuente, ya que no aparece en los registros efectuados con maza. Otro pico de amplitud se produce a 850 Hz para P2T100 y 650-750 Hz para P1T100. La amortiguación es superior a -20 dB a más de 200 Hz, pasando a -40 dB para 500-600 Hz, excepto con el uso de geófonos de 40 Hz para los que la amortiguación de las altas frecuencias es algo más rápida.

Para los mismos geófonos de 40 Hz, el uso de maza (P1G40) produce un notable incremento de amplitud en los armónicos de alta frecuencia, respecto del uso de escopeta (P1T40); con la maza, el empleo de geófonos de 100 Hz si que permite apreciar un gran aumento de la amplitud de las altas frecuencias registradas en la banda más eficaz (por encima de los -50 dB), que pasa de los 500-600 Hz obtenidos con escopeta a 850 Hz (para geófonos de 40 Hz) y 1400 Hz (para geófonos de 100 Hz).

Cabe por tanto deducir que, en principio, la combinación con la que se puede obtener mayor resolución es con geófonos de 100 Hz y maza; esto puede ser debido a que el uso de stacking con la maza ha permitido compactar el suelo y aprovechar mejor la energía emitida en los siguientes golpes (obsérvese que la situación inversa se presentó en el experimento referido en las figuras 3 y 4, realizado en otro entorno geológico).

Es importante sin embargo observar que, a pesar de estar los geófonos enterrados, la onda aérea, con su gran contenido en altas frecuencias, se observa más con el uso de la maza que con la escopeta (comparar registros del P1G100, P1G40 con P1T100, P1T40 en la fig. 19); este hecho puede no obstante ser circunstancial, dependiendo del lugar y acoplamiento entre fuente y terreno, siendo mejor registrada la onda aérea por los geófonos de 100 Hz, lo que es una paradoja que se vuelve en contra de la mejor resolución que cabe esperar con su uso.

8.2 ESPECTROS DE LA SEÑAL Y DEL RUIDO

En la fig. 20 se presentan los espectros de amplitud para una selección de lo que se considera exclusivamente señal de reflexión y Ground-roll, para el tiro 122 del perfil P2T100 y tiro 150 del P1G40 y del P1T100.

Se observa que para golpes de maza hay en efecto más amplitud a alta frecuencia y que en cualquier caso, el GR tiene un espectro más limitado, no sobrepasando los 400 Hz (a -60 dB) para escopeta y los 700 Hz para golpes, mientras que la señal conserva amplitudes útiles hasta frecuencias más altas.

En la fig. 21 se muestra el espectro exclusivamente de la onda aérea; mientras que el pico de amplitud de las reflexiones se produce entorno a los 60-80 Hz, atenuándose a -20 dB para más de 200 Hz, la onda aérea tiene su pico de máxima amplitud a unos 500 Hz, y pasa a -20 dB para más de 1000 Hz. Esto puede dar lugar a un severo límite en la separación de señal y ruido en las altas frecuencias, dándose además el caso de que la onda aérea está contaminando toda la porción útil de las trazas y tiempos donde se producen reflexiones.

En conclusión, señal y ruido tienen tanto por bajas frecuencias como por altas un importante solape de contenido frecuencial.

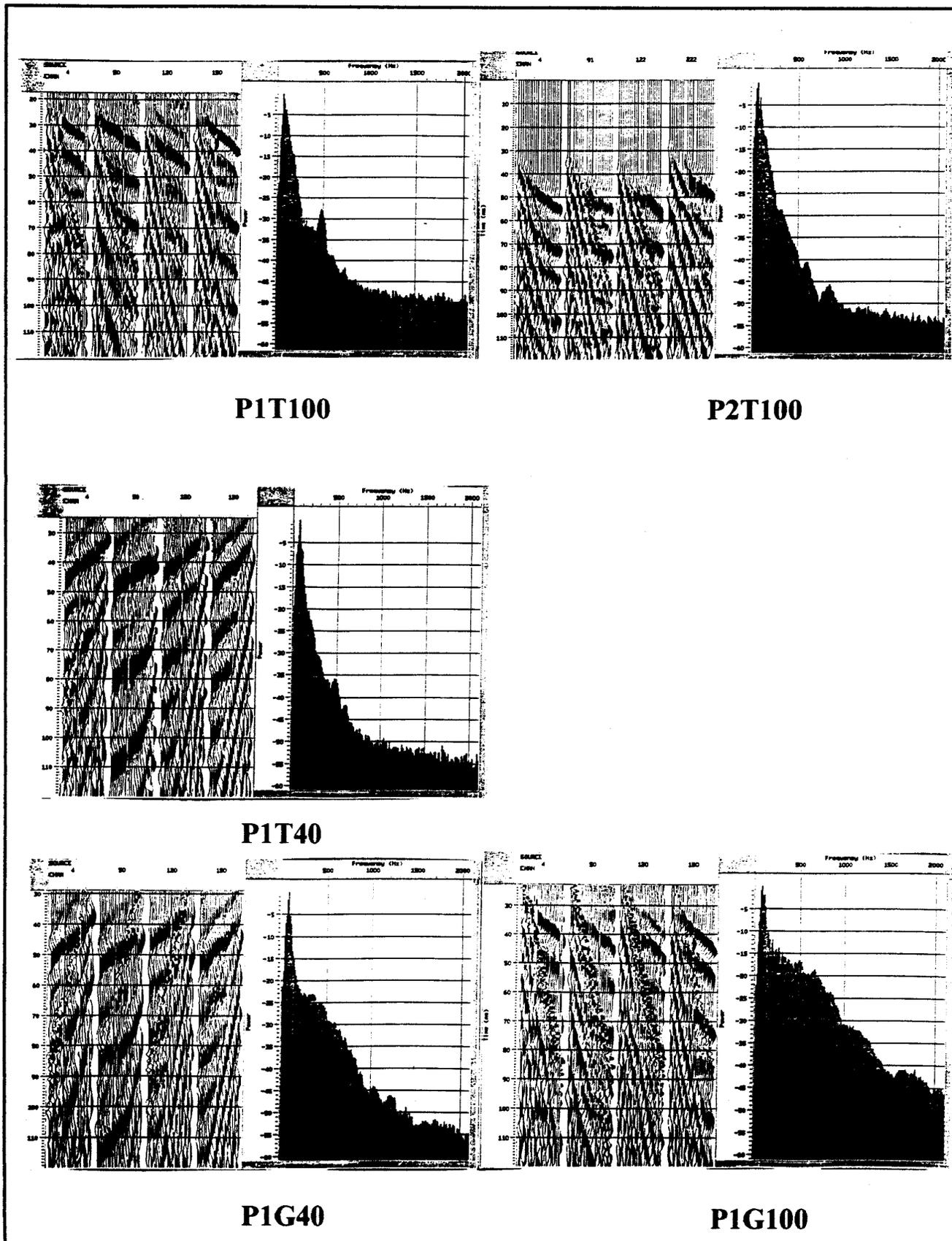


Fig. 19 Espectros de amplitud de los primeros 120 ms de los registros 4,50,120 y 150 de la LS1, para todas las combinaciones de fuente de energía y geófonos, y de los registros 4,91,122 y 222 de la LS2. El contenido en mayores frecuencias se observa para la combinación de golpes de maza y el uso de geófonos de 100 Hz.

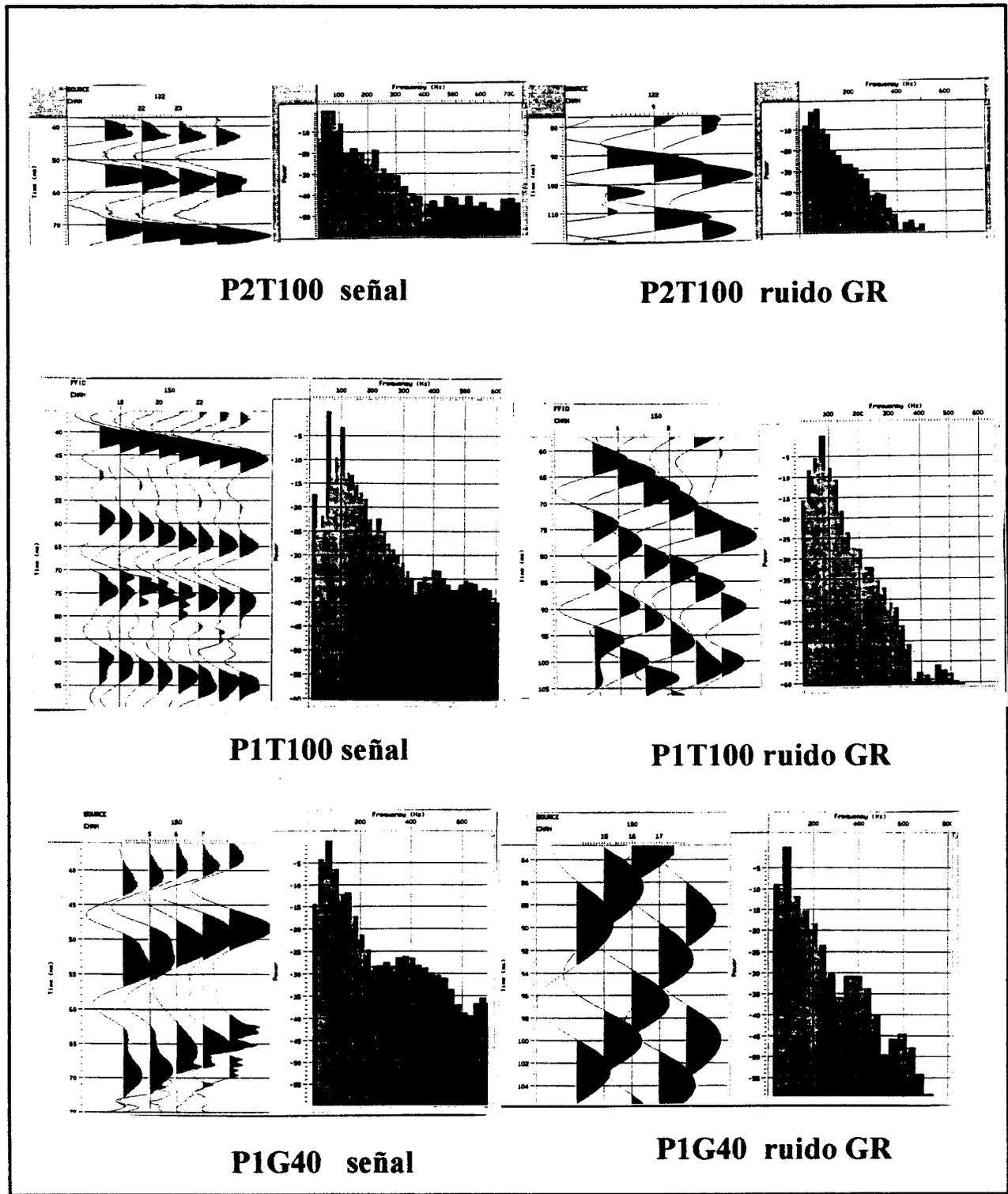


Fig. 20 Espectros de amplitud de la señal de reflexión y del Ground-roll para el registro 122 del perfil P2T100 y para los registros 150 de los perfiles P1G40 y P1T100

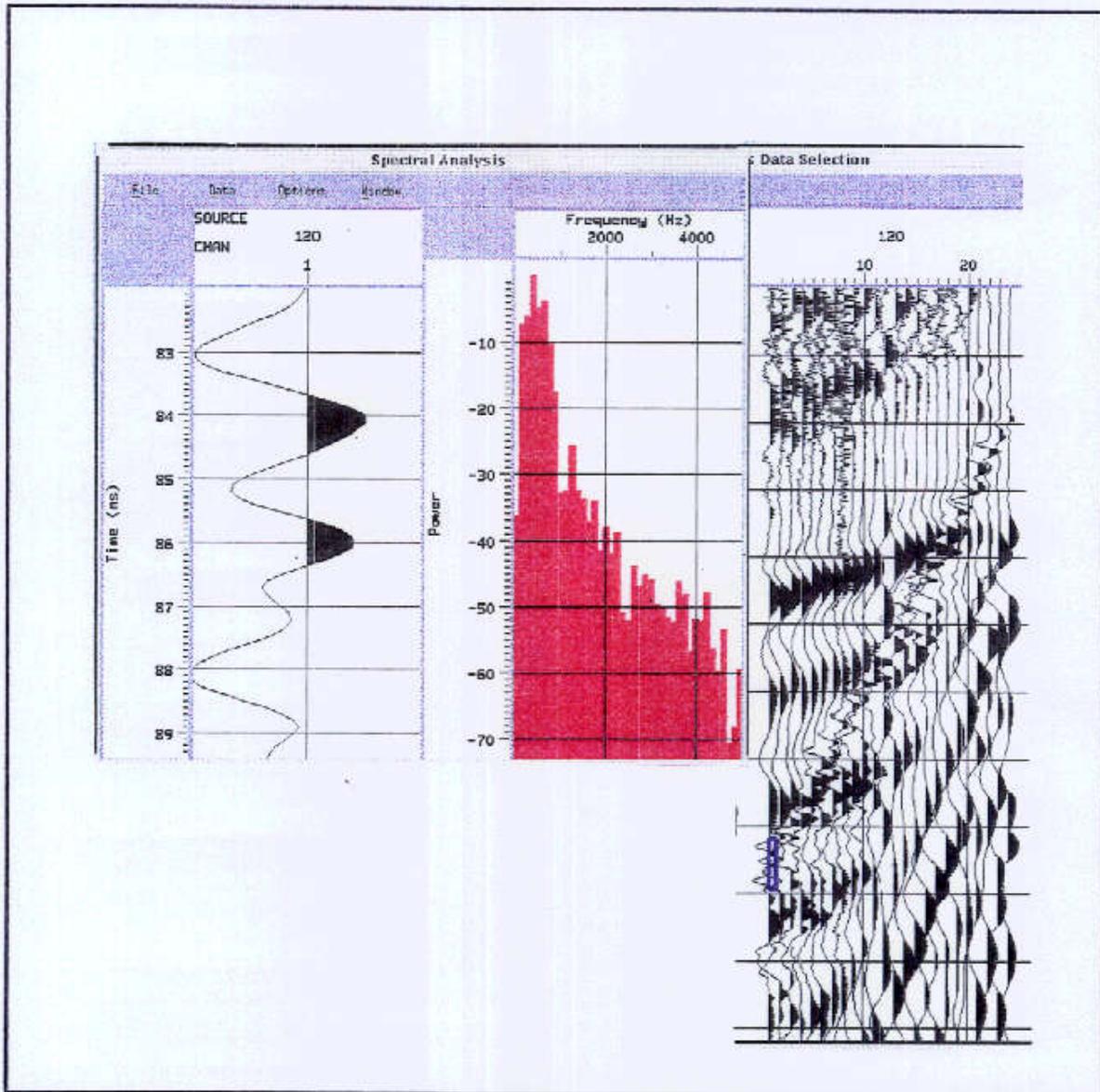


Fig. 21 Espectro de amplitud de la onda aérea, tomada del registro 120 del perfil P1G40

**9. IDENTIFICACION DE SUCESOS EN FRECUENCIAS
TEMPORALES Y ESPACIALES.**

9. IDENTIFICACION DE SUCESOS EN FRECUENCIAS TEMPORALES Y ESPACIALES

A fin de identificar plenamente los sucesos sísmicos registrados y su contenido frecuencial, se ha procedido a aplicar una serie de filtros en frecuencia pasa-banda a los registros, al tiempo que se han obtenido los espectros f-k correspondientes. En la fig. 22 se representa el registro del tiro 150 del perfil P1G100, bruto y tras diversos filtros de frecuencia en las bandas 10/60, 50/75, 85/200, 100/200, 160/300 y 250/1000 Hz, y en la fig. 23 se presenta la secuencia de espectros fk obtenidos para el registro bruto y los filtrados. Los mismos filtros han sido aplicados a otros puntos de tiro, presentándose en la fig. 24 los resultados para los PT 35, 85 y 135 del perfil P1G100.

De su análisis se concluye: (se indica entre paréntesis la denominación del suceso, según el modelo anteriormente establecido).

. La onda directa (D), poco apreciable en este registro bruto, se mantiene a 100 m/s, con altos valores de k y frecuencias entre 40 y 70 Hz; da lugar a alising en k.

. La onda aérea (A) se sitúa en altos valores de k, siendo notable por encima de los 160 Hz y hasta más de 1000 Hz, por lo que da lugar a un importante aliasing en k, que llega a contaminar con altas frecuencias las componentes de bajos valores de k en el espectro (frecuencias positivas y velocidades elevadas).

. El Ground-roll (GR), con velocidad aparente de unos 300 m/s está bien diferenciado de la señal en el dominio k, pero sus frecuencias llegan hasta más de 100 Hz, apareciendo componentes de hasta más de 200 Hz en las trazas próximas, por lo que también puede dar lugar a alising en k.

. Al aplicar filtros pasa banda 10-60 y 50-75, se deja ver una señal de velocidad aparente del orden de 1500 m/s, bajo valor de k, y no perceptible por encima de 85 Hz, con un aspecto cíclico en toda la gama de tiempos (con aparición inclusive antes de la primera llegada), que ya fue comentada anteriormente; pensamos que se trata de un ruido producido por inducción eléctrica (?), o vibración de alguna maquinaria en la parte opuesta del río, donde se encuentran instalaciones del puerto de Huelva, aunque también pudiera ser un artefacto producido por la aplicación del filtro; en cualquier caso no es factible asignar esta señal a una componente de baja frecuencia de las reflexiones; no son sin embargo visibles

estos ruidos en la banda 85-200. La refracción (br) viene situada en el espectro f-k junto a este ruido.

. Las señales de reflexión (cx, dx y ex) aparecen bien diferenciadas en el espectro f-k, así como en el resultado de aplicar un filtro en la banda 85-200, y tienen además componentes visibles hasta 300 Hz, (no visibles en todos los puntos de disparo); sus velocidades aparentes son del orden de 1500 m/s, con una longitud de onda baja que las separa bien en k del GR, pero quedan solapadas en k al ruido antes aludido y a la refracción. No se observan componentes de reflexión en la banda 250-1000, por lo que resulta evidente que no los hay, ya que p.e. en la primera traza del registro 150 del P1G100 si que se manifiesta claramente en esta banda de frecuencias un ruido sobre los 40 ms, inapreciable en el registro bruto.

Este análisis pone en evidencia que cualquier operación de filtrado con estos registros es crítica, ya que hay solapes en f, en k, en altos y en bajos valores, con una cierta dependencia del contenido frecuencial con la posición del PT, debido a los diferentes acoplamientos de la fuente de energía y en menor grado al tipo de terreno, que en principio aparece homogéneo a lo largo de las líneas sísmicas.

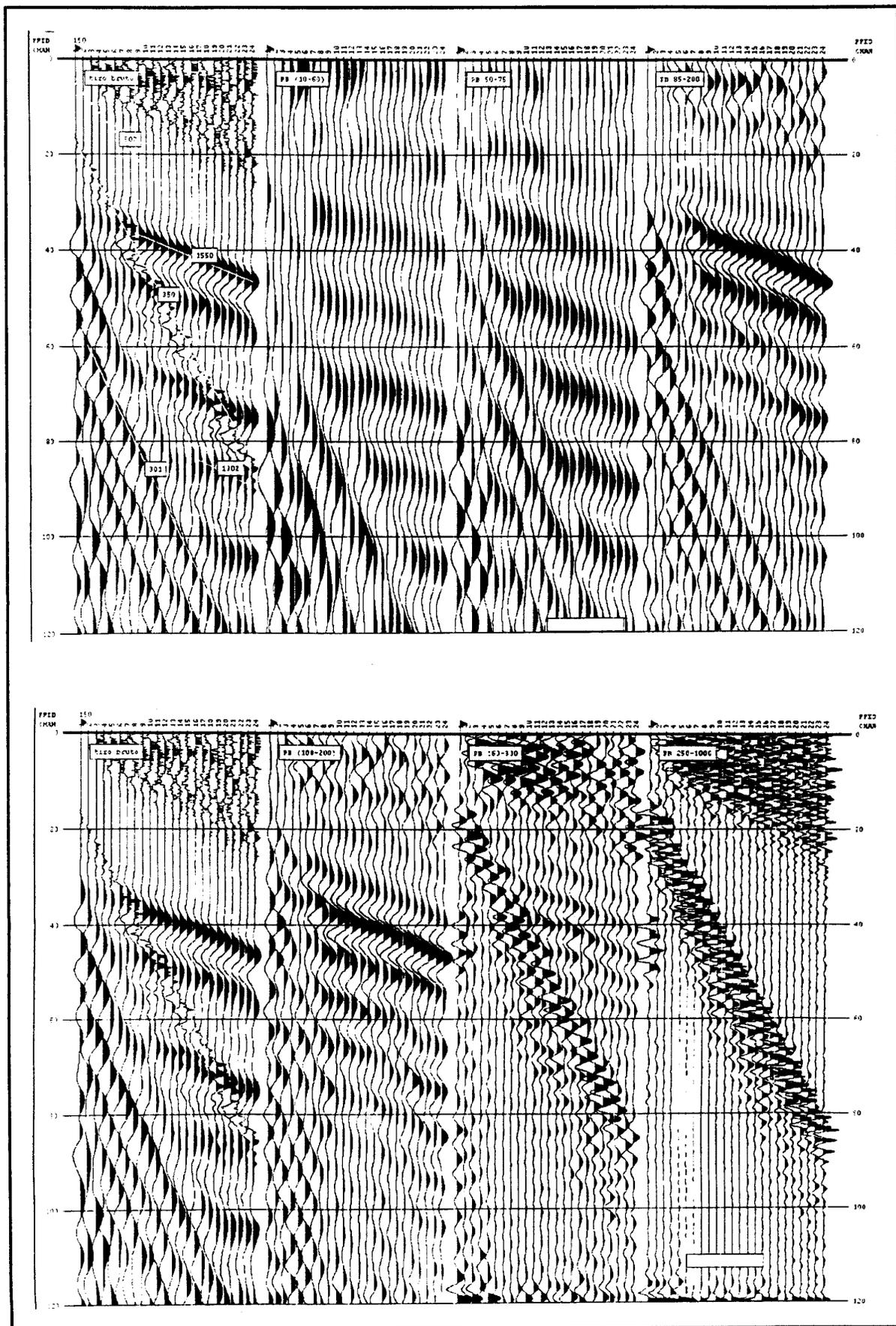


Fig. 22 Resultado de la aplicación de diversos filtros pasa banda en el dominio de las frecuencias para identificación del contenido frecuencial de los sucesos sísmicos registrados. Registro 150 del perfil P1G100

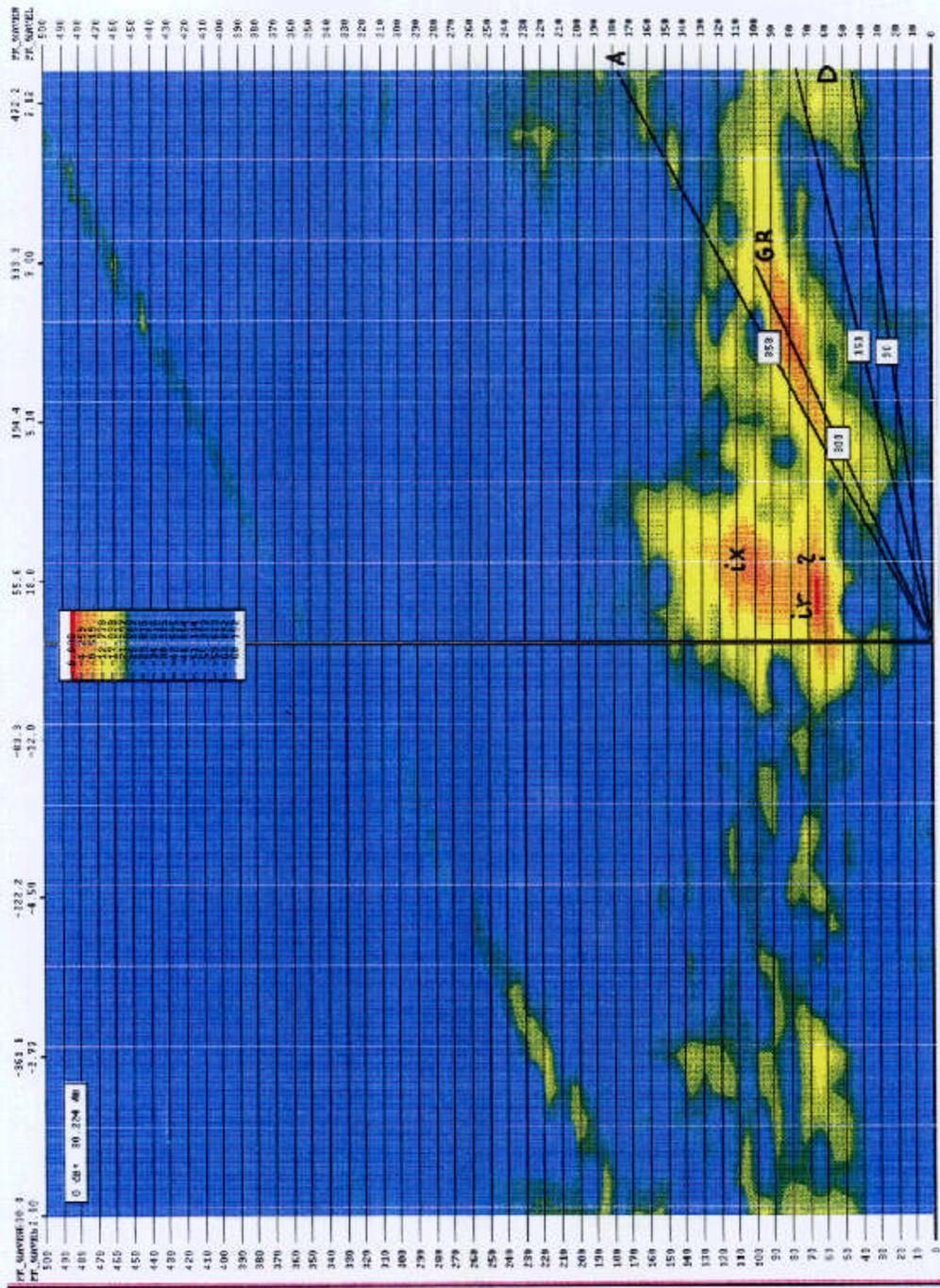
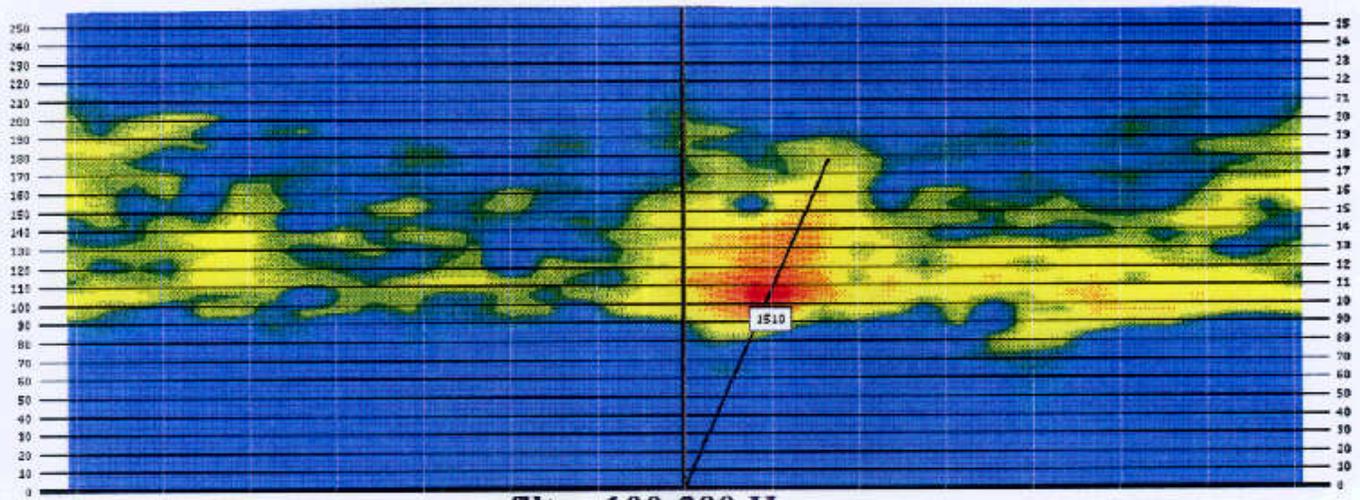
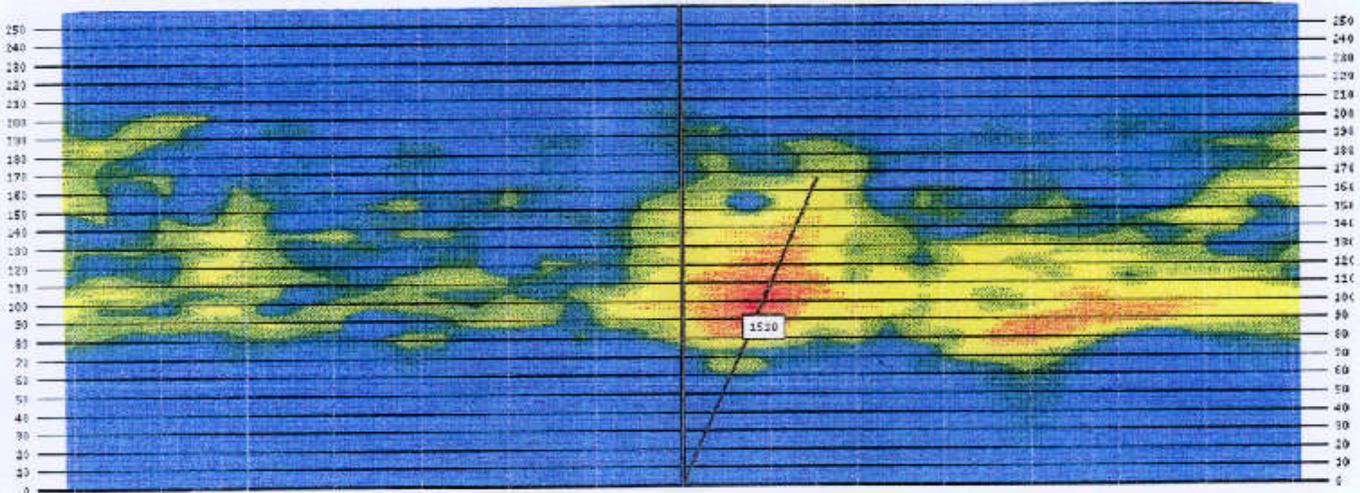


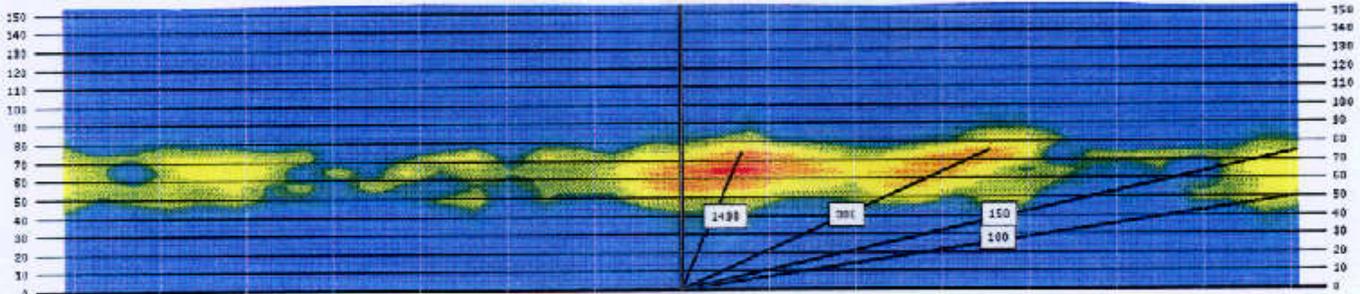
Fig. 23a Espectro f-k del registro bruto 150 del perfil PIG100, con aplicación de ganancia AGC en operador de 40 ms. Se indica la situación de los diferentes sucesos sísmicos identificados: D= onda aérea, GR= ground-roll, ix = reflexiones; it= refracciones y ruido.



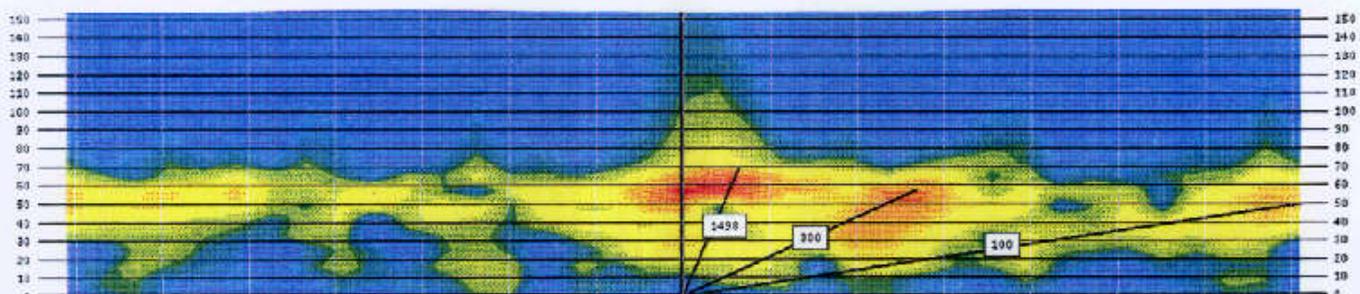
filtro 100-200 Hz



filtro 85-200 Hz



filtro 50-75 Hz



filtro 10-60 Hz

Fig. 23b Espectros f-k del registro 150 perfil P1G100 tras la aplicación de diversos filtros pasa banda en el dominio de las frecuencias

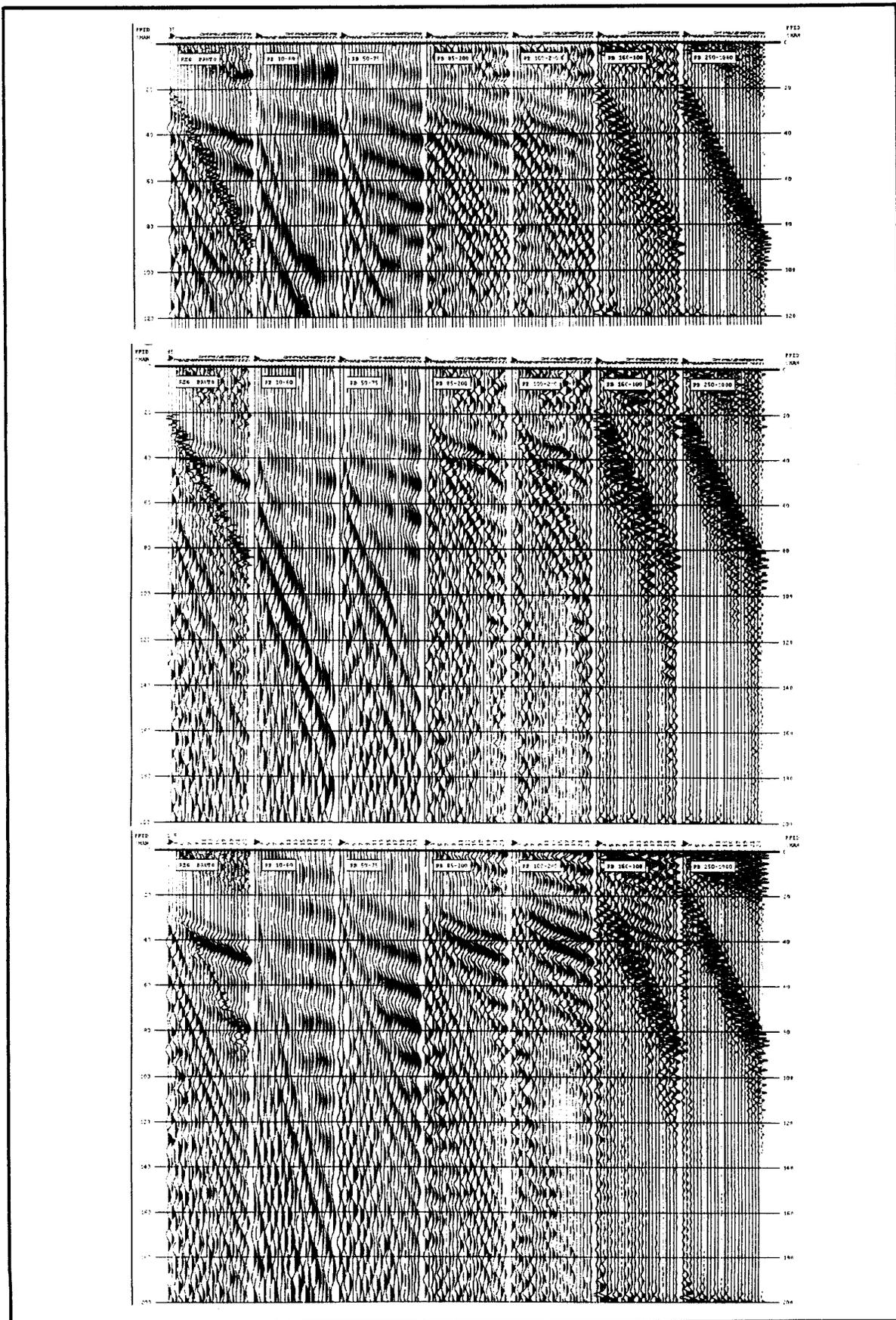


Fig. 24 Ejemplos del resultado de la aplicación de filtros pasa banda a otros registros del perfil P1G100, con analoga información a la obtenida para el tiro 150 (fig. 22)

**10. OBTENCION DE CONJUNTOS DE CDP PARA ANALISIS
DE VELOCIDAD.**

10. OBTENCION DE CONJUNTOS DE CDP PARA ANALISIS DE VELOCIDAD

Una vez identificados los sucesos sísmicos registrados, el primer objetivo propuesto es tratar de eliminar el ruido que contienen los registros, dejando solo las señales de reflexión. Según el análisis anterior, la banda de frecuencias 100-200 Hz parece ser la más desprovista en general de la influencia de los ruidos, por lo que se ha utilizado un filtro de esta banda para todos los registros del perfil antes de obtener los correspondientes conjuntos de trazas de CDP.

El offset o distancia entre punto de tiro y geófono para cada una de las 12 trazas de un CDP, varía desde 6 m hasta 28 m, aumentando de dos en dos metros; aún con la aplicación del filtro 100-200, las cuatro o cinco primeras trazas de los registros (offset de 6 m a 10 m) no contienen información útil, por lo que tampoco cabe esperar dicha información en las tres primeras trazas del conjunto CDP.

En la fig. 25, se presentan las trazas para los CDP 100, 140, 200, 210, 270, 300, 310, 360 y 400 del perfil P1G100, tanto con las trazas brutas como con las trazas filtradas; solamente son claramente observables reflexiones coherentes en las trazas lejanas de los datos brutos de los CDP 100 y 140; al aplicar el filtro, esta coherencia es algo evidente en el CDP 270, 360 y 400, desapareciendo en el resto.

Este resultado contrasta fuertemente con el obtenido al aplicar dichos filtros a los registros. Las razones para esta pérdida de información pueden ser:

- . Efectos destructivos producidos por el filtro: se ha utilizado un filtro tipo Butterworth en el dominio de la frecuencia, con rampa de 95 dB/octava tanto en inicio como en final, padding del 25%, pudiendo observarse en la fig. 22 que excepto para la banda de muy baja frecuencia (10-60 Hz) no se observan en los registros filtrados evidencias de distorsión de los datos, y aún a estas frecuencias puede tratarse de un ruido realmente existente.

- . Efecto de correcciones estáticas, lo que tampoco parece evidente, dado que en los registro brutos la señal es coherente, siendo la longitud del dispositivo igual a la del conjunto de trazas de un CDP: si en estos 28 m de terreno se produjeran variaciones de velocidad y/o potencia de la primera capa capaces de afectar a la coherencia de los sucesos sísmicos en un conjunto de trazas CDP, este efecto sería observable también en los registros brutos.

. Lo más probable es que esta ausencia de señales coherentes en los CDP tanto brutos como filtrados, sea debida a la diferencia de tiempos introducida de un registro a otro, tanto por la variación del contenido frecuencial por acoplamiento de la fuente de energía, como por el cambio de profundidad de fuente de energía y geófonos, dada la dificultad de mantener estos factores homogéneos a lo largo de los perfiles en este tipo de terreno. En efecto, la naturaleza extremadamente blanda del terreno, ha afectado mucho según la compactación conseguida en cada tiro y geófono a la calidad de las trazas (compárense los resultados obtenidos por aplicación del filtro en la banda 100-200 Hz a los diferentes registros mostrados en las figuras 22 y 24).

Cualesquiera que sea la razón, el hecho es que con los conjuntos de trazas CDP obtenidos, no ha sido posible realizar un análisis de velocidad con el que efectuar adecuadamente la corrección dinámica y proseguir con la adición de las trazas para obtención de la sección en cobertura múltiple.

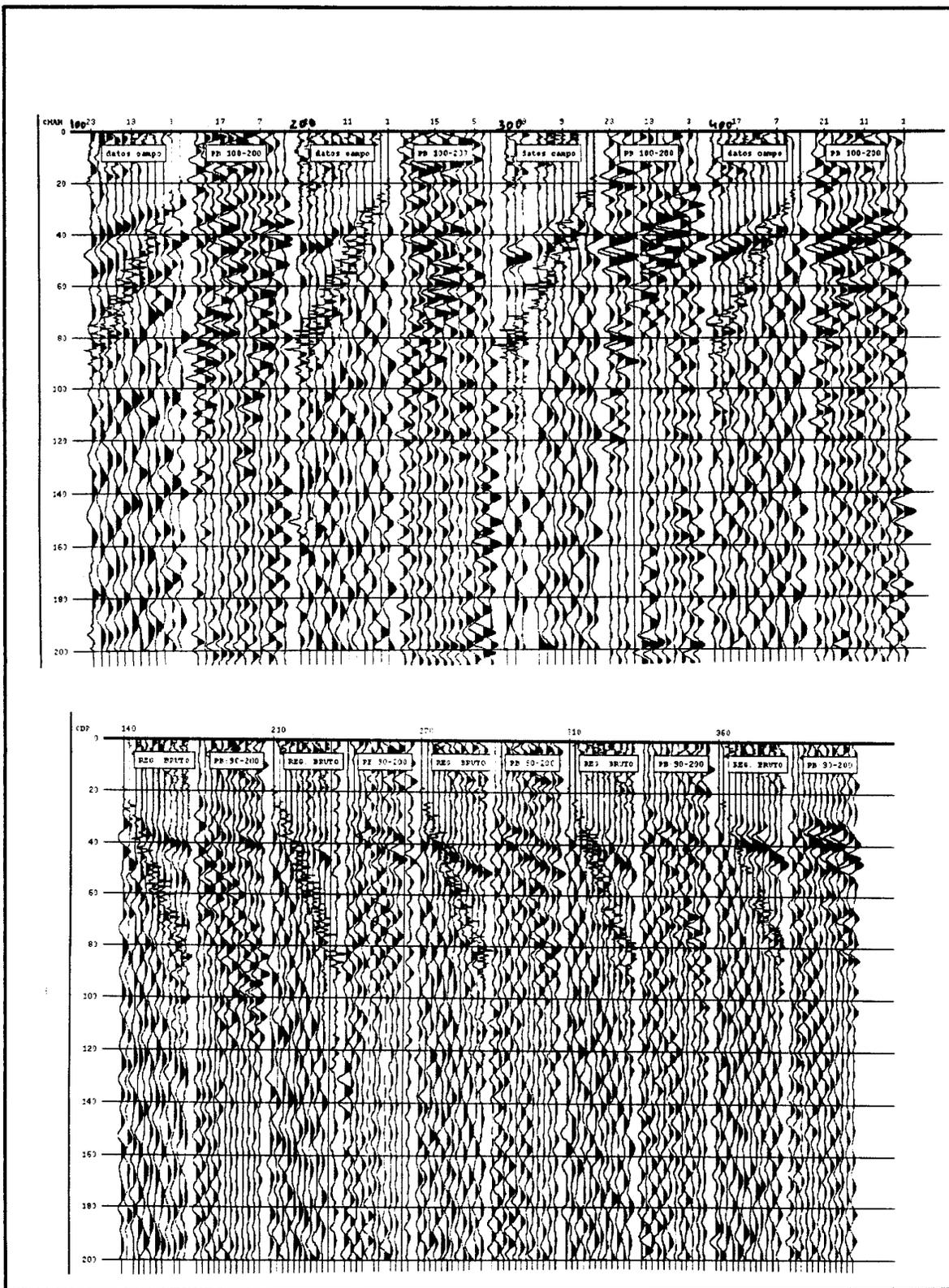


Fig. 25 Conjuntos de trazas CDP obtenidos a partir de los registros brutos y filtrados en la banda 90/100-200 Hz en el dominio de las frecuencias. Parte superior: CDP 100,200,300 y 400 ; parte inferior: CDP 140, 210, 270 y 360, del perfil P1G100.

11. APLICACION DE FILTROS EN EL DOMINIO F-K.

11. APLICACION DE FILTROS EN EL DOMINIO F-K

A la vista de este resultado, se ha ensayado la aplicación de filtros en el dominio f-k (f= frecuencia temporal en Hz, k=frecuencia espacial en ciclos/km).

11.1 PRIMER FILTRO (FK1)

Para separar el GR y onda aérea del resto de los sucesos se ha diseñado un filtro que rechace las velocidades inferiores a 700 m/s. El resultado puede verse en la fig. 26 para el PT 150 del perfil P1T100. En el espectro del registro bruto (parte superior de la fig. 26a), resultan bien identificables los diferentes sucesos sísmicos presentes, siendo los resultados de aplicación del filtro la desaparición de la onda directa y del GR, permaneciendo una contaminación de la onda aérea posiblemente por el efecto del aliasing espacial anteriormente comentado. Se hace notar que en los registros de la fig. 26b no se ha suprimido el ruido ambiental que existe en los primeros 20 ms del registro previos a las primeras llegadas, resultando observable en el registro con las señales eliminadas por el filtro, un suceso coherente enmascarado en este ruido, con claras repeticiones del orden de cada 20 ms a lo largo de todo el registro, que ya fue comentado en el capítulo 9 a propósito del ruido detectado en las bajas frecuencias. En el espectro fk del registro filtrado permanece la señal de reflexión, la refracción y una componente de ruido de mayor velocidad que el ground roll y onda aérea, que pudiera ser la aludida contaminación ambiental.

Otro ejemplo de los resultados obtenidos con la aplicación de este tipo de filtro se muestra en la fig. 27, para el PT150 del perfil P1G40; aquí resulta más clara la permanencia en el espectro (fig. 27a) y por tanto en el registro filtrado, de una contaminación de ruidos de baja velocidad (respecto de la aparente de las reflexiones) y aliasing espacial (fundamentalmente de la onda aérea). En la misma fig. 27b se ha reproducido el registro PT150 del P1T100 con eliminación de ruido antes de las primeras llegadas, comprobándose que es en efecto la detección de su existencia antes de que se produzcan llegadas de las ondas que se han producido en el disparo, la clave para entender el origen del ruido coherente observado.

En la fig. 28b se muestran más ejemplos para los registros PT4 y PT122 del perfil P2T100. En los registros mostrados en este capítulo, a fin de mejorar el análisis se ha aplicado un aumento de amplificación por AGC previo a la obtención de los

espectros; la utilización de AGC focaliza mejor la situación de los picos de máxima amplitud de los armónicos, facilitando así su localización y medición, como puede observarse por comparación de los espectros del registro para el tiro 4 del perfil P2T100 en la fig. 28a; sin embargo la reducción del rango dinámico producida por la amplificación AGC hace que el espectro muestre un menor contenido aparente en frecuencias temporales f .

Así pues, la aplicación de este filtro es comparable a la del filtro paso banda 100-200 Hz en el dominio de las frecuencias, como se deduce por comparación del efecto producido sobre el PT150 del perfil P1G100 (ver fig. 22 y fig. 26b).

En conclusión, la eficacia del filtro es buena, habiendo aislado bien la porción del espectro que contiene la señal, si bien queda aún el ruido en el mismo rango de frecuencia espacial k ; el resultado es tanto mejor cuanto menor sea el aliasing que contiene el registro, como ocurre para el P1T100 PT150 (fig. 27b); aunque el GR queda bien eliminado, es no obstante perceptible en los registros efectuados con geófonos de 40 Hz, así como parte de la onda aérea, posiblemente proveniente de su contaminación por aliasing de las altas frecuencias a bajos valores de k .

11.2 SEGUNDO FILTRO (FK2)

Sobre los espectros de los registros filtrados en la etapa anterior se ha diseñado un nuevo filtro para eliminar ahora el ruido superpuesto a la señal en su misma gama de velocidades y frecuencia espacial k : se trata de un filtro de velocidades-frecuencias definido por el abanico 700-5000 m/s y la banda 80 -500 Hz (ver fig. 26a). Los resultados se muestran en la fig. 29a y 29b, que puede compararse con la fig. 27b y 28b.

La parte rechazada ahora es el ruido con velocidades inferiores a 700 m/s y frecuencias inferiores a 80 Hz o superiores a 500 Hz, quedando en el registro aceptado por el filtro la señal de reflexión. El efecto más notable del filtro sobre los registros es el haber eliminado de forma eficaz tanto el ground-roll como la onda aérea; aunque se ha ganado coherencia en algunas reflexiones, la señal aparece con un carácter casi cíclico, situándose en ocasiones en toda la gama de tiempos, lo que vuelve poner en duda su procedencia.

Como verificación, se ha aplicado a los mismos registros de partida (filtrados por el primer filtro $fk1$), en vez de este nuevo filtro en el dominio $f-k$, un filtro pasa

banda en frecuencias de valores 80-500 Hz, apreciándose en la misma fig. 29 que este sistema de filtrado deja pasar gran parte de la onda aérea, disminuyendo además la coherencia de la señal, que en algunos casos (PT122 del P2T100) casi desaparece; por otra parte el carácter del ruido o suceso cíclico es menos notable en los registros obtenidos tras aplicar este proceso.

En conclusión, con la aplicación de una cascada de filtros f-k, aunque parecen mejorar los resultados, la adjudicación de los sucesos a ruido o a señal permanece algo ambigua, dejando dudas de si el propio diseño de los filtros (definición de las rampas, etc) contribuye a la aparición de efectos no deseados. En consecuencia se ha optado por mantener solamente la aplicación del primer filtro fk1, con mayor garantía de conservar todas las componentes de la señal.

11.3 OBTENCION DE CONJUNTOS CDP DE TRAZAS FILTRADAS EN FK

En la fig. 30 se reproducen las secciones de cobertura simple, limitadas a los primeros 125 ms, obtenidas con aplicación del primer filtro fk1, para eliminar el GR; su efecto es notable en este sentido (comparar con las secciones de la fig. 18).

Al igual que tras la aplicación del filtro en el dominio de las frecuencias, se ha procedido a obtener los conjuntos de trazas de CDP tras la aplicación de los filtro f-k; en la fig. 31 se muestra un ejemplo del resultado de obtener los conjuntos de trazas que forman los CDP 50, 100, 150, 200, 300 y 400 del perfil P2T100, con aplicación de los dos filtros diseñados en el dominio f-k, apreciándose que aunque ha mejorado la coherencia de las señales respecto de la obtenida con la aplicación de los filtros en el dominio de las frecuencias (ver fig. 25), no son de la calidad necesaria para proceder a un análisis de velocidad.

En la misma fig. 31, se muestran las trazas de los conjuntos CDP 100, 200, 300 y 400, para el perfil P1T100, obtenidas tras aplicación de sólo el primer filtro fk1 a los registros. La coherencia de la señal en los CDP, aunque es susceptible de permitir un análisis, viene perjudicada por la clara presencia de ruidos de baja velocidad, desaconsejando por tanto la prosecución de un proceso en cobertura múltiple.

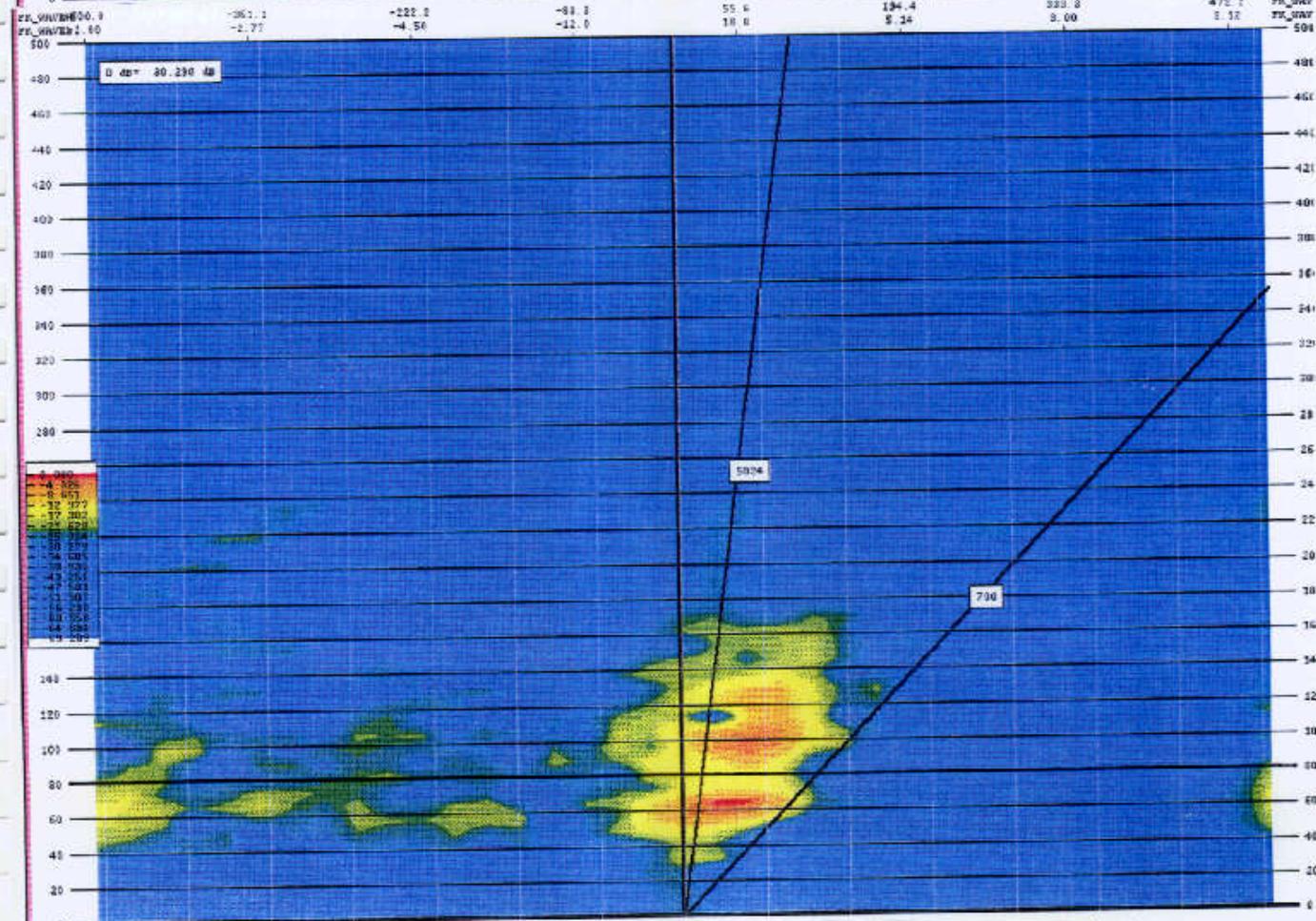
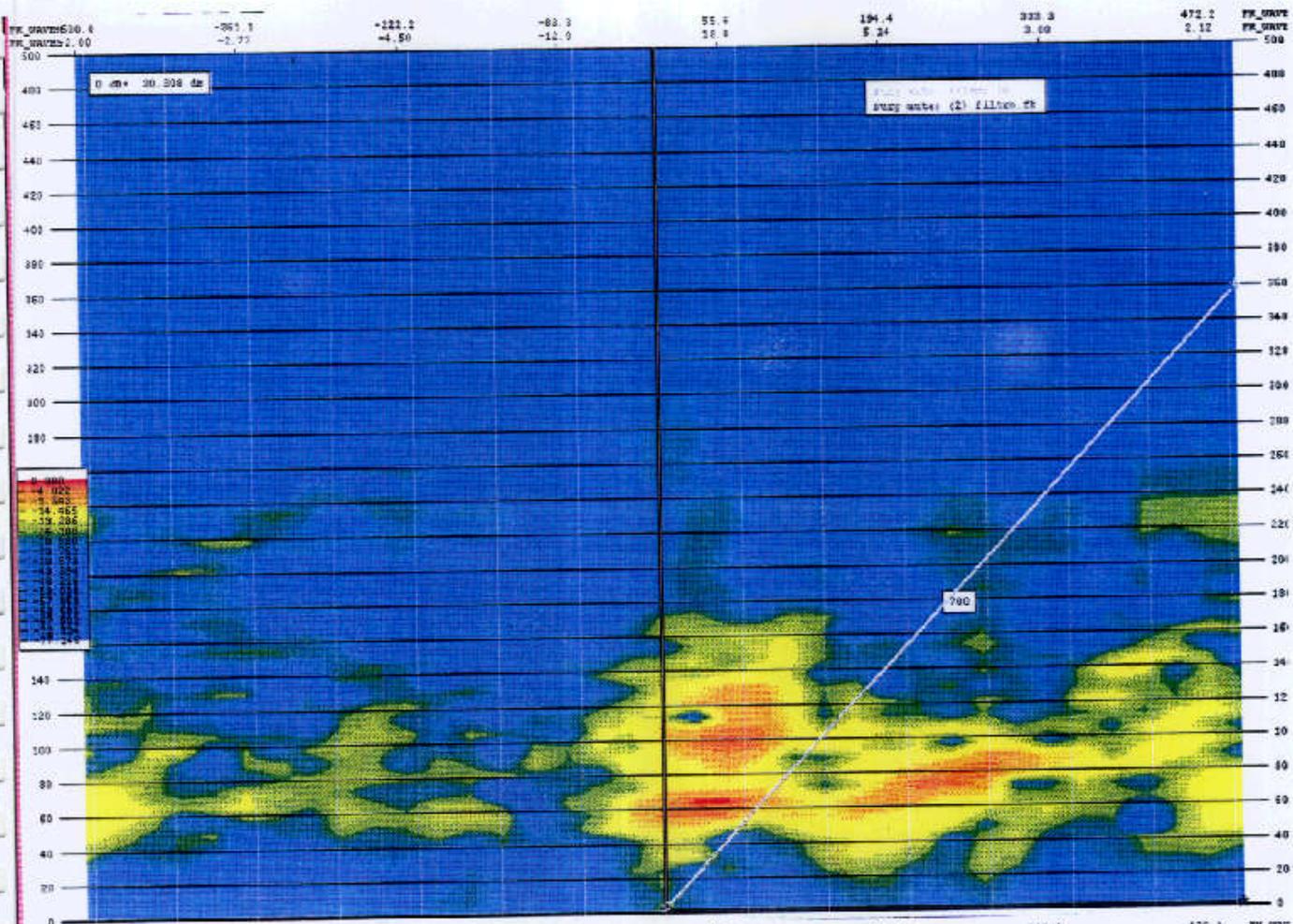


Fig 26a Espectros f-k del registro PT150 del perfil PIT100; el espectro de la parte superior pertenece al registro bruto y el de la parte inferior al registro filtrado en el dominio fk, con un filtro "abanico" para velocidades aparentes inferiores a 700 m/s. Los registros pueden observarse en la fig. 26b.

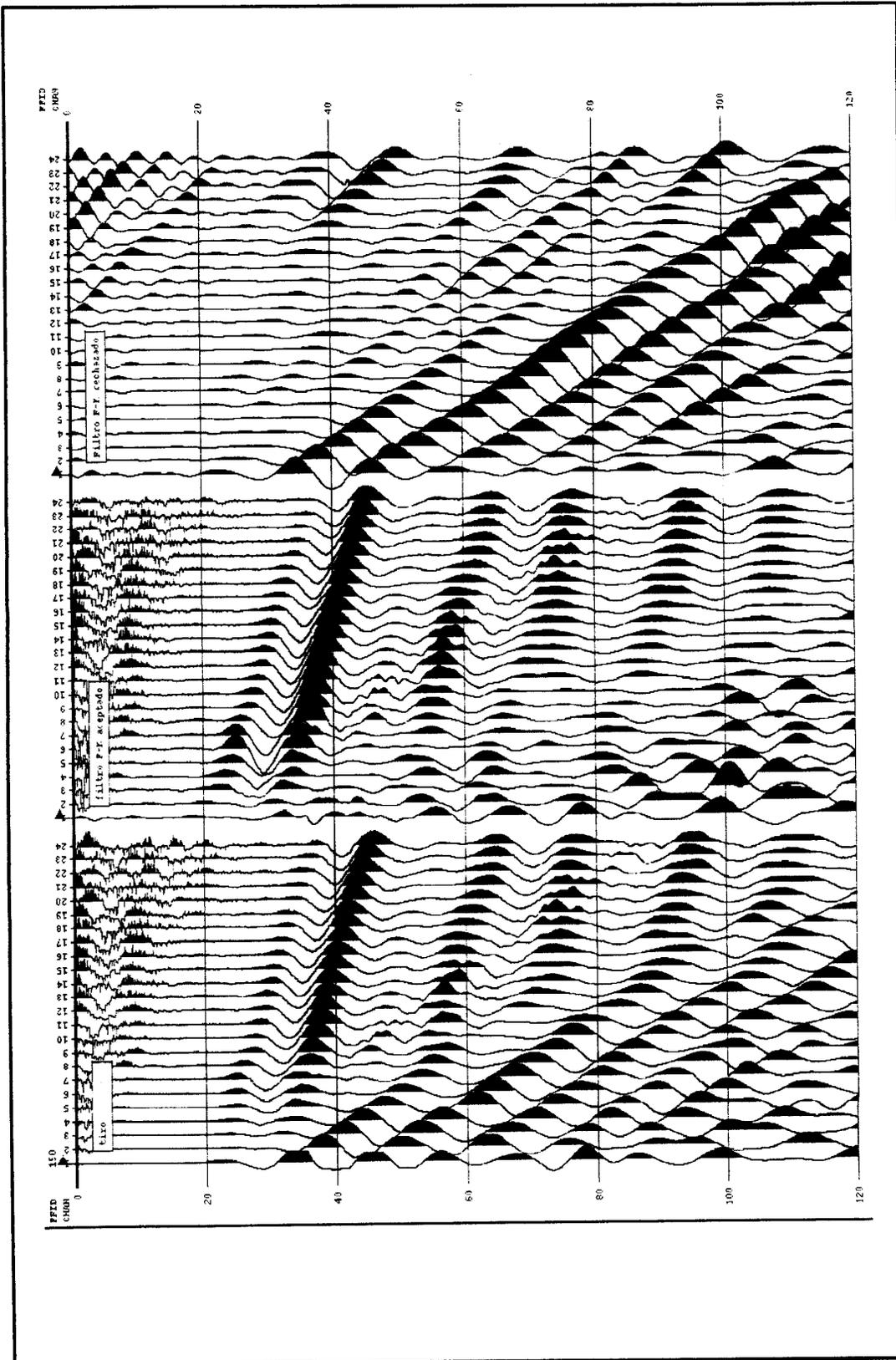


Fig. 26b Registro PT150 del perfil PIT100 bruto, aceptado por el filtro f_k (velocidades aparentes superiores a 700 m/s) y rechazado. En estos registros no se ha realizado la supresion del ruido presente antes del inicio de las primeras llegadas. Ver tambien fig. 27b.

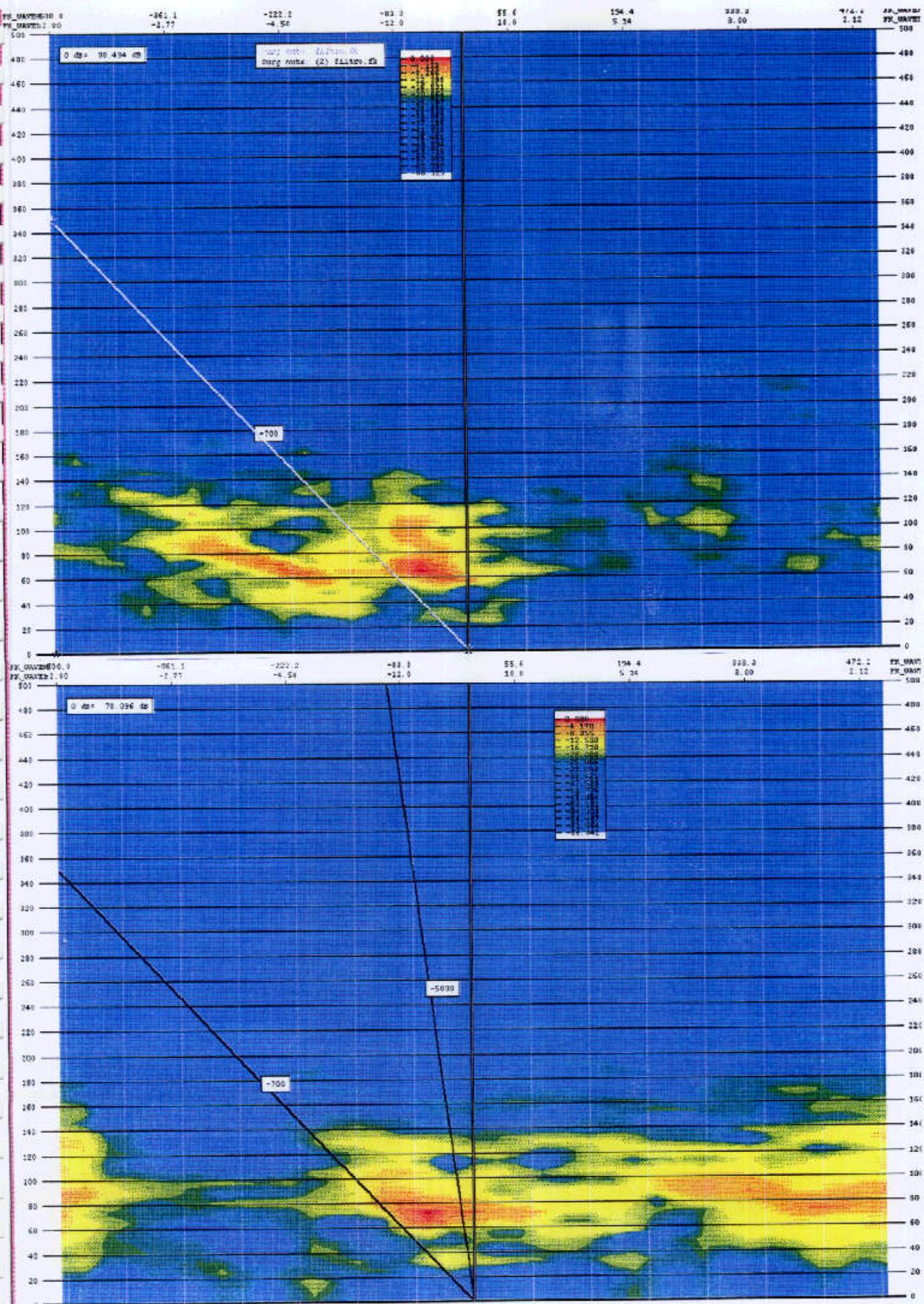


Fig. 27a Espectros f-k del registro PT150 del perfil PIG40; el espectro de la parte superior pertenece al registro bruto y el de la parte inferior al registro filtrado en el dominio fk, con un filtro "abanico" para velocidades aparentes inferiores a 700 m/s. Los registros pueden observarse en la fig. 27b.

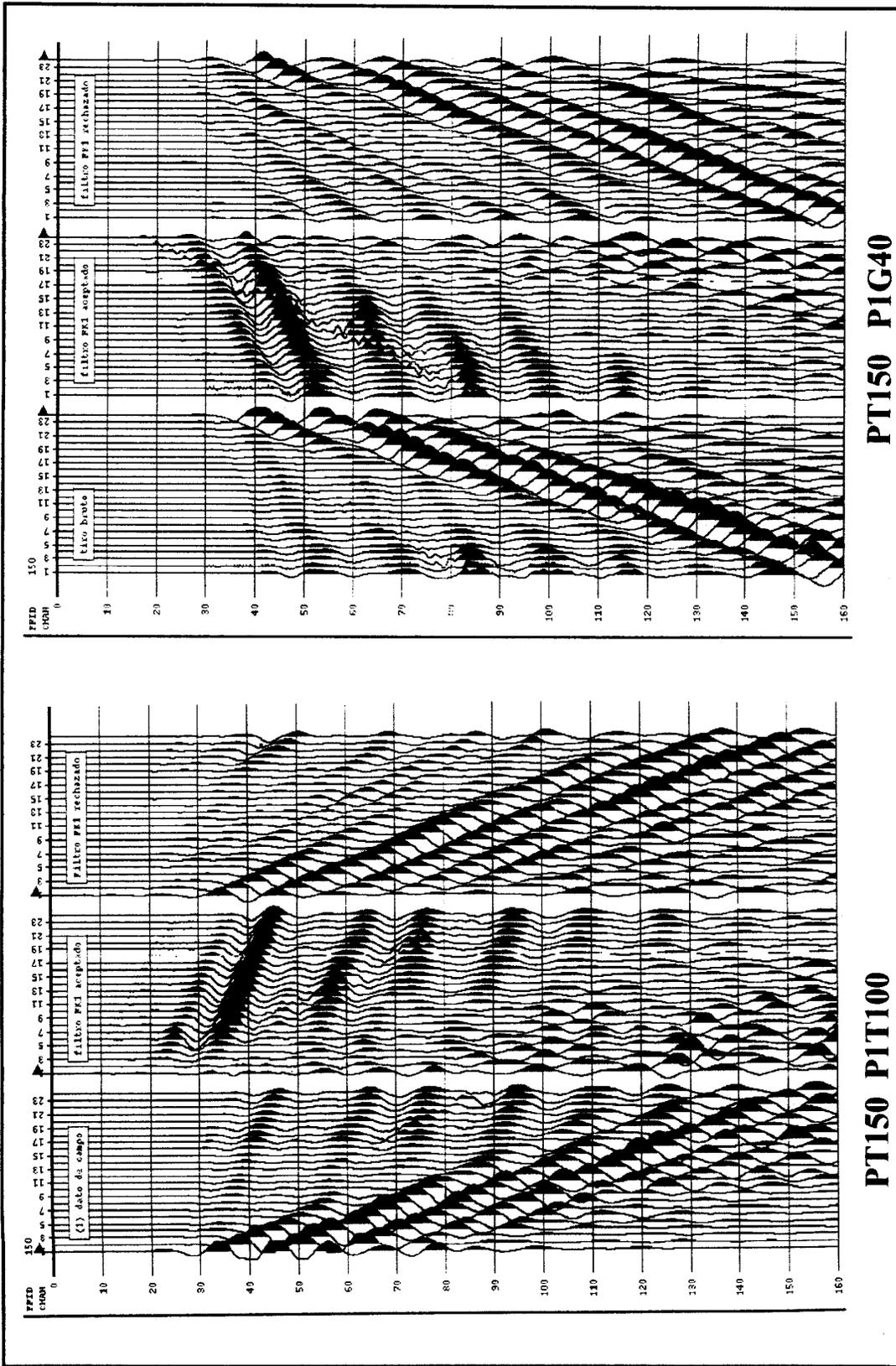
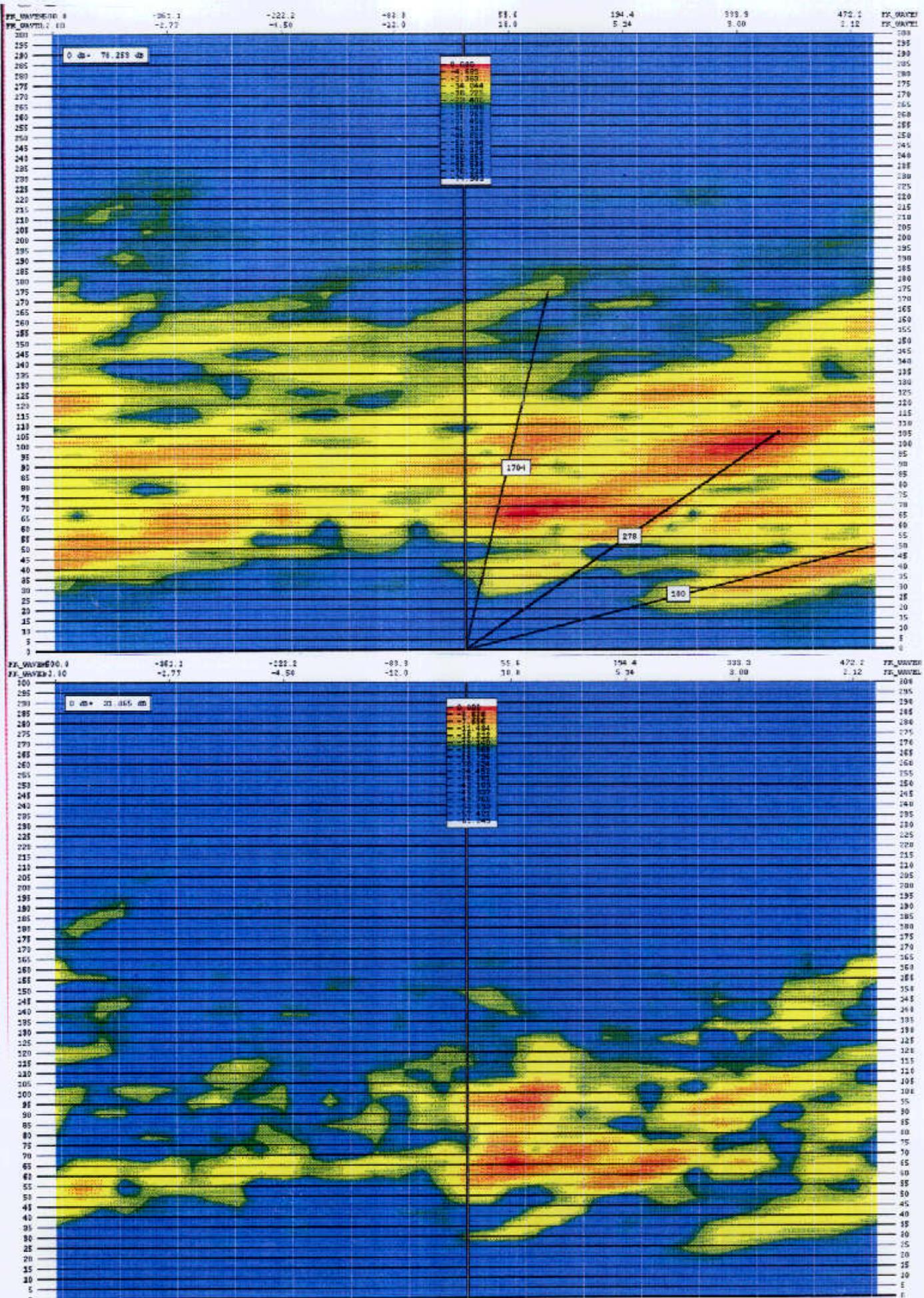


Fig. 27b Registro PT150 del perfil PTT100 y registro PTT150 del perfil PIG40 brutos, aceptados por el filtro f_k (velocidades aparentes superiores a 700 m/s) y rechazados. En estos registros se ha realizado la supresión del ruido presente antes del inicio de las primeras llegadas. Ver también fig. 26b.



ig. 28a Espectros f-k del registro PT4 del perfil P2T100, con indicación de velocidades aparentes. El espectro de la parte superior esta obtenido sin aplicar ganancia AGC, mientras que el de la parte inferior tiene una AGC en operador de 40 ms.

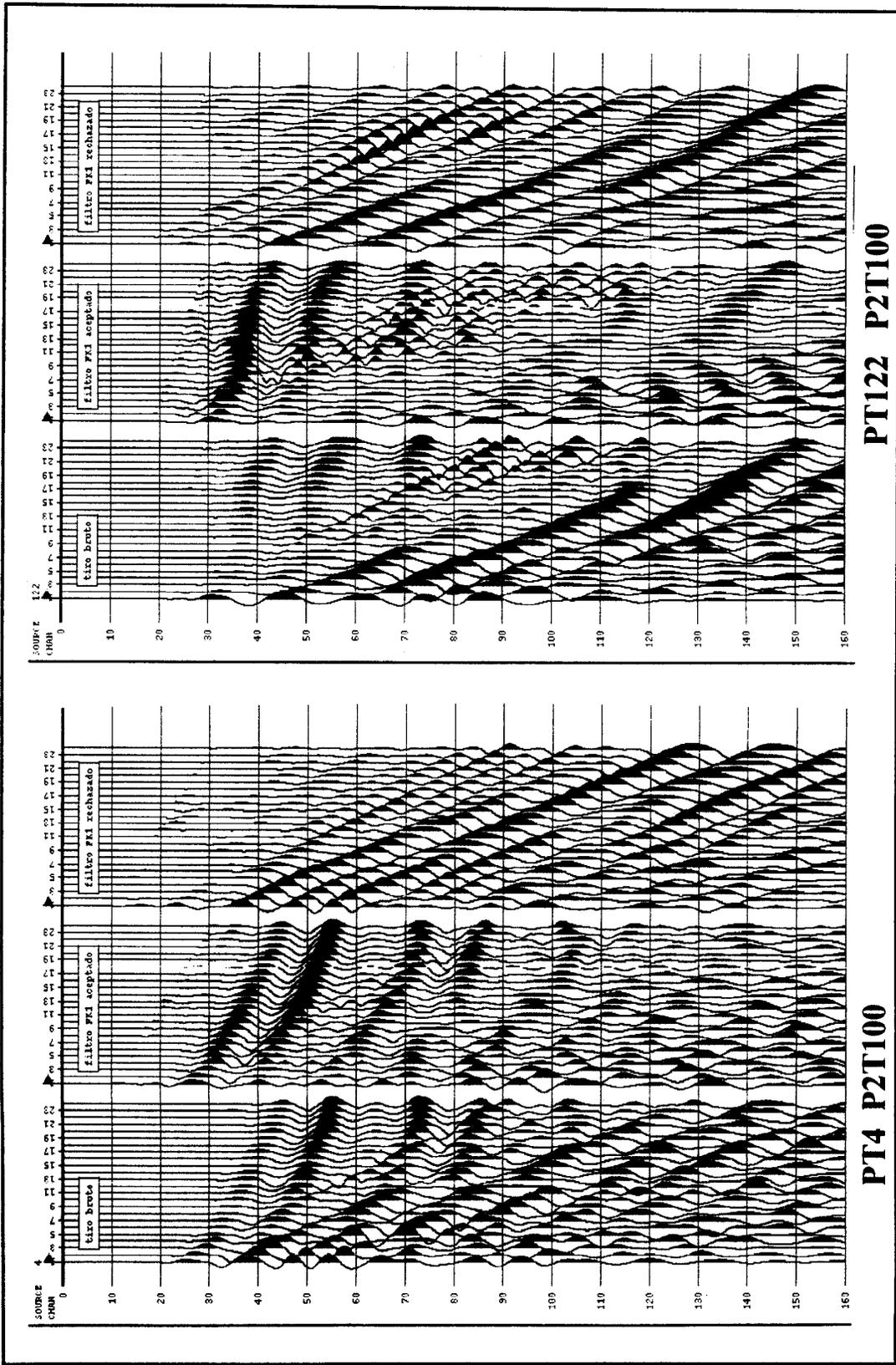


Fig. 28b Registros PT4 y PT122 del perfil PT100 brutos, aceptados por el filtro f_k (velocidades aparentes superiores a 700 m/s) y rechazados. En estos registros se ha realizado la supresión del ruido presente antes del inicio de las primeras llegadas.

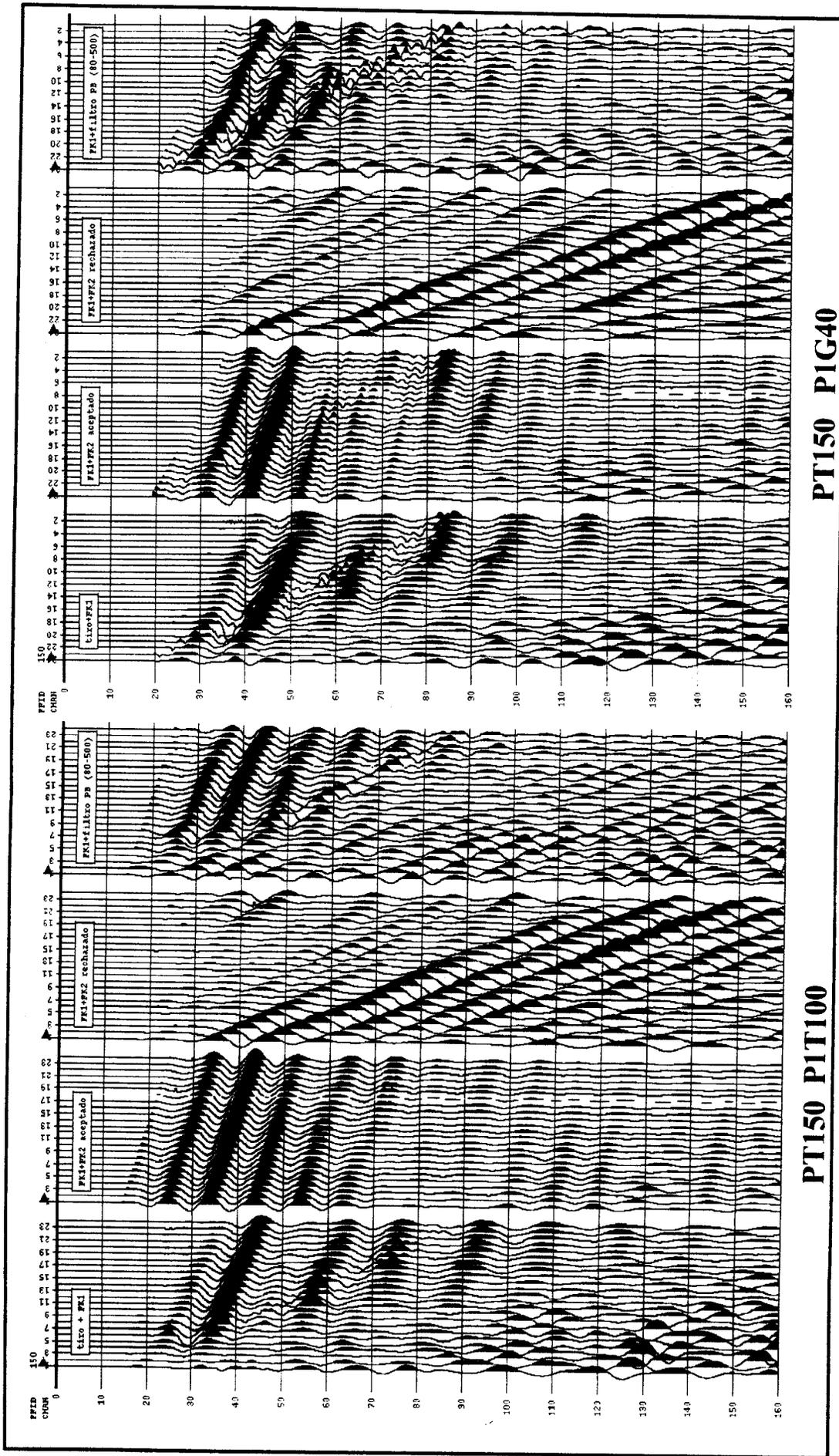


Fig. 29a Registros PT150 del perfil PIT100 y del perfil PIG40. La entrada es el registro filtrado por fk 1 (velocidades superiores a 700 m/s), al que se le ha aplicado un nuevo filtro fk2 (velocidades aparentes entre 700 y 5000 m/s y frecuencias aparentes entre 80 y 500 Hz) mostrandose tanto los registros aceptados como los rechazados. Para comparación con los aceptados se ha aplicado al registro de entrada un filtro en el dominio de frecuencias, dejando las señales entre 80 y 500 Hz.

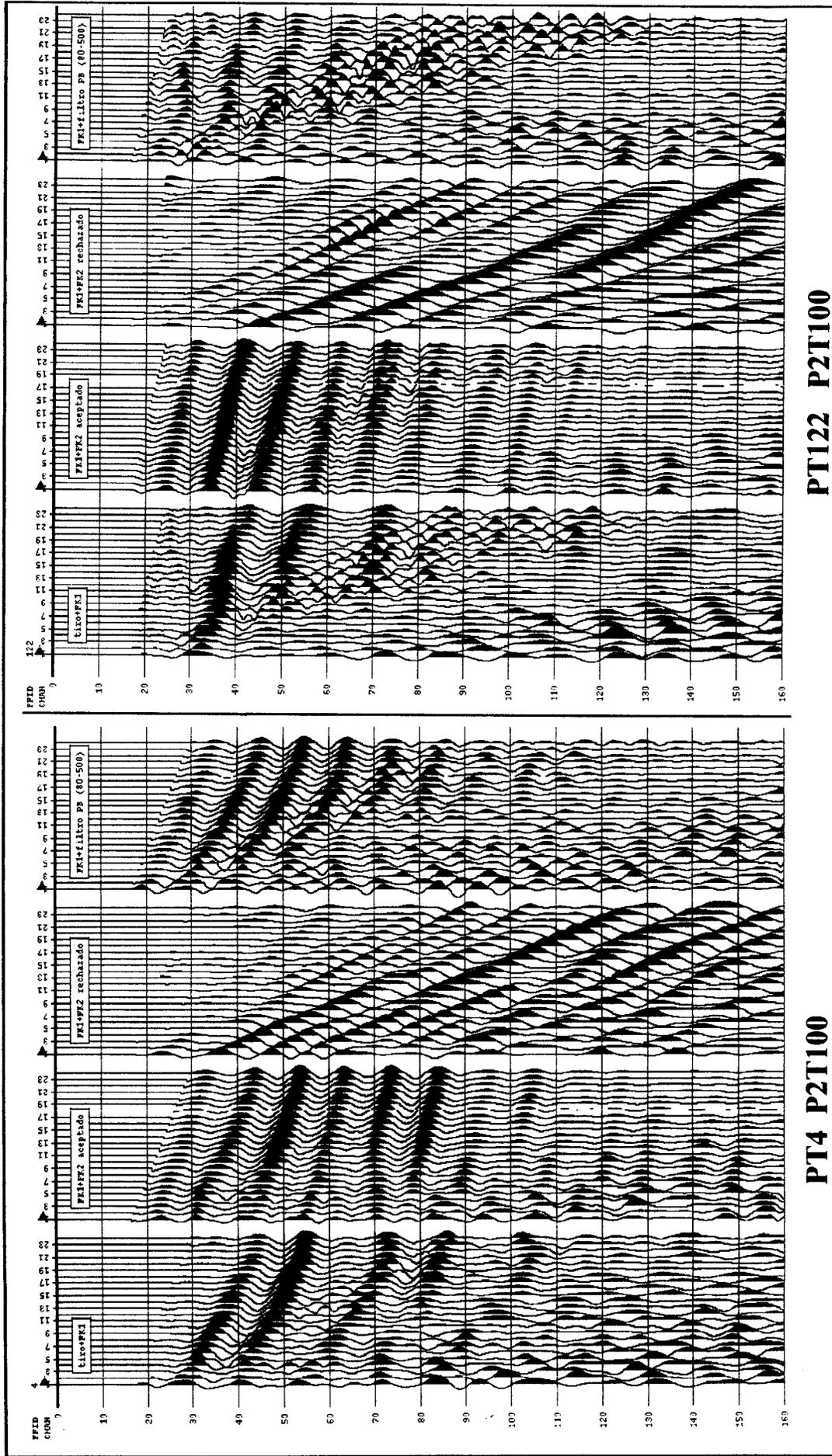


Fig. 29b Registros PT4 y PT122 del perfil PIT100. La entrada es el registro filtrado por fk 1 (velocidades superiores a 700 m/s), al que se le ha aplicado un nuevo filtro fk2 (velocidades aparentes entre 700 y 5000 m/s y frecuencias entre 80 y 500 Hz) mostrándose tanto los registros aceptados como los rechazados. Para comparación con los aceptados se ha aplicado al registro de entrada un filtro en el dominio de frecuencias, dejando las señales entre 80 y 500 Hz.

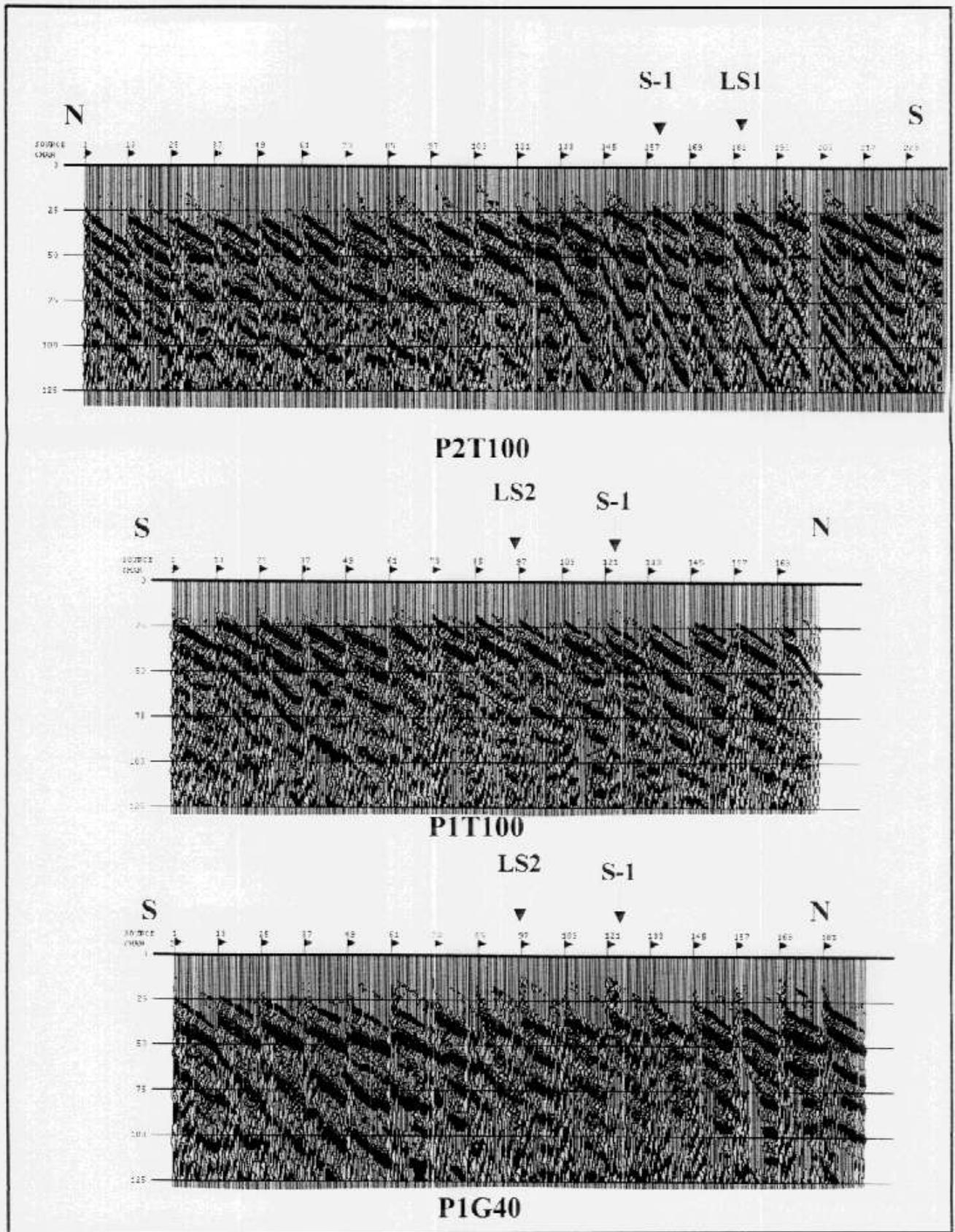
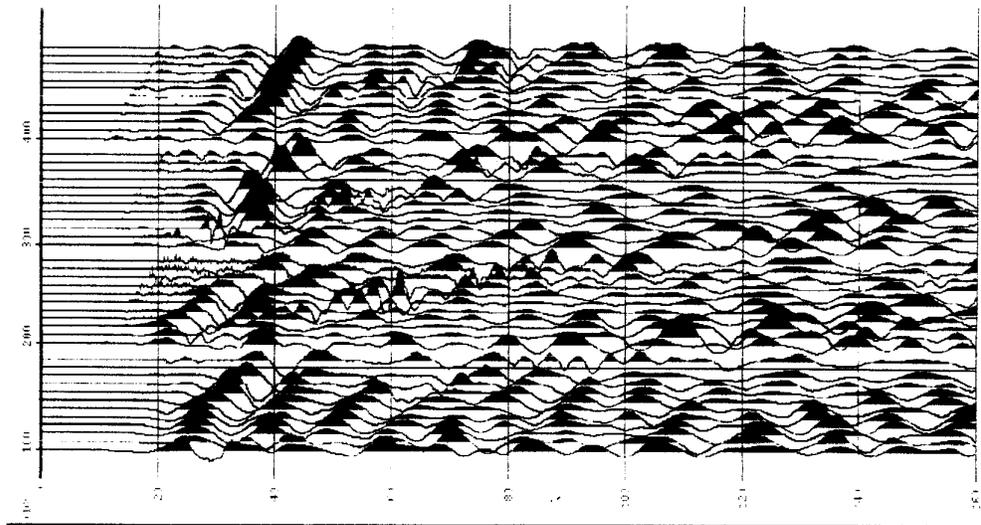
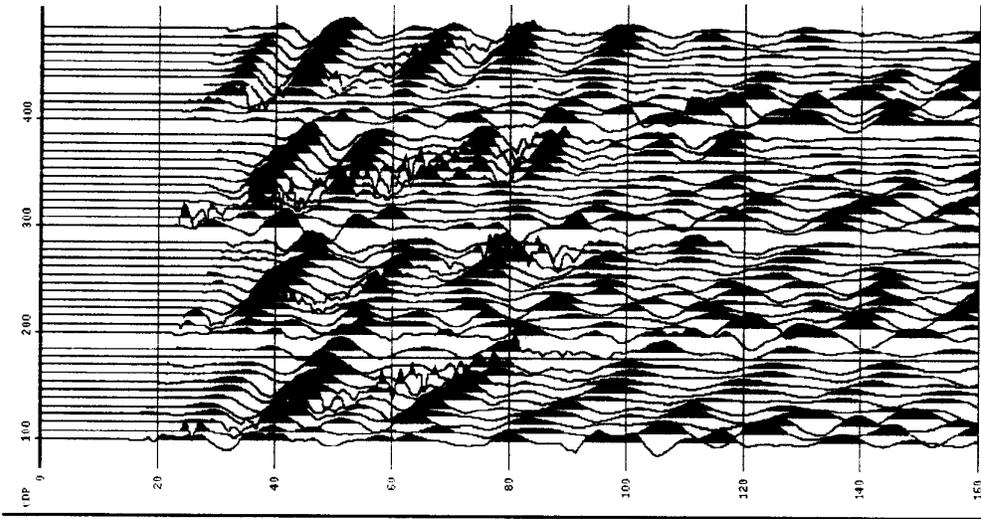


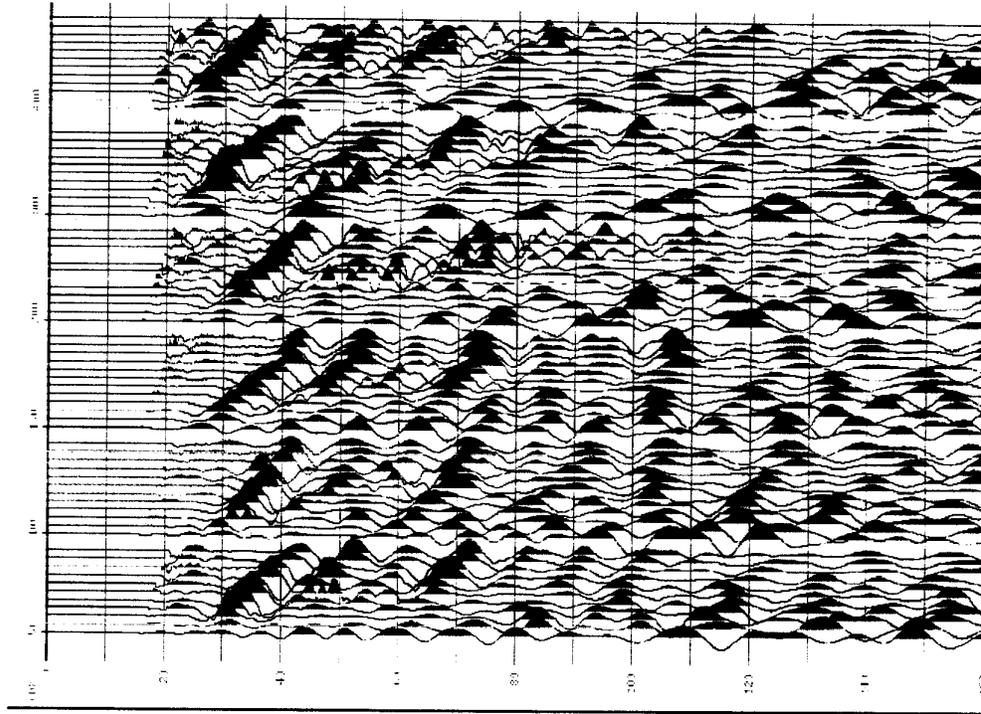
Fig. 30 Secciones en cobertura simple mostradas en la fig. 18, aplicando a los registros el filtro f_k1 (eliminación de velocidades aparentes inferiores a 700 m/s)



P1G40 FK1



P1T100 FK1



P2T100 FK1+FK2

Fig. 31 Conjuntos de CDP obtenidos tras aplicar a los registros brutos los filtros $fk1$ (supresión de velocidades aparentes inferiores a 700 m/s) y $fk1+fk2$ (supresión de velocidades aparentes inferiores a 700 m/s y superiores a 5000 m/s, dejando solo las frecuencias entre 80 y 500 Hz)

12. SECCIONES DE OFFSET COMUN.

12. SECCIONES DE OFFSET COMUN

Como consecuencia de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados para tratar de mejorar la relación señal/ruido y obtener conjuntos de trazas CDP válidos para un proceso en cobertura múltiple, se ha evaluado la alternativa de efectuar la composición de una sección sísmica con los registros de campo mediante la técnica de secciones de offset común, en la que la misma traza (misma distancia al punto de tiro) de tiros sucesivos son colocadas correlativamente; si dicho offset fuera cero, el resultado sería equivalente al de una sección en cobertura múltiple, sin las ventajas de mejora de la relación señal/ruido que aporta la adición de trazas.

Se ha seleccionado el offset de 25 m como el óptimo (el menos afectado por los ruidos), lo que supone la traza del canal 20 de cada registro; los tiempos de los sucesos sísmicos al utilizar esta distancia vienen incrementados en unos 8 a 12 ms respecto de los de offset cero (el normal move out es menor a mayores profundidades), por lo tanto la reflexión del horizonte (c) se observará en estas secciones a los 50 ms, la del horizonte (d) a los 70 ms y la del horizonte (e) a los 80 ms.

Se han obtenido además de las secciones para los tiros brutos, las resultantes de aplicar alguno de los filtros anteriormente diseñados, optándose por el filtro fk1 como una solución que mejora el aspecto de las señales registradas, desprovistas del GR, aunque sigan contaminadas de onda aérea y otros ruidos.

En ningún caso se ha realizado un muting o supresión de las primeras llegadas, por lo que a pesar de su posible interferencia con señales de reflexión, deben ser consideradas fundamentalmente como señales de refracción, y por tanto sin significado interpretable en estas secciones.

La numeración de las trazas en las secciones se refiere a la posición de las estaciones sobre el terreno, por lo que resultan comparables entre todas ellas.

Para el perfil P2T100, en la fig. 32 se presentan las secciones de offset común para las trazas brutas, con aplicación de un filtro pasa-banda en frecuencias y con aplicación del filtro fk1; en la sección bruta se aprecia bien el horizonte (c), excepto entre las estaciones 155 a 195, con un ligero buzamiento hacia el norte, el horizonte (d) también desaparece en parte del tercio sur del perfil y buza también hacia el norte; no se aprecia el reflector (e). La aplicación de un filtro

pasa banda en frecuencias, con la gama 80-100/500-520, elimina eficazmente el GR, pero también hace desaparecer gran parte de la señal de los horizontes (c) y (d), excepto en el tercio norte, lo que sugiere una variación en las condiciones de transmisión de las frecuencias a lo largo del perfil; por otra parte se crea un suceso ficticio a los 80 ms, resultado de una falsa coherencia de componentes de la onda aérea, que podría ser confundido con el reflector (e), hipótesis no aceptable, ya que se daría la paradoja de que las altas frecuencias de la señal se pierden en la zona más somera y se conservan en la más profunda. Se reitera por tanto una vez más que la aplicación de filtros en estos registros tiene efectos críticos e imprevisibles. La mejor sección de este perfil es posiblemente la obtenida por aplicación del filtro fk1, presentado con AGC (operador de 40 ms) y aumento de coherencia, donde es más fiable que la reflexión a los 85 ms de la porción sur sea debida al reflector (e). Esta sección será comentada en más detalle en párrafos posteriores.

Para el perfil P1T100 en la fig. 33 se presentan las secciones de 160 ms en offset común de 25 m, para las trazas brutas y con la aplicación del filtro fk1, con AGC (40 ms de operador) y mejora de coherencia; los reflectores de los horizontes (c) y (d) presentan buzamiento hacia el norte, con una buena continuidad en toda la sección filtrada; se presenta, al igual que en la línea LS2, una pérdida de información en la parte central del perfil para la sección de trazas brutas, lo que hace pensar que sea debido a la naturaleza del terreno; el filtro ha conseguido mejorar la continuidad del reflector sobre los 80 ms, aunque parte de él (entre las estaciones 85 y 156) es debido posiblemente a la onda aérea, dejando visible un reflector al inicio y al fin del perfil, adjudicable al horizonte (e).

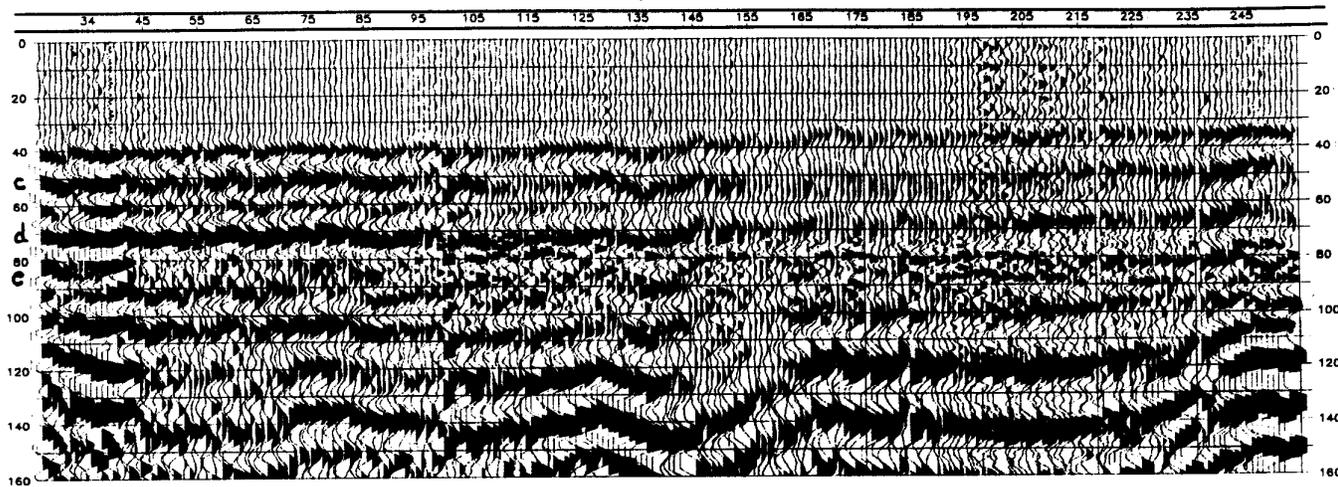
Para el perfil P1T40, la figura 34 presenta las secciones con las trazas brutas y el resultado de aplicar el filtro fk1, AGC(40 ms) y filtro de mejora de coherencia. La importancia del GR es mayor en esta sección bruta, obscureciendo las señales en los tiempos menores de 80 ms. El proceso de filtrado ha conseguido corregir esta situación, resultando bien visibles y con buena continuidad todos los reflectores, aunque es evidente el mayor contenido en bajas frecuencias para esta sección.

El perfil P1G40 se presenta en la fig. 35 en sección de trazas brutas, filtradas con fk1 y filtradas en frecuencias; el resultado de aplicar el filtro fk mejora sustancialmente la sección, siendo identificables todos los horizontes presentes, con buena continuidad durante toda la sección. El filtro pasa banda 80-100/500-520 Hz, con rampa de 24dB, no mejora la calidad, eliminando

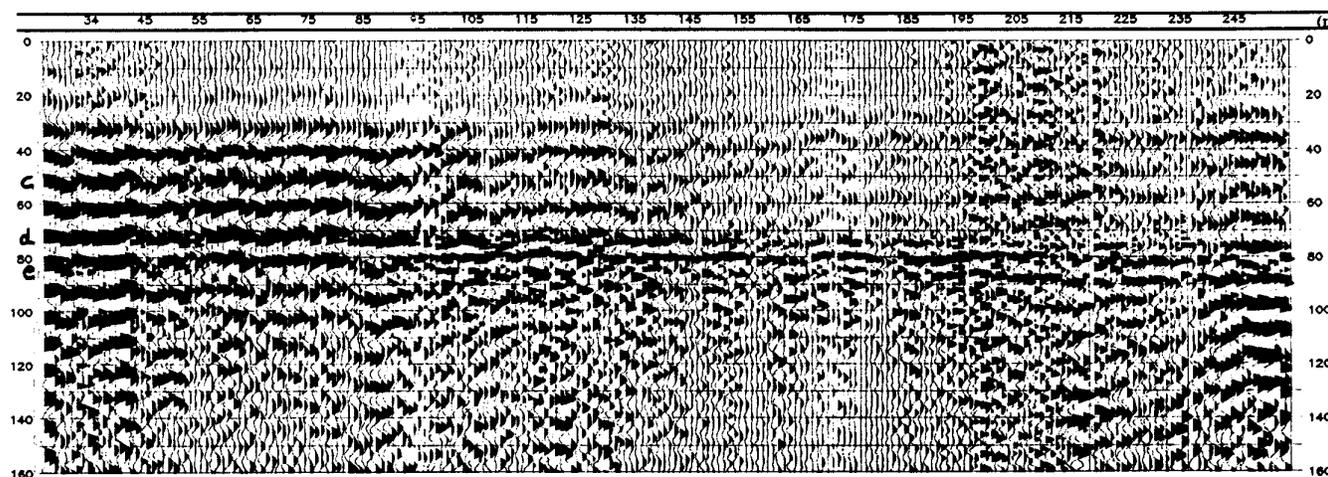
principalmente la onda aérea, que resulta menos perjudicial sobre los 80 ms.

Finalmente, en la fig. 36 se presentan las secciones para el perfil P1G100; en estas es mayor la influencia de la onda aérea, cuyas altas frecuencias perjudican desde los 70 hasta los 90 ms, siendo parcialmente eliminadas en la sección filtrada por fk1.

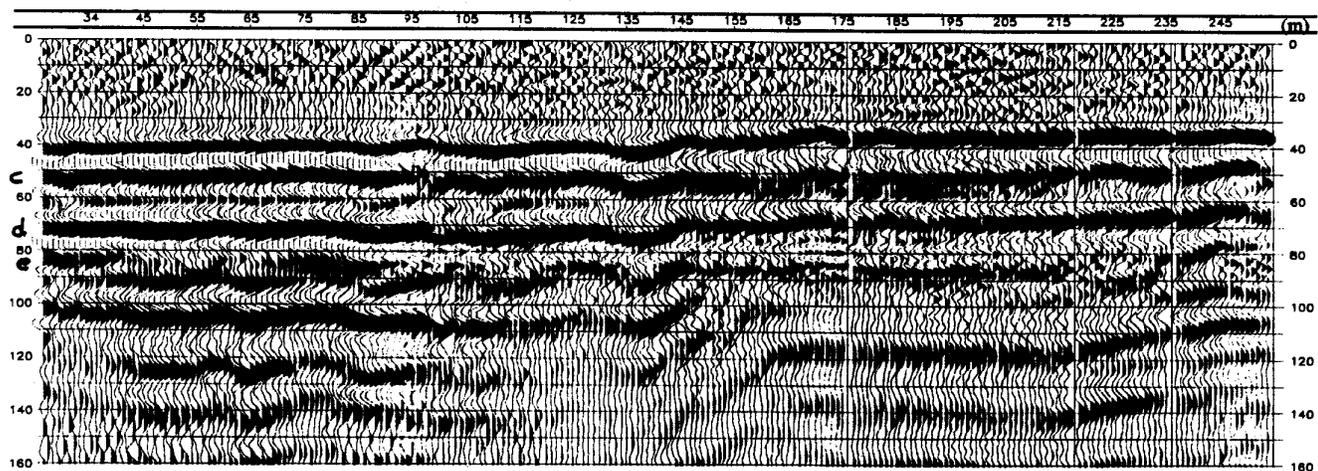
Para completar el estudio comparativo entre secciones, se han representado conjuntamente en la fig. 37, que debe ser analizada junto con los espectros de las diversas fuentes de energía y geófonos, mostrados en la fig. 19. Tanto en las secciones de trazas brutas como en las filtradas por fk1, se corrobora el resultado deducido a la vista de los espectros de las diferentes fuentes y geófonos, en cuanto a contenido frecuencial; sin embargo, desafortunadamente, parece confirmarse que en este terreno de la Isla Bacuta, la combinación de fuente y geófonos capaz de generar y registrar las frecuencias más altas (maza y geófonos de 100 Hz), ha sido también especialmente eficaz en generar y registrar la onda aérea; las secciones brutas y filtradas registradas con geófonos de 100 Hz contienen, incluso con una inspección solamente visual, mayores frecuencias que las registradas con geófonos de 40 Hz, y las obtenidas con maza, son también más ricas en altas frecuencias que las obtenidas con escopeta.



trazas brutas

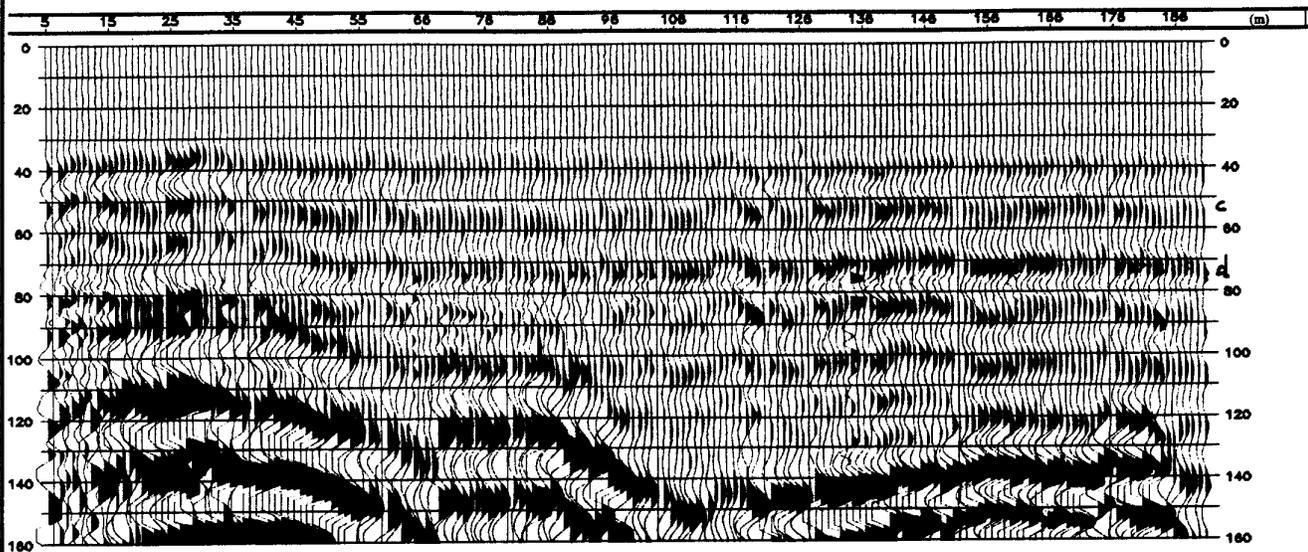


trazas filtradas pasa-banda 80-100/500-520 Hz

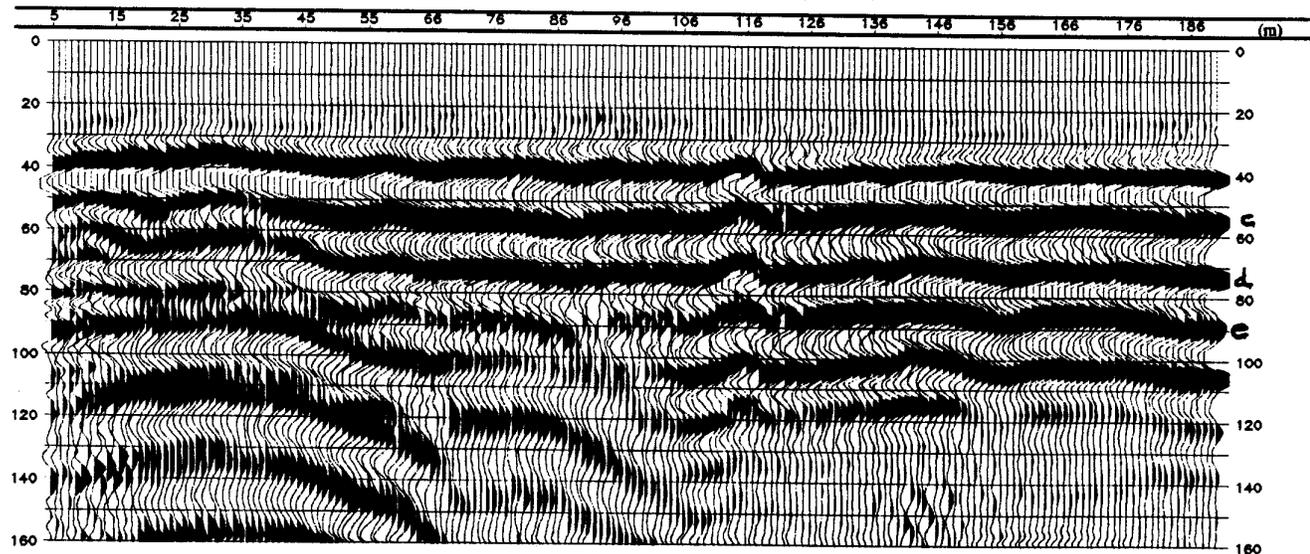


trazas filtradas en fk eliminando velocidades inferiores a 700 m/s

Fig. 32 Sección de offset común 25 m del perfil P2T100.

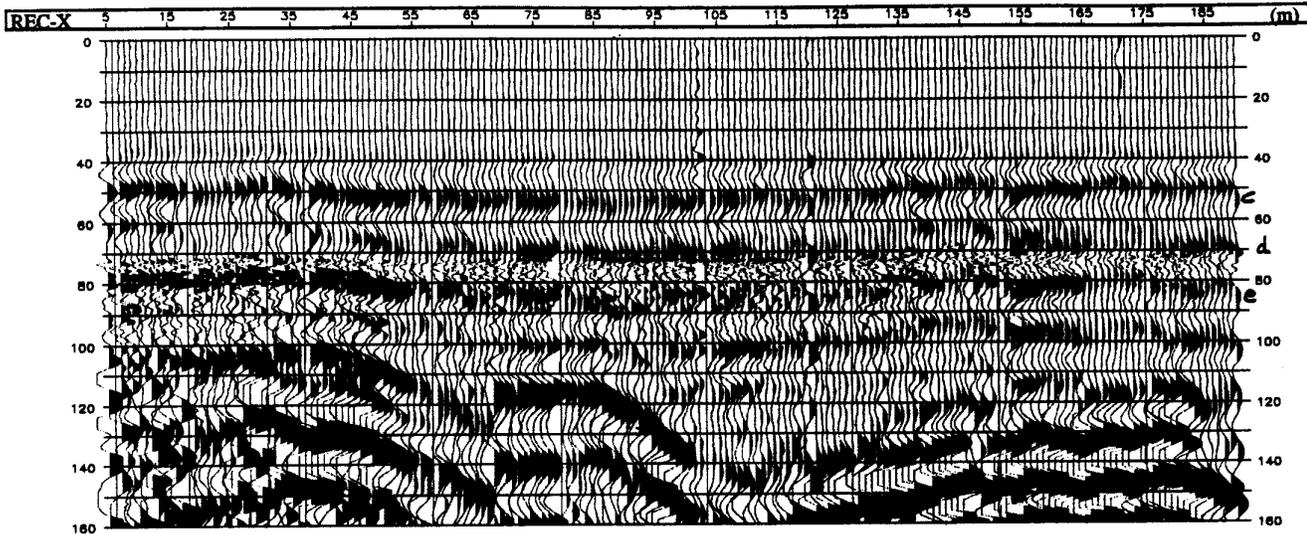


trazas brutas

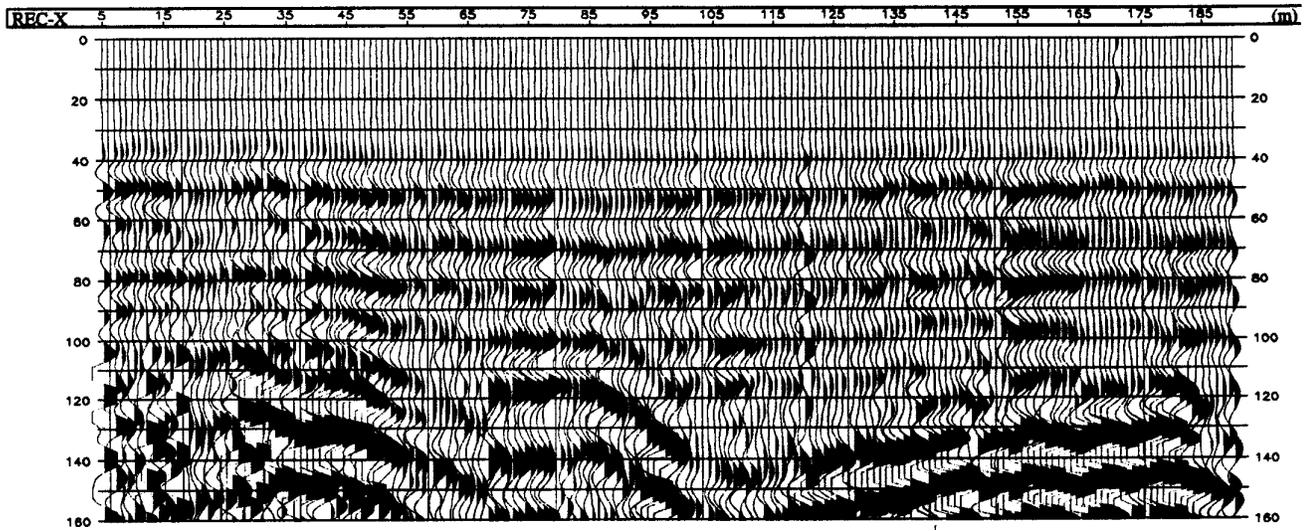


trazas filtradas en fk eliminando velocidades inferiores a 700 m/s

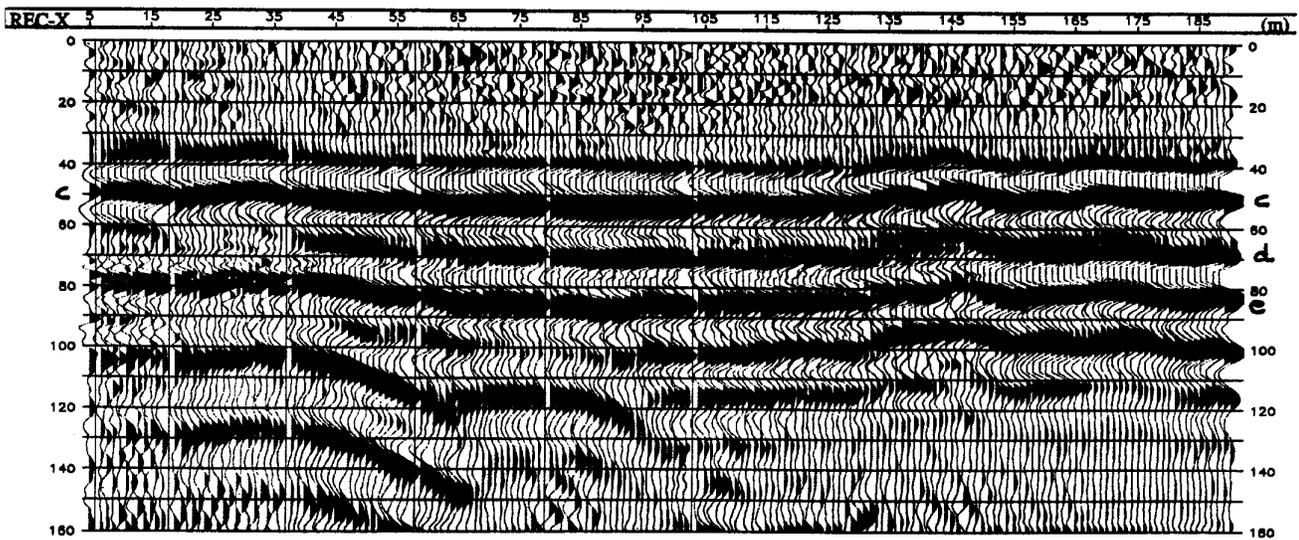
Fig. 34 Sección de offset común 25 m del perfil P1T40.



trazas brutas

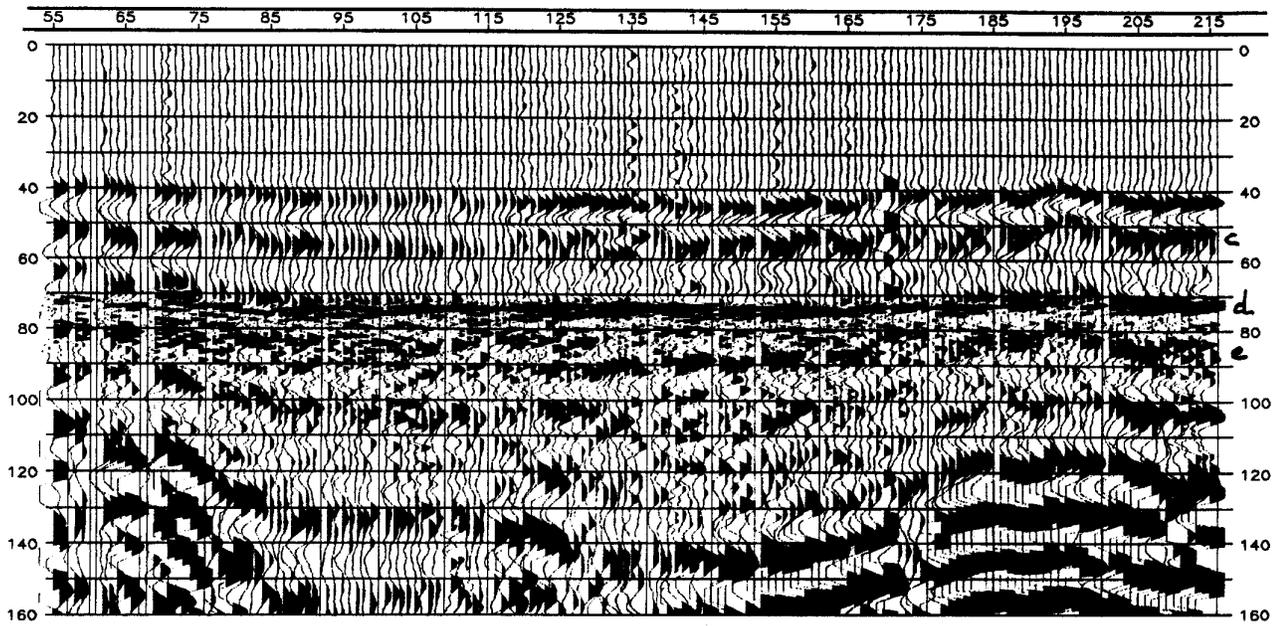


trazas filtradas pasa-banda 80-100/500-520 Hz

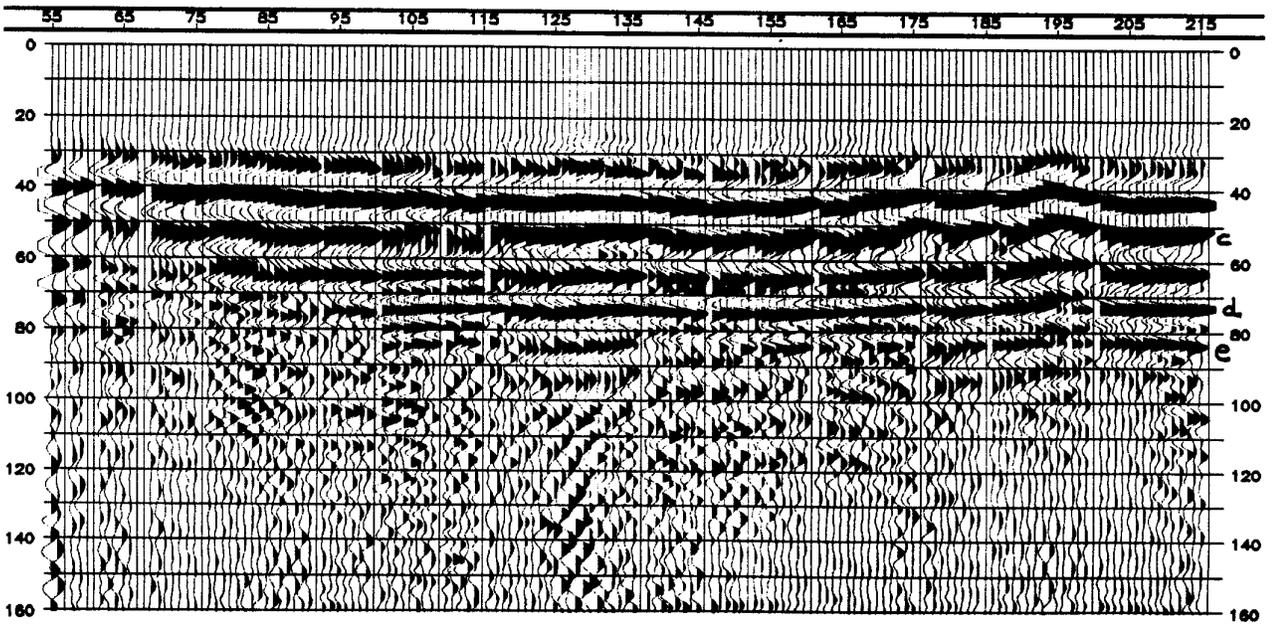


trazas filtradas en fk eliminando velocidades inferiores a 700 m/s

Fig. 35 Sección de offset común 25 m del perfil P1G40.



trazas brutas



trazas filtradas en fk eliminando velocidades inferiores a 700 m/s

Fig. 36 Sección de offset común 25 m del perfil P1G100.

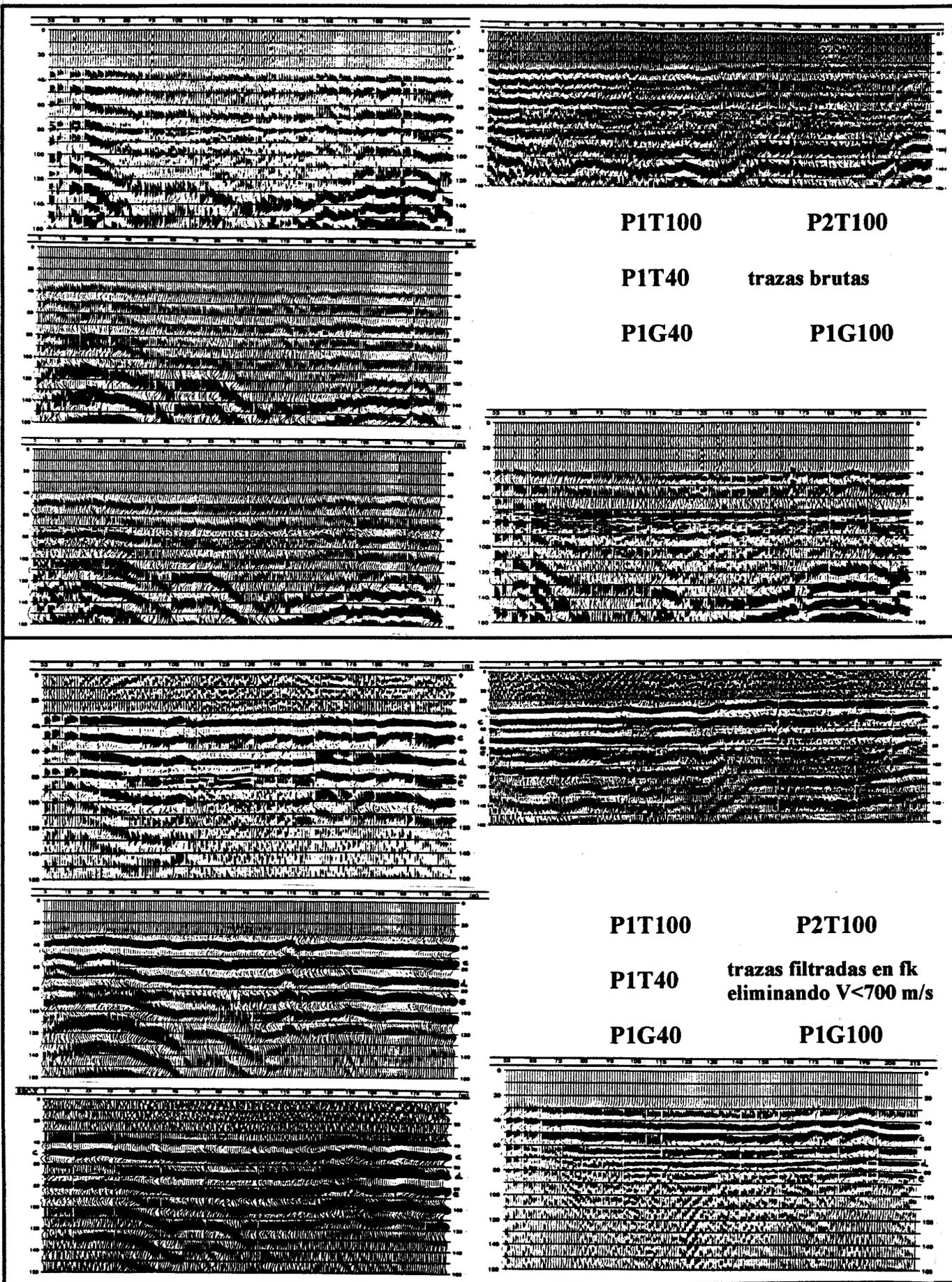


Fig. 37 Comparación de las secciones de offset común 25 m para todas fuentes y geófonos.(ver fig. 19)

13. INTERPRETACION.

13. INTERPRETACION

La continuidad de los diferentes horizontes de reflexión se aprecia ocasionalmente interrumpida, por anomalías con aspecto de pequeños relieves o saltos que no son coincidentes en su posición en las diferentes secciones obtenidas. En el perfil P1T100 existe una "elevación" de los reflectores (incluida la primera llegada) sobre las estaciones 105-110, 160-165 y 185-195; en el perfil P1T40, se dan estos "accidentes" entorno de las estaciones 55 y 116; en el perfil P1G100 son observables sobre las estaciones 160, 175 y 185-195 y en el perfil P1G40 sobre las 140-145 y 165.

Esta falta de coincidencia hace pensar que tales "accidentes" no son realmente debidos a variaciones geológicas del subsuelo, sino a modificaciones en las condiciones de registro. En efecto, si existiera una zona anómala (p.e. disparos de escopeta efectuados a mayor profundidad) entorno de la estación 80, los registros afectados serían los de la zona de la estación 55 para los geófonos de 40 Hz y los de la zona de la estación 105 para los geófonos de 100 Hz.

Lo mismo ocurriría si hay disparos de escopeta anómalos entorno de la estación 140, que afectaría a las trazas entorno de la 115 para los geófonos de 40 Hz y entorno a la traza 165 para los geófonos de 100 Hz. En el caso de emplear maza, una anomalía en los tiros entorno de la estación 170 se traduce por anomalías en las trazas 140 para 40 Hz y 195 para 100 Hz.

La anomalía detectada entre las estaciones 185-195 para los perfiles P1T100 y P1G100 pudiera ser debida a la colocación de los geófonos de 100 Hz, ya que no se observa en las secciones equivalentes obtenidas con geófonos de 40 Hz; sin embargo, el pequeño salto observado entre las estaciones 160-165 parece ser visible en todas las secciones, por lo que pudiera tener un origen geológico.

Tras estas consideraciones, no parece razonable efectuar un seguimiento más detallado de horizontes sobre estas secciones de offset común, que encuentran en este aspecto su mayor limitación; estos efectos deberían verse suprimidos en secciones de cobertura múltiple, o por la aplicación de una corrección estática que tenga en cuenta la no perfecta nivelación de todos los puntos de tiro y geófonos.

La interpretación por tanto va a efectuarse solamente a nivel de asignación de reflectores a niveles geológicos detectados por el sondeo mecánico, utilizando para ello las secciones P2T100, P1G100 y P1T40.

La asignación de reflectores a interfases va a hacerse según orden secuencial con la columna sedimentológica de la fig. 7, y con modificaciones respecto del modelo inicialmente establecido para el origen de las reflexiones dentro de un orden de magnitud permisible.

En la fig. 38 se presenta la sección P1G100 junto con la columna del sondeo mecánico; el primer horizonte, sobre los 30 ms, es sin lugar a dudas una llegada de refracción, pero el segundo, b, pudiera ser una reflexión, que se ha adjudicado a la base del tramo de limos (6 o 5), dando paso a las arenas fangosas. El siguiente horizonte c, sobre los 50 ms, puede asignarse a la interfase entre tramos (4) y (3), de arenas fangosas a arenas, de muy diferente granulometría, y el reflector d sobre los 72 ms al techo de las gravas (tramos 2 a 1). Aparece un reflector intermedio, al que denominaremos l, sobre los 62 ms y que se encontraba muy atenuado en los registros (ver figura 16), por lo que no fue considerado en el modelo preliminar; puede asignarse a la interfase entre arenas y limos (tramos 3 a 2). El reflector e se asigna a la base de las gravas, con peor continuidad que los anteriores, no siendo perceptibles en esta sección reflectores más profundos, por lo que cabe considerar que el substrato de margas miocénicas es de gran potencia. Entre los reflectores l y d, y d y e, podrían ocasionalmente interpretarse otras capas, pero lo más probable es que se trate de coherencias debidas a los restos de la onda aérea.

La parte sur de la sección es más pobre en reflectores, lo que no es debido a causas geológicas, como puede apreciarse en los perfiles P1T40 o P1G40, que se inician en la estación 5 y muestran mejor continuidad al menos para los reflectores más someros, con cierta pérdida de energía a mayor profundidad. Es apreciable un ligero buzamiento de las capas hacia el norte, con una suave inclinación en el extremo sur.

Una dificultad que ofrece a la interpretación, sobre todo cuantitativa, el uso de secciones de offset común, frente a las secciones de cobertura múltiple, de offset cero, es que los tiempos considerados no son los de las trayectorias verticales. Los tiempos tomados para los reflectores no son además los de inicio de la onda, sino que se ha considerado una fase posterior, más fácilmente identificable en las secciones de aérea variable por la continuidad de el "pico" de onda marcado en negro.

Con los tiempos tomados, se han estimado los de trayectoria vertical evaluando aproximadamente el normal move out de cada reflexión, lo que junto con las

profundidades de las interfases asignadas como origen de cada reflexión, tomadas de la columna del sondeo mecánico, puede presentarse el siguiente modelo de velocidades:

reflector	twf leído	twf x=0	z	velocidad de intervalo	litología
(b)		30	5.8	386)	limos
c	52	40	9.5	740	arenas fangosas
l	62	51	21	2090	arenas
d	71	60	31.8	2400	limos arcillosos
e	83	69	38	1377	gravas

los tiempos están en ms, las profundidades en m y las velocidades en m/s. El horizonte b se ha tomado considerándolo como refracción probablemente interferida con una reflexión.

La distribución de velocidades encontrada, es compatible con la litología y justifica además las amplitudes de onda registradas: p.e. la débil amplitud de la reflexión l sería debida al bajo contraste entre 2090 y 2400 m/s, mientras que el reflector d, al pasar de 2400 a 1377 m/s presenta cambio de polaridad, lo que puede aceptarse a la vista de los registros, en donde esta onda tiene gran amplitud en la polaridad inversa para (ver fig. 15).

La sección P2T100 se muestra en la fig. 39, donde existen los mismos reflectores, salvo la primera llegada a los 30 ms. El paso de arenas a limos (reflector l) solo se aprecia en la mitad norte de la sección, siendo también de peor calidad y continuidad el horizonte e. Las llegadas posteriores a los 100 ms son debidas al ground-roll, peor eliminado por el filtro en esta sección. El diferente contenido frecuencial produce además desfases en las ondas, que tienden a situarse a menores tiempos en esta sección.

La peor resolución se presenta para la combinación de escopeta como fuente de energía y de geófonos de 40 Hz, como se aprecia en la sección P1T40 de la fig. 40; las frecuencias más bajas de esta sección son bien patentes por comparación a las anteriores, aunque es no obstante posible efectuar un buen seguimiento de las interfases c, d y e, con mayor interferencia del ground-roll y con menor repercusión de la onda aérea.

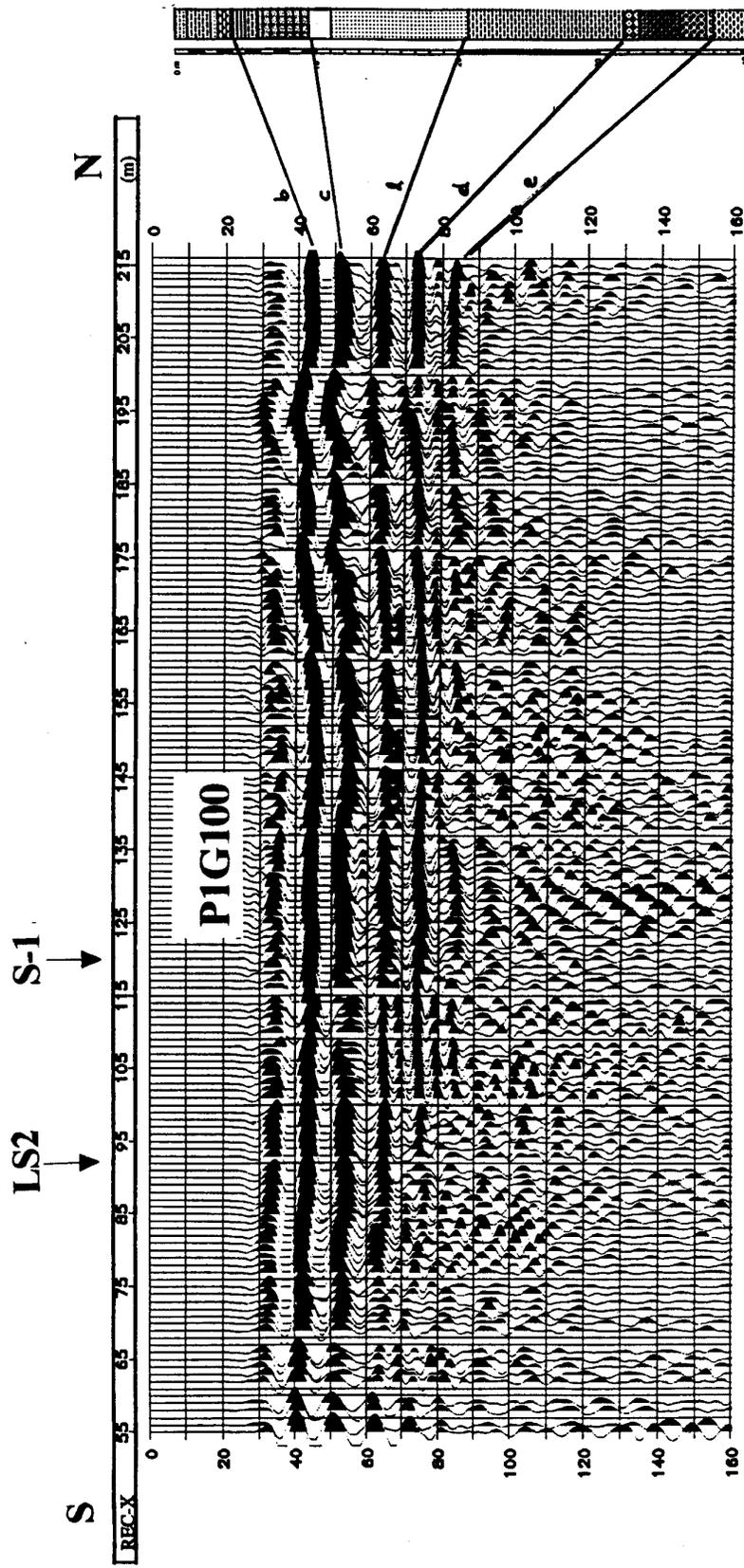


Fig. 38 Interpretación de la sección de offset común 25 m P1G100 (fuente de energía golpes de maza y geófonos de 100 Hz). La numeración de las trazas es según su distancia en metros al origen del perfil. Se indican la posición del sondeo mecánico S-1 y el cruce con la línea sísmica LS2.

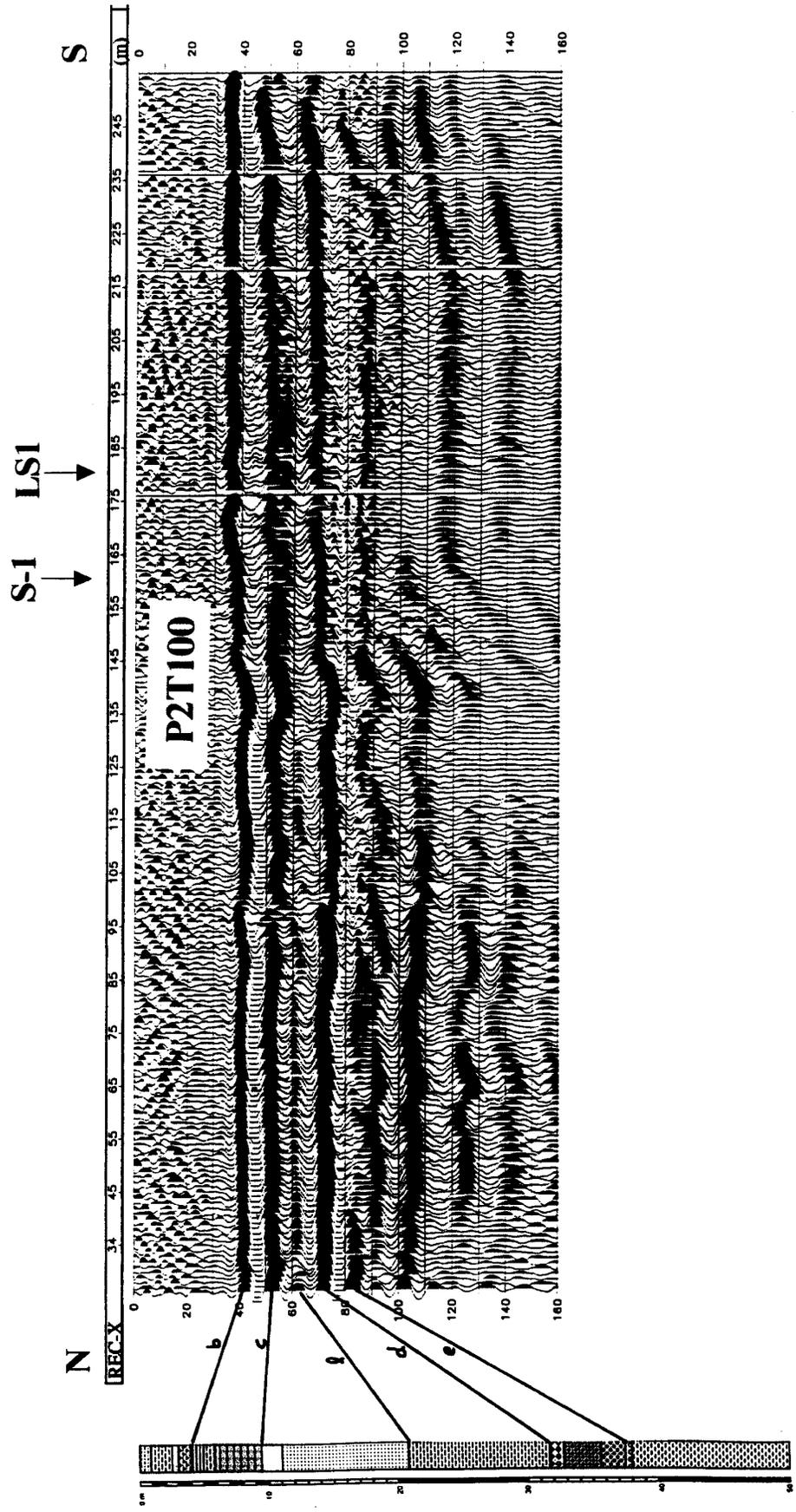


Fig. 39 Interpretación de la sección de offset común 25 m P2T100 (fuente de energía disparos de escopeta y geófonos de 100 Hz). La numeración de las trazas es según su distancia en metros al origen del perfil. Se indican la posición del sondeo mecánico S-1 y el cruce con la línea sísmica LS1.

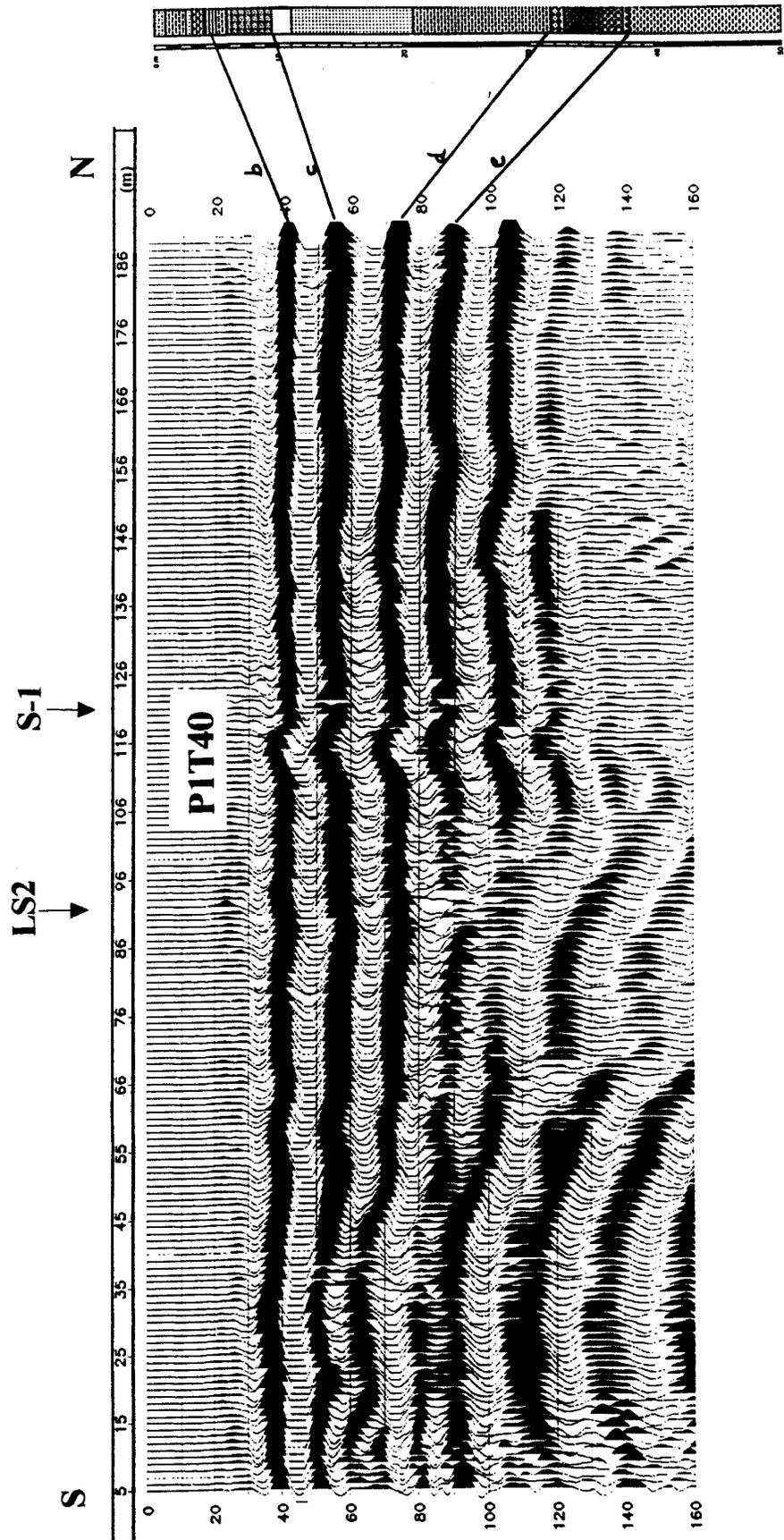


Fig. 40 Interpretación de la sección de offset común 25 m PIT40 (fuente de energía disparos de escopeta y geófonos de 40 Hz). La numeración de las trazas es según su distancia en metros al origen del perfil. Se indican la posición del sondeo mecánico S-1 y el cruce con la línea sísmica LS2.

14. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

14. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un experimento en la desembocadura del río Odiel, Isla Bacuta (Huelva), con la finalidad de poner a punto los métodos de registro y proceso de datos de sísmica de reflexión de alta resolución en ambientes sedimentarios recientes.

Para ello se han registrado dos líneas sísmicas de reflexión, de 215 y 255 m de longitud, utilizándose como fuentes de energía una escopeta con cartuchos de posta y una maza de 8 kg, con las que cabe esperar, por experimentos anteriores, obtener frecuencias útiles de hasta 650 y 450 Hz respectivamente. El dispositivo es de 24 trazas e intertraza de un metro, con offset mínimo de 6 m. Se han empleado geófonos de 40 Hz y 100 Hz, registrándose en cobertura 12 con todas las combinaciones posibles de fuentes de energía y geófonos. El esquema del dispositivo de registro y esquema de situación de los trabajos se indica en las figuras 5 y 6.

El objetivo de este informe es efectuar el análisis y proceso de los datos registrados, realizando un estudio comparativo de los resultados obtenidos.

El terreno está constituido por una alternancia de limos y arenas, con potencias de 3 a 10 m, que finalizan en una capa de gravas de 6 m antes de un substrato margoso a una profundidad de 38 m. La columna de un sondeo mecánico realizado en la zona, junto con su análisis sedimentológico puede verse en la fig. 7.

A partir de ensayos complementarios de refracción y down-hole, se dispone de una información provisional sobre las velocidades de estos materiales, que son del orden de 1600 m/s para las arenas, 1000 m/s para los fangos y 580 m/s para los limos superiores, existiendo además una primera capa de limos muy finos, de pocos decímetros y extremadamente lenta (unos 100 m/s iniciales, que pasan luego a 350 m/s), y que ha absorbido gran parte de la energía.

En los registros se identifican al menos tres llegadas de ondas reflejadas, entre los 40 ms y los 90 ms, visibles solamente en las trazas lejanas, ya que el resto del registro está fuertemente contaminado por ondas superficiales, tipo ground-roll, y onda aérea, que se ha introducido a pesar de haberse enterrado los geófonos. Estos sucesos pueden verse en la fig. 15.

A partir de la medición de las velocidades aparentes de las llegadas de refracción y de sus tiempos de interceptación en el origen, junto con la estimación del tiempo para offset cero de los sucesos de reflexión, se ha efectuado un modelo inicial del subsuelo, comprobándose la viabilidad de que las reflexiones obtenidas tengan origen en las interfases litológicas cortadas por el sondeo mecánico, a través de la comparación de los datos registrados con un registro sintético obtenido del modelo. Este modelo se muestra en la fig. 14b y 16. Se deduce igualmente de este primer análisis la no conveniencia de efectuar un muting o supresión de las primeras llegadas, por su gran probabilidad de aportar datos de reflexión, así como la necesidad de eliminar mediante filtros los ruidos coherentes (onda aérea y ground-roll).

Como fase previa a la de filtrado, se ha analizado el contenido frecuencial de los sucesos registrados: la onda aérea se ha registrado con componentes de más 1000 Hz, el ground-roll está básicamente compuesto por armónicos de hasta 200 Hz y la señal de reflexión llega hasta los 400 Hz, siendo el conjunto variable con la combinación de fuente de energía y geófonos utilizados. El mayor contenido en altas frecuencias se ha obtenido en los registros realizados con golpes de maza y geófonos de 100 Hz, mientras que el más pobre en altas frecuencias es el efectuado con cartuchos de posta y geófonos de 40 Hz. El que se hayan conseguido frecuencias más altas con la maza es posiblemente debido a la técnica de stacking, con la que el terreno ha sido compactado en los sucesivos golpes dados en cada punto de tiro, y además se efectúa una adición de trazas. Los espectros totales, de señal y de ruido pueden verse en las figuras 19, 20 y 21.

La aplicación de diversos filtros pasa banda a los registros ha permitido aislar bien los sucesos sísmicos: la señal está contenida entre 80 Hz y 200 Hz, desapareciendo por completo por encima de los 250 Hz; por debajo de 80 Hz, aunque también existen componentes de las reflexiones, se manifiestan dos tipos de ruidos: el ground-roll, que desaparece por encima de 100 Hz y un ruido posiblemente de contaminación industrial, que no llega a los 80 Hz; por encima de 200 Hz se manifiesta la onda aérea, hasta más de 1000 Hz. En el espectro del dominio frecuencias-espacio (fk), se identifican plenamente estos sucesos: onda aérea y ground-roll están bien separados de la señal por sus valores de frecuencia espacial, siempre superior a 100 c/km, pero los otros ruidos tienen la misma gama de frecuencias espaciales que la señal. Es notoria la contaminación que se produce por aliasing espacial de la onda aérea y ground-roll. Estos registros filtrados y los espectros fk pueden verse en las figuras 22 y 23a.

A fin de preparar una sección en cobertura múltiple, se han obtenido los conjuntos de trazas que forman los CDP, con previa aplicación de un filtro en la banda 100/200 Hz; el resultado ha sido, no obstante, conjuntos con nula o muy pobre coherencia de las señales, lo que no permite realizar un adecuado análisis de velocidades, como puede verse en la fig. 25. La razón de esto pudiera ser la diferencia de tiempos introducida de un registro a otro, tanto por la variación del contenido frecuencial por acoplamiento de la fuente de energía, como por el cambio de profundidad de fuente de energía y geófonos, dada la dificultad de mantener estos factores homogéneos a lo largo de los perfiles en este tipo de terreno.

Otra forma de intentar eliminar el ruido presente en los registros se ha llevado a cabo mediante filtros en el dominio fk , tratando con ello de amortiguar los efectos del aliasing espacial. Para ello se ha diseñado una cascada de filtros: $fk1$ eliminando las velocidades aparentes inferiores a 700 m/s y superiores a 5000 m/s, y $fk2$, eliminando las frecuencias inferiores a 80 Hz y superiores a 500 Hz, aplicando este segundo filtro tanto en el dominio de las frecuencias como en el espacio fk . Los filtros y resultados pueden verse en las figuras 26a y 29a. Los mejores resultados se han obtenido con la aplicación solamente del primer filtro en abanico de velocidades. Para las trazas así filtradas se han preparado los conjuntos de CDP, mostrados en la fig. 31, que tienen mejor coherencia de las señales que los registros anteriores filtrados en la banda 100/200Hz. Aun así, esta coherencia es insuficiente, por la presencia de ruidos de velocidad aparente similar a la de la señal.

En conclusión, no ha resultado factible la realización de un análisis de velocidades con el que efectuar la corrección dinámica y adición de trazas para preparación de secciones en cobertura múltiple, por lo que se ha optado por utilizar la técnica de las secciones formadas por trazas de offset común. Para ello se ha elegido el offset de 25 m, como el menos afectado por los ruidos, obteniéndose las secciones para todas las combinaciones de fuentes de energía y geófonos, que se muestran en las figuras 32 a 36. No se ha llevado a cabo la supresión de las primeras llegadas, ofreciéndose los resultados para las trazas brutas, filtradas en la banda 100/500 Hz en el dominio de las frecuencias y filtradas para velocidades inferiores a 700 m/s en el dominio fk . Las secciones tanto brutas como filtradas, registradas con geófonos de 100 Hz contienen, incluso con una inspección solamente visual, mayores frecuencias que las registradas con geófonos de 40 Hz, en las que el ground-roll sigue aun presente por debajo de 100 ms; las secciones obtenidas con maza, son también más ricas

en altas frecuencias que las obtenidas con escopeta, perjudicando más la onda aérea en los registros con geófonos de 100 Hz.

La aparición de accidentes en los reflectores en distinta posición para cada perfil obtenido, es debida a la influencia de la posición de determinados puntos de tiro, corroborando que este aspecto ha sido especialmente perjudicial a la hora de obtener conjuntos de trazas CDP con señales de buena coherencia.

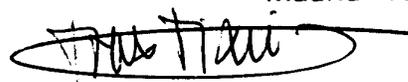
Aunque es posible efectuar el seguimiento de los reflectores detectados en cualquiera de las secciones, los mejores resultados se obtienen para la sección filtrada en fk1 y la combinación de maza como fuente de energía con geófonos de 100 Hz. Su interpretación, mostrada en la fig. 38, permite identificar con bastante seguridad la base del primer tramo de limos, a 5.8 m de profundidad, la base de las arenas fangosas a 9.5 m, la interfase entre arenas y limos a 21 m, y el techo y muro del paquete de gravas, entre 31.8 y 38 m. No se detectan reflectores en el substrato. La secuencia deposicional aparece homogénea en toda la zona cubierta por los dos perfiles sísmicos, presentando las capas un ligero buzamiento hacia el norte.

En consecuencia, a pesar de las dificultades encontradas debido a la naturaleza del terreno, a la generación de ruidos coherentes difíciles de filtrar en proceso, y a la segura presencia de ruidos ambientales en la misma gama de velocidades aparentes que la señal, la técnica desarrollada permite afirmar que el método de sísmica de reflexión de alta resolución puede ayudar a obtener un conocimiento del subsuelo en un entorno amplio de un sondeo mecánico, con un elevado grado de fiabilidad.



Juan Luis Plata Torres
ITGE

Madrid 1996



Teresa Teixido
SGC