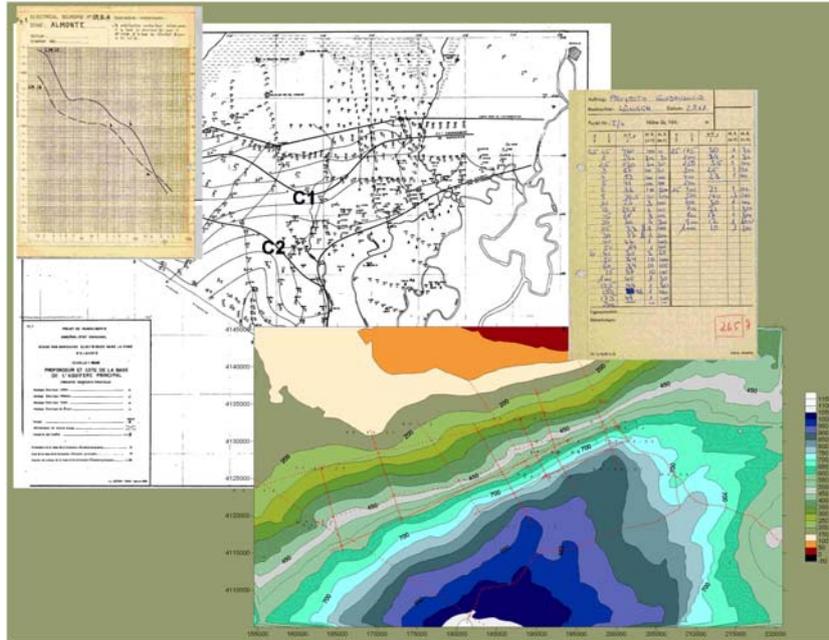


# PROYECTO

## REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA EXISTENTE EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA)



### INFORME FINAL TOMO 1

### RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS

Juan Luís Plata  
Felix Manuel Rubio  
Julián Coronel  
Carmen Rey  
Mónica Arias

Área de Geofísica del IGME

Tres Cantos  
2007



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN



Instituto Geológico  
y Minero de España





# PROYECTO

## REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA EXISTENTE EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA)

### INFORME FINAL TOMO 1

### RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS

#### Autores informes IGME:

**Juan L. Plata**, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.  
[jl.plata@igme.es](mailto:jl.plata@igme.es)  
**Felix M. Rubio**, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.  
**Julián Coronel**, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.  
**Carmen Rey**, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.  
**Mónica Arias**, Becaria Formación del IGME (periodo 2001-2002)  
**Pedro Sánchez**, Realización de Prácticas Profesionales de la UPM en el IGME (2004)  
**Marcos Maneiro**, Realización de Prácticas Profesionales de la UCM en el IGME (2005)  
**Carlos Mediavilla**, Oficina del IGME en Sevilla

#### Asistencias Técnicas y Convenios:

International Geophysical Technology (IGT): **Angel Granda**  
Análisis y Gestión del Subsuelo (AGS): **Enrique Aracil**  
Universidad Politécnica de Cartagena: **Marisol Manzano**

Área de Geofísica del IGME  
Tres Cantos  
2007

## **Relación de participantes en cada actividad**

### **0. Introducción y antecedentes (J. Plata)**

#### **I Recopilación de la información (J. Plata, F. Rubio, C. Mediavilla, M. Manzano)**

#### **II Preparación de datos en forma digital (J. Coronel, F. Rubio, J. Plata, M. Arias)**

#### **III Análisis de la información**

III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules (**J. Plata**)

III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión (**J. Plata, P. Sánchez, M. Maneiro**)

III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970 (**F. Rubio, C. Rey, M. Arias, J. Plata**)

III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada (**J. Plata**)

#### **IV Realización de nuevos ensayos de metodología geofísica**

IV.1 Introducción (**J. Plata, M. Manzano, C. Mediavilla, F. Rubio**)

IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos

IV.2.2 Nueva campaña de testificación realizada en 2002 (**IGT, J. Plata, C. Mediavilla**)

IV.2.3 Campaña de testificación de 2005 (**AGS, J. Plata, C. Mediavilla**)

IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos (**IGT, F. Rubio, J. Plata**)

IV.4 Perfiles de sísmica de reflexión (**IGT, J. Plata**)

IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas (**F. Rubio**).

Integración de resultados (**J. Plata**)

#### **V Resumen y Conclusiones (J. Plata)**

Redacción final del Informe y diseño de material gráfico: J. Plata

## **INDICE REDUCIDO**

### **TOMO 1**

#### **0. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

#### **I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA**

**I.1 Introducción histórica de la documentación analizada**

**I.2 Descripción del contenido de los informes parciales del periodo 1967-1976**

**I.3 Descripción del contenido de los informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982**

**I.4 Descripción del contenido de los informes recopilados posteriores al Proyecto Guadalquivir**

**I.5 Datos de campañas de sismica de reflexión**

**I.6 Sondeos de prospección de hidrocarburos**

#### **II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL**

**II.1 Tipos de documentos digitales generados**

**II.2 Información procedente de informes parciales hasta 1976**

**II.3 Procedente de informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982**

**II.5 Datos de campañas de sismica de reflexión. "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España", 1990, Ref. 29036.**

**II.6 Base de datos de SEV**

**II.7 Adaptación de la base de sondeos mecánicos**

**II.8 Cuadro general de ficheros generados**

**Anexo Digital II-a (DocuEscanDigita)**

**Anexo Digital II-b (BaseDatosSEV)**

**Anexo Digital II-c (BaseDatosSondeos)**

#### **III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

**III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules**

**III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sismica de reflexión**

**III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970**

**III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada**

**Anexo III-2.8**

**Anexo Digital III-1 (Margas azules)**

**Anexo Digital III-2 (Margas azules Sísmica)**

**Anexo Digital III-3 (Revisión de SEV)**

**Anexo Digital III-4 (Interfase)**

## **TOMO 2**

### **IV REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA**

#### **IV.1 Introducción**

#### **IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos**

#### **IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos**

#### **IV.4 Perfiles de sismica de reflexión**

#### **IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas. Integración de resultados.**

#### **Anexo Digital IV-2 (Testificación)**

#### **Anexo IV-2- a: Informe de testificación realizada por IGT**

#### **Anexo IV-2- b: Informe de testificación realizada por AGS**

#### **Anexo Digital IV-3 (Eléctricos)**

#### **Anexo IV-3 Informe de trabajos presentado por IGT**

#### **Anexo Digital IV-4 (Sísmica)**

#### **Anexo IV-4 Informe de la campaña sísmica realizada por IGT**

#### **Anexo Digital IV-5 (Datos de campo IGME)**

### **V RESUMEN Y CONCLUSIONES**

Al final del tomo:

- **Índice general extendido, con indicación de nº de página**
- **Referencia de los Anexos en soporte papel**
- **Referencia de Publicaciones efectuadas**
- **DVD con Anexos Digitales (contraportada trasera del tomo 2)**

### **Abstract**

Trabajo realizado para revisar la información geofísica existente, con el objetivo de verificar la cartografía de 1982 de cotas del techo de las margas azules del Mioceno. Se pretende además establecer una metodología geofísica para resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno y determinación de la posición de la interfase agua dulce - agua salada.

Se han recopilado 18 trabajos de índole geofísica efectuados en el acuífero desde 1967 a 1995, con más de 895 SEV y 460 sondeos mecánicos. La digitalización de la información ha dado lugar a la creación de más de 749 nuevos ficheros digitales. Tras su análisis, se demuestra que el mapa de 1982 ni ha sido obtenido a través de mediciones geofísicas, ni intenta reproducir la cota de las margas azules, habiéndose obtenido un nuevo mapa con la información sísmica disponible. Se valida la interpretación de los SEV de 1968-1970, verificando que no hay relación entre fácies geoelectricas y unidades estratigráficas. Se consideran útiles los diversos trazados existentes de la interfase agua dulce- agua salada, aunque se advierte que es posible que en la zona de Marismas exista más de una superficie de interfase.

En 7 zonas seleccionadas se han medido 4 perfiles de sísmica de reflexión (7.8 km), 25 SEDT, 17 SEV y 9 Perfiles Eléctricos (33 km). Además se han testificado 44 sondeos (4315 m) con Gamma Natural, temperatura y conductividad del agua, resistividad de la formación por inducción, radiación gamma espectral, y velocidad de ondas sísmicas (por down hole). Los resultados son analizados de forma integrada para cada zona, presentando esquemas geológicos interpretativos para la resolución de los problemas planteados. El método de Perfiles Eléctricos se manifiesta como el más adecuado, dada su mejor resolución, aunque puede verse limitado en la profundidad de investigación y ser no resolutivo cuando la salinidad del agua distorsiona fuertemente la resistividad de las rocas; el empleo conjunto con la sísmica de alta resolución palia ambas limitaciones: profundidad y geometría. Las testificaciones son imprescindibles para apoyo a la interpretación de los datos de superficie.



## **MEMORIA TOMO 1**

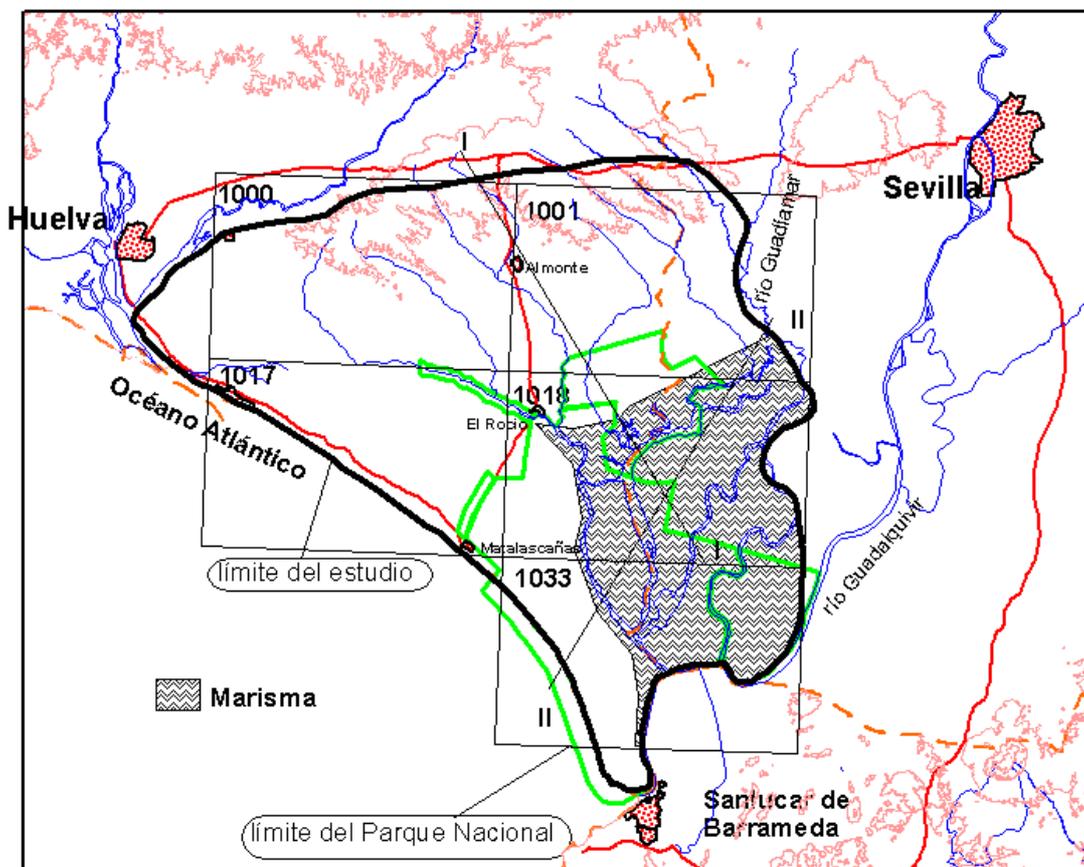


## 0. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 0.1 Situación y límites de la zona de estudio

La zona propuesta para su estudio (Figura 1) se encuentra situada en el sistema acuífero Almonte-Marismas o de Doñana (antiguo Sistema Acuífero 27 y actual Unidad Hidrogeológica 05-51 + 04-14), en la depresión del Guadalquivir. El acuífero limita al este con los ríos Guadimar y Guadalquivir; al norte con los afloramientos de margas azules del Mioceno (aproximadamente coincidentes con el trazado de la autopista Sevilla-Huelva) y al sur con el océano Atlántico, prolongándose mar adentro unas decenas de kilómetros y recubierto por arenas litorales recientes. Ocupa una superficie de unos 3400 km<sup>2</sup>, de los cuáles unos 1000 km<sup>2</sup> corresponden al sector confinado bajo marismas, y tiene un espesor variable entre unas pocas decenas de metros tierra adentro y más de 200 m bajo la marisma, cerca de la costa.

Las hojas del M.T.N. a escala 1/50.000 que cubren el área son: 1000 Moguer, 1001 Almonte, 1017 El Abalario, 1018 El Rocío, 1033 Palacio de Doñana y 1047 Sanlúcar de Barrameda.



**Fig. 1. Mapa general de situación del Acuífero Almonte-Marismas y de la zona de estudio. I-I y II-II, cortes de la Figura 2.**

## 0.2 Geología de la zona

[Esta síntesis procede de los informes técnicos consultados (Ref. Capítulo I), así como de aportaciones más recientes efectuadas por algunos miembros del equipo de este Proyecto, reflejando la base de partida en el año 2000]

El sistema acuífero está constituido por materiales marinos del Mioceno-Plioceno y depósitos marinos, fluviales, eólicos, de estuario y marisma del Cuaternario (Cortes de la Figura 2, cuya posición está indicada en la Figura 1), que se distribuyen en las siguientes formaciones sedimentarias:

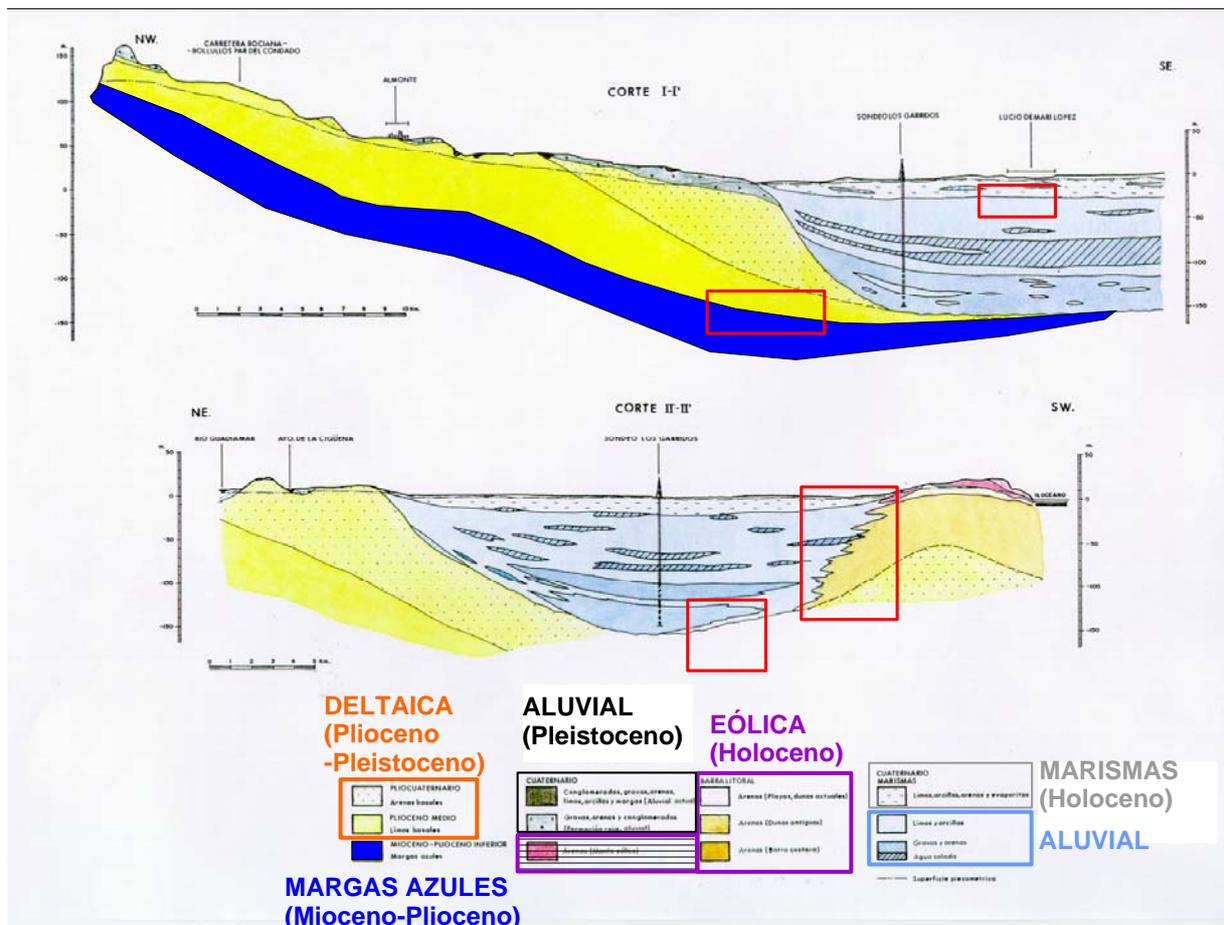


Fig. 2. Cortes geológicos representativos de las Unidades que conforman la geología del acuífero; posición indicada en la Figura 1. (Adaptado de "Hidrogeología general del Parque Nacional de Doñana y su entorno". IGME. 1992). Los recuadros rojos indican los tipos de situación de contactos lito-estratigráficos cuya identificación mediante métodos geofísicos es uno de los objetivos de este Proyecto. [basado en imágenes 33Plano-4 y 33Plano-5]

### Margas azules (Mioceno Tortoniense-Plioceno):

\* El Mioceno superior-Plioceno inferior está constituido por la formación **Margas azules**, en general de origen marino profundo y con algunos niveles subordinados de limos y arenas a techo. Afloran en todo el borde norte del acuífero y son la base impermeable del mismo. La potencia es variable y aumenta de Norte y Oeste hacia el Suroeste: 15 m en Gibraleón, 200 m en Huelva y más de 1000 m cerca de la costa. Buzan hacia el Sur-Sureste, donde, según los datos antiguos existentes, el techo se situaba a

250 m de profundidad b.n.m., pero según datos muy recientes (ITGE-CSIC-UPC) en el extremo Sur de la flecha litoral aparece a unos 65 m de profundidad bajo la superficie del terreno. Según los datos conocidos presenta depresiones bajo los ríos Guadiamar y arroyo de la Rocina, la primera de ellas condicionada por una falla y la segunda probablemente también, aunque está por confirmar.

#### **Unidad deltaica Plioceno medio-superior – Pleistoceno inferior:**

\* El Plioceno medio lo constituyen los **Limos basales**, formación heterogénea (limos arenosos, limos, margas arenosas, margas y, localmente, arenas) con zonas donde predominan los limos arenosos y otras donde aumenta el contenido arcilloso, variando de permeable a semipermeable. Aflora, en contacto con el Mioceno, en el borde superior y en parte de la subcuenca del arroyo del Partido, arroyo del Algarbe y arroyo de las Pilas o del Gato. Son sedimentos de origen deltaico distal (prodeltaico) que hacia el S, SE y SW desaparecen, pasando transicionalmente a margas azules. En el subsuelo tienen color azulado y son difíciles de diferenciar de las margas miocenas. El espesor máximo observado es de 50 m en Sanlúcar la Mayor.

\* El tránsito Plioceno superior-Pleistoceno está representado por las **Arenas Basales** (blanco-amarillentas o amarillo-rojizas), e incluye niveles de gravas, lumaquelas y arcillas, constituyendo el acuífero más importante. Son facies de llanura deltaica y frente deltaico, con frecuentes episodios aluviales e influencia eólica, y es discordante sobre el Plioceno medio, situándose a veces entre medias una costra ferruginosa-conglomerática. Aflora en gran parte del sector norte de la zona y tiene una potencia de 50 m a 80 m, que pasa a ser de 10 m a 30 m en la costa del Asperillo y de más de 100 m bajo la marisma.

**En el Cuaternario (Pleistoceno - Holoceno)** cabe diferenciar varias unidades características:

#### **Unidad Aluvial Pleistoceno superior:**

- El Alto Nivel Aluvial, antes denominado "Formación Roja", son gravas y arenas de abanicos aluviales pleistocenos (5-10 m de espesor), generalmente cementadas por cementos ferruginosos. Se desarrollan principalmente en el margen occidental de la cuenca (Huelva-Moguer-Lucena).
- Depósitos aluviales de la red de drenaje actual: gravas, limos y arcillas asociados a las terrazas cuaternarias y rellenos de fondo de valle del río Guadiamar y arroyos de La Rocina, El Partido, Alcarayón, de Pilas, de la Cañada, etc. Los depósitos de los ríos cuya cuenca llega a Sierra Morena suelen ser gravas y arenas silíceas y de rocas metamórficas; en los demás casos son depósitos arenosos y limos reciclados de las formaciones pliocuaternarias. El espesor suele ser inferior a 10 m, salvo en el caso del Guadiamar, donde alcanza casi 30 m.
- A esta Unidad hay que añadir la así denominada bajo las Marismas.

#### **Unidad Eólica Pleistoceno final - Holoceno:**

- Manto Eólico Litoral: conjunto de dunas antiguas y recientes, localmente estabilizadas (médanos costeros), arrasadas (área de El Abalarío) o móviles, que se extienden entre el arroyo de las Madres

(W), el arroyo de La Rocina (N), el ecotono de la Vera (E), la flecha litoral actual (SE) y el acantilado de El Asperillo - El Arenosillo (SW). Son arenas silíceas muy bien clasificadas, de color blanco, amarillento o rojizo, con intercalaciones locales de turba de origen lagunar en la zona costera. Con una potencia variable en general inferior a 5 m y una permeabilidad media, constituye la principal zona de recarga del acuífero Almonte-Marismas. En la zona de Abalarío se dispone sobre 50-70 m de Arenas Basales en cuya base aparece un nivel poco potente (inferior a 10 m) de gravas aluviales que constituye el principal nivel permeable de la zona.

- Barra Litoral: formada por arenas litorales y dunas estabilizadas o móviles recientes; se extiende entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir. Las dunas a veces se adentran hasta 8 km hacia el interior, formando cuatro cordones con dunas móviles que tienen un desplazamiento de unos 6 m anuales. Tiene más de 60 m de potencia y es muy permeable. Las arenas de la barra de costa se separan de las Arenas Basales por capas de turba o de óxidos de hierro, según zonas.

**Las Marismas (Holoceno):** formadas por sedimentos continentales y marinos de relleno de estuario (arcillas y limos con intercalaciones arenosas, de gravas y de bioclastos), se extiende entre el ecotono de La Vera y La Retuerta (W), el ecotono N (N) y el pie de los relieves secundarios de la margen izquierda del río Guadalquivir, ocupando todo el sector sudoriental del acuífero. Se apoya sobre las Arenas Basales del Pliocuatnario en el borde norte, sobre las arenas de la barra costera en el borde sur y occidental y sobre los materiales del olitostroma triásico en el este (margen izquierda del Guadalquivir); localmente también podría reposar directamente sobre los limos del Plioceno y las margas del Mioceno.

A raíz de los estudios de la FAO (1974), en el centro de la marisma se diferencian dos niveles de gravas y arenas: uno inferior, situado a 90-150 m de profundidad en el centro de la marisma, bastante continuo y con potencia de 10-30 m; la capa del nivel superior se sitúa a 50-80 m de profundidad, está formada por lentejones más discontinuos, con unos 5 m a 20 m de potencia. Estos materiales corresponden a terrazas aluviales pleistocenas y holocenas de la red de drenaje contemporánea al relleno del estuario y marismas, y se originan en épocas en que el nivel marino estaba más bajo que en la actualidad, englobándose actualmente con la denominación de **Unidad Aluvial**. Sin embargo, la geometría de estas dos capas en los bordes de la marisma es poco conocida debido a la irregular distribución de los sondeos y a la escasez de los mismos en ciertas zonas: hacia el N y W parecen confluir en una sola, hacia el E no hay casi información y hacia el SW no aparecen gravas entre ni bajo las arcillas, que se disponen directamente sobre las margas azules del Mioceno.

La potencia total de las arcillas (suprayacente al primer nivel de gravas y arenas o bien capa única), y que actualmente constituye la **Unidad de Marismas** propiamente dicha, varía entre unos pocos metros al N, W y E, unos 80 m en el centro de la marisma y más de 200 m en zonas localizadas al sur, donde a veces es imposible diferenciarlas de los limos margosos del techo del Mioceno si no es mediante datación con microfauna o con  $^{14}\text{C}$ .

Aunque las características estructurales de la zona son poco conocidas, los estudios realizados desde Vigüer coinciden en considerar la cuenca compartimentada en bloques con subsidencia diferencial, limitados por fallas sinsedimentarias de salto variable y activas durante el Mioceno-Plioceno y Cuaternario. El accidente más relevante es la falla del Bajo Guadalquivir (NNE-SSO), que limita el Bajo Guadalquivir con el Mesozoico bético aflorante. Una falla algo menor es la del Guadiamar, que se piensa que separa la parte occidental del acuífero (donde sólo se encuentran las unidades Deltaica y Eólica), de la oriental (donde sobre la unidad Deltaica se sitúa además la Aluvial y de Marisma). Puede haber otras fallas de menor entidad -o de entidad aún desconocida- cómo son la de Mazagón-La Rocina (dirección E-O), la de Torre del Oro (OSO-NE) y la de Matalascañas (SO-NE), coincidente aproximadamente con el ecotono, todas ellas de salto normal y parece ser que con una actividad cuaternaria relevante. Estas fallas, cuyas dimensiones reales se desconocen en general, han condicionado la paleogeografía de la cuenca y el desigual reparto del relleno sedimentario, el cuál condiciona a su vez la estructura y funcionamiento hidráulico del acuífero.

### 0.3 Funcionamiento hidrogeológico

**[Esta síntesis procede de los informes técnicos consultados, (Ref. Capítulo I), así como de aportaciones más recientes efectuadas por algunos miembros del equipo de este Proyecto, reflejando la base de partida en el año 2000]**

El sistema acuífero está formado por materiales permeables y otros de muy baja permeabilidad, jugando la formación arcillosa que sustenta la marisma un papel importante en el funcionamiento hidráulica del sistema. Las formaciones geológicas permeables que constituyen el acuífero son:

- Gravas, arenas y conglomerados del Alto Nivel Aluvial, con matriz arcillosa y potencia máxima de 20 m.
- Arenas Basales deltaicas del Pliocuatrnario (potencia métrica en Almonte, 80-100 m en el borde de las Marismas y 200 m en el sur).
- Arenas de la barra costera y dunas asociadas (potencia máxima superior a 60 m, con intercalaciones de arcilla).
- Manto eólico litoral y dunas antiguas, de arenas finas y potencia no mayor de 8 m.
- Gravas y cantos de las terrazas fluviales y rellenos de cauce de la red de drenaje actual, con matriz areno-arcillosa, y potencia máxima de 30 m en el río Guadiamar.
- Niveles de gravas y arenas intercalados entre las arcillas del estuario y marismas (nivel continuo inferior de 10-30 m de potencia, y superior discontinuo de 5-20 m).

El conjunto de niveles detríticos permeables se comporta como un único acuífero libre, excepto en el sector bajo las marismas, donde funciona como semiconfinado. No obstante, en el área de El Abalarío (comprendida entre el arroyo de Las Madres, la costa, La Rocina y el ecotono W) el acuífero único, con unos 90 m de espesor máximo, se subdivide litológica e hidráulicamente en dos niveles: uno inferior bastante permeable formado por un nivel de gravas de pocos metros de espesor, y otro superior de permeabilidad media formado por arenas plio-cuatrnarias del manto eólico litoral y Arenas Basales. El nivel inferior de gravas se comporta como semiconfinado respecto al superior.

La recarga procede de la lluvia que cae sobre el acuífero libre. La piezometría refleja fielmente la topografía en todo el acuífero, salvo allí donde la concentración de explotaciones ha ocasionado descensos piezométricos y freáticos de orden métrico y decamétrico en los últimos 15 años (en el entorno de El Rocío y ecotono NW, debido a las explotaciones del Sector IV del Plan Regable Almonte Marismas, en el extremo NE de la marisma y entorno del Sector I del Plan Regable, donde existe un cono de depresión con un mínimo piezométrico varios metros por debajo del nivel del mar).

La descarga del sistema freático ocurre, de forma natural, hacia el mar (a lo largo de la franja costera al W de Matalascañas), hacia arroyos y ríos (como La Rocina, El Partido, La Cañada Mayor, el Río Loro, el río Guadiamar en su tramo bajo y el río Tinto), a lo largo del borde de la marisma (ecotonos) mediante flujos verticales ascendentes, y mediante la evotranspiración de la vegetación. Hoy en día una buena

parte de la descarga tiene lugar a través de los bombeos en pozos. Sin embargo, una parte del agua subterránea que llega al borde de la marisma no descarga a través de los ecotonos sino que continúa fluyendo hacia el sur y sureste por el sector de acuífero confinado bajo la marisma. Buena parte de esta agua descarga hacia la superficie de la marisma por flujos ascendentes muy lentos (goteo) a través de las arcillas. El goteo ha tenido lugar a lo largo de los 6.000 años que lleva constituido el sistema acuífero tal y como lo conocemos en la actualidad, y ha sido probablemente responsable de la "dilución" de buena parte del agua salina que ocupaba inicialmente los poros de las arcillas en la mitad noroccidental de la marisma. Sin embargo, esta situación se ha modificado ligeramente en el sector noreste de la marisma debido a las fuertes extracciones de agua subterránea de los últimos 15 años, que han disminuido e incluso invertido localmente el gradiente hidráulico y por tanto también los flujos y el sentido del desplazamiento del agua salina.

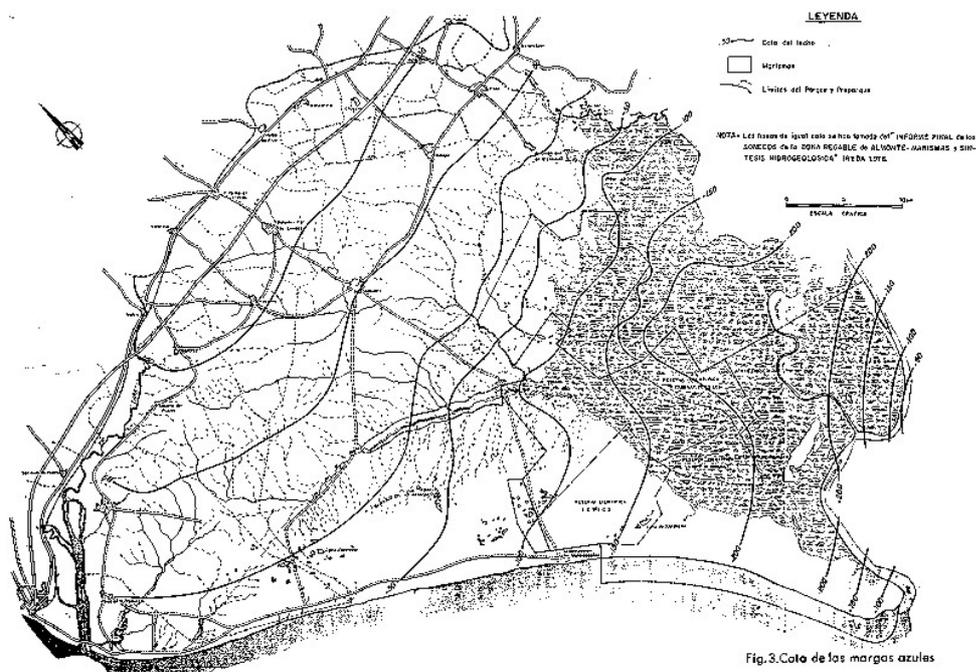
En la mitad sur oriental de la marisma, donde el agua es más salina e incluso hay salmuera, los elevados espesores de sedimentos, la mayor densidad del agua que los satura y los pequeñísimos gradientes hidráulicos del agua dulce previene el flujo de ésta tanto a la superficie de la marisma como lateralmente hacia el mar, comportándose aquí el acuífero como un fondo de saco donde se ha encontrado agua con más de 15.000 años de tiempo de residencia (es decir, contemporáneas a la deposición de los propios sedimentos). No obstante, hasta muy recientemente la información disponible en la marisma ha sido escasa y difícil de interpretar, pues procedía de sondeos y pozos multirejilla que mezclan agua de todos los niveles que atraviesan. Más recientemente, la información proporcionada por sondeos puntuales (rejilla corta y única) perforados en el borde SW de la marisma por la CHG y el IGME parece indicar la existencia de salmueras en todo el espesor del relleno arcilloso, si bien se trata de información puntual aún en elaboración. En el sector SE no existen de momento captaciones ni sondeos que permitan un mejor conocimiento de la distribución de agua salada.

La potencia total del acuífero varía de 15-20 m en el norte a 80-100 m en el sur, incrementándose en las marismas hasta los 200 m. Todo el conjunto permeable descansa sobre las margas azules del Mioceno superior, que es la base del acuífero, y pasa de tener cota 100 m s.n.m. en el norte a -250 m bajo las marismas (Figura 3), con una vaguada bajo el arroyo de La Rocina y otra bajo el río Guadiamar. Estos datos cuantitativos constituyen la síntesis actualmente (año 2000) aceptada de los grandes rasgos geométricos del acuífero.

Parte de las Marismas, junto con la zona del cordón litoral de dunas móviles y terrazas adyacentes de arenas estabilizadas, forman el Parque Nacional de Doñana, cuya existencia tiene una repercusión fundamental sobre la gestión de este acuífero, ya que hoy día está totalmente admitida la importancia que tienen las aguas subterráneas en la hidrografía del Parque, pudiendo además mediante la explotación racional de los recursos subterráneos crearse nuevas zonas de humedales.

En el área existen más de 1000 puntos de agua, casi siempre inferiores a 10 m de profundidad, y numerosos sondeos, con unos 70 m en el acuífero libre y 150 m en el acuífero en carga, pero muy

concentrados en una franja situada al norte del Parque (excepto los de captación en Matalascañas y Mazagón y algunas otras zonas). En 1982 y 1989 se llevaron a cabo campañas de control del nivel piezométrico con más de 200 puntos, pudiendo existir campañas de piezometría posteriores, todas ellas con resultados coincidentes en los rasgos básicos ya descritos.



**Fig. 3. Mapa de cotas del techo de las margas azules, según "Hidrogeología general del Parque Nacional de Doñana y su entorno". IGME. 1992. [imagen 33Plano-6]**

Los parámetros hidráulicos de los materiales permeables del sistema acuífero se consideran bien conocidos, al menos en la zona más estudiada (entorno N y W de la marisma, donde se instalaron los pozos del Plan Regable). No obstante, los modelos numéricos de simulación del flujo de agua subterránea existentes (IGME y UPC) han permitido recientemente (año 2000) obtener valores de transmisividad de todo el acuífero mediante la calibración del modelo con hidrogramas de varios centenares de pozos y sondeos que cubren toda la zona, algunos con 26 años de datos.

En el acuífero libre al N de la marisma las transmisividades más frecuentes oscilan entre 15 y 60 m<sup>2</sup>/día, aunque en el entorno de La Rocina y a lo largo del ecotono N superan los 100 m<sup>2</sup>/día; en el acuífero libre al W de la marisma están entre 200 y 500 m<sup>2</sup>/día; en la marisma las transmisividades crecen de NW a SE entre los 600 y los casi 7000 m<sup>2</sup>/día en el sector más sur oriental de la misma.

El último balance hídrico calculado (año 2000), realizado mediante calibración del modelo numérico de flujo, proporciona las siguientes cifras: la recarga (recursos de agua dulce disponibles) se estima (26 años de datos) en 174 hm<sup>3</sup>/año, de los que se explotan en la actualidad (datos de 1999) 90 hm<sup>3</sup>/año para regadío, abastecimiento urbano y alimentación artificial de algunas lagunas (67 hm<sup>3</sup>/año según la

información previa), aunque la mayor parte corresponde a usos agrícolas; las salidas al mar por la franja costera occidental se estiman en 37 hm<sup>3</sup>/año; el drenaje a ríos y arroyos se estima en 79 hm<sup>3</sup>/año; el drenaje por goteo a través de la marisma se estima en 10 hm<sup>3</sup>/año y la transferencia lateral de agua a otras unidades (hacia el W) se estima en 13 hm<sup>3</sup>/año. Esto ha ocasionado una disminución del almacenamiento durante los 26 últimos años de unos 10 hm<sup>3</sup>/año.

En cuanto a la calidad, las principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas se deben a:

- La elevada concentración de nitratos (procedentes de labores agrícolas y vertidos de aguas residuales urbanas no depuradas), así como de otros agroquímicos incluidos los plaguicidas, que afecta a las zonas de mayores explotaciones agrícolas y urbanas.
- Contaminantes industriales varios, fundamentalmente orgánicos, procedentes de las industrias agropecuarias y agroalimentarias que abundan en la zona.
- El desplazamiento del agua salada contenida en los sedimentos de la marisma: la interfase agua dulce - agua salada en la marisma con valor de 1 mS/cm se dispone con dirección aproximada NE-SW, situándose su extremo NE sobre las explotaciones agrarias del Sector I del Plan Regable. Una sobreexplotación del acuífero conllevaría el avance hacia el oeste de las aguas con elevada concentración salina.
- El riesgo de intrusión marina en la costa frente a las zonas de mayor explotación (Palos de la Frontera, Mazagón y Matalascañas) es evidente, si bien hasta el momento no ha tenido lugar.

## 0.4 Información Geofísica existente

El primer estudio sobre el acuífero parece ser el realizado por la FAO en el Proyecto del Guadalquivir en 1964; a partir de ese momento los trabajos son prácticamente ininterrumpidos, sobre temas muy variados: balances hídricos, cartografía hidrogeológica, realización de sondeos de abastecimiento, estudios de contaminación, realización de modelos matemáticos (desde 1976), control de piezometría, control de calidad del agua, normas de explotación de acuíferos, etc.

En estos estudios han participado numerosos organismos: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG, antigua Comisaría de Aguas del Guadalquivir), ICONA, IRYDA, IGME, Junta de Andalucía, MOPU, así como varias universidades del país (principalmente la Complutense de Madrid, la Politécnica de Cataluña, la de Córdoba y la de Huelva) y centros del CSIC (Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, IRNA de Sevilla e Instituto Jaume Almera de Barcelona), etc., sin que exista (que sepamos) ningún archivo centralizado de toda la ingente documentación generada, en parte de la cual pueden encontrarse recogidas las prospecciones geofísicas realizadas.

Igualmente, existen numerosas líneas sísmicas, así como sondeos profundos con testificación geofísica, realizadas para la exploración de hidrocarburos, es decir, con objetivos de mayor profundidad que la aquí contemplada, por lo que, aun en el caso de que existan horizontes sísmicos dentro del conjunto Neógeno -Cuaternario, no está garantizada su posible identificación o asignación a un piso estratigráfico ni su posibilidad de seguimiento.

Una labor previa realizada para la preparación de este Proyecto, permite adelantar que desde el punto de vista geoelectrico, las margas de la base del acuífero presentan una resistividad de 0.5 ohm.m a 3.3 ohm.m, mientras que los limos, gravas, arenas y conglomerados superiores se presentan como una sola unidad geoelectrica, que en conjunto tiene del orden de los 8 ohm.m a 10 ohm.m, dándose para las capas de limos y arcillas más superficiales valores de 0.3 ohm.m a 2 ohm.m; es decir, todas las unidades presentan una gran conductividad, con diferencias muy sutiles entre ellas, lo que supone utilizar los métodos geoelectricos en las condiciones límites de su capacidad de resolución para poder efectuar estas diferenciaciones litológicas.

## 0.5 Objetivos generales del Proyecto

Los trabajos técnicos realizados desde 1964 permiten concluir que la geología, geometría y funcionamiento hidráulico del sistema acuífero Almonte-Marismas pueden considerarse conocidos en sus rasgos generales, y con más detalle sólo en los lugares donde se realiza su explotación. Sin embargo, la coexistencia de dos sectores, uno libre, donde tiene lugar la recarga al acuífero y donde se ubican la mayor parte de las explotaciones, y otro semiconfinado bajo la marisma, junto con los diferentes mecanismos existentes en la zona para las relaciones de interfase entre agua dulce y agua salada, confieren al acuífero una especial complejidad, no verificándose siempre en trabajos de detalle las hipótesis establecidas con carácter más general. Esto ha sido puesto de relieve recientemente (1999), merced a trabajos realizados por colaboración entre el IGME, la UPC y el CSIC, en el contacto de la flecha litoral con la marisma, donde el Mioceno, datado con microfauna, ha sido encontrado a menor profundidad de lo inicialmente previsto, y donde se ha encontrado salmueras rellenando todo o buena parte de los sedimentos perforados, obligando a modificar el modelo hidrogeológico previo.

Se hace pues necesario mejorar el conocimiento de la geometría y funcionamiento del acuífero, tanto a nivel general como de detalle en determinadas zonas más restringidas, lo que por otra parte viene también exigido por el actual planteamiento de compatibilizar la explotación del acuífero con la conservación del medio ambiente, dando además prioridad a éste último aspecto.

Los trabajos de este Proyecto están encaminados a la consecución del objetivo último de las actuales investigaciones en la zona, que pretenden mejorar los existentes modelos conceptual y numérico del acuífero, y aumentar así la fiabilidad de las simulaciones y predicciones de este último.

Los objetivos concretos son:

- Revisar la información geofísica existente, obtenida en el marco de estudios geológicos, hidrogeológicos y de prospección de hidrocarburos, que permita mejorar el conocimiento de la profundidad del techo del Mioceno en toda el área cubierta por el acuífero Almonte-Marismas, proponiendo, si fuera necesario, la realización de nuevas mediciones geofísicas para completar su cartografía y localizar las principales estructuras que puedan existir a escala 1/100.000.
- En áreas restringidas, y en particular en la zona sur de la barra litoral, establecer una metodología geofísica que permita ayudar a resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno (Figura 2), así como la posición de la interfase agua dulce - agua salada, a escala 1/50.000.

## **0.6 Definición de los problemas de índole geofísica actualmente planteados**

Para mejorar el conocimiento del funcionamiento del acuífero es fundamental establecer la evolución estratigráfica y paleogeográfica reciente de la zona, especialmente del relleno cuaternario del estuario, y con ella la evolución paleohidrológica que originó la situación actual, como puede ser la relación entre la evolución sedimentaria del tránsito Pleistoceno-Holoceno con el emplazamiento del agua salada encontrada en el sector SW. Para ello, dentro de los conocimientos que se considera necesario revisar están los marcados en los objetivos de este Proyecto: la geometría de la base impermeable del acuífero, y la metodología geofísica para localizar la interfase agua dulce - agua salada y para diferenciar entre distintas unidades litoestratigráficas.

El problema planteado tiene por tanto dos vertientes técnico-científicas confluyentes: existe por una parte un problema de índole estratigráfica, de tal forma que los límites entre los materiales del acuífero y sus unidades limítrofes puedan ser claramente establecidos, en especial, la diferenciación entre las margas limosas del techo del Mioceno y los limos margosos de los pisos superiores (Pleistoceno-Holoceno); por otra parte, para poder abordar este problema con técnicas geofísicas es necesario disponer de un criterio de diferenciación a nivel petrofísico, siendo preciso determinar la diferencia no sólo ya entre los aludidos niveles litológicos, sino además las debidas a la presencia y distribución de agua salada.

Con el estado de conocimientos actuales, los temas propuestos no parecen tener fácil solución estratigráfica ni geofísica, por lo que este Proyecto debe realizarse con carácter multidisciplinar y exige emplear estrategias de desarrollo metodológico.

Los problemas que pretenden abarcarse son por tanto los siguientes:

1/ Para toda la unidad del sistema acuífero Almonte-Marismas, se requiere revisar a escala 1:100.000 la profundidad actualmente establecida mediante técnicas geofísicas del techo del Mioceno y localizar las principales estructuras tectónicas que puedan existir en la zona.

2/ En la zona sur oriental de la barra litoral, se precisa resolver diversos problemas estratigráficos, de situación de la interfase agua dulce - agua salada y de distribución espacial del cuerpo de agua salina (salmuera con más de 50 mS/cm), a escala 1:50.000:

a) Localizar la posición del tránsito entre el relleno pleistoceno-holoceno de la marisma (gravas, arenas, limos y arcillas), los limos margosos del techo del Mioceno y las arenas de la barra de costa. Se requiere determinar la distribución espacial de la cota de este tránsito, localizando la posible existencia de paleorelieves y fallas que condicionen el funcionamiento del acuífero en esta zona. Es por tanto necesario abordar el problema de diferenciar, tanto estratigráfica como geofísicamente, las margas grises y arcillas de la marisma de las margas miocenas, y aunque los objetivos de este Proyecto se

limitan a la diferenciación geofísica, es evidente que previamente tiene que establecerse la estratigráfica.

Este problema ha surgido como consecuencia de que dataciones cronológicas realizadas mediante microfauna por el CSIC en el sondeo Malandar (noviembre de 1999) y Marismillas (octubre de 1999), el Mioceno comienza a los 75 m, lo que no "coincide" con la información disponible hasta el momento, reflejada en el mapa de la Figura 3, que fue realizado con los datos existentes en 1976, y donde el tránsito en esta zona se situaba a los 200 m de profundidad.

b) Identificar la extensión y profundidad de la interfase entre el agua dulce y la salmuera (zona de los sondeos de Vetalingua, Marismillas y Malandar). Los últimos modelos numéricos de flujo indican la posible salida de agua dulce subterránea hacia el mar a través de una franja de extensión no demasiado grande y cercana a la desembocadura del Guadalquivir, a pesar de que el modelo conceptual sugiere la no existencia de flujo de agua dulce. No obstante, en el sondeo Malandar (a pocos metros de la línea de costa), se han localizado lentejones de arenas con agua salada entre los 60-70 m, reposando sobre los limos margosos del Mioceno; por encima hay arcillas y limos de marisma, siendo los primeros 20 m de arenas. Un sondeo próximo de 300 m de profundidad, el Marismillas CHG de 1997, encontró también salmuera en la parte inferior, pero hoy está lleno de salmuera desde los 40 m o 50 m hasta el fondo, lo que puede haber sucedido bien porque la salmuera ha ascendido por potencial hidráulico (poco probable), bien porque se ha infiltrado desde niveles superiores por rotura de la entubación, o bien porque la salmuera hubiera descendido desde un acuífero superior por el espacio anular y ascendido por el interior de la entubación.

c) El conocimiento de la distribución espacial de la masa de agua salina ayudaría a mejorar notablemente el modelo conceptual de funcionamiento de la zona, y por ende el modelo numérico de simulación del flujo de agua subterránea. De forma complementaria, ayudaría a mejorar el conocimiento de la historia geológica reciente (cuaternaria) del estuario, lo que a su vez repercutiría sobre el conocimiento de la evolución hidráulica histórica del sistema acuífero, y por tanto de su situación actual.

## 0.7 Definición de la metodología a seguir en el Proyecto

Para conseguir los objetivos planteados es preciso efectuar una serie de tareas que, forzosamente, deben comenzar con la búsqueda y **recopilación de la información existente de carácter geofísico** y geológico que sea de interés. Algunos de los documentos fundamentales en los que se basan los actuales modelos de funcionamiento del acuífero pueden tener su base en campañas de prospección geofísica y de sondeos mecánicos. En los informes disponibles en este momento se encuentra tan sólo el resultado de la interpretación de dichas campañas, siendo imprescindible disponer de la mayor documentación original posible para poder proceder a su análisis. Por otra parte, existe información que no fue obtenida con fines hidrogeológicos, pero que puede aportar datos útiles en el momento actual. Se pretende por tanto reunir dicha información.

Una vez recogida esta documentación, se necesita darle la forma más adecuada para su manejo por los medios actualmente utilizados en el análisis de la información, es decir, la **preparación de los datos en forma digital**, mediante digitalización y organización en ficheros de datos, para que puedan ser leídos por las diversas herramientas de trabajo que utilicen los diferentes equipos involucrados.

El **análisis de la información** así preparada se centrará en los objetivos propuestos. Por una parte permitirá validar los datos geológicos derivados de las campañas geofísicas; estos datos son los que actualmente están siendo utilizados en los diferentes proyectos de investigación del acuífero, y de forma más concreta, el mapa de profundidad del techo del substrato impermeable. Por otra parte, podrá determinarse cuál es la información geofísica complementaria que se necesita para mejorar dicho mapa. Los datos geofísicos que quieren utilizarse en este Proyecto fueron tomados hace bastantes años, y en algunas ocasiones con finalidad distinta del uso que pretende dárseles actualmente.

Los materiales involucrados en el acuífero Almonte-Marismas adolecen, en principio, de grandes contrastes de sus propiedades petrofísicas; por otra parte, los temas planteados tienen dos escalas de trabajo bien diferenciadas, así como temáticas diferentes. Por una parte se pretende diferenciar un substrato de margas de un conjunto suprayacente de limos, arcillas y arenas; por otra parte se requiere detectar cuerpos de arenas y gravas inmersos en limos y arcillas, pero con la dificultad de que dichas unidades contienen agua y además ésta puede ser salada; finalmente, se pretende diferenciar el contacto lateral entre una secuencia de limos, gravas y arenas de unas arenas con agua, que de nuevo puede estar contaminada por agua salada. Tanto las situaciones geométricas planteadas, como la pobre diferenciación petrofísica y estratigráfica existente, hace necesario efectuar una serie de pruebas de diversos métodos geofísicos en áreas donde las diferentes temáticas propuestas se encuentren bien conocidas y controladas, a fin de poder definir la mejor, si es que existe, metodología para su resolución. Será preciso además tener en cuenta la disponibilidad de sondeos mecánicos con las necesarias testificaciones geofísicas y con una descripción geológica y estratigráfica detallada.

Para abordar los objetivos de carácter local, y posiblemente para completar la información de cobertura regional, se considera por tanto imprescindible efectuar **ensayos de métodos geofísicos**, a fin de determinar cuál o cuáles son los más adecuados para resolver los temas planteados de diferenciación de unidades estratigráficas y de interfase agua dulce - agua salada. Para ello, se seleccionarán unas áreas con suficiente control geológico para detección del techo del Mioceno, para detección de la interfase agua dulce - agua salada y para detectar la frontera entre arenas de la barra costera y las formaciones de marisma, y se llevarán a cabo varios experimentos de campo.

Una vez interpretados los resultados de estas campañas, podrá procederse a elaborar **una propuesta de la metodología geofísica** a utilizar en cada caso. A fin de efectuar una correcta parametrización de las medidas tomadas sobre la superficie, será necesario el disponer de sondeos mecánicos con la testificación geofísica más adecuada a los fines propuestos.

Ante la incertidumbre del éxito que pueden tener los métodos de prospección geofísica en la resolución de los temas planteados, no ha parecido adecuado en este Proyecto abarcar de una forma inmediata la ejecución de trabajos a escala regional. En caso de que los ensayos realizados en el Proyecto fueran positivos, se propondría una metodología a seguir de forma sistemática en toda la cuenca y en áreas locales para problemas específicos.

Para llevar a cabo el análisis de la información geofísica (preexistente o nuevamente adquirida) es necesario conocer el carácter petrofísico de los niveles geológicos involucrados y poder verificar la información obtenida por interpretación de los documentos geofísicos con la situación geológica realmente existente. Igualmente en la selección de zonas para pruebas geofísicas es preciso conocer la litología detallada y el valor de las propiedades físicas de los materiales involucrados y su modificación por la intrusión salina, para definir la metodología geofísica más adecuada en los ensayos con los que tratar de averiguar sus límites. Además, para la interpretación de las nuevas mediciones geofísicas, está previsto calibrar los diferentes métodos utilizados en las campañas geofísicas de pruebas a través de mediciones de parametrización junto a sondeos mecánicos testificados. Por tanto, para la realización de diferentes etapas de este Proyecto es fundamental disponer de los adecuados medios de planificación y de verificación de la información deducida de las mediciones geofísicas desde superficie. El mejor control es el proporcionado mediante los datos que se obtienen por la **testificación geofísica de sondeos mecánicos**, donde además su columna litoestratigráfica esté bien establecida. El uso de la testificación geofísica como método propio para establecer correlaciones entre sondeos no se contempla aquí, ya que no se conoce la existencia de ninguna campaña actual ni futura de redes de sondeos con la densidad necesaria para permitir el uso de esta técnica.

A priori se desconoce la envergadura de la disponibilidad de este tipo de información, por lo que se prevé la necesidad de llevar a cabo nuevas testificaciones geofísicas en los sondeos existentes o bien en aquellos que pudieran realizarse durante la ejecución de este Proyecto



## I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA

### I.1 Introducción histórica de la documentación analizada

A comienzos de la década de 1960 se inició el “*Proyecto de Investigaciones Hidrogeológicas en la Cuenca del Guadalquivir*”, promovido por convenio entre el Gobierno del Estado Español y el Fondo Especial de las Naciones Unidas. El proyecto fue ejecutado a través de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization, FAO) y un conjunto de organismos españoles: Instituto Geológico y Minero de España, Instituto Nacional de Colonización (posteriormente denominado Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, IRYDA), y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

De los trabajos preliminares de este Proyecto sólo se han encontrado algunos planos originales pintados a acuarela, con datos sobre topografía, pluviometría y temperaturas (**informe *Requête du Gouvernement de l'Espagne au Fond Spécial des Nations Unies (FAO). 1964. Ref. 35531***)<sup>1</sup>. Las actividades principales, con cobertura regional, debieron de comenzar en 1966, finalizando en 1968 con la selección de dos áreas de interés: la Vega de Granada y el subsistema Almonte-Marismas. Como consecuencia de este Proyecto, se efectuaron nuevas investigaciones de carácter local entre 1969 y 1971 (a partir de 1966 el Fondo Especial se unió al Programa de Asistencia Técnica, pasando a denominarse Programa de las N.U. para el Desarrollo), cuyos resultados se encuentran en el informe presentado por la FAO al Gobierno Español titulado **Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972. Ref. 35522**, determinándose la viabilidad de las actuaciones propuestas en la primera fase. En 1972 se realiza el “Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha)”, para determinación de captaciones y evaluación de caudales, continuando en 1974 con la definición de las directrices para la puesta en riego. Los resultados de estas fases están recogidos en el informe titulado **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.** En estos dos últimos informes se encuentra recopilada y sintetizada la mayor parte de la información geológica y geofísica que fue adquirida en el **Proyecto Guadalquivir** en su sentido más amplio.

---

<sup>1</sup> las Referencias de los documentos son las del Fondo Documental del IGME

Sin embargo, para el estudio que estamos actualmente efectuando, es necesario recabar no sólo los resultados, sino los datos de campo de las numerosas actuaciones llevadas a cabo en el *Proyecto Guadalquivir*, habiéndose recuperado los siguientes **informes parciales**:

- **Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063**
- **Guadalquivir Project Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559**
- **Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.**
- **Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070**
- **Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.**
- **Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.**
- **Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538**

En los datos de los anteriores informes están basados los **informes finales**:

- **Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972. Ref. 35522,**
- **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.**

En 1982, el IGME efectuó el Informe **Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649**, donde se sintetizan todos los datos aportados por el *Proyecto Guadalquivir* y sus posteriores fases hasta 1976, incorporando además los resultados de varios trabajos: "*Informe sobre el control y vigilancia del acuífero Almonte-Marismas durante los años 1975-1977. IRYDA*"; el modelo matemático efectuado por el IGME en 1978; el "*Informe hidrogeológico y de recursos hidráulicos. Desagües y vertidos, y posibles incidencias de los mismos en el Parque Nacional de Doñana.1979. DGOH, MOPU*"; la tesis doctoral de M. Menanteau de 1980 sobre las Marismas; el estudio "*Hidrogeología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y su zona de influencia.1981.*", realizado por convenio

entre la Comisaría de Aguas del Guadalquivir y el CEDEX; la “Síntesis hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir. IGME.1981”; el “Estudio hidrogeológico del acuífero de Palos-Moguer (Huelva), IGME, 1982”; así como el nuevo modelo digital del acuífero realizado en 1982, los datos de control de piezómetros llevados a cabo por el IGME en los periodos 1969-1971 y 1975-1982 y controles de calidad química e intrusión, por lo que puede considerarse como representativo del estado del conocimiento sobre el acuífero en 1982.

El contenido de este informe (35.649) fue además divulgado en forma de **Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1982**, basado fundamentalmente en el informe 35.649. Esta publicación fue reeditada con ligeras revisiones en 1992: **Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1992**, por lo que han pasado a ser, probablemente, los documentos más conocidos por el público en general. Sin embargo, por lo que respecta a los objetivos del presente Proyecto, estas publicaciones no contienen información geofísica, al menos de forma explícita.

Con posterioridad al *Proyecto Guadalquivir*, se han llevado a cabo numerosos estudios locales, bien para abastecimiento a poblaciones o para estudio de la contaminación salina, de los que han sido recuperados los siguientes informes en los se proporcionan datos o resultados de **nuevas mediciones geofísicas:**

- **Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939**
- **Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213**
- **Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347**
- **Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408**
- **Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963**

o se proporciona información sobre sondeos mecánicos nuevos:

- **Informe sobre el sondeo Mazagón (Huelva). IGME. 1976. Ref. 35.922**
- **Informe técnico. Sondeo de abastecimiento a Villarrasa (Huelva). IGME. 1980. Ref. 35.586**

- **Informe técnico del sondeo para abastecimiento a Villarrasa (Huelva). Sondeo Villarrasa III. IGME. 1981. Ref. 32.227**
- **Informe técnico de los sondeos Niebla I y Niebla II, para abastecimiento de agua a la localidad de Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.920**
- **Informe técnico del sondeo Mazagón VI. Moguer (Huelva). IGME. 1983. Ref. 35.832**
- **Informe técnico del sondeo 1041-3029 bis para abastecimiento a Bonares (Huelva). IGME. 1985. Ref. 35.835**
- **Informe técnico del sondeo 1042-1-0065 para abastecimiento a Mazagón (Huelva). IGME. 1995. Ref. 37.575**

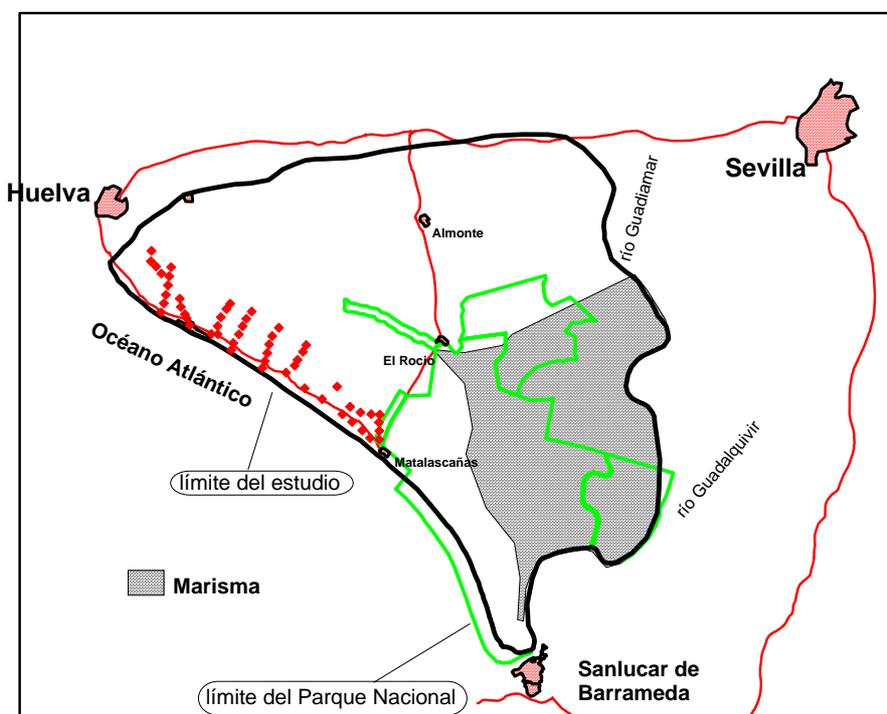
Gran parte de estos Informes se han localizado en la Oficina Regional del IGME en Sevilla, otros en el Fondo Documental del IGME en Madrid, y otros han sido aportados por la Universidad de Barcelona, suponiendo la localización de alguno de ellos una labor bastante ardua, sobre todo para el **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.** En otros casos, la recuperación efectuada supone la salida a la luz de informes de alto valor documental, por tratarse de ejemplares únicos e inéditos: **Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref., e Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.**

Durante la duración del presente Proyecto, un ejemplar de cada uno de estos trabajos ha sido temporalmente archivado en el Área de Geofísica del IGME, siendo posteriormente incorporados al Fondo Documental del IGME.

## I.2 Descripción del contenido de los informes parciales del periodo 1967- 1976

### I.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063

Informe, firmado por F. Esteban (IGME), sobre 56 SEV numerados L-xx, hechos con AB=800-1000 m y situados en la zona costera, entre Huelva y Torre de la Higuera. Se dispone de plano de posición (sin coordenadas), estadillos de campo (archivados aparte del Informe), curvas de campo interpretadas y secciones geoelectricas. Los SEV están agrupados por zonas: El Acebuche, El Picacho, El Abalarío, Los Cantos, Los Caños y Huelva, y su posición está indicada en la Figura 4. En este trabajo, interpretado sin ningún apoyo geológico, se supone que el conductor impermeable de base (10-20 ohm.m) son siempre las margas azules, que se presentarían a profundidades de 50 m a 150 m, buzando hacia el sur. Sobre ellas reposa un horizonte de 100-400 ohm.m (arenas o limos arenosos con 50-150 m de potencia), y sobre él se sitúan unos 10 m de arenas secas (>3000 ohm.m). Estos mismos SEV fueron recopilados en el informe de Prakla de 1968 (Ref. 35.559) y reinterpretados por Astier en su informe de 1970, con la misma nomenclatura L-xx, presentándose unas diferencias a veces muy importantes entre ambas interpretaciones. (En el capítulo III del presente Informe se proporcionan algunos ejemplos).



**Fig. 4. Situación de los SEV medidos en el Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. Campaña L1967. Ref. 40.063 [fichero de posición SEV40063.xls]**

## **I.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968. Ref. 35559**

Es el informe original presentado a la FAO y al IGME por la compañía alemana PRAKLA, sobre los trabajos geofísicos realizados en el periodo desde diciembre de 1966 a octubre de 1967. El objetivo de este trabajo era identificar, mediante el uso de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), las zonas favorables para explotar económicamente los recursos de agua subterránea para riego, en donde no existiera posibilidad de utilizar agua superficial. Se midieron 895 SEV, distribuidos en 19 perfiles de reconocimiento y 30 áreas de detalle, así como la testificación geofísica de 6 sondeos mecánicos en toda la cuenca del Guadalquivir. El informe presenta una Memoria con la descripción de los trabajos realizados y, de forma muy escueta, una interpretación de los resultados, que incluye la reinterpretación de dos campañas de SEV adicionales: la efectuada por el IGME en 1967 (ref. 40063) y otra medida por la compañía Lerici en 1963. La Memoria se acompaña de 87 Anexos:

- Anexos 1 a 15: planos de posición de trabajos y resultados. **(carpeta naranja 1. 553/1994)**
- Anexos 16 a 69: perfiles y cortes geoelectrónicos. **(carpeta naranja 3. 554/1994)**
- Anexos 70 a 87: testificaciones de Potencial Espontáneo PS, Resistencia Monoelectrónica R, resistividad normal corta y larga N16" y N64" de los sondeos mecánicos BG-6, BG-7, SC-10, GUADIX II, ORCE I y ORCE II. **(carpeta naranja 2. 553/1994)**. De los sondeos testificados solamente se encuentran en la zona de estudio del presente Proyecto el BG-6 (numeración actual 34-1033) y el BG-7 (35-1033).

Se conserva además la siguiente documentación complementaria:

- Estadillos de campo originales de los SEV (valores de AB, MN, I, V) de los Perfiles de Reconocimiento y de 16 de las campañas de detalle. **(3 archivadores "proyecto Guadalquivir" 55 FAO est., 567/1994)**
- Perfiles de Reconocimiento: borradores con los cortes geoelectrónicos presentados en los Anexos del Informe y fotocopia de las curvas de campo, en módulo (de la escala logarítmica) de 84 mm. **(carpeta verde 6, 557/1994)**
- Borradores de trabajo con los cortes geoelectrónicos presentados en los Anexos del Informe y fotocopia de las curvas de campo de todas las zonas de detalle (excepto de las T, V y Z), en módulo de 84 mm. **(carpetas verdes 7-A, 558/1994 y 7-B, 559/1994)**
- Originales vegetales de las curvas de campo, sin interpretación, en módulo de 62 mm, de todos los perfiles de reconocimiento (incluido IGME 7) y de todas las zonas de detalle. **(carpetas verdes 7-Ca, 560/1994 y 7-Cb, 559/1994)**
- Informes de progreso de algunas de las campañas de reconocimiento. Contienen las mismas curvas de campo interpretadas (84 mm) que las almacenadas en la carpeta 6. **(carpeta verde 13, 566/1994)**. Hay varios ejemplares de cada informe, fuera de la carpeta.

Por lo que respecta a las actuaciones llevadas a cabo en el acuífero Almonte-Marismas, y dentro del área contemplada en el actual Proyecto, en este Informe están interpretadas las siguientes campañas de SEV:

Área	Denominación	Numeración de SEV	Cantidad
Reconocimiento previo: Perfil 1	1	2-19,4a,9a,10 a,12a,13a,17a,	24
Perfil 2	2	1-14,14a15,15a17,18	19
Marisma P.Doñana	MD	2-10,12-15,17-40	37
Marismas los Palacios (margen oeste del Guadalquivir)	MP	1-53	53
Marismas El Rocio	MR	1,3,4,6-34,36-40	37
Marismas Sanlúcar (margen oeste del Guadalquivir)	MS	1-15	15
Niebla	N	1-12,14,15,17,19-33, 3a,5a,6a,8a,9a,15a,17a,22a-25a, 27a,28a,33ª	44
Total			229

Su posición queda reflejada en la Figura 5, excepto las campañas MP y MS, que no han sido consideradas para el presente trabajo, por referirse al margen oriental del río Guadalquivir.

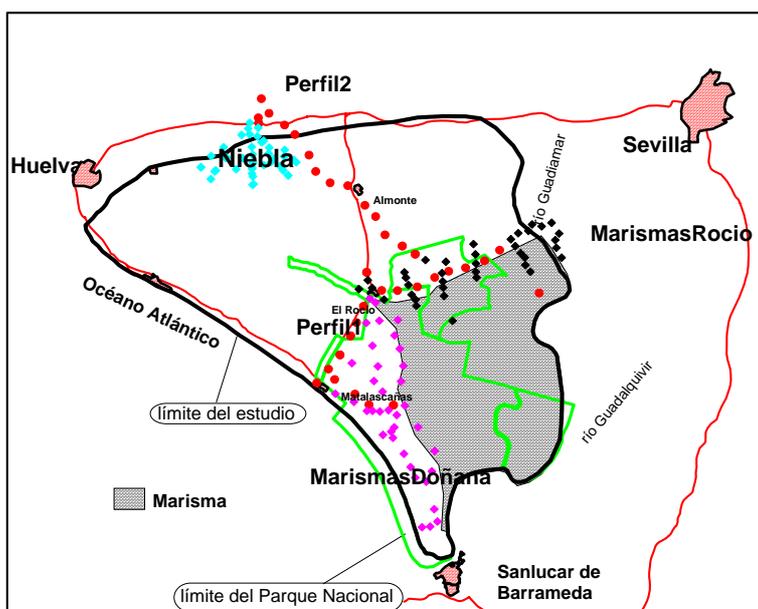
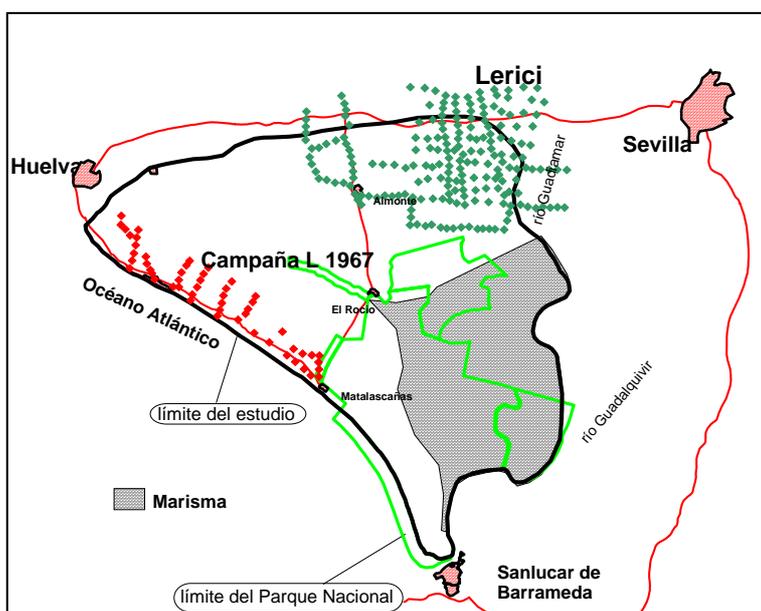


Fig. 5. Situación de los SEV medidos en el Proyecto Guadalquivir, Informe de Prakla de 1968. Ref. 35.559, dentro del área de estudio del presente proyecto.[ficheros de posición SEVPerfil135559.xls, SEVPerfil235559.xls, SEVMD35559.xls, SEVMR35559.xls, SEVN35559.xls]

En la interpretación de estos SEV se incorporaron otros medidos anteriormente:

Origen	Denominación	Numeración de SEV	Cantidad
Campaña IGME 1967 (Ref. 40.063)	L	1-8,10-15,17-44,46,51,53-56	52
Campaña 309 efectuada por LERICI en 1963 para la C.H.G.	Sin nombre inicial	1-200	200

cuya posición se refleja en la Figura 6.



**Fig. 6. Situación de los SEV añadidos para la interpretación presentada en el Proyecto Guadalquivir, Informe de Prakla de 1968. Ref. 35.559. [ficheros de posición SEVLerici35559.xls y SEV40063.xls]**

La interpretación de todos estos SEV se presenta tanto en forma de “cortes” (columnas) geoelectricas por separado para cada SEV, como en forma de perfiles o secciones geoelectricas, representado la evolución de las diferentes capas del subsuelo. Finalmente, se efectúa un cálculo de la resistencia transversal del acuífero y de la profundidad de su substrato impermeable. Se cita en el informe que los resultados se plasmaron en mapas hidrogeológicos a escala 1/50.000, que fueron entregados directamente a la “oficina principal del proyecto”, pero no constan como Anexos en el informe. Dichos mapas no han podido ser localizados actualmente.

De los documentos disponibles, son de interés para el presente Proyecto los siguientes:

- Anexo 2: Mapa de resistencia transversal 1:100.000

- Anexo 3: Plano de los resultados de la prospección eléctrica 1:100.000 (profundidad del techo del substrato (resistivo) para la zona de Niebla (SEV N y de Lericí).
- Anexo 17: corte geoelectrico Perfil 1
- Anexo 18: corte geoelectrico Perfil 2
- Anexo 20 y 21: columnas de interpretación de los SEV N (Niebla)
- Anexo 22 y 23: cortes geoelectricos de la zona Almonte-Pilas (SEV Lericí y MR)
- Anexos 24 y 25: cortes geoelectricos reinterpretación de la zona L
- Anexos 26 y 27: columnas de interpretación de los SEV Palacio Doñana MD
- Anexos 28,29 y 30: columnas de interpretación de los SEV Los Palacios MP
- Anexos 31 y 32: columnas de interpretación de los SEV El Rocio MR
- Anexo 33: columnas de interpretación de los SEV Sanlúcar MS
- Anexo 70: testificación del sondeo BG-6
- Anexo 74: testificación del sondeo BG-7

Se transcriben a continuación los datos de mayor interés contenidos en este informe y que son necesarios para dar significado a la interpretación de los SEV realizada en 1967:

**- Esquema geológico considerado en la interpretación de estos trabajos:**

El basamento Paleozoico aflora en el norte (en la alineación Alcalá del Río a Niebla), situándose directamente sobre él una formación de areniscas o conglomerática denominada "Mioceno de Base"; solamente se conoce la presencia de capas intermedias representadas por pequeños afloramientos de calizas mesozoicas en el área de Niebla, que han sido también detectadas en el Nor-Oeste por el sondeo "El Asperillo", cerca de Almonte. Sobre el "Mioceno de Base" se encuentra una potente formación arcillosa de "Margas azules", sobre las que se sitúa, entre las desembocaduras del Tinto y del Guadalquivir, dunas de arena del Cuaternario y sedimentos arenosos del Mio-Plio-Cuaternario. La parte central de la región está cubierta por el Plio-cuaternario y margas y arenas del Mioceno.

**- Valores globales de resistividad encontrados:**

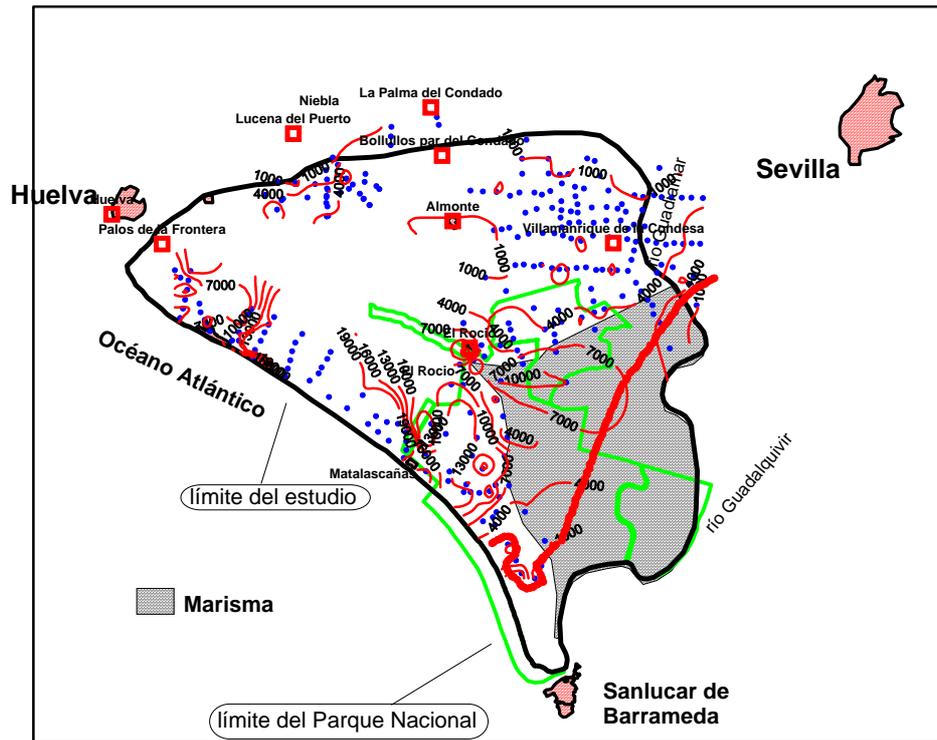
Los valores de resistividad deducidos de los SEV para las diferentes litologías se encuentran resumidos en la tabla adjunta. El contraste de resistividad entre el sustrato impermeable de las "Margas azules" y los sedimentos arenosos suprayacentes sólo es alto en la franja costera (Cuaternario), por lo que la diferenciación entre sustrato y arenas presenta con frecuencia algunas incertidumbres. Por esta razón, para dar una mejor idea de la importancia de los paquetes resistivos en toda el área, en vez de trazar un mapa del techo de las Margas azules, se decidió dibujar un mapa

de Resistencia Transversal T (producto de potencia por resistividad). A fin de eliminar las situaciones de poco interés hidrogeológico (baja resistividad con gran potencia), se han utilizado solamente los valores de T con resistividad superior a 20 ohm.m (con mayor probabilidad de ser arenas permeables), y así mismo se han eliminado las partes donde se sitúan arenas secas superficiales. Por otra parte, y por comparación con datos de sondeos mecánicos de la zona, valores de T inferiores a 1000 pueden interpretarse como zonas de agua salada [El agua con un contenido superior a 2 g/l de ClNa tiene una resistividad a 18°C de  $R_w=3$  ohm.m, por lo que la resistividad de una formación con un 20% de porosidad, según la ley de Archie es  $R = p^{-2} 0.81R_w = 61$  ohm.m, que para una potencia mínima de interés de 20 m, proporciona el valor de  $T=1220$ ]. De esta forma, el mapa de Resistencia Transversal T (presentado en el Anexo 2), distribuye el área desde zonas de alto valor hidrogeológico (arenas de la costa  $T>10.000$ ), hasta zonas donde la salinidad o arcillosidad es relevante ( $T<1.000$ ). La línea  $T=1.000$  situada a la derecha del río Guadalquivir indica el límite entre agua dulce- agua salada. De forma separada, se ha trazado el mapa de potencia del acuífero hasta llegar a su substrato impermeable o margas azules (Anexo 3).

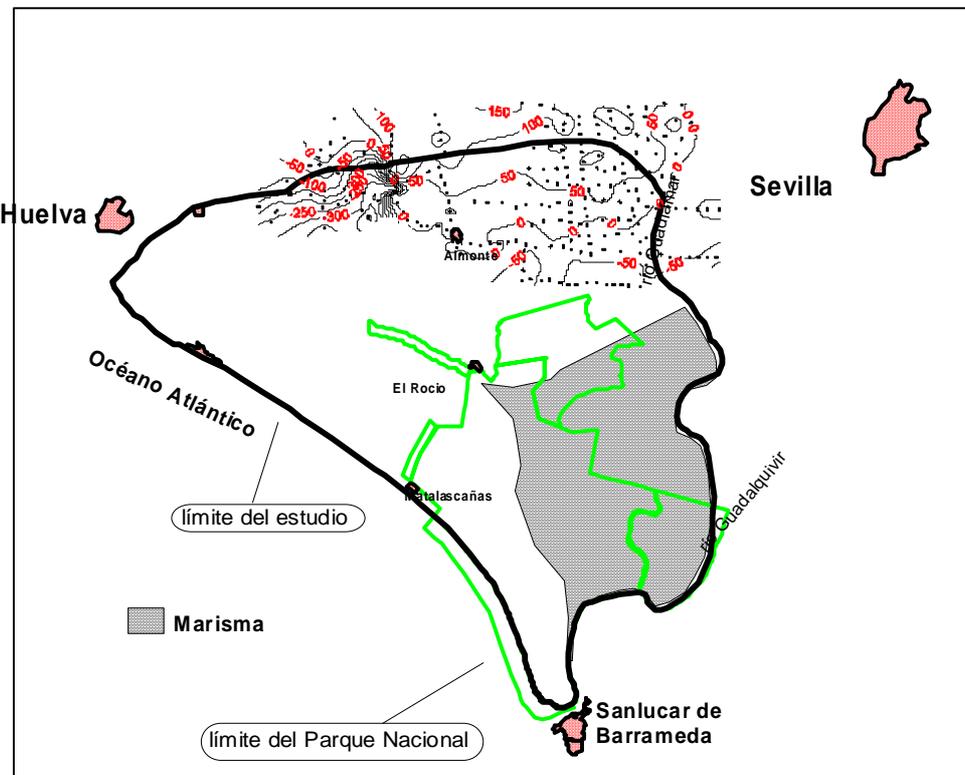
<b>Cuaternario</b>	<b>Dunas de arena (franja costera)</b>	<b>100-500 ohm.m (mayores valores en la parte seca superior)</b>
<b>Mio-Plio-Cuaternario</b>	<b>Arenas</b>	<b>Más de 20 ohm.m</b>
<b>Mioceno</b>	<b>Calcarenitas</b>	<b>50-200 ohm.m</b>
<b>Mioceno</b>	<b>Margas azules</b>	<b>Menos de 10 ohm.m</b>
<b>Mioceno Inferior</b>	<b>Conglomerados</b>	<b>100 ohm.m</b>
<b>Olitostroma</b>	<b>Arcilloso o salado</b>	<b>Menos de 3 ohm.m</b>
<b>Mesozoico</b>	<b>Areniscas o dolomías (según contenido en margas)</b>	<b>20-100 ohm.m</b>
<b>Trías Germano-Andaluz</b>		<b>10-20 ohm.m</b>
<b>Basamento Paleozoico</b>		<b>Más de 400 ohm.m</b>

**Tabla de valores de resistividad de las formaciones**

En las Figuras 7 y 8 se reproducen los mapas de estos dos Anexos, que sintetizan el resultado total de la interpretación (Los valores de los mapas originales han sido pasados a fichero digital, reproduciéndose así los mapas de isolíneas presentados en estas figuras).



**Fig. 7. Mapa de resistencia transversal  $T$  (producto de potencia por resistividad) del acuífero, presentada como Anexo 2 en el Informe de Prakla de 1968 (Ref. 35.559). Reconstrucción por digitalización de valores. La línea gruesa en color rojo marca el límite  $T < 1000$  dentro de las marismas en el mapa original. [construido con los ficheros 22ProResyTAnexo2.xls y 22linea1000deTAnexo2.txt]**



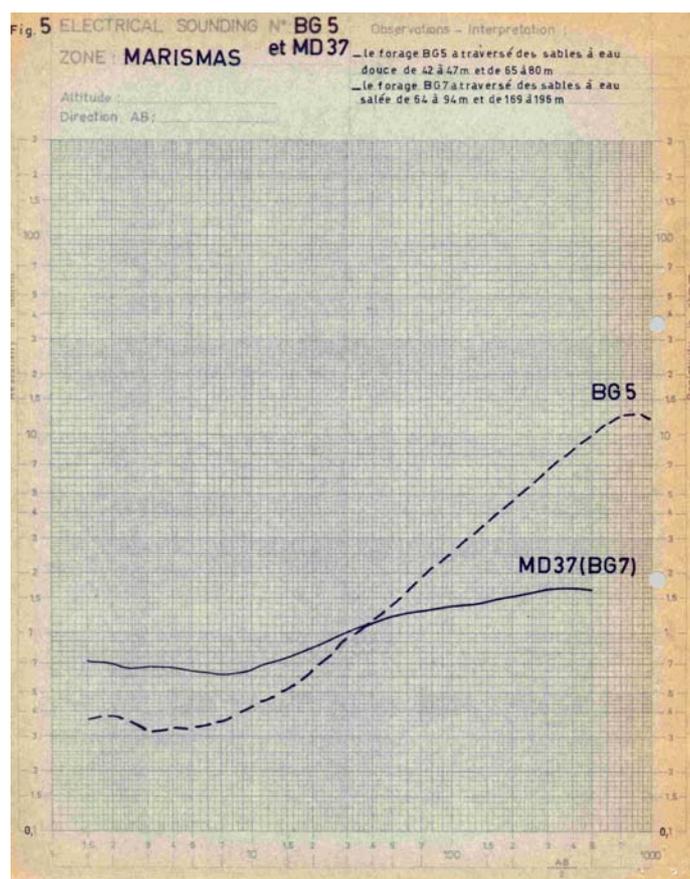
**Fig. 8. Mapa de cotas de la profundidad del techo del substrato impermeable resistivo en la zona de Niebla, presentado como Anexo 3 en el Informe de Prakla de 1968. (Ref. 35.559). Reconstrucción por digitalización de valores. [construido con el fichero 22ProfCotasSustratoAnexo3.xls]**

### **I.2.3 Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.**

Se deduce de este y otros documentos que M. Astier (conocido geofísico, autor del libro "Géophysique appliqué a l'hydrogéologie"- Masson&Cia-1971) actuó, encargado por la FAO, como supervisor de la campaña de SEV efectuada por Prakla en el Guadalquivir, antes de dar por concluidos los trabajos sobre el terreno. A este respecto, es de interés resaltar algunos comentarios contenidos en el informe: Astier visitó los trabajos de campo en marzo de 1967, detectando que los valores de potencial medidos en los SEV eran demasiado bajos y poco fiables, por lo que algunas curvas presentan irregularidades metrológicas en su parte final; esta situación parece haber sido corregida tras dicha visita. Por otra parte, Astier insiste en la necesidad de que Prakla efectúe un informe de contenido geológico con las interpretaciones de los SEV, teniendo en cuenta los resultados de los sondeos mecánicos que se hicieran: sobre la existencia de estas presumibles interpretaciones no hemos encontrado ninguna documentación. Finalmente, pone de relieve que la instrumentación (Log Master) enviada para la testificación de los sondeos estaba muy averiada (lo que puede explicar la baja disponibilidad de las testificaciones efectuadas en estas campañas), así como que la instrumentación para SEV comprada por la FAO a Prakla era muy compleja, de tal forma, que la previsión efectuada de que a partir de octubre de 1967 el IGME (Sr. Galvache) asumiría la ejecución de los trabajos de campo, podría verse comprometida en caso de avería.

Por lo que respecta a aspectos geológicos e interpretativos, este informe de Astier se refiere a las zonas de Orce, Huescar, Dólar, **Marismas** y Jerez de los Caballeros (campaña hecha por el IGME). Se resaltan los siguientes comentarios de la zona de interés:

- En la zona de Marismas existe, bajo las arcillas saladas o bajo las dunas, un potente relleno plio-cuaternal donde alternan las gravas, arenas y arcilla, cuyo contenido en agua es tanto dulce como salada, siendo por tanto de gran interés su distinción y demarcación del límite. Astier propone utilizar como elemento diferenciador la circunstancia de que las arcillas y las arenas con agua salada son muy conductoras, mientras que las arenas con agua dulce son resistivas, aunque él mismo advierte que bajo un tramo de 1 ohm.m cualquier terreno actúa como resistivo. Además, las resistividades de los primeros metros del terreno son tan variables (desde 0.5 ohm.m para arcillas saladas a miles de ohm.m para arenas secas), que pueden influir mucho en los resultados de los SEV. Pone como ejemplo (Figura 9) el caso del SEV MD37, junto al sondeo mecánico BG-7 (agua salada), y el SEV teórico que se daría junto al BG-5 (agua dulce). El sondeo BG-5 corta capas de arenas con agua dulce entre los 42-47 m y entre los 55-80 m, mientras que el BG-7 corta capas de arenas con agua salada entre los 54-94 m y entre los 169-195 m. La diferencia de las resistividades alcanzadas en ambos casos son muy diferentes, dificultando la interpretación.



**Fig. 9. Ejemplos de la influencia de la salinidad del agua en la forma de las curvas de SEV y su interpretación (según Astier, 1996) [archivo 23F5.jpg]**

- En consecuencia, se dibuja un mapa de resistividad aparente para AB=600 m (entre 60 m y 150 m de profundidad aproximadamente) para las zonas MD, MS, MP y MR, reproducido en la Figura 10. La resistividad del tramo considerado como acuífero está entre 1 y 40 ohm.m, según la salinidad del agua. Basándose en datos de los sondeos mecánicos BG-7 (que sólo atraviesa acuíferos salados, con T=400) y BG-5 BG-6 (con buenos caudales de agua dulce y T>5000), traza la línea T=5000 como el límite entre agua dulce- agua salada (1000 en el Informe de Prakla), correspondiente aproximadamente a 5-10 ohm.m, pero matizando que es por debajo de 2000 cuando puede considerarse agua salada. Recomienda efectuar nuevos SEV en la alineación BG-5 (agua dulce) a BG-1 (agua salada) para una mejor definición del trazado del límite, SEV que fueron efectivamente efectuados y se incorporaron al mapa anterior (Figura 11; estos SEV se denominan aquí como Txx, pasando a la nomenclatura TS en el informe posterior de Astier en 1970), modificando sustancialmente el trazado de la línea límite.

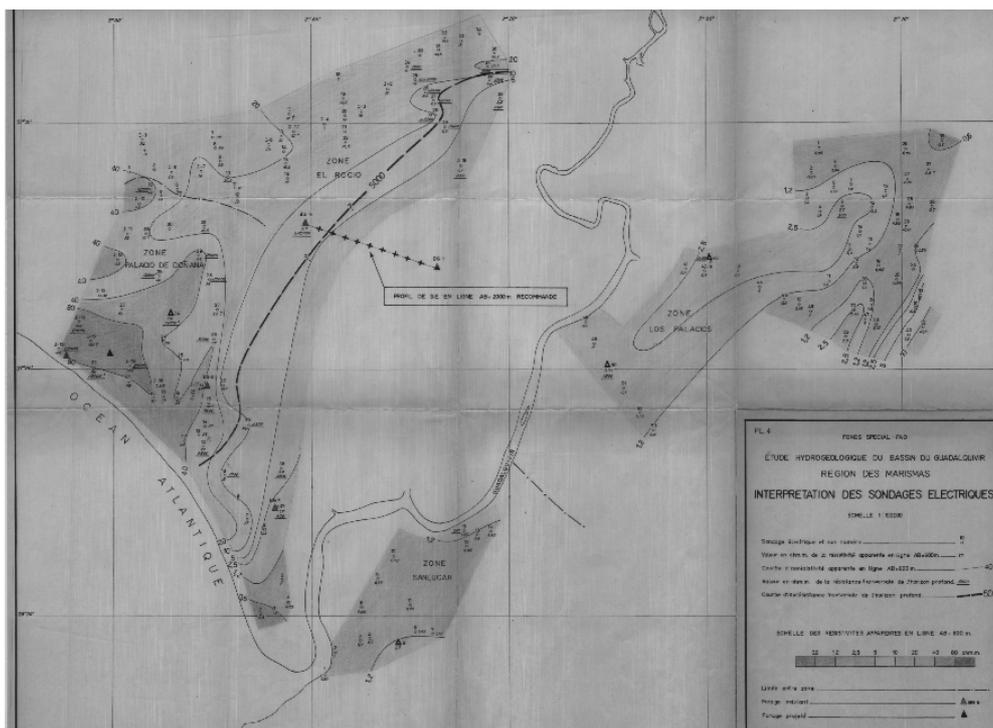


Fig. 10. Curvas isoresistivas para AB=600 m, resultado de la reinterpretación de los SEV de las campañas MD, MS, MP y MR, efectuada en el informe de Astier de 1967. Línea de resistencia transversal T del límite agua dulce-agua salada igual a 5000 ohm.m.m. [fichero 23PL-4.tif]

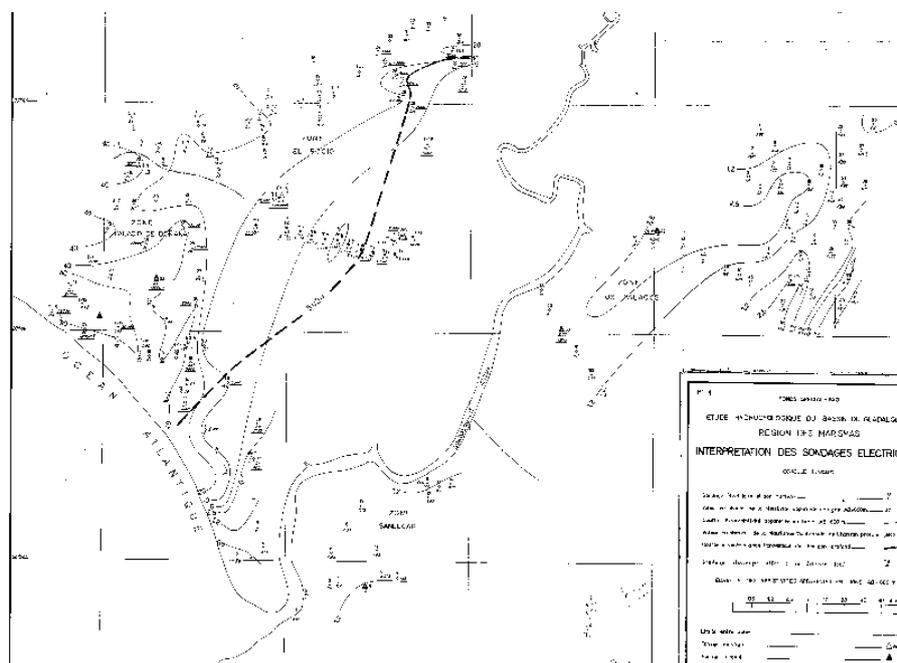
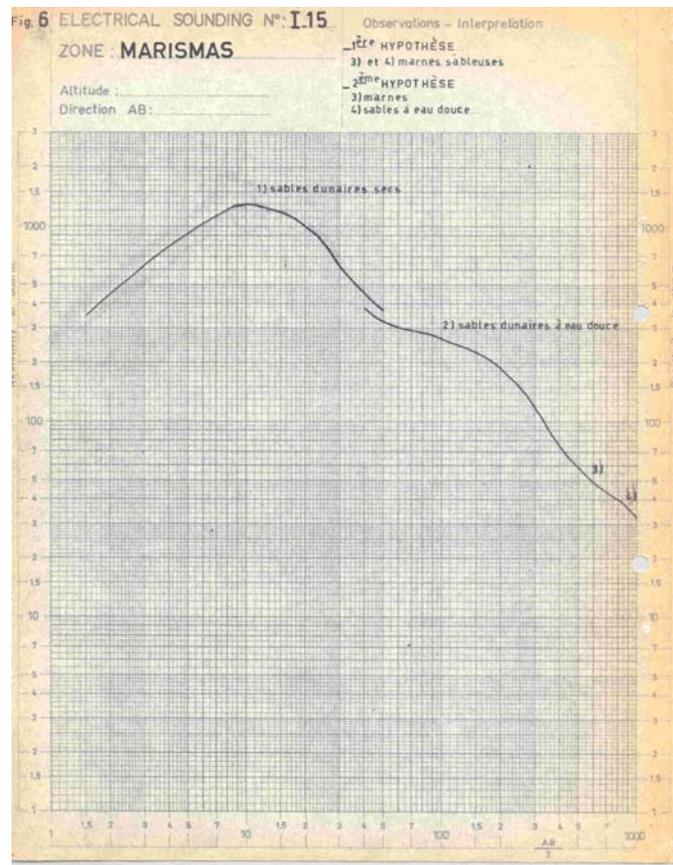


Fig. 11. Igual contenido que la figura 10, pero la línea de resistencia transversal T del horizonte profundo (acuífero) igual a 5000 ohm.m.m se ha vuelto a trazar después de hacer nuevos SEV entre los sondeos BG1 (agua salada) y BG5 (agua dulce).[fichero 23PL-4BIS.jpg]

- En la zona de los SEV 14, 15 y 19 del perfil 1 (Figura 11) el acuífero tiene más de 80 ohm.m (Figura 12) con  $T > 20.000$  y se corresponde, según un sondeo mecánico (no sabemos cuál)

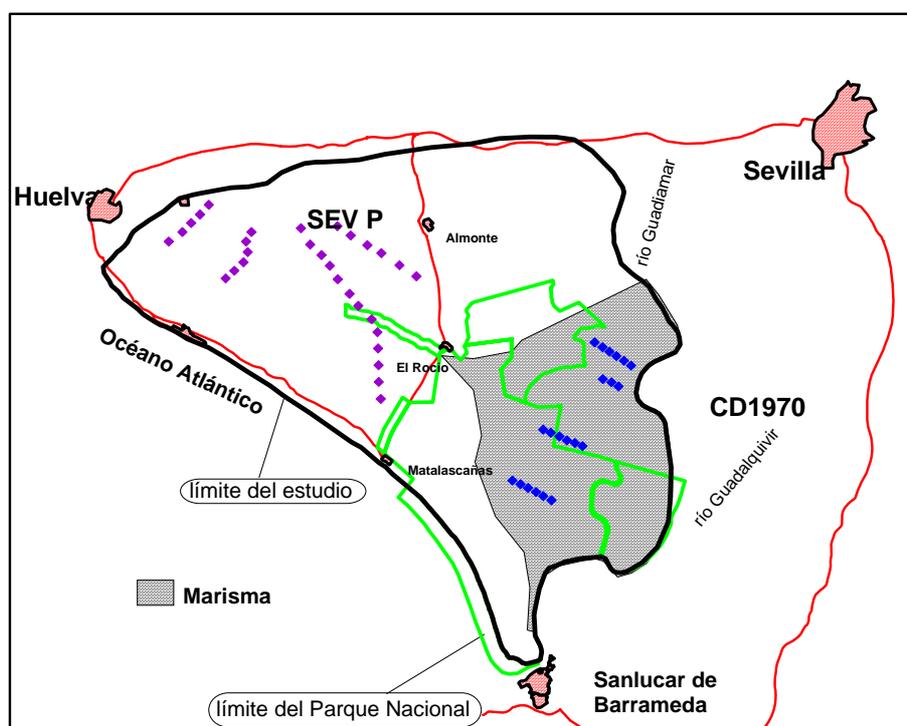
con un paquete de arenas de duna de 142 m, entrando luego en margas (el sondeo paró a los 145 m), por lo que Astier sugiere la existencia en esta zona de otra formación de arenas con agua dulce antes de llegar a las margas, recomendando un sondeo más profundo (al menos 300 m) para su verificación.



**Fig. 12. Ejemplo de SEV en la zona de Matalascañas, donde se produce un aumento de la resistividad y/o potencia del acuífero, lo que sugiere la existencia de un nuevo paquete de arenas con agua dulce, antes de llegar al basamento conductor.[fichero 23F6.jpg]**

### I.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070

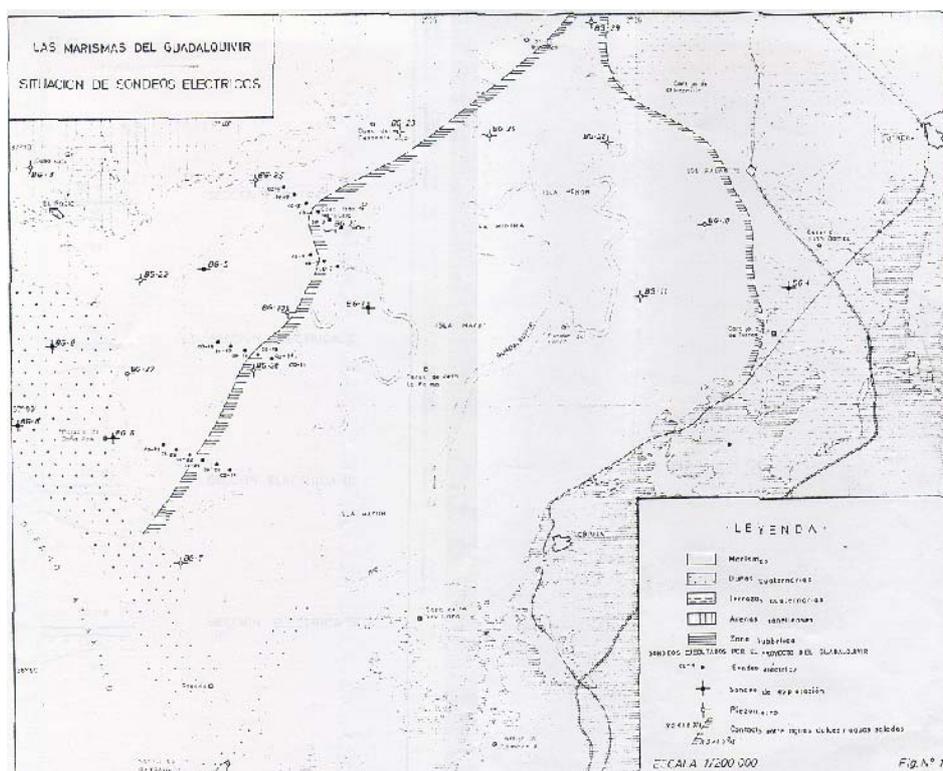
Campaña realizado por el IGME en 1968, de 30 SEV con AB=1000 m, numerados del 1 al 30 y distribuidos en 5 perfiles, según se indica en la Figura 13. Se incluye en el informe un plano de posición, curvas de campo interpretadas sin ningún apoyo geológico (nombradas como Moguer 1 a 9 y Almonte 10 a 30) y perfiles geoelectrónicos. El objetivo era determinar el techo de las margas azules, que en ese trabajo se supone siempre que son el conductor de base, y el espesor de las “arenas sahelenses”, que descansan sobre las margas. Estos mismos SEV fueron reinterpretados por Astier en su informe de 1970, donde reciben la nomenclatura P-xx (ver situación en Figura 15), presentándose unas diferencias a veces muy importantes entre ambas interpretaciones.



**Fig. 13. Situación de los SEV medidos por el IGME en 1968 (Informe Ref. 40.070), denominados Moguer y Almonte, y que fueron posteriormente incorporados en la interpretación efectuada en el Informe de Astier de 1970 con la denominación de SEV P. Situación de la campaña de SEV del Punta, denominados CD y medidos en 1970. [ficheros de posición SEV40070.xls y SEVCD-Marismas1970.xls]]**

### I.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.

Campaña realizada por el IGME (toma de datos en campo por Galvache en 1969, interpretados por F. Esteban en febrero de 1970) de 24 SEV de AB/2 máximo de 800 m, cuya posición se indica en la Figura 13. Están nombrados CD y agrupados en 4 perfiles sobre las marismas, en la zona de la interfase agua dulce/ salada señalada en el Informe de Astier de 1967, lo que les confiere un especial interés, junto con el hecho de proporcionar un plano de posición, que es el único documento recuperado donde se ve reflejada la situación de gran parte de los sondeos mecánicos BG (Figura 14). Se dispone de los estadillos de campo, curvas interpretadas y las secciones geoelectricas con apoyo de los sondeos BG21 y BG26.



**Fig. 14. Plano de posición de los SEV medidos por el IGME en 1970, denominados CD. Se indica también la posición de gran parte de los sondeos mecánicos BG efectuados en el Proyecto Guadalquivir, así como el límite entre el agua dulce y el agua salada deducido de este estudio (línea sombreada). [archivo 25Fig-1.jpg]**

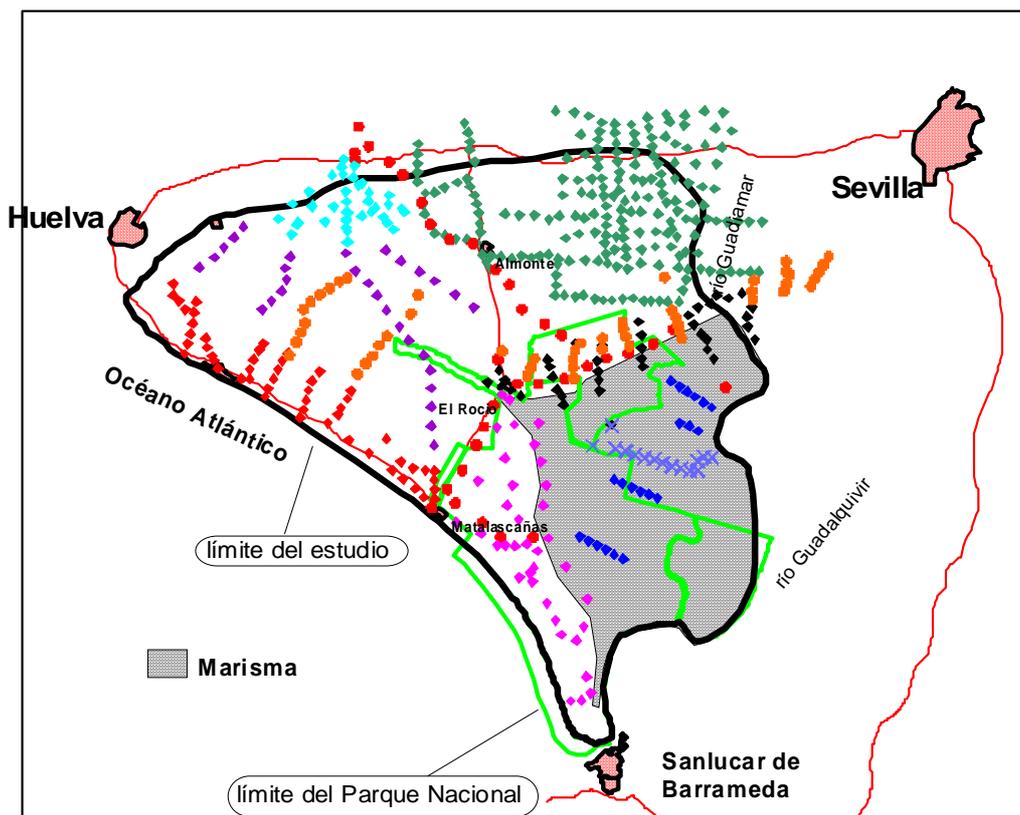
Los objetivos del trabajo eran determinar el espesor del Saheliense y el límite agua dulce-agua salada. El autor hace notar las fuertes discrepancias entre las columnas de los sondeos mecánicos y la información suministrada por los sondeos eléctricos, sin posibilidad de ajuste, lo que no sabe si adjudicar a la influencia en la calidad debida a la presencia de charcas saladas en superficie. Define el techo del Sahelinese, aumentando su potencia hacia el NO y hacia el Sur, situando el conductor de base a los 750 m bajo el SEV CD1, aunque advierte que la baja resistividad de las arenas sahelenses puede haber enmascarado el techo de las margas azules. Asegura que distingue muy bien los límites de salinidad, que dibuja en el plano nº1, reproducido en la Figura 14. El límite está trazado para valores de T superiores a 3000, sin saberse el criterio seguido para trasladar este valor

a una equivalencia de 1.5 g/l de ClNa. Estos SEV están incluidos en la interpretación de conjunto realizada por Astier en 1970, que se menciona a continuación.

### I.2.6 Interpretación d'ensemble des sondages eléctricos des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.

Se trata de la reinterpretación conjunta de 380 SEV:

- 89 del total de 200 efectuados por la compañía Lerici en 1963 para la C.H.G.
- 115 de los efectuados por Prakla en 1967 (44 de la zona N, 37 de la MD y 37 de la MR, habiendo eliminado 3 SEV)
- 86 efectuados por el IGME en 1967 (campaña L con 56 SEV y P con 30 SEV)
- 24 efectuados por el IGME en 1969 (campaña CD)
- 66 efectuados por el IGME en 1969 (16 de la T y 50 de la CM), campañas de las que no se dispone de mayor información, excepto de los estadillos de campo de la CM
- 



**Fig. 15. Conjunto de SEV contemplados en este informe de 1970: L rombo rojo; Lerici verde oscuro; CD azul oscuro; P morado; CM naranja; Perfil 1 y Perfil 2 círculo rojo; MD rosa; MR negro; N azul claro; TS aspas azules.**[ficheros de posición de SEV de los informes 40063, 35559, 40070, IGME 1970 S/R y Astier 1970 S/R]

En la Figura 15 se indica la posición de todas las campañas eléctricas, incluyendo los SEV TS efectuados sobre las marismas a raíz del informe de Astier en 1967, y que aparecen allí denominados como SEV Txx. Hay que tener en cuenta que no todos los SEV fueron considerados en esta interpretación, y que los situados al norte de la línea Moguer-Almonte-Pilas, que afectan a las campañas N de Lericí, no fueron interpretados por falta de tiempo.

En el Informe se suministran los siguientes documentos en escala 1/100.000:

- PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal
- PL 2: Zona Almonte. Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m)
- PL 3: Zona de Almonte. Resistividad del acuífero principal
- PL 4: Zona de Almonte. Profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales
- PL 5: Zona de Marismas. Límite entre agua dulce – agua salada
- PL 6 y 7: Cortes geoelectrónicos de 10 perfiles, a escala 1/50.000, cuya situación se indica en todos los planos anteriores

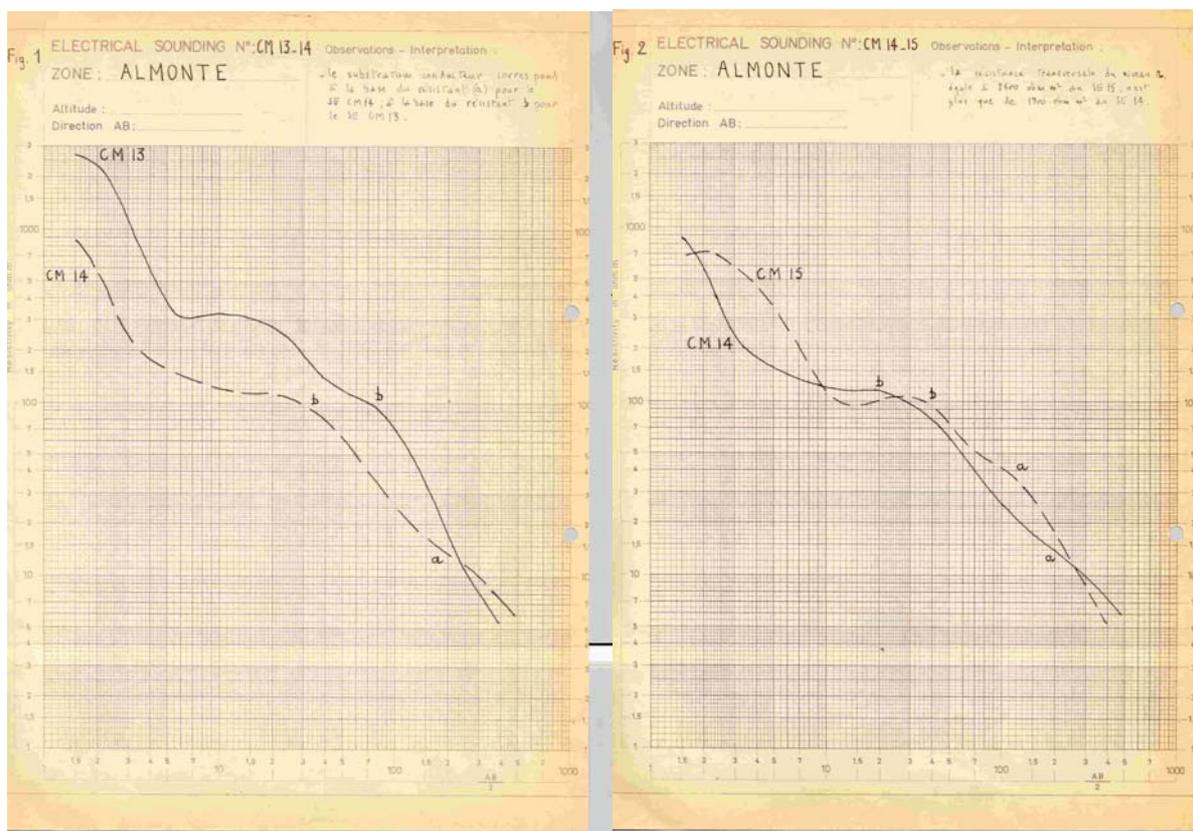
La interpretación se apoya en 19 sondeos mecánicos que han cortado el sustrato impermeable, de los cuales sólo se dispone de testificación de resistividad en uno y de resistencia monoelectrónica en otro (no se dice cuales son estos sondeos). Del conjunto de la información disponible se preparó el siguiente cuadro de valores de resistividad:

Litología	Valores más frecuentes y sondeos mecánicos utilizados	Otros valores
<b>Arenas sahelenses y villafranquienses</b>	<b>100 ohm.m</b> (1000-137, 1000-138, 1001-13 y 1001-188)	<b>150 ohm.m</b> (1001-11)
<b>Arenas de dunas</b>	<b>150 ohm.m</b> (1033-37), 250 ohm.m (1017-42, 1033-34)	<b>450 ohm.m</b>
<b>Arcillas o margas netas</b>	<b>Inferior a 10 ohm.m</b>	
<b>Arcillas arenosas, arenas arcillosas</b>	<b>10- 100 ohm.m</b>	

Las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m se consideraron como impermeables, y permeables las que tienen más de 80 ohm.m. Se indica que cuando se ha dispuesto de sondeos mecánicos próximos a los SEV, se ha tomado como profundidad del sustrato impermeable la indicada por C. Ruiz Celaa (IGME).

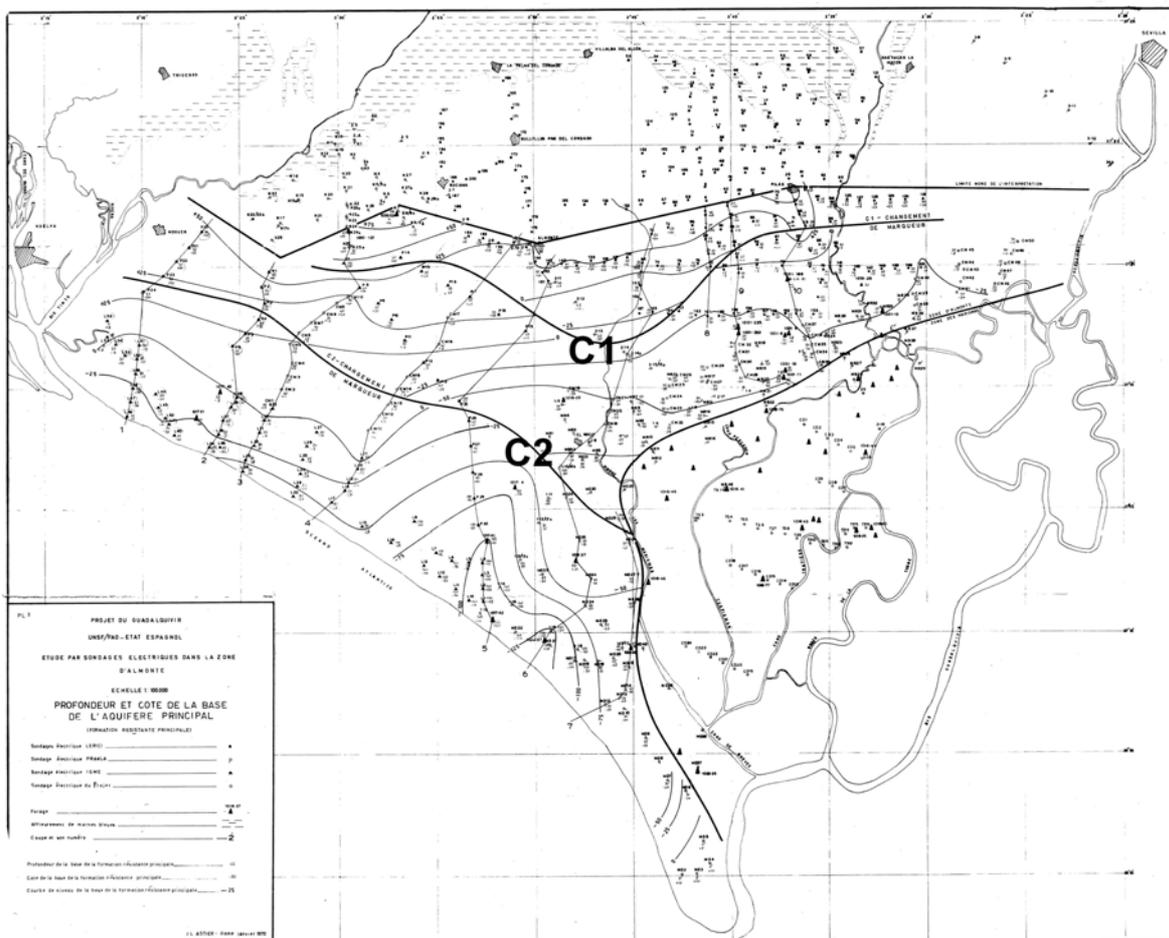
Este documento puede por tanto considerarse la síntesis de todos los trabajos geoelectricos anteriores, y la base para los posteriores estudios hidrogeológicos, por lo que es necesario conocer las observaciones que en él se hacen, para la correcta utilización de la información suministrada. En la interpretación efectuada se plantearon cuatro objetivos:

1/ **Determinación de la profundidad y cota del sustrato impermeable (PL1)**, que para Astier no es siempre las margas azules del Mioceno, sino que, en ocasiones, corresponde también a las arcillas arenosas sahelinenses o villafranquienses (Plioceno superior). En la interpretación se hace notar que se ha cambiado dos veces de sustrato conductor, al irse desplazando desde el norte hacia el sur, lo que Astier justifica de la siguiente manera: la cuenca aumenta de potencia y buza en general hacia el Sur, por lo que al dirigirse en esa dirección van apareciendo aflorantes las capas mas recientes; cuando éstas son resistivas y lo suficientemente potentes, acaban por ocultar en los SEV las capas resistivas más antiguas, lo que se ilustra en el tránsito entre los SEV CM 13 al sur y CM 14 al norte (Figura 16), donde el resistivo *b* del CM 13 impide ver el resistivo *a* bien visible en el CM14. Esto, unido a que hacia el Sur las arenas sahelinenses y villafranquienses disminuyen de importancia y son reemplazadas por arcillas (SEV CM14 y CM15, Figura 16), justifica el cambio de sustrato conductor.



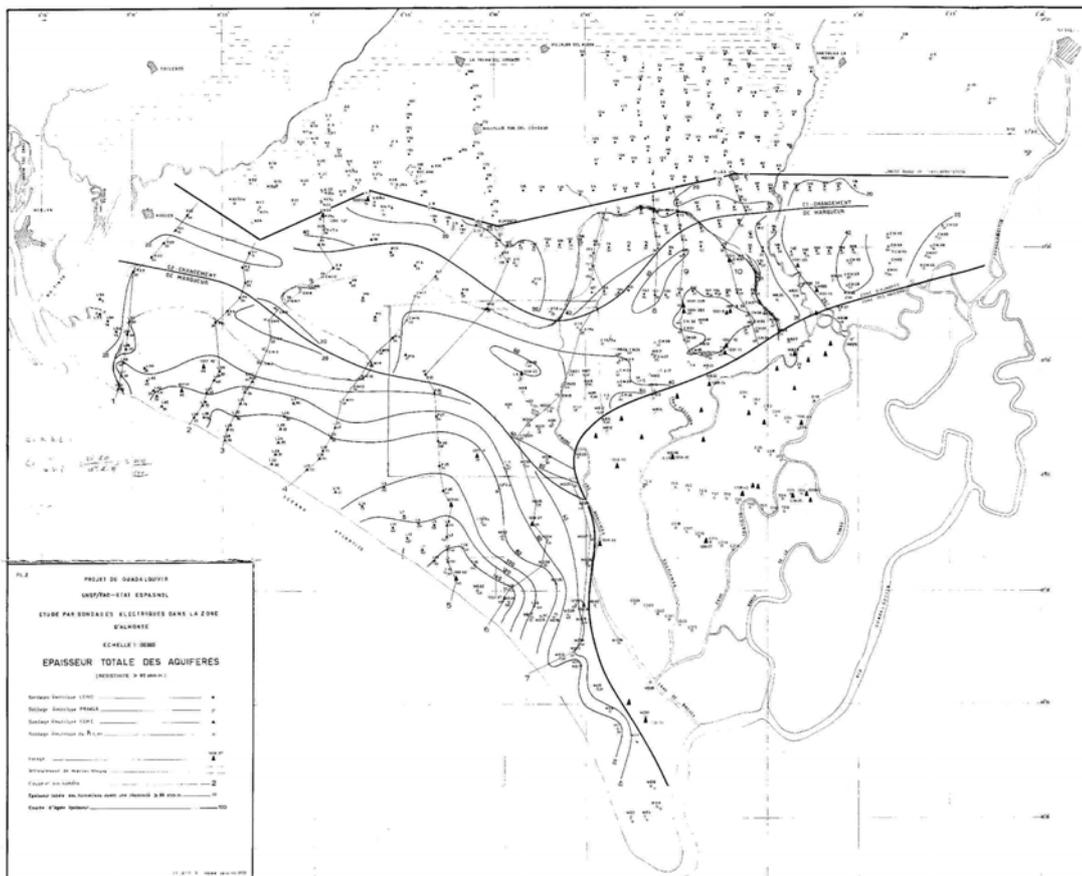
**Fig. 16. Ejemplos dados por Astier para justificar los cambios de sustrato conductor según se desplaza el perfil geoelectrico hacia el Sur.[ficheros 26fig-1.tif y 26fig-2.tif]**

A este planteamiento se le puede hacer la observación de que una cosa es que, debido a la disposición geométrica de la sedimentación, cambie el nivel conductor más fácilmente visible en las curvas de los SEV, y otra que ello signifique que cambie realmente el sustrato inferior impermeable del acuífero. El sustrato conductor marcado en el plano PL1 (Figura 17) corresponde a las margas azules al norte del límite marcado C1, a las arcillas arenosas probablemente sahelenses entre las líneas C1 y C2, y a arcillas más recientes al sur de C2.



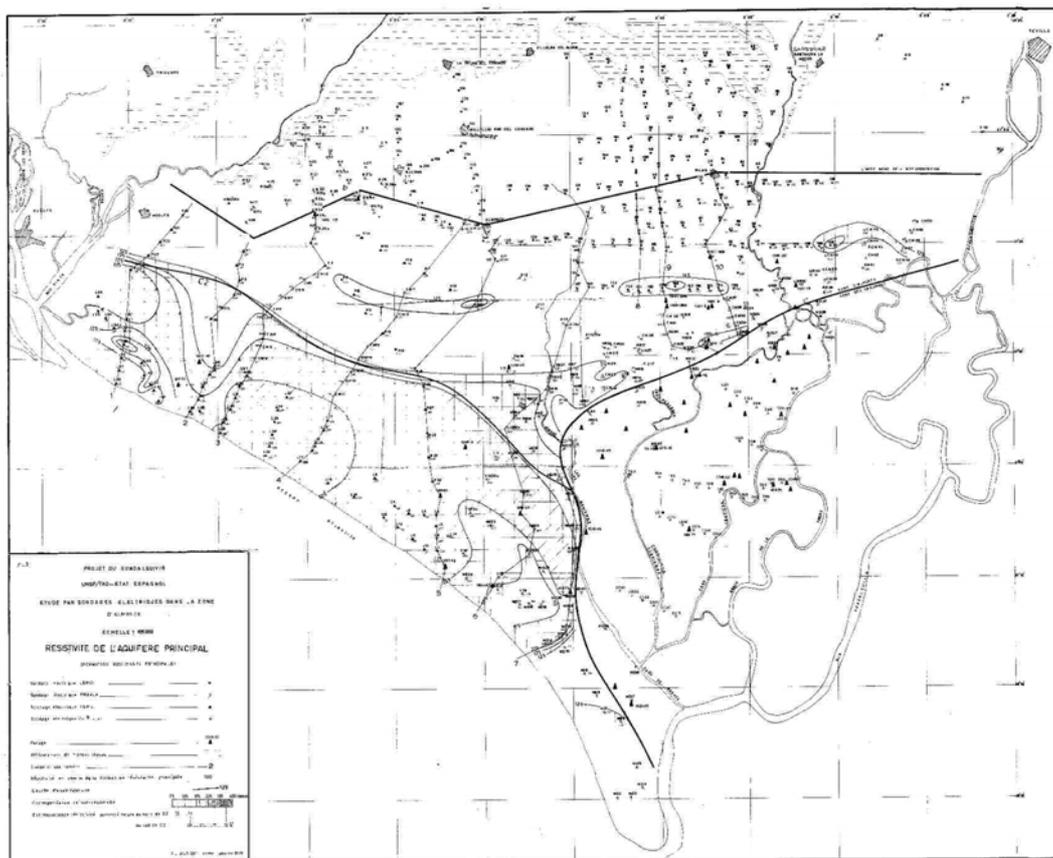
**Fig. 17. Plano PL1 de interpretación: profundidad y cota de la base del acuífero principal.[archivo 26PL-1.tif]**

2/ **Determinación del espesor de los niveles permeables** por encima del sustrato (PL2, Figura 18), a fin de poder calcular el volumen del acuífero, eliminando los lentejones de arcillas. Para ello se prepararon los diez cortes indicados en el PL 1 y dibujados en los PL6 y 7, en donde Astier aprecia en los SEV que las intercalaciones arcillosas entre las arenas no se trata de lentejones, sino de capas continuas de potencia casi igual a la de los niveles de arenas, y así lo refleja en las secciones geoelectricas. Esto pone en evidencia que en realidad existen tres acuíferos, cuya intercomunicación parece problemática. Para el mapa de potencia total de los niveles del acuífero se han tomado los tramos con resistividad superior a 80 ohm.m (PL2)



**Fig. 18. Plano PL2 de interpretación: espesor total del acuífero para capas con más de 80 ohm.m [archivo 26PL-2.tif]**

3/ **Determinación de la porosidad de los niveles permeables**, para calcular las reservas de agua. A partir de las resistividades puede efectuarse una evaluación de la porosidad de forma empírica, por la Ley de Archie. Astier, para ello, hace la hipótesis de que el contenido en arcilla es muy pequeño, ya que ha individualizado las capas por su resistividad, y para evaluar la resistividad del agua parte de seis muestras (con valores entre 14 ohm.m y 27 ohm.m, a 10 °C). En el mapa PL3, Figura 19, se establece la equivalencia, resistividad-porosidad, en donde la disminución de resistividad de un nivel acuífero va asociada a un aumento de su porosidad.



**Fig. 19. Plano PL3 de interpretación: resistividad del acuífero principal. La disminución de resistividad va asociada a un aumento de la porosidad. [archivo 26PL-3.tif]**

**4/ Espesor de los niveles arcillosos** (resistividad inferior a 30 ohm.m) **superficiales** (profundidad inferior a 5 m), para evaluar los posibles problemas de drenaje. Se detecta la presencia de estas capas, de al menos 6 m de potencia, en casi toda el área, a excepción de la zona de dunas costeras.

**5/ Determinación del límite entre el agua dulce y el agua salada en la zona de Marismas**, donde la presencia de arcillas saladas en superficie hace que los SEV sólo puedan apreciar la existencia de un tramo resistivo inferior, que engloba todo el acuífero hasta las margas azules. Esto hace que el parámetro más fiable de estos SEV sea la resistencia transversal T. Las líneas de concentración en sales indicadas en el plano PL5 (Figura 21) son en realidad líneas de igual T. La equivalencia se ha obtenido comparando el resultado del análisis de residuo seco en g/l para de diez sondeos mecánicos (indicados en los gráficos de la Figura 20) con el valor de T del SEV más próximo. El conjunto de puntos se adapta aceptablemente a la línea teórica para una capa de potencia de 100 m y porosidad 20 % (valores medios del acuífero, anteriormente obtenidos), en donde la variación de T se debe por tanto a la de la resistividad asociada a la variación de contenido en sales. Con esta equivalencia se han trasladado los valores de T del resto de los SEV a valores de concentración en g/l, adjudicándose el paso a agua salada a partir de 1.5 g/l ( $T=3000 \text{ ohm.m.m}$ ). Hay que tener esto muy en cuenta, ya

que otras posiciones de los límites de salinidad encontradas en la información utilizada en el presente Proyecto están trazadas basándose en otros criterios.

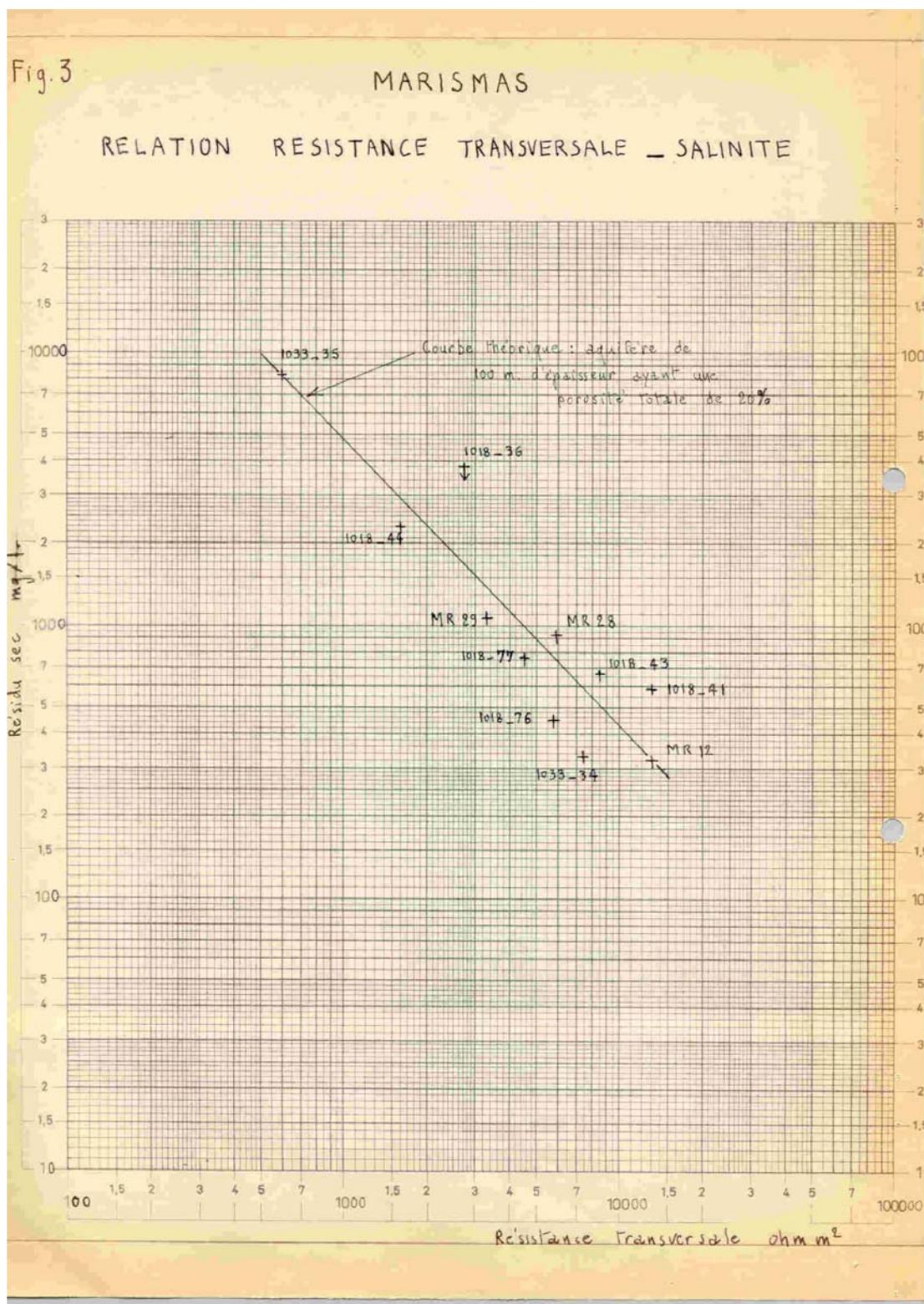


Fig. 20. Criterio utilizado para la conversión de resistencia transversal unitaria T a salinidad en g/l [fichero 26fig-3.tif]

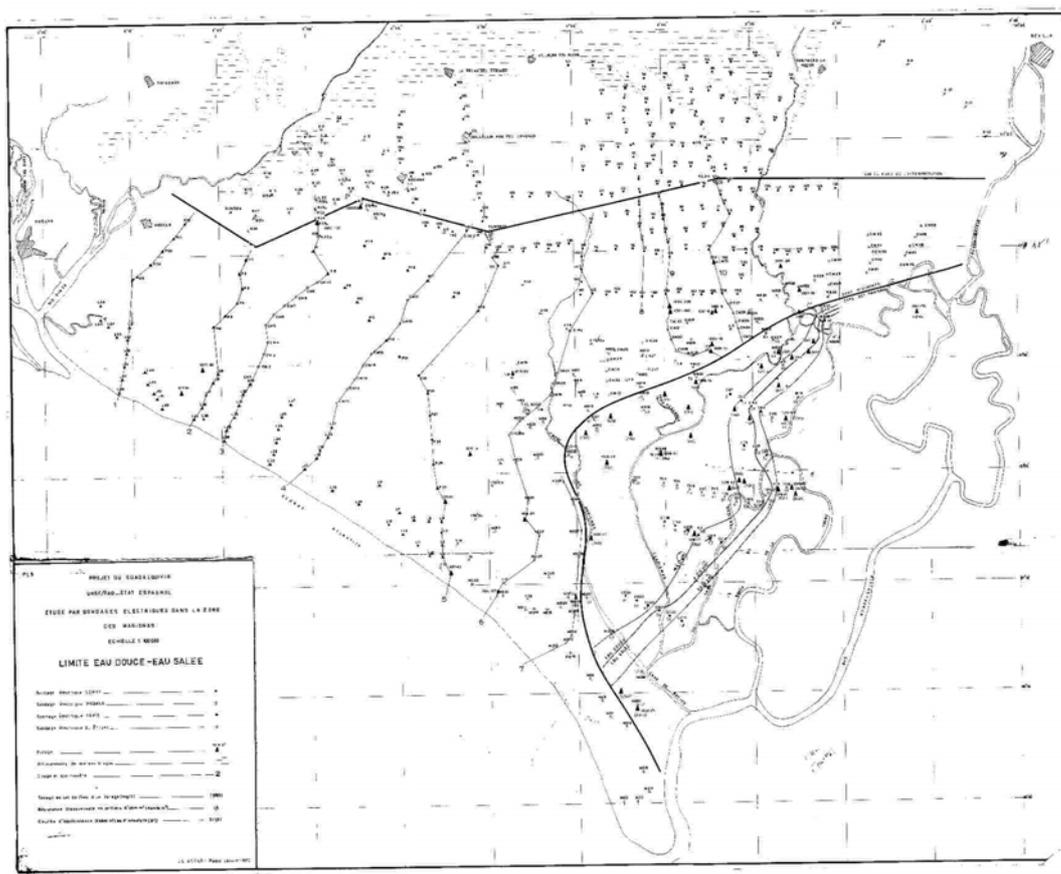


Fig. 21. Plano PL5: nuevo trazado de la línea límite entre agua dulce y agua salada en la zona de Marismas, efectuada por conversión de los valores de  $T > 3000$  como  $> 1.5$  g/l. [fichero 26PL-5.tif]

### I.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538

De todos los sondeos del **Proyecto Guadalquivir** previstos para ser testificados por el equipo del IGME, sólo se efectuaron los presentados en este Informe, debido a las dificultades encontradas a causa del gran diámetro y la alta salinidad de los lodos.

- Lucio del Lobo..... gamma natural hasta los 100 m
- 114230024 (M-6-5)..... gamma natural hasta los 186 m
- 114220018 (AM-1)..... gamma natural, resistividad y potencial espontáneo hasta 128 m
- 114230049 (M-8-14)..... gamma natural, resistividad y potencial espontáneo hasta 138 m

El informe contiene copias de baja calidad de los registros obtenidos, con una interpretación previa. Los documentos no disponen de indicación de valores de la escala, por lo que esta información sólo tiene un valor cualitativo de variaciones relativas, no siendo útil para cuantificación de las resistividades. El sondeo AM-1 se encuentra también testificado en el Informe 35963 de 1995.

## **I.3 Descripción del contenido de los informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982**

### **I.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.**

Como consecuencia de los resultados obtenidos en el *Proyecto de Investigación Hidrogeológica en la Cuenca del Guadalquivir*, finalizado en 1969, se decidió continuar los estudios con un nuevo Proyecto de utilización de las aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir en las zonas de Almonte-El Rocio-Marismas, Vega de Granada y Guadix. Fue llevado a cabo por los mismos participantes anteriores (FAO, IGME, IRYDA y CHG), a los que ahora se unió la Dirección General de Obras Hidráulicas. Este trabajo, presentado por la FAO al Gobierno español, tiene como objetivos principales hacer una investigación cuantitativa detallada de los recursos de agua subterránea, incluyendo estudios de desarrollo agrícola y socioeconómico, anteproyectos de explotación y cálculos económicos y de rentabilidad. Consta de 7 informes técnicos:

- 1/** Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha). (con un tomo de Apéndice)
- 2/** Utilización de las aguas subterráneas para la mejora del regadío de la vega de Granada
- 3/** Plan de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la zona de Guadix
- 4/** Tecnología y coste de los sondeos de captación de aguas subterráneas en la Cuenca del Guadalquivir
- 5/** Estudio detallado de los suelos de la zona Villamanrique de la Condesa – Hinojos – Almonte – El Rocío. 1973
- 6/** Finca Piloto “Las Marismas”. 1973
- 7/** Proyecto de transformación de la zona regable Almonte-Marismas. 1975

Sólo interesa para el presente estudio parte del contenido de los informes técnicos **1, 4 y 7**, cuyos datos de mayor importancia se transcriben a continuación.

#### **Informe 1/ Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha)**

Incluye un resumen de los trabajos geofísicos (SEV), que se refiere a los reinterpretados por Astier en 1970, presentando un mapa de posición de SEV (mapa 1.2.2) que no incluye todos los realizados. Se efectuaron 68 sondeos mecánicos (6719 m de perforación) para reconocimiento geológico e hidráulico, control de calidad del agua y estudio de métodos de captación; de estos sondeos no consta ninguna información detallada, ni fueron, que sepamos, utilizados para verificar o reinterpretar

los SEV. Se presenta además una descripción de las características geométricas, hidráulicas y químicas del sistema acuífero Almonte-Marismas, que tiene especial interés por ser la utilizada en estos mismos estudios, y permite por tanto interpretar los documentos aportados, por lo que se resume a continuación.

Se descarta la margen oriental del Guadalquivir por ser sus aguas subterráneas fósiles y muy cargadas en sales, considerándose terrenos acuíferos:

- las arenas sahelenses (actualmente (2003) catalogadas como "limos basales del Plioceno", a techo de las margas azules tortonienses), que aumentan desde 20-30 m de potencia al Norte hasta 50-70 m al Sur. Tienen facies variable entre arenas gruesas medias a arenas finas, que pasan a arcillosas en la base, diferenciándose de las margas azules por tener más de 30 ohm.m de resistividad; presentan con frecuencia areniscas de grano fino muy fosilíferas.

- las arenas margosas del Plioceno continental, que recubren el Saheliense, con potencia de 10-20 m al Norte hasta 80 m al Sur. Cambios de facies muy frecuentes con lentejones de gravas o arenas gruesas y de arcillas, que abarcan grandes superficies con potencia de 2 a 5 m.

- el Cuaternario medio, formado por terrazas fluviales de arenas y cantos rodados más o menos mezclados con arcillas y arenas (10 a 20 m en el río Guadiamar), y el cordón de dunas fósiles (entre el Rocio y Matalascañas) de 30 a 40 m de arenas finas, con estrechos lechos arcillosos.

- El Cuaternario reciente, formado igualmente por terrazas (15 a 30 m) y dunas más potentes (60 m)

- El Cuaternario de marismas, constituido por una capa inferior de 15 a 50 m de gravas y arenas gruesas, que apoyan directamente sobre las arenas sahelenses, y otra capa superior, discontinua, en forma de lentejones incluidos en una potente capa de arcillas y que no se considera cómo acuífero, ya que su alimentación se efectúa desde la capa inferior, a través de las arcillas que las engloban.

El espesor total de terreno acuífero se presenta en el mapa 1.2.4, que es una suavización (elimina los saltos entre zonas de distinta base impermeable) del dibujado por Astier en 1970 (Figura 18), y tampoco incluye la zona de marisma. En el mapa 1.2.5 se dibuja la cota absoluta del fondo impermeable (también suavizado del de Astier de 1970, Figura 17). Anticiparemos que este plano, junto con el de Astier, es importante para demostrar que el pretendido mapa del techo de las margas azules presentado en la Figura 3, de 1992, no tiene nada que ver con la cartografía geofísica. Aunque aquí se considera que la base impermeable pueden ser las margas azules tortonienses, se advierte que la transición a las arenas sahelenses es progresiva y difícil de definir. Las investigaciones realizadas llevaron a la conclusión de que las arenas muy arcillosas o las margas muy arenosas representan en realidad el fondo impermeable de la zona. Mediante SEV paramétricos se comprobó que esta zona corresponde a una resistividad que desciende de 30 ohm.m. Para la zona de marismas no puede efectuarse este mapa por la dificultad que presenta la alta salinidad de las arcillas que recubren los acuíferos, así como a la presencia, en determinadas zonas, de aguas muy cargadas en

sales. Según este mapa, el techo impermeable presenta un suave buzamiento hacia el Sur, aunque en la mitad occidental, entre Palos y El Rocío, dicho buzamiento se divide en dos: uno hacia el océano y otro hacia el Sur-Este. En el borde de las marismas, al Sur del Rocío se observa un suave alzamiento de las margas, a manera de domo. La cota más baja (150 m b.n.m.) se sitúa en Torre de la Higuera.

#### **Informe 4/ Tecnología y coste de los sondeos de captación de aguas subterráneas en la Cuenca del Guadalquivir**

Se refiere a los sondeos efectuados tanto durante este estudio como anteriores, que en total son 131, más 52 piezómetros (20.892 m perforados). Este informe recoge una serie de recomendaciones sobre la forma de ejecutar los sondeos, poner los filtros, desarrollo y equipos. Se dice que para cada sondeo existe un informe individual que queda archivado, así como que en los sondeos efectuados por el IGME estaba previsto ejecutar una testificación eléctrica para precisar las zonas permeables y ayudar a las correlaciones geológicas necesarias, incluyéndose en el Anexo la columna del BG6; el resto de esta información no sabemos dónde está. Hay un cuadro donde se recogen las características de todos los sondeos efectuados en la zona de Almonte y Marismas, que son todos los BG, que ha sido pasado a archivo digital en el presente Proyecto.

#### **Informe 7/ Proyecto de transformación de la zona regable Almonte-Marismas. 1975**

Es un estudio, firmado en Roma en 1975, sobre la tecnología y coste de los sondeos de captación de aguas subterráneas realizados desde 1971 a 1973 en la zona. Se trata de 125 sondeos (109 útiles) de 762 mm, realizados en malla en los sectores denominados III, IV y V, cuya posición se indica en el Plano 2. Se incluyen cuatro cortes geológicos, basados en las columnas de los sondeos, con indicación del nivel impermeable y presencia de arcillas de los sectores III y IV, así como las columnas de los sondeos: IV-5-1 III-12-49 III-10-7 III-11-11 III-11-11bis, documentos todos ellos que han sido escaneados en el presente Proyecto.

Los datos aportados por este informe serán más ampliamente comentados en el capítulo III de Análisis de la Información.

### I.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.

El IRYDA fue el encargado, a través de su Parque de Maquinaria, de realizar las perforaciones para la captación de los caudales necesarios para la puesta en riego de la zona “Almonte-Marismas”. Este informe se refiere a los 462 sondeos mecánicos efectuados entre octubre de 1971 y marzo de 1976, y no sabemos si mantienen alguna correspondencia con los mencionados anteriormente en el Informe 7/ de la FAO (1975), ya que los trabajos de desarrollo y aforo terminaron en septiembre de 1976. Es un trabajo de síntesis, mencionándose que se realizó un informe individual para cada sondeo. En cualquier caso, se advierte que en la Segunda Fase del Plan General de Transformación en 1974 se modificó la nomenclatura de los sectores de riego, manteniéndose en este informe la anterior, porque los sondeos ya estaban realizados al cambiarla, siendo la equivalencia:

Sector de sondeos	Sector de riego
I	I
III, IV y V	II
MARISMAS	III

La Memoria describe las técnicas, medios y tiempos de construcción de los sondeos; datos económicos; datos hidrogeológicos y experiencias realizadas, finalizando con unas Conclusiones. Se acompaña de 12 Anejos y 45 planos. De su amplio contenido, que recoge y modifica cuestiones ya tratadas en anteriores Informes, extractamos a continuación los aspectos más relevantes para nuestro estudio actual:

#### **Datos de los sondeos:**

El Anexo 1 está formado por una colección de fichas de datos de los sondeos mecánicos efectuados, que son los siguientes:

Sector Almonte-Marismas	Nº total de sondeos	Nº de sondeos útiles
I	83	83
III	107	84
IV	100	94
V	67	50
MARISMAS	92	90
<b>TOTAL</b>	<b>449</b>	<b>401</b>

Los sondeos están nombrados:

- AM 1 a 18
- M-1 1 a 6 (con 5bis y 6bis), M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, M-8
- I-1, I-2, I-3, I-4, I-5, I-6, I-8, I-9
- III-3, III-6, III-7, III-8, III-9, III-10, III-11, III-12
- IV-1, IV-2, IV-3, IV-4, IV-5, IV-6, IV-7, IV-8 IV-9, IV-10, IV-11, IV-12, IV-13
- V-1, V-2, V-3, V-4, V-5, V-7, V-8

constando cada serie de varios sondeos, para los que las fichas proporcionan los siguientes datos:

-Datos técnico-económicos: número de obra, fecha de comienzo y final, perforadora, diámetro, metros perforados, diámetro de entubación, bomba y profundidad de aspiración, caudal, depresión, nivel estático, caudal específico, coste, certificación y observaciones,

-Datos hidrogeológicos: cota del terreno, nivel estático, **cota del fondo impermeable**, techo del primer acuífero, disposición de las rejillas, transmisividad, coeficiente de pérdida de carga, recomendaciones de explotación (caudal, profundidad de bomba,..).

### ***Testificación geofísica:***

Se comenzó testificando la mayoría de los sondeos, midiendo la resistividad y el potencial espontáneo, con un equipo del Proyecto Guadalquivir. Se comprobó que hay una clara correlación entre los datos de las testificaciones y las características de permeabilidad esperada de las muestras de los terrenos atravesados (lo que corroboró la buena calidad de los datos obtenidos con el método de circulación inversa). A la vista de esto, en la zona de arenas dejaron de realizarse testificaciones (sorprendente decisión), mientras que en el sector de Marismas se consideraron imprescindibles por tratarse de una formación distinta y esperar la aparición de un primer acuífero superior cargado de sales, y ser necesario determinar la interfase agua dulce-salada. Por averías del equipo (del IRYDA) sólo se llegaron a hacer 10 testificaciones, de las que el informe adjunta únicamente la del sondeo M-1-6 bis, desconociéndose que ha pasado con el resto.

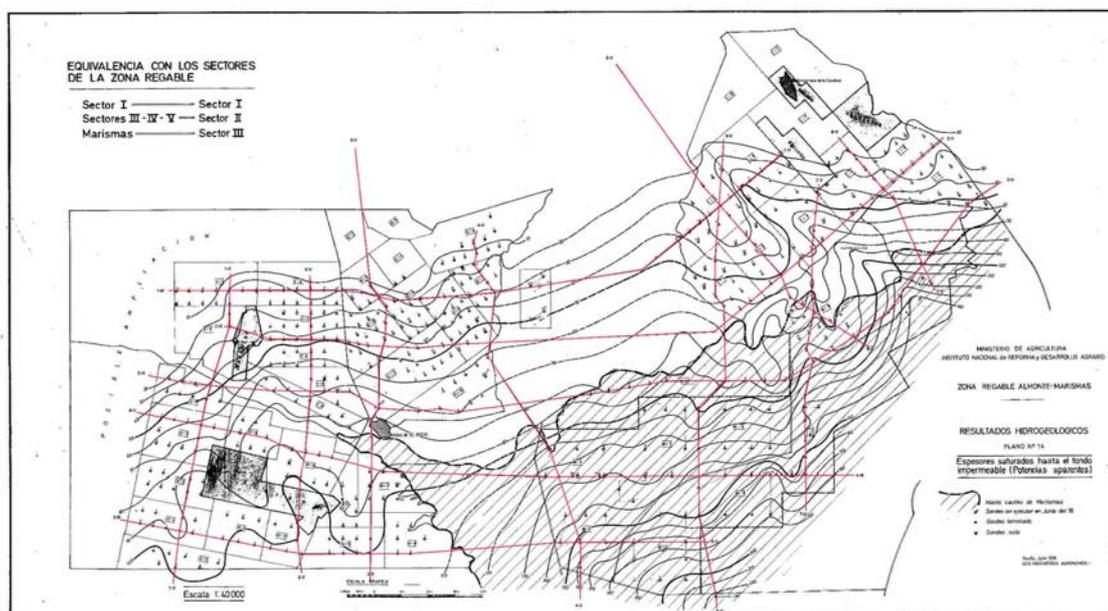
### ***Hidrogeología del acuífero Almonte-Marismas :***

Dada la profusión de datos proporcionados por los 462 sondeos efectuados, se elaboró una nueva síntesis de los conocimientos adquiridos sobre la hidrogeología del acuífero, en la que se avisa que se han detectado desviaciones de alguna importancia respecto de las previsiones efectuadas en el *Proyecto Guadalquivir*, sobre todo en la situación y gradiente del frente salino en el acuífero cautivo de Marismas, y en la obtención de caudales, mayores que los previstos. Aunque los datos de base se han estudiaron en el sector de riego, se procedió además a una elaboración global de todo el

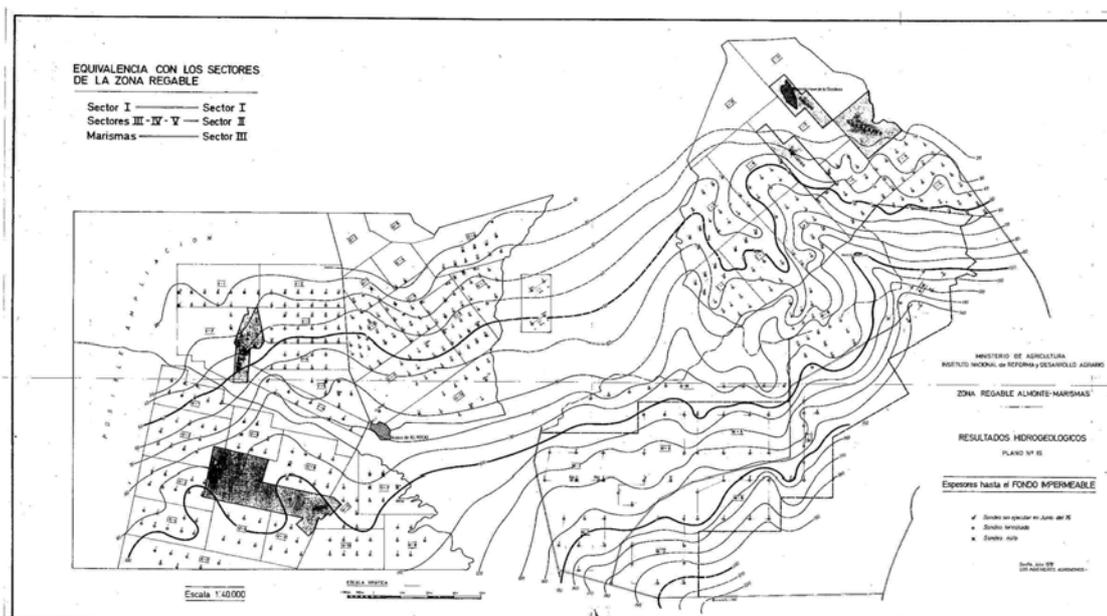
acuífero, **interpretándose las partes con pocos datos de la forma más probable para obtener una visión de conjunto.** Destacamos aquí los datos de interés para nuestro estudio actual:

- **Espesores hasta el fondo impermeable, potencias del acuífero y cota del fondo impermeable:**

Los valores están reflejados en planos, sin que exista mayor información sobre cómo se han elaborado. Para el área de la zona regable, el espesor de la capa saturada (plano 14, reproducido en la Figura 22) aumenta de Norte (15 m) a Sur (80-100 m en la franja de contacto entre arenas y marismas, y 200 m en el extremo Sur). Puesto que los niveles estáticos son reducidos, las potencias del acuífero son similares al espesor hasta el fondo impermeable (plano 15, reproducido en la Figura 23), excepto en el sector I en donde, por tener niveles estáticos bajos y espesor reducido, queda una potencia de acuífero de 20-30 m. En Marismas, la potencia aprovechada se reduce considerablemente, aunque todo el espesor hasta el fondo impermeable está saturado de agua. El techo del acuífero cautivo está a 20 m en el Norte, llegando a los 100 m en el Sur de la zona de captación en la Marisma, por lo que la potencia aprovechada va desde los 40 m hasta los 120 m, creciendo en dirección NW-SE.

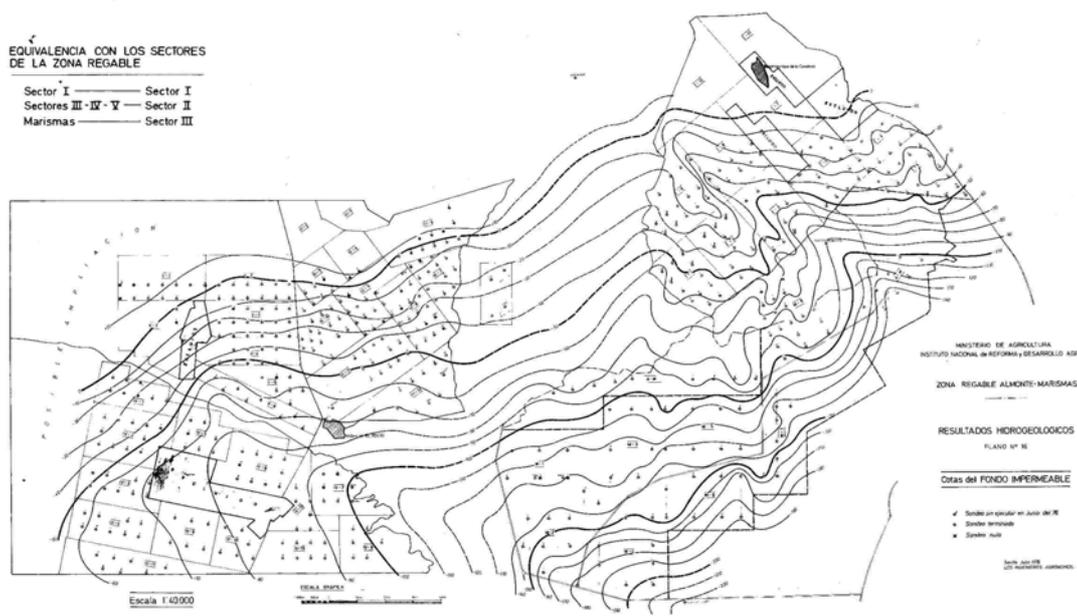


**Fig. 22. Espesores saturados hasta el fondo impermeable. Se indica la posición de los perfiles geológicos levantados con las columnas de los sondeos mecánicos, y representadas en los planos 24 a 29.[fichero 32PL-14.tif]**



**Fig. 23. Espesores hasta el fondo impermeable. [fichero 32PL-15.tif]**

Sobre la cota del fondo impermeable (plano 16, Figura 24), se dice explícitamente “*que se ha elaborado con los datos de los sondeos (los que figuran en el Anexo I), **admitiendo como muro del acuífero las series de margas arenosas con vetas de areniscas de grano fino y muy cementadas, con abundancia de fósiles entremezclados, que anteceden a las margas azules propiamente impermeables, y en las que se van transformando gradualmente al aumentar la profundidad. Estas series de transición pueden casi no existir o llegar a tener del orden de 30-40 m. Las posibilidades de captación de esta formación son casi nulas, y aunque su permeabilidad sea mayor que la de las margas azules, a escala local se ha considerado impermeable. Al norte de la zona de captación estas capas de transición del Saheliense al Tortoniense son, en muchos puntos, el único acuífero existente, con características de transmisividad y caudales obtenidos muy pequeños***”. La cota descende desde 10 m al Norte hasta la -220 m al Sur, de forma uniforme pero formando dos vaguadas situadas en las proximidades del Arroyo de la Rocina y 2 km al oeste del arroyo de la Cigüeña.



**Fig. 24. Cotas del fondo impermeable según plano 16, obtenidas a partir de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos efectuados, recogidos en el Anexo I del informe del IRYDA. Este fondo lo forman las series de margas arenosas de transición del Saheliense al Tortoniense, previas a las margas azules. [fichero 32PL-16.tif]**

La extrapolación de las cotas del fondo impermeable para todo el acuífero está representada en el Plano 41 (documento no reproducido aquí, ya que el original disponible es de muy mala calidad), utilizando para ello la información de los datos de sondeos piezómetros realizados en el *Proyecto Guadalquivir*. En el plano está indicada la posición de los sondeos BG-39, BG-47, BG-7, BG-28, BG-11, BG-29, BG-24 y otros tres BG cuyo número no es identificable, así como otros sondeos realizados fuera de la zona regable (situados también en el plano 37) como investigación complementaria para la elaboración del modelo matemático de funcionamiento del acuífero (sondeos Almonte, Arrayán, Bonarés, Señuela, Señuela bis, Abalorio), sondeos del Parque Doñana (Mari López, Travieso 1, Travieso 2, Lucio Lobo) y otros (Partido Resina, El Rocio, Mediana y Caserío de Mazagón, Suministro a Mazagón, 22-1001). Hay alguno más, de difícil identificación, debido a la mala calidad de la reproducción de la que ha podido disponerse. Para cada uno de estos sondeos el mapa indica el valor de la cota del fondo impermeable y el espesor hasta dicho fondo, por lo que sería posible identificar en las columnas de estos sondeos que es lo que se ha tomado por base del acuífero. En este documento se indica, en una nota escrita a mano, que “se considera fondo impermeable la transición a margas plásticas (margas arenosas del Saheliense)”.

- **Perfiles litológicos:**

A partir de las columnas litológicas de los sondeos efectuados, se confeccionaron 13 perfiles en la zona de captación. Su situación se representa en el Plano 14 (Figura 22) y los perfiles geológicos están dibujados en los planos 24 a 29, y otro en la zona de dunas.

Estos perfiles reflejan la división del subsuelo en cuatro tipos de terreno, según su permeabilidad relativa:

			Muy permeable $k > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s	Permeable $5 \cdot 10^{-4} > k > 10^{-5}$ m/s	Semi-permeable $10^{-5} > k > 10^{-7}$ m/s	Impermeable $k < 10^{-7}$ m/s
CUATERNARIO	Reciente	Cuaternario fluvio-marino de marismas	Mezcla de arenas, gravas y cantos rodados	Arenas marrón-grisáceas capas conchíferas	Arcillas arenosas marrón-verdosas o azuladas	Arcillas y margas marrón-grisáceas
	medio	Dunas fósiles		Arenas finas blanco amarillentas	Lentejones de arenas arcillosas	
		Terrazas arenosas	Mezcla de arenas, gravas y cantos rodados	arenas	Arcillas arenosas	Arcillas marrón oscuro
PLIOCENO continental [VILLAFRANQUIENSE]*			Gravas y gravillas de cuarzo blanco amarillento	Arenas finas amarillo-rojizas. Conglomerados	Arenas arcillosas amarillo-rojizas y arcillas arenosas	
MIOCENO	Saheliense [ANDALUCIENSE, MESSINIENSE]*			Arenas amarillentas a grisáceas, lumaquelas, areniscas poco cementadas	Arenas margosas, areniscas muy cementadas. Margas arenosas grises fosilíferas	
	Tortonense					Margas gris-azuladas

\* denominaciones añadidas en el presente trabajo (2003) para completar las utilizadas en otros documentos.

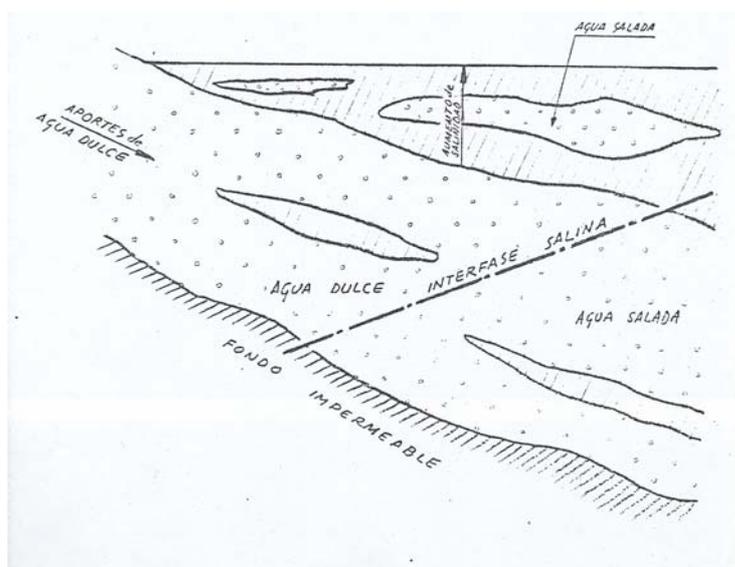
• **Interfase agua dulce- agua salada:**

Con 1133 muestras procedentes de 206 sondeos efectuados en este proyecto, junto con 56 análisis representativos procedentes del *Proyecto Guadalquivir* para extender el área contemplada, se trazaron mapas de líneas de igual concentración de salinidad. Estos mapas no han sido encontrados actualmente, pero según los comentarios del informe se observan dos zonas de calidad de agua bien diferenciadas, separadas por un frente salino de alto gradiente en las Marismas. En la parte dulce, que corresponde principalmente al acuífero libre, se aprecia cierta relación entre la calidad del agua y la litología:

- en las dunas y arenas pliocenas no se rebasan los 300 mg/l
- en las zonas de predominio de las arenas y margas arenosas del Saheliense se llega a los 500 mg/l, aumentando en los afloramientos hasta 750 mg/l
- en el cuaternario reciente (formación de Marismas), el acuífero cautivo es alimentado lateralmente por el libre de Almonte, cuyas aguas dulces han desplazado parcialmente a las saladas del antiguo estuario del Guadalquivir unos 6 km hacia el Sur-Este desde su posición

original, formándose una alineación de alto gradiente de la interfase, verificado con muestras y con la sonda de resistividad eléctrica: con conductividades superiores a 1.7 mmho/cm el residuo sólido supera 1 g/l. Por tanto, se concluyó que las curvas de concentración pueden ser fiablemente trazadas a partir de los valores de conductividad eléctrica. La salinidad en profundidad llega a los 35-40 g/l, próxima a la de agua de mar.

En la Formación Marismas existe un acuífero superficial salado, constituido por capas más o menos continuas de arenas y gravas confinadas dentro de un paquete de margas de poca potencia en los bordes, creciendo hasta unos 80 m en el centro de la Marisma. La alta concentración salina obedece a fenómenos de concentración superficial por ascensos capilares del acuífero principal, en carga y surgente. En superficie se superan los 100 g/l, pasando 0.6 g/l en profundidad (esquema de la Figura 25).



**Fig. 25. Esquema de la situación de la interfase entre el agua dulce y el agua salada en la zona de Marismas. [fichero 32CroquisInterfase.tif]**

Aparecen además en este Informe dos mapas (planos 31 y 32, reproducidos en las Figuras 26 y 27) de situación de la interfase en profundidad en parte de la zona regable, trazados a partir “de la salinidad del agua” y “de la superficie piezométrica, sin que hayamos encontrado ninguna explicación más de la forma en que fueron trazados.

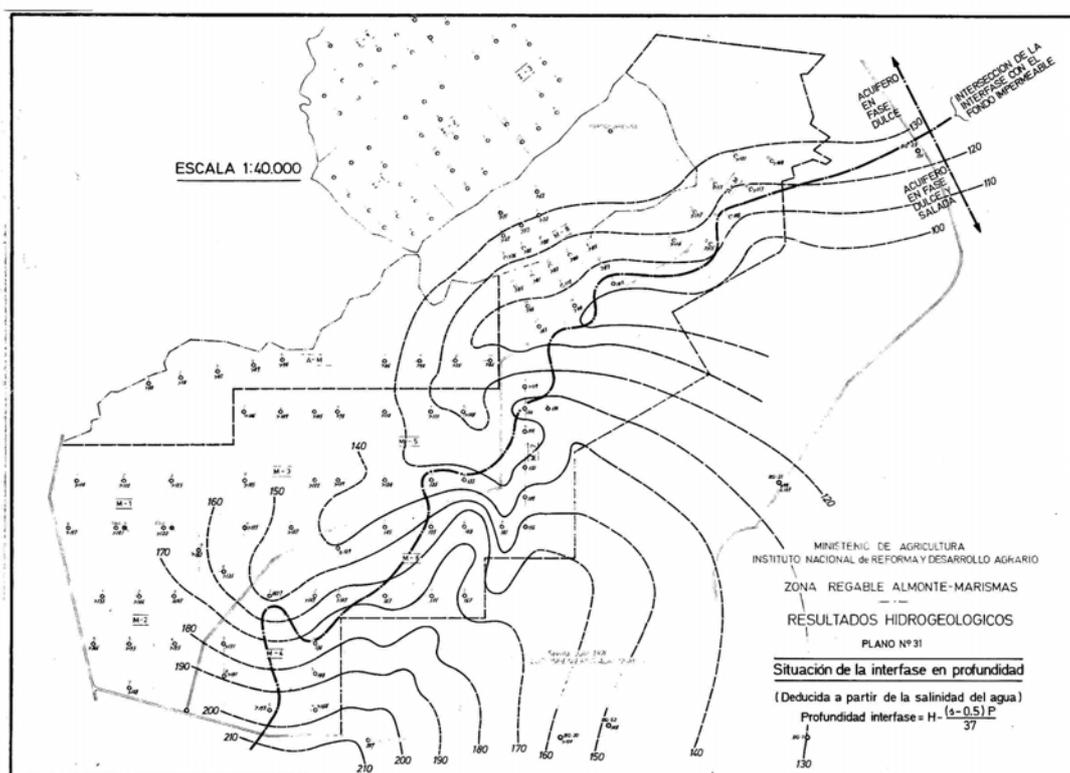


Fig. 26. Situación de la interfase en profundidad, deducida a partir de la salinidad del agua. [fichero 32PL-31.tif]

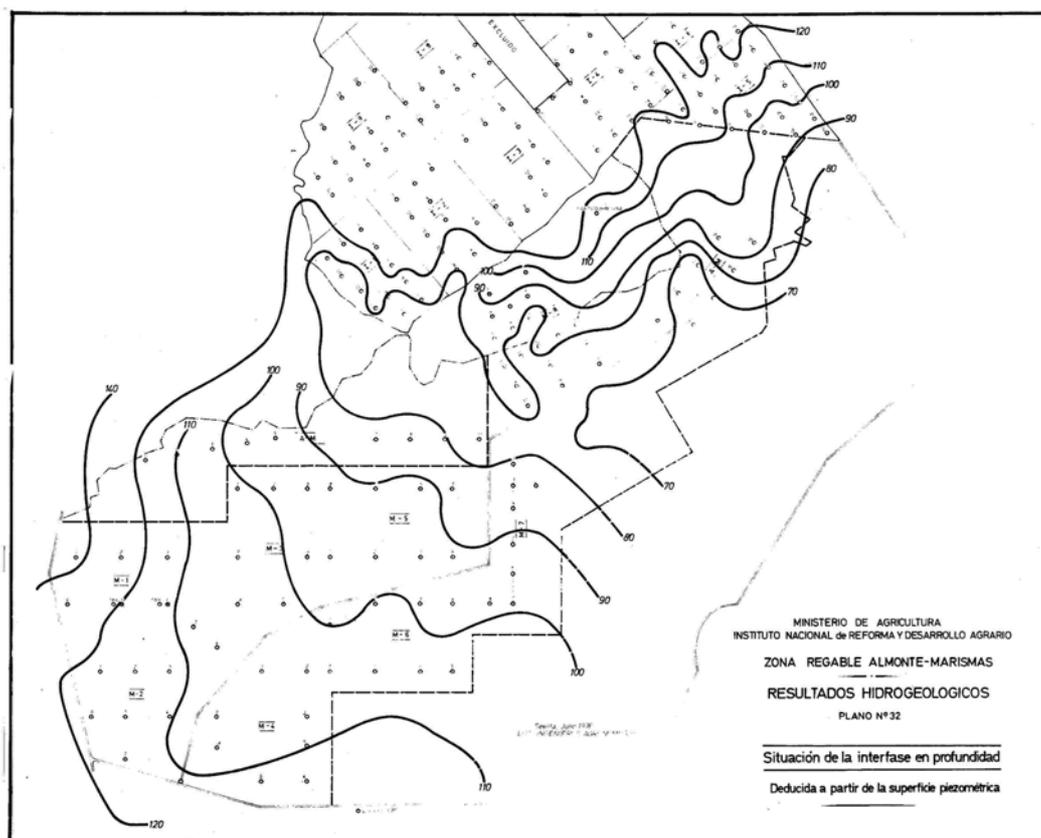


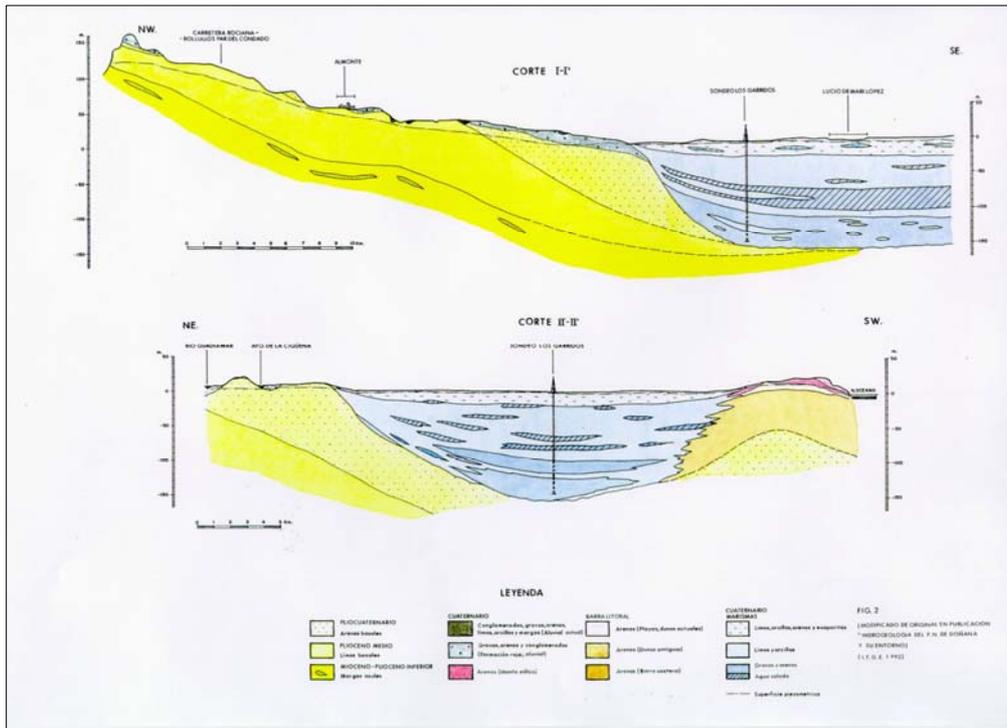
Fig. 27. Situación de la interfase en profundidad, deducida a partir de la superficie piezométrica. [fichero 32PL-32.tif]

### I.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649

Es un trabajo de síntesis, donde se recogen los estudios realizados en el acuífero Almonte-Marismas, fundamentalmente por el IGME y el IRYDA, desde 1965, además de efectuar nuevos trabajos en áreas donde era necesario actualizar el conocimiento.

La cartografía geológica adoptada es la del MAGNA 1:50.000, representándose los datos a escalas 1:100.000 y 1:200.000. La Memoria describe la hidrogeología del sistema, funcionamiento, constantes hidrodinámicas, calidad del agua, hidrología y balances hídricos.

Se recoge la descripción de la geología, según los criterios hasta entonces mantenidos: depósitos marinos de Neógeno, erosionados y fosilizados por materiales fluvio-marinos del cuaternario, con distinción de tres unidades geomorfológicas: dunas costeras al sur, Marismas y zonas de arenas. La serie simplificada es la recogida en los cortes geológicos de la Figura 28:



**Fig. 28. Cortes geológicos del informe 35649 de 1982 (reproducido también en la Fig. 2). [ficheros 33Plano-4.tif y 33Plano-5.tif]**

- Margas azules: Mioceno superior-pleioceno inferior. No afloran en las marismas. Su techo bajo las marismas se sitúa entre los 160 m y 250 m bajo el nivel del mar. Su potencia según el sondeo de Hidrocarburos de Valdebro ronda los 1200 m.
- Limos basales.- Plioceno medio. Esta formación no aflora. Son alternancias de arenas bioclásticas y lumaquelas de fósiles (ostreas). El medio de depósito varía de marino más o menos profundo a somero y su potencia es variable.

- Arenas basales.- Pliocuaternario. Discordantes sobre los limos basales aparecen arenas de origen deltáico. También intercalaciones de areniscas calcáreas, gravas, gravillas y niveles ocasionales de margas limo-arenosas.
- Margas verdes.- Esporádicamente entre la formación roja y las arenas basales pueden aparecer margas verdosas que localmente pueden alcanzar hasta 3 m de potencia.
- Formación roja.- Constituida por gravas, arenas y conglomerados. La potencia es muy variable, oscilando entre pocos decímetros y 15 a 20 m. Son de origen fluvial.
- Turberas.
- Dunas antiguas.
- Dunas actuales.
- Marismas y depósitos cuaternarios infrayacentes: se encuentran sobre los depósitos del Pliocuaternario. Aunque son frecuentes los cambios de facies, aparecen dos capas de cantos rodados, una entre 90 y 150 m de profundidad con una potencia de entre 10 m y 30 m, y otra situada entre 50 m y 10 m de profundidad con potencia entre 5 y 30 m. Entre las capas, aparecen materiales arcillosos y arenoso-arcillosos.

Las formaciones acuíferas son:

- Arenas basales, con potencia de 15 a 20 m en la parte Norte, de 80 a 100 m en el tránsito de Almonte-Marismas y de 200 m en el extremo más meridional. Hacia el techo aparecen intrusiones arcillosas.
- Formación roja: Cuaternario antiguo y Plioceno superior. Cambios de facies con predominancia de arenas y conglomerados con un espesor variable de hasta 15-20 m.
- Manto eólico y dunas antiguas con 7 a 8 m como máximo.

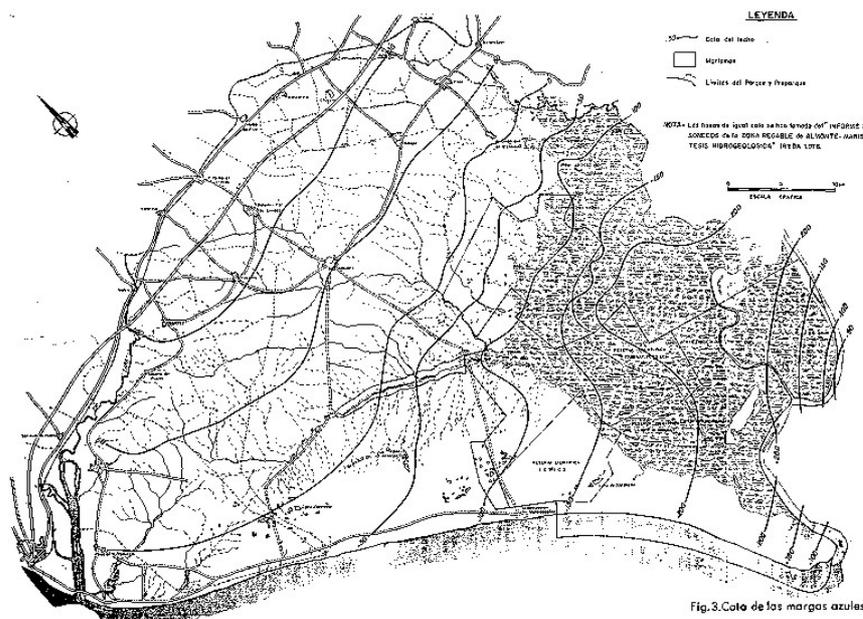
Es espesor del acuífero libre aumenta desde el N con 15 a 20 m hasta 10-100 m en la franja N que bordea las marismas y 200 m en el extremo sur del cordón de dunas. Bajo las marismas el espesor aumenta de N a S pasando de 40 a 130 m que corresponden a la mayor parte del acuífero situado al N.O. de la interfase agua dulce - agua salada.

Toda la información contenida en este Informe se encuentra publicada en los fascículos: **Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1982 (basado fundamentalmente en el informe 35.649), y Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1992 (reedición revisada del publicado con el mismo nombre en 1982)**, y que ha sido la fundamentalmente utilizada como base para la preparación del presente estudio.

Desde el punto de vista geofísico, no existe en este trabajo ninguna nueva aportación, haciéndose tan solo referencia a que “por correlación entre los sondeos mecánicos y los SEV se ha podido establecer como límite entre las formaciones permeables e impermeables el valor de 30 ohm.m de resistividad

eléctrica, de tal forma que valores inferiores corresponderían a los materiales de la base impermeable". Por otra parte, "la zona Marismas es la que entraña mayor dificultad para detectar el techo de la formación impermeable mediante métodos geofísicos de resistividades eléctricas. Esto se debe en algunas ocasiones al alto contenido salino de las arcillas que se superponen a los niveles acuíferos, y en otras a la presencia de lentejones permeables más superficiales con aguas subterráneas muy cargadas en sales."

El aspecto más relevante de este documento para el presente proyecto es el plano nº 6 COTA DE LAS MARGAS AZULES, reproducido en la Figura 29, en el que consta que fue extraído del "Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica" IRYDA. 1976 [comentado en el apartado precedente I-3.2], y que es precisamente uno de los objetivos de nuestra revisión, por lo que será estudiado con detenimiento en el análisis de toda esta información presentado en el capítulo III.



**Fig. 29. Mapa de cotas de las margas azules según el informe 35649 de 1982, extraído del "Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica" IRYDA. 1976, (reproducido también en la Figura 3). [imagen 33Plano-6]**

## **I.4 Descripción del contenido de los informes recopilados posteriores al Proyecto Guadalquivir**

### **I.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939**

Trabajo de 10 SEV de AB/2=300 m realizados sobre las margas azules próximas a Niebla para detectar el acuífero formado por el Mioceno de base (conglomerados, arenas y areniscas calcáreas del Tortonense) que se localiza entre las margas y las pizarras del Paleozoico. El corte geoeléctrico está apoyado en un sondeo mecánico. El único interés de este trabajo para nuestro estudio actual es el disponer de unos SEV realizados directamente sobre las margas azules, por lo que los valores obtenidos para su resistividad aparente deben estar menos influenciados por los de capas más superficiales. Estos SEV adjudican a las margas azules valores entre 4 y 15 ohm.m.

### **I.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655**

El objetivo de este trabajo es determinar la evolución temporal de la interfase agua dulce – agua salada en la zona de Marismas, a fin de verificar su variación desde los trabajos realizados en el Proyecto Guadalquivir en 1969.

Para ello se midieron 25 SEV de AB/2 del orden de 1000 m, aunque en bastantes casos se superan los 1500 m, decidiéndose el fin de la medición cuando la curva de campo (resistividad-AB/2) presentaba una bajada a valores de menor resistividad. Están distribuidos en 4 perfiles (1,3,4 y 5) perpendiculares a la traza conocida de la interfase, intercalados entre los SEV denominados CD-xx de 1969 (**Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.**, apartado I-2.5 del presente Informe), cuya posición puede verse en la Figura 30 (ver también Figura 14). No existen los estadillos con los valores medidos en campo que permitan su incorporación a una base de datos digital, aunque el informe incluye las curvas de campo AB/2-resistividad aparente. La interpretación se realizó mediante ábacos, asignando los tramos finales con un fuerte descenso de resistividad a una mayor salinidad. Los resultados se presentan en forma de cortes geoeléctricos (Figura 31), con la siguiente interpretación:

- Bajo un nivel superficial de pequeña potencia, con resistividad variable, se sitúa un nivel de 10 m de profundidad máxima, muy conductor con resistividad inferior a 0.4 ohm.m (limos, arcillas, arenas y evaporitas de Marismas).
- Nivel de limos y arcillas con resistividad entre 1 y 4 ohm.m que llega a 30 o 40 m. No se detecta en algunos puntos y localmente llega a 70 m.
- El acuífero, constituido por gravas, arenas y conglomerados en matriz arcillosa, alcanza hasta 200 m y presenta resistividad muy variable, con valores entre 30 ohm.m y 5 ohm.m. Las variaciones se atribuyen a la heterogeneidad en el contenido arcilloso.

- Nivel conductor basal con dos posibles interpretaciones: debido a un cambio litológico por la presencia de los limos basales o de las margas azules; o debido a un cambio de resistividad por la presencia de agua salada, en cuyo caso este horizonte se atribuye a la zona de transición agua dulce-salada. En consecuencia, el contacto inferior del acuífero (margas azules) no puede precisarse, optándose por interpretarlo como que el techo de los limos basales o margas azules si la profundidad es superior a 200 m ó 300 m.

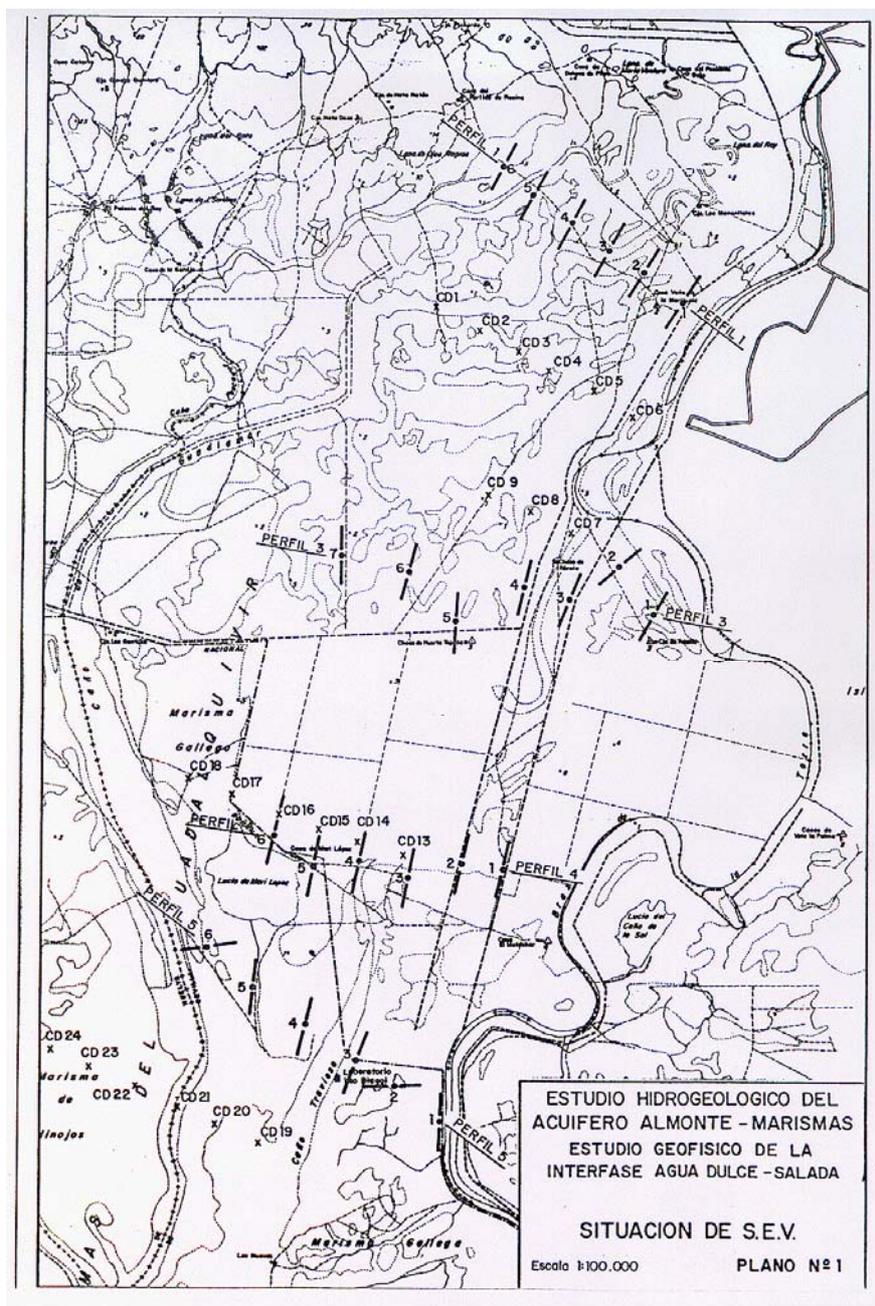
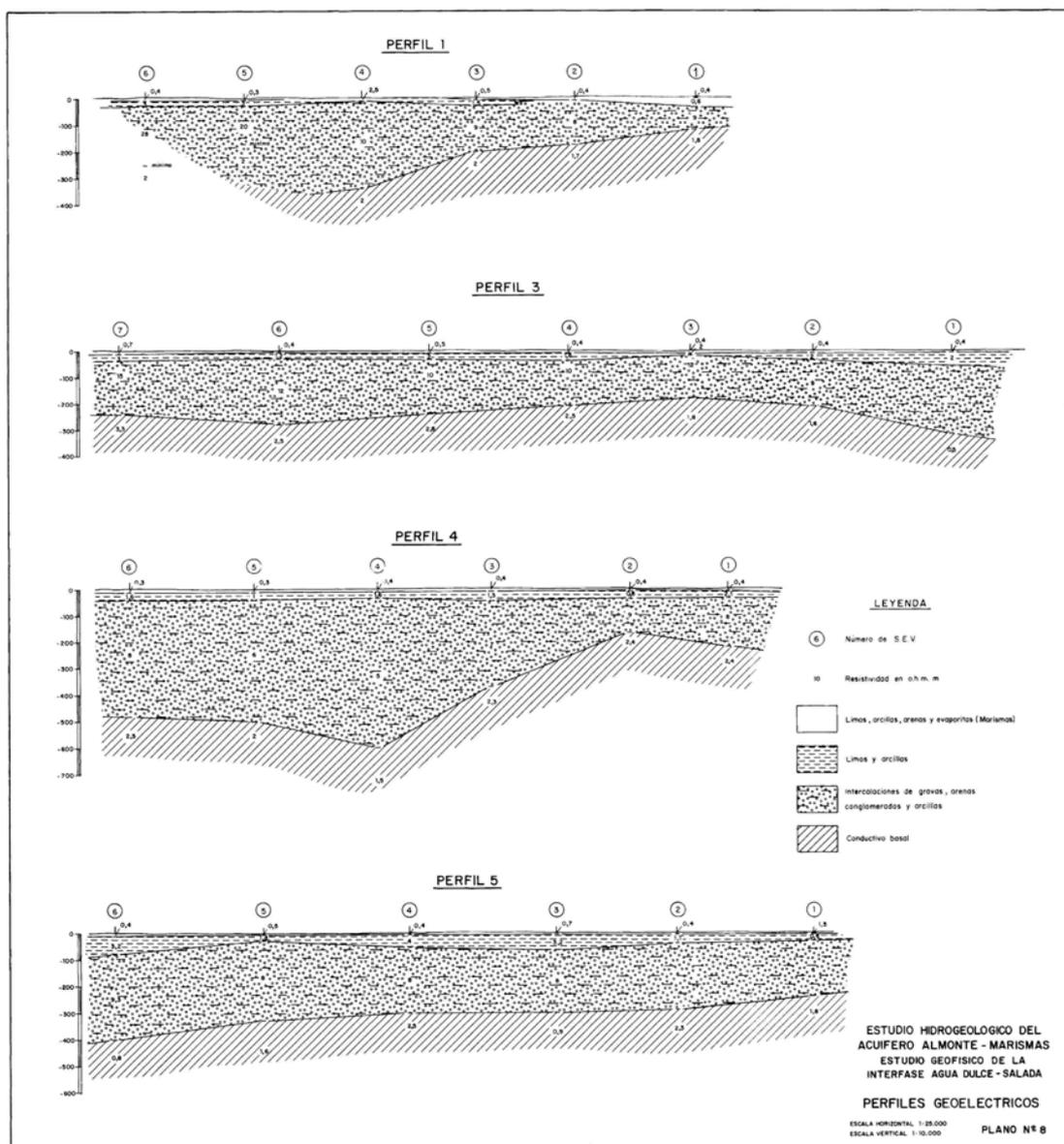


Fig. 30. Plano de situación de los SEV efectuados en las campañas del informe 35655, junto con los denominados CD de la campaña de 1969 (ver Fig. 14). [archivo 42Plano-1.tif]



**Fig. 31. Cortes geoelectrónicos de la campaña de 1982, informe 35655.[fichero 42Plano-8.tif]**

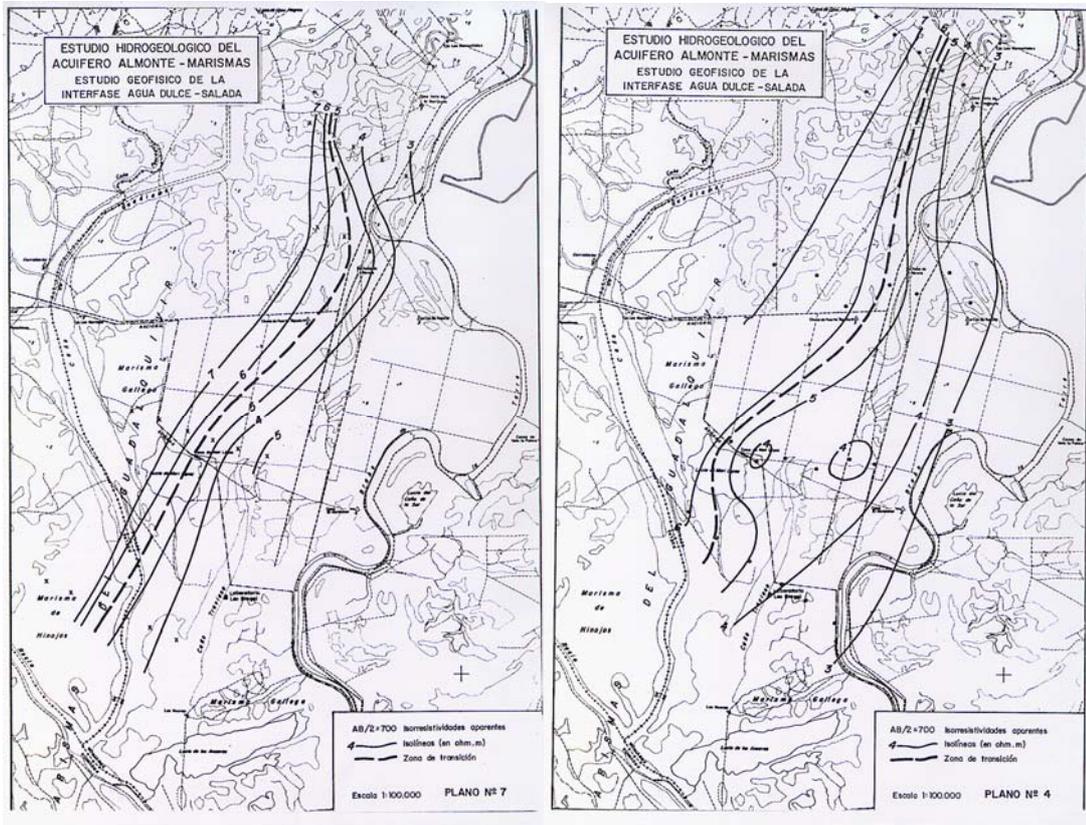
En nuestra opinión, y adelantando resultados del análisis que presentaremos en el capítulo III del presente estudio, esta interpretación y asignación de litologías en la zona de Marismas parece poco conforme a la realidad, ya que se está asumiendo la inmediata presencia de las margas azules (que efectivamente era la hipótesis del momento (1982) en que se hizo la campaña) y se obvia el conocimiento de que la primera parte está más salinizada, y el resto constituido por una potencia de arcillas entre las que se intercalan capas de arenas. Este trabajo hay que mirarlo por lo tanto con precaución, porque la metodología utilizada es dudosa. Habría además que comparar la posición de la interfase con los documentos restantes.

Los resultados, en cuanto a la posición de la interfase entre agua dulce y agua salada, se presentan en forma de mapas de isoresistividad aparente para AB/2 300, 500 y 700 m, estimando que la

profundidad correspondiente es del orden de 1/3 a 1/4 de la distancia AB entre electrodos de emisión. La zona salinizada se atribuye a resistividades aparentes inferiores a 3-4 ohm.m, y el agua dulce 6-7 ohm.m como máximo, estableciendo una relación salinidad-resistividad:

Concentración g/l	Resistividad ohm.m en el SEV
2	3
1.5	4-5
1	6

Estos mismos mapas se dibujaron también con los valores medidos en 1969, no observándose diferencias en la posición de la interfase; un ejemplo de los mismos puede verse en la Figura 32 (ver también Figura 14).



**Fig. 32. Líneas isoresistivas para  $AB/2=700$  m, según las medidas de 1969 (izquierda) y de 1982 (derecha). Se consideran debidos al agua salada los valores de resistividad inferiores a 6 ohm.m. El inicio del tramo en bajada de las curvas se produce casi siempre para valores superiores de  $AB/2>700$  m, por lo que consideramos estas curvas como las que mejor representan la situación de la interfase, teniendo menos validez las trazadas por los autores del informe 35655 en 1982 para  $AB/2=$  a 300 y 500 m.[ficheros 42Plano-4.tif y 42Plano-7.tif]**

En este trabajo se proyectó efectuar una calicata eléctrica paralela a la costa, pero no pudo llevarse a cabo debido al alto valor del Potencial Espontáneo, que impedía las mediciones. Se realizó también un perfil GENIE (método electromagnético), coincidente con el perfil 1 de la Figura 30, con separación Tx-Rx de 50 m (para 100 m la intensidad de la señal no era mesurable), con una longitud total de 4

km, en tres frecuencias: 337.7, 1012.5 y 3037.5 Hz, consiguiendo tres niveles de penetración. En este perfil se observan dos zonas: desde el SE hasta la estación 24 aumenta la respuesta para luego estabilizarse, situándose la zona de transición agua dulce-salada en la primera parte, que por corresponder con una variación suave de la resistividad no se manifiesta como un cambio brusco. Los picos detectados se interpretan correspondientes a la presencia de lentejones salinizados locales (Figura 33).

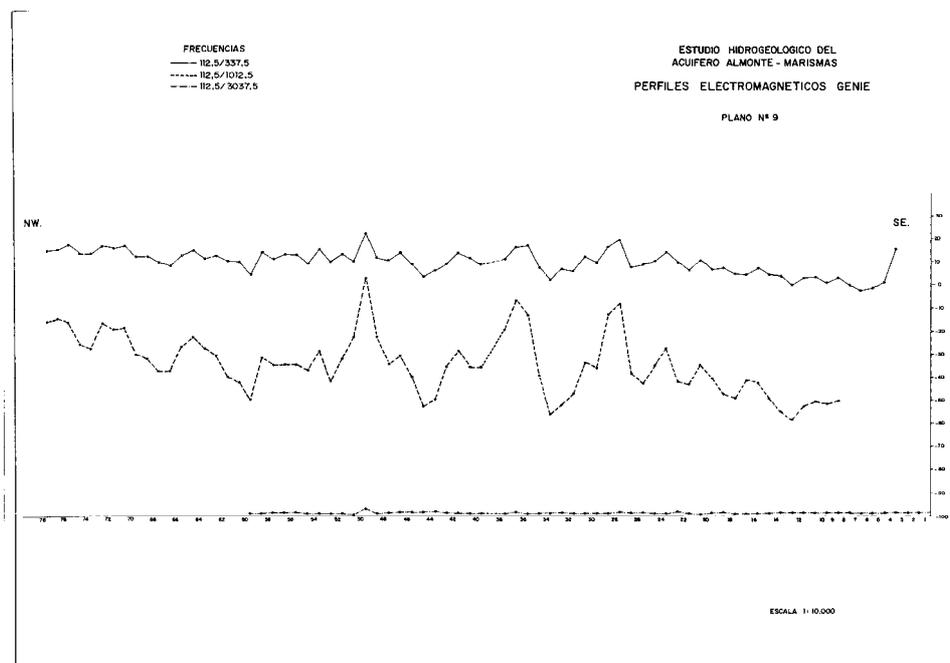


Fig. 33. Perfil electromagnético Genie realizado sobre el perfil 1 de SEV.[fichero 42Plano-9.tif]

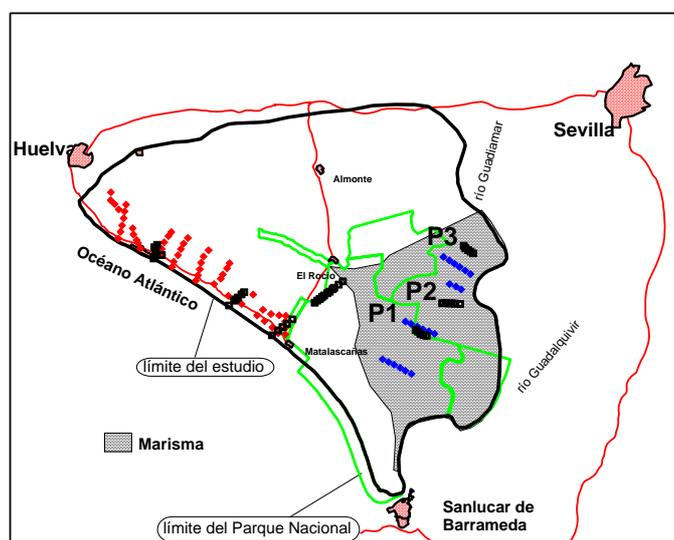
### I.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213

Trabajo de 12 SEV de AB/2=500 m, realizados sobre las margas azules entre La Palma del Condado y Villalba de Alcor, para detectar el acuífero formado por el Mioceno base (Tortonense de conglomerados, arenas y areniscas calcáreas) que se localiza entre las margas azules del Mioceno y las pizarras del Paleozoico (trabajo análogo al anterior **Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939**, comentado en el apartado I-4.1). En el informe se presenta el mapa de posición y las curvas de campo, interpretadas con ábacos. En algunas partes del perfil formado, existe una cobertera de "arenas y limos Sahelienses" de unos 8 m de potencia y 3-12 ohm m de resistividad, tras las que se sitúan las margas con potencia de 120 a 140 m y resistividades en el rango de 2 a 7 ohm.m, finalizando en el paleozoico con resistividades de 20-60 ohm.m. El mioceno de base no se manifiesta como capa geoelectrica.

Para nuestro estudio actual, de este trabajo es interesante la información sobre los limos del Saheliense situados a techo de las margas azules, apreciándose que su resistividad no puede siempre diferenciarse de la de las margas, y por lo tanto es de esperar que lo será aún menos cuando estos pocos metros de potencia se sitúan a mayores profundidades.

#### I.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347

Es un trabajo de cobertura nacional, realizado a instancias del IGME, para estudiar la respuesta de diferentes métodos geofísicos en la determinación de la geometría de la interfase agua dulce- agua salada en acuíferos costeros. Los métodos empleados fueron mediciones en perfiles de resistividad (calicatas eléctricas en la denominación del momento), electromagnéticas LIN (Low Induction Number), electromagnéticas VLF, Polarización Inducida en el dominio de tiempos, SEV y SEDT (Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo), utilizando en cada emplazamiento los más adecuados de acuerdo con la logística del lugar. Se seleccionaron diez emplazamientos en toda la costa, entre los que se encuentra el de Almonte-Marismas, donde se efectuaron 26 SEV repartidos en 4 perfiles a lo largo de la costa, entre Mazagón y Matalascañas, y 16 SEDT en 3 perfiles en el interior de la marisma, en la misma alineación utilizada en los perfiles de SEV efectuada en 1970 (SEV CD-xx) y 1982 (Informe Ref. 35655) (Figura 34).

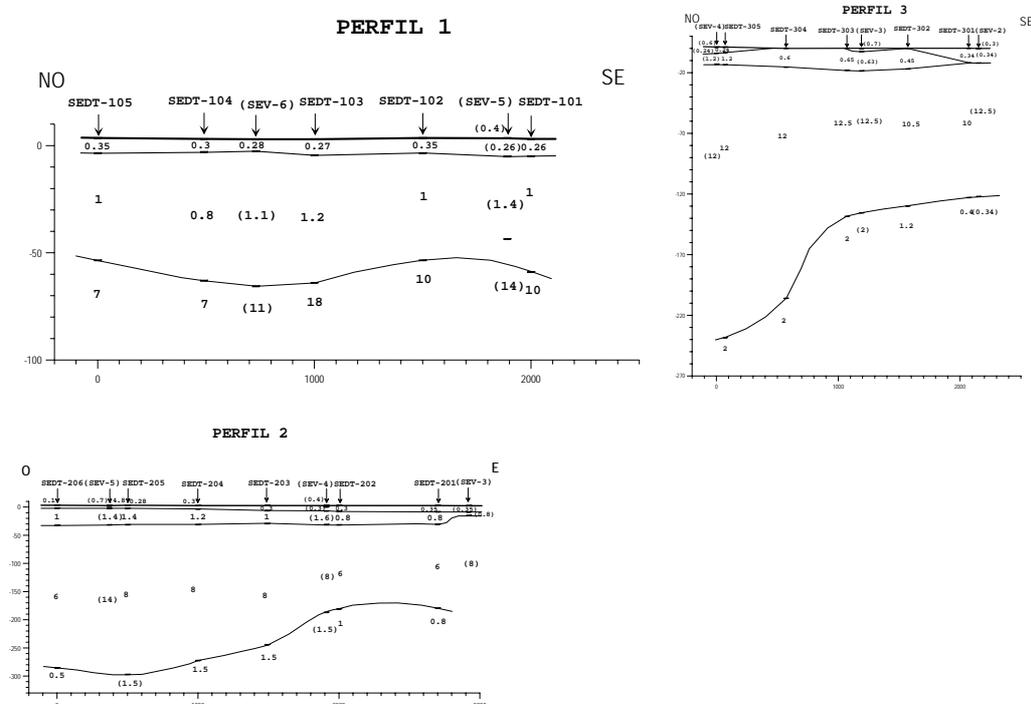


**Fig. 34. En negro: situación de los SEV (en la costa y Rocio) y SEDT (dentro de la Marisma) medidos en el informe 40347 de 1988. En rojo: SEV del trabajo 40.063 de 1967. En azul, SEV denominados CD de 1970.[ficheros 44Perfiles.xls, SEV40063.xls y SEVCD-Marismas.xls]**

Los datos de campo originales no han sido encontrados, disponiéndose tan solo de los resultados reflejados en cortes geoelectrónicos, de gran interés, sobre todo los realizados en el interior de Parque Nacional en la zona de marisma. Tampoco se conocen los parámetros de registro (longitud de alas de SEV); de los SEDT se dice que fueron efectuados con un equipo Geonics EM-37, con bucles de 40x40 m o 70x70 m, en frecuencias de 25 Hz, 6.25 Hz y 2.5 Hz.

En cuanto a los SEV, en el perfil situado más al sur (comienza en la Playa de Castilla y llega hasta las Casas del Hato Villa), los niveles más superficiales tienen resistividades altas y se atribuyen a arenas, pasando en profundidad a formaciones arcillosas y margosas. Se dice que las altas resistividades del último tramo podrían corresponder al muro del acuífero, con 90 ohm.m. El corto perfil central (empieza en la playa del Asperillo y termina en el cortafuegos a la altura de Porquera Cayo) tiene las

mismas características del anterior, con los niveles resistivos a mayor profundidad (más de 200 m). El perfil más al norte se inicia en el Camping de Mazagón, en la playa, y llega hasta el Vivero los Aguallules; para su interpretación se ha utilizado apoyo de sondeos mecánicos preexistentes. El corte es análogo a los anteriores, con niveles arenosos menos potentes y la formación profunda más conductora, atribuida a margas o arcillas con algún contenido salino intraformacional. En ninguno se aprecia indicios de contaminación por intrusión, que era el objetivo de este trabajo.



**Fig. 35. Secciones geoelectricas de los perfiles de SEDT realizados en las Marismas. Informe 40347 de 1985. [fichero 44PERFILES.xls]**

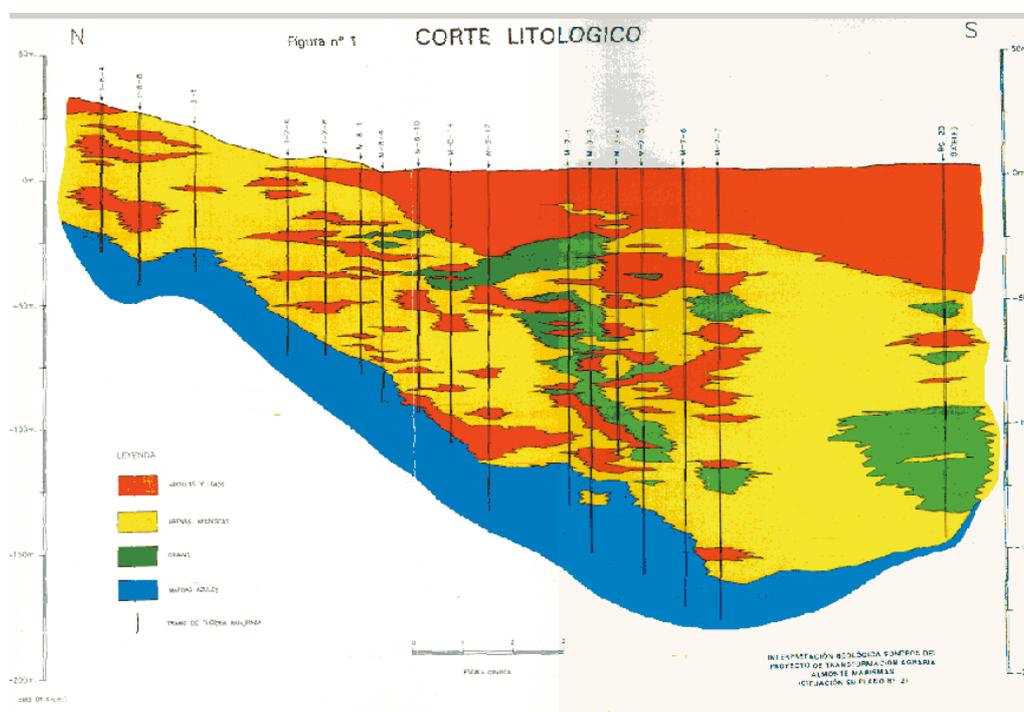
Respecto a los SEDT (perfiles P1, P2 y P3 de Figura 34), están situados a la altura de Casa Mari López (perfil P1), límite del Parque Nacional Tejada a la altura de la Choza de la Huerta Tejada (perfil P2), y NO de Marijuela (perfil P3). Sus cortes geoelectricos se representan en la Figura 35. Los tres tienen las mismas características, con nivel piezométrico prácticamente en superficie y muy bajas resistividades. Se diferencian tres tramos geoelectricos: conductor A (menos de 5 ohm.m) de arenas cuaternarias; tramo medio B menos conductor (6-18 ohm.m), formación acuifera de arenas pliocuaternarias, y tramo C conductor inferior (menos de 2 ohm.m), de limos margosos pliocenos. En el perfil 1 aparece un primer tramo salino de 5-8 m de espesor, que se apoya en el A, con 50-60 m de potencia, estando el sustrato formado por el tramo B. En el perfil P2 se detecta el tramo C, dando al intermedio una potencia de 110 a 230 m. En el P3, el tramo A tiene 20-35 m y el B 140-270 m. Estos resultados se afirma que coinciden muy bien con los SEV realizados en campañas anteriores, aunque se dice que no se puede saber si la salinidad reflejada por las bajas resistividades se debe a salinización sedimentaria o intrusión marina. De esta interpretación ciertamente que llama la atención tanto la gran profundidad alcanzada por los SEDT en un ambiente tan conductor, como la asimilación al final del acuífero de valores de alta resistividad en los SEV (90 ohm.m).

#### **I.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408**

Es un trabajo que consta de 11 SEV de AB=100 m y un bloque de perfiles de resistividad de 400x135 m, para caracterizar una zona donde se llevaron a cabo estudios de balsas de depuración. Tienen interés los datos aportados por los SEV efectuados junto a los sondeos mecánicos, en especial el SEV S2 y sondeo S-2, de 54 m y que llega a las margas azules a los 51 m, ya que el resto es una batería de piezómetros de menos de 14 m de profundidad. Para el AB empleado, los SEV finalizan todos en una capa conductora de 1-12 ohm.m a unos 30 m de profundidad, que habría que adjudicar a las arenas limosas junto con arcillas y gravas del final del Plioceno (similar a los valores encontrados para las arenas-limos sahelenses en el Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213, comentado en el apartado I-4.3), sin que se sepa si la diferenciación con las margas azules no es posible por ausencia de contraste geoelectrico y por falta de penetración del dispositivo. Se dispone además una testificación gamma natural, neutrones, gamma-gamma y diámetro del sondeo S2. Este sondeo podría compararse con el realizado en el Informe técnico del sondeo 1042-1-0065 para abastecimiento a Mazagón (Huelva). IGME. 1995. Ref. 37.575.

### I.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963

Es un trabajo realizado en la zona nororiental del Parque Nacional de Doñana, sectores I y Marismas del Plan de Transformación Agraria, como consecuencia de la modificación de las condiciones hidrodinámicas naturales provocadas por las extracciones. En esta área existen dos zonas de calidad de agua diferenciadas: en el acuífero libre y en la porción del mismo bajo los sedimentos impermeables de las marismas, donde pasa a ser semiconfinado, las aguas son de buena calidad y facies bicarbonatada cálcica (conductividad inferior a 1000 uS/cm); hacia el Sur y Sureste, a medida que aumenta el espesor de sedimentos confinantes de marismas, las aguas evolucionan bruscamente hacia facies cloruradas sódicas (más de 20.000 uS/cm), evidenciando la existencia de una zona de tránsito de agua dulce-agua salada, cuya situación está siendo desplazada hacia las zonas de explotación. Esta agua salada tiene su origen en el proceso de colmatación del estuario del Guadalquivir, durante el cual la zona estaba ocupada por aguas marinas que durante el relleno quedaron ocluidas en las formaciones geológicas. Posteriormente, por el empuje de las aguas de recarga procedentes de la zona libre del acuífero, el agua salada fue desplazada hacia el Sur. Este trabajo es por tanto, en cierta medida, continuación del **Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655**, descrito en el apartado I-4.2, aunque su localización geográfica es muy diferente. La situación geológica esta representada en el corte de la Figura 36, apreciándose que, englobados en los sedimentos limoarcillosos de marismas, existen lentejones de formaciones permeables que constituyen acuíferos, aunque de poca continuidad lateral.



**Fig. 36. Corte geológico efectuado con los sondeos mecánicos de esta zona. Rojo: arcillas y limos; amarillo: arenas; verde: gravas; azul: margas azules. Su situación se indica en la Figura 37, de Villamanrique al Lucio del Lobo.[fichero 46Fig-1]**

Este trabajo de 1995 tiene por objeto establecer un diagnóstico de la calidad de las aguas y la definición de la posición de la interfase, para lo que se llevó a cabo una campaña de testificación geofísica de 31 sondeos, con registros de conductividad y temperatura de la columna de agua, y una campaña de muestreo de aguas subterráneas en un total de 34 puntos de agua, para su posterior análisis físico-químico. La testificación se llevó a cabo con dos equipos: 16 sondeos se efectuaron con un Century CompuLog III con medición continua de gamma natural, temperatura, incremento de temperatura y conductividad del fluido, y en los restantes las mediciones fueron efectuadas a intervalos discretos con un aparato Instran 30, con medición de conductividad y temperatura. Los sondeos testificados son:

Nº registro	nombre	id	profundidad test	Aparato	Nº registro	nombre	id	profundidad test	Aparato
114170034	I-2-5	35	65	CC	114170034	I-2-5	35	60	INS
114180079	I-6-2	36	65	CC	114180079	I-6-2	36	60	INS
114220018	AM-1	12	120	CC	114170110	I-4-19	37	60	INS
114220045	AM-5	51	87	CC	114170120	I-8-8	38	60	INS
114230035	AM-10	52	98	CC	114220017	AM-3	39	80	INS
114220013	M-1-1	53	135	CC	114170138	AM-12	40	80	INS
114220025	M-2-6	54	102	CC	114220039	M-1-5	41	65	INS
114220037	M-4-3	55	105	CC	114220023	M-2-3	42	65	INS
114230030	M-6-3	56	132	CC	114260002	M-2-7	24	65	INS
114170069	AM-13	57	110	CC	114220022	M-3-4	43	55	INS
114230062	M-7-6	58	82	CC	114260006	M-4-5	44	80	INS
114210156	Pichiricha-4	59	105	CC	114220014	M-4-7	45	95	INS
114160018	L.Anguila-1	60	65	CC	114230060	M-5-5	46	60	INS
114220047	Juncos-1	61	65	CC	114230061	M-6-8	47	140	INS
114240021	C. Bombas	62	175	CC	114170073	M-8-4	48	65	INS
114180096	Pescante	63	145	CC	114270023	Casa Lobo	49	48	INS
					114280006	Lucio Cangrejo	50	105	INS

El identificador id es el que permite la localización del sondeo en el plano de posición de la Figura 37.

Los valores de conductividad, reducidos a 25 °C, se convirtieron a concentración en g/l de ClNa equivalente mediante la ecuación:

$$CINa = 3.3 C_{25}^{1.14} / (1 + 0.04 C_{25}^{-2.36})$$

que se dice que fue deducida en el **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.** (descrito en el apartado I-3.2), cuestión que no hemos podido verificar (La relación de conversión dada por los manuales de testificación de Schlumberger es  $CINa = (5.19 C_{25})^{-1.05}$ ). En la figura 37 se reproduce el mapa de posición de sondeos y de las líneas de igual valor de conductividad general (no referidas a ninguna profundidad), comentándose en el informe las dificultades encontradas para rendir todos los valores comparables, por las diferentes características de los sondeos (posición de filtros, tramos cementados, etc.). Se

concluye que la posición de la interfase, cuyo avance sería debido a las extracciones, no se ha modificado desde los trabajos de 1983 del IGME-IRYDA. Los registros y columnas litológicas están recogidos en el Anexo del informe, mencionándose que las testificaciones se entregaron también en soporte digital ASCII (no localizados en la búsqueda efectuada para el presente Proyecto de 2002). En Anexo se proporcionan asimismo las curvas de igual conductividad y concentración a las cotas -25, -50, -75 y -100 m utilizando solamente los valores testificados con el equipo Century.

FIGURA Nº 5 DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD EN 1994  
(VALORES EN mS/cm)

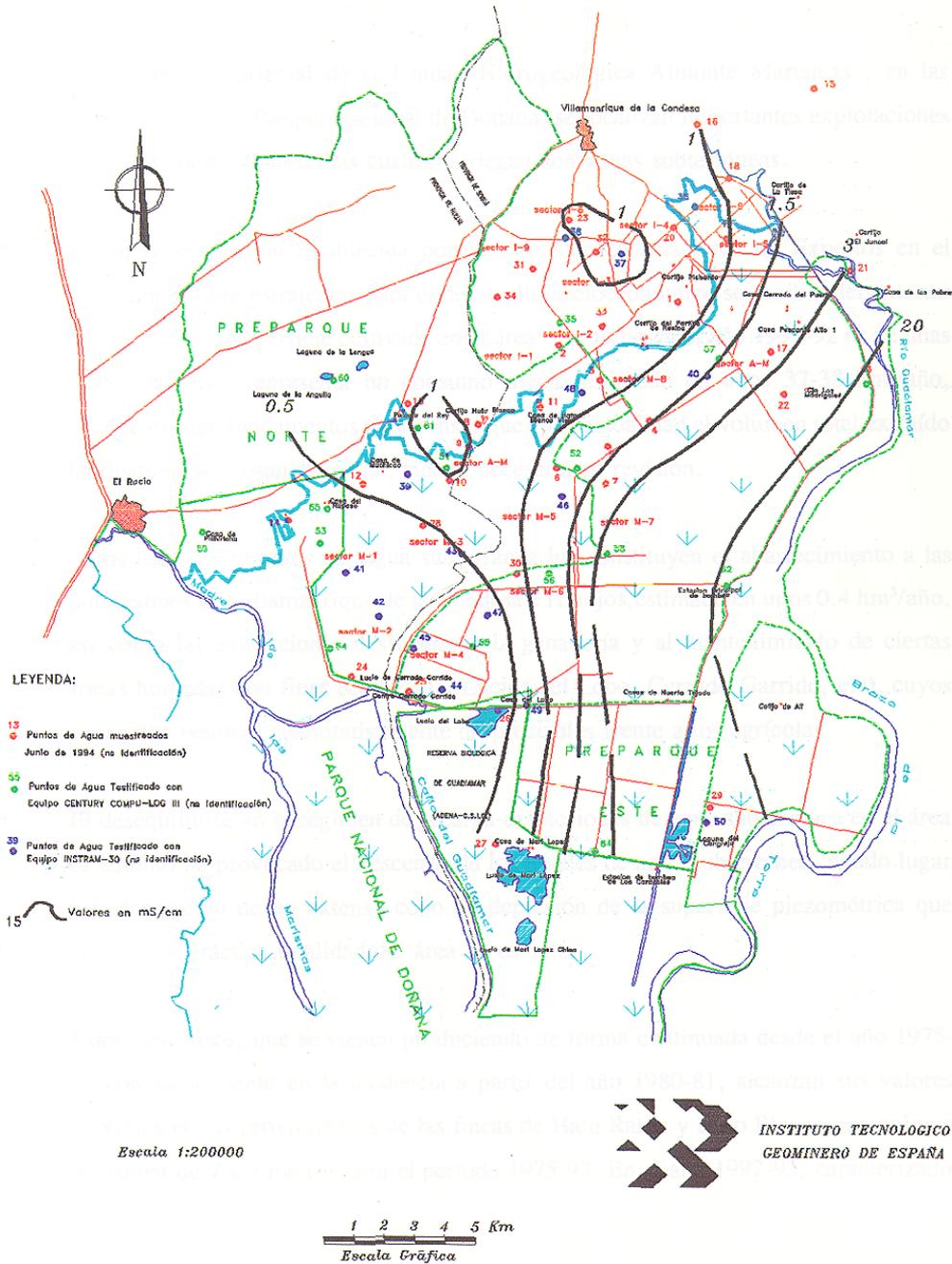
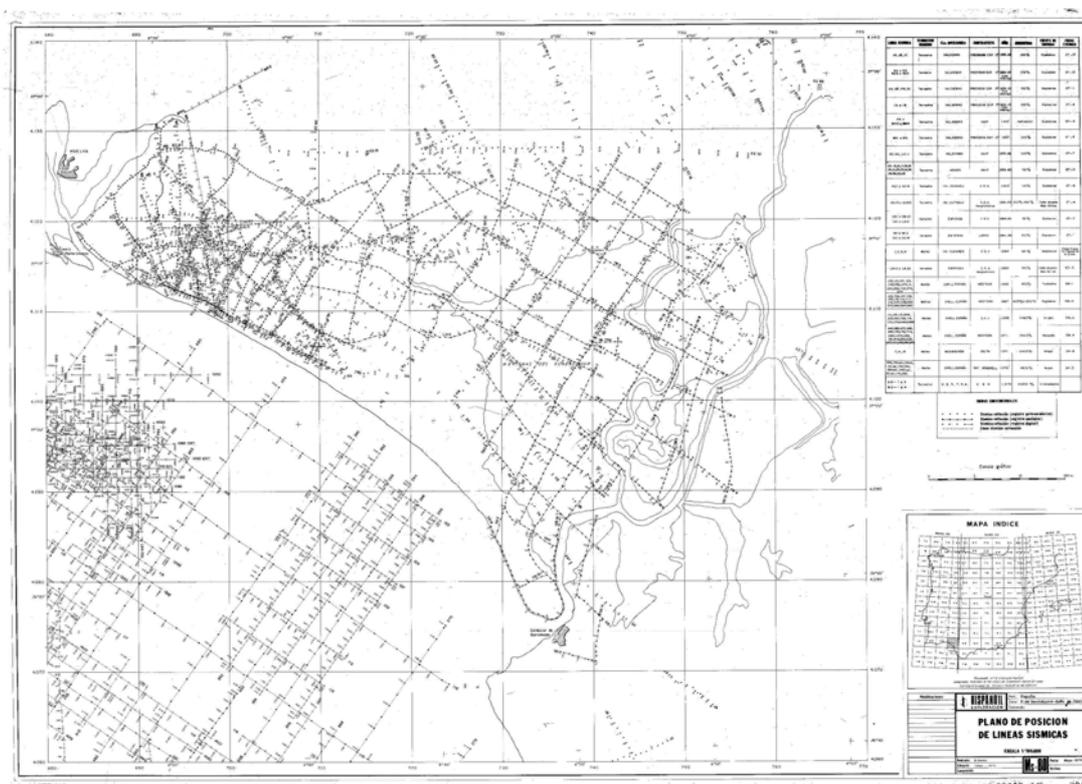


Fig. 37. Posición de los sondeos testificados, perfil de la Fig. 36 y líneas de isoconductividad en 1994.[fichero 46Fig-5.tif]

## I.5 Datos de campañas de sísmica de reflexión.

El valle del Guadalquivir ha sido objeto desde 1955 de numerosas campañas sísmicas efectuadas para prospección de hidrocarburos, cuya información se encuentra oficialmente depositada en el "Archivo de Hidrocarburos" de la actual (2003) D.G. de Política Energética y Minas del Ministerio de Hacienda. Los mapas de posición de dichas líneas, así como los valores de las coordenadas de sus puntos de tiro están siendo objeto de incorporación a la base de datos geofísicos del IGME (SIGEOF), a partir de la información facilitada por el Archivo de Hidrocarburos y de Repsol.

Los planos de posición de algunas líneas y parte de los resultados de alguno de estos trabajos se encuentran recogidos en el Informe "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España. Tomo I. Guadalquivir-Golfo de Cádiz", 1990, Ref. 29036, de donde se han obtenido las Figuras 38 y 39, en las que se puede apreciar la cantidad de líneas sísmicas existentes.

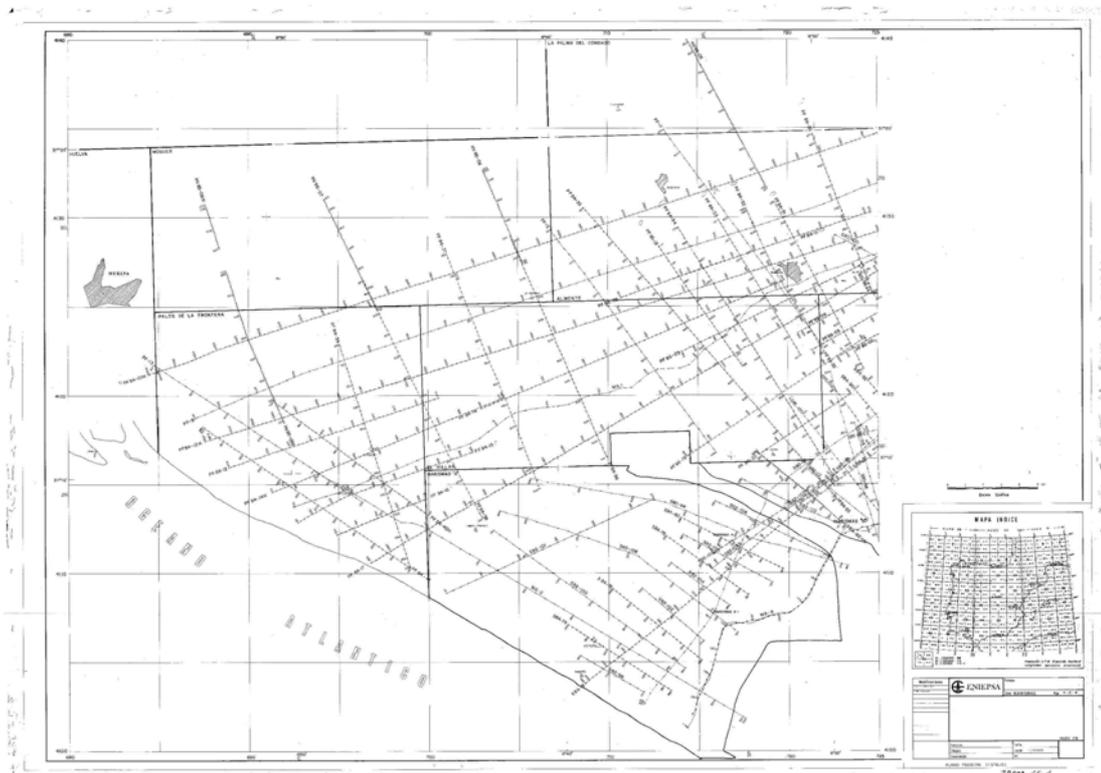


**Fig. 38. Posición de líneas sísmicas efectuadas sobre el acuífero Almonte-Marismas, desde 1955 a 1972.[fichero Sis4k]**

Las líneas efectuadas antes de 1968 fueron registradas en cobertura simple. Las campañas de interés para la zona contemplada en el presente Proyecto de revisión de la información geofísica son:

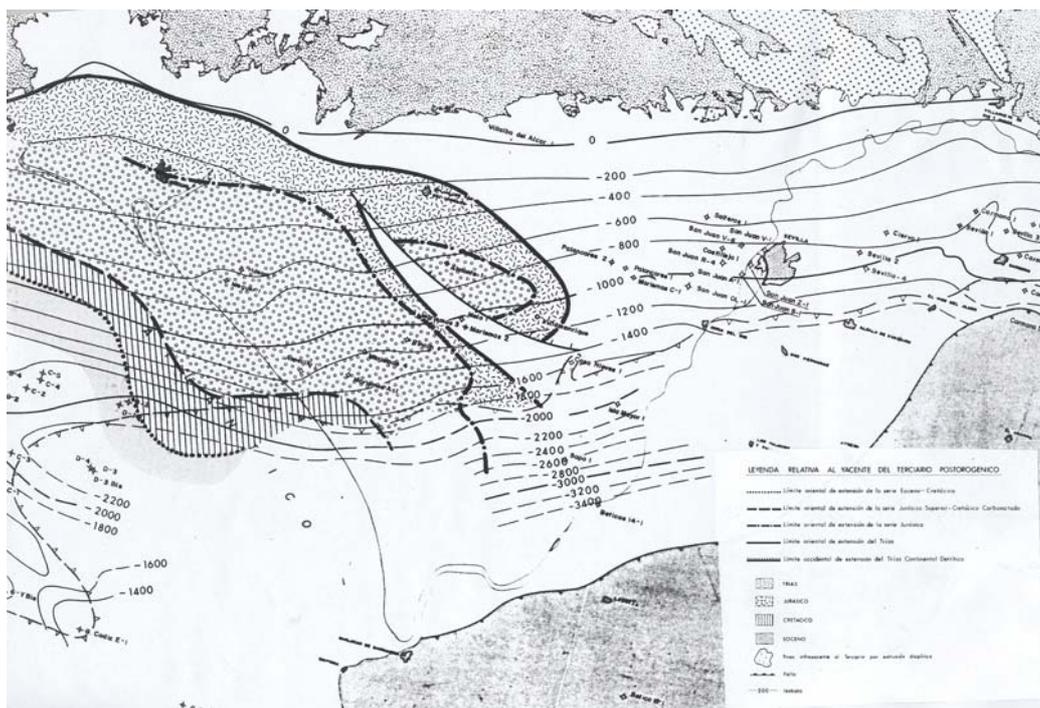
- SA, SB, RN, SE de VALDEBRO (Precisión Exp.C., 1955-57)
- IM 1 a 12 de ENPENSA (Lerici ,1964-65)
- MA de ENIEPSA (EDS, 1978)
- PF84 de ENIEPSA ( Horizon, 1984)

- PF86 de HISPANOIL (C.G.G., 1986)
- S80 de CHEVRON (E.D.S., 1980)
- S82 de CHEVRON (C.G.G., 1982)
- S83 de CHEVRON (C.G.G., 1983)
- S84 de CHEVRON (C.G.G., 1984)
- S85 de CHEVRON (C.G.G., 1985)



**Fig. 39. Posición de líneas sísmicas efectuadas sobre el acuífero Almonte-Marismas, a partir de 1972. [fichero Sis4k-4]**

De todos estos trabajos no suele estar disponible la interpretación de las líneas, ya que pertenece a la información confidencial de las operadoras originales. En el mencionado Informe 29036, en el tomo I “Guadalquivir-Golfo de Cádiz”, se encuentran varios mapas de isobatas e isopacas de diversos horizontes, de los que el único de posible interés sea el de isobatas de la base del terciario postorogénico y yacente del mismo, reproducido en la Figura 40, ya que el resto se refiere a terrenos más antiguos. La base del terciario aparece en este mapa como una superficie prácticamente plana, de rumbo este oeste y buzamiento sur, de tal forma que a la altura de Huelva existen unos 300 m de depósitos del Terciario, pasando a más de 3400 m en la parte nororiental de las Marismas y no disponiéndose de información aproximadamente desde Matalascañas hacia el Sur.



**Fig. 40. Isobatas de la base del terciario postorogénico deducidas de la interpretación de las secciones sísmicas hasta 1972. [fichero Sis-PL20]**

También puede ser de interés el mapa de isócronas de un horizonte próximo a la discordancia miocena, Figura 41, efectuado en 1986, que cubre igualmente sólo el norte del acuífero, pero en el que se dibujan la manifestación de accidentes tectónicos o estructurales que pueden estar afectando a los terrenos acuíferos.

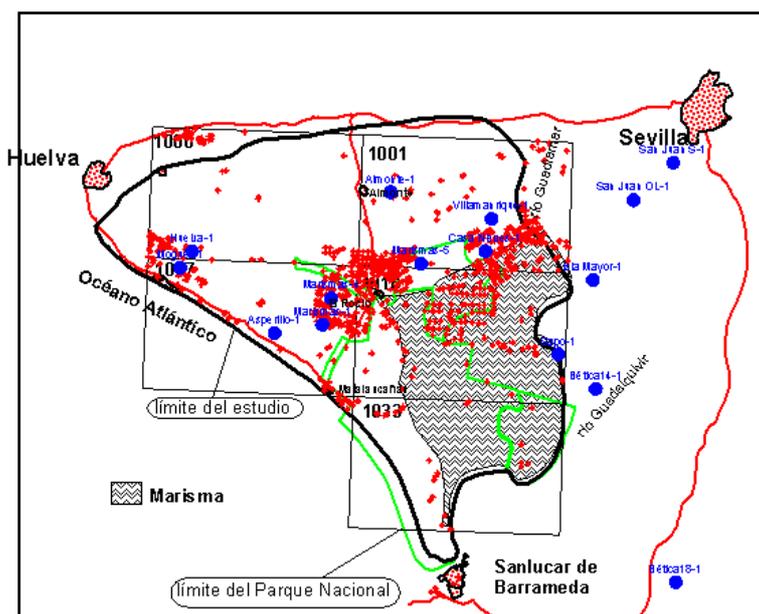


**Fig. 41. Isócronas de un horizonte próximo a la discordancia miocena. [fichero Sis-PL6]**

## I.6 Sondeos de prospección de hidrocarburos

Aunque, en principio, los objetivos del presente Proyecto se encuentran limitados a los primeros 300-400 m del subsuelo, se ha consultado la existencia de sondeos profundos en la base de datos de Hidrocarburos, encontrando 36 sondeos en esta área, si bien 21 de ellos son confidenciales. Puede ser asequible la información de los sondeos siguientes, cuya posición queda reflejada en la Figura 42:

sondeo	profundidad	Operadora	año
Asperillo-1	3307	VALDEBRO	1957
Isla Mayor-1	2375	VALDEBRO	1957
Moguer-1	2473	VALDEBRO	1957
Almonte-1	1344	VALDEBRO	1957
Casa Nieves-1	1630	ERAP	1967
Marismas-1	1379	CHEVRON	1981
Villamanrique-1	1341	ERAP	1967
Sapo-1	971	ERAP	1968
Bética14-1	3507	ESSO	1986
Huelva-1	1431	COPAREX	1965
Marismas-4	1351	CHEVRON	1985
San Juan OL-1	1525	REPSOL	1989
San Juan S-1	1365	REPSOL	1989
Marismas-5	1371	CHEVRON	1988
Bética18-1	4348	ESSO	1984



**Fig. 42. Posición de sondeos profundos de Hidrocarburos, en azul. Puntos rojos: sondeos mecánicos existentes. [fichero SondeosHidrocarburos.xls y base-final.xls]**

De las quince fichas recogidas, sólo diez se encuentran dentro de los límites del estudio. Todos estos sondeos disponen de diversas diagráfias geofísicas, y se conoce la columna litológica simplificada de siete de ellos.

## II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL

### II.1 Tipos de documentos digitales generados

Para el análisis de la información contenida en la documentación recopilada es necesario efectuar superposición de documentos, trazado de nuevos mapas o secciones, etc., que actualmente es mucho más factible de llevar a cabo mediante herramientas informáticas. Por otra parte, una vez recuperada la información de datos de campo originales de trabajos geofísicos, se pretende conservarla incorporándola a las Bases de Datos actualmente en preparación en el IGME (en particular al Sistema de Información Geofísica, SIGEOF). Por estas razones se ha procedido a dos tipos de conversión de los documentos:

- Conversión de documentos en papel a **imágenes** mediante **escáner**
- Creación de **ficheros de datos**, mediante grabación a partir de listados, estadillos de campo, lectura de datos en mapas, digitalización de curvas, etc.

En particular, son de especial importancia la recuperación de los **datos de Sondeos Eléctricos Verticales**, para los que se han generado tres tipos de ficheros para cada campaña recuperada:

- **Ficheros de posición: SEVnombre.xls** (ficheros Excel) con los valores: Nombre del SEV, X, Y (UTM 30), cota, compañía, zona geográfica, denominación, nº informe, nº hoja 1/50.000.
- **Ficheros de valores AB/2, resistividad** (extensión **.rpd**, ficheros ascii con formato estándar según la base de datos SIGEOF)
- **Ficheros de interpretación**, en formato Excel, con los valores: nº informe, X,Y (UTM 30), cota, potencia, resistividad, interpretaciones efectuadas originalmente o bien reinterpretadas posteriormente (p.e. del Informe 35559 anexo 24 y 25 o de Astier 1970).

El trabajo de recuperación de los valores de los Sondeos Eléctricos Verticales ha dado lugar a una base de datos específica, explicada en el apartado II-6 de este capítulo. No obstante, el proceso de recuperación de dichos datos queda recogido en el apartado II-2.

Para facilitar la identificación, el nombre de todos los ficheros generados se ha iniciado con el número asignado al apartado, **marcado en color amarillo**, en el que se comenta el documento original (este número se ha hecho coincidir para que sea el mismo en el capítulo I de Recopilación y en este

capítulo II de Preparación de datos). Así mismo, se incluye una visión del contenido de cada carpeta correspondiente del Archivo Digital, mostrando los documentos escaneados como “vistas en miniatura”, a fin de dar una idea del tipo de documento, que debe ser consultado informáticamente para su correcta visión.

**Todos los ficheros generados se encuentran en los Anexos Digitales (en el DVD adjunto a la Memoria de este Informe) II-a(DocuEscanDigita), II-b(BaseDatosSEV), II-c (BaseDatosSondeos), cuyo contenido se ilustra en el texto siguiente para los correspondientes documentos.**

**En el fichero “ficherosDigitalizacionDoñana.xls” quedan referenciados los nombres de los ficheros creados, su contenido y formato, agrupados por Informes de procedencia.**

## II.2 Información procedente de informes parciales hasta 1976

### II.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063

- Se ha creado el fichero de posición **SEV40063.xls**, conteniendo **X,Y,X,nombreSEVL** de todos los SEV de este Informe. Las coordenadas X,Y se han tomado por digitalización sobre el mapa de posición del Informe de Prakla de 1968 (Ref. 35.559). La cota se ha medido en las secciones geoelectricas del informe de Astier de 1970 (sin ref.).
- Se han creado 52 ficheros **Lxx\*.rpd** con los valores **AB/2, resistividad** de cada SEV. Se han generado a partir de los datos de los estadillos de campo (archivador 567/1994 55 FAO est (A02)), que contienen los valores de intensidad de corriente y diferencia de potencial para cada MN y AB. Para cada lectura, se ha recalculado la constante del dispositivo y el valor de resistividad aparente (se han redondeado las cifras, siguiendo el criterio usado en los estadillos, fichero **CONSTATNES.xls**). Se han detectado anomalías en los cálculos originales o en la posición de algún punto de las curvas de campo para los SEV L41, L54, L34, L46, L11, L28 y L26, que han sido corregidos.
- Se ha creado el fichero **SEV-INTERPRETACION.xls**, a donde se han pasado los valores de interpretación anotados en las curvas de campo. No coinciden algunas interpretaciones con los datos puestos en los cortes (L-4, L-5, L-6, L-8, L-25, L-27, L-28, L-37, L-53 y L-56). Los valores de resistividad de los sondeos L-37, L-38 y L-39 están multiplicados por 10.

El fichero **SEV-INTERPRETACION.xls** incorpora las interpretaciones de todos los SEV de las diferentes campañas. **Todos estos ficheros se encuentran en la Base de Datos de SEV.**

### II.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559

- ficheros de posición de las diferentes campañas de SEV de este informe: **SEVPerfil135559.xls**, **SEVPerfil235559.xls**, **SEVMD35559.xls**, **SEVMR35559.xls**, **SEVN35559.xls** y **SEVLerici35559.xls**. conteniendo **X,Y,X,nombreSEV**. Las coordenadas de cada SEV se han tomado por digitalización sobre el mapa de posición del Informe de Prakla 35559. La cota se ha medido en las secciones geoelectricas presentadas por Astier en 1970 (sin ref.). Aunque no han sido utilizados en el presente Proyecto, se han generado también los ficheros de posición de las zonas Palacios, Sanlucar, Alcalá y Perfil3 (no hay datos para los Perfil4 y Perfil5). Los SEV 189 al 198 tenían las coordenadas mal. El 189 es el 198 y todos los demás tiene un numero mayor (+1).

- ficheros \*.rpd con los valores **AB/2, resistividad** de cada SEV. Se han generado a partir de los datos de los estadillos de campo, para las zonas Perfil 1, Perfil 2, Marismas-Doñana MD, Marismas-Rocio MR y Niebla N. Aunque no eran necesarios para el presente Proyecto, por referirse a zonas externas a la contemplada, se han generado también los ficheros rpd correspondientes a las zonas Alcalá, Palacios, Sanlucar, Perfil3, Perfil4 y Perfil5. No se dispone de datos de campo sobre la campaña denominada Lericí.
- fichero de interpretación: los valores de interpretación anotados en las curvas de campo o en los Anexos (secciones y/o cortes) de las zonas Perfil1, Perfil2, MD, MP, MR, N y LERICI, se han pasado al fichero **SEV-INTERPRETACION.xls**. Se observa que los valores de interpretación anotados en las curvas no coinciden exactamente con los de los cortes, habiéndose utilizado para el fichero los datos de los cortes. En algunas celdas hay dos valores por existir dos interpretaciones de estos sondeos. Para la campaña MR se han utilizado los anexos 31 y 32 (columnas geoelectricas) por considerarlos más fiables, aunque existen también en los anexos 22 y 23 (cortes geoelectricos). Los valores de espesores con raya dentada en los gráficos de los cortes se ponen como valores seguros. Los de raya dentada con interrogación se ponen con interrogación. Los SEV L-37, L-38 y L-39 no coinciden con los del proyecto 40063 por estar multiplicados los valores de resistividad por 10 en este proyecto. Se han incorporado los espesores y resistividades resultado de la reinterpretación efectuada por Astier en 1970.
- En el mapa del Anexo2 (Mapa de resistencia transversal) 1:100.000 se han leído, en cada punto de SEV donde aparece (parte de los SEV de las zonas Lericí, L, MD, MR, N y MP), el valor de la resistencia transversal T y la profundidad desde superficie de la capa resistiva, formando el fichero **22ProResyTAnexo2.xls**, al que se ha añadido el valor de la cota del techo del resistivo por diferencia entre los valores de cota del SEV y la profundidad. El fichero **22ProResyTAnexo2bis.xls** no contiene los SEV de la zona MP (Palacios), situados al Este del Guadalquivir. En los sondeos MD-12, MD-13, MD-14, MR-36 y MR-37 aparecen dos valores de profundidad del resistivo, habiéndose tomado la más acorde con el entorno. El SEV 188 situado entre los puntos 173 y 199 es el punto 198 (Anexo 2 y Anexo 3).
- Se ha digitalizado la línea T=1000 del Anexo 2, fichero **22linea1000deTAnexo2.txt**
- En el mapa 1:100.000 del Anexo3 (Plano de resultados de la prospección eléctrica: mapa de cotas de la profundidad del techo del substrato), que utiliza parte de los SEV de la zona de Niebla (SEV N) y de Lericí, se ha leído, en cada punto SEV donde aparece, el valor de la profundidad del substrato resistivo (acuífero) y su cota, formando el fichero **22ProfCotasSubstratoAnexo3.xls**, en el que algunos valores han sido modificados respecto

de los que constan en el plano para hacerlos concordantes con los datos de las cotas de los SEV.

- Se han digitalizado las testificaciones de los sondeos BG6 (PS, R, R16" y R64"Normal) y BG7 (PS, R, R6" lateral, R16" y R64"Normal), de los Anexos 70 a 77: **22Anexo70-77-testfBG6yBG7.xls**
- El fichero **22PerfilA.tif** es un fragmento del corte geoelectrico 2 del Anexo 17; el fichero **22PerfilE.tif** es un fragmento del corte geoelectrico del Anexo 22

Todos los ficheros de SEV se encuentran en la Base de Datos de SEV. Los restantes en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):



### **II.2.3 Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.**

Se ha reproducido en scanner:

- Plano 4: Interpretación de Sondeos Eléctricos: curvas isorresistivas para AB=600 m, fichero **23PL-4.tif**
- Plano 4 con diferente posición de la línea T=5000: fichero **23PL-4BIS.jpg**.
- Figura 5: ejemplo de interpretación del SEV MD37, fichero **23F5.jpg**
- Figura 6: ejemplo de interpretación del SEV I15, fichero **23F6.jpg**.

Se han digitalizado las curvas de T=5000 de los mapas PL4 y PL4bis, creando los ficheros **23linea5000TdePL4.txt** y **23linea5000TdePL4b.txt**

Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):



23F5



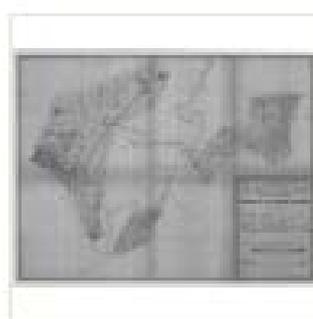
23F6



23linea5000TdePL4



23linea5000TdePL4b



23PL-4



23PL-4Bis

## II.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070

- fichero de posición **SEV40070.xls**: las coordenadas de cada SEV se han tomado por digitalización sobre el mapa de posición del Informe de Prakla de 1968 (Ref. 35.559), SEV nombrados Pxx. La cota se ha medido en las secciones geoelectricas presentadas por Astier 1970. (La denominación de estos SEV en el fichero de posición está referida como P-x, mientras que los correspondientes ficheros rpd mantienen la denominación MOGUER-x).
- ficheros **MoguerXX.rpd (AB/2, resistividad)**: se han generado a partir de los datos de los estadillos de campo, que contienen los valores de intensidad de corriente y diferencia de potencial para cada MN y AB. Para cada lectura, se ha recalculado la constante y el valor de resistividad aparente (se han redondeado las cifras, siguiendo el criterio usado en los estadillos, fichero CONSTANTES.xls).
- fichero de interpretación: los valores de interpretación anotados en las curvas de campo se han incorporado al fichero **SEV-INTERPRETACION.xls**

**Todos estos ficheros se encuentran en la Base de Datos de SEV.**

## II.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.

- Fichero de posición de SEV **SEVCD-Marismas1970.xls**
- Se han creado los ficheros **CDxx \*.rpd** con los datos de campo de los SEV a partir de los estadillos de campo
- fichero de interpretación: los valores de interpretación anotados en las curvas de campo se han pasado al fichero **SEV-INTERPRETACION.xls**. Los sondeos CD-10, CD-11 y CD-12 no existen.
- Se ha escaneado el Plano 1 1/200.000 con posición de SEV, sondeos mecánicos BG y línea de separación agua dulce- agua salada según la interpretación de los SEV: fichero **25Fig-1.jpg**
- Se ha digitalizado en coordenadas X,Y UTM huso 30 los límites de la interfase agua dulce-salada del Plano 1 : **25FIGURA-1.xls**

Todos los ficheros de SEV se encuentran en la Base de Datos de SEV. Los restantes se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):



25FIGURA-1



25Fig-1

## II.2.6 Interpretation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.

De los SEV denominados CM, efectuados por el IGME en 1969, la única información que existe actualmente son los estadillos de campo, estando posicionados únicamente en los mapas de este documento, por lo que se han creado los ficheros:

- Fichero de posición de **SEVCM.xls** por digitalización en los mapas

- Los ficheros **CM\*.rpd** (AB/2- resistividad) se han creado con los datos de campo
- fichero de interpretación: los valores de interpretación se han tomado de los cortes geoelectricos (PL7) y se han incorporado al fichero **SEV-INTERPRETACION.xls**

#### **Todos estos ficheros de SEV se encuentran en la Base de Datos de SEV**

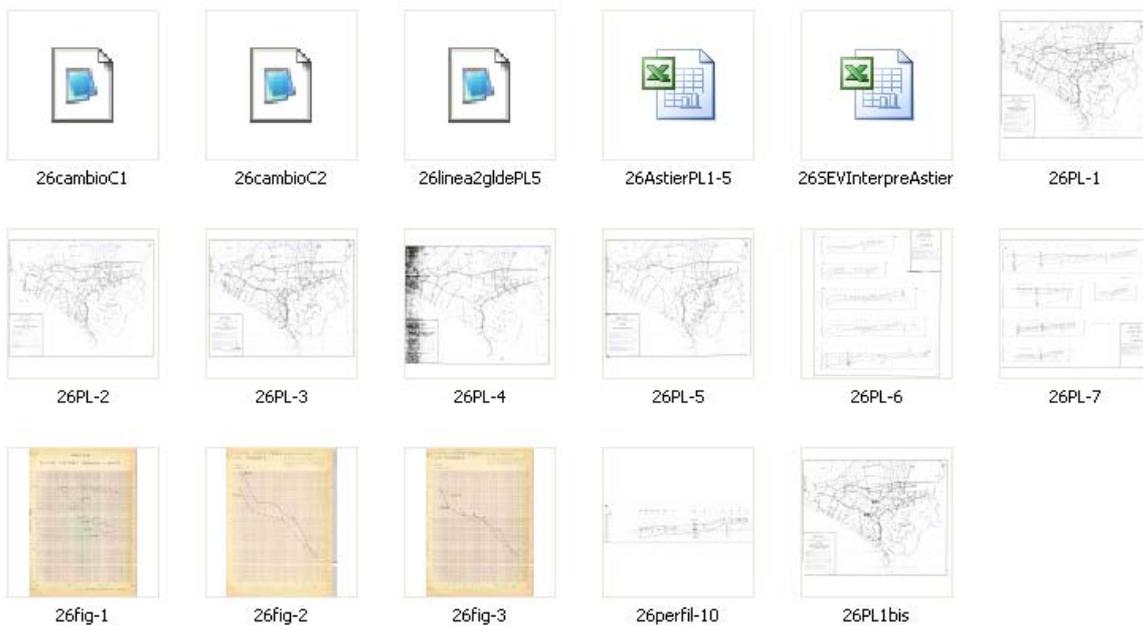
- Los SEV utilizados en la reinterpretación de Astier se han agrupado en el fichero **26SEVinterpretacionAstier.xls** (SEV,X,Y)
- Se han escaneado los siguientes documentos en escala 1/100.000:
  - . PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal: **26PL-1.tif**
  - . PL 2: Zona Almonte. Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m): **26PL-2.tif**
  - . PL 3: Zona de Almonte. Resistividad del acuífero principal: **26PL-3.tif**
  - . PL 4: Zona de Almonte. Profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales: **26PL-4.tif**
  - . PL 5: Zona de Marismas. Límite entre agua dulce – agua salada: **26PL-5.tif**
  - . PL 6 y 7: Cortes geoelectricos de 10 perfiles, a escala 1/50.000: **26PL-6.tif** y **26PL-7.tif**. Fragmento de PL7 con sólo el corte 10 en **26Perfil-10.tif**
  - . Figuras 1 y 2 (ejemplos de la influencia de la resistividad en la adjudicación de cambio de sustrato) ficheros **26fig-1.tif**, **26fig-2.tif**,
  - . Figura 3: relación resistencia transversal-salinidad. Fichero **26fig-3.tif**.
- Los ficheros **26CambioC1.txt** y **26CambioC2.txt** son la digitalización de las líneas que indican el cambio de basamento adoptado como fin del acuífero en el plano PL 1
- Se ha digitalizado la línea de 2 g/l de interfase agua dulce-salada del plano PL5; fichero **26linea2gldePL5.txt**
- La información digital de los mapas PL-1 a PL-5 ha sido recobrada traspasando los valores indicados junto a cada SEV o sondeo al fichero **26AstierPL1-5.xls** (libro SEV), donde se indican el nombre del SEV, sus coordenadas X,Y UTM30, cota Z (la cota Z de los sondeos CM se ha tomado de los planos 6 y 7) y los valores proporcionados por cada plano:
  - profundidad de la base del acuífero principal, PL1
  - cota de la base del acuífero principal, PL1
  - espesor total de acuífero (resistividad >80 ohm.m), PL2
  - resistividad del acuífero principal, PL3

- Profundidad y espesor de las capas de arcillas superficiales (resistividad < 30 ohm.m), PL4. Hay muchos puntos cuyos valores no se ven y otros son dudosos, por lo que este fichero contiene posibles errores.
- Resistencia transversal unitaria (para límite agua dulce-salada), PL5

En el mismo fichero **26AstierPL1-5.xls** existen además los libros:

- **Sondeos M** contiene los sondeos mecánicos del plano 1, con la información de los planos 1 al 5.
- **SM.Monica** contiene la información del fichero Base Final.xls sobre sondeos mecánicos, que será comentado en el párrafo II-7.
- **Correlación S.M** contiene los sondeos mecánicos del plano 1 y la información de los sondeos más próximos
- **Hojas Topo** contiene los valores de las esquinas de las hojas topográficas para su representación en los gráficos
- **Gra. SM**, gráfico con los sondeos mecánicos del plano 1 y los próximos a ellos
- **Gra.Ast-Moni**, gráfico con los sondeos mecánicos del plano 1 y todos los sondeos de la base final de sondeos mecánicos.

**Los ficheros obtenidos por escaner y digitalización se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



## **II.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538**

- Se han escaneado los siguientes documentos de las testificaciones:

. Lucio del Lobo..... gamma natural hasta los 100 m, fichero **27Lucio.cpt**

. 114230024 (M-6-5)..... gamma natural hasta los 186 m: fichero **27M-6-5.cpt**

. 114220018 (AM-1)..... gamma natural, ficheros **27AM-1.cpt**, y resistividad y potencial espontáneo hasta 128 m, fichero **27AM-1RPS.cpt**

. 114230049 (M-8-14)..... gamma natural, fichero **27M-8-14RG.cpt**, y resistividad y potencial espontáneo hasta 138 m, en fichero **27M-8-14.cpt**

**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



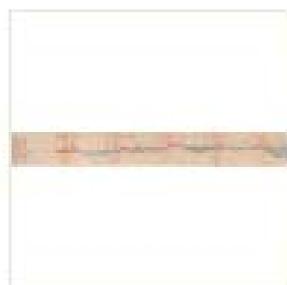
27AM-1



27AM-1RPS



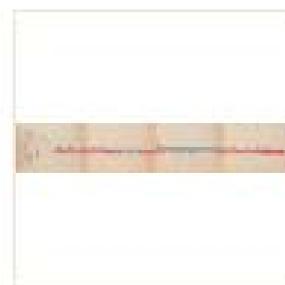
27Lucio



27M-6-5



27M-8-14



27M-8-14RG

## II.3 Procedentes de informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982

### II.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.

- Se han reproducido por scanner los planos:

1.2.2 Posición de SEV (selección de los SEV presentados en el mapa de Astier, 1970), fichero **31Map12-2.tif**

1.2.4 Espesor de acuífero (modificado por suavización del de Astier, 1970, mapa PL-2), fichero **31Map12-4.tif**

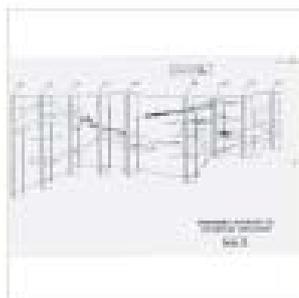
1.2.5 Cota del fondo impermeable (modificado por suavización del mapa PL-1 de Astier 1970, no distinguiendo entre diferentes horizontes), fichero **31Map12-5.tif**

- Se han digitalizado las curvas del plano 1.2.5, en fichero **31plano12-5.xls** (transportadas a Surfer en 31plano12-5.srf)
- Se ha recuperado la columna del sondeo mecánico BG6 (en documento Informe técnico 4) e incorporado a la base de datos de sondeos.
- Se han pasado a fichero los datos del cuadro donde se recogen las características de todos los sondeos efectuados en la zona de Almonte y Marismas, que son todos los BG (en documento Informe técnico 4), fichero **sondeosBG.xls**. Se recoge nombre y nº del sondeo, X,Y,Z, profundidad, piso estratigráfico del acuífero, piso del fondo, entre otros datos. Se aprecian diferencias en las coordenadas X,Y entre las diferentes fuentes de información para estos sondeos:

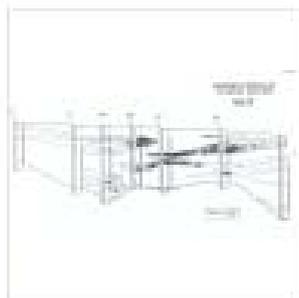
BG-1 base final	212359	4107903
BG-1 base original	212331.2	4107903.6
BG-1 calculado (a partir de geográficas)	212306.8	4107788.6
BG-5 base final	200953	4111174
BG-5 base original	200924.9	4111174.3
BG-5 calculado (a partir de geográficas)	201493.2	4111158

- Del informe técnico 7 se ha reproducido por scanner el Plano 2 de situación de los sondeos mecánicos en los sectores III, IV y V, fichero **31PL-2.tif** y los cuatro cortes con indicación del nivel impermeable y presencia de arcillas de los sectores III y IV, ficheros **31Cortes-1.tif**, **31Cortes-2.tif**, **31Cortes-3.tif** y **31Cortes-4.tif**.
- Se ha recuperado la información de las columnas de los sondeos: IV-5-1 III-12-49 III-10-7 III-11-11 III-11-11bis, e incorporado a la base de datos de sondeos.

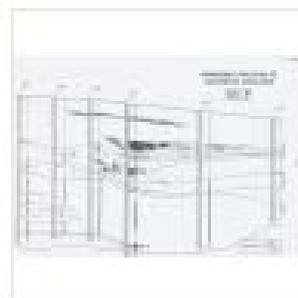
**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



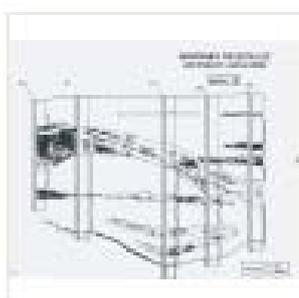
31CORTE-1



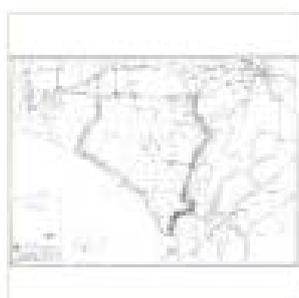
31CORTE-2



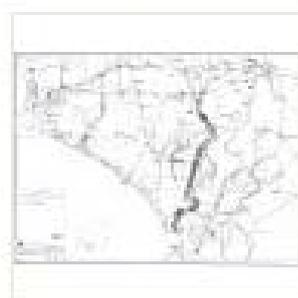
31CORTE-3



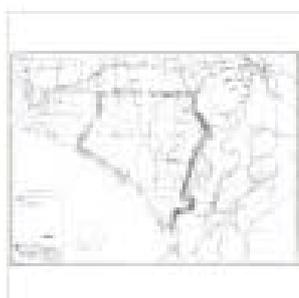
31CORTE-4



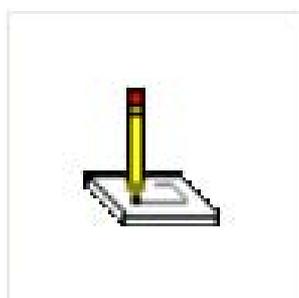
31Map12-2



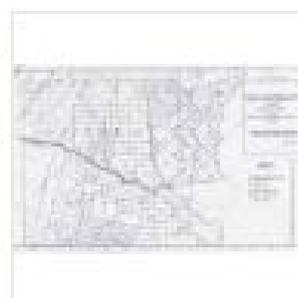
31Map12-4



31Map12-5



31plano12-5



31PL-2



31plano12-5



sondeosBG

### **II.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.**

Este informe se refiere a los Sectores I, II y III (recoge los anteriormente denominados I, III, IV, V y Marismas).

- Se han reproducido en scanner (ficheros \*.tif) y digitalizado (ficheros \*.xls) las curvas de los siguientes documentos (se conservan además los ficheros \*.txt originales de la digitalización de curvas):
  - plano 14 (espesores saturados hasta el fondo del impermeable): **32PL-14.tif** y **32PL14-curvas.xls**
  - plano 15 (espesores hasta el fondo impermeable): **32PL-15.tif** y **32PL15-curvas.xls**
  - plano 16 (cotas del fondo impermeable): **32PL-16.tif** y **32PL16-curvas.xls**
  - plano 31 de situación de la interfase agua dulce-salada deducida a partir de la salinidad del agua: **32PL-31.tif**, **32PL31-curvas.xls** y **32PL31-contacto.xls** (intersección de la interfase con el fondo impermeable).
  - plano 32 de cotas de la interfase en profundidad, deducida a partir de la superficie piezométrica: **32PL-32.tif** y **32PL32-curvas.xls**
- Se han reproducido en scanner los siguientes documentos:
  - plano 14b con indicación de posición de cortes geológicos V y H, que originalmente se encuentran en el plano 23: **32PL-14-cortes.tif** (en versión color y Blanco-negro)
  - cortes de los planos 24 a 29. Ficheros **32PerV-1.tif** a **32PerV-8.tif**, y **32PerH-1.tif** a **32PerH-5.tif**,
  - perfil litológico de la zona de dunas: **32perfilDunas.tif**
  - esquema conceptual de situación de la interfase agua dulce-salada en la zona de Marismas **32CroquisInterfase.tif**
  - cuadro de clasificación de la permeabilidad por pisos estratigráficos, fichero **32estrati-permeab.tif**
- se ha digitalizado las curvas de los siguientes documento (además de las indicadas en el párrafo anterior):
  - plano 41 (cotas del fondo impermeable para todo el acuífero) **32PL41-curvas.xls**. Este mapa no ha sido escaneado debido al mal estado de la copia disponible, muy ennegrecida.
  - testificación de resistividad y potencial espontáneo del sondeo M-1-6 bis: fichero **32Sondeo M-1-6bis.xls**

- Los datos numéricos sobre la **cota del fondo impermeable** contenidos en el Anexo 1 han sido incorporados al fichero de sondeos mecánicos, formando el nuevo fichero **32sondeosTECHO\_IMPERMEABLE.xls**. Observaciones a estos datos:

La colección de fichas del Anexo 1 contiene datos de los siguientes sondeos:

AM 1 a18,

M-1 1 a 6 (con 5bis y 6bis), M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, M-8

I-1, I-2, I-3, I-4, I-5, I-6, I-8, I-9

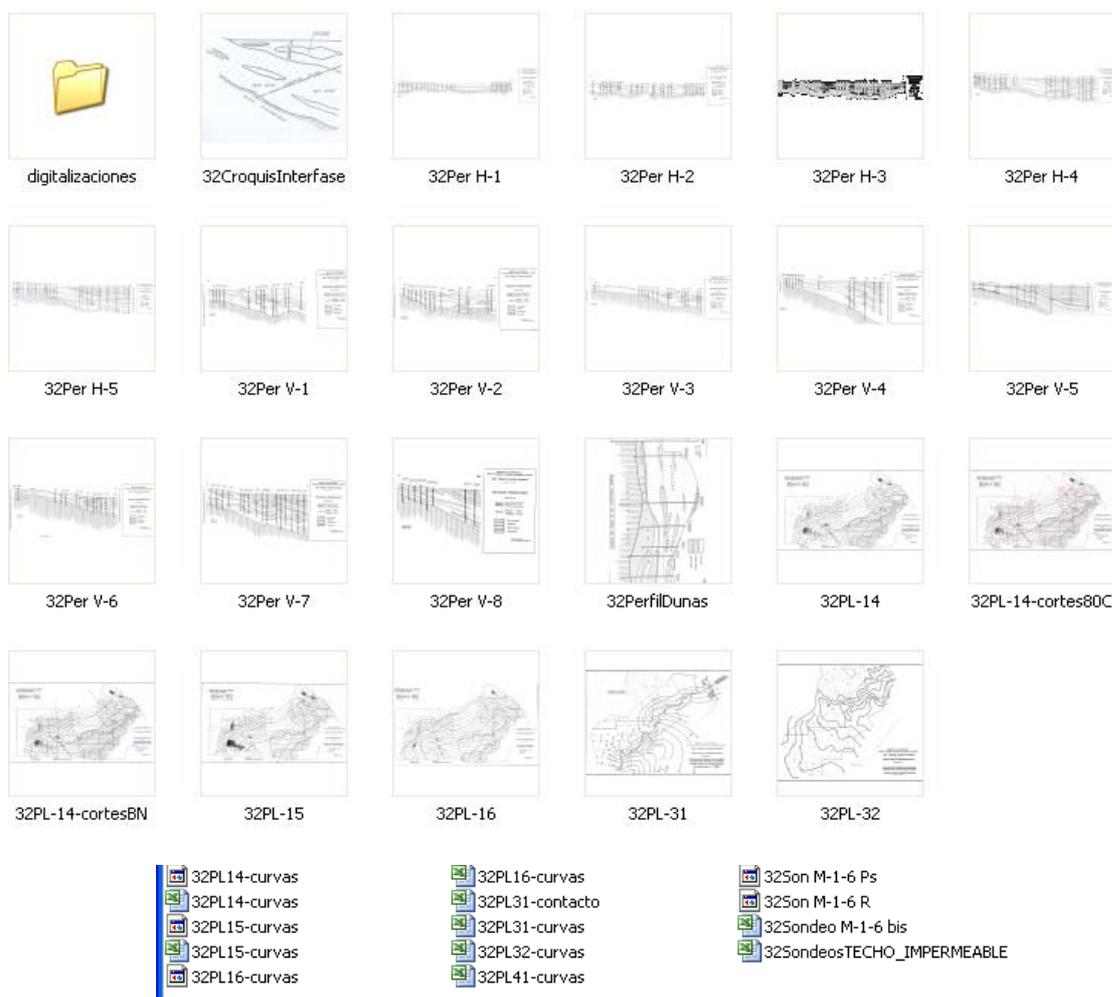
III-3, III-6, III-7, III-8, III-9, III-10, III-11, III-12

IV-1, IV-2, IV-3, IV-4, IV-5, IV-6, IV-7, IV-8 IV-9, IV-10, IV-11, IV-12, IV-13

V-1, V-2, V-3, V-4, V-5, V-7, V-8

Los sondeos I-2-10 y IV-13-1 no existen en la base de datos litológica, ni se identifican según el código IGME: el código 114170034 pertenece al I-2-5 en vez de al I-2-10, y el código 114210062 pertenece al IV-13-8, y no al IV-13-1. Haría falta identificar las columnas de los sondeos siguientes para verificar que es lo que se ha tomado por base del acuífero en este listado: BG-39, BG-47, BG-7, BG-¿, BG-¿, BG-¿, BG-28, BG-11, BG-29, BG-24, Almonte, Arrayan, Bonares, Señuela, Señuela bis, Abalorio, Mari López, Travieso 1, Travieso 2, Lucio LoboPartido Resina, El Rocio, Mediana y Caserío de Mazagón, Suministro a Mazagón, 22-1001.

**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



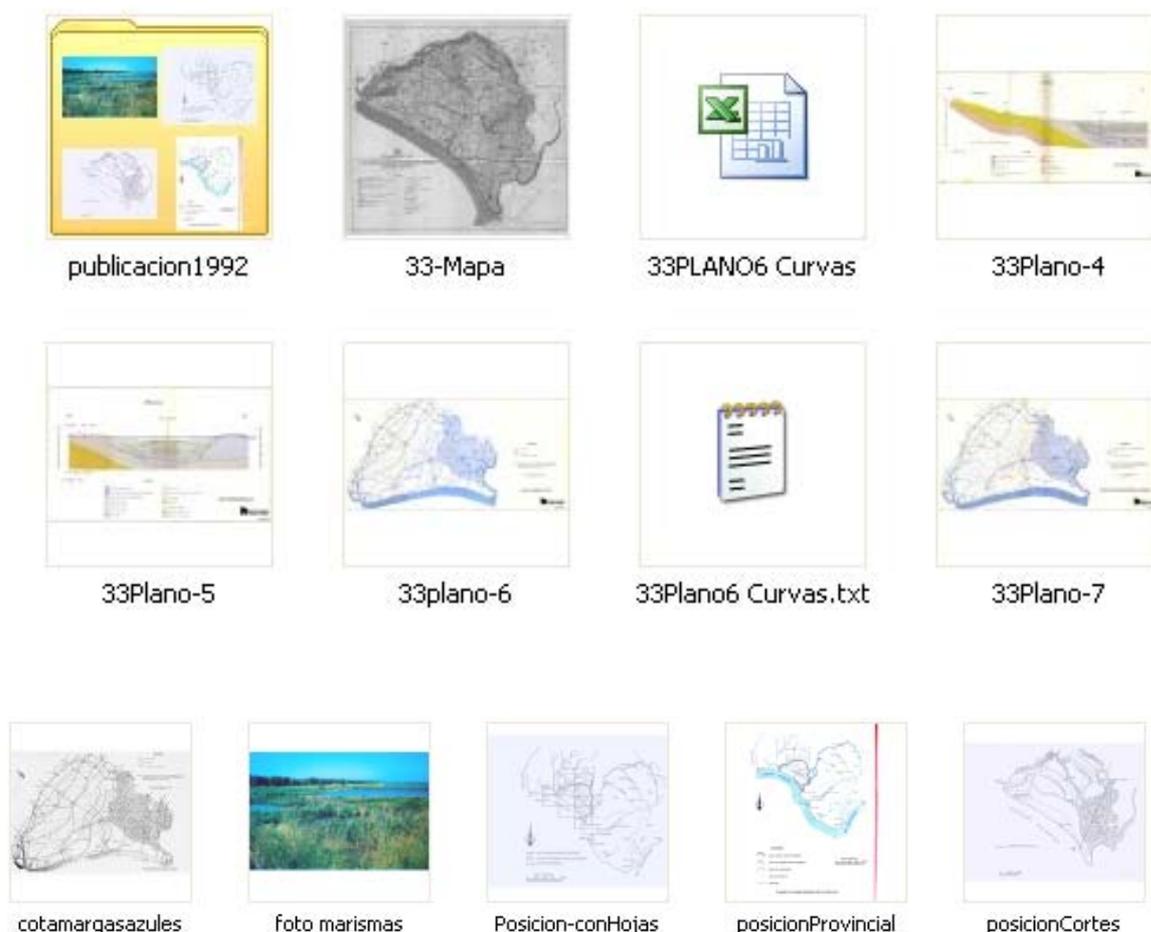
### II.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649

- Se han reproducido por scanner los siguientes planos:
  - mapa general 1/100.000 **33-Mapa.tif** (en mal estado de conservación)
  - plano 4: Corte geológico I-I **33Plano-4.tif**
  - plano 5: corte geológico II-II **33Plano-5.tif**
  - plano 6: cota de margas azules **33Plano-6.tif**
  - plano 7: potencia de niveles permeables saturados **33Plano-7.tif**

Se han digitalizado las curvas del plano 6: **33PLANO6Curvas.xls** (se conserva el fichero txt original de la digitalización).

Este informe fue recogido nuevamente en la publicación realizada por el IGME en 1992 “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”, de donde se han escaneado las figuras de **33-1992posición-conHojas.tif**, **33-1992posicionProvincial.tif**, **33-1992posicióncortes.tif**, **33-1992cotamargasazules.tif** y **33-1992fotomarismas.tif**.

Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):



## II.4 Procedentes de informes posteriores al Proyecto Guadalquivir

### II.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939

Se han escaneado el plano posición (**fichero 41PL-1.tif**) y el corte geoelectrico (**41corte.tif**)  
Sólo existen las curvas de campo de los SEV, por lo que no se han preparado ficheros \*.rpd ni fichero de posición de los mismos.

**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



41corte



41PL-1

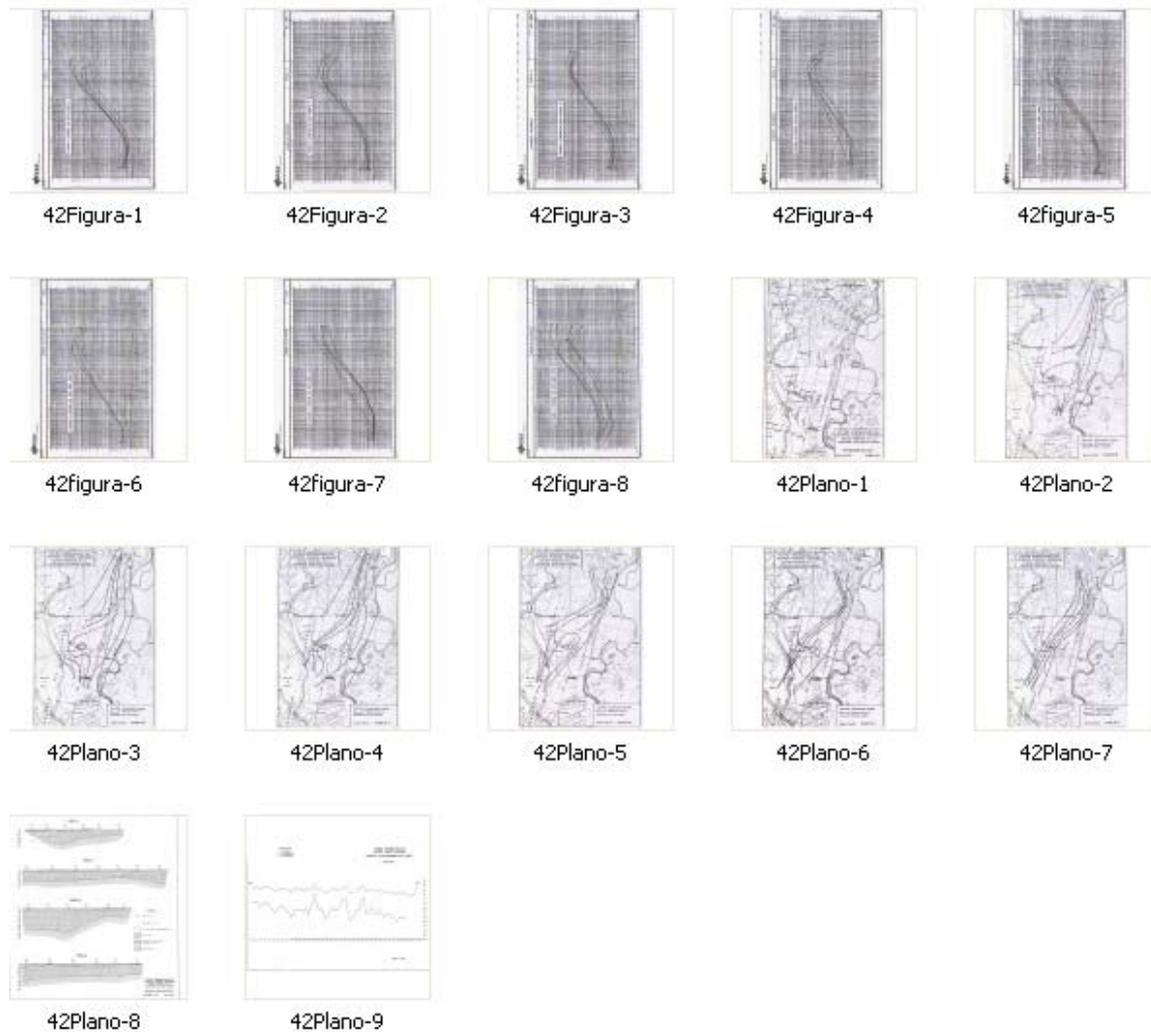
### II.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655

Se han escaneado todas las figuras de este Informe:

- plano nº 1 de posición de los SEV medidos en el mismo y de los SEV CD de 1969: **42Plano-1.tif**
- isorresistivas para AB/2 300, 500 y 700 m con las medidas de este informe: **42Plano-2.tif**  
**42Plano-3.tif** **42Plano-4.tif**
- isorresistivas para AB/2 300, 500 y 700 m, con los datos de los SEV CD de 1969: **42Plano-5.tif**  
**42Plano-6.tif** y **42Plano-7.tif**
- cortes geoelectricos: **42Plano-8.tif**
- perfil electromagnético Genie: **42Plano-9.tif**
- curvas de campo de los SEV de este informe y de 1969 (CD): **42Figura-1.tif** a **42Figura-8.tif**

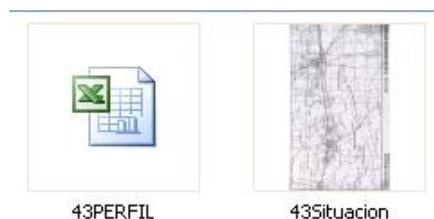
En el informe sólo se facilitan las curvas de campo de los SEV, no existiendo valores de estadillos que permitan su incorporación a una base digital.

**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



### **II.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213**

- scanner de plano de posición: **43Situacion.tif**
- fichero de posición e interpretación de los SEV: **43PERFIL.xls (libro datos)** dibujándose el correspondiente perfil geoelectrico (**libro perfil**)
- No hay datos de campo de los SEV, por lo que no se han podido preparar los ficheros \*.rpd e incorporarlos a la base de datos de SEV.



#### **II.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347**

- A partir del plano 10.1 se han obtenido las coordenadas X,Y de los SEV y de los SEDT efectuados
- Por medición de la cota Z en la escala gráfica de los planos 10.4 a 10.7 (cortes geoeléctricos 1A, 1B, 2 A y 3 A de los SEV) se han obtenido la cota, potencia y resistividad de cada capa para las medidas de corriente continua.
- Por medición de la cota Z en la escala gráfica del plano 10.8 (cortes geoeléctricos 1, 2 y 3 de los SEDT) se han obtenido la cota, potencia y resistividad de cada capa para las medidas electromagnéticas.
- Estos datos (SEV, X,Y, COTA ,ESPESOR, RESISTIVIDAD, DISTANCIA AL ORIGEN) se han pasado ordenados por perfiles al fichero **44PERFILES.xls**, dibujándose todas las secciones geoeléctricas, tanto en Excel (libros del fichero xls, como en Grapher). Para los SEV L34 y L35 se ha añadido la interpretación del fichero general **SEV-Interpretacion.xls** a la derecha para poder comparar, ya que hay una diferencia en cota Z de unos 14 m.

#### **II.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408**

Se ha digitalizado la testificación de sondeo S-2 (gamma natural, diámetro, densidad, neutrón): **45SONDEO-2.xls**

#### **II.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963**

- Se han reproducido por scanner los siguientes documentos:
  - figura 1 Corte geológico a partir de sondeos mecánicos **46Fig-1.cpt**
  - Plano 2.- Plano de sectores.- Situación del corte geológico. **46PL-2.cpt**
  - Plano 5. Situación de sondeos testificados **46PL-5.cpt**
  - Figura 5- Situación interfase agua dulce-salada en 1994 **46Fig-5.tif**
  - Figura 2 del Anexo 3. Posición sondeos testificados **46Fig-2.tif**
  - 4 figuras del Anexo 3 con posición de las isoclasas de conductividad y concentración de cloruros a 25,50,75 y 100 m de profundidad: **46Prof-25.tif**, **46Prof-50.tif**, **46Prof-75.tif** y **46Prof-100.tif**

Se han digitalizado las curvas de isoconductividad en mS/cm de la Figura 5: **46Fig-5.xls** utilizando para georeferenciarla su superposición con el plano Plano-6 del informe Ref.35.649, por tener la

misma escala, haciendo coincidir los pueblos. En este mismo fichero se incluye la posición X,Y de algunos sondeos por digitalización en la misma Fig. 5, cuyas coordenadas se han comparado con los valores de la base de sondeos (libro comparación), observándose una diferencia aproximada en X de 1300 m y en Y de 1000 m, por lo que la posición de las curvas de conductividad digitalizadas y las del fichero **33Plano6 curvas.xls** (de cotas de las margas azules) pueden contener dicho error de desplazamiento relativo frente a otros documentos.

Se ha preparado el fichero **46tablaSondeos.xls** incluyendo la posición X,Y de los sondeos utilizados en el este Informe.

Los ficheros digitales (ASCII) de las testificaciones del Anexo 3, realizadas con el equipo Century: gamma natural, T, resistividad 25°C, conductividad del fluido (25°C), concentración ClNa no han podido ser recuperados.

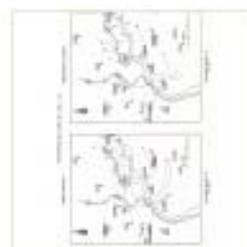
**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-a(DocuEscanDigita):**



46tablaSondeos



46Prof-100



46Prof-75



46Prof-50



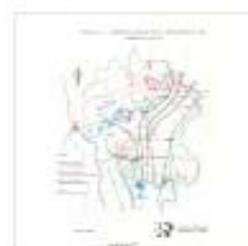
46Prof-25



46PL-2



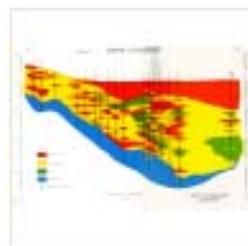
46Fig-5



46Fig-5



46fig-2



46Fig-1



46PL-5

## II.5 Datos de campañas de sismica de reflexión. “Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España. Tomo I. Guadalquivir-Golfo de Cádiz”, 1990, Ref. 2903

A partir del documento mencionado, así como mediante consulta al Archivo de Hidrocarburos, se ha preparado la siguiente información:

- Mapas de posición de líneas sísmicas
- Información sobre sondeos mecánicos profundos
- Secciones sísmicas

### Mapas de posición de líneas sísmicas:

Se han reproducido por scanner los siguientes documentos sobre posición de líneas sísmicas:

- mapa de posición de líneas sísmicas escala 1/100.000 (anteriores a 1972), del cuadrante 4k, fichero **Sis4k.tif**
- mapas de posición de líneas sísmicas escala 1/50.000 (posteriores a 1972), de los octantes 4k-1, 4k-2 y 4k-4, ficheros **Sis4k-1.tif** **Sis4k-2.tif** y **Sis4k-4.tif**
- mapa PL-20 Tomo I, mapa de isobatas de la base del terciario postorogénico y yacente del mismo, **Sis-PL20.jpg**
- mapa de isócronas de un horizonte próximo a la discordancia miocena, **Sis-PL6.jpg**

Se incluye también una imagen (**Sis-Sigeof**) indicando la posición de líneas sísmica existente en la base de datos SIGEOF.



Sis-4K



Sis-4K-1



Sis-4K-2



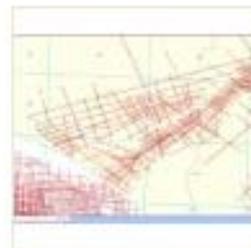
Sis-4K-4



Sis-PL6



Sis-PL-20



Sis-Sigeof

### Información sobre sondeos mecánicos profundos:

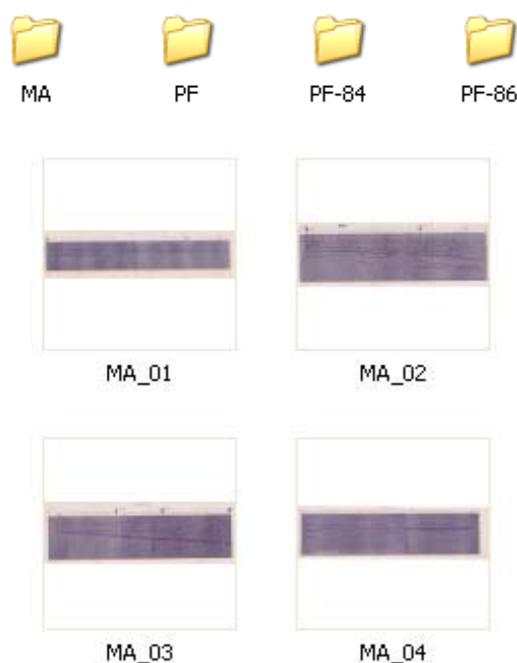
El fichero **SondeosHidrocarburos.xls** contiene información de los sondeos profundos existentes de la prospección de hidrocarburos (nombre del sondeo, X,Y UTM30,Z, profundidad, cota de las margas azules, operadora, e indicación de si se dispone de litología y diagrfías). Este fichero ha sido posteriormente simplificado a los 9 sondeos que no son confidenciales y contienen información de las margas azules: **XYsondeos.xls** con la información sondeo, operadora, profundidad, X,Y UTM30, cota de las margas azules, a los que se ha añadido (en los sondeos para los que se ha podido leer esta información), el valor del tiempo leído en las secciones sísmicas para las margas, así como la velocidad media resultante.



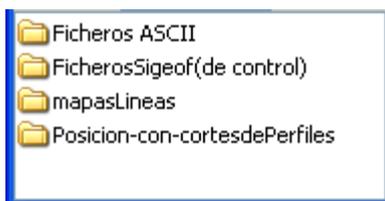
Se ha añadido el fichero **Moguer-1.tif**, con parte de la columna litológica de dicho sondeo y su correlación con la estratigrafía, por escaneado de un fragmento del plano PL-13 del documento Ref. 2903.

### Secciones sísmicas:

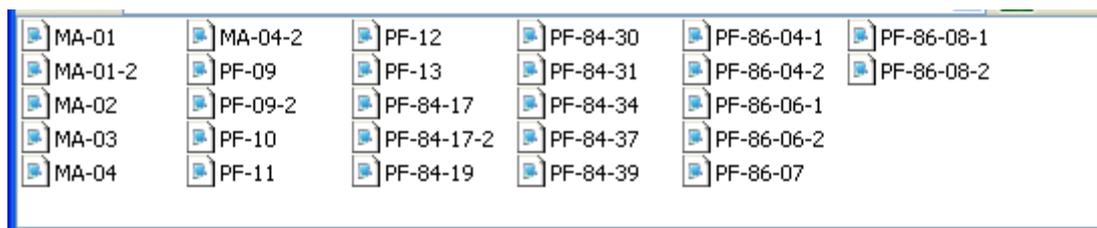
Se han escaneado las 24 secciones sísmicas disponibles y no confidenciales de las campañas MA (01,02, 03,04), PF09 (186, 508, 845, 1186), PF10-1245, PF11-101, PF12-445 y PF13-101, PF84 (17, 17-2, 17-3, 19,30, 31, 34, 37 y 39), PF86 (04,06, 07 y 08) y HV-85 (05, 06 y 07). Ficheros **nombreLinea.jpg**



Los **ficheros de coordenadas** obedecen a diferentes criterios:

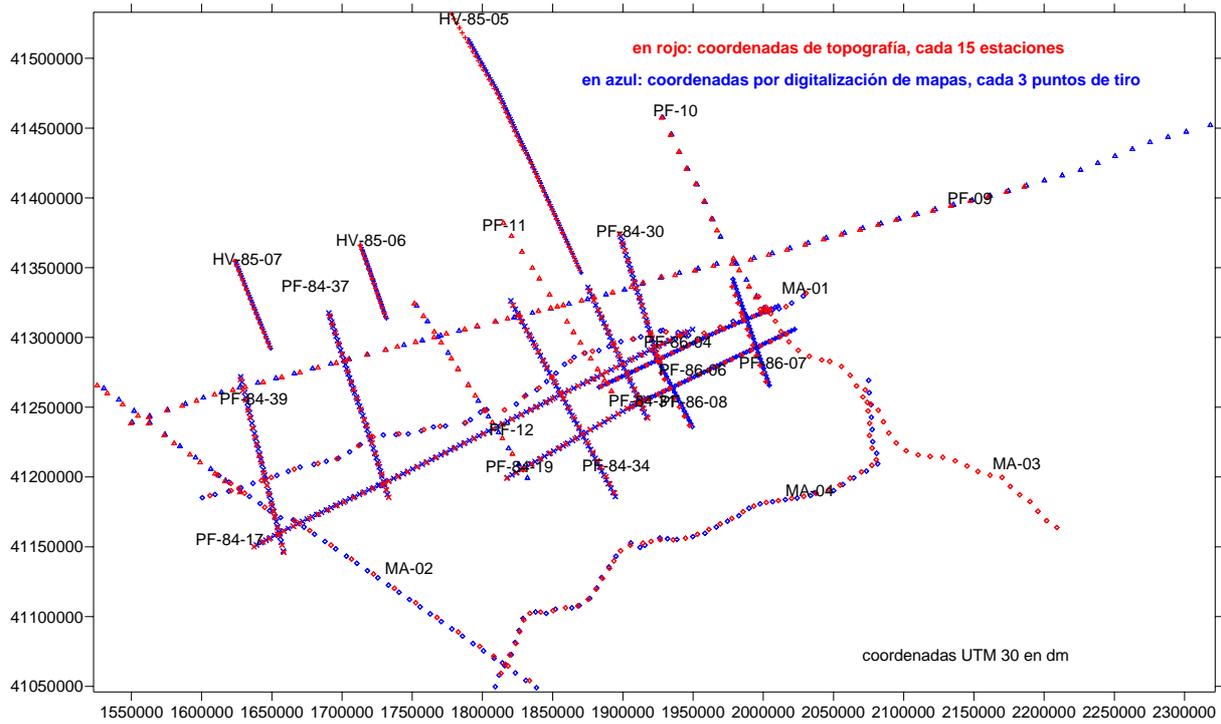


Los que se encuentran en la carpeta **Sigeof** del Anexo II-a(DocuEscanDigita) son ficheros en formato Excel (xls) proporcionados por REPSOL, y contienen las coordenadas de las líneas según los datos topográficos; las columnas originales B y D contienen la Y , X, en UTM 29 en dm; se les han añadido las columnas F,G con coordenadas X,Y en huso 30 en dm, y las columnas H,I con las mismas coordenadas en m. Estos ficheros no tienen indicación de la estación o punto de tiro a donde corresponden las coordenadas, por lo que se ha procedido a la obtención de las coordenadas de los puntos de tiro (PT) por digitalización a partir de los mapas de posición, obteniendo los ficheros en formato txt de la carpeta **ASCII** con coordenadas X,Y UTM 29 en km, que contienen X,Y,PT, y cruces.



A partir de estos ficheros se han preparado otros en formato xls en la carpeta **posición-cortes**, estando en las columnas A,B las coordenadas X,Y UTM 29 en m, en las C,D las coordenadas en huso 30, ambas en m; las columnas H,I tienen las coordenadas huso 30 en dm, para comparación con los ficheros de Repsol.

En el siguiente esquema (Figura 43a), dibujado con los anteriores ficheros de posición, se sitúan las líneas escaneadas y de las que se dispone de coordenadas de sus Puntos de Tiro, comparando las dadas por los topógrafos y las obtenidas a partir de digitalización de los mapas de posición. Las diferencias mayores no superan los 20 m, y son debidas a la deformación de los documentos en papel utilizados para la digitalización.



**Fig. 43a** Posición de líneas sísmicas escaneadas y con información de coordenadas [Fichero posición líneas digitalizadas.srf]

## II.6 Base de datos de SEV

A partir de la información contenida en los Informes consultados se ha preparado una base de datos de los Sondeos Eléctricos Verticales, teniendo en cuenta solamente los efectuados en el acuífero Almonte-Marismas, si bien la base incluye ambos márgenes del río Guadalquivir. Aunque estos datos serán incorporados a la base institucional del IGME (Base SIGEOF), se indica aquí los ficheros creados, así como los datos necesarios para tener en cuenta el alcance de los mismos y su utilización en el presente Proyecto.

La documentación utilizada ha sido los propios Informes recopilados, junto con los estadillos y curvas de campo conservados, a los que se hizo referencia en el apartado I-2.2. Un ejemplo de este tipo de documentos se reproduce aquí:

Auftrag: PROYECTO GUADALQUIVIR  
 Beobachter: WUNSCH Datum: 23.67

Punkt Nr.: I/4 Höhe üb. NN: m

a	L	mV	M. B.	M. B.	a	L	mV	M. B.	M. B.
2	2	J	(mV)	(mA)	2	2	J	(mV)	(mA)
0,5	1,5	460	100	10	25	125	30	1	30
2	2	266	300	30	200	29	1	30	
2,5	120	300	30	250	35	1	100		
3	87	100	30	300	25	1	100		
4	52	100	100	400	23	1	100		
5	41	100	100	500					
6	33	100	300	25	400	21	1	100	
8	26,5	30	300	500	140	3	100		
10	26	3	100	600	30	1	100		
12	25,5	3	100	700	21	1	300		
15	25	3	100	800	17	1	300		
20	30	3	300	900	12	1	300		
25	33	3	100	1000	10	1	300		
30	37	3	300						
40	46	1	100						
50	54	1	100						
10	40	3	30						
50	34	10	100						
60	34	10	100						
75	37	10	100						
100	40	1	30						
125	44	1	30						
150	46	1	100						
175	49	1	100						
200									

Eigenpotential:  
 Bemerkungen: 265 8

El 10/250/3.83 Skizze unseitig

Dirección 45°

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Investigación eléctrica en CADIZ

Fecha 13-11-68 ( eléctrico n.º CAZ Observador Sr. GALACHE

Fórmula: SCH. C. C.

MH	AB	1		2		3	4	5	6	7	8	9	10
		Resista	1	Resista	2								
9,5	1,5	600	300	15,5									
2	2	200	4	19,5									
3	4	4	2,9										
4	1000	1000	38										
6	300	100	58										
8	4	4	76										
10	1000	4	96										
15	4	300	115										
20	300	30	150										
30	4	4	160										
40	1000	30	160										
50	300	300	135										
60	4	4	135										
60	1000	4	135										

Según se ha descrito para cada Informe en el capítulo II-2 y siguientes, a partir tanto de datos de campo (valores de AB-MN-intensidad de corriente-diferencia de potencial), como de curvas en papel bilogarítmico (AB/2-resistividad), se han preparado ficheros tipo **rpd**, que es el formato estándar adoptado en SIGEOF (ficheros de entrada a programas de interpretación de SEV tipo Interpex), según el siguiente ejemplo:

CM1	SCHL	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0
FAO			30-1-69				
HUELVA-SEVILLA				CM1			
MOGUER				40			
GUADALQUIVIR				UNKNOWN			
No.	SPACING	RESISTIVITY		IP			
1	1.5000	4300.0000					
2	2.0000	3100.0000					
3	3.0000	1350.0000					
4	4.0000	550.0000					
5	6.0000	180.0000					
6	8.0000	165.0000					
7	10.0000	160.0000					
8	15.0000	160.0000					
9	20.0000	155.0000					
10	30.0000	160.0000					
11	40.0000	150.0000					
12	30.0000	145.0000					
13	40.0000	140.0000					
14	60.0000	150.0000					
15	75.0000	150.0000					
16	100.0000	120.0000					

Creándose así un fichero **nombreSEV.txt** para cada SEV, agrupados en la Base por informes de origen.

Las coordenadas y cota en m de cada SEV se han obtenido a partir de sus respectivos mapas de posición, cortes geoelectrónicos, etc., y han sido traspasadas posteriormente al sistema UTM Huso 30. Se ha realizado una búsqueda de los sondeos mecánicos que estén cercanos a sondeos eléctricos, encontrándose 50 sondeos mecánicos a una distancia menor de 300 m de algún SEV. Algunos sondeos eléctricos tienen más de un sondeo mecánico cercano. Para cada campaña o zona (Nombre) se ha creado un fichero (**SEVNombre.xls**) de posición de los SEV, incluyendo los datos siguientes:

NOMBRE	DENOMINACIÓN			SONDEOS	HOJA
SEV	X UTM 30	Y UTM 30	COTA AUTOR	ZONA GEOGRÁFICA	Mapa
					INFORME PRÓXIMOS EJERCITO

Los ficheros **Constantes.xls** para cada zona contienen los cálculos establecidos para recuperación de los valores de los estadillos.

Las campañas así preparadas son las siguientes (Tabla en fichero **SEVrps.xls**):

Área	Denominación	Fichero de posición	cantidad	nº Informe
Reconocimiento previo: Perfil 1	1	SEVPerfil135559	24	35559
Perfil 2	2	SEVPerfil235559	19	35559
Marisma P.Doñana	MD	SEVMD35559	37	35559
Marismas El Rocío	MR	SEVMR35559	38	35559
Niebla	N	SEVN35559	44	35559
Campaña IGME 1967	L	SEV40063	52	40063
Moguer-Almonte	P (Moguer)	SEV40070	30	40070
Puntal	CD	SEVMarismas1970	21	IGME-1970
Complementos Moguer	CM	SEVCM	49	Astier1970
Interfaz dulce-salada	TS	SEVmuroAstier1970	16	Astier1970
<b>margen oeste del Guadalquivir</b>				
Alcala de Guadaira	A	SEVA35559	4	35559
Perfil 3	3	SEVPerfil3	34	35559
Perfil4	4	no hay	30	35559
Perfil5	5	no hay	31	35559
Marismas los Palacios	MP	SEVPalacios35559	53	35559
Marismas Sanlúcar	MS	SEVSanLucar35559	16	35559

Esta tabla está contenida en el fichero **SEVrpd.xls**. En total se han recuperado 16 campañas, con 498 SEV.

Se hace notar que no existen datos que permitan la recuperación de los valores medidos en campo de los SEV de la Campaña efectuada por Lerici en 1963 para la C.H.G., ni de los efectuados en 1988 por INTECSA dentro del Proyecto "Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina" (Ref. 40.347). La situación de los SEV recuperados está representada en la Figura 43.

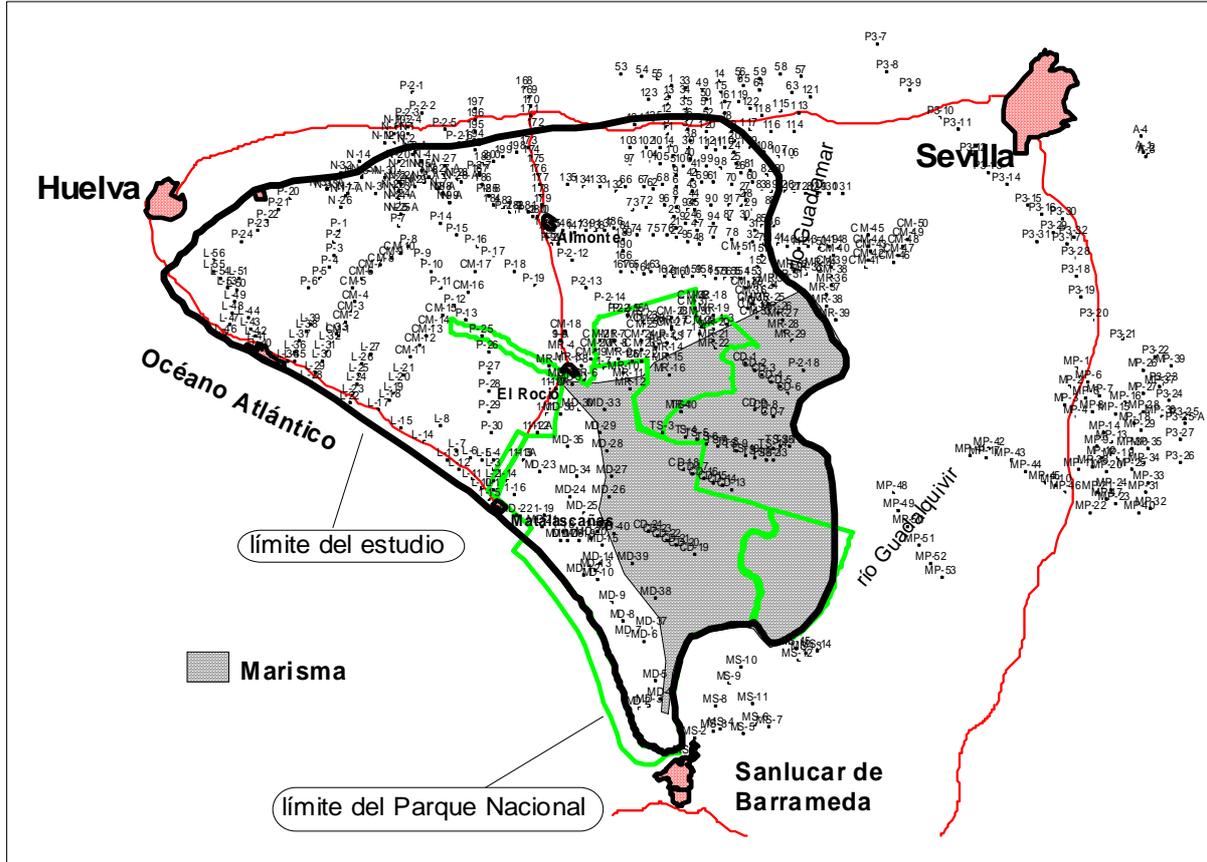


Fig. 43b. Posición de todos los SEV recuperados y cuyos datos han sido trasladados a formato digital. [fichero PERFILES(todosSEV).xls, mapaPosicionSEV.srf]

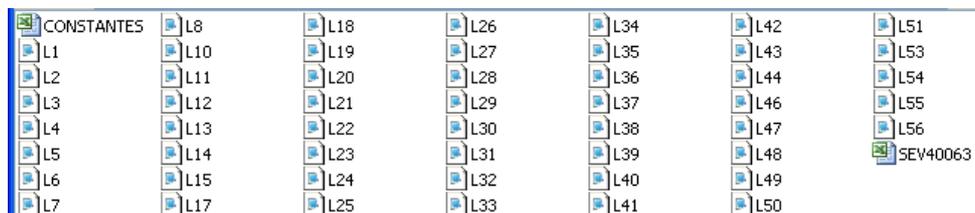
Se han generado además tres ficheros con el conjunto de los datos:

- **PERFILES(todosSEV).xls** (nombre, X,Y,Z)
- **SEVdonanaOeste.xls** (que contiene sólo los que se encuentran al Oeste del Guadalquivir)
- Las interpretaciones (resistividad-profundidad) han sido recuperadas según se describe en el apartado II-2, incorporándose todas a un mismo fichero: **SEV-INTERPRETACIÓN.xls**

Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-b(Base Datos SEV):



Para cada zona existen los ficheros rpd., Constantes y de posición (ejemplo para la zona L):



Sobre el trabajo efectuado de creación de los ficheros digitales \*.rpd se hacen las siguientes observaciones:

**SEV DE LA ZONA MOGUER–ALMONTE** (del "Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva)", realizado por F. Esteban en junio de 1968, Ref. 40070):

- Los SEV tienen la denominación M. Los data set tienen sin embargo la denominación MOGUER. Aparecen en el plano de situación del informe de Astier 1970, con la letra P.
- Los datos de apertura de electrodos son de AB/2 y de MN/2.
- En estos estadillos, al igual que en los de Arcos, no están los datos reales de intensidad y voltaje, sino que figuran las escalas a las que se midieron, por lo que no pueden comprobarse los valores de resistividad.
- A partir del sondeo número 12 el nombre se cambia de Moguer por Almonte, pero todos pertenecen a la misma campaña, por lo que se han agrupado bajo el nombre de Moguer, ya que pertenecen al informe mencionado anteriormente.

**Zona CM:**

- al igual que en el caso de los SEV de Arcos y de Moguer, en los estadillos de campo de los archivadores I y V los valores están sólo por la escala de lectura de los aparatos, por lo que no puede comprobarse los valores de resistividad que figura en los estadillos.
- En el sondeo CM2 vienen dos valores de resistividad. Se ha optado por el valor de la columna de la derecha.
- El sondeo CM14 tiene una curva de campo que no se puede ajustar a una curva modelo.
- No se ha considerado el SEV CM42, debido a que sólo tiene lecturas hasta en AB/2 de 8 metros, ni el SEV CM43, al que le faltan medidas y además no tiene anotado el azimut.
- El CM49 tampoco tiene apuntado el azimut.

**SEV SURESTE DE HUELVA (COSTEROS) (SEV L del plano de Prakla, 1968):**

- Los datos que aparecen en los estadillos son MN y AB, por lo que se ha pasado a AB/2 en la creación de los ficheros \*.rpd.
- Algunos cálculos de la resistividad están mal escritos ya que les falta en algunos casos un dígito.
- Los resultados de la resistividad están redondeados, por lo que los datos calculados no son los que figuran en los estadillos, sino los que se han pasado a los ficheros rpd.
- Al SEV L41 es casi imposible ajustarle las curvas teóricas.
- No todos los sondeos llevan la misma apertura de electrodos, sobre todo los MN.
- En el SEV L49 hay un punto que se desvía. No se sabe si la Intensidad es 14,3 o es 143 (con esta Intensidad, el punto no se desviaría tanto).

- Al no existir comas en los estadillos pueden haber errores en el cálculo de las resistividades, aumentando o disminuyendo en escala de 10.
- La resistividad en L54 MN=5 Y AB=60, está mal calculada en el estadillo.
- En el sondeo L34 se ha corregido el último valor de la resistividad.
- El punto del L46 AB=0.5 y MN=30 es muy ruidoso.
- La resistividad que viene en el estadillo L11, para MN=0.5 y AB=4 es de 3750, pero su recalcu da 4178.
- En el SEV L28, para AB = 10, no se sabe si tomar como intensidad 215 o 42. Además en este sondeo está especificado un 1/2.
- En el SEV L26, los valores de resistividad en algunos casos no coinciden con los que se han recalculado con los valores de intensidad y voltaje que vienen en los estadillos. Además existen signos de interrogación en los valores obtenidos para AB = 400 y 600.
- El recalcu de los valores de resistividad que figuran en los estadillos se ha hecho mediante hoja de cálculo en EXCEL, que figura en los correspondientes ficheros **CONSTANTES.xls** para los de la zona L y P.

## II.7 Adaptación de la base de sondeos mecánicos

### II.7.1 Bases de partida

A) El equipo de la Universidad de Barcelona (posteriormente de Cartagena) participante en el presente Proyecto ha facilitado la **Base\_Doñana.mdb** y **pozos.mdb** en Acces, con 877 sondeos organizados por su origen:

<b>FAO (estudio)</b>	Bajo Guadalquivir) BG , multirejilla (85 sondeos)
<b>IARA (Plan</b>	ALMONTE-MARISMAS) I,III,IV,V, M, AM , multirejilla (471 sondeos)
<b>IARA</b>	multirejilla (47 sondeos)
<b>ICONA</b>	(multirejilla) (10 sondeos)
<b>LAGUNAS</b>	(sector El Abalarío) y sondeo estudio nitratos (El Tejar),monorejilla (13 sondeos)
<b>UNIV. COMP</b>	LUTENSE DE MADRID(nido, monorejilla)(2 sondeos)
<b>MAPA IGME</b>	Nº 1018 (El Rocio)(4 sondeos)
<b>SGOP</b>	Red piezométrica CHG, nido,monorejilla (88 sondeos)
<b>CGS</b>	red piezométrica CHG,nido, monorejilla (60 sondeos)
<b>BOLIDEN</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar) (19 sondeos)
<b>FINCA DEL</b>	QUEMA (4 sondeos)
<b>CHG-1998</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar) (11 sondeos)
<b>EMGRISA</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar) (27 sondeos)
<b>CHG-1999</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar) (27 sondeos)
<b>CHG-1999</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar; sondeos barrera geoquímica) (7 sondeos)
<b>ITGE-1999</b>	(estudio del Guadiamar-Aznalcóllar)Feder, (1 sondeo)

Conteniendo los siguientes datos:

**inventario CHG, sondeo, toponimia, organismo, profundidad, UTM: X(29), UTM: Y(29), cota (m), cota Mulhacen, longitudM-longitudG, latitud, fecha de realización, disponibilidad de litología.**

Extraído de Acces y pasado a Excel, este fichero se ha denominado **MM.xls**. Las coordenadas UTM en huso 30 (**UTM: X(30), UTM: Y(30)**) se han añadido posteriormente, dando lugar al fichero **MM30.xls**. La transformación de coordenadas del uso 29 al 30 se ha hecho mediante el programa Arc/Info, apreciándose en ocasiones diferencias importantes entre las coordenadas de un mismo sondeo en ambas bases, que han sido incorporadas en los datos del libro **basefinal.xls**, añadiendo las columnas de diferencias en X y en Y encontradas.

La situación de estos sondeos se indica en la Figura 44:

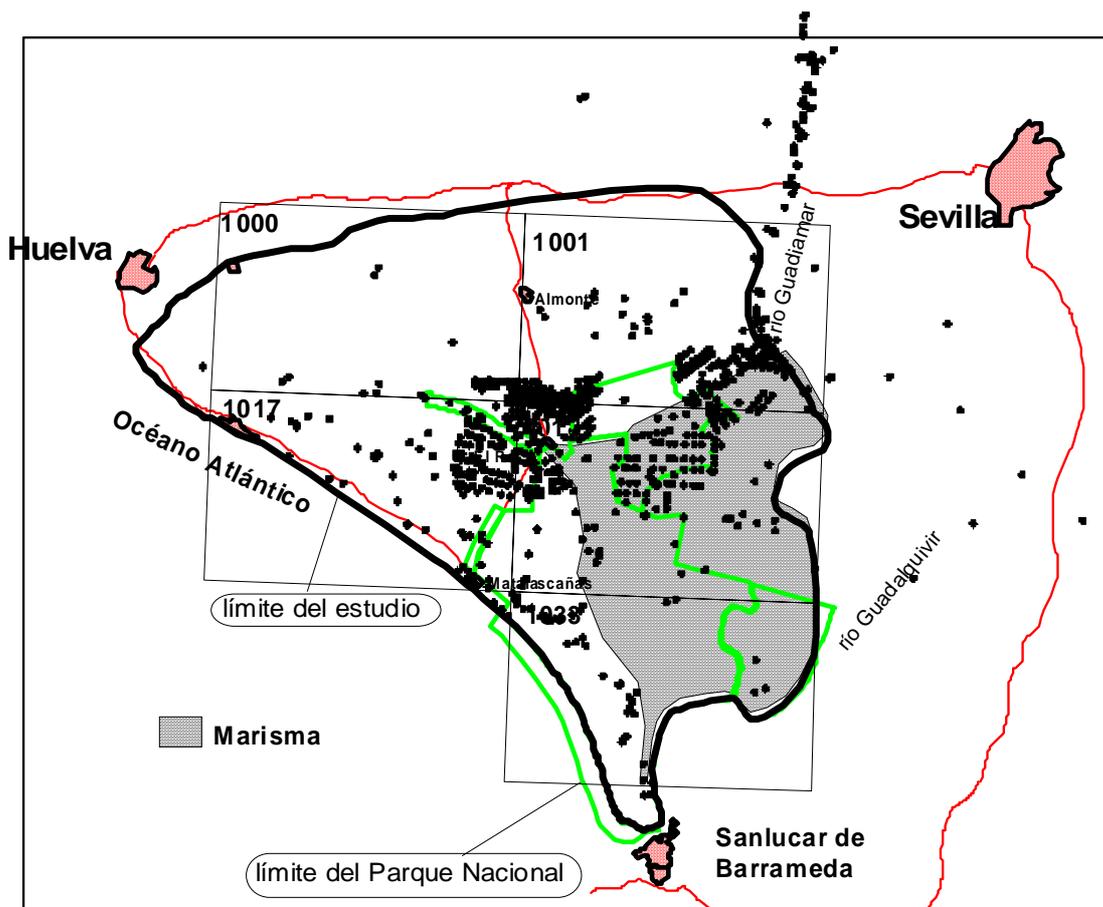


Fig. 44. Situación de los sondeos mecánicos existentes en la base MM30 [fichero MM30]

B) Se ha dispuesto también de los sondeos de la Base del IGME de puntos de agua, con 2394 sondeos, que contiene los siguientes datos:

**Inventario, sondeo, profundidad, UTM: X(29), UTM: Y(29), UTM: X(30), UTM: Y(30), cota, disponibilidad de litología,** así como indicación de la naturaleza (sondeo, pozo o piezómetro)

Se encuentra recogida en el fichero **CHG\_IGME\_COMPLETADAS.xls**, libro **IGMECOMPLETADA**. Este fichero tiene además el libro **CHGCOMPLETADA**, que es la base MM30, sin separación por proyectos (incluidos en la columna "proyecto"), y de la que se han eliminado los datos relativos a la longitud, latitud y fecha (prácticamente vacía en el fichero original). La situación de los sondeos de la base del IGME queda reflejada en la Figura 45:

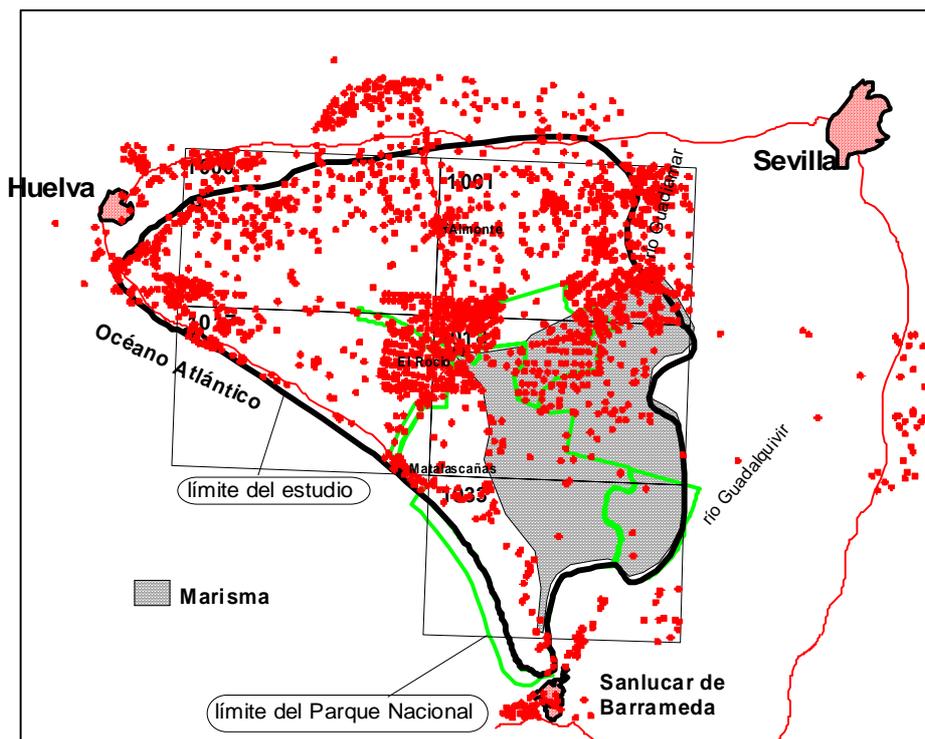


Fig. 45. Situación de los sondeos mecánicos existentes en la base CHG\_IGME\_COMPLETADAS.xls, libro IGMECOMPLETADA.

## II.7.2 Proceso de filtrado

Las bases originales se han sometido a un proceso de filtrado, para establecer los sondeos comunes a ambas bases, homogeneizar la información, y dejar sólo los sondeos dentro del área de trabajo y con información litológica, eliminado además de la Base MM los que no tienen coordenadas. A los datos resultantes del filtrado anterior, se les ha aplicado un límite de profundidad, desechando los sondeos que no tengan una profundidad mayor de 20 m, con el siguiente resultado:

### RESULTADO DEL FILTRADO DE LAS BASES DE DATOS

	TOTAL	Con coordenadas	Total en zona de proyecto	Total en zona columna litológica	En zona, con columna y prof >20 m
<b>IGME</b>	2394	2394	1975	889	509
<b>MM (CHG)</b>	877	828	750	624	538
<b>TOTALES</b>	3271	3222	2725	1513	1047

La distribución por hojas del MTN 1/50.000 de estos sondeos queda recogida en el siguiente cuadro:

**TABLA RESUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SONDEOS EN LAS HOJAS TOPOGRÁFICAS DE LA ZONA**

	Total sondeos (*)	Sondeos IGME	Sondeos MM	Sondeos mismo nº inventario
Hoja 10-41	254	238	16	10
Hoja 10-42	313	192	121	81
Hoja 11-41	425	225	200	76
Hoja 11-42	375	136	239	91
Hoja 11-43	101	55	46	37
Hoja 11-44	45	43	2	2
<b>TOTALES</b>	1513	889	624	<b>297</b>

(\*) Las bases de datos que se han utilizado son las que ya están filtradas según el criterio de existencia o no de columna litológica. Estos resultados se obtuvieron antes de aplicar el filtro de profundidad

Los detalles de los sondeos correspondientes a cada hoja se encuentran en los diversos libros del fichero **SONDEOS-HOJAS.xls**

### **II.7.3 Base final**

Para la obtención de la base común final, se ha tomado como base partida la Base IGME con información litológica, a la que se le han añadido posteriormente los sondeos de la base MM que no estuviesen recogidos en la del IGME. Existen un total de 297sondeos comunes a ambas bases, habiéndose verificado además que tuvieran el mismo número de inventario, sus coordenadas, cota y profundidad en ambas bases. Esta verificación genera unos resultados que, en ocasiones son anómalos:

- Sondeos con el mismo nº (por ejemplo 104280059), presentan diferencias en coordenadas que pueden ser muy altas, del orden de los 10 km, tanto en las X como en las Y.
- Diferencias en la profundidad de hasta 149 m (104280062). El punto en la base IGME tiene una profundidad de 177, y en la del MM es de 28.

- También en la medida de la cota hay diferencias llegando incluso a ser de 35 m en el sondeo 104280047.

El fichero definitivo para su uso en el proyecto, que contiene todos los sondeos disponibles es **Basefinal.xls**, con los siguientes datos:

**Base de datos origen,**  
**nº inventario,**  
**sondeo,**  
**toponímica,**  
**origen(Proyecto),**  
**organismo,**  
**diferencia de profundidad entre bases originarias,**  
**indicación de si tiene más de 20 m (filtro>20m),**  
**profundidad,**  
**diferencia de coordenadas X,**  
**X UTM 29,**  
**diferencia en coordenadas Y,**  
**Y UTM 29,**  
**X UTM 30,**  
**Y UTM 30,**  
**diferencia de cotas,**  
**cota,**  
**disponibilidad de información litológica,**  
**nº hoja 50.000.**

El **Libro>20 m** de este fichero se ha obtenido por filtro del libro **Basefinal**, eliminado los sondeos con profundidad inferior a 20 m. Además se han suprimido los sondeos provenientes de la base MM, cuando ya se encontraban en la base IGME. Consta de 806 sondeos con los siguientes datos:

**nº inventario,**  
**sondeo,**  
**toponímica,**  
**origen(Proyecto),**  
**organismo,**  
**profundidad,**  
**X UTM 29, Y UTM 29,**  
**X UTM 30, Y UTM 30,**  
**cota,**  
**nº hoja 50.000**

Puede considerarse el fichero definitivo para uso en este Proyecto, y la posición de los sondeos queda reflejada en la Figura 46.

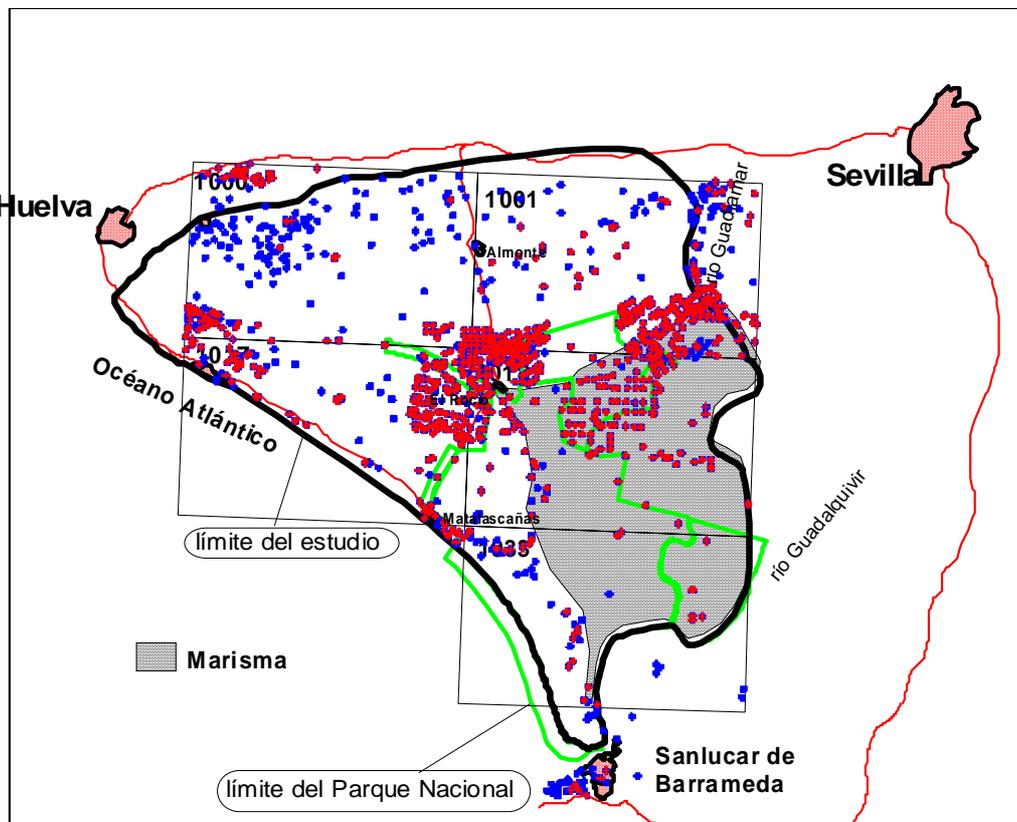


Fig. 46. Situación de los sondeos mecánicos existentes en la base Base Final (azul) y libro final > 20 (rojo).

**TABLA RESUMEN DE LOS DATOS DE LA BASE FINAL DE LOS SONDEOS**

Sondeos no comunes dentro de la zona y con columna

	<b>IGME final</b>	<b>MM final (*)</b>	
	889	327 (624-297)	
<b>TOTAL</b>	<b>1216 (1513-297)</b>		Base final.xls (hoja 2 "Base final")

Sondeos no comunes dentro de la zona, con columna y profundidad mayor de 20 m.

	<b>IGME final &gt; 20</b>	<b>MM final &gt; 20 (*)</b>	
	509	298	
<b>TOTAL</b>	<b>806</b>		Base final.xls (hoja 1 "Base > 20")

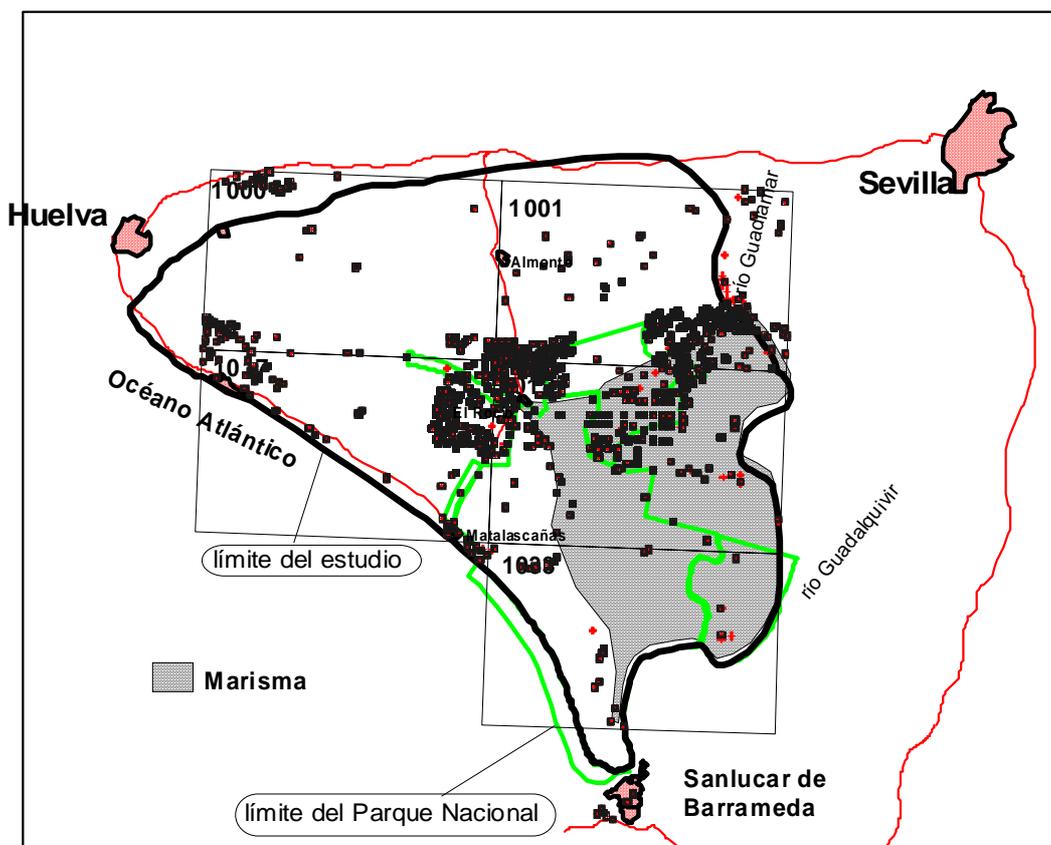
(\*) Los sondeos que eran comunes a ambas bases de datos, se eliminaron de la base MM

## II.7.4 Baselitológica.xls

A los sondeos de la base **final >20** se les ha incorporado la información litológica (cuando se dispone de ella), con la información de profundidad y litología de cada capa. Para los sondeos procedentes de la base del IGME se ha utilizado la litología que se facilitó con dicha base, sin embargo, cuando el sondeo también se encontraba en la base MM, se ha utilizado la litología proveniente de esa fuente, que tienen una columna más completa. Con el total de sondeos de ambas bases de datos que cumplen las condiciones establecidas y que no están repetidos, se ha realizado una base lo más completa posible con los datos de litología que se tienen (en la base de datos original existen un total 57 sondeos de los que, aunque esté indicada la disponibilidad de litología, en realidad no existen datos litológicos en la base facilitada). El resultado de esta base litológica está recogido en **BASE LITOLOGIA.xls**, que consta de los siguientes datos:

**nº inventario igme, sondeo, toponímica, organismo, profundidad, X UTM 29, Y UTM 29, X UTM 30, Y UTM 30, cota, litología, Profundidad inicial, Profundidad final, Cota inicio, Cota final**

Y su posición queda reflejada en la Figura 47.



**Fig. 47. Situación de los sondeos mecánicos existentes en el fichero baselitológica.xls**

El siguiente cuadro resume las características de los diferentes ficheros generados:

			IGME COMPLETADA		BASE FINAL		
	Base_ doñana	MM30	IGME COMPLETADA	CHG COMPLETADA	BASE FINAL	BASE>20	base Litologica
inventario CHG	X	x		x			
nº inventario IGME			x		x	x	X
Sondeo	X	x		x	x	x	X
toponimia	X	x		x	x	x	X
organismo	X	x		x	x	x	X
PROYECTO				x	x	x	
Profund.	X	x	x	x	x	x	X
dif. Profundidad					x		
Filtro >20m					x		
dif. X UTM					x		
dif. Y UTM					x		
UTM: X(29)	x	x	x	x	x	x	X
UTM: Y(29)	x	x	x	x	x	x	X
UTM: X(30)		x	x	x	x	x	X
UTM: Y(30)		x	x	x	x	x	X
dif. Cota					x		
Cota (m)	x	x	x	x	x	x	X
Cota Mulhacen	x	x					
longitudM- longitudG	x	x					
Latitud	x	x					
fecha realizac.	x	x					
litología disp.?	x	x	x	x	x		
litología							X
Prof. Inicio							X
Prof. Final							X
Cota inicio							X
Cota final							X
Clave							
Hoja 1/50,000					x	x	
columna					x		
Base de datos					x		
Total sondeos	877	877	2394	877	1513	806	799
			3271				

El fichero **SondeosBG.xls** se ha extraído del **BaseFinal.xls**, dejando sólo los sondeos BG.

## II.7.5 Ficheros para base de datos en ARC/VIEW

Se han generado los ficheros adecuados para su utilización dentro del sistema Arcview, proyecto "sondeos\_mecanicos.apr", que llevan los siguientes nombres:

- **Ficheros originales.** Se encuentran los ficheros originales de las bases de datos, uno para la base IGME y otro para la base MM
- **Sondeos Zona proyecto:** resultado del primer paso del proceso de filtrado: eliminación de los sondeos que se encontraban fuera del área de trabajo, la cual engloba la superficie definida por las siguientes hojas topográficas, 10-40, 10-41, 10-42, 11-40, 11-41, 11-42, 11-43 y 11-44.
- **Sondeos litología:** resultado de eliminar aquellos que en las bases de datos indica que no tenían información litológica..
- **Sondeos litol 20.** resultado de eliminar del conjunto de sondeos resultante aquellos sondeos con una profundidad menor de 20 m.
- **Base final:** Con las dos bases filtradas (excepto el filtro de profundidad), se realizó una comparación de ambas (por nº de inventario) para poder eliminar (por convenio, de la base MM) los sondeos con el mismo nº. En esta base se encuentran los sondeos que están dentro de la zona, que tienen litología y que no son comunes.
- **Base final 20.** Esta es la base definitiva, una vez aplicados todos los criterios de filtrado y eliminados los sondeos de la base MM que estuviesen repetidos

Las extensiones de los ficheros que están en cada uno de los directorios es la siguiente:

- .dbf. fichero Dbase, es donde se recogen las base de datos
- .sbn; .sbx; .shp: Estos tres tipos de ficheros son los que nos permiten la representación cartográfica de los sondeos con el programa Arcview.
- .avp. Extensión de los ficheros que representan una paleta de símbolos y de colores.

NOMBRE FICHERO	Sondeos totales	COMENTARIOS
<i>Igme_original.dbf</i>	2394	Listado original de sondeos IGME. Todos los sondeos vienen con coordenadas
<i>Chg_original.dbf</i>	828	Listado original de sondeos MM excepto los que no tienen coordenadas
<i>Total sondeos zona.dbf</i>	2655	Total de sondeos de ambas bases que están en las hojas topográficas del proyecto (6 hojas)*
<i>Total zona litologia.dbf</i>	1513	Total de sondeos de ambas bases que presentan información litológica
<i>Base final.dbf</i>	1216	Total de sondeos con datos litológicos una vez eliminados de la base MM los sondeos comunes
<i>Total zona litol 20.dbf</i>	1047	Total de sondeos de ambas bases que presentan información litológica y prof >20 m
<i>Base final 20.dbf</i>	807	Sondeos una vez eliminados los comunes que tienen una profundidad mayor de 20 m.

(\*) - Las hojas en las que se sitúa la zona del proyecto son la 10-41; 10-42; 11-41; 11-42 y 11-43 y 11-44

**Todos los ficheros se encuentran en el Anexo II-c(BaseDatosSondeos):**



## II.8 Cuadro general de ficheros generados

En total se han creado más de 749 nuevos ficheros de datos digitales, sin contar las bases de datos de sondeos mecánicos. De estos ficheros 125 son documentos escaneados, 525 son ficheros digitales con valores numéricos extraídos de documentos en papel (estadillos, mapas, etc.), 20 ficheros se han obtenido por digitalización sobre mesa o pantalla de curvas de los mapas en papel, y 79 ficheros se refieren a posicionamiento de líneas sísmicas.

Los 125 documentos escaneados se refieren principalmente (101 ficheros) a cortes geoelectrónicos, curvas de SEV, mapas de curvas de isoresistividad, mapas de posición de la línea de separación entre agua dulce y agua salada obtenidas en distintas épocas y por distintos métodos, mapas de profundidad y cota de la base del acuífero, mapas de espesor de acuíferos, testificaciones geofísicas, cortes geológicos por correlación de sondeos mecánicos, mapas de posición de SEV, mapas de posición de líneas sísmicas y sondeos mecánicos. Otros 24 ficheros son líneas sísmicas.

Los 20 ficheros de digitalización se refieren a líneas de valor de T y otros separadores de la interfase agua dulce-agua salada en distintos trabajos, cotas de la interfase de agua dulce-salada en sectores restringidos, testificaciones geofísicas de sondeos, líneas de cambio de sustrato resistivo tomado como base del acuífero, líneas de cotas del fondo impermeable, isolíneas de espesores saturados y cota de las margas azules.

De los 525 ficheros digitales creados por lectura de datos en documentación, 15 se refiere a ficheros de posición de SEV (coordenadas tomadas de mapas, y cotas tomadas de cortes), 498 ficheros son valores de campo de los SEV recuperados a partir de los estadillos originales, y otros 15 ficheros se refieren a listados de valores asociados a una posición geográfica (coordenadas X,Y) tomados de mapas (profundidad del resistivo, cota del sustrato resistivo, valor de T, resistividad del acuífero, potencia y resistividad de capas según los SEV, principalmente).

Toda esta información queda sintetizada en el siguiente cuadro, clasificado por origen de la información, donde se especifica el nombre de cada fichero generado, su contenido y su formato. Se ha añadido además el número de las figuras del presente Informe donde se ha utilizado cada fichero. La utilización del formato DIN A4 de este Informe no es la óptima para la visualización de la cuantiosa información gráfica generada, para lo que se remite al lector a los correspondientes anexos informáticos.

<b>CUADRO GENERAL DE LOS FICHEROS GENERADOS EN LA RECUPERACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA</b>			
<b>2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
4, 6, 15, 34, 93	SEV40063.xls Lxx*.rpd (52 archivos) CONSTANTES.xls	X.Y de mapa de posición del Informe de Prakla 35.559). Cota medida en las secciones geoelectricas del informe de Astier de 1970 (sin ref.). estadiillos de campo estadiillos de campo	X.Y.Z SEVL AB/Z, resistividad recalculo estadiillos
<b>2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
5, 15, 93	SEVPerfil135559.xls		X.Y.Z SEVP1
5, 15, 93	Ix.rpd (24 archivos) SEVPerfil235559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVP2
5, 15, 93	IIx.rpd (19 archivos) SEVMD35559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVMD
5, 15, 93	MDxx.rpd (37 archivos) SEVMR35559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVMR
5, 15, 93	MRxx.rpd (38 archivos) SEVN35559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVN
6, 15, 93	Nxx.rpd (44 archivos) SEVLerici35559.xls: SEVA35559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVLerici X.Y.Z SEVP1
	Ax.rpd (4 archivos) SEVPalacios35559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVP1
	IMPxx.rpd (53 archivos) SEVPerfil335559.xls		AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVP1
	IIlxx.rpd (34 archivos) Vxx.rpd (31 archivos) SEVSanlucar35559.xls		AB/Z, resistividad AB/Z, resistividad X.Y.Z SEVP1
	MSxx.rpd (16 archivos)		AB/Z, resistividad
50	22Perfil-A	fragmento de Anexo 17-Cortes geoelectricos	escaner
54	22Perfile	fragmento de Anexo 22-Cortes geoelectricos	escaner
7, 49, 143, 144, 159	22ProResyTAnexo2.xls	Anexo 2, Mapa de resistencia transversal T. Fichero bis sin SEV Este Guadaluquivir	SEV, X,Y,Z, prof. Resistivo, cota resistivo, T
7, 143, 144, 146, 148, 160	22linea1000deTAnexo2.txt	Anexo 2, Mapa de resistencia transversal T.	digitalización de línea T=1000
8, 49, 51	22ProfCotasSustratoAnexo3.xls	Anexo3, mapa cotas profundidad del techo del sustrato zonas N y Lercil	SEV, X,Y,Z, prof. Sustrato,cota sustrato
164	22Anexo70-77-testfBG6yBG7.xls	testificaciones (PS, R, R16" y R64") de sondeos BG6 y BG7	digitalización

2.3 Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier, 1967. Sin Ref.		
figuras	nombre del fichero	descripción
10	23PL-4.tif	Plano 4: Interpretación de Sondeos Eléctricos: curvas isorresistivas para AB=600 m
144, 146, 148, 160	23linea5000TdePL4.txt	digitalización X,Y de las curvas de T=5000
11	23PL-4BIS.jpg	Plano 4 con diferente posiciones de la línea T=5000
144, 146, 148, 160	23linea5000TdePL4b.txt	escaner
9, 94, 145	23F5.jpg	digitalización X,Y de las curvas de T=5000
12	23F6.jpg	ejemplo de interpretación del SEV MD37
		ejemplo de interpretación del SEV I15
		escaner
		escaner
2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070		
figuras	nombre del fichero	descripción
13, 15,93	SEV40070.xls	formato
	MOGUERxx.rpd (30 archivos)	X.Y.Z SEVL
		AB/2, resistividad
2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.		
figuras	nombre del fichero	descripción
13, 15,34,93146,148,151,151	SEVCD-Marismas1970.xls	formato
	CDxx.rpd (21 archivo)	X.Y.Z SEVL
14, 146, 148, 151,152,155,160,11	25Fig-1.jpg	AB/2, resistividad
	25FIGURA-1.xls	escaner
		digitalización X,Y línea dulce/salada fig. 1
2.6 Interpretation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier, 1970. Sin Ref.		
figuras	nombre del fichero	descripción
15	SEVCM.xls	formato
	CMxx.rpd (49 archivos)	X.Y.Z SEVL
93,144,146,148,151,156,159	SEVMuroAstier1970.xls	AB/2, resistividad
	TSxx.rpd (16 archivos)	SEV.X.Y
17, 99	26PL-1.tif	AB/2, resistividad
		Profundidad y cota de la base del acuífero principal ProfBase, CotaBase
18, 100	26PL-2.tif	escaner
19, 101	26PL-3.tif	escaner
		Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m) EspAcuif
		Resistividad del acuífero principal ResAcui
		Profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales (resistividad<30 ohm.m) ProfEspArcilla
21	26PL-5.tif	escaner
148, 151, 152, 155, 160	26linea2glddePL5.txt	Limite entre agua dulce – agua salada Tlimite
59, 57,55	26AstierPL1-5.xls	datos de PL1 a PL5

96.98	26PL-6.tif	Cortes geoelectricos perfiles 1 a 5	escaner
97	26PL-7.tif	Cortes geoelectricos de perfiles 6 a 10	escaner
16.95	26fig-1.tif	ejemplos de la influencia de la resistividad en la adjudicación de cambio de sustrato	escaner
16.95	26fig-2.tif	ejemplos de la influencia de la resistividad en la adjudicación de cambio de sustrato	escaner
20, 147	26fig-3.tif	relación resistencia transversal-salinidad	escaner
53.55.57	26CambioC1.txt	lineaC2 de cambio sustrato en PL1	digitalización X,Y
53.55.57	26CambioC2.txt	lineaC1 de cambio sustrato en PL2	digitalización X,Y
54	26Perfil-10.tif	fragmento de 26PL-7	escaner
53.57	26SEVinterpretacionAstier.xls	solo los SEV usados en informe 2.6	SEV, X,Y
<b>2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538</b>			
	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripcion</b>	<b>formato</b>
165	27Lucio.cpt	Lucio del Lobo.gamma natural hasta los 100 m	escaner
165	27M-6-5.cpt	M-6-5.gamma natural hasta los 186 m	escaner
	27AM-1.cpt	AM-1 .gamma natural	escaner
	27AM-1RPS.cpt	resistividad y potencial espontáneo hasta 128 m	escaner
	27M-8-14RG.cpt	M-8-14.gamma natural	escaner
	27M-8-14.cpt	resistividad y potencial espontáneo hasta 138 m	escaner
<b>3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.</b>			
	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripcion</b>	<b>formato</b>
	31Map12-2.tif	Posición de SEV (selección )	escaner
	31Map12-4.tif	Espesor de acuífero (suavización de 26PL-2.tif)	escaner
58	31Map12-5.tif	Cota del fondo impermeable(suavización 26PL11.tif)	escaner
60.59	31plano12-5.xls	digitalización curvas del plano 1.2.5	escaner
	sondeosBG.xls	de tabla informe técnico 4	nombre, nº, X,Y,Z, profundidad, piso estrat. Acuífero y del fondo
	31PL-2.tif	PL-2 informe técnico 7; sondeos sectores III, IV y V	escaner
	31Cortes-1.tif	cortes sond. PL2con nivel impermeable y arcillas	escaner
	31Cortes-2.tif	cortes sond. PL2con nivel impermeable y arcillas	escaner
	31Cortes-3.tif	cortes sond. PL2con nivel impermeable y arcillas	escaner
	31Cortes-4.tif	cortes sond. PL2con nivel impermeable y arcillas	escaner

3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.		
figuras	nombre del fichero	descripción formato
22	32PL-14.tif	plano 14. Espesores saturados hasta el fondo del impermeable escaner
	32PL14-curvas.xls	digitalización X,Y curvas plano 14
23	32PL-15.tif	plano 15 (espesores hasta el fondo impermeable) escaner
	32PL15-curvas.xls	digitalización X,Y curvas plano 15
61, 24	32PL-16.tif	plano 16 (cotas del fondo impermeable) escaner
	62 32PL16-curvas.xls	digitalización X,Y curvas plano 16
26	32PL-31.tif	plano 31 de situación de la interfase agua dulce-salada deducida a partir de la salinidad del agua escaner
152,161	32PL31-curvas.xls	digitalización X,Y curvas plano 31
152,161	32PL31-contacto.xls	intersección de la interfase con el fondo impermeable digitalización contacto X,Y plano 31
27	32PL-32.tif	plano 32 de cotas de la interfase en profundidad deducida a partir de la superficie piezométrica escaner
153	32PL32-curvas.xls	digitalización X,Y curvas plano 32
63, 64	32PL41-curvas.xls	plano 41 (cotas del fondo impermeable para todo el acuífero) Mapa no escaneado digitalización X,Y curvas plano 41
	32PL-14-cortes.tif	plano 14b posición de cortes geológicos V y H escaner
	32PerV-1.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
65	32PerV-2.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-3.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-4.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-5.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-6.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-7.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerV-8.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerH-1.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerH-2.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerH-3.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
102,311	32PerH-4.tif	cortes de los planos 24 a 29 escaner
	32PerH-5.tif	cortes de los planos 24 a 29 + zona de dunas escaner
66	32perfilDunas.tif	cortes zona de dunas escaner
25, 158	32CroquisInterfase.tif	esquema conceptual interfase agua dulce-salada escaner
102,166	32Sondeo M-1-6bis.xls	testificación resistividad y PE M-1-6 bis digitalización
62,64	32sondeosTECHO IMPERMEABLE.xls	cota del fondo impermeable de tabla de Anexo 1 dato añadido al fichero de BaseFinal de sondeos mecánicos
	32estrati-permeab.tif	cuadro de permeabilidad por pisos escaner

<b>3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
	33-Mapa.tif	mapa general a 1/100.000	escaner
2, 28, 125	33Plano-4.tif	plano 4: Corte geológico I-I	escaner
2, 28, 125	33Plano-5.tif	plano 5: corte geológico II-II	escaner
3, 29, 48	33Plano-6.tif	plano 6: cota de margas azules	escaner
51, 57, 60, 64	33PLANO6Curvas.xls	a partir de original 33Plano6curvas.txt	digitalización X.Y. cota margas plano 6
	33Plano-7.tif	plano 7: potencia de niveles permeables saturados	escaner
48	33-1992cotamargasazules.tif	mismo mapa que 33Plano-6.tif	escaner
	33-1992posicion-conHojas.tif		escaner
	33-1992posicionProvincial.tif		escaner
	33-1992posicionCortes.tif		escaner
	33-1992totomarismas.tif		escaner
<b>4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
	fichero 41PL-1.tif	plano posición	escaner
	41corte.tif	corte geoelectrico	escaner
<b>4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
30, 149	42Plano-1.tif	plano 1 posición SEV medidos y los CD de 1969	escaner
	42Plano-2.tif	isorresistivasAB/2 300 de SEV medidos 1982	escaner
	42Plano-3.tif	isorresistivasAB/2 500 de SEV medidos 1983	escaner
32, 150	42Plano-4.tif	isorresistivasAB/2 700 de SEV medidos 1984	escaner
	42Plano-5.tif	isorresistivasAB/2 300 de SEV CD de 1969	escaner
	42Plano-6.tif	isorresistivasAB/2 500 de SEV CD de 1969	escaner
32, 150	42Plano-7.tif	isorresistivasAB/2 700 de SEV CD de 1969	escaner
	31 42Plano-8.tif	cortes geoelectricos	escaner
	33 42Plano-9.tif	perfil electromagnético Genie	escaner
	42Figura-1.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1969	escaner
	42Figura-2.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1970	escaner
	42Figura-3.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1971	escaner
	42Figura-4.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1972	escaner
	42Figura-5.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1973	escaner
	42Figura-6.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1974	escaner
	42Figura-7.tif	curvas de campo SEV de este informe y de CD 1975	escaner
	42Figura-8.tif		escaner

<b>4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
	43Situacion.tif	escaner
	43PERFIL.xls	X,Y,Z, potencia-resistividad capas. Corte en libro 2
<b>4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
34, 35, 156,157	44PERFILES.xls	X,Y,Z, potencia-resistividad capas de SEV y SEDT. Cortes en libros del fichero
<b>4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
167	45SONDEO-2.xls	prof.gamma natural, diámetro, densidad, neutrón digitalizado la testificación de sondeo S-2
<b>4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad fisico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
36	46Fig-1.cpt	figura 1 Corte geológico a partir de sondeos mecánicos
	46PL-2.cpt	Plano 2.Sectores y situación corte geológico.
	46PL-5.cpt	Plano 5. Situación de sondeos testificados.
37,154, 170,308	46Fig-5.tif	Figura 5- Situación interfase agua dulce-salada en 1994
155,162,313	46Fig-5.xls	escaner
	46Fig-2.tif	Figura 2 del Anexo 3. Posición sondeos testificados
	46Prof-25.tif	figura Anexo 3 isolinias de conductividad y concentración a 25 m
	46Prof-50.tif	figura Anexo 3 isolinias de conductividad y concentración a 50 m
	46Prof-75.tif	figura Anexo 3 isolinias de conductividad y concentración a 75 m
	46Prof-100.tif	figura Anexo 3 isolinias de conductividad y concentración a 100 m
	46TablaSondeos.xls	relación de sondeos testificados en este Inf.
		escaner
		digitalización curvas figura 5
		escaner

<b>4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
	43Situacion.tif	plano situación de SEV	escaner
	43PERFIL.xls	interpretación SEV	X,Y,Z, potencia-resistividad capas. Corte en libro 2
<b>4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
34, 35, 156,157	44PERFILES.xls	datos del informe	X,Y,Z, potencia-resistividad capas de SEV y SEDT. Cortes en libros del fichero
<b>4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
167	45SONDEO-2.xls	digitalizado la testificación de sondeo S-2	prof.,gamma natural, diámetro, densidad, neutrón
<b>4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963</b>			
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>descripción</b>	<b>formato</b>
36	46Fig-1.cpt	figura 1 Corte geológico a partir de sondeos mecánicos	escaner
	46PL-2.cpt	Plano 2.Sectores y situación corte geológico.	escaner
	46PL-5.cpt	Plano 5. Situación de sondeos testificados	escaner
37,154, 170,308	46Fig-5.tif	Figura 5- Situación interfase agua dulce-salada en 1994	escaner
155,162,313	46Fig-5.xls		digitalización curvas figura 5
	46Fig-2.tif	Figura 2 del Anexo 3. Posición sondeos testificados	escaner
	46Prof-25.tif	figura Anexo 3 isolineas de conductividad y concentración a 25 m	escaner
	46Prof-50.tif	figura Anexo 3 isolineas de conductividad y concentración a 50 m	escaner
	46Prof-75.tif	figura Anexo 3 isolineas de conductividad y concentración a 75 m	escaner
	46Prof-100.tif	figura Anexo 3 isolineas de conductividad y concentración a 100 m	escaner
	46TablaSondeos.xls	relación de sondeos testificados en este Inf.	

5. Datos de campañas de sísmica de reflexión. "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España", 1990, Ref. 29036. e Hidrocar.		
figuras	nombre del fichero	descripción formato
38	Sis4k.tif	mapa posición líneas sísmicas anteriores a 1972, cuadrante 4k escaner
	Sis4k-1.tif	ochoantes 4k-1, a partir 1972 escaner
	Sis4k-2.tif	ochoantes 4k-2, a partir 1972 escaner
39	Sis4k-4.tif	ochoantes 4k-4, a partir 1972 escaner
40	Sis-PL20.jpg	mapa PL-20 Tomo I, isobatas de la base del terciario escaner
41	Sis-PL6.jpg	isócronas horizonte próximo discordancia miocena escaner
	Sis-Sigeof	imagen pantalla SIGEOF imagen
42	SondeosHirocarburos.xls	15 sondeos X,Y,Z, prof., cota de las margas azules, operadora, año, lito, diagrf.
72	XYsondeosHidro.xls	9 sondeos que cortan las margas azules escaner
	nombreLinea.jpeg (24 ficheros)	secciones sísmicas MA,PF escaner
	nombreLinea. Txt (27 ficheros)	ficheros posición puntos de tiro PT X,Y (km), PT digitalizados de los mapas de posición de líneas sísmicas.
75	nombreLinea.xls (21 ficheros)	a partir de los anteriores X, Y (UTM 29 y 30), PT, cortes, tiempo margas, equidistancias
74	nombreLineas.xls (31 ficheros)	ficheros SIGEOF, no informan de PT X,Y puntos de la línea
73	Moguer-1.tif	fragmento de PL-13, ref. 29036 escaner
80	posicionlineasdigitalizadas.srf	comparación X,Y digitalizadas y de topo. mapa Surfer

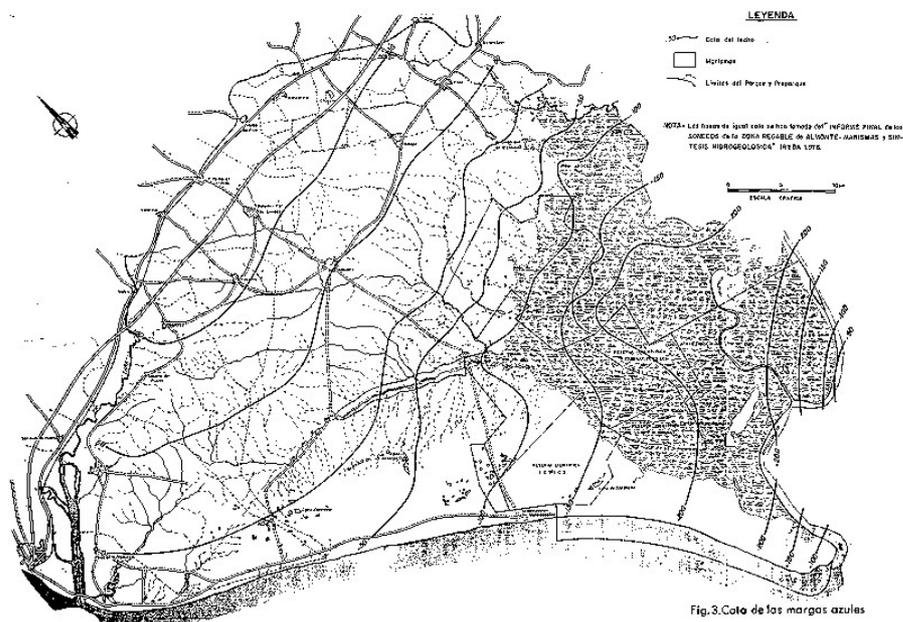
<b>BASES DATOS SEV</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
	SEVNombre.xls	X,Y,Z, 16 ficheros
	nombrexx.rpd	AB/2-resistividad 499 ficheros
	CONSTANTES.xls	valores de campo para cada SEV
	SEVrpd.xls	recalculo de estadillos para cada zona
43b, 104	PERFILES(todosSEV).xls	información campañas recuperadas
	SEVdonanaOeste.xls	X,Y,Z
	SEV-INTERPRETACION.xls	X,Y,Z
	mapapositionSEV	X,Y,Z, espesor-resistividad de cada capa interpretada
		mapa Surfér
<b>BASES DATOS SONDEOS MECANICOS</b>		
<b>figuras</b>	<b>nombre del fichero</b>	<b>formato</b>
44	MM30	original de U.B.
	45 CHG_IGME completados	original de IGME
42,46,104,161	Base-final>20	fusión de ambas
	47 base litologica	selección con litología
143, 159, 160, 161	sondeosBG	extraído de Base-final



### III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

#### III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules

Uno de los motivos por los que se propuso llevar a cabo el presente proyecto es la revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules, refiriéndose por tal al mapa presentado en la **Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1982**, reproducido en la Figura 48, y **Publicación IGME de la colección Informes “Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. 1992** (reedición revisada del publicado con el mismo nombre en 1982), ambos basados fundamentalmente en el Informe **Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649**.



**Fig. 48. Mapa de cotas del techo de las margas azules, según “Hidrogeología general del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. IGME. 1992.[fichero 33-1992cotasmargasazules.tif]**

Este documento ha sido el más conocido por los diferentes grupos de trabajo en el acuífero, atribuyendo su trazado a datos de sondeos mecánicos y geofísicos (SEV), y en lo que sigue del presente Informe vamos a denominarlo “Mapa de las margas azules-1982”. Demostraremos que este documento está extraído del **“Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-**

**Marismas y síntesis hidrogeológica” IRYDA. 1976.**, sin que en su confección se haya tenido nunca en cuenta la información geofísica. Para este análisis se va a utilizar la información descrita en el capítulo I (Recopilación de la Información) del presente Informe.

Las dudas sobre la fiabilidad del “Mapa de las margas azules-1982” surgieron en 1999, al manifestarse, mediante datación de muestras de sondeos realizados en las zonas de Marismillas, que el Mioceno comenzaba sobre los 75 m de profundidad, en lugar de a los 175 m previstos por el mencionado mapa. Sin embargo, los datos del sondeo Malandar realizado en las mismas fechas, que también sitúan el Mioceno a esa profundidad, si que son concordantes con el referido mapa. Este hecho puso de manifiesto la necesidad de aclarar a qué profundidad se encuentra realmente el tránsito entre los limos margosos del techo del Mioceno (tradicionalmente llamados margas azules), y el relleno pleistoceno-holoceno de las marismas, formado por gravas, arenas, limos y arcillas.

El esquema geológico aceptado desde el comienzo de las investigaciones en el acuífero Almonte-Marismas (*Informe Guadalquivir Project de PRAKLA, 1968. Ref. 35559*) se basa en que sobre el basamento Paleozoico que aflora en el norte (en la alineación Alcalá del Río a Niebla), se sitúa directamente el Cenozoico, con una formación de areniscas o conglomerática denominada “Mioceno de Base”. La presencia del Mesozoico solamente se conoce por pequeños afloramientos de calizas en el área de Niebla, también detectadas en el Nor-Oeste por el sondeo “El Asperillo”, cerca de Almonte. Sobre el “Mioceno de Base” se encuentra una potente formación arcillosa o “Margas azules”, del **Tortonense**, que se continúan hasta el Plioceno Inferior, constituyendo en fondo impermeable regional de las demás formaciones suprayacentes. Son de origen marino profundo y con algunos niveles subordinados de limos y arenas a techo, de potencia variable, que aumenta de Norte (donde afloran) y Oeste hacia el Suroeste, donde alcanzan los 1200 m, según sondeos de Hidrocarburos. La situación general es que sobre estas margas, se sitúan unos limos basales del Plioceno medio, formado por alternancias de arenas bioclásticas y lumaquelas de fósiles (ostreas), que son depósitos de facies deltaica, de origen marino más o menos profundo a somero, y potencia variable. Los sondeos ponen de manifiesto que el techo de las margas azules presenta una topografía suave, descendiendo hacia el Sur, formando un surco de dirección NE-SW que viene a coincidir aproximadamente con el área cubierta por las marismas. Su cota pasa de tener 100 m s.n.m. en el norte, a -160 y -250 m bajo las marismas (Figura 48), con una vaguada bajo el arroyo de La Rocina y otra bajo el río Guadiamar, posiblemente condicionadas por fallas. En consecuencia, la potencia total del acuífero varía de 15-20 m en el norte a 80-100 m en el sur, incrementándose en las marismas hasta los 200 m. Para verificar el contenido del aludido mapa, se va a proceder a analizar la información progresivamente conocida sobre la base impermeable del acuífero en los informes recopilados, y que se encuentra en los documentos efectuados por Prakla en 1968, la interpretación de los SEV realizada posteriormente en 1970, el proyecto de la FAO de 1972 y el informe final de sondeos de la zona regable del IRYDA de 1976.

### III.1.1 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA. 1968. Ref. 35559

Los valores de resistividad asignados en este estudio de 1968 a las formaciones entonces consideradas son los siguientes:

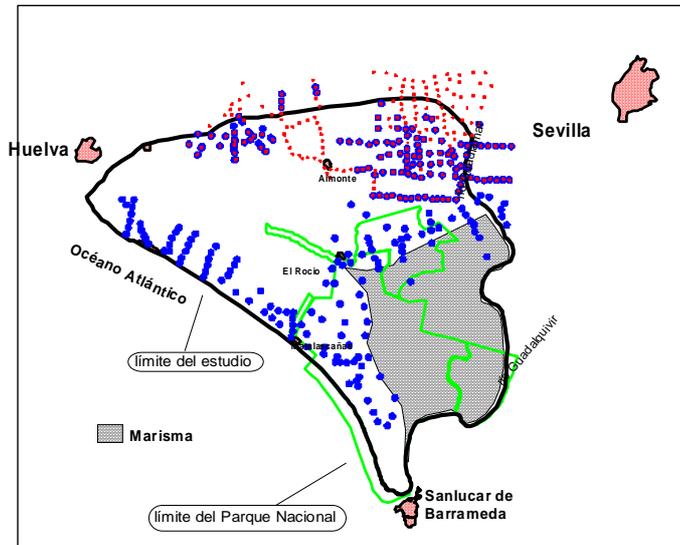
Cuaternario	Dunas de arena (franja costera)	100-500 ohm.m
Mio-Plio-Cuaternario	Arenas	Más de 20 ohm.m
Mioceno	Calcarenitas	50-200 ohm.m
Mioceno	Margas azules	Menos de 10 ohm.m
Mioceno Inferior o de Base	Conglomerados	100 ohm.m
Basamento Paleozoico		Más de 400 ohm.m

de lo que se deduce que el contraste de resistividad entre el sustrato impermeable de las “Margas azules” y los sedimentos arenosos suprayacentes, sólo es alto en la franja costera (Cuaternario), por lo que la diferenciación entre el sustrato y las arenas del acuífero presenta con frecuencia algunas incertidumbres.

La interpretación de los SEV puso de manifiesto la existencia de una capa resistiva aflorante o a muy poca profundidad, que se consideró como acuífero, ya que por debajo se sitúa un paquete de baja resistividad (en general inferior a 10 ohm.m), asignado a formaciones margosas de baja permeabilidad. La resistividad del tramo resistivo, en realidad formado por varias capas, depende del contenido en arcillas, por lo que las características del acuífero se expresaron mediante su Resistencia Transversal T (producto de potencia por resistividad). Para ello, sólo se utilizaron los tramos con valores de resistividad superior a 20 ohm.m, considerando los valores de T inferiores a 1000 como representativos de la existencia de agua salada (ver Capítulo I). El mapa de T, reproducido en la Figura 7 del Capítulo I, distribuye el área desde zonas de alto valor hidrogeológico (arenas de la costa con  $T > 10.000$ , debidas a resistividades del orden de más de 400 ohm.m y potencias de más de 100 m), hasta zonas al norte con  $T < 5000$ , debido a capas de potencia no superior a los 50 m y resistividades del orden de 40 ohm.m. Valores con  $T < 1.000$  se atribuyen a zonas donde la salinidad o arcillosidad es relevante. Los autores del trabajo consideraron que la línea  $T = 1.000$  situada a la derecha del río Guadalquivir marcaba el límite entre agua dulce- agua salada.

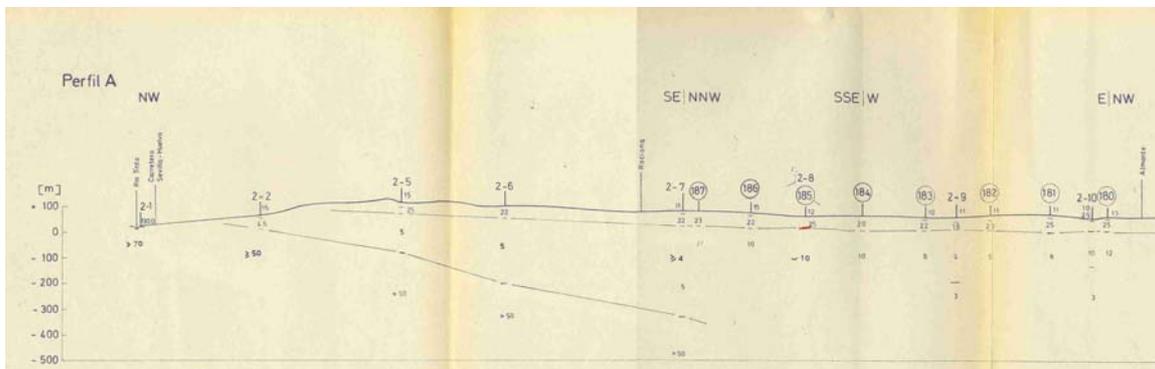
En este mismo trabajo se trazó un mapa de cotas del techo del sustrato impermeable (Figura 8, Capítulo I), que sólo se refiere la zona norte. En la Figura 49 se han situado los SEV utilizados por PRAKLA para construir cada mapa. La recuperación de los valores de las cotas del techo del impermeable para el resto de la zona de estudio sólo podría intentarse a partir de la resistencia transversal T si se conociera el valor de resistividad utilizado en cada punto; ante la incertidumbre que

esto presenta, se ha optado por no construir dicho mapa, ya que podría dar lugar más a confusión que a aclarar cuestiones.



**Fig. 49. SEV utilizados para trazar los mapas hidrogeológicos: en azul para definir la profundidad del techo del acuífero y su resistencia transversal [fichero 22ProResyTAnexo2.xls]; parte de los SEV de las zonas Lerici, N, L, MD, MR y MP; en rojo, los empleados para calcular la profundidad del techo del sustrato impermeable y su cota [fichero 22ProfCotasSustratoAnexo3.xls]: parte de los SEV de Niebla y campaña Lerici.**

En la Figura 50 se expone un ejemplo de la interpretación de los SEV con la que se construyeron estos mapas, donde se pone de manifiesto que el sustrato conductor considerado se trata efectivamente de las margas azules, que afloran en el SEV 2-2. Las isolíneas de las cotas de las margas azules construidas con esta interpretación están representadas en la Figura 51. En primer lugar, destaca el brusco salto que se presenta, tanto de orientación como de valores, en la unión entre las zonas de SEV de la campaña Lerici y de la zona de Niebla. El autor del mapa remarca en el documento original, que el sustrato pasa de ser las margas azules en el Este, a calizas en el Oeste (Figura 50). Se trata por lo tanto de un cambio de criterio, que no encontramos justificado, por el que no se puede tener en cuenta la parte occidental del mapa.



**Fig. 50. Ejemplo de cambio de criterio en la selección del sustrato, entre la zona de Niebla y el Este. Las margas azules afloran bajo el SEV 2-2, por lo que el sustrato aquí interpretado son dichas margas, excepto en la zona de Niebla, donde se ha señalado como sustrato la base de las calizas mesozoicas.[fichero 22Perfil-A.jpg]**

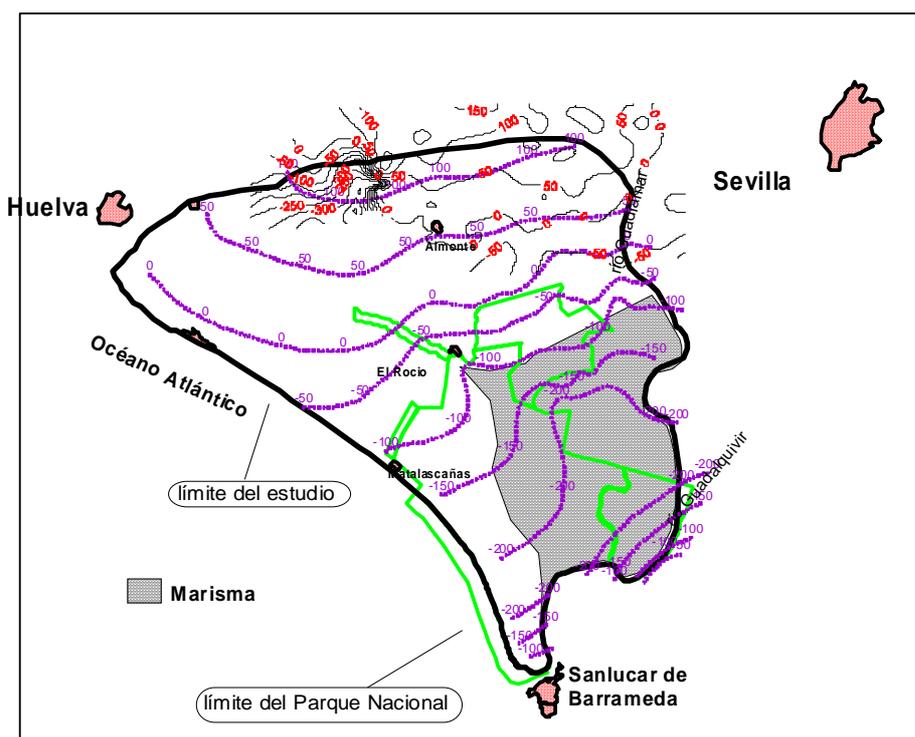


Fig. 51. Mapa de cotas del techo del sustrato impermeable según la interpretación de SEV de la zona Norte del acuífero (isolíneas en color negro [22ProfCotasSustratoAnexo3.xls] ), junto con el Mapa de las margas azules-1982 (isolíneas en morado [33PLANO6Curvas.xls]).

Considerando, por lo tanto, sólo el trazado de la parte Este con mayor detalle en la Figura 52, se aprecia una coincidencia en el trazado de las isolíneas 0 y 50 del mapa de 1982 (color morado), con el de las isolíneas -50 y 0 respectivamente del mapa obtenido por interpretación de los SEV (color negro). Las isolíneas 100 de uno y 50 del otro tienen un trazado algo diferente, aunque coincidente en su extremo occidental. En consecuencia, existe una diferencia de 50 m entre las superficies definidas por ambos mapas, estando más elevado el de 1982.

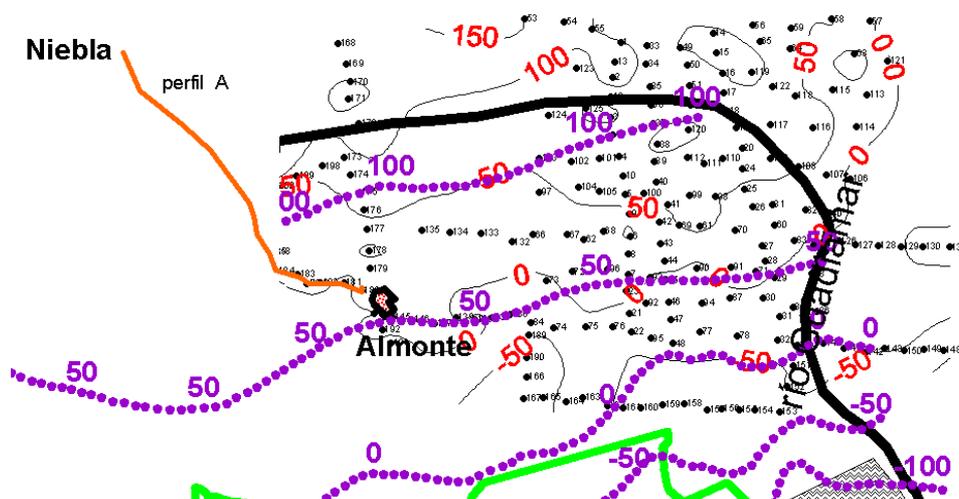


Fig. 52. Detalle de la figura 51, con indicación del perfil de la figura 50 y posición de los SEV utilizados.

Sin embargo, como queda reflejado en el corte geoelectrico de la Figura 50, las cotas del techo del fondo impermeable a que se refiere esta interpretación son con seguridad las margas azules aflorantes en Niebla, por lo que, en principio, **puede afirmarse que la superficie reflejada por el mapa de 1982 no pertenece a dichas margas, o al menos, no ha sido deducida de esta interpretación de los SEV.**

### III.1.2 Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.

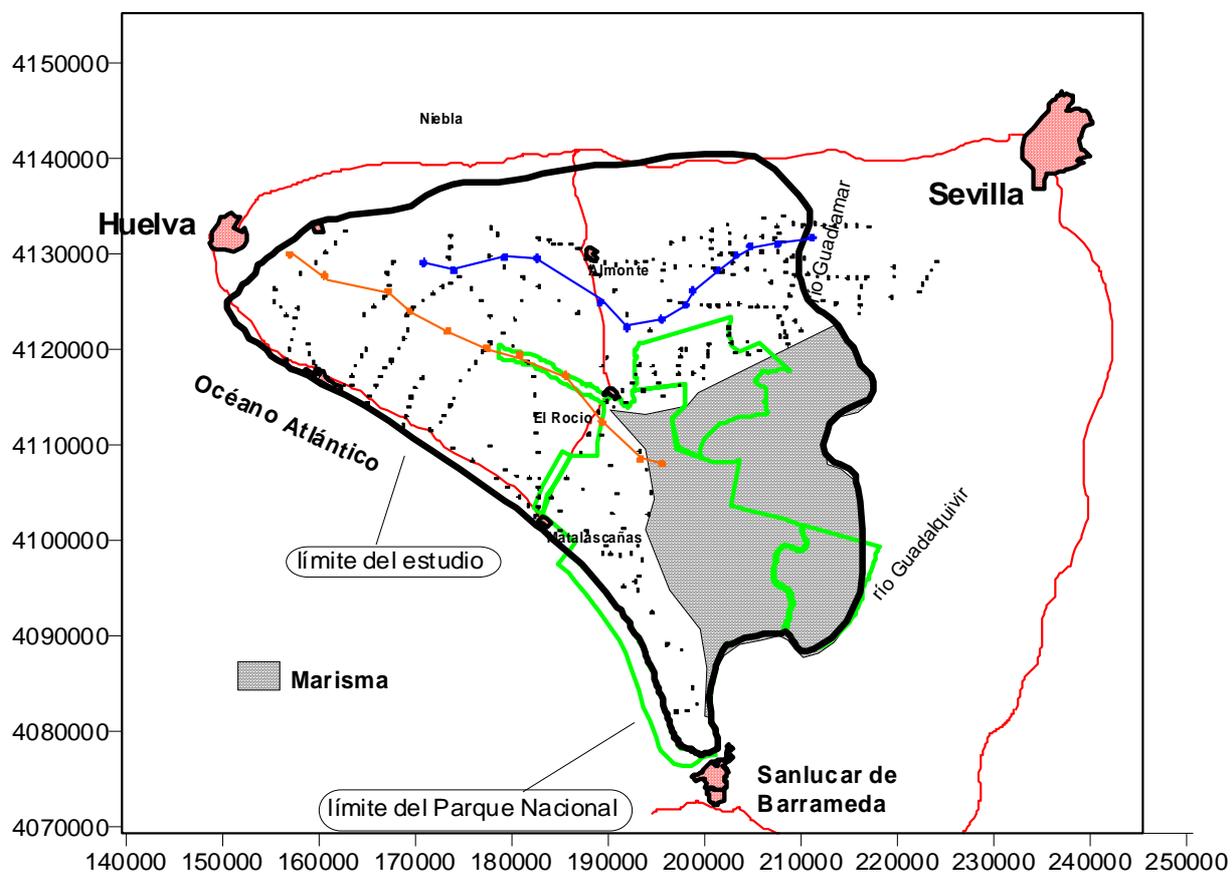
En este Informe aparece un nuevo mapa de la cota de la base del acuífero principal, definida como mapa de cotas de la base de la formación resistiva principal o acuífero. Este mapa fue efectuado por reinterpretación de los SEV realizados para el Proyecto Guadalquivir, tomando como impermeable de base la aparición de un tramo conductor tras el resistivo. Aunque en esta ocasión se consideró el conjunto de los SEV, y no cada campaña por separado, no se tuvieron en cuenta la totalidad de los SEV, sino sólo los representados en la Figura 53. La interpretación se apoya en 19 sondeos mecánicos que cortan el sustrato impermeable, de los cuales sólo se dispone de testificación de resistividad en uno y de resistencia monoelectrónica en otro (no se dice cuales son estos sondeos). Del conjunto de la información disponible se ha preparado el siguiente cuadro de valores de resistividad:

Litología	Valores más frecuentes y sondeos mecánicos utilizados	Otros valores
<b>Arenas sahelenses y villafranquienses</b>	<b>100 ohm.m</b> (1000-137, 1000-138, 1001-13 y 1001-188)	<b>150 ohm.m</b> (1001-11)
<b>Arenas de dunas</b>	<b>150 ohm.m</b> (1033-37), 250 ohm.m (1017-42, 1033-34)	<b>450 ohm.m</b>
<b>Arcillas o margas netas</b>	<b>Inferior a 10 ohm.m</b>	
<b>Arcillas arenosas, arenas arcillosas</b>	<b>10- 100 ohm.m</b>	

Aunque los tramos de arenas son en general de mayor resistividad que los margosos, el aumento en el contenido de arcillas en un tramo arenoso puede hacerle tan conductor como el sustrato margoso impermeable.

Se tomaron como impermeables las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m y permeables las que tienen más de 80 ohm.m. Cuando se dispuso de sondeos mecánicos próximos a los SEV, se ha tomado como profundidad del sustrato impermeable la dada por la columna litológica, de tal forma

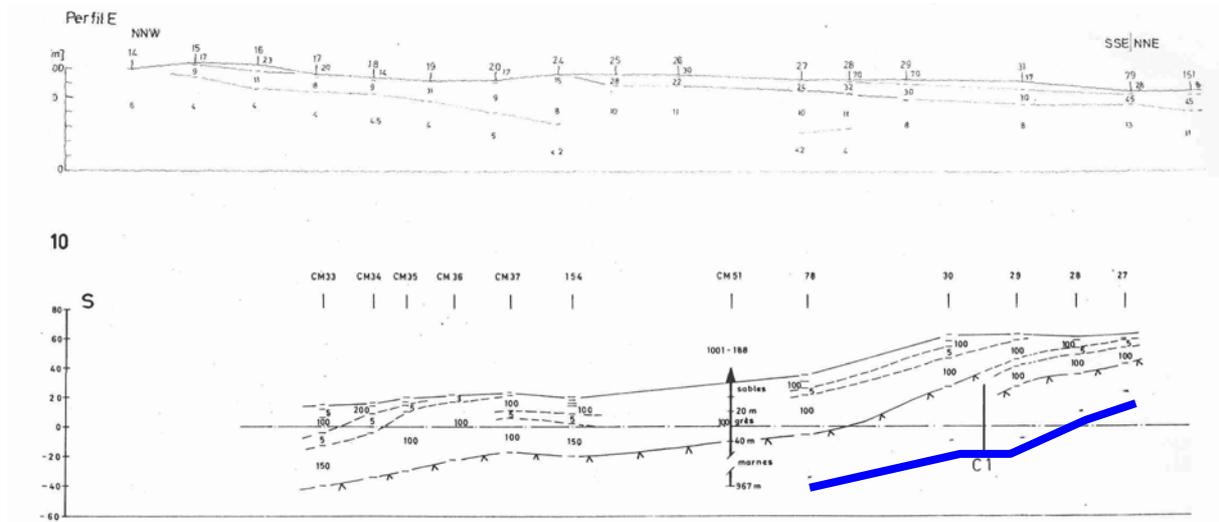
que en esta interpretación el sustrato impermeable no es siempre las margas azules del Mioceno, sino que, en ocasiones, corresponde también a las arcillas arenosas sahelinenses o villafranquienses (Plioceno superior).



**Fig. 53. Conjunto de SEV reinterpretados por Astier en el informe de 1970. Las líneas azul y naranja indican los límites tomados para cambio de horizonte o litología de la base del acuífero. [ficheros 26SEVinterpretaciónAstier.xls, 26CambioC1.txt, 26CambioC2.txt]**

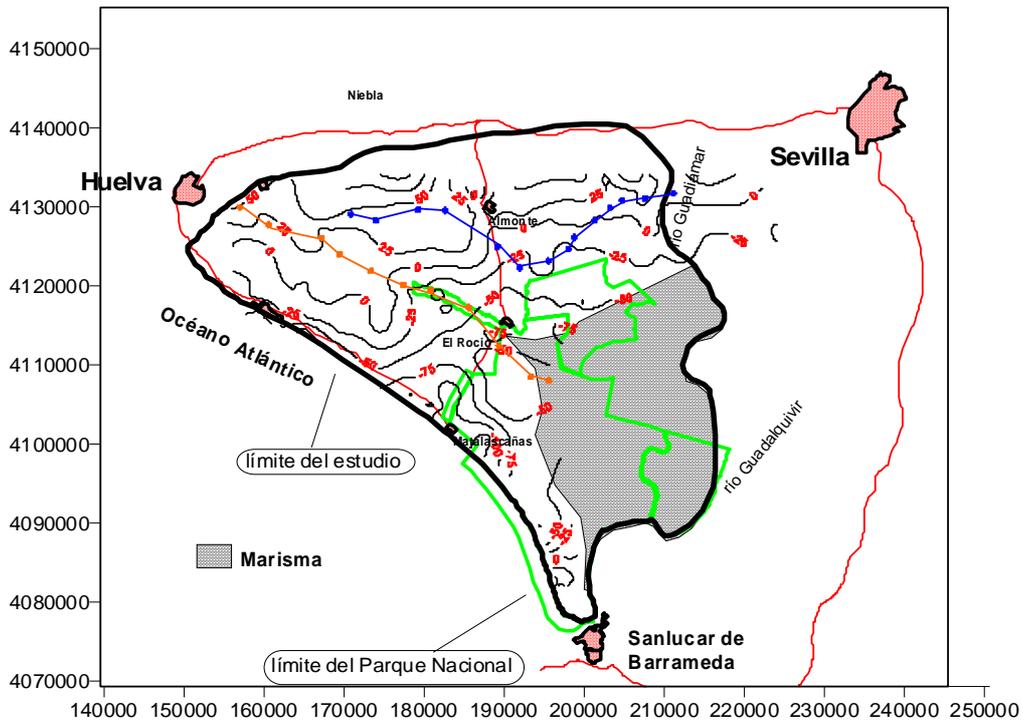
En la interpretación se hace notar que se ha cambiado dos veces de sustrato conductor, al irse desplazando desde el norte hacia el sur (Figura 53). Esto se justifica (Astier) porque, debido a que la cuenca aumenta de potencia y buza en general hacia el Sur, al dirigirse en esa dirección van aflorando las capas más recientes; cuando éstas son resistentes y lo suficientemente potentes, acaban por ocultar en los SEV las capas resistentes más antiguas, lo que unido a que hacia el Sur las arenas sahelinenses y villafranquienses disminuyen de importancia y son reemplazadas por arcillas, justifica el cambio de sustrato conductor [ver más detalles en Capítulo I, 2.6 del presente Informe]. En la Figura 54 se pone un ejemplo del cambio de marcador a que se refieren estas interpretaciones. La diferente interpretación dada a los mismos SEV en ambos perfiles de la Figura 54 es perfectamente compatible con los datos de campo, a pesar de las considerables diferencias en la profundidad otorgada al último tramo conductor. Esto se ha comprobado en el presente trabajo construyendo las correspondientes curvas AB/2-resistividad para los modelos profundidad-resistividad de las

interpretaciones de 1968 y 1970, resultando en curvas idénticas, dado que para estos SEV no se han conservado los datos de campo originales.



**Fig. 54.** Parte inferior: perfil 10 de la nueva interpretación (1970), donde se aprecia el criterio utilizado para indicar un cambio en el sustrato impermeable. Al norte de C1 se trata de las margas azules; al sur arcillas arenosas probablemente sahelenses. Parte superior: perfil E según la interpretación utilizada en 1968 (cada división de la escala vertical es 50 m). La profundidad del basamento de esta interpretación se ha marcado en el perfil 10 de 1970 (línea azul), apreciándose que el basamento ahora considerado se sitúa a cotas más elevadas, incluso cuando se refiere a las margas azules. [ficheros 22PerfilE y 26Perfil-10]

El mapa original de cotas del basamento impermeable [Figura 17 de I-2.6], se ha reproducido en la Figura 55, una vez digitalizados los valores de la interpretación de los SEV.



**Fig. 55.** Mapa de cotas del basamento impermeable efectuado con la nueva (1970) interpretación de los SEV, e indicación de los límites de cada tipo de basamento impermeable utilizado: cambio C1 (azul) y C2 (naranja). [curvas dibujadas con el fichero 26AstierPL1-5.xls, 26CambioC1.txt, 26CambioC2.txt]

El sustrato conductor en el plano PL1 (Figura 55) corresponde a las margas azules al norte del límite del marcador C1, a las arcillas arenosas probablemente sahelenses entre las líneas C1 y C2, y a arcillas más recientes al sur de C2. Por lo tanto, la comparación con el mapa obtenido en el Informe de 1968 sólo puede establecerse para la parte al Norte de C1, siendo poca la superficie común a ambos mapas, representados en la Figura 56. Se aprecia que la superficie definida en 1968 está unos 25 m por debajo de la adoptada en la interpretación de 1970. Esto puede también apreciarse en corte de la Figura 54, donde se han reproducido porciones de perfiles comunes a ambas interpretaciones.

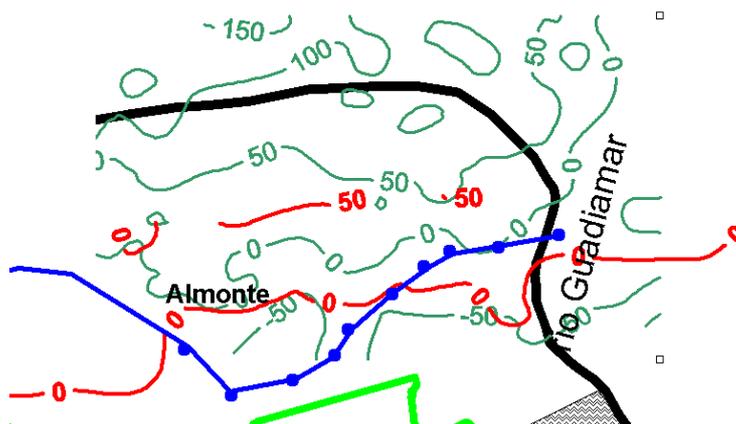


Fig. 56. Cotas del basamento de margas azules según el informe de 1970 (rojo) y 1968 (verde).

Por lo que respecta a la verificación de si esta nueva interpretación de 1970 es la adoptada en el mapa de cotas de 1982, en la Figura 57 se han representado de forma conjunta ambas superficies.

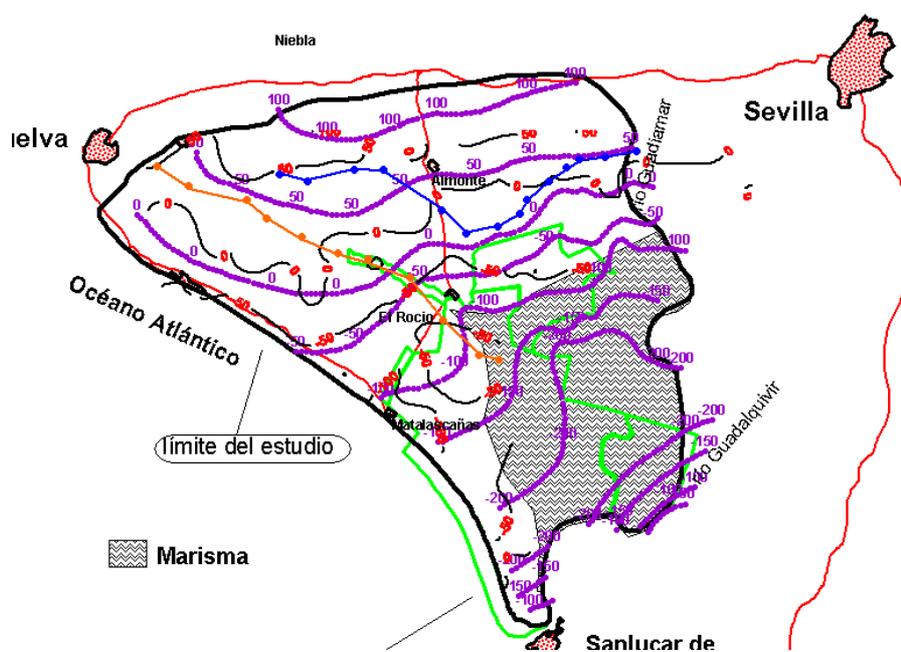


Fig. 57. En color malva, superficie de cotas de las margas azules, según el mapa de 1982 [33PLANO6Curvas.xls]. En color negro, la superficie (que sólo corresponde a las margas azules por encima de la línea azul [26CambioC1.txt, 26CambioC2.txt,]) según la interpretación de los SEV en 1970 [curvas dibujadas con datos de 26AstierPL1-5.xls, correspondientes a PL1].

En la parte Norte, la tendencia en el trazado de las curvas coincide para el intervalo de cotas entre 100 y -50 m de ambos documentos; sin embargo, las cotas dadas por los SEV1970 dibujan una superficie situada unos 25 m por debajo de la dibujada en el mapa de 1982. A partir de la cota -50 m los dos mapas discrepan fuertemente, de tal forma que, por ejemplo, en la barra litoral, mientras que el mapa de 1982 indica cotas de -100 y -200 m, el obtenido de los SEV sitúa la superficie del basamento conductor (que no se trata de las margas azules) entre 0 y -50 m.

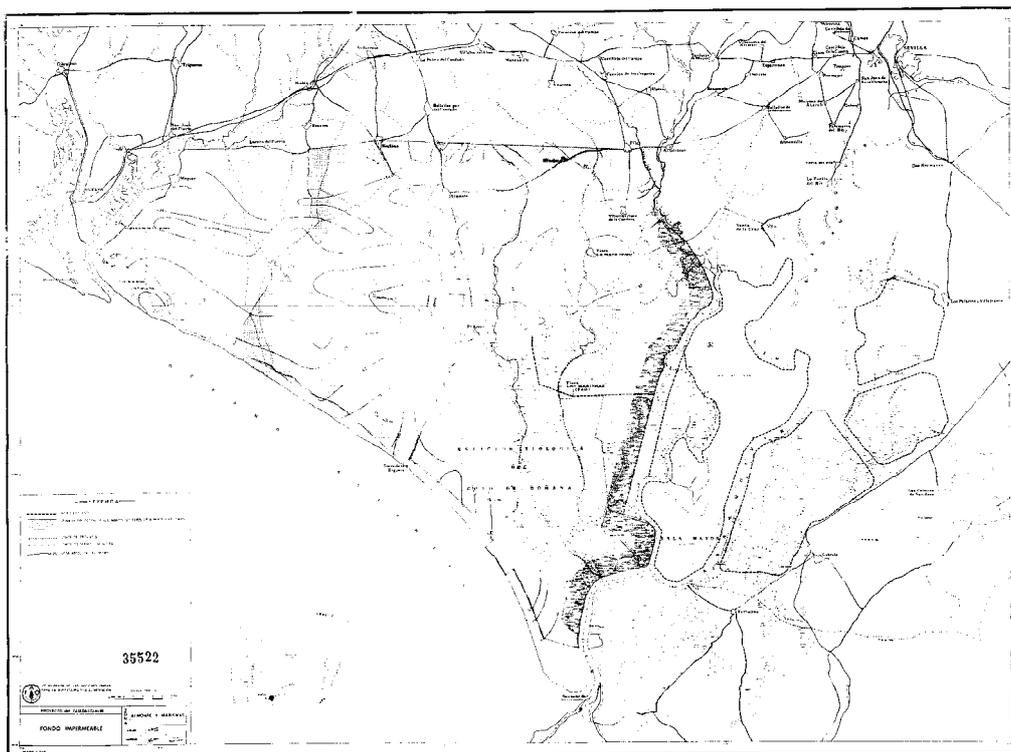
### **III.1.3 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.**

En el **Informe del Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha)** se incluye un resumen de los trabajos geofísicos (SEV), que se refiere a los reinterpretados por Astier en 1970, sin que conste que la información proporcionada por los 68 nuevos sondeos mecánicos efectuados (para reconocimiento geológico e hidráulico, control de calidad del agua y estudio de métodos de captación) fuera utilizada para verificar o reinterpretar los SEV. Sin embargo, con el apoyo de estos sondeos mecánicos, además de descartar la margen oriental del Guadalquivir por ser sus aguas subterráneas fósiles y muy cargadas en sales, se reafirma la consideración de los tramos acuíferos y de los criterios utilizados para definir el sustrato impermeable.

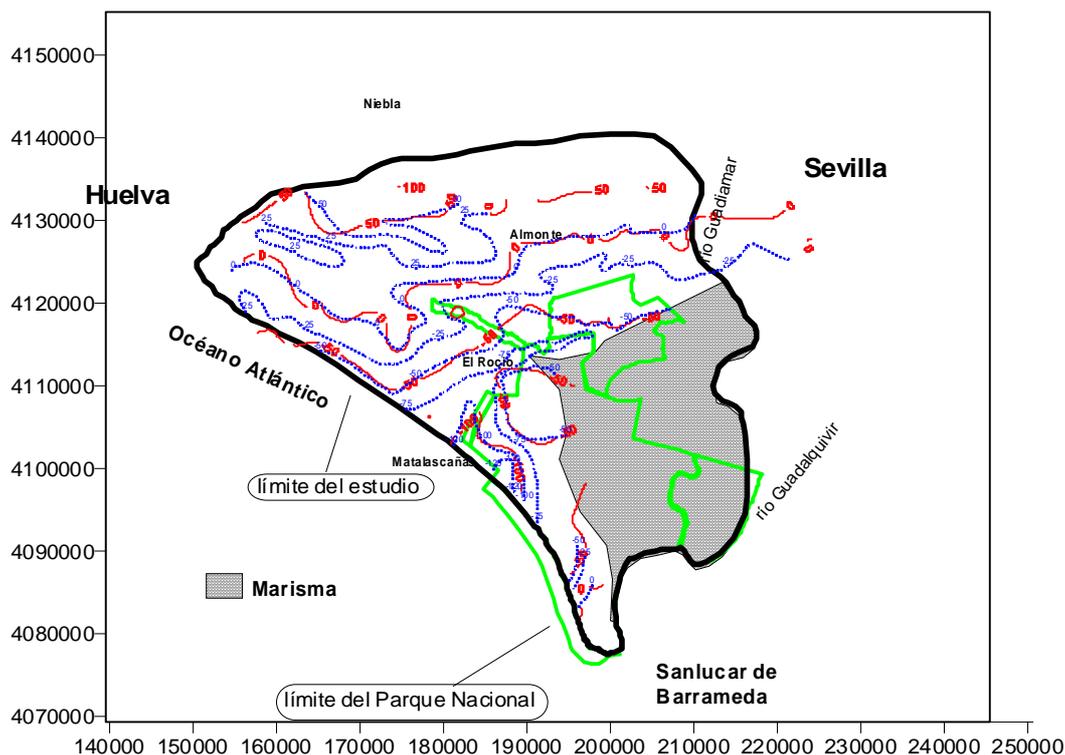
Se definen como tramos acuíferos:

- las arenas sahelenses (“limos basales del Plioceno”), a techo de las margas azules tortonienses, que aumentan desde 20-30 m de potencia al Norte hasta 50-70 m al Sur. Tienen facies variable entre arenas gruesas medias a arenas finas, que pasan a arcillosas en la base, diferenciándose de las margas azules por tener más de 30 ohm.m de resistividad; presentan con frecuencia areniscas de grano fino muy fosilíferas.
- las arenas margosas del Plioceno continental, que recubren el Saheliense, con potencia de 10-20 m al Norte y hasta 80 m al Sur. Cambios de facies muy frecuentes con lentejones de gravas o arenas gruesas y de arcillas con potencia de 2 a 5 m, que abarcan grandes superficies.
- el Cuaternario medio, formado por terrazas fluviales de arenas y cantos rodados más o menos mezclados con arcillas y arenas (10 a 20 m en el río Guadiamar), y el cordón de dunas fósiles (entre El Rocio y Matalascañas) de 30 a 40 m de arenas finas, con estrechos lechos arcillosos.
- El Cuaternario reciente, formado igualmente por terrazas (15 a 30 m) y dunas más potentes (60 m)
- El Cuaternario de marismas, constituido por una capa inferior de 15 a 50 m de gravas y arenas gruesas, que apoyan directamente sobre las arenas sahelenses, y otra capa superior, discontinua, en forma de lentejones incluidos en una potente capa de arcillas y que no se considera cómo acuífero, ya que su alimentación se efectúa desde la capa inferior, a través de las arcillas que las engloban.

En este Informe de 1972 se presenta de nuevo un mapa de cotas del techo del sustrato impermeable, reproducido en la Figura 58, y que una vez digitalizado se ha superpuesto (Figura 59) al mapa de cotas del basamento realizado por Astier en 1970 (Figura 55), resultando ser el actual una suavización del anterior, y desapareciendo la indicación de cambios de criterio en la asignación de qué capa es considerada como fondo impermeable. Aunque el autor del mapa considera que dicho sustrato es en general las margas azules tortonienses, advierte que la transición a las arenas sahelenses es progresiva y difícil de definir, aduciendo que las investigaciones realizadas llevaron a la conclusión de que las arenas muy arcillosas o las margas muy arenosas representan en realidad el fondo impermeable de la zona. Mediante SEV paramétricos se ha comprobó que el basamento en esta zona corresponde a una resistividad inferior a 30 ohm.m. Para la zona de marismas no pudo efectuarse este mapa por la dificultad que presenta la alta salinidad de las arcillas que recubren los acuíferos, así como a la presencia, en determinadas zonas, de aguas muy cargadas en sales. Según este mapa, el techo impermeable presenta un suave buzamiento hacia el Sur, aunque en la mitad occidental, entre Palos y El Rocío, dicho buzamiento se divide en dos: uno hacia el océano y otro hacia el Sur-Este. En el borde de las marismas, al Sur del Rocío se observa un suave alzamiento de las margas, a manera de domo. La cota más baja (150 m b.n.m.) se sitúa en Torre de la Higuera.

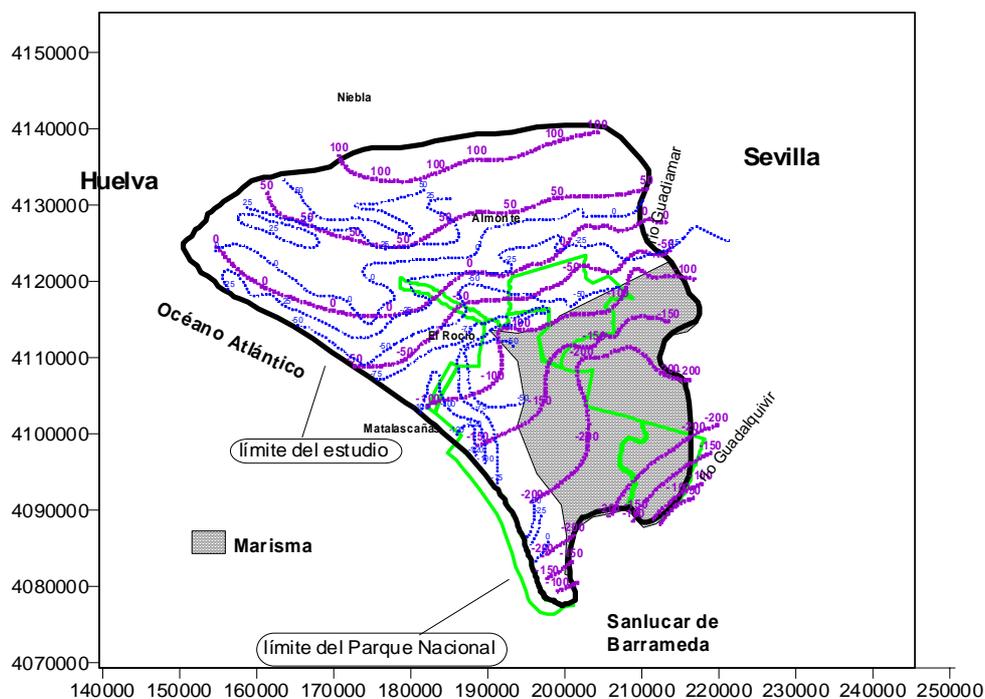


**Fig. 58. Mapa de cotas del fondo impermeable (1972)[fichero 31Map12-5.tif]**



**Fig. 59.** Mapa de cotas del techo del impermeable según el Informe de 1972 (curvas en azul [fichero 31plano12-5.xls]). Se aprecia que se trata del mismo mapa realizado en 1970 (curvas en rojo, fig. 55, [curvas dibujadas con el fichero 26AstierPL1-5.xls]), suavizando su trazado y sin tener en cuenta los cambios de marcador considerados en el original.

En la Figura 60 se ha superpuesto este mapa de 1972 al que estamos analizando de 1982, llegando a las mismas conclusiones que con el mapa de 1970, ya que ambos (1970 y 1972) son el mismo.

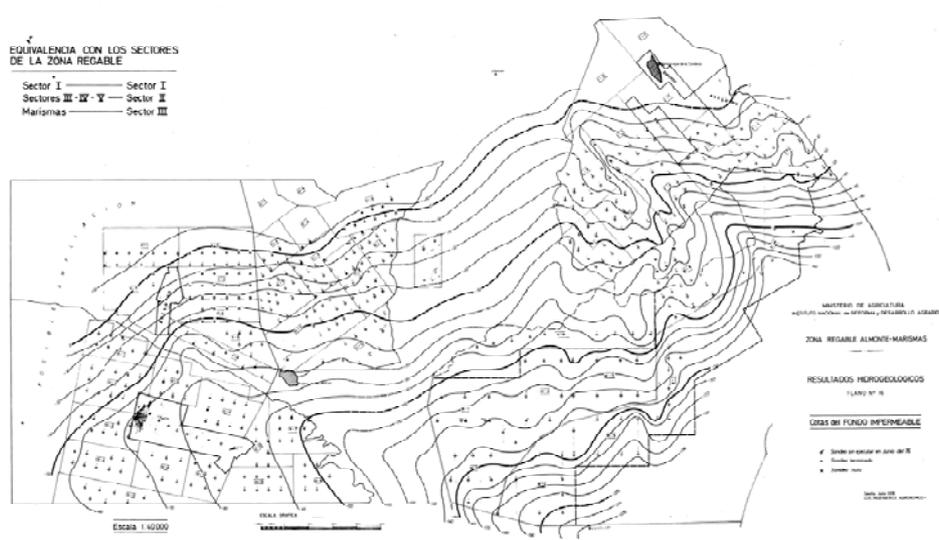


**Fig. 60.** Mapa de cotas del techo del impermeable según el Informe de 1972 (curvas en azul [fichero 31plano12-5.xls]), superpuesto al mapa de 1982 (en morado [33PLANO6Curvas.xls]).

### III.1.4 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.

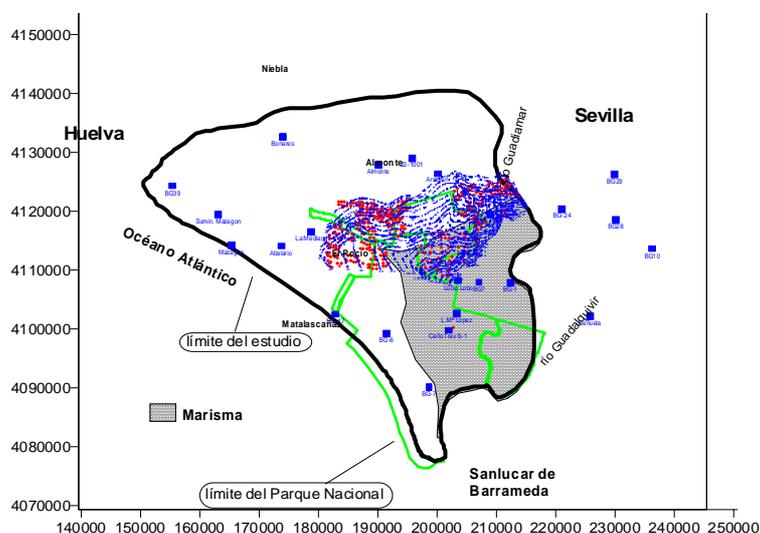
El IRYDA realizó entre 1971 y 1976 un total de 462 sondeos mecánicos para la captación de los caudales necesarios para la puesta en riego de la zona “Almonte-Marismas”, dividida en sectores numerados del I al V, además de la denominada Marismas. En el informe de estos trabajos de 1976 se presenta nuevamente un mapa de cotas del fondo impermeable, que cubre la zona de los sondeos mecánicos (denominado Plano 16), y otro que cubre todo el acuífero (denominado Plano 41).

En documentación aneja se presentó una colección de fichas de datos (denominado Anexo I) que proporcionan, para cada sondeo, entre otra información (ver Capítulo I, apartado 3.2), la cota del terreno, el nivel estático y la **cota del fondo impermeable**.

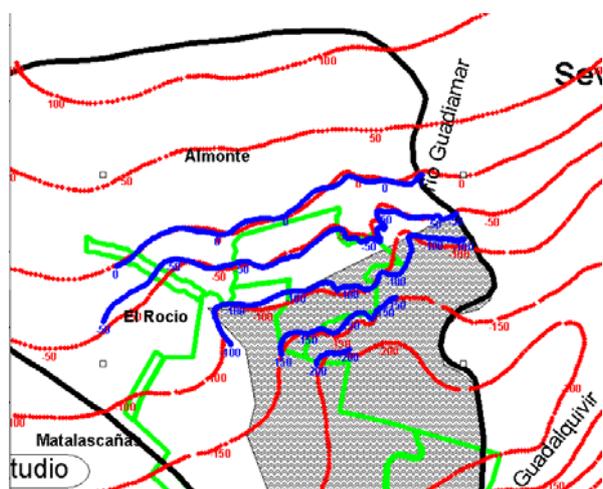


Sobre la cota del fondo impermeable (plano 16, Figura 61), se dice explícitamente que se ha elaborado con los datos de los sondeos mecánicos (los que figuran en el Anexo I), **admitiendo como muro del acuífero las series de margas arenosas con vetas de areniscas de grano fino y muy cementadas, con abundancia de fósiles entremezclados, que anteceden a las margas azules propiamente impermeables, y en las que se van transformando gradualmente al aumentar la profundidad. Estas series de transición pueden casi no existir o llegar a tener del orden de 30-40 m. Las posibilidades de captación de agua de esta formación son casi nulas, y aunque su permeabilidad sea mayor que la de las margas azules, a escala local se ha considerado impermeable. Al norte de la zona de captación estas capas de transición del Saheliense al Tortoniense son, en muchos puntos, el único acuífero existente, con características de transmisividad y caudales obtenidos muy pequeños.** El mapa está trazado con isolíneas cada 10 m. La cota desciende desde 10 m al Norte hasta la -220 m al Sur de forma uniforme, pero formando dos vaguadas situadas en las proximidades del Arroyo de la Rocina y 2 kilómetros al oeste del arroyo de la Cigüeña.

En la Figura 62 se presentan estas mismas curvas, una vez digitalizadas, sobre el plano general del acuífero, a fin de apreciar su situación, y junto con los sondeos mecánicos utilizados para su trazado. Aunque los datos de base que se utilizaron se refieren solamente al sector de riego, se procedió además a una elaboración global de este mapa para todo el acuífero, *interpretándose las partes con pocos datos de la forma más probable para obtener una visión de conjunto*, formando así el mapa de cotas del fondo impermeable, cada 50 m, representado en el Plano 41, que por su mala calidad no ha sido reproducido en scanner para el presente estudio, procediéndose a digitalizar las curvas, representadas en la Figura 63 para la parte central del acuífero y en la Figura 64 para toda la extensión recogida en el documento original. En este documento se indica, en una nota escrita a mano, que “se considera fondo impermeable la transición a margas plásticas (margas arenosas del Saheliense)”.



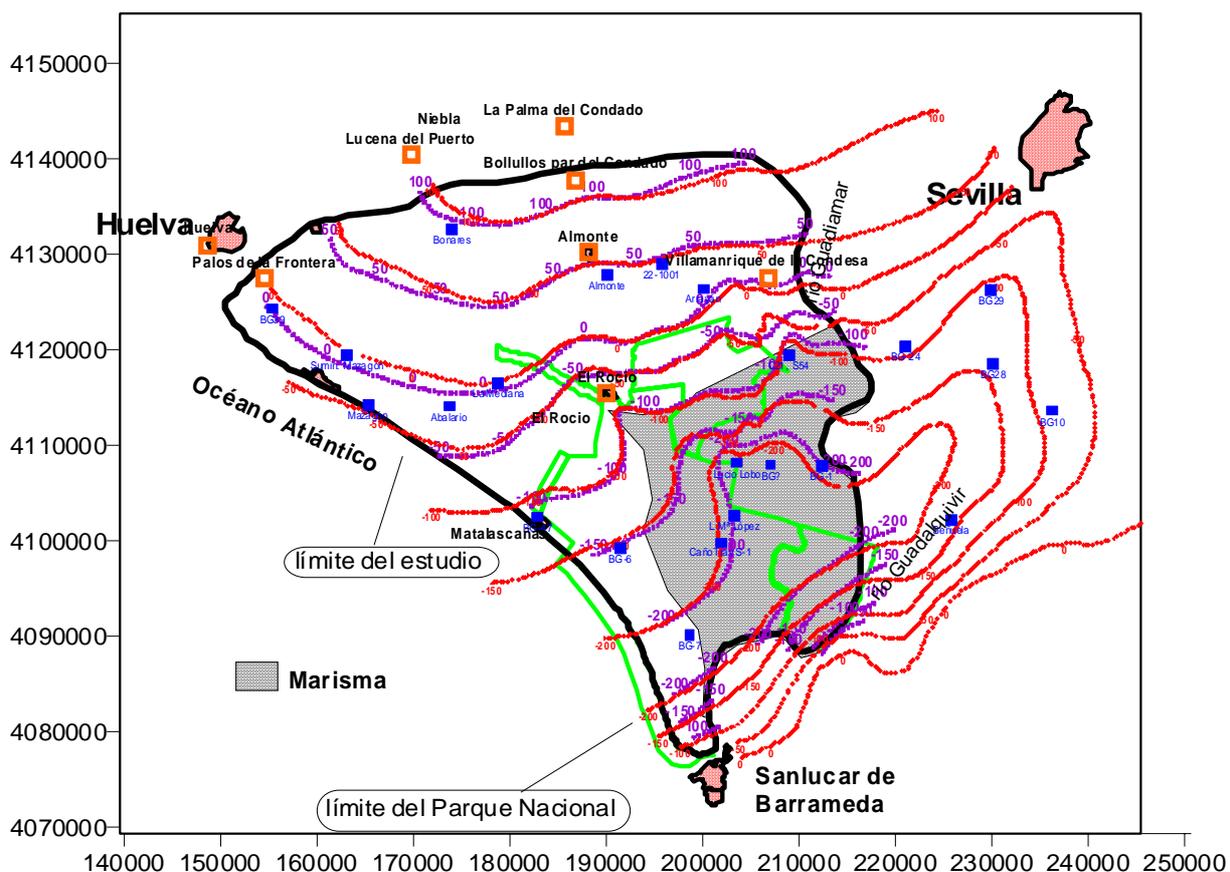
**Fig. 62. Cotras del fondo impermeable según el plano PL16 [fichero 32PL16-curvas.xls] y sondeos mecánicos utilizados para su trazado (puntos en color rojo, [fichero 32sondeosTECHO\_IMPERMEABLE.xls]), que cubren los sectores I, III, IV, V y Marismas. Los cuadrados en color azul son los sondeos mecánicos utilizados para extrapolar esta información al resto del acuífero, dando lugar al mapa representado en la figura 64.**



**Fig. 63. Detalle de comparación entre el mapa de cotas del fondo impermeable en la zona regable (azul, PL16), y su extensión al resto del acuífero (en rojo, PL41, [fichero 32PL41.xls])**

Para la extrapolación de las cotas del fondo impermeable a todo el acuífero se utilizó la información de los datos de sondeos piezométricos realizados en el *Proyecto Guadalquivir* (los BG-39, BG-47, BG-7, BG-1, BG-6, BG-24, BG-28, BG-10, BG-29, BG-24), así como los resultados de diversos sondeos realizados fuera de la zona regable para investigación complementaria en la elaboración del modelo matemático de funcionamiento del acuífero (sondeos Almonte, Arrayan, Bonares, Señuela, Señuela bis, Abalorio), sondeos del Parque Doñana (Mari López, Travieso 1, Travieso 2, Lucio Lobo) y otros (Partido Resina, El Rocío, Mediana y Caserío de Mazagón, Suministro a Mazagón, 22-1001). La posición de todos estos sondeos se encuentra en los Planos 41 y 37 del informe original, aunque la identificación de algunos sondeos no siempre es posible debido a la mala calidad de las reproducciones de la que ha podido disponerse.

Finalmente, en la Figura 64 volvemos a comparar el mapa editado en 1982 como cotas del techo de las margas azules, con el realizado en el informe del IRYDA de 1976, comprobando que se trata del mismo mapa (las pequeñas diferencias apreciadas se deben al proceso de digitalización de los documentos originales, cuya georeferenciación no ha podido ser siempre exacta, al carecer en muchos casos de coordenadas en los mapas originales).



**Fig. 64.** Cotas del fondo impermeable extrapolado para todo el acuífero (en rojo [fichero 32PL41-curvas.xls] efectuado en 1976, y mapa de cotas de las margas azules según su publicación en 1982 (en morado [33PLANO6Curvas.xls]). Se indica además la posición de los sondeos mecánicos utilizados en 1976 para extrapolar la información a partir de la zona regable [fichero 32sondeosTECHO\_IMPERMEABLE.xls].

### III.1.5 Análisis del mapa de cotas del fondo impermeable de 1976

Por lo tanto, el documento de referencia de 1982 ni ha sido obtenido a través de mediciones geofísicas, ni intenta reproducir la cota de las margas azules. Desconocemos por qué motivos en su traslación al documento realizado en 1982 recibió este nombre. Con la finalidad de aclarar más el alcance de este mapa se han llevado a cabo la serie de comprobaciones que describimos a continuación.

En primer lugar, para cada sondeo de la relación del Anexo I del informe del IRYDA-1976, se ha verificado cuál es la litología existente a la cota indicada para el fondo impermeable, según la información proporcionada por la base de datos litológica (ver Capítulo II-7.4, fichero **Baselitologica.xls**). Para los sondeos de la zona regable se ha encontrado que en el 54 % de los casos, a esa profundidad se encuentran arenas, areniscas y/o gravas. En el 25 % se trata de arcillas, y sólo para el 21% de los sondeos existen margas a la cota indicada como fondo impermeable. En algunos casos se han observado diferencias entre las cotas asignadas a los sondeos en las distintas fuentes de información, lo que puede dar lugar a desviaciones entre la capa que se utilizó en 1976 para asignarla al impermeable, y la que se observa en la base de datos. No obstante, esto no justifica el porcentaje de casos encontrados en el que la litología no es en principio de carácter impermeable, lo que hace pensar que el criterio que se siguió en 1976 fue mucho más generalista. En el texto del informe del IRYDA se hace referencia a la diferenciación de dos tramos en el Saheliense: uno permeable ( $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} > k > 10^{-5} \text{ m/s}$ ), formado por arenas amarillentas a grisáceas, lumaquelas y areniscas poco cementadas, y otro semipermeable ( $10^{-5} \text{ m/s} > k > 10^{-7} \text{ m/s}$ ), de arenas margosas, areniscas muy cementadas y margas arenosas grises fosilíferas. Con este criterio se realizaron los cortes presentados en dicho informe (ver Capítulo I-3.2), ejemplo de los cuales se reproducen en las Figuras 65 y 66.

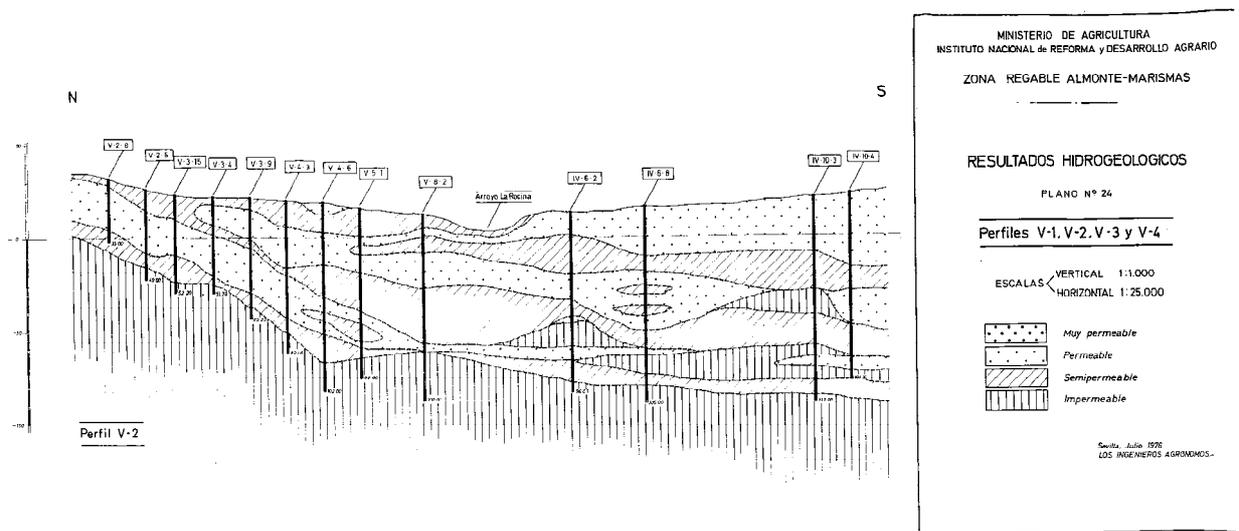
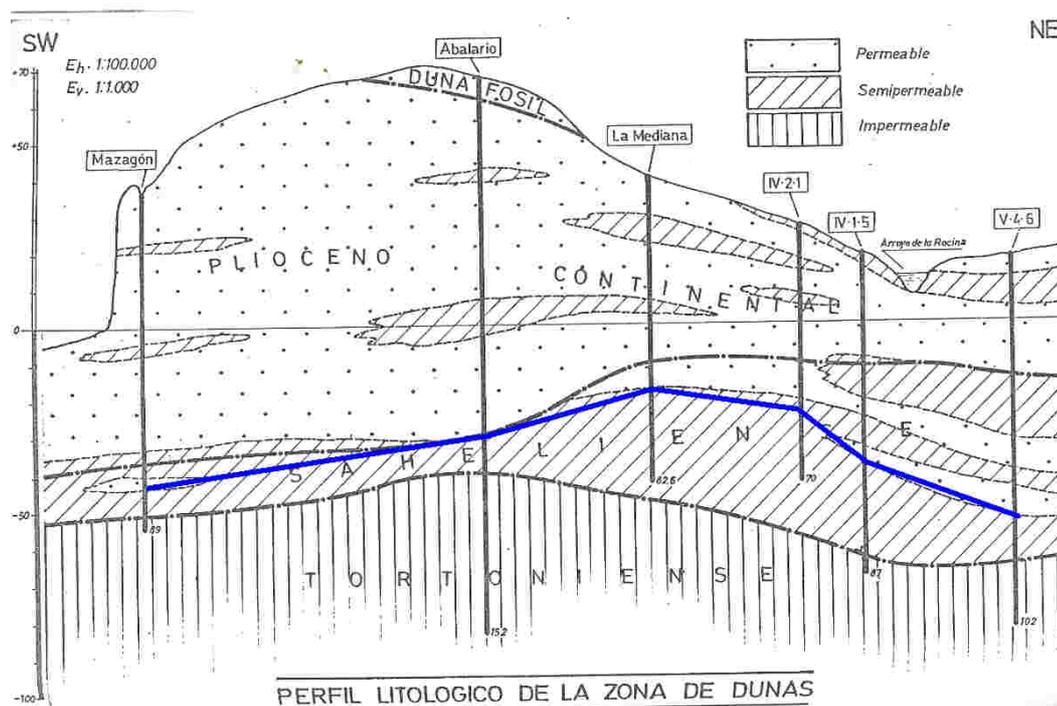
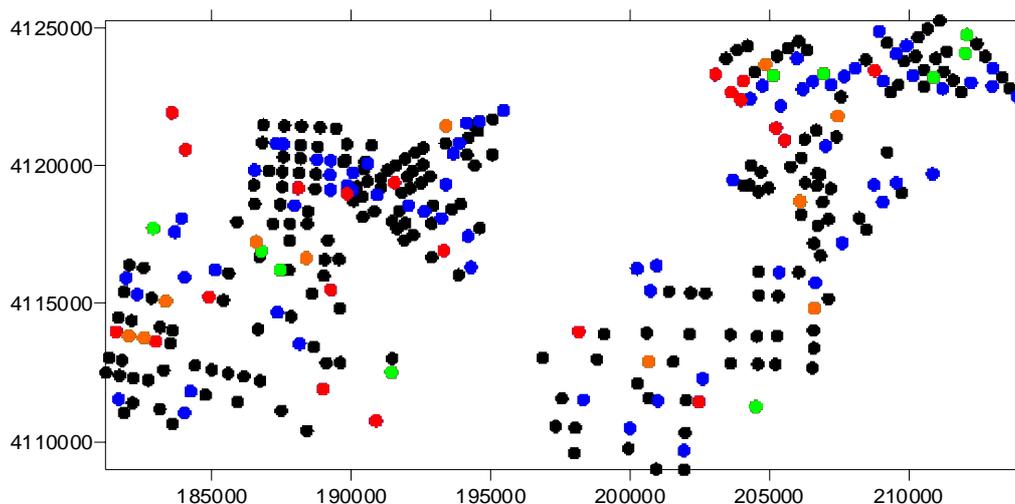


Fig. 65. Perfil de sondeos de la zona regable con su interpretación en términos hidrogeológicos. [fichero 32PerV-2.tif]



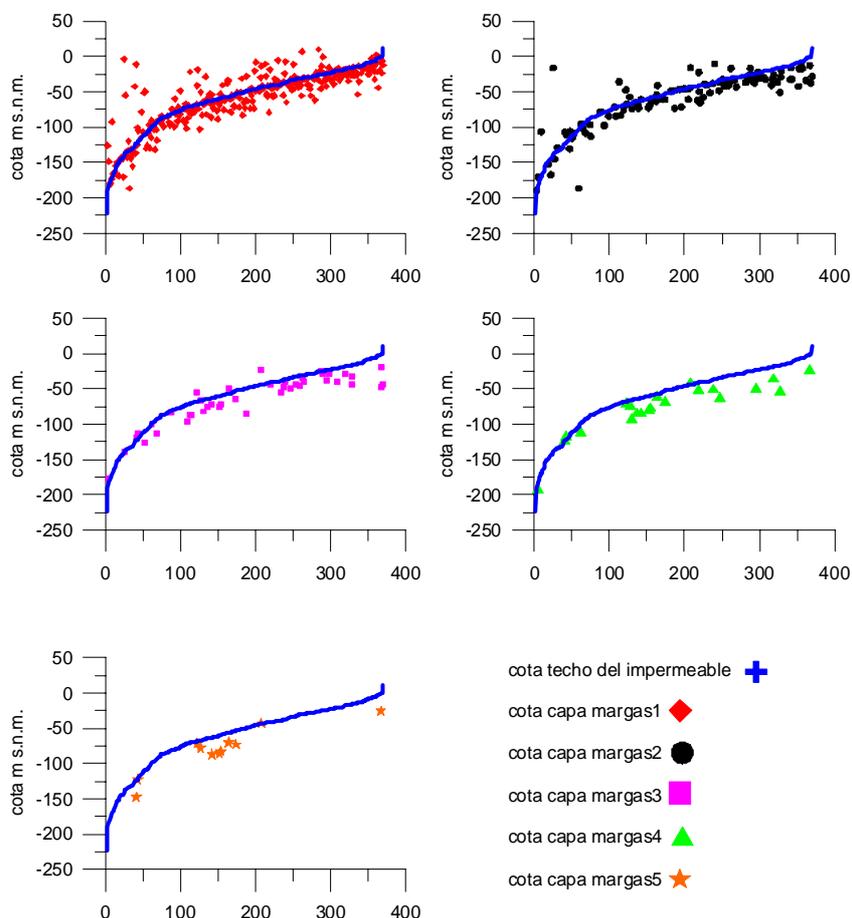
**Fig. 66. Perfil de sondeos de la zona regable con su interpretación en términos hidrogeológicos. Se ha añadido (línea azul) el techo tomado como impermeable, según los valores numéricos del Anexo1-IRYDA-1976.[32perfilDunas.tif]**

Es decir, se adoptó un criterio subjetivo para identificar en las columnas de los sondeos el comienzo de un tramo menos permeable dentro del Saheliense, que no tiene porqué coincidir con una paquete de margas. Para ahondar en esta comprobación, se han identificado en la base de datos litológica las capas de margas existentes en cada sondeo, dando lugar a la situación, reflejada en la Figura 67, de que al menos para el 60% se identifica más de un tramo de margas.

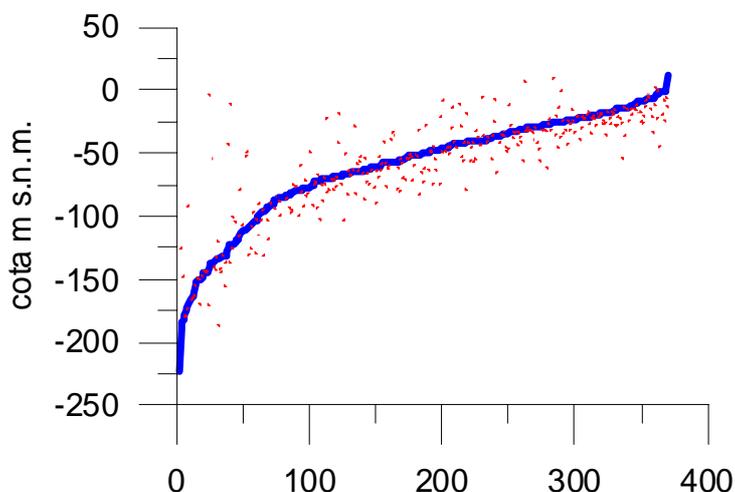


**Fig. 67. Sondeos de la zona regable clasificados por los tramos de margas identificados en su columna litológica: negros una sola capa; azul, dos capas; rojo, tres capas; verde, cuatro capas, y naranja, cinco capas.**

Todas estas capas de margas se sitúan principalmente por debajo del nivel seleccionado como “techo del impermeable”, según se puede comprobar en los gráficos de la Figura 68, donde para cada sondeo, ordenados por cotas crecientes del “fondo impermeable”, se han indicado las cotas de cada capa de margas. Los 70-80 sondeos en los que el “fondo” coincide con un tramo de margas, se refieren en general a la primera capa (Fig. 69), aunque también puede llegar a ser la última.

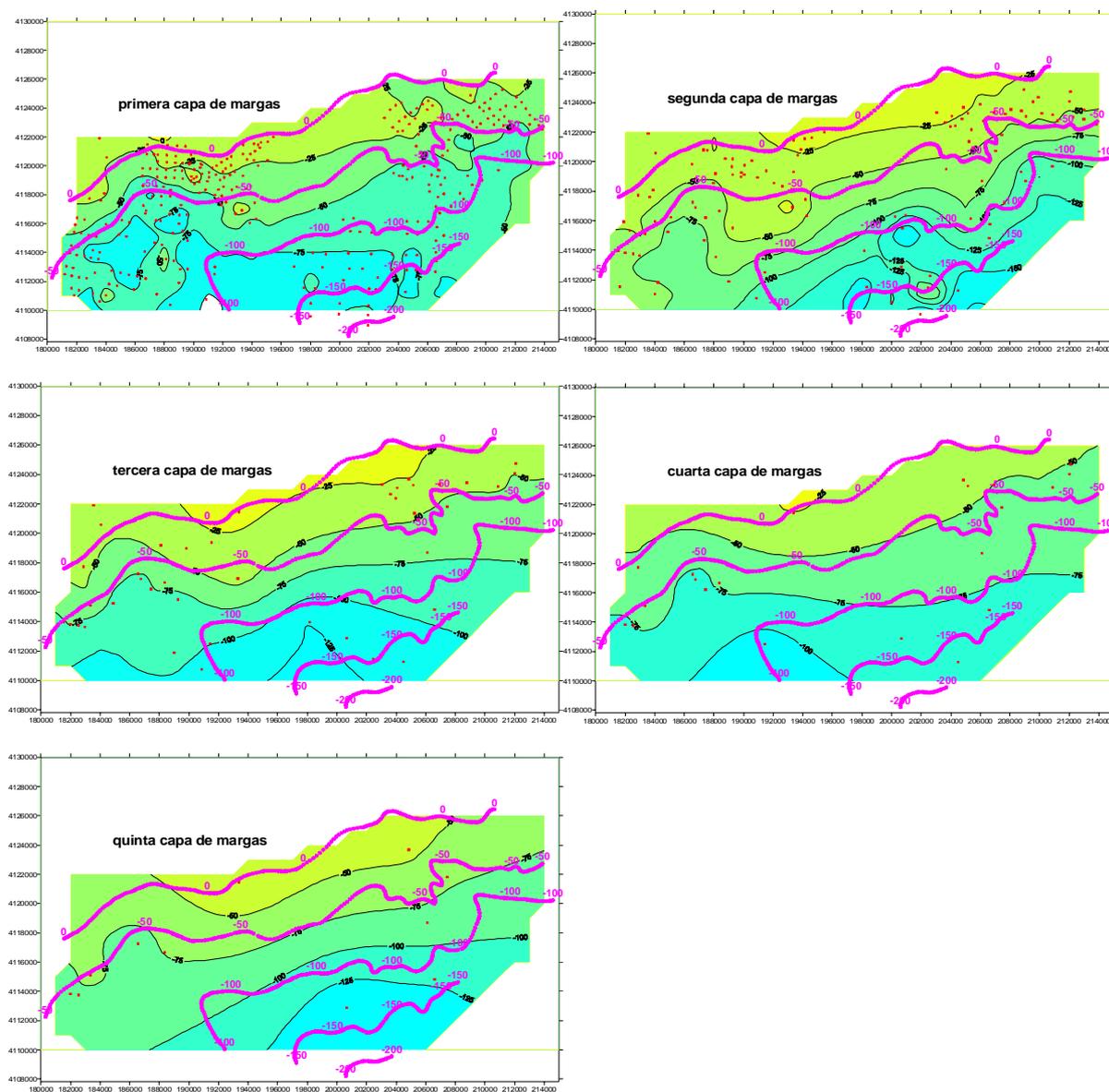


**Fig. 68. Comparación de la cota seleccionada como techo impermeable y la cota de las capas de margas cortadas por los sondeos mecánicos utilizados.**



**Fig. 69. Detalle de la figura 68, donde se aprecia cómo la primera capa de margas es sólo la considerada como techo de la formación impermeable en una pequeña parte de los sondeos.**

Aunque sólo la primera capa puede considerarse con suficiente extensión como para pretender trazar su continuidad en toda la superficie cubierta por los sondeos, se han dibujado las hipotéticas superficies que surgirían si se diera el caso de que todas las capas presentaran cobertura en toda el área, reflejándose en los “mapas de cotas de superficies impermeables” correspondientes de la fig. 70.



**Fig. 70. Hipotéticos mapas de cotas del techo del impermeable que formarían las sucesivas capas de margas identificadas en las columnas litológicas de los sondeos, y su comparación con el mapa de cotas del fondo impermeable de 1976 (líneas en morado).**

Los sucesivos mapas mantienen cierta coincidencia con el del fondo impermeable para la cota 50 en las cuatro primeras capas, y para la cota 100 en la segunda, tercera y quinta, siendo muy dispares para el resto de las curvas. En conclusión, ni siquiera en la zona del área regable, con una densidad grande de sondeos mecánicos, es posible identificar una superficie con control litológico que responda al mapa trazado como base impermeable en 1976.

Al considerar la extrapolación de esta superficie al resto del acuífero utilizando para ello sólo unos pocos sondeos (Fig. 64), esta situación todavía empeora. Actualmente sólo se dispone de información del sondeo BG-7, donde a la cota indicada se sitúan margas, del sondeo BG-47, donde se trata de arenas; del BG-6, donde son arenas, y del Partido Resina, donde hay arcillas. Dado el criterio utilizado para definir la cota del fondo impermeable, consideramos poco probable que los tramos identificados en estos sondeos periféricos al área regable puedan ser correlacionables en tan gran extensión. No es por lo tanto de extrañar que sondeos actuales no hayan encontrado las margas azules, allí donde nadie ha dicho que existieran.

En nuestra opinión, el mapa de cotas del techo del impermeable trazado en 1970 (ver apartado III - 1.2), utilizando una amplia cobertura de la fuente de información (mapa de SEV de la Figura 53), y como criterio objetivo considerar como impermeable las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m, es de mayor rigor hidrogeológico que el mapa de 1982 que estamos analizando. El de 1970 considera además una variación en la naturaleza de la litología y unidad estratigráfica del fondo: pasa de ser margas azules en el norte, a arcillas arenosas del Saheliense y, más hacia el Sur, del Villafranquiense, delimitando las zonas mediante unos cambios de marcador claramente identificados (Figura 55).

Todos los ficheros generados para confeccionar las figuras de este apartado se encuentran en el Anexo Digital III- 1 (margas azules).

### III. 2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión.

[La realización de este estudio ha contado con la participación de D. Pedro Sánchez Ramírez, quien con este tema efectuó en el IGME su Proyecto Fin de Carrera, presentado en 2004 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, UPM]

#### III.2.1 Introducción

La conclusión del análisis efectuado en el capítulo anterior es que el denominado *mapa de las cotas de la base del acuífero principal* (Figura 55), efectuado en 1970 con gran soporte de datos geofísicos (SEV) (Informe ***Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.***), está mejor fundamentado y tiene mayor valor hidrogeológico que el mapa del fondo impermeable trazado en 1976, utilizando exclusivamente datos de sondeos mecánicos en un sector de la zona regable, cuya extrapolación a todo el acuífero dio lugar al mal llamado desde 1982 "*mapa de cotas de las margas azules*" (Figura 48).

En el mapa de 1970, la unidad lito-estratigráfica del fondo impermeable es variable, pasando de ser las margas azules del Tortoniense en el norte, a arcillas arenosas del Saheliense en la parte central, y, más hacia el Sur, del Villafranquiense; es decir, se atribuye a terrenos más modernos según se avanza hacia el Sur, de acuerdo con la progresión debida al buzamiento regional de las capas. Según la versión suavizada posteriormente elaborada en 1972 (Figura 59) (***Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972. Ref. 35522***), aunque se menciona que dicho sustrato es en general las margas azules tortonienses, se advierte de que la transición a las arenas Sahelienses es progresiva y difícil de definir, concluyendo que las arenas muy arcillosas o las margas muy arenosas representan en realidad el fondo impermeable de la zona. Según este mapa, el techo impermeable presenta un suave buzamiento hacia el Sur, aunque en la mitad occidental, entre Palos y El Rocío, el buzamiento se divide en dos: uno hacia el océano y otro hacia el Sur-Este. En el borde de las marismas, al Sur de El Rocío se observa un suave alzamiento de las margas, a manera de domo. La cota más baja (150 m b.n.m.) se sitúa en Torre de la Higuera.

En el mapa de 1976 también se acepta que el fondo impermeable se refiere a las series arenosas-margosas que anteceden a las margas azules, indicando no obstante que en zonas del norte del acuífero *estas capas de transición del Saheliense al Tortoniense son, en muchos puntos, el único acuífero existente, con características de transmisividad y caudales obtenidos muy pequeños*. La morfología de este mapa indica que la cota descende desde 10 m al Norte hasta la -220 m al Sur, de forma uniforme, pero formando dos vaguadas situadas en las proximidades del Arroyo de la Rocina y 2 kilómetros al oeste del arroyo de la Cigüeña.

Queda por lo tanto suficientemente puesto de manifiesto que en la historia del estudio hidrogeológico del acuífero de Doñana nunca se han considerado las margas azules como la única base impermeable del acuífero estudiado. A pesar de ello, parece aceptado que estas margas, localizadas dentro del nivel Tortoniense, del Mioceno Superior, suponen la base del resto de las formaciones detríticas susceptibles de almacenar agua, por lo que, a fin de tratar de esclarecer cuál es realmente el mapa de cotas de las margas azules, se ha utilizado la información geofísica de sísmica de reflexión disponible para efectuar su trazado.

### III.2.2 Antecedentes geológicos.

La selección e identificación del horizonte sísmico a cartografiar se apoya en las columnas geológicas de los sondeos realizados en la exploración de hidrocarburos en 1957 (Capítulo I-6, Figura 42). La terminología entonces utilizada no es siempre conforme a los criterios actuales, pudiendo producirse una cierta ambigüedad en la equiparación de los criterios. Por ello, se ha considerado que era previamente necesario para la mejor comprensión del presente Informe revisar y sintetizar los antecedentes geológicos, limitándonos a lo concerniente a la mejor identificación del techo de las margas azules en las secciones sísmicas, y remarcando además aquellos detalles que puedan ser utilizados en la asignación de facies sísmicas diferenciales. Se ha utilizado como base para esta síntesis geológica las Memorias de las Hojas 1/50.000 del MAGNA (Hoja 982 y 983: Leyva Cabello, F. y Ramírez Copeiro del Villar, J, (1976); Hoja 1000: Leyva Cabello, F y Pastor, F. (1976), así como el trabajo de Salvany, J.M. y Custodio, E.,1995, "Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas", Rev. Soc. Geol.. España, 8 (1-2), 21-31.

Desde el punto de vista de la **historia geológica**, hacia los últimos tiempos del Mioceno Superior el área se encuentra, si no toda, en gran parte sumergida bajo un mar de aguas someras, que se extiende ampliamente por los dominios de la actual Depresión del Guadalquivir y de las Cordilleras Béticas y del que emergen numerosas islas y archipiélagos. En el fondo de este mar se depositan las margas y calizas ricas en aportes detríticos procedentes de la erosión de los relieves montañosos, todavía poco importantes, de dichas Cordilleras. Hacia el final del Mioceno o principios del Plioceno ocurre una regresión bastante general, después de la cual, ya en pleno Plioceno, el mar transgrede de nuevo, pero penetra mucho menos hacia el interior de las Cordilleras Béticas y las líneas de costas se van acercando al trazado actual. En cierto modo, el área de Doñana constituye una excepción, ya que en ella las variaciones de la línea de costa han sido más importantes y han continuado incluso hasta tiempos históricos, en relación con la subsidencia diferencial. Durante el Mioceno superior-Plioceno las condiciones de depósito reinantes parecen corresponder a los de la cuenca marina de profundidad de media a grande, en la que se depositaron potentes capas de margas. En las zonas marginales se formaron áreas inestables que favorecieron el deslizamiento de masas de materiales subbéticos hacia el fondo de la cuenca. Estos sedimentos se encuentran, en

parte, intercalados entre los materiales autóctonos del Mioceno. Hacia techo las margas (margas azules), son cada vez más arenosas, lo que indica que, la cuenca entró en un período regresivo. Al final se produjo una emersión, con erosión parcial del techo del tramo margoso, sobre el que a continuación se depositaron sedimentos costero-litorales (arenas basales). En las zonas emergidas se generó una importante red fluvial, así como un glacis que llegó a ocupar una extensión considerable. Posteriormente, entre finales del Plioceno y principios del Cuaternario se produjo una nueva trasgresión marina, pero de mucha menor envergadura que la del Mioceno superior. Se instaló así un golfo en una zona que prácticamente coincide con la ocupada por las actuales marismas. De forma simultánea a esta trasgresión, probablemente, se inició el crecimiento, en dirección SE de una barra litoral arenosa que paulatinamente, cerró el golfo, convirtiéndolo en una albufera. Esta se rellenó, principalmente, con sucesivos aportes fluviales, los cuales junto con algunas interferencias de origen marino-costero, contribuyeron a la colmatación final. Así, el avance progresivo de las arenas pudo llegar a cerrar, en muchos casos, las desembocaduras de algunos arroyos y a dificultar o impedir el drenaje, lo que originó ambientes lagunares locales, en los que se pudieron dar las condiciones precisas para la formación de turba. En la actualidad en la costa se produce una intensa removilización eólica, y en las marismas una colmatación, a expensas, fundamentalmente, de materiales detríticos finos. La tectónica que pudo afectar a la serie Mioceno-Cuaternario no tuvo una importancia neta. En el área estudiada se traduce en pliegues muy amplios y suaves. La subsidencia es especialmente importante en la región de las Marismas del Guadalquivir, cuya topografía, y las características de su relleno sedimentario, indican la individualización de una amplia cuenca sinclinal, cuya subsidencia debe continuar aún hoy.

**El Mioceno** comienza por una formación **transgresiva**, denominada “**de base**” porque es la primera que se encuentra en la base de la serie miocena autóctona y discordante sobre los terrenos de edad anterior. Aflora al norte de la Depresión del Guadalquivir, formando una estrecha franja continua, de 1 km de anchura media en la zona del bajo Guadalquivir. Este Mioceno de base, que descansa sobre el zócalo paleozoico, desciende hacia el sur con una pendiente media del 2 al 3% sin plegamiento notable, alcanzando una profundidad superior a los 3400 m b.n.m. (mapa de isobatas de la base del terciario postorogénico (Figura 40 del Capítulo I-5), aunque afectado por un sistema de fallas de dirección bética (OSO-ENE), originadas por una tectónica rígida en “horst” y “graben” (visibles en el mencionado mapa de isobatas de la base del terciario postorogénico (Figura 40)). Las facies más comunes del Mioceno transgresivo de base son, de techo a muro:

- Margas azules superiores **Tortonienses**: afloran ampliamente en la Depresión del Guadalquivir y constituyen el material principal que ha rellenado dicha depresión. formando una serie monoclinial normal, aumentando su potencia hacia el sur, hasta alcanzar más de mil metros bajo las Marismas del Guadalquivir. Su edad está muy bien determinada por la abundante microfauna que contiene, a base de asociaciones típicas del Tortoniense Medio. Son normalmente gris azuladas, pero en superficie, cuando se alteran, toman un color amarillento debido a la presencia de hierro. Las margas azules

pasan a margas arenosas de modo progresivo tanto en su parte superior, cerca de las arenas Sahelienses, como en su parte inferior, al contacto con las arenas Helvecienses.

- Por encima se sitúan unos estratos de arenas, molasas y conglomerados, todos ellos fosilíferos, con un espesor total que no sobrepasa los 30 m, y que algunos autores han denominado **nivel detrítico basal** (J.M. Salvany y Custodio, 1995) y como se aclarará más tarde pueden considerarse como una única unidad estratigráfica. Pensamos que este nivel puede ser determinante como reflector sísmico.
- Sobre esta base se localiza una **facies regresiva Saheliense**, que aflora de modo continuo desde Ayamonte hasta Sevilla, y de forma discontinua tanto al norte como al sur de la Depresión del Guadalquivir. Se apoya directamente sobre las margas azules del Tortoniense y está recubierto por el Plioceno continental o por los primeros depósitos detríticos del Cuaternario. Existen manifestaciones de macro y microfauna que concluyen en otorgarle una edad comprendida entre el Tortoniense y el Hastiense, si bien, la microfauna encontrada obliga a inclinarse por una edad Tortoniense Superior-Saheliense. Se trata de la evolución normal regresiva de la serie miocena, siendo, por tanto el tránsito final del Mioceno-Plioceno. Este piso, tal como se ha definido, corresponde a lo que algunos autores denominan *Andaluciense*, que es la nomenclatura utilizada en los sondeos de hidrocarburos. Estas facies son muy constantes en el bajo Guadalquivir y están caracterizadas por arenas finas, areniscas y calcarenitas, finalizando en arenas finas arcillosas inferiores, pasando hacia abajo progresivamente a margas azules. La potencia media de estas capas detríticas es del orden de 30 m, pero aumenta en el centro de la depresión, en particular bajo las Marismas del Guadalquivir, donde sobrepasan los 60 m. Desde un punto de vista estratigráfico se asocia este nivel con la parte inferior de la **unidad deltáica**.

En la parte más meridional de la zona de estudio la existencia de fósiles en el **Plioceno** obliga a suponer que la sedimentación aquí fue de tipo marino, mientras que la ausencia de esta fauna en zonas más interiores implica una sedimentación continental.

El **Plioceno marino** aparece a lo largo del litoral de Cádiz sobre las arenas Sahelienses, como una capa de areniscas de tipo transgresivo, con pequeños cantos rodados y muchos fósiles, a veces formando una verdadera lumaquela a base principalmente de ostreas; está ocasionalmente recubierto por un Plio-Villafranquiense continental.

El **Plioceno continental** se trata de depósitos que recubren en gran parte toda la región de Huelva, así como las arenas Sahelienses situadas al norte de las Marismas del Guadalquivir; forma un inmenso "glacis", que desciende suavemente desde la meseta hercínica hasta el océano Atlántico o hasta las Marismas, enmascarando las formaciones secundarias y terciarias. La facies es típicamente

continental, sin fauna, y presenta alternancias rápidas de arenas más o menos gruesas, de gravas y de conglomerados y de bancos arcillosos, a menudo verdes. La granulometría es variable, pero de tamaño generalmente más grande que el de las arenas Sahelienses. Parece existir una clasificación mecánica de los granos en su deposición, correspondiendo a una granulometría que va decreciendo desde la Meseta hacia el borde del mar o de las Marismas. El espesor del Plioceno continental de Huelva y de Almonte suele ser pequeño, del orden de 10-30 m, salvo al sur, cerca del contacto con las Marismas del Guadalquivir, en la región de El Rocío, donde puede alcanzar valores comprendidos entre 100 y 200 m. Esta formación no existe bajo las Marismas, puesto que en el momento de su depósito seguía un régimen marino en ellas. Su edad es posterior al Saheliense, sobre el cual suele apoyarse, así como al Plioceno marino de la región de Cádiz, al cual recubre también. Por lo tanto, se le puede atribuir la edad Plio-Villafranquiense como más probable.

Esta distinción y el hecho de que el Plioceno continental recubra en el sur al marino (como es lógico cuando se produce una regresión), han provocado que existan distintas clasificaciones estratigráficas incluyendo o no el Plioceno marino como un nivel propio. En el presente trabajo no se ha hecho esta distinción pues el comportamiento hidrogeológico de estos materiales es similar, denominando al mismo, junto con las arenas Sahelienses y parte del Cuaternario más antiguo, **unidad deltaica** (J.M. Salvany y Custodio, 1995).

Los materiales que se han depositado durante el **Cuaternario** son de tipo detrítico, tanto marinos como continentales. En particular se pueden distinguir los siguientes tipos de depósitos: terrazas fluviales continentales encajadas a lo largo de los ríos y arroyos, terrazas marinas y dunas en el litoral y capas de tipo fluvio-marino (superpuestas) en las zonas actuales de las Marismas. Las terrazas marinas se han observado a lo largo de la costa entre Sanlúcar de Barrameda y Puerto de Santa María y representan una banda costera de 3 a 4 km de anchura. Desde Ayamonte hasta Conil, existe un cordón litoral de dunas vivas actualmente, cuya altura llega a 100 m sobre el nivel del mar en la zona de Asperillo, y bordea la costa paralelamente a las playas. Tierra adentro se encuentra un cordón litoral fósil, de dirección paralela al actual, que se extiende desde Mazagón hasta Sanlúcar de Barrameda, formando una marga arenosa que separa la marisma del océano Atlántico. La altura media de estas dunas fósiles es del orden de 30 m y su espesor puede alcanzar 60 m. Se han incluido estas dunas en el Cuaternario medio, siendo posible que en parte pertenezcan al Cuaternario antiguo.

Bajo la marisma actual del Guadalquivir se encuentran alternancias de capas fluviales a base de cantos rodados, gravas y arenas y de capas marinas a base de arcilla gris, verdes o azules, que contienen fósiles característicos de mares poco profundos y salados. Se individualizan dos capas de cantos rodados y gravas: la primera, se encuentra entre 50 y 100 m de profundidad, y tiene un espesor variable de 5 a 30 m; la segunda, que constituye la base del Cuaternario fluvio-marino, está situada a una profundidad comprendida entre 100 y 150 m y tiene un espesor de 10 a 30 m. El conjunto de estas capas tiene una potencia variable, pero normalmente importante, del orden de 150

m. La capa de aluviones más profunda, que se apoya directamente sobre las facies sahelenses, debe corresponder a un período de gran pluviometría durante el Cuaternario antiguo, mientras que la capa de aluviones superiores debe corresponder a un período análogo del Cuaternario medio, estando el Cuaternario reciente representado por unos metros superficiales de limos arenosos y arcillas.

Aunque, como ya se ha mencionado, existen numerosas **clasificaciones estratigráficas** de los materiales sedimentarios de la zona de estudio, se ha elegido la propuesta por J.M. Salvany y Custodio (1995) por considerar que se trata de la clasificación más actual y, por tanto, supuestamente más exacta, y es además la que se ajusta mejor al modelo hidrogeológico actualmente propuesto. Se consideran por tanto las unidades estratigráficas siguientes:

- **Nivel detrítico basal:** este sería el nivel de base de la serie Mioceno-Cuaternario. Se apoya de forma discordante sobre los niveles inferiores y correspondería a las arenas helvecienses. La potencia media de este nivel es de 30 m.
- **Margas azules:** compuesto por materiales pelágicos producto de una sedimentación de tipo marino, es la base absoluta impermeable del acuífero y su caracterización es el fundamento principal del presente estudio. La potencia de este nivel es variable, aumentando de norte a sur.
- **Unidad deltaica:** forma un cuerpo sedimentario compuesto por gravas, arenas y limos. Se encuentra ubicado entre las *margas azules* del Tortoniense (a muro) y la denominada *unidad eólica* (a techo). El tránsito entre las margas y la unidad deltaica es gradual y, por tanto, resulta difícil establecer el límite entre las mismas, pudiendo tener una potencia aproximada de 60 m – 70 m. Los materiales de esta serie se alternan de forma cíclica formando una sucesión granocreciente, en la que en su base existe un predominio de litologías de tamaño de grano menor, aumentando éste hacia el techo de la unidad. Los finos (limos y arenas) que predominan en la parte inferior, representan depósitos del frente deltaico. Los materiales más gruesos constituyen los depósitos de la llanura deltaica. El nivel en su conjunto equivale a las arenas sahelenses y los depósitos del Plioceno, anteriormente descritos.
- **Unidad aluvial:** constituye un depósito de gravas, arcillas, limos y arenas, ubicado bajo las Marismas de Doñana y de gran potencia (hasta 180 m). Se relaciona esta unidad a antiguos cauces del río Guadalquivir, de ahí su denominación. La correlación de este nivel con los niveles geológicos puede establecerse con las terrazas fluviales del Cuaternario
- **Unidad eólica:** está formada por arenas muy homogéneas, localizadas sobre todo en el litoral. Se apoya sobre la *unidad deltaica* al oeste y los limos arenosos de la *unidad de las Marismas*. Dichas arenas están compuestas, casi exclusivamente, por sílice, formando tramos continuos de hasta decenas de metros de espesor, separados por niveles de arenas finas y limos arcillosos, así como capas de turba en la franja litoral. La potencia de esta unidad es del orden de 150 m en la costa disminuyendo hacia el interior. Puede establecerse

una equivalencia entre este nivel y los depósitos de origen eólico del Cuaternario (dunas y barras costeras).

- Unidad de las Marismas:** esta unidad está formada por depósitos de limos y arcillas, con ocasionales niveles de gravas, arenas, turbas y bioclastos, localizados en el subsuelo inmediato de Doñana. Verticalmente se encuentran situados sobre la *unidad aluvial*, y hacia el oeste limitan lateralmente con la *unidad eólica* mediante un tránsito gradual. El espesor máximo se da en la franja litoral, con valores de 70 m – 75 m, decreciendo hacia el interior con valores de 10 m – 20 m en la parte más septentrional de las Marismas. Este nivel se corresponde con lo que en la anterior descripción de la geología se ha denominado *Cuaternario fluvio-marino de Marismas*.

La edad asociada a cada una de estas unidades se recoge en la *tabla III-2-1*, en la que se han representado los contactos discordantes mediante doble línea.

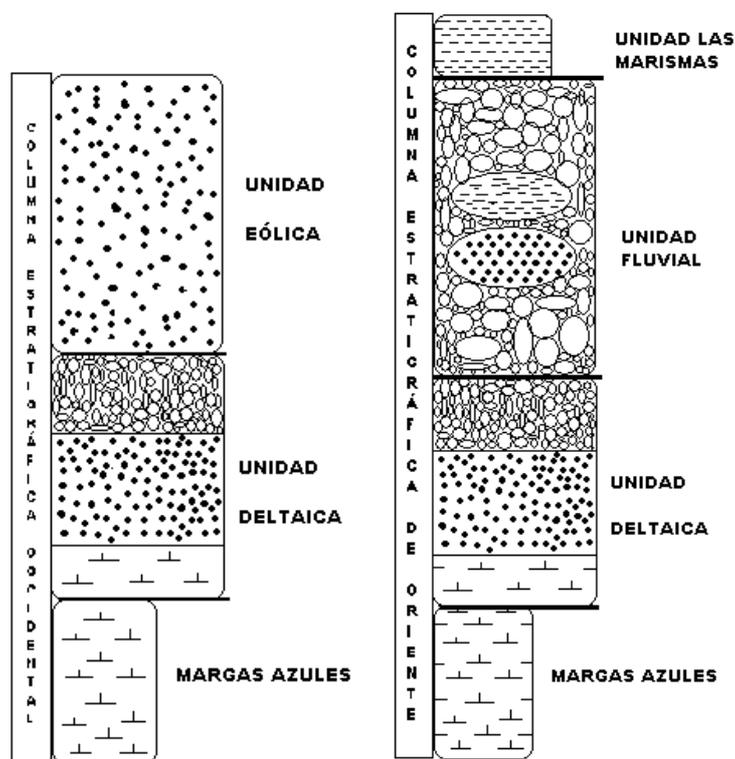
SISTEMA	PISO		UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	
CUATERNARIO	HOLOCENO		UNIDAD EÓLICA UNIDAD DE LAS MARISMAS	
	PLEISTOCENO	SUP.	UNIDAD ALUVIAL	
		INF.		
NEÓGENO	PLIOCENO	MEDIO SUP.	UNIDAD DELTAICA	
		IN F.		
		SUP.		
	MIOCENO	SUP.		MARGAS AZULES
		INF.		NIVEL DETRÍTICO BASAL

*Tabla III-2-1: Edad de las unidades estratigráficas*

Para explicar estos dos dominios J.M. Salvany y E. Custodio (1995) hacen la hipótesis de la existencia de una falla fosilizada por los depósitos recientes de las marismas de Doñana y que sería

la prolongación de la falla de Guadiamar, y cuya posición coincidiría con la de la falla al Oeste de Matalascañas. Esta falla permite explicar el desarrollo de las unidades aluvial y las marismas, y la ausencia de la unidad deltaica al Este, ya que su movimiento provocaría una mayor subsidencia en esta zona. Así, según estos autores, las tres fallas podrían constituir un mismo accidente tectónico, fosilizado en parte por los depósitos de las marismas de Doñana. Existen otros autores que no ven clara esta teoría y no están de acuerdo con la misma, así como otros que suponen la presencia de la unidad deltaica por debajo de la fluvial en la zona situada al Este.

Según esta estratigrafía, la base impermeable última del acuífero de Doñana sería la capa de margas azules, y las capas potencialmente acuíferas serían las unidades que contienen gravas y arenas. La diferenciación estratigráfica en dos zonas (occidental y oriental) tiene como consecuencia un comportamiento hidrogeológico también bizonal. Se pueden diferenciar así dos tipos de subunidades: una occidental de tipo libre y una oriental de tipo semiconfinado. La posición y potencia de las unidades estratigráficas queda reflejada en la columna estratigráfica. Como ya se ha mencionado, hay que distinguir dos zonas donde el corte estratigráfico es distinto. La zona más occidental, en la que no existen marismas, tiene un corte de índole más continental, mientras que en la zona más oriental, donde se encuentran las Marismas de Doñana, la sedimentación es más pelágica. Ambos cortes se encuentran reflejados en la Figura 71.



**Fig. 71. Columnas estratigráficas de la zona**

Las secciones sísmicas disponibles se localizan fundamentalmente en el sector occidental.

### III.2.3 Información suministrada por los sondeos mecánicos profundos.

En el área cubierta por la información sísmica existen al menos 36 sondeos mecánicos profundos efectuados entre 1957 y 2000, de los que actualmente (2005) son confidenciales 21. De los restantes, son de interés para este estudio y se ha podido obtener alguna información a través del Archivo Técnico de Hidrocarburos, de los siguientes (tabla III-2-2 y Figura 72):

SONDEO	COMPAÑÍA OPERADORA	Año de realización	X <sub>UTM</sub>	Y <sub>UTM</sub>	Profundidad total (m)	Cota de las margas azules m (b.n.m)
Moguer-1	VALDEBRO	1957	162410,4	4119149,7	2473	525
Asperillo-1	VALDEBRO	1957	175722,6	4109887,3	3306,9	930
Marismas A-1	CHEVRON	1981	182444,3	4111083,5	1378,6	935
Almonte-1	VALDEBRO	1957	192063	4129805	1344	515
Villamanrique-1	ERAP	1967	206267	4126022	1341	735
Casa Nieves-1	ERAP	1967	205391	4121453	1630	930
Isla Mayor-1	VALDEBRO	1957	220516	4117387	2375	560
Sapo-1	ERAP	1967	215692	4106900	971,1	475
Bética 14-1	ESSO	1967	220929	4102024	3507	510

**Tabla III-2-2 Sondeos seleccionados para este estudio**



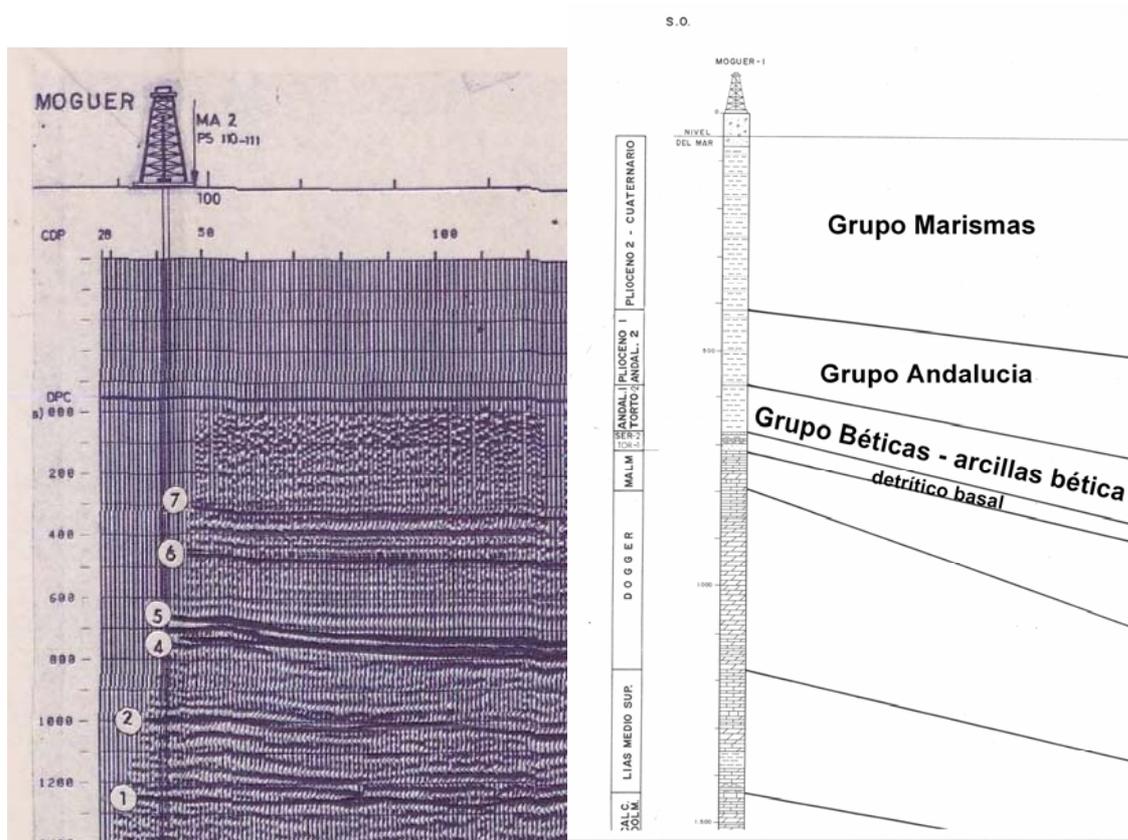
**Fig. 72. Situación de los sondeos seleccionados en el área de estudio [fichero XYsondeosHidro.xls]**

La información disponible sobre las columnas de estos sondeos (según el Informe “**Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España. Tomo I. Guadalquivir-Golfo de Cádiz**”, 1990, Ref. 29036 y las fichas facilitadas por el Servicio de Hidrocarburos) es muy escueta. Como ejemplo, para el sondeo Moguer-1 la columna descrita, representada en la Figura 73, es:

FORMACIÓN O EDAD	TECHO (m.s.n.m.)	Potencia m	Litología
MIOCENO-PLIOCENO	0	713	Margas con algunas areniscas
JURASICO SUPERIOR	713	77	Calizas ocasionalmente. Oolíticas o dolomíticas
LIAS	790	833	Dolomías y alternancia de calizas, margas arcillas y dolomías a la base
BETICO	1623	281	Dolomías, equivalente de las carniolas.
TRIASICO	1904	472	Anhidrita, sal. Arcillas Arenisca y conglomerados
PALEOZOICO	2376	97	Arcillas esquistosas, carbonífero?

La agrupación realizada es de tipo sismo-estratigráfico: se efectúa una distinción entre grandes unidades, utilizando denominaciones indiferenciadas tanto de fácies como de pisos locales, que se manifiestan por dar lugar a reflectores sísmicos, y que para los pisos por encima del basamento Mesozoico son (Figura 73):

- Grupo del Guadalquivir o **detrítico basal**, formado por litologías del Serravaliense-2 y Tortoniense-1, del Mioceno inferior
- Grupo béticas, o **arcillas bética**, formado por litologías del Andaluciense-1 (Saheliense o Messiniense) y Tortoniense-2
- Grupo Andalucía, formado por litologías del Plioceno y Andaluciense-2
- Grupo Marismas, formado por litologías del Plioceno-2 y Cuaternario.
- Cuaternario



**Fig.73. Columna tipo de los sondeos de hidrocarburos. Sondeo Moguer-1 y situación del mismo sobre la sección sísmica MA-01 [archivo Moguer-1.tif]**

No se ha podido encontrar una fuente donde se definan los tramos a los que aquí se adjudican dos unidades (p.e. Tortoniense-1 y 2), ni la litología de cada uno, pero de la secuencia y trama utilizada en las columnas que se han encontrado dibujadas, puede deducirse que las margas azules están comprendidas en el Grupo Béticas. En efecto, según los criterios lito-estratigráficos sintetizados en el apartado anterior, de acuerdo con la profundidad y edad de los distintos Grupos, existe ambigüedad entre dos agrupaciones: el Grupo Bética y el Grupo Andalucía:

- Ambas formaciones están encuadradas dentro del Mioceno Superior. Más concretamente, el final del Tortoniense se sitúa entre ambos grupos.
- El único carácter litológico que se puede apreciar en las columnas de los sondeos es el tamaño de grano. Según la trama utilizada para definir los grupos, se concluye que ambos horizontes son de carácter arcilloso-limoso.

A pesar de estas indeterminaciones, se ha concluido que el horizonte correspondiente a las margas azules es el Grupo Bética. Esta afirmación se sustenta en las razones siguientes:

- Algunos autores denominan a la capa suprayacente a las margas azules como Andaluciense.
- La sucesión de estratos hasta llegar al nivel de interés es tal que se puede establecer una correlación entre los niveles atravesados y las litologías descritas en el apartado III.2.2: se

pasa de forma gradual de sedimentos continentales de distinto tamaño de grano a sedimentos marinos, secuencia típica asociada a una regresión marina.

- Las margas azules pertenecen al Tortoniense, de forma inequívoca, según la microfauna encontrada.
- Se trata del último nivel de carácter marino de edad miocena.
- Se puede afirmar que el Grupo Andaluciense es una transición de sedimentación marina a sedimentación continental, aumentando el tamaño de grano de muro a techo, estableciendo una correlación con las arenas Sahelienses y arcillas del Villafranquiense.

De esta manera, se ha tomado de la información de los sondeos la profundidad o cota bajo el nivel del mar a la que se encuentra el techo de las margas azules, según se indica en la Tabla III-2-2.

La mayoría de los sondeos seleccionados han servido de base para la identificación de los horizontes o reflectores sísmicos en las secciones más próximas MA-01, MA-02, MA-03 y MA-04 (Figura 74). Esto ha permitido además establecer una correspondencia entre tiempos y profundidades, lo que ha sido aprovechado para verificación del análisis de velocidades, a fin de corroborar la ley calculada para la conversión de tiempos a profundidades, que se describirá posteriormente.

#### **III.2.4 Datos geofísicos sísmicos de partida. Facies sísmicas.**

De la revisión de los conceptos estratigráficos anteriormente efectuada, así como de la información suministrada por los sondeos mecánicos en los que conste fehacientemente que se han cortado las margas azules (prácticamente sólo en los de la exploración de hidrocarburos), se concluye que, excepto en la parte norte, la profundidad a la que se encuentran las margas azules no permite su exploración mediante los SEV disponibles, pudiendo ser, no obstante un posible objetivo con sísmica de reflexión. En el apartado 5 del Capítulo I del presente Informe se indicó la existencia de numerosas líneas efectuadas entre los años 1968 y 1986. Parte de las líneas sísmicas anteriores a 1972 cubren el actual Parque Nacional y zona de Marismas (Figura 38), mientras que las posteriores (Figura 39) sólo fueron efectuadas fuera de estos límites. En la Figura 74 se indica la situación de estas líneas, según los mapas de posición facilitados por REPSOL, y actualmente incluidos en la base datos SIGEOF del IGME.

En consecuencia se procedió a efectuar una consulta y solicitud de información al Archivo Técnico de Hidrocarburos (Ministerio de Hacienda), con el resultado de que parte de las líneas no existen en dicho Archivo, y de que otra parte son actualmente (2003) confidenciales, debido a la existencia de permisos vigentes de exploración y explotación. Finalmente, para llevar a cabo este trabajo se han utilizado las 20 líneas siguientes, cuyo trazado queda indicado en la Figura 75 y Tabla III-2-3.

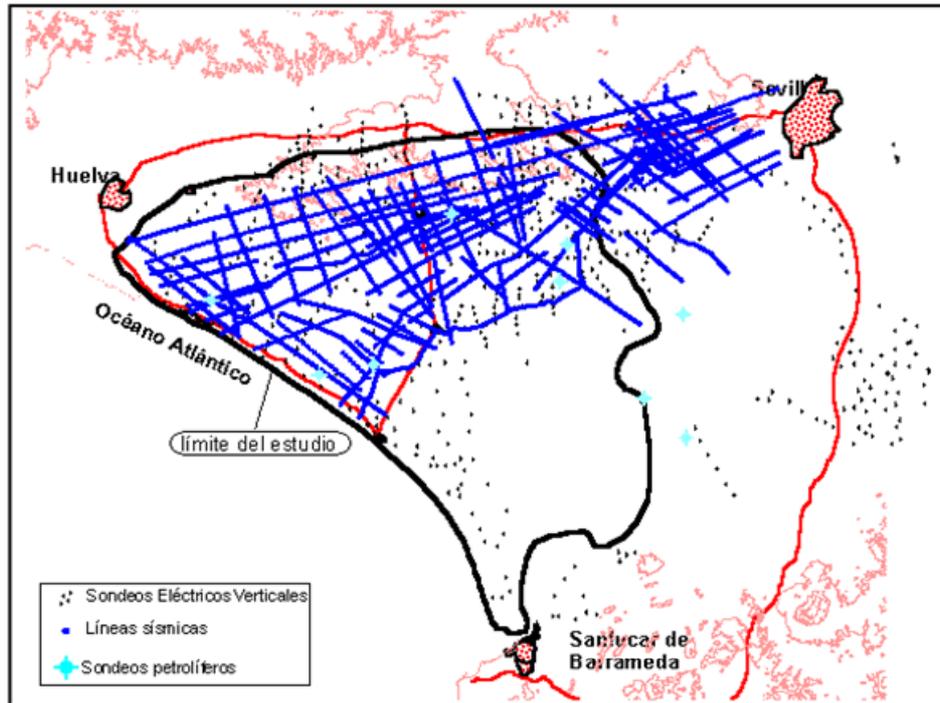


Fig. 74. Líneas Sísmicas existentes en la zona de estudio y sondeos de hidrocarburos.[fichero nombreLineas.xls]

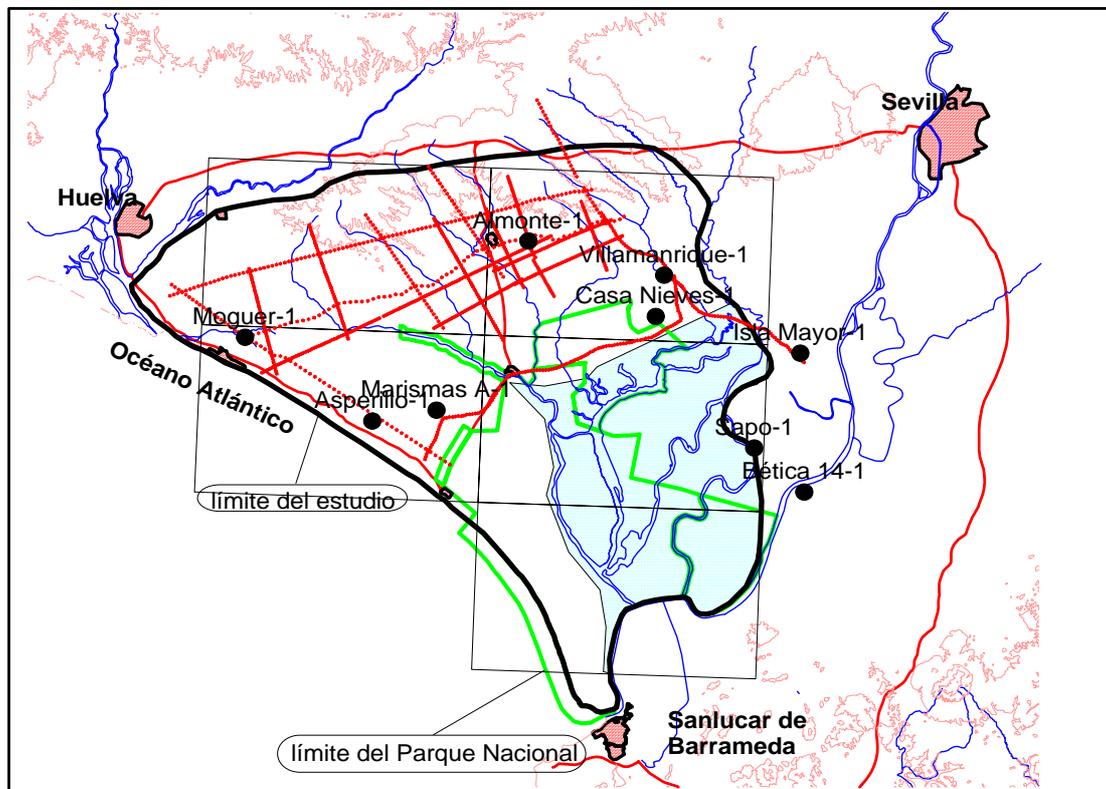


Fig. 75. Posición de las líneas sísmicas utilizadas en este estudio y sondeos de hidrocarburos.[ficheros nombreLinea.xls]

Nombre de línea	Año de realización	Orientación	Nombre de línea	Año de realización	Orientación
MA-01	1978	NS	PF-84-19	1984	EO
MA-02	1978	EO	PF-84-30	1984	NS
MA-03	1978	EO	PF-84-31	1984	NS
MA-04	1978	NS	PF-84-34	1984	NS
PF-09	1983	EO	PF-84-37	1984	NS
PF-10	1983	NS	PF-84-39	1984	NS
PF-11	1983	NS	PF-86-04	1986	EO
PF-12	1983	NS	PF-86-06	1986	EO
PF-13	1983	NS	PF-86-07	1986	NS
PF-84-17	1984	NS	PF-86-08	1986	NS

**Tabla III-2-3 Líneas sísmicas utilizadas. Todas las secciones están reproducidas en el Anexo Digital de este capítulo.**

En esta selección se ha tenido en cuenta que en las líneas MA-01, MA-02, MA-03 y MA-04 se encuentran previamente identificados los reflectores debidos a los criterios de Grupos lito-estratigráficos anteriormente mencionados. El resto de las líneas se han seleccionado atendiendo a los siguientes criterios:

- Conseguir una cobertura homogénea de la zona de estudio, de tal forma que formen una red, a fin realizar un seguimiento del horizonte reflector con suficiente cobertura en el área de interés.
- La posibilidad de establecer un sistema de control en el seguimiento del reflector del techo de las margas azules, tanto mediante intersección con las líneas base, de tal forma que pueda trasladarse este reflector al resto de las líneas, como para verificar que el tiempo medido en los puntos de intersección, sea de la mayor fiabilidad posible.

En los diferentes perfiles sísmicos estudiados se ha hecho un intento de identificar la evolución geológica de las formaciones que componen el acuífero de Almonte–Marismas, por las características reflexivas o facies sísmicas diferenciales. En todas las secciones se observan cinco tramos o facies sísmicas, aunque en algunas se puede definir otro más. Los tramos definidos, de mayor a menor tiempo de registro (Figura 76), son los siguientes:

1. Se observa en todos las secciones. Presenta una configuración caótica con pequeña amplitud y baja continuidad. Este tramo sería lo que se denomina en estratigrafía del subsuelo como basamento acústico, punto a partir del cual podemos definir la cuenca de sedimentación a estudio. Este basamento correspondería con lo que se viene denominando nivel detrítico basal.

2. Por encima del anterior se observa un tramo representado a lo largo de todas las secciones. Presenta una configuración paralela con alta amplitud y continuidad, y una geometría de tabla con ausencia de reflectores intermedios. Esto indica que este depósito agradante refleja un ambiente de baja energía. Puede tratarse de las denominadas margas azules.
3. El tramo suprayacente al anterior se presenta a lo largo de todas las secciones con una configuración subparalela y una geometría sigmoide progradante. La sección sísmica presenta una amplia continuidad y amplitud, observándose *down lap* en algunas zonas. Las características del tramo indican una baja energía de sedimentación.
4. Otro tramo diferenciable, pero que no aparece en todas las secciones, se deposita sobre el tramo anterior y muestra una configuración paralela. Se trata de unas facies menos continuas, aunque igual de amplias que las anteriores, lo que indica una energía variable. Este tramo se deposita formando un *on lap* con el tramo infrayacente, lo que denota una parada en la progradación de la cuenca.
5. Se diferencia otro tramo que se deposita sobre los tramos 3 y 4. Presenta una configuración paralela y una amplitud y continuidad muy elevadas. Observando el conjunto de las secciones, se puede decir que se trata de una facies oblicua progradante, propia de un ambiente de alta energía. Donde mejor está representada la geometría del banco es en la línea sísmica MA4 de dirección W-E. El conjunto progradante de los tramos 3, 4 y 5 puede representar el denominado como unidad deltaica.
6. El tramo superior presenta una configuración subparalela algo caótica con una baja amplitud y continuidad media. Muestra una geometría de banco y puede corresponder con la unidad eólica.

Los perfiles donde mejor se observa la morfología de la unidad deltaica, progradante, son los de dirección W-E. Esto es así debido a que son perpendiculares a la dirección de progradación.

En resumen, teniendo en cuenta las características de las reflexiones en los perfiles, puede decirse que existe un basamento acústico sobre el que se depositan las margas azules, con características de baja energía, luego existe una parada sedimentaria y posteriormente se deposita el conjunto deltaico, que presenta características progradantes resultado de una regresión. Más tarde se deposita la unidad eólica con características de una mayor energía. En conclusión, la secuencia de facies sísmica puede interpretarse como la propia de una secuencia sedimentaria de regresión, pasando de ambientes marinos profundos (margas azules) a un ambiente continental (unidad eólica), con una etapa intermedia de naturaleza deltaica. Fruto de esta regresión se formó el acuífero de Almonte – Marismas, y las actuales marismas de Doñana.

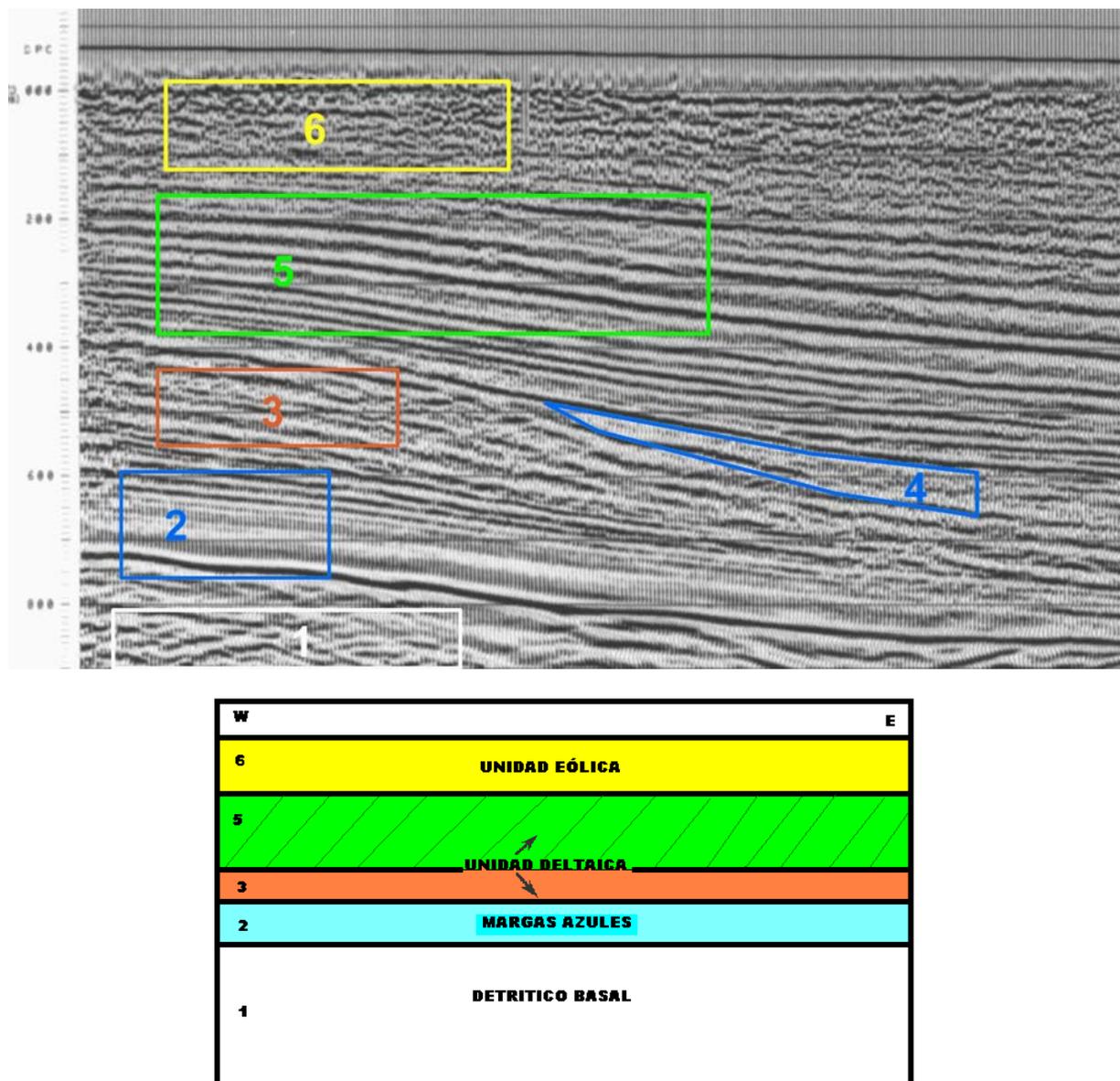


Fig. 76. Tramos de facies sísmicas identificados en las secciones (ejemplo de sección PF-86-08) y esquema de asignación estratigráfica.

### III.2.5 Metodología seguida en la interpretación de las secciones sísmicas

La información de base utilizada para este trabajo la constituyen las secciones sísmicas junto con los mapas de posición, ambos documentos en soporte de papel. Ello ha obligado a diseñar una metodología específica para este trabajo, que tiene como finalidad la obtención de todos los datos necesarios en formato digital, a fin de utilizar herramientas informáticas en los correspondientes cálculos y representaciones gráficas. Se hace además constar que el método seguido tiene una serie de singularidades derivadas de la disponibilidad de los medios; en este sentido la aplicación fundamental utilizada es el programa SURFER, y los PC utilizados (Área de Geofísica del IGME) presentan ciertas limitaciones en el tratamiento de una información tan masiva como son las imágenes sísmicas. El proceso seguido consta de las fases sintetizadas en la Figura 77:

- **Preparación de la información sísmica de partida para su posterior tratamiento informático**

Para lo que ha sido necesario efectuar las siguientes actuaciones:

- a) *Paso a formato digital (imágenes escaneadas) de los documentos originales*

Una vez recopiladas todas las líneas sísmicas disponibles en la zona de estudio (Tabla III-2-3), se ha procedido al escaneado de las mismas a fin de obtener archivos digitales gráficos. Sus imágenes en formato tif se encuentran en el Anexo Informático de documentos escaneados y digitalizados (Anexo Digital II-a), denominándose cada fichero según el nombre de la sección correspondiente dada en el tabla III-2-3.

Los planos de posición (Figuras 38 y 39, mapas 4k-1 y 4k-4) donde se encuentran estas líneas están igualmente escaneados.

- b) *Obtención de las coordenadas X,Y de los puntos de las líneas sísmicas donde se van a realizar las medidas de tiempos: ficheros X,Y, PT.*

Al no disponer de ficheros originales con las coordenadas de los puntos de tiro (PT) de las líneas sísmicas se ha partido de los mapas escaneados de posición de las mismas. Una vez efectuada su georeferenciación en el sistema UTM, se han digitalizado (en pantalla de PC) las coordenadas  $X_{UTM}$ ,  $Y_{UTM}$  de los PT indicados en los mapas. Los ficheros generados en formato ASCII, con los datos **X,Y,PT**, resultado de esta operación han sido traspasados a formato Excel, incorporando nueva información (X,Y huso 29, X,Y huso 30, punto de tiro, corte con líneas, twt, X,Y en dm, distancia de cada punto de tiro del anterior]. Los ficheros ascii originales de la base de datos SIGEOF [formato Y,X dm huso 29, X,Y dm huso 30, X,Y m huso 30] son utilizables sólo a efectos de posicionamiento, pero no de cálculo, ya que no contienen información de los PT.

- c) *Preparación del sistema de picado y lectura de tiempos*

Se ha procedido a eliminar de las imágenes escaneadas de las secciones sísmicas partes con información no necesaria para proceder al picado de tiempos de los reflectores (información de los parámetros de registro y proceso, diagrama de cobertura, análisis de velocidad, etc.), generando nuevas imágenes, denominadas "Secciones Recortadas". Sobre estas secciones se han identificado las trazas en las que se va a realizar las medidas de los tiempos, que son los puntos CDP de los que se han obtenido sus coordenadas de posición.

- **Selección y picado del reflector de las margas azules: ficheros PT, twt**

Una vez seleccionado el reflector correspondiente al techo de las margas azules, se ha procedido a su señalización digital a lo largo de las secciones en todos los ficheros gráficos "Secciones Recortadas", generando unas nuevas imágenes en formato srf "Secciones Sísmicas Surfer. La digitalización de dicho reflector permite la obtención de los tiempos correspondientes a cada traza seleccionada, ficheros **PT, twt**. Estos ficheros se integrarán con los de posición, para obtener finalmente un conjunto de valores **PT, X, Y, twt**.

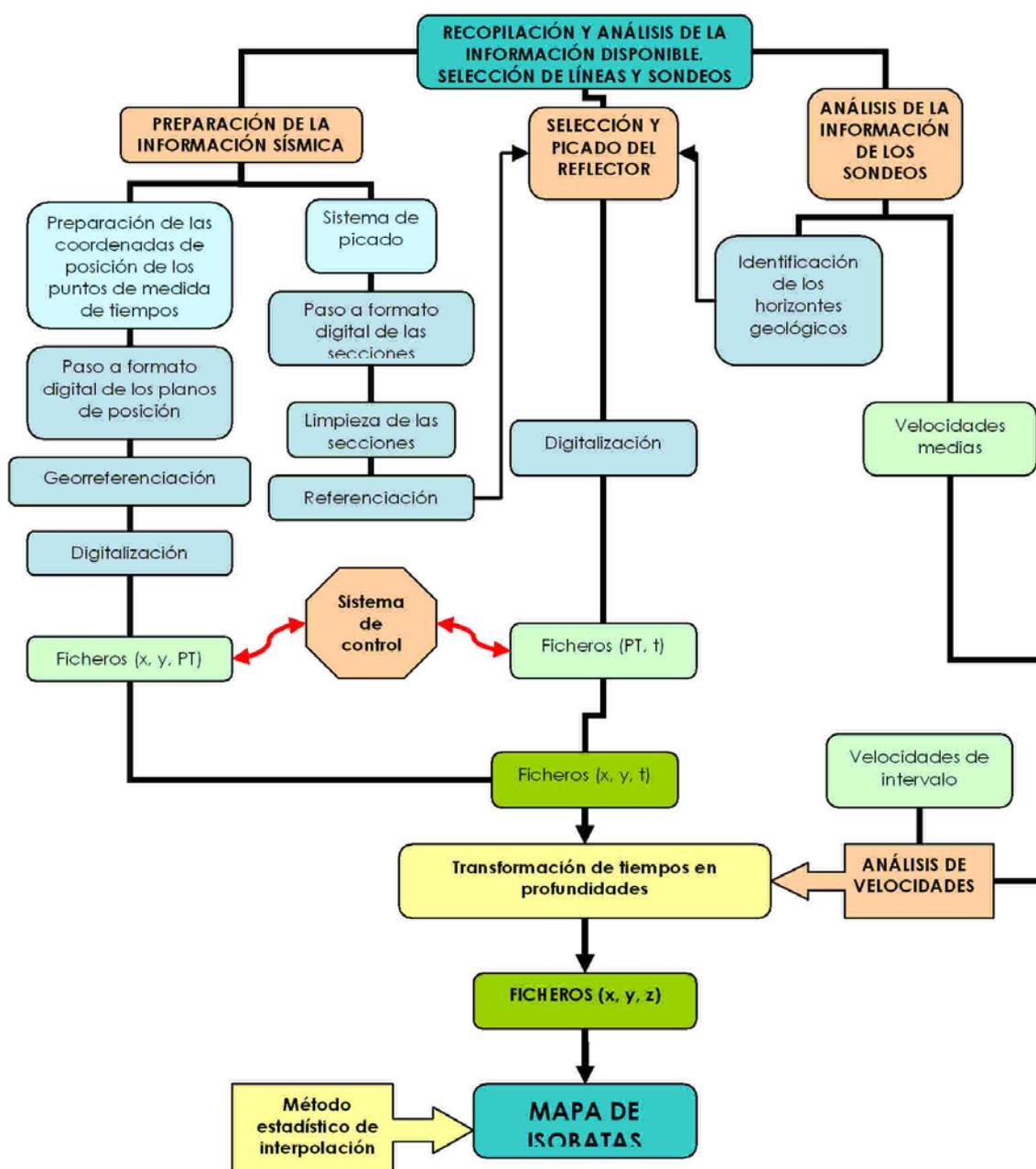


Fig. 77. Organigrama de la metodología seguida en la interpretación de las secciones sísmicas.

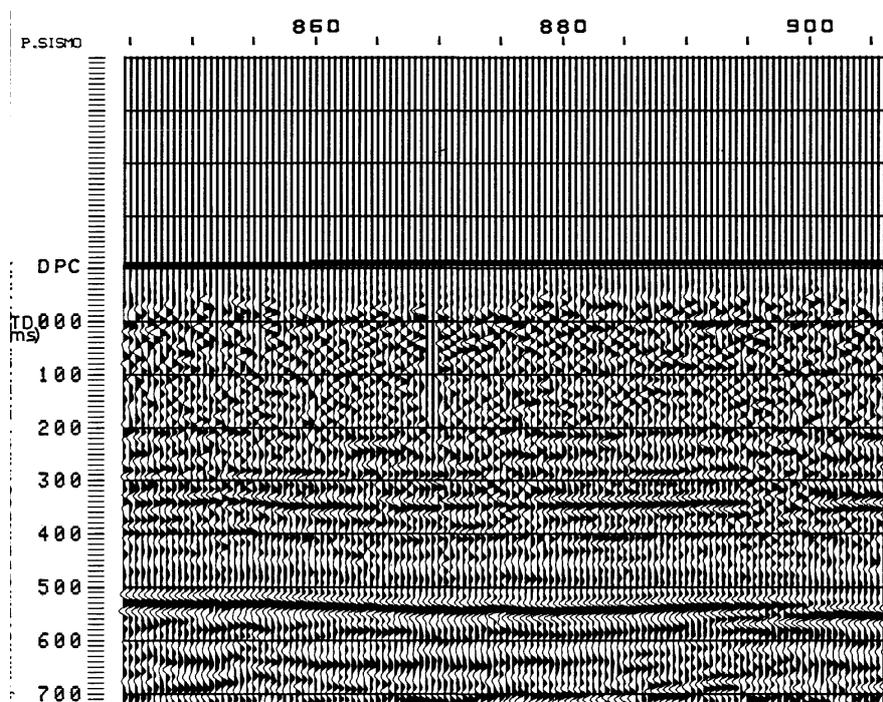
- **Tratamiento de la información sísmica obtenida y trazado del mapa de isobatas**

Con toda la información disponible sobre las secciones y sondeos se ha realizado el análisis de velocidades a fin de obtener la ley de transformación de tiempos en profundidades. Con el conjunto de valores  $X_{UTM}$ ,  $Y_{UTM}$ ,  $Z$  será realizada la cartografía de la cota del techo de las margas azules.

Estas etapas serán seguidamente descritas en mayor detalle. Todos los ficheros generados en este proceso se encuentran recogidos en el Anexo Digital III-2.

### III.2.6 Obtención de las coordenadas de los puntos de tiro. Sistema de control

Las trazas de una sección sísmica están identificadas en la misma por el número al que corresponde el conjunto CDP (o su equivalente en numeración de puntos de tiro PT) que da lugar a dicha traza, tras el proceso de datos de los registros de terreno, como se indica en el ejemplo de la Figura 78.



**Fig. 78.** Detalle de los ejes de una sección sísmica. Horizontal: numeración en PT de las trazas CDP. Vertical: tiempos dobles (twf) de los reflectores.

Para cada traza, se precisa medir el tiempo del reflector (el valor de tiempo doble twt ó TD en ms en el eje vertical), para trasladarlo a un plano a fin de efectuar el trazado de las líneas isócronas. Para ello es imprescindible disponer de las coordenadas X,Y de dichos puntos. La falta de esta información acerca de las coordenadas de la posición de los puntos de tiro, ha obligado a establecer un procedimiento de obtención de las mismas, cerciorándose, al mismo tiempo, de no cometer errores significativos, habiendo sido tomadas por digitalización a partir de los planos de posición de las líneas sísmicas. Los planos originales 4K-1 y 4K-4 se han escaneado (Anexo Digital II-a), dando lugar a archivos imagen, como el fragmento de ejemplo que se representa en al Figura 79.

Las imágenes escaneadas de estos planos se han georeferenciado mediante el programa *Surfer* (definiendo los valores máximos y mínimos de  $X_{UTM}$  e  $Y_{UTM}$  de las esquinas de la imagen). Esto se ha realizado partiendo del conocimiento de las coordenadas UTM de al menos dos puntos del mapa origen, que, junto con las dimensiones del archivo imagen, permiten hallar los valores máximos y mínimos de  $X_{UTM}$  e  $Y_{UTM}$  mediante los pertinentes cambios de escala y origen de coordenadas.



**Fig. 79. Fragmento de mapa de posición de líneas**

En los mapas de posición de las líneas, aparece identificada la posición de uno de cada diez puntos de tiro, numerados en el orden de avance de la línea (Figura 79), siendo ésta por lo tanto la distancia que se va a utilizar para el cálculo de coordenadas y posterior medición de los tiempos.

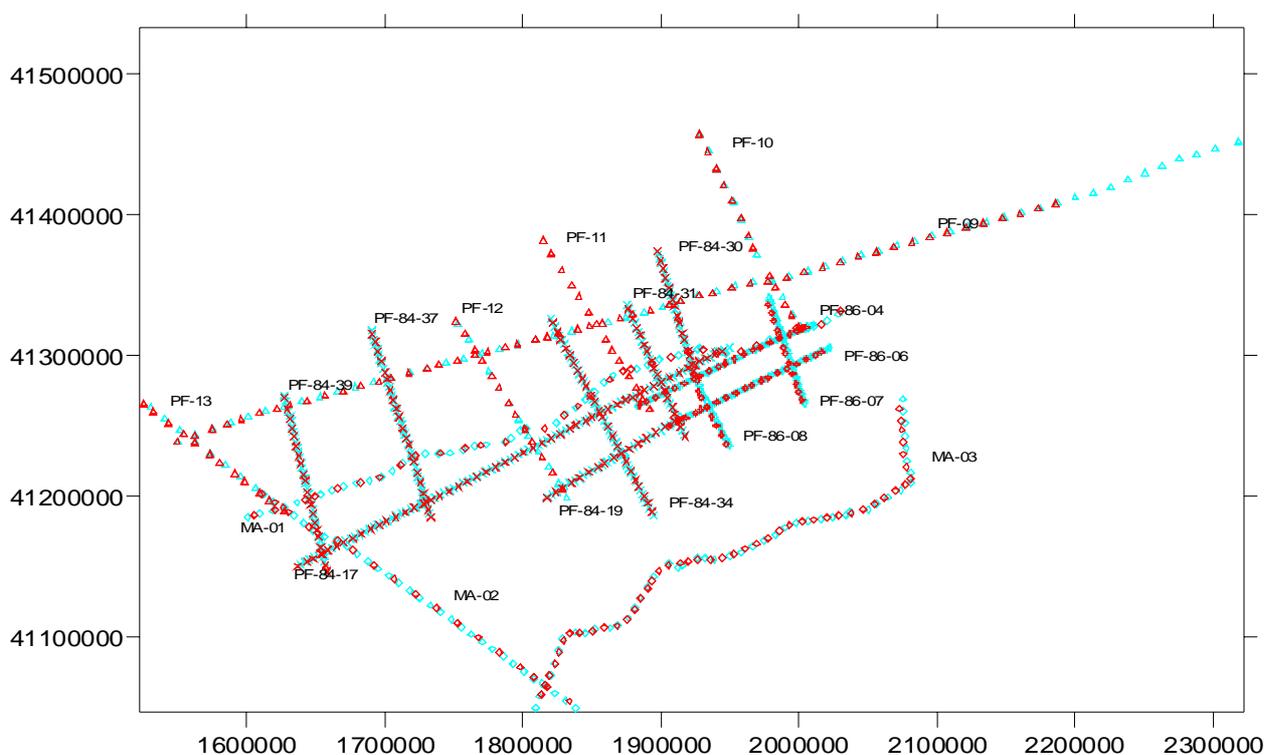
El comando *Digitize* del programa *Surfer* permite la identificación y registro (en fichero tipo ASCII) de las coordenadas de cualquier punto de la imagen georeferenciada mediante la señalización del mismo con el puntero. En la Tabla III-2-4 aparecen reflejadas las distancias medias entre dos medidas consecutivas (10 puntos de tiro), así como la longitud total aproximada de cada línea. Las inter distancias entre dos medidas permiten un conocimiento aproximado de la precisión de la cartografía.

NOMBRE	Longitud (km)	Nº Puntos de tiro	Equidistancia(m)
MA-01	47,3	780	606
MA-02	27,4	450	608
MA-03	28,8	960	300
MA-04	39,3	1320	298
PF-09	66,4	1480	449
PF-10	16,8	370	454
PF-11	15,0	330	453
PF-12	15,3	340	450
PF-13	13,6	300	454
PF-84-17	35,0	1400	250
PF-84-19	12,0	460	261
PF-84-30	9,4	370	255
PF-84-31	10,6	410	257
PF-84-34	16,3	640	254
PF-84-37	14,2	540	262
PF-84-39	13,1	520	251
PF-86-04	13,8	560	246
PF-86-06	13,1	520	252
PF-86-07	8,3	330	250
PF-86-08	6,4	250	256

**Tabla III- 2-4 Distancias medias entre puntos de tiro para las líneas utilizadas**

Las veinte líneas utilizadas suponen un total de 422 km y más de 1200 puntos de tiro, para los que se ha digitalizado sus coordenadas y en los que se ha medido el tiempo del reflector. El hecho de no contar con información digital directa, obliga a establecer un sistema de control para evitar errores, ya que las distintas operaciones realizadas a partir de documentos en papel pueden conllevar imprecisiones tales como distorsiones y giros de los planos al pasar a ficheros imagen, errores en la georeferenciación, errores al obtener de las coordenadas, etc.

Se ha podido disponer de ficheros topográficos de las coordenadas de las líneas (obtenidos de SIGEOF, contenidos en el Anexo Digital II-a), aunque sin identificación de puntos de tiro. Con ellos, se ha establecido un control de las coordenadas obtenidas mediante la representación gráfica y superposición de ambas informaciones, presentada en la Figura 80, donde se puede observar que los errores cometidos en la obtención de las coordenadas de los puntos de medición son mínimos para la escala de trabajo.



**Fig. 80. Representación de la posición de las líneas [posición de líneas digitalizadas.srf]. En color rojo aparecen los puntos obtenidos en el proceso de digitalización, y en color azul la representación de los ficheros topográficos.**

Mediante la digitalización en SURFER, para cada línea se ha generado un fichero ascii, con indicación de las coordenadas X,Y UTM (huso 29) y número del punto de tiro. Posteriormente, estos ficheros han sido trasladados a la aplicación EXCEL, donde se han añadido las coordenadas en huso 30, así como la identificación de los puntos de corte con otras líneas, según el ejemplo representado en la Figura 81.

Línea PF-86-08			
Xhuso30	Yhuso30	PT	CORTES CON OTRAS LÍNEAS
192210	4129107	101	
192322	4128890	110	
192421	4128668	120	
192523	4128470	130	
192560	4128402	132	PF-86-04
192634	4128235	140	
192774	4127993	150	
192610	4127666	160	
192717	4127454	170	
192812	4127265	179	PF-84-18
192830	4127214	180	
192959	4126994	190	

**Fig. 81.** Ejemplo de fichero xls resultado de la obtención de coordenadas de los puntos de tiro de cada línea (tomados cada 10 valores) en los mapas de posición escaneados.

### III.2.7 Obtención de los tiempos del reflector en las secciones sísmicas.

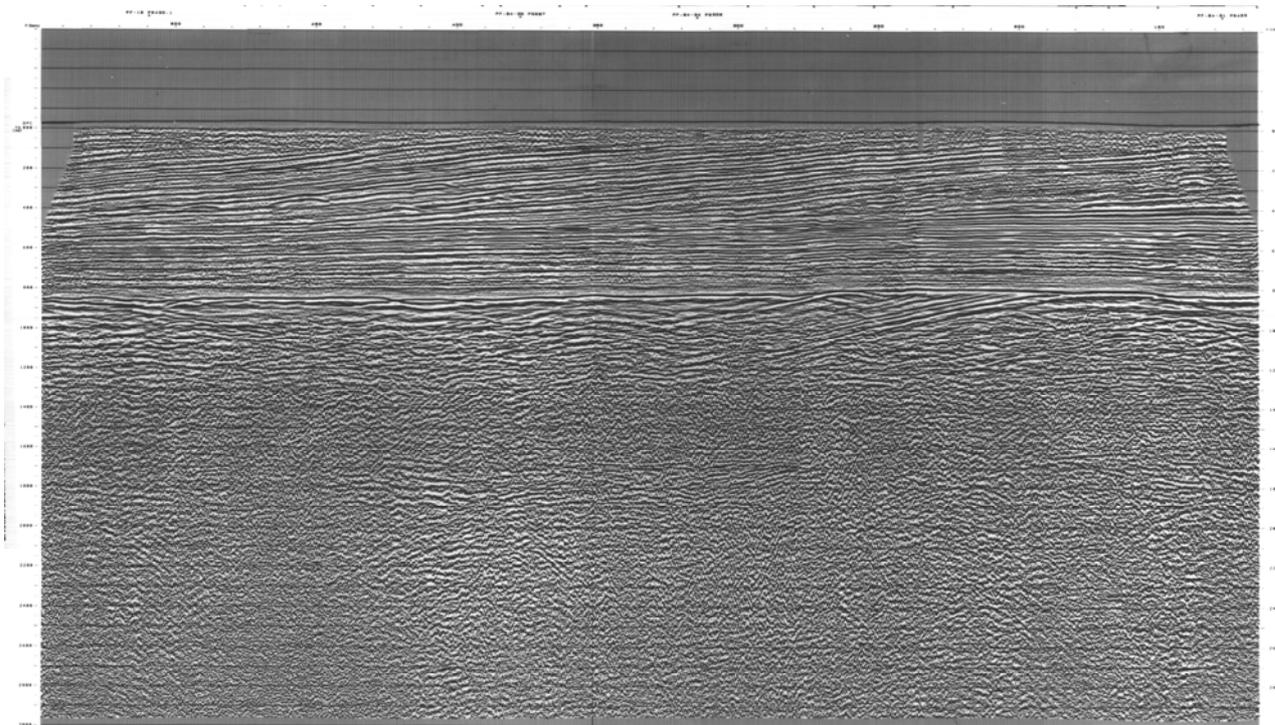
La lectura de tiempos del reflector de las margas azules se ha efectuado por digitalización sobre las imágenes escaneadas de las secciones sísmicas, para lo que previamente se ha efectuado la identificación y “picado” o marcado del reflector. El sistema de digitalización exige además definir el sistema de coordenadas de las imágenes, definiendo los ejes de tiempo y de puntos de tiro que permitan la obtención de los tiempos correspondientes a cada uno de los puntos de los cuales son conocidas sus coordenadas UTM.

Para ello ha sido necesario realizar las siguientes operaciones:

- Paso a formato digital de los documentos secciones originales mediante escáner, obteniendo así, los archivos de las imágenes correspondientes.
- Limpieza de los archivos imagen obtenidos, ya que contienen un tipo de información no necesaria para este procedimiento que se transforma en dificultades de su tratamiento informático por la excesiva capacidad de memoria requerida. En esta fase, se han recortado digitalmente las imágenes, eliminando información no procedente: márgenes, cajetines, etc., con el fin de disminuir su extensión. De esta forma, se consigue que los archivos imagen de las secciones contengan sólo la información relativa a los tiempos de llegada, para efectuar, en una etapa posterior el picado del reflector. Un ejemplo del resultado de esta operación se refleja en la Figura 82.
- Referenciación de las imágenes de las secciones sísmicas en un sistema de coordenadas Punto de Tiro, tiempo doble. De esta forma se ha conseguido que cada punto de los archivos imagen de las secciones sísmicas seleccionadas esté identificado mediante el par (PT, twt) lo que

permitirá, más tarde, la lectura de los tiempos de llegada al reflector de las margas azules sobre los puntos de tiro cuyas coordenadas de posición han sido obtenidas anteriormente.

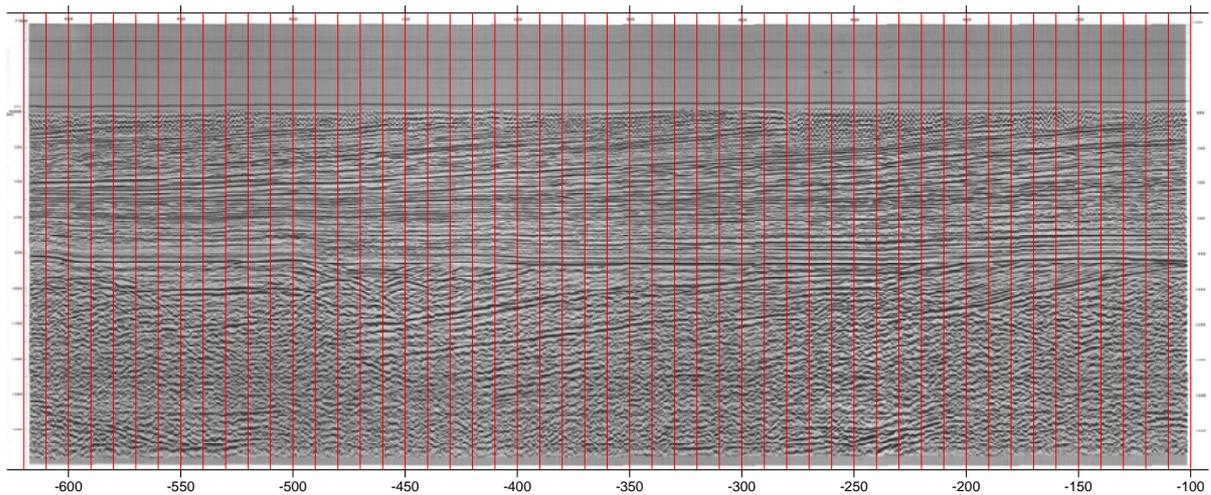
- Señalización sobre las imágenes de las secciones de los puntos de tiro donde se va a realizar la lectura de tiempos. La lectura de tiempos, como ya se ha mencionado, se va a efectuar sobre los puntos de tiro que aparecen señalizados en los planos de posición de las líneas (ejemplo en Figura 79). Para identificar con seguridad y sin errores dichos puntos de tiro, se han representado sobre la sección los ejes de puntos de tiro constante, a intervalos de diez (Figura 83). De esta forma, una vez señalado (picado) el reflector correspondiente al techo de las margas azules, se tomarán los tiempos en las intersecciones entre dicho ejes y el reflector.



**Fig. 82. Ejemplo Sección sísmica limpia**

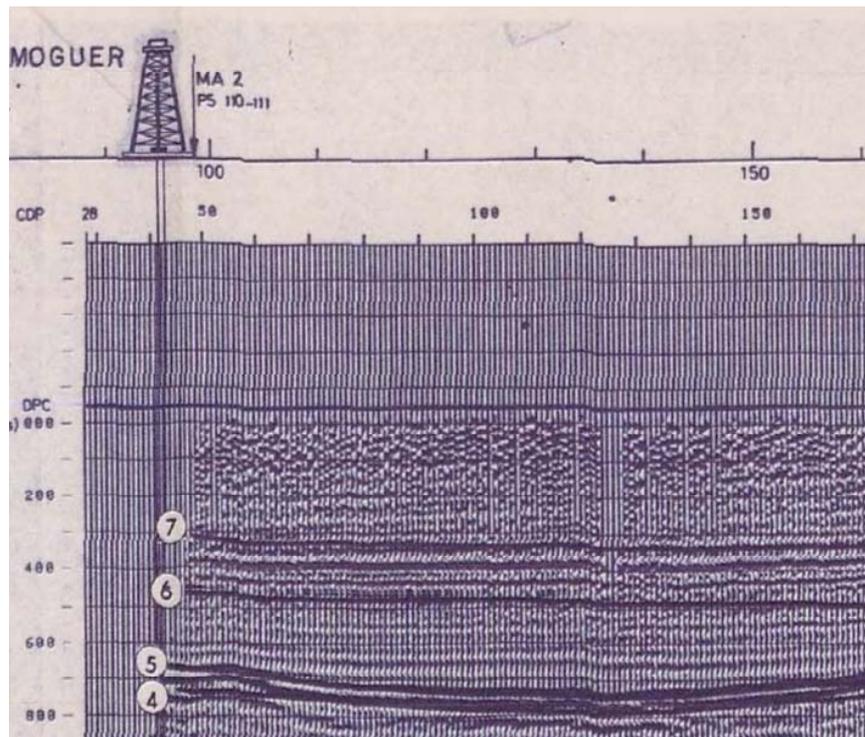
Para identificar el reflector correspondiente a las margas azules se ha partido de las líneas base MA-01, MA-02, MA-03 y MA-04, en las que se encuentran identificados, junto a los sondeos más próximos, los reflectores de los diversos Grupos lito-estratigráficos (Figura 73 y 84):

- Reflector 7: techo del Grupo Andalucía
- Reflector 6: techo del Grupo Béticas, que contiene las margas azules.
- Reflector 5: techo del Grupo Guadalquivir
- Reflector 4: techo del Jurásico



**Fig. 83. Ejemplo de Sección preparada para el picado del reflector. Las líneas rojas pertenecen a uno de cada diez puntos de tiro, correspondiéndose con los señalizados en los planos de posición ( Fig. 79).**

La elección del reflector 6 como el más próximo al techo de las margas azules tortonienses viene además corroborado por la facies sísmica observada entre los reflectores 6 y 5, correspondientes a materiales con un carácter marcadamente plástico, como fue comentado en el apartado III-2.4.



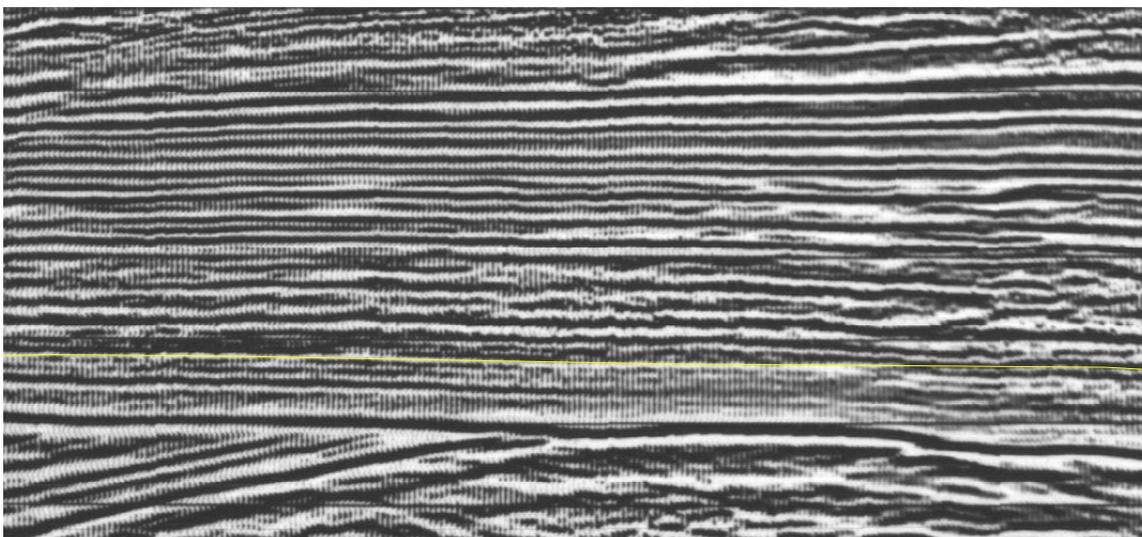
**Fig. 84. Situación del reflector 6 del techo del Grupo Bética sobre la sección MA-01**

Por otro lado, el reflector del techo del Grupo Bética, tiene un buzamiento NNO-SSE, situación que coincide con las afirmaciones de los estudios geológicos realizados por varios autores (apartado III-2.3), correspondiéndose también las facies sísmica de los materiales suprayacentes con los

materiales mencionados en las descripciones geológicas, de carácter fundamentalmente de materiales arenosos.

En cuanto a la respuesta sísmica de los materiales subyacentes, se observa un pequeño nivel por debajo del supuesto paquete de margas con una disminución de la longitud de onda. Este nivel puede identificarse con el denominado *nivel detrítico basal*. Por debajo de este nivel, aparece un reflector que, muy claramente, separa a dos macroniveles sísmicos. Un nivel inferior más rígido, con un aumento de la velocidad de propagación por encima de los 2000 m/s, y un nivel superior con un velocidad más pequeña, de menor rigidez y, por tanto, de carácter más detrítico. Este reflector equivaldría a la discordancia sedimentaria bajo el *Mioceno transgresivo de base*. Todo ello justifica suficientemente la elección del reflector correspondiente al techo del Grupo Bética como el más representativo de la posición del techo de las margas azules.

Una vez seleccionado el nivel de interés, se ha procedido a su picado (señalización) a lo largo de todas las secciones disponibles, marcándolo con una línea de color amarillo, como se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 85.



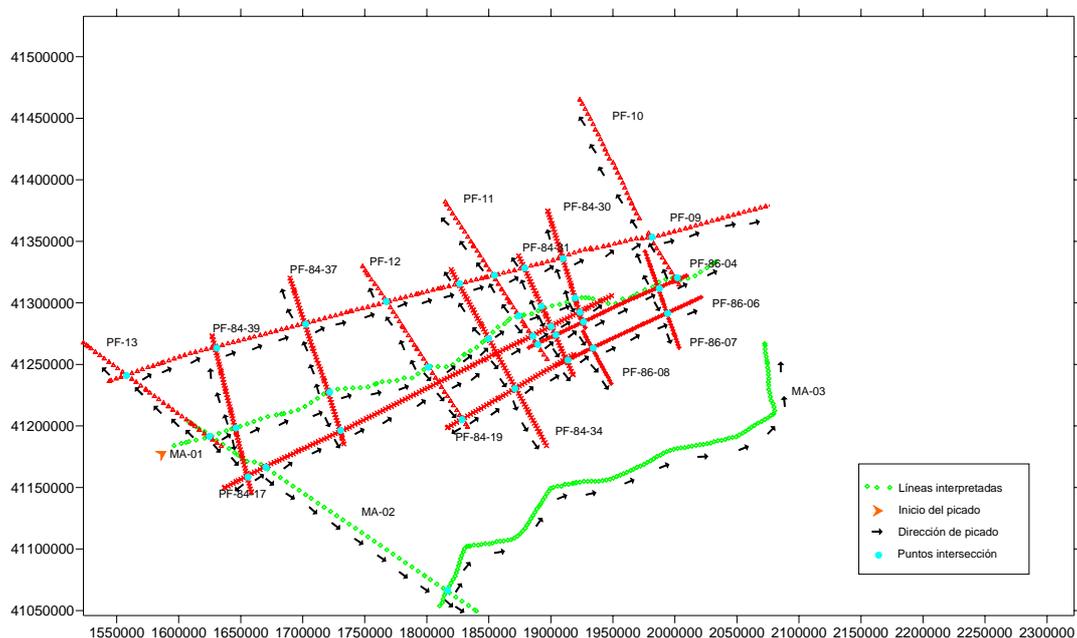
**Fig. 85. Reflector del techo de las "margas azules" señalado (en amarillo) en línea PF-84-19**

Para el picado del reflector se han seguido los siguientes criterios:

- Se ha seleccionado el "valle" inferior a la onda de interés, pues los "picos", al estar rellenos en color negro por el sistema de representación de la traza en área variable, son más difíciles de seguir a lo largo de una sección. Esta opción lleva implícito un error o decalaje en lectura del tiempo, que es algunos milisegundos mayor (del orden de 10 ms) que los tiempos de inicio, lo

que se traducirá posiblemente en un cálculo de profundidades unos 10 m mayores a las reales.

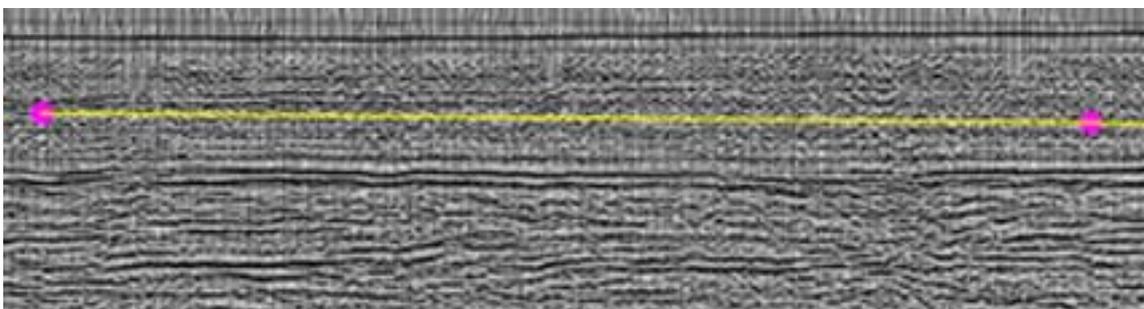
- Para seguir un determinado reflector a lo largo de una sección es necesario tener en cuenta el conjunto de sucesos sísmicos que lo rodean. De lo contrario se pueden producir saltos a otro reflector, pues, en ocasiones la onda que representa el mismo suceso en distintas trazas no tiene la misma morfología en cada una de ellas, y más aún cuando dichas secciones son de distinta procedencia.
- En el caso de que una sección se componga de varios fragmentos, es muy importante conocer con exactitud la coordenada (PT, t) del último punto para arrastrar el reflector a la continuación de la línea.
- A partir de una de las líneas interpretadas (líneas base), según una dirección E-O, se ha identificado el reflector en todas las líneas que la cruzan, midiendo los tiempos en los puntos de intersección sobre la línea base y trasladándolos a las distintas líneas con dirección N-S, teniendo en cuenta además que la facies sísmica del reflector en ambas líneas sea la misma. De esta forma, realizando este proceso de forma sucesiva, se ha proseguido con el picado en el resto de las líneas. En la Figura 86 se puede observar el recorrido seguido en la señalización.



**Fig. 86. Recorrido en la señalización del reflector**

A pesar de todas las medidas tomadas para minimizar los errores durante el proceso de picado del reflector, las líneas pertenecientes a las campañas más antiguas (PF-09, PF-10, PF-11, PF12 y PF-13) son de menor calidad gráfica, disminuyendo aún más la calidad con la conversión digital de los documentos originales. En las secciones correspondientes a la línea PF-09, existen partes en las que el reflector no es perceptible, lo que ha obligado a apoyarse en las líneas que la franquean a lo largo

de su recorrido. Es decir, midiendo los tiempos directamente sobre las secciones originales, se han llevado a lo largo de dicha línea, realizando así, el picado y el control simultáneamente (Figura 87).



**Fig. 87. Detalle de sección PF-09, donde la identificación del reflector no es clara, y se ha realizado por seguimiento entre puntos de cruce.**

Las secciones con el reflector señalado se encuentran recogidas en el Anexo Digital III-2.

Una vez identificado el reflector en todas las secciones, se ha procedido a la lectura de los tiempos, por digitalización. Los ficheros ASCII generados se encuentran recogidos en el Anexo digital III-2. Las lecturas se han tomado en las intersecciones del reflector señalado con los ejes de los puntos de tiro situados a equidistancias de diez, obteniéndose por lo tanto los valores (PT, t) a intervalos fijos de diez puntos de tiro coincidentes con los seleccionados en los mapas de posición. Esto supone un total de 1217 puntos en los que se conoce el tiempo doble de reflexión del suceso sísmico de interés.

Antes de la integración de todos los datos, es necesario establecer un sistema de control de los tiempos tomados en cada línea, de tal forma que se puedan controlar y corregir posibles errores en el picado y la digitalización. El sistema de control de tiempos utilizado consiste en la comparación de los tiempos tomados en las intersecciones de las líneas. Las diferencias pueden deberse a la posible modificación de las longitudes de onda en cada línea, ya que se trata a veces de distintas campañas, con variación de los parámetros tanto de registro como de proceso de datos. Existe también un error debido al grosor de la línea utilizada para marcar el reflector, además del cometido al digitalizar (1 mm equivale en las escalas utilizadas a 10 ms). Se admite, por tanto, la posibilidad de que en los puntos intersección se dé un cierto grado de discrepancia, habiéndose establecido un nivel de tolerancia máximo de 25 ms.

Los resultados de esta operación de control se hallan en la Tabla III-2-5, en la que se ha tomado como base las líneas con dirección E-O, mostrándose los tiempos medidos en el reflector en dichas líneas y en las que se cruzan con ellas. Como se puede observar, la mayoría de las diferencias se encuentran dentro de los límites establecidos por la tolerancia máxima. Sólo en la intersección entre las líneas MA-01 y MA-02 existe una discrepancia mayor, que puede ser una consecuencia de la

mayor escala a la que ambas se encuentran, por lo que el mismo grosor en mm de la línea utilizada en el picado representa más milisegundos. Con los ficheros (PT, twt) y los ficheros (PT,X,Y) de coordenadas de posición de los puntos de tiro, se puede ya elaborar un fichero (X,Y,twt) que refleje la posición y el tiempo doble de llegada de la onda en cada punto de medición sobre el terreno.

Línea base	Línea intersectada	Tiempos (ms)		Diferencia
		En línea base	En línea intersectada	
PF-09	PF-13	235	237	2
	PF-84-39	290	266	24
	PF-84-37	260	260	0
	PF-12	270	265	5
	PF-84-34	320	320	0
	PF-11	345	340	5
	PF-84-31	411	410	1
	PF-84-30	403	403	0
	PF-10	407	407	0
MA-01	MA-02	460	460	0
	PF-84-39	483	489	6
	PF-84-37	463	477	14
	PF-12	470	468	2
	PF-84-34	470	480	10
	PF-11	520	520	0
	PF-84-31	530	545	15
	PF-84-30	547	560	13
	PF-84-17	590	609	19
	PF-86-07	610	630	20
	PF-10	610	620	10
	MA-03	610	610	0
	PF-86-04	647	670	23
PF-84-17	MA-01	609	595	14
	PF-84-30	610	610	0
	PF-84-31	625	625	0
	PF-11	570	570	0
	PF-84-34	550	550	0
	PF-12	580	580	0
PF-86-04	MA-01	670	650	20
	PF-86-07	680	680	0
	PF-86-08	633	633	0
	PF-84-31	636	651	15
	PF-11	610	610	0
PF-84-19	PF-84-31	740	740	0
	PF-84-34	740	740	0
	PF-12	775	775	0
PF-86-06	PF-86-07	765	765	0
	PF-86-08	750	750	0
	PF-84-31	750	750	0
MA-04	MA-03	670	693	23
	MA-02	997	970	27

**Tabla III-2-5 Resultado del sistema de control de tiempos**

### III.2.8 Obtención de la velocidad para la conversión tiempo-profundidad

Para la conversión de los tiempos en profundidades es necesario conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en los diferentes medios rocosos por los que ha viajado hasta llegar a la superficie reflectante. La mejor fuente para su obtención es la testificación sónica de un sondeo que esté situado junto a las secciones sísmicas. Dado que no se dispone de esta fuente, se ha recurrido a utilizar las velocidades obtenidas durante el proceso de datos llevado a cabo para la corrección dinámica. En el Anexo III-2.8 se encuentra una explicación detallada del sistema de cálculo seguido, así como del control efectuado sobre el mismo.

En la mayor parte de las secciones sísmicas utilizadas se dispone del resultado del análisis de velocidad para varios conjuntos de CDP. Esta información se suministra en forma de tablas con las velocidades de "stacking" y de intervalo (Figura 78).

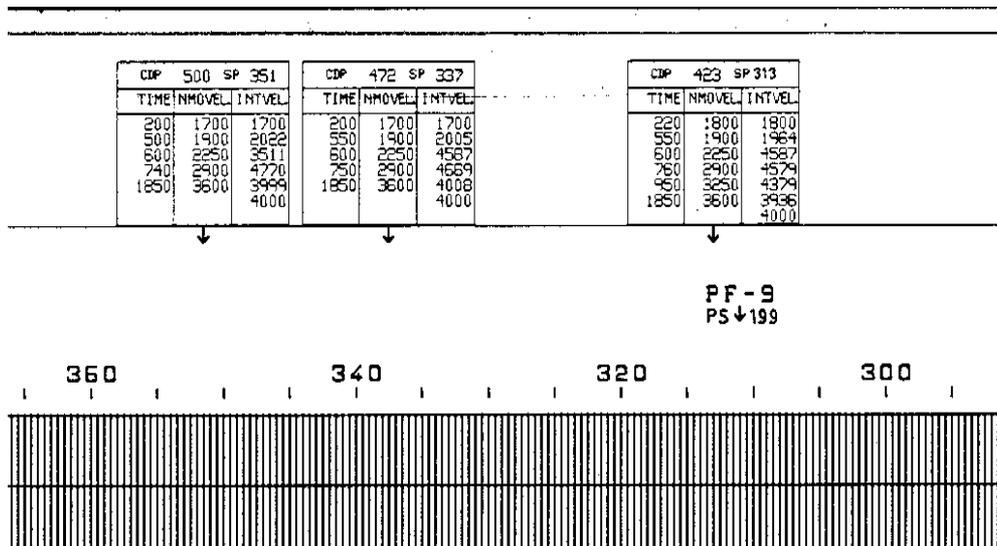


Fig. 88. Velocidades de "stacking" y de intervalo sobre la sección sísmica

Para cada punto donde se ha llevado a cabo este cálculo se dispone por tanto de una ley de variación de la velocidad con la profundidad (realmente, con el tiempo de viaje de la onda). Hay que tener en cuenta que las velocidades de intervalo así calculadas no son el reflejo directo de la litología subyacente, sino el producto de uno de los procesos de elaboración de la sección sísmica. Puesto que el resultado de este análisis es diferente para cada punto de cálculo, lo que refleja en parte la variación de la velocidad real litológica a lo largo de la sección, habría que aplicar las velocidades obtenidas en cada lugar, efectuando una interpolación en los puntos intermedios, o efectuando una división de la zona en áreas con distintas leyes medias, de acuerdo con la heterogeneidad lateral de los materiales subyacentes. No obstante, dada la uniformidad litológica del ambiente sedimentario donde se está realizando este estudio, se ha optado por resolver esta cuestión mediante la obtención de una ley media de velocidades única para toda la zona.

La información disponible para el cálculo de la ley media de velocidades es la siguiente:

- Velocidades de intervalo y tiempos correspondientes a lo largo de todas las líneas.
- Profundidades del nivel a cartografiar en los sondeos de apoyo y los tiempos correspondientes a dichas profundidades (Tabla III-2-6).

<b>SONDEO</b>	<b>Cota de las margas (m)</b>	<b>Tiempo medido en la línea (ms)</b>	<b>Velocidad media (m/s)</b>
Asperillo-1	930	844	2204
Moguer-1	525	480	2188
Almonte-1	515	539	1911
Villamanrique-1	735	728	2019

**Tabla III-2-6 Profundidades y tiempos hasta las margas en los sondeos**

Cada sección sísmica dispone de un determinado número de conjuntos de CDP donde se ha efectuado el análisis de velocidad y se proporciona información de las velocidades de intervalo. De todas las tablas de velocidades disponibles en las secciones, se ha efectuado una selección de un número representativo de dichas leyes para cada línea sísmica, escogidas atendiendo a los siguientes criterios:

- En las líneas con una longitud menor o igual a 450 puntos de tiro, se ha seleccionado una sola ley de velocidades, correspondiente a un punto intermedio.
- En el caso de que las líneas contengan entre 450 y 800 puntos de tiro se han tomado dos leyes.
- Para líneas con más de 800 puntos de tiro el número de muestras ha sido de tres.

Para hallar una ley media de velocidades para toda la zona, es necesario, en primer lugar, tener una ley única para cada línea. Por tanto, el primer paso realizado ha sido el cálculo de la ley media de velocidades en aquellas líneas en las que se han seleccionado varias leyes (véase Anexo III-2.8).

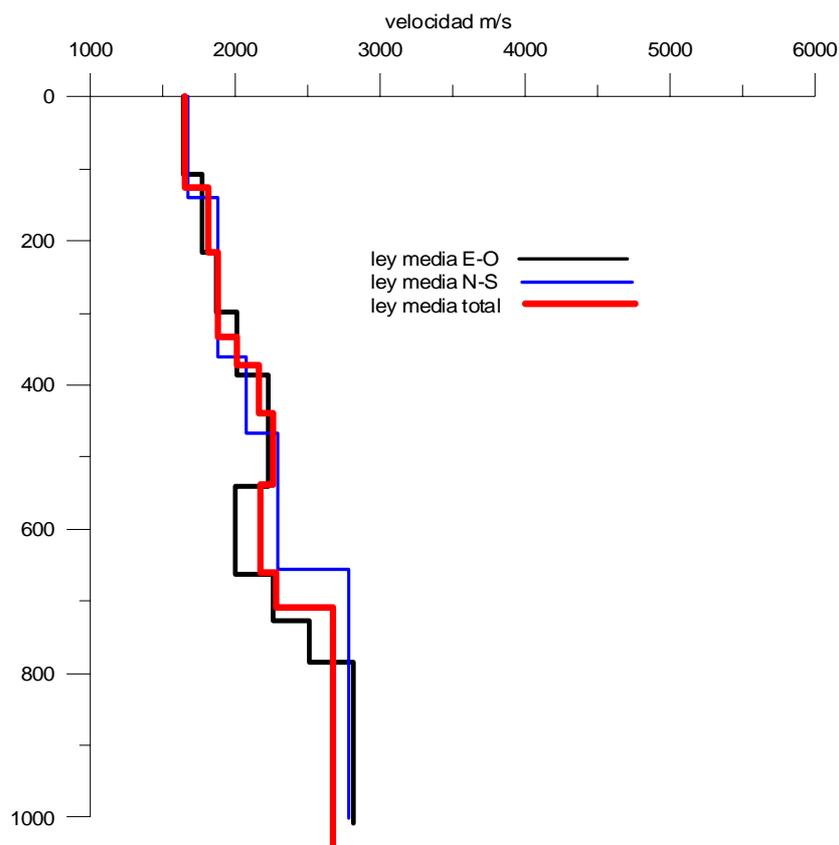
Con una ley única de velocidades por línea, se ha procedido al cálculo de una ley para toda la zona de estudio. El procedimiento utilizado ha sido la señalización gráfica mediante criterios del interpretador, si bien, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Se han obviado los datos superiores a los 1100 ms, pues los tiempos del reflector de las margas azules no superan, en ningún caso, ese valor.
- Debido al gran número de líneas y a la posibilidad de la existencia de cierta anisotropía, se han hallado por separado la ley media de las líneas con dirección E-O y la ley media N-S, calculando la ley media de la zona a partir de las mismas.

Las operaciones realizadas para hallar la ley media se encuentran recogidas en el Anexo III-2.8. Los resultados finales del cálculo de las leyes medias direccionales y zonales se han reflejado en la Tabla III-2-7 y en la Figura 89.

Ley media E-O		Ley media N-S		Ley media zonal	
Vint (m/s)	Tiempo (ms)	Vint (m/s)	Tiempo (ms)	Vint (m/s)	Tiempo (ms)
1641	109	1672	139	1653	126
1768	216	1875	360	1813	217
1872	298	2079	467	1878	335
2004	386	2293	655	2009	374
2224	542	2778	1001	2161	439
1998	662			2263	539
2264	726			2168	661
2507	784			2284	709
2818	1009			2668	1044

**Tabla III-2-7 Ley media de velocidades de intervalo según dirección E-O, N-S y media total.**



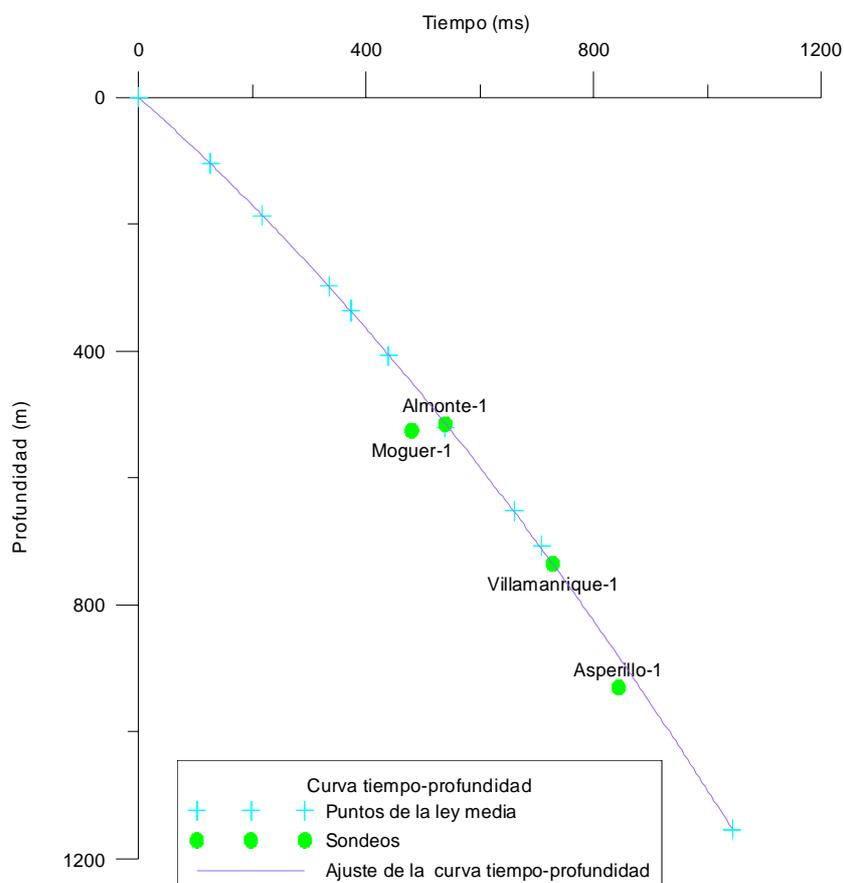
**Fig. 89. Leyes de velocidades medias NS, EO y total.**

A partir de la ley media total de velocidades, se han hallado las profundidades correspondientes a cada intervalo de tiempos. Los resultados así obtenidos se muestran en la Tabla III-2-8.

Velocidad de intervalo	Tiempo	Profundidad
0	0	0
1653	126	104
1813	217	187
1878	335	297
2009	374	336
2161	439	407
2263	539	520
2168	661	652
2284	709	707
2668	1044	1154

**Tabla III-2-8 Profundidades asociadas a cada velocidad de intervalo**

Los valores de tiempos y profundidades asociadas deducidos anteriormente junto con los obtenidos a partir de la información de los sondeos petrolíferos, se han representado en la Figura 90. Mediante el ajuste de una curva polinomial de regresión a los puntos correspondientes a la ley media, se ha obtenido una función para hallar las profundidades que corresponden a cada tiempo medido en las líneas.



**Fig. 90. Curva tiempo-profundidad**

El buen ajuste de los puntos correspondientes a los sondeos con la función hallada, ratifica la solidez de la ley promedio de velocidades. De esta manera, la ecuación de transformación resultante es la siguiente:

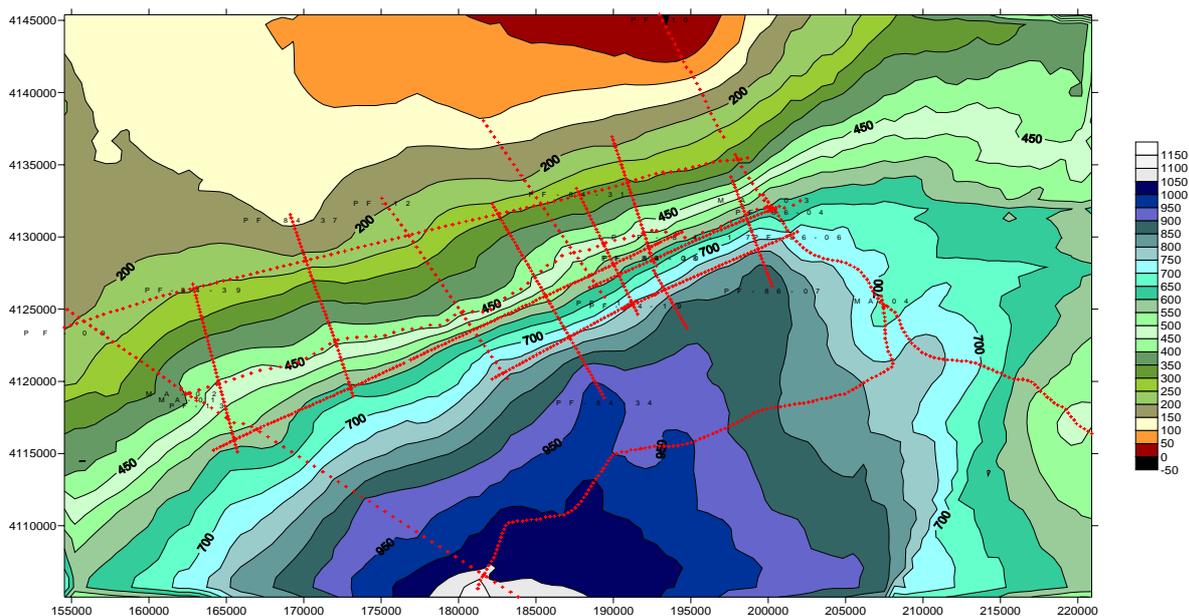
$$z = 0.1811967046 + 0.791178999 \cdot t + 0.0002999577431 \cdot t^2$$

Mediante esta ecuación se ha realizado una primera transformación de los tiempos en profundidades.

### III.2.9 Mapa de isobatas del techo de las margas azules

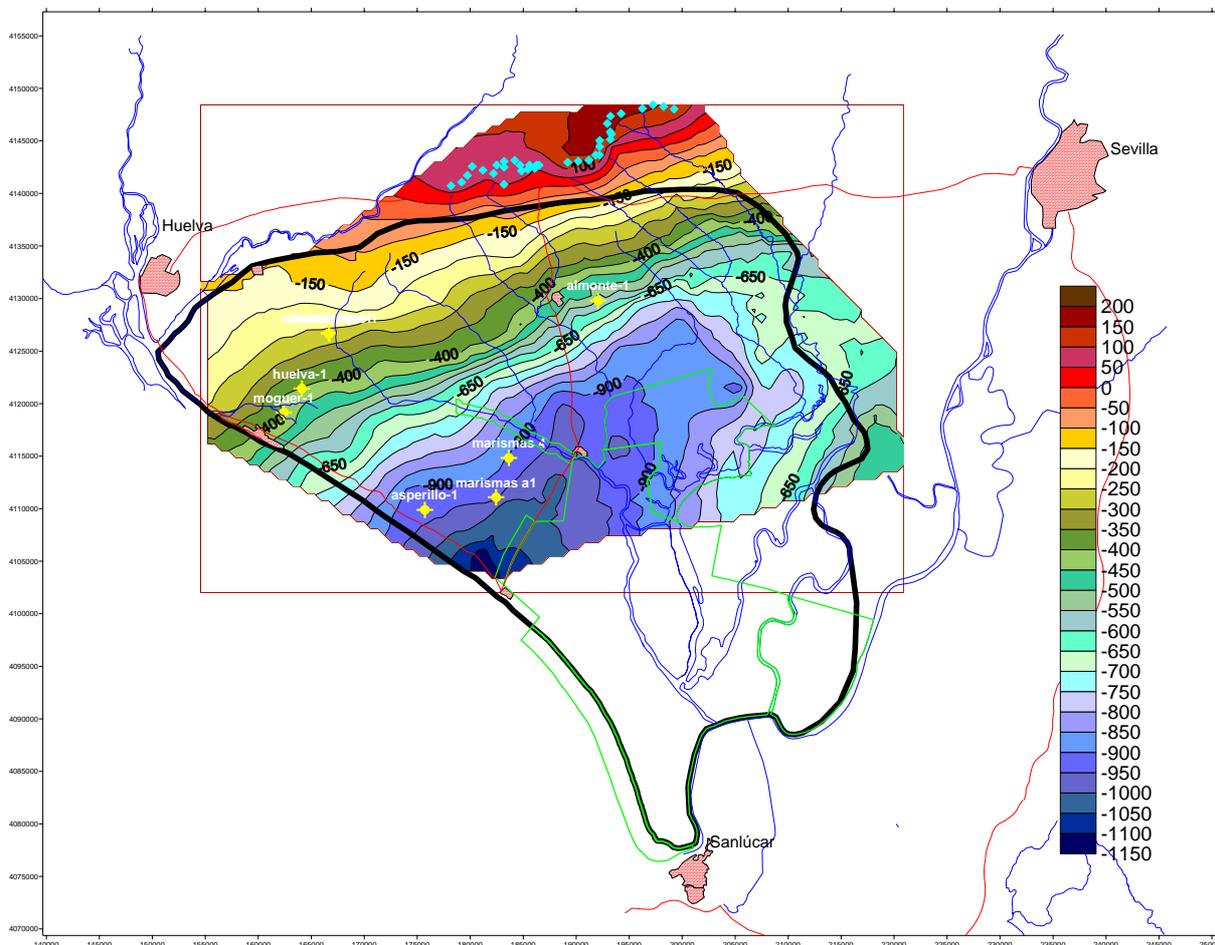
Los tiempos medidos sobre las secciones están referidos al *datum plane 0*, es decir, al nivel del mar. Por lo tanto, las profundidades obtenidas mediante la ecuación de transformación de tiempos en profundidades son cotas absolutas. Dichas cotas, junto con las coordenadas UTM de los puntos de medición se encuentran en el fichero **ProfundReflector.xls** [orientación, línea, X, Y, PT, corte con otra línea, twt, cota reflector, velocidad media].

Para el trazado de isobatas se ha utilizado el programa *Surfer*, mediante interpolación a valores en malla por el *método de kriging*. De esta forma, se ha obtenido un primer mapa de las isobatas del techo del nivel impermeable, según se observa en la Figura 91. Los posibles errores cometidos en el trazado tienen dos orígenes. Uno de ellos se debe a la incertidumbre introducida por la metodología utilizada en los cálculos, que se ha estipulado en un orden de  $\pm 20$  m. Por otro lado, existe un error inherente al trazado de cualquier mapa, consecuencia de los cálculos de interpolación para la realización del mismo. En todo caso, el método utilizado para efectuar dicha interpolación, lleva implícito una minimización de dicho error.



**Fig. 91. Mapa de isobatas de un horizonte próximo al techo de las margas azules.**

Este mapa, sobre el que se han dibujado los puntos de cálculo de la superficie (puntos de tiro de las líneas sísmicas donde se ha calculado la profundidad), tiene porciones de trazado donde las isólinas son fruto más de una extrapolación que de una interpolación, por lo que se ha limitado a la zona donde realmente existe información, que es la cubierta por las líneas sísmicas, reduciéndose al dibujado en la Figura 92.



**Fig. 92. Mapa de isobatas del techo de las margas azules. Se indica la situación del afloramiento de las margas azules en el Norte y sondeos profundos.**

### III.2.10 Conclusiones

De los resultados del presente estudio se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El horizonte impermeable más profundo que sella el acuífero de Doñana son las margas azules del Tortonense.
- En la información disponible dicho horizonte se identifica con el denominado Grupo Bética.
- La profundidad de las margas azules es superior a la supuesta por estudios anteriores al presente.

- La morfología del techo de las margas azules es una superficie cóncava, pudiendo admitirse, en principio, que se debe a una trasgresión marina diferencial en la zona.
- El error cometido en la determinación de las cotas es mínimo para la escala de trabajo, y se estima en el orden de 20 m. Este error se refiere a las peculiaridades de la metodología seguida, pero no puede asumir las particularidades surgidas durante los procesos de toma de datos y tratamiento de los datos sísmicos, que fueron realizadas con objetivos más profundos.
- Según el trazado de las isolíneas se pueden extraer las siguientes conclusiones del régimen sedimentario que dio origen a la deposición de las margas azules:
  - La cuenca marina sobre la cual se sedimentaron las margas azules tuvo más de 1000 m de profundidad.
  - La tendencia de la curvatura de las isobatas hacia el mar parece indicar que, durante el Mioceno Superior, la invasión marina, consecuencia de la deposición de las margas azules tuvo una morfología de golfo.
  - La fuerte pendiente inicial desde su afloramiento hasta el centro de la cuenca, puede revelar características de talud oceánico. De esta forma, se produciría un aumento de la potencia de los sedimentos en el centro de la cuenca.
  - Según la morfología del techo de la capa, los límites de la invasión marina se establecerían en la zona septentrional a su afloramiento.
  - Por tanto, se puede añadir a la historia geológica la profundidad de la cuenca marina que produjo la sedimentación de las margas (más de 1000 m), si bien, la fauna encontrada ya inclinaba a suponer una profundidad de media a grande. La morfología de la cuenca tiene forma triangular de vértices las localidades de Sevilla, Huelva y Sanlúcar de Barrameda, aunque para asegurarlo es necesario la aportación de más datos que cubran por completo el área de la transgresión marina.



## **ANEXO al apartado III-2.8**

### **OBTENCIÓN DE LA LEY DE VELOCIDADES MEDIAS**

## 1. Base teórica del cálculo de velocidad de conversión a partir de las velocidades de corrección dinámica.

En el método Sísmico de Reflexión pueden distinguirse distintos tipos de velocidades:

- ◆ Velocidad de intervalo: resultado del tiempo invertido por la onda sísmica en atravesar una capa de potencia  $z$ :

$$v_{\text{int}} = \frac{z}{t}$$

Esta velocidad es la única con significado litológico y es la que debe ser utilizada para convertir tiempos en profundidades.

- ◆ Velocidad media: velocidad promedio desde la superficie hasta un reflector.
- ◆ Velocidad cuadrática media: es la velocidad que permite asumir que la trayectoria de reflexión a través de medios de distinta velocidad de intervalo sigue una ley dada por la ecuación tipo  $t^2 = t_0^2 + x^2/V_{\text{rms}}^2$ . Su valor es el siguiente:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum v_{\text{int}}^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}}$$

El interés de esta velocidad es que mediante la ecuación de Dix, puede calcularse la velocidad de intervalo, a partir de la velocidad cuadrática media de dos interfases:

$$v_{\text{int}} = \sqrt{\frac{v_{\text{rms}_i}^2 \cdot t_i - v_{\text{rms}_{i-1}}^2 \cdot t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}}$$

- ◆ Velocidad de “stacking” o de corrección dinámica: es aquella que cumple estrictamente la ecuación normal de la reflexión en su forma  $t=t_0+n.m.o$ . Esta velocidad es el resultado del análisis de velocidades, y es prácticamente igual a la  $V_{\text{rms}}$ . A partir de ella se puede calcular la velocidad de intervalo por aplicación de la ecuación de Dix.

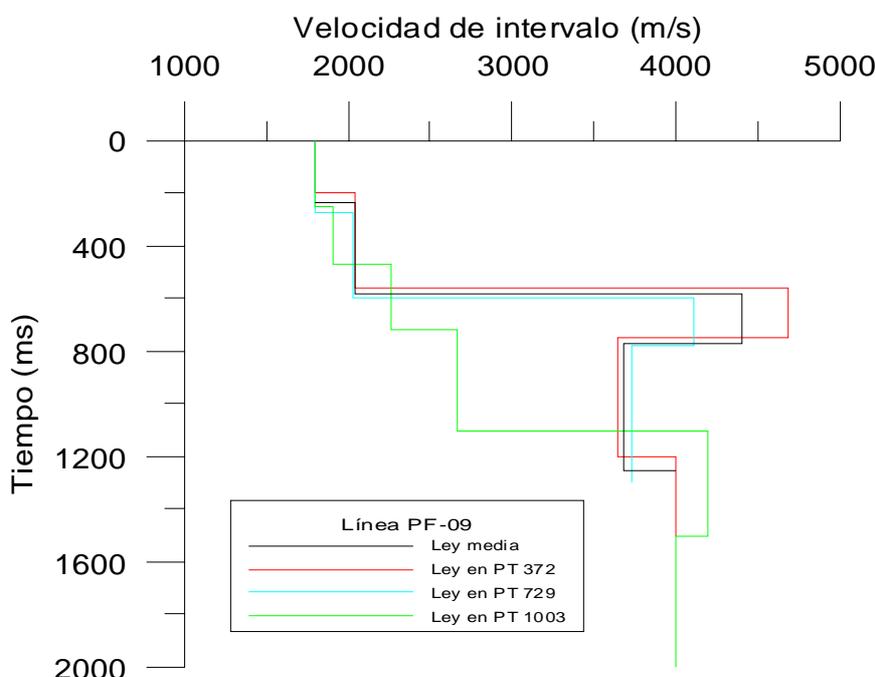
## 2. Obtención de la ley de velocidades medias para cada línea.

Durante el proceso de datos para obtener la sección sísmica, el análisis de velocidad se lleva a cabo para varios conjuntos CDP a lo largo de la sección. Para cada CDP analizado se obtiene por lo tanto una ley de variación de la velocidad con la profundidad (con el tiempo doble twt). La variación de esta ley con las distintas posiciones de cálculo puede indicar variaciones litológicas, aunque dada la relativa homogeneidad de los terrenos objeto de este estudio, cabe el asumir que una única ley de

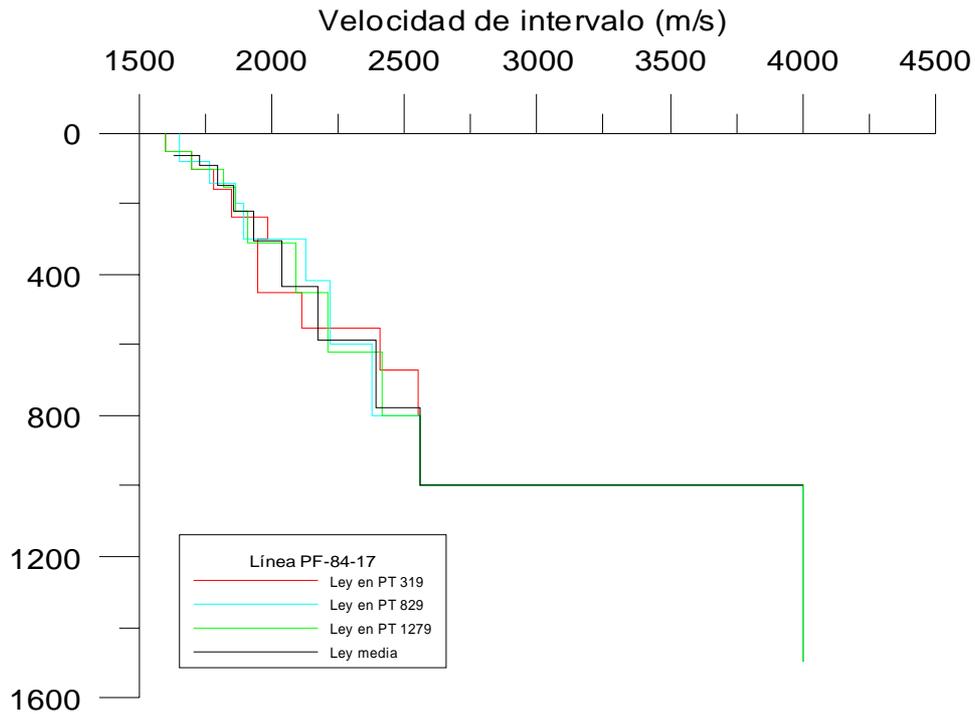
velocidad puede representar aceptablemente la situación geológica general. Para ello, se ha procedido a obtener una única ley de velocidad por sección sísmica, y posteriormente a una única ley para toda la zona estudiada.

Según la longitud de las líneas, se ha seleccionado el resultado del análisis de velocidad de un sólo CDP, o de varios, siendo necesarios seleccionar tres CDP para las líneas PF-09, PF-84-17, dos para las PF-84-19, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39, PF-86-04 y PF-86-06, y un CDP para el resto (PF-10, PF-11, PF-12, PF-13, PF-84-30, PF-86-07 y PF-86-08). El primer paso ha consistido en trasladar la información de velocidades de las carpetas de las líneas sísmicas a ficheros Excel **\*.xls.**, con el contenido de [línea, PT, twt, Vint], existiendo uno de estos fichero por cada CDP seleccionado (almacenados en la carpeta **Velocidades de intervalo** del Anexo Digital III-2).

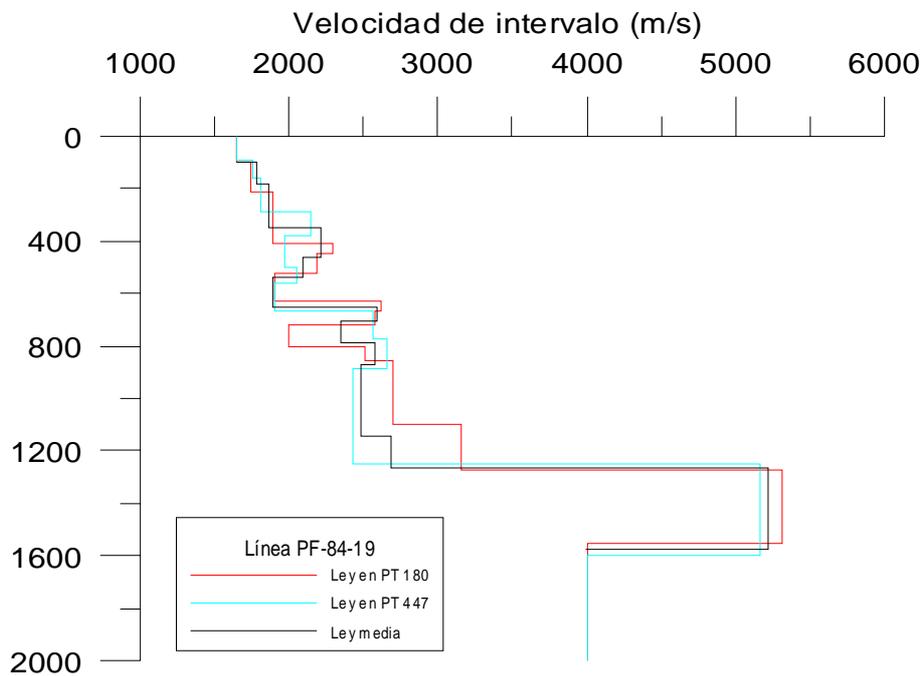
En el caso de existir más de un CDP por línea, se han representado las leyes de velocidad en GRAPHER [ficheros **\*.grf** de la carpeta **Velocidades de intervalo**], mostrados en las siguientes figuras (Figuras a-i) . Sobre ellas, se ha dibujado una ley media, dando lugar a ficheros **\*.txt** para las correspondientes líneas. Las leyes medias de cada línea se han obtenido mediante el seguimiento gráfico de las leyes particulares, es decir, se han trazado sobre éstas mediante criterios gráficos y sísmicos. En algunos casos, se ha desechado alguna de las leyes puesto que no seguían la tendencia general de las demás, siendo, además poco o nada representativas de las litologías subyacentes.



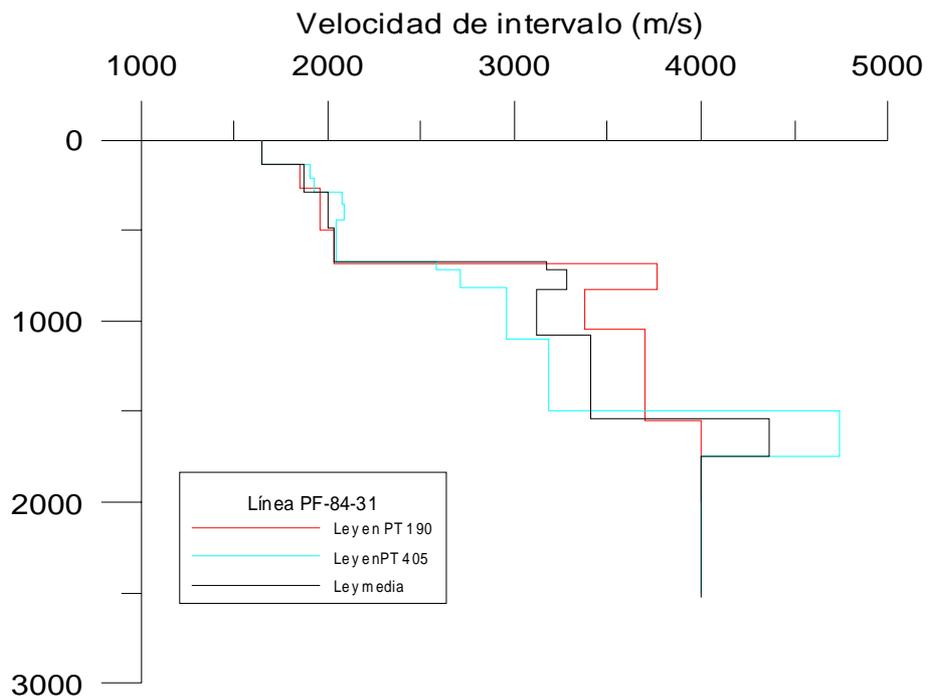
**Figura a Ley media de velocidades de PF-09**



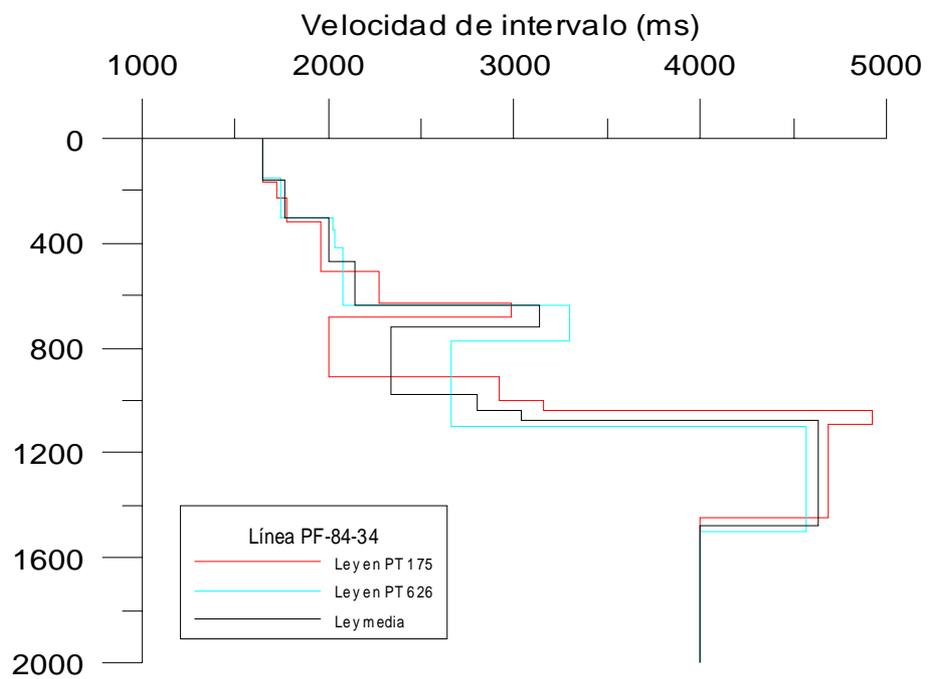
**Figura b. Ley media de velocidades de PF-84-17**



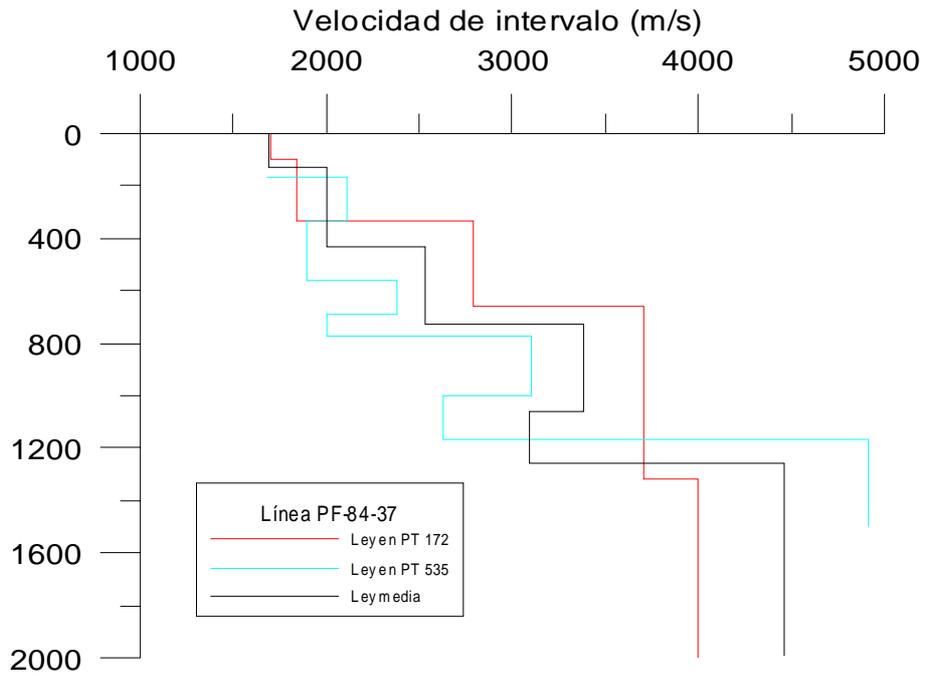
**Figura c. Ley media de velocidades de PF-84-19**



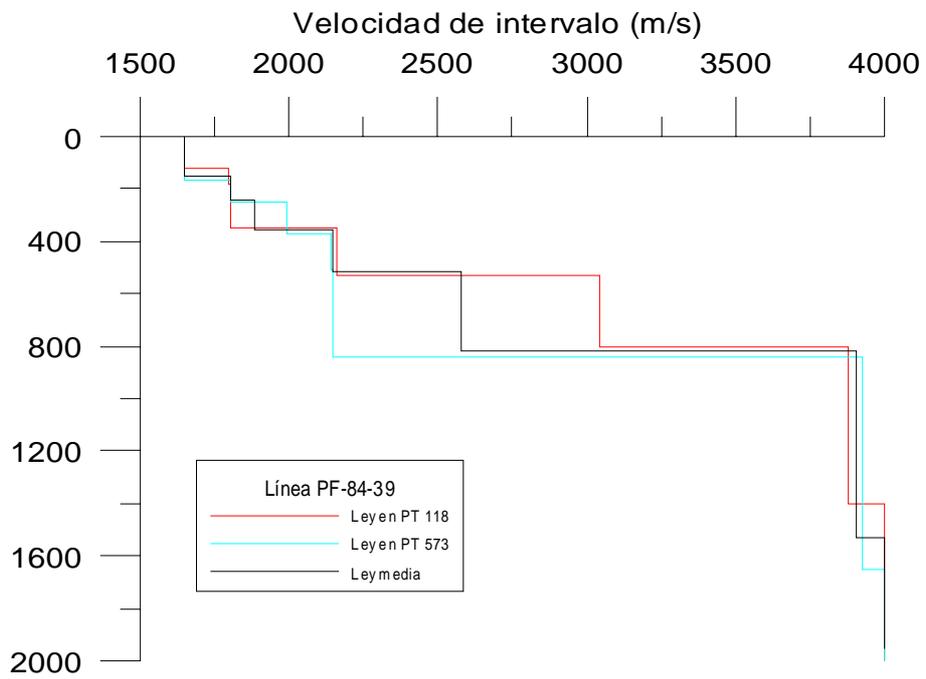
**Figura d. Ley media de velocidades de PF-84-31**



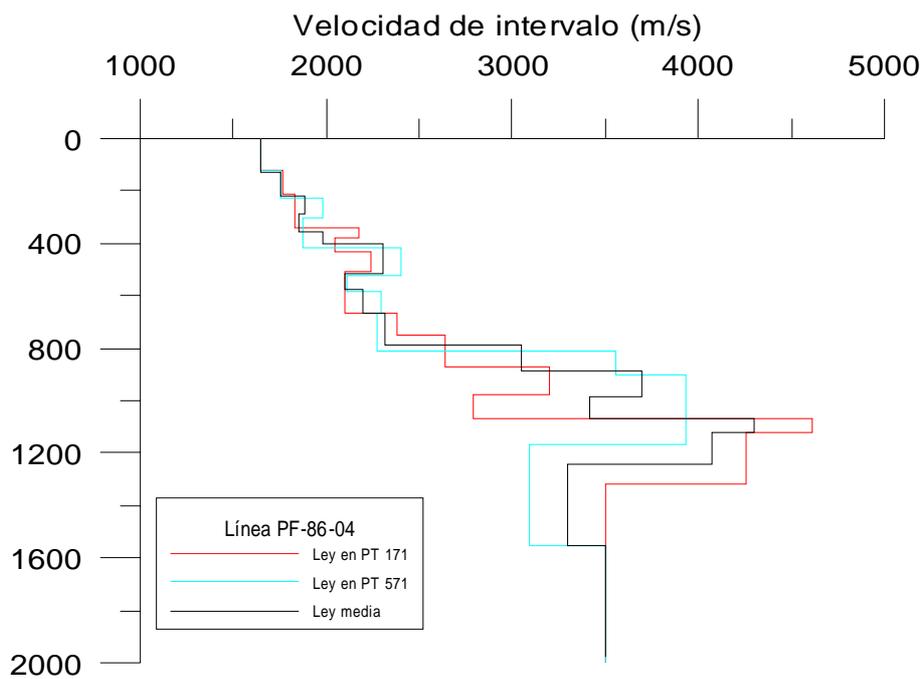
**Figura e. Ley media de velocidades de PF-84-34**



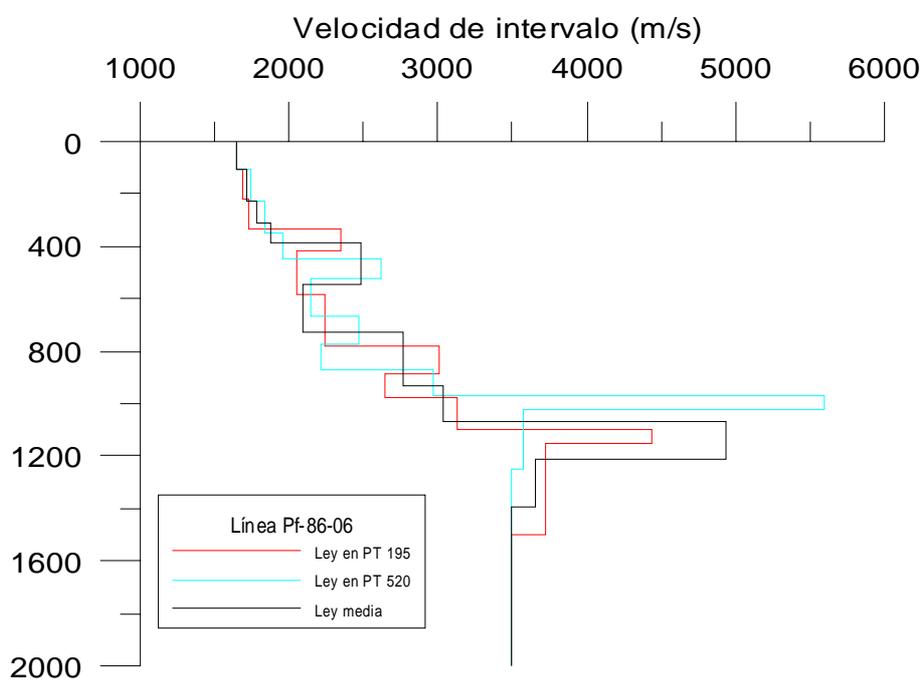
**Figura f. Ley media de velocidades de PF-84-37**



**Figura g. Ley media de velocidades de PF-84-39**



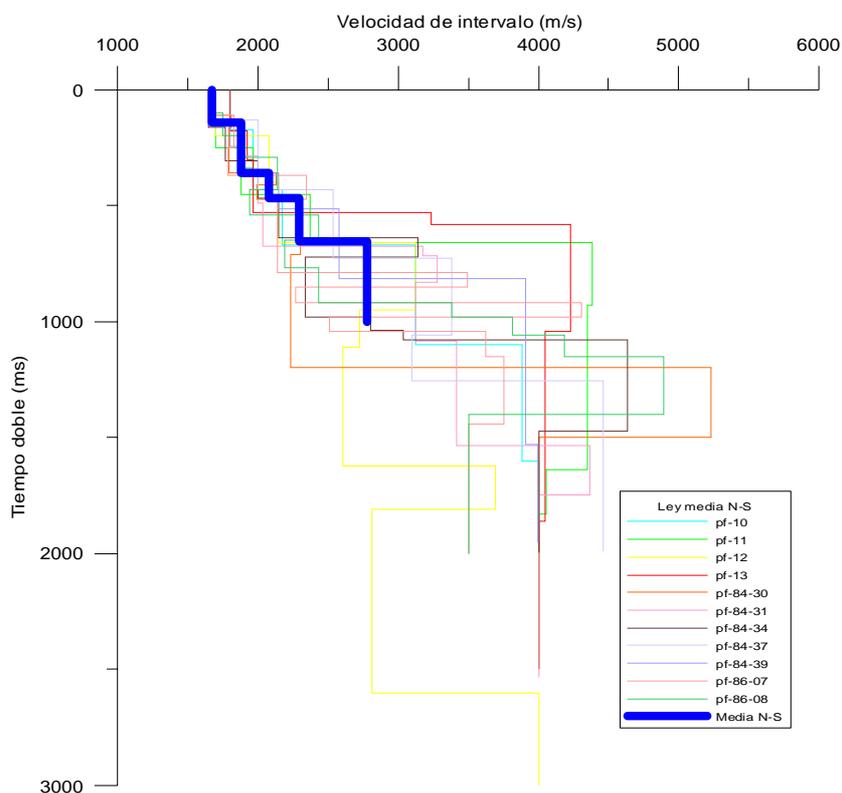
**Figura h. Ley media de velocidades de PF-86-04**



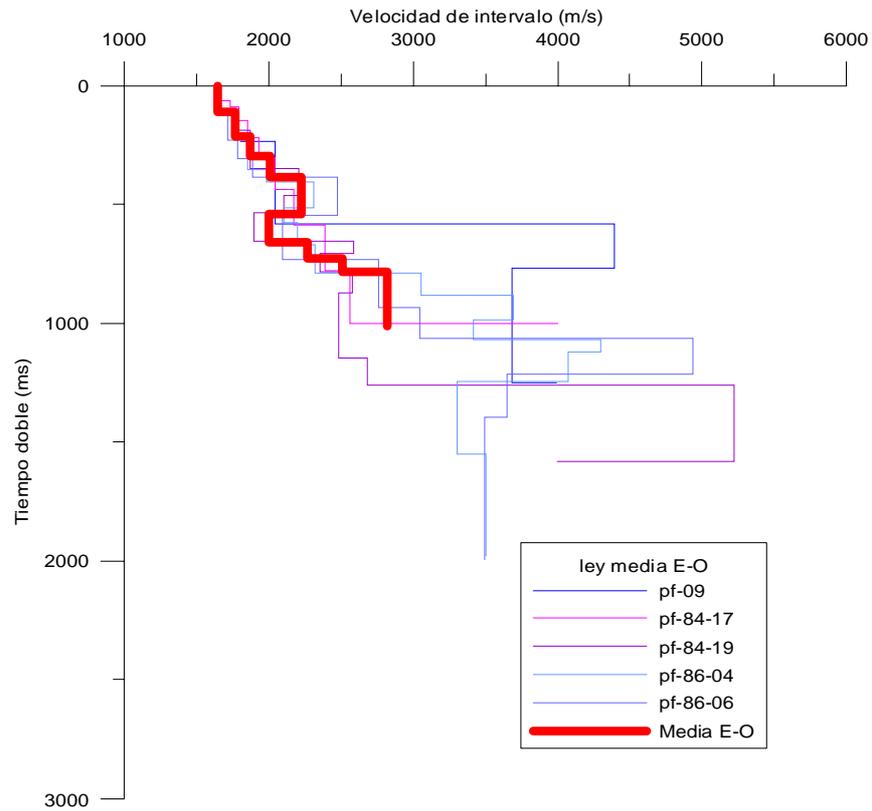
**Figura i. Ley media de velocidades de PF-86-06**

### 3. Obtención de la ley media N-S , E-O y ley media total

Posteriormente se ha procedido al agrupar las líneas según su dirección en Este-Oeste y Norte-Sur, calculando gráficamente dos leyes medias generales, según las dos direcciones preferentes (Figuras j y k). Como los tiempos medidos no superan los 1000 ms, se ha limitado la ley media a dicho tiempo.



**Figura j. Ley media N-S**



**Figura k. Ley media E-O**

El hecho de que no existan grandes diferencias entre ambas, ha conducido a la selección de una ley **media NSEO**, que es el resultado total de este cálculo (Figura l).

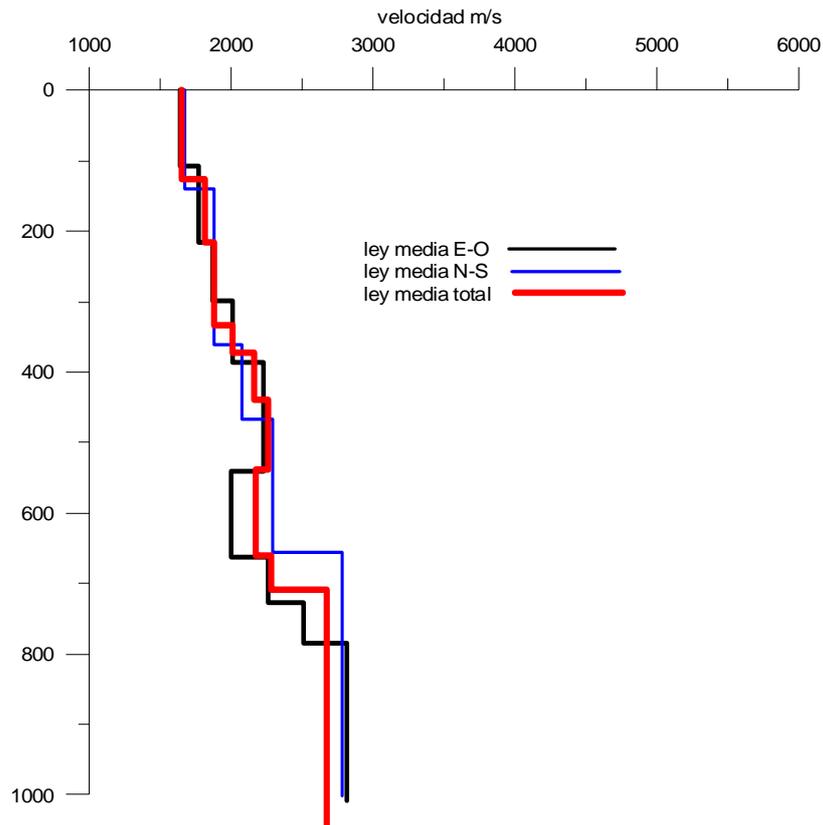


Figura I. Ley media total [leyesEONSTotal.grf]

#### 4. Obtención de la función de conversión tiempo-profundidad

Partiendo de los datos de velocidad de intervalo para cada rango de tiempos contenido en el fichero ley **media NSEO**, se han calculado las profundidades correspondientes a cada intervalo de tiempos mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta z = v_{int} \times \frac{t}{2} \times \frac{1}{1000}$$

$$z = \sum \Delta z$$

Siendo:  $\Delta z$  la potencia de intervalo en m

$v_{int}$  la velocidad de intervalo media en m/s

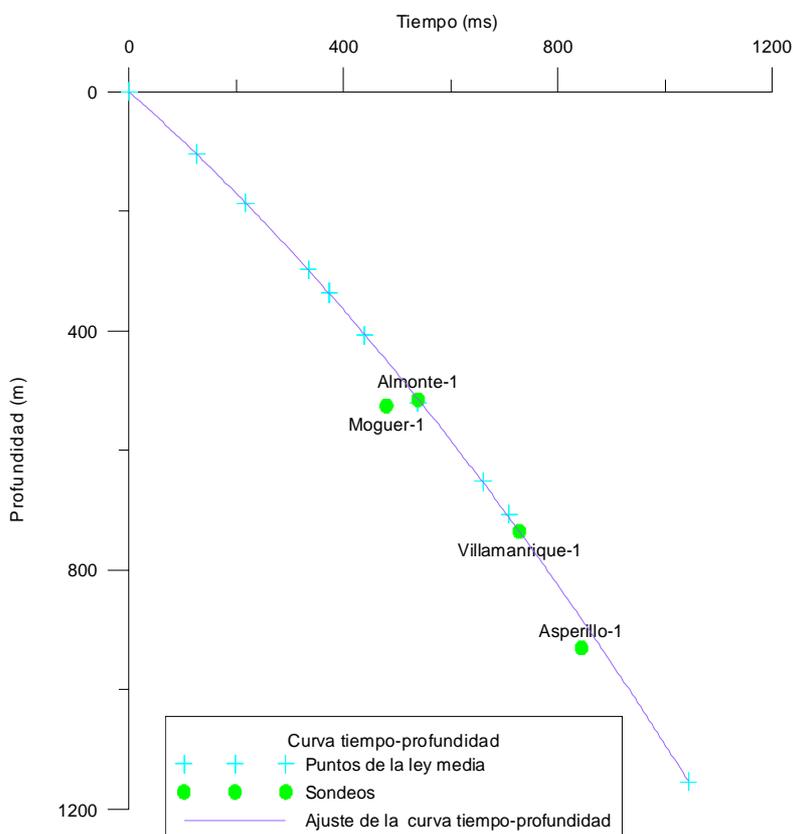
$t$  el tiempo doble correspondiente a dicha velocidad en ms

que se encuentran recogidos en la tabla siguiente (fichero **z-t.xls** de la carpeta **velocidades medias**):

Velocidad de intervalo	tiempo	Profundidad
1653	126	0
1813	217	104
1878	335	187
2009	374	297
2161	439	336
2263	539	407
2168	661	520
2284	709	652
2668	1044	707
		1154

(fichero **z-t.xls** de la carpeta **velocidades medias**)

dibujando con él la curva **profundidad-tiempo** (Figura m) y, a la que se le ha ajustado una función que permitirá convertir en profundidades los tiempos leídos para el reflector de las margas azules en los puntos de tiro de las diferentes líneas sísmicas.



**Figura m. Función de conversión tiempo- profundidad Equation  $Y = 0.1811967046 + 0.791178999 * X + 0.0002999577431 * pow(X,2)$**

## 5. Verificación de la ley media de velocidad obtenida

Como sistema de verificación de los resultados obtenidos, a fin de detectar posibles errores en la selección de la ley de velocidades media total y en el posterior cálculo de la ecuación tiempos-profundidades, por una parte se ha calculado la velocidad media hasta cada inicio de intervalo dado

en las tablas de leyes de velocidad seleccionadas en las secciones sísmicas. La velocidad media correspondiente a cada tiempo en cada ley se ha determinado mediante la siguiente expresión:

$$\bar{v}_m^i = \frac{2 \cdot z_i}{t_i}$$
$$z_i = \sum \Delta z_i = \sum v_i \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{2}$$

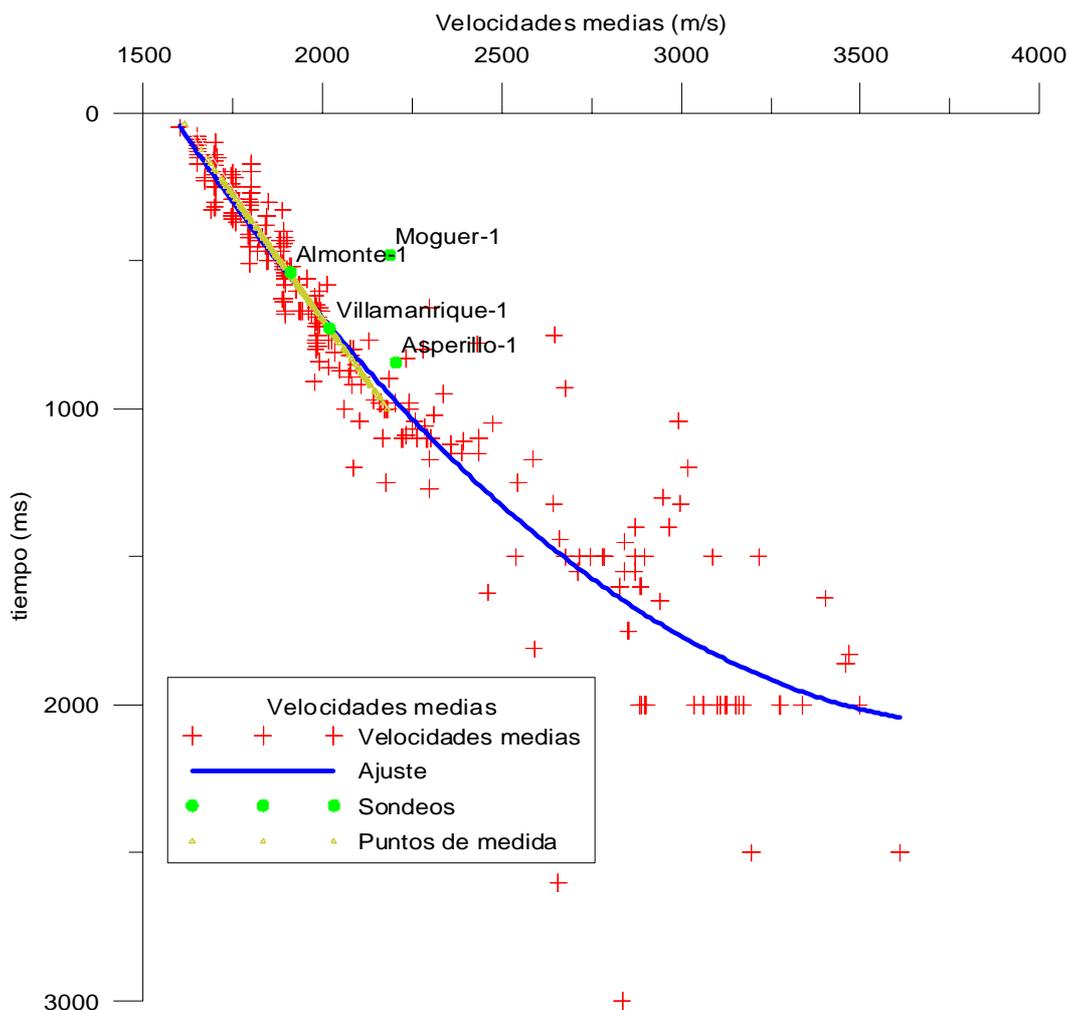
*Siendo:  $\bar{v}_m^i$  la velocidad media asociada a cada tiempo  $t_i$*

*$v_i$  la velocidad de intervalo del tiempo  $t_i$*

*$t_i, t_{i-1}$ , los tiempos correspondientes a intervalos de tiempo consecutivos donde se ha efectuado el análisis de velocidad en el proceso de datos*

Estas velocidades junto con las obtenidas en análisis de la información aportada por los sondeos mecánicos (Tabla III-2-6), se han representado en la Figura n, con el fin de compararlas. De esta forma se controla el proceso de promediado gráfico realizado en la etapa anterior, mediante el posterior cotejo de resultados. A los puntos que representan las velocidades medias en la Figura n se les ha ajustado a una curva polinomial que representa la tendencia general de las mismas. Las velocidades medias calculadas con los sondeos, superpuestas a las anteriores siguen la misma tendencia. Este hecho confirma que todos los cálculos y medidas realizadas hasta el momento son correctos, en lo que a información sísmica se refiere.

Por otra parte, se han superpuesto en el mismo gráfico (Figura n) las velocidades medias deducidas de las profundidades del reflector calculadas para todos los puntos de tiro en todas las líneas sísmicas. Esta operación sencilla, consistente en dividir dichas profundidades entre el tiempo de llegada, se ha efectuado en el fichero **profundReflector.xls** [dirección, línea, X,Y, PT, corte con otra línea, twt, profundidad margas, Vm]. El buen ajuste de todos estos datos a los anteriores corrobora nuevamente la fiabilidad del proceso seguido.



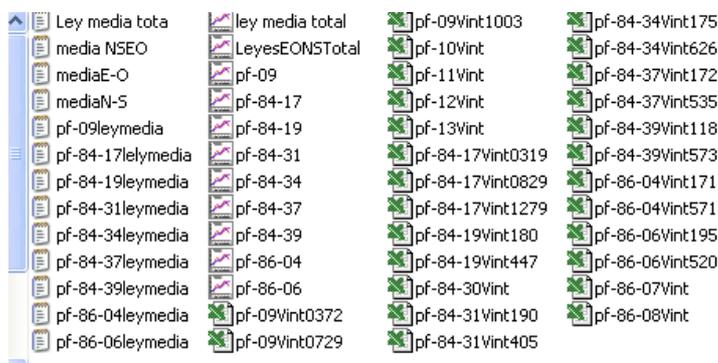
**Figura n. Cotejo de resultados**

Como se observa en la Figura n sólo existe una ecuación de conversión de tiempos en profundidades pues todos los datos se ajustan a la misma recta. Además, dicha ecuación ha sido calculada con un error mínimo, puesto que las velocidades medias calculadas a partir de las profundidades, se acoplan con exactitud a la curva de ajuste de las velocidades medias, las cuales se ha hallado a partir de las velocidades de intervalo. Este hecho es muy significativo pues las profundidades son el producto de una selección de leyes de velocidades, las cuales se han promediado gráficamente, mientras que para el cálculo de la curva de ajuste se han empleado todas las velocidades de intervalo.

Con estos resultados, se puede concluir, que existe una única ecuación de conversión de tiempos en profundidades suficientemente correcta.

## 6. Anexo Digital de ficheros generados

La carpeta **Velocidades de intervalo** contiene los siguientes ficheros:

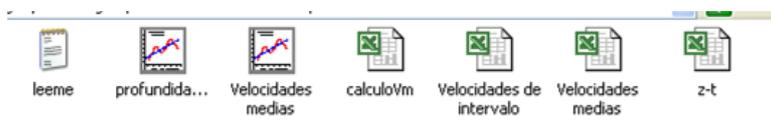


Los ficheros xls contienen las leyes de velocidad obtenidas de las secciones sísmicas.

Los ficheros grf contienen los gráficos de los anteriores, cuando existe más de una ley de velocidad por sección, y sobre ellos gráficamente se han trazado las leyes medias, que los ficheros txt.

En el gráfico **Ley media total.grf** están representados todos los gráficos de los ficheros txt obtenidos como resultado de promediar las leyes de varios CDP de una misma línea, así como los debidos a un solo CDP por línea, y sobre él se han obtenido las leyes medias según la dirección y total (el fichero **Ley media total** se refiere a una media de todas las anteriores, no siendo igual al media NSEO que es el considerado como válido del proceso seguido). El gráfico **LeyesEONSTotal.grf** es el utilizado en la representación final.

Todos los ficheros \*.xls con las velocidades de intervalo de la carpeta **Velocidades de intervalo** están reunidos en un solo fichero: **velocidades intervalo.xls**, que contiene los mismos datos: [línea, PT, twt, Vint], y que se encuentra en la carpeta **velocidades medias**.



A este fichero se le han añadido, mediante cálculo, las columnas [línea, PT, twt, Vint, **incremento de  $z_i$ ,  $z_i$ ,  $v_{im}$** ], formando el fichero **velocidades medias.xsl**.

### **III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970**

#### **III.3.1 Objetivos y alcance de esta revisión**

Los Sondeos Eléctricos Verticales han sido el método geofísico fundamental, si no el único, utilizado en la prospección del acuífero de Almonte-Marismas. En el capítulo I del presente Informe se han relatado, de forma sintetizada, la sucesión de trabajos existentes desde los comienzos del Proyecto Guadalquivir en 1967 hasta los últimos estudios de cobertura amplia, realizados en 1995. En este periodo de tiempo, desde el punto de vista geofísico se ha producido una evolución tanto de la instrumentación para tomar las medidas en campo, cómo de las capacidades y sistemas de cálculo. Los avances en instrumentación pueden suponer una mejora en la relación señal/ruido, al tiempo que los sistemas de lectura digital eliminan los posibles errores de apreciación del operador. No obstante, los datos de campo disponibles de los SEV efectuados son los que son, y por estar tomados hace más de cuarenta años no hay porqué asignarles una calidad dudosa (algunas observaciones de los informes analizados apuntan, no obstante, a que algunos valores de potencial medidos en los SEV eran demasiado bajos y poco fiables, por lo que algunas curvas pueden presentar irregularidades metrológicas en su tramo final).

En el terreno de la interpretación, en este periodo de tiempo se ha pasado de efectuar cálculos manuales sobre ábacos gráficos a utilizar cálculos digitales, más rigurosos y exactos que los anteriores. No obstante, debe tenerse en cuenta que el conseguir un menor error matemático entre un modelo y unas lecturas de campo no significa que dicho modelo sea mejor solución geológica. Los nuevos sistemas permiten efectuar una interpretación más rápida, con mejores ajustes entre modelo y mediciones, pero sobre todo facilitan la verificación de soluciones equivalentes, buscando así la que mejor representa la situación geológica existente, siempre que se disponga de un control sobre la misma.

Otro aspecto a considerar es la evolución sufrida en el conocimiento geológico del acuífero. En principio, la disponibilidad de información de un sondeo mecánico en las proximidades de un SEV permite mejorar su interpretación, trasladándola posteriormente a los restantes SEV de la campaña que no estén demasiado alejados del punto inicial de parametrización. Según consta en los informes de los trabajos consultados, no fue ésta la situación normal de las campañas realizadas, por una cuestión metodológica obvia: eran los resultados de los SEV los que servían para orientar la ejecución de los sondeos mecánicos, y por lo tanto no se disponía normalmente de la información geológica a priori.

La conjunción de los dos aspectos: mejores herramientas de cálculo para la interpretación y la disponibilidad de mayor información forman los pilares de la revisión que se propone realizar en este trabajo. Finalmente será tomada en cuenta otra cuestión, fruto de la evolución del conocimiento geológico: los criterios interpretativos. Todas las interpretaciones efectuadas se hicieron con un punto de vista exclusivamente geoelectrico: asignación de una resistividad a una litología, y más

simplificadamente, el establecimiento entre la resistividad y el carácter más o menos permeable de la formación. En la presente revisión se propone utilizar los criterios estratigráficos actuales para investigar la viabilidad de establecer relaciones entre fácies geoelectricas y unidades estratigráficas.

### III.3.2 Síntesis de la información geoelectrica sobre el acuífero de Almonte-Marismas de 1970.

De todos los documentos recopilados para realizar el presente Proyecto, el denominado *Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.* puede considerarse como el fundamental, al menos desde el punto de vista de los trabajos de Sondeos Eléctricos Verticales. Este documento es la síntesis de todos los trabajos geoelectricos anteriores, y es la base para los posteriores estudios hidrogeológicos.

En el trabajo de 1970 se recogen las campañas geoelectricas efectuadas en el *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559*, (161 SEV de las campañas Marismas Doñana MD, Marismas Rocio MR, Niebla N, Perfiles 1 y 2), junto con otros estudios contemporáneos relativos al mismo Proyecto Guadalquivir, pero efectuados por otros organismos y/o no contemplados en el informe de Prakla: 200 SEV de la campaña efectuada por Lericí (sin denominación específica) en 1963; 56 SEV de la campaña L, trabajo *Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063*; 30 SEV de la campaña P efectuados en el *Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070*; 24 SEV de la campaña CD procedentes del *Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.*, y otros 50 SEV efectuados por el IGME en 1969, campaña Complementos Moguer CM. La situación de este conjunto de unos 517 SEV, incluyendo los nuevos SEV denominados TS efectuados a raíz del informe de Astier en 1967 se reproduce en la Figura 93.

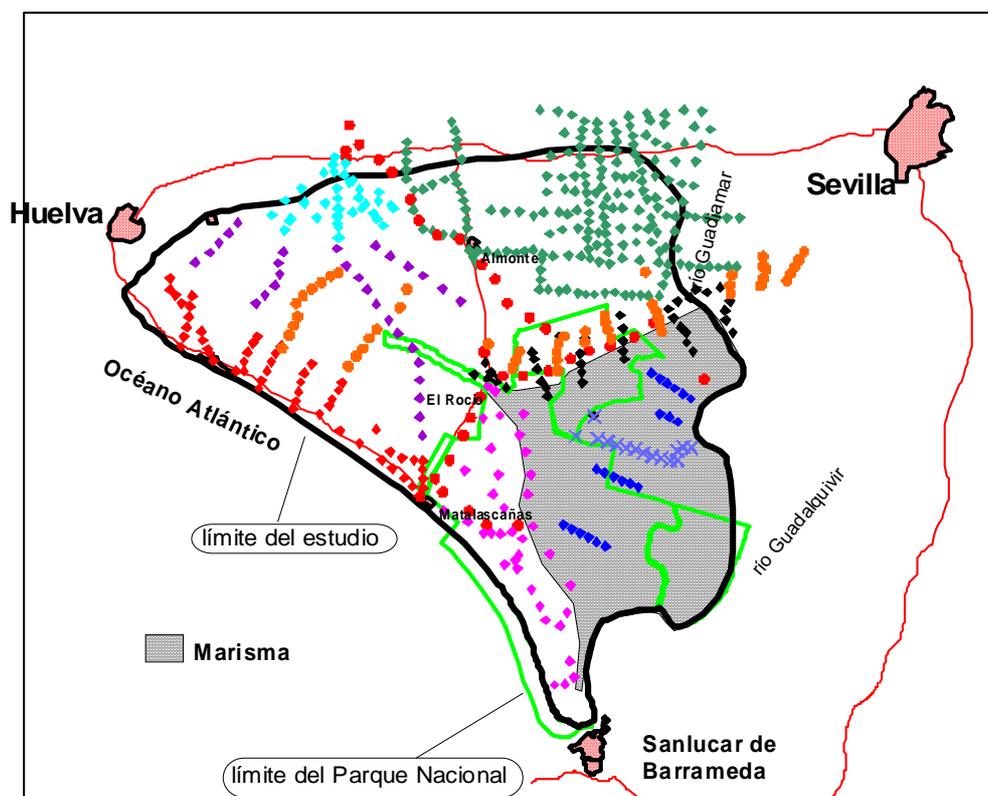
La reinterpretación conjunta efectuada en el referido informe de Astier de 1970 sólo tiene en cuenta 380 de estos SEV, ya que de los 200 efectuados por Lericí en 1963, sólo se consideraron 89 (los situados al norte de la línea Moguer-Almonte-Pilas, no fueron interpretados por falta de tiempo).

Resultado de las interpretaciones anteriores y de su confrontación con algunos sondeos mecánicos es el siguiente esquema de relación entre resistividad y litología:

<b>Cuaternario</b>	Dunas de arena (franja costera)	100-500 ohm.m (mayores valores en la parte seca superior)
<b>Mio-Plio-Cuaternario</b>	Arenas	Más de 20 ohm.m
<b>Mioceno</b>	Calcarenitas	50-200 ohm.m
<b>Mioceno</b>	Margas azules	Menos de 10 ohm.m

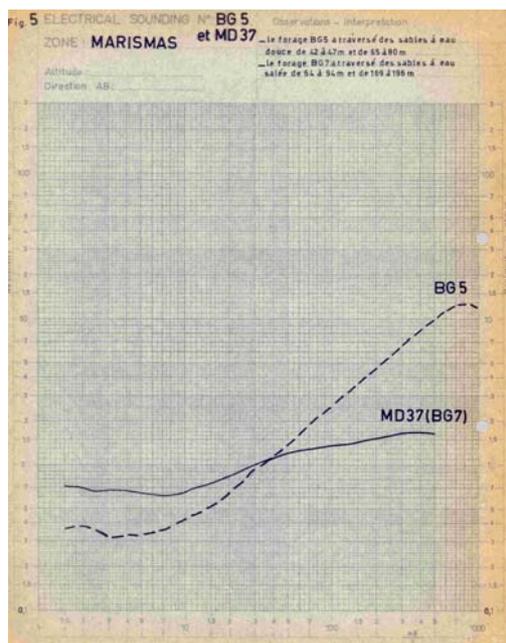
Estas asignaciones se matizan al tener en cuenta que el contraste de resistividad entre el sustrato impermeable de las "Margas azules" y los sedimentos arenosos suprayacentes sólo es alto en la franja costera (Cuaternario), por lo que la diferenciación entre sustrato y arenas presenta con

frecuencia algunas incertidumbres. Por esta razón, para dar una mejor idea de la importancia de los paquetes resistivos (acuífero potencial) en toda el área, en vez de trazar un mapa del techo de las Margas azules, se decidió dibujar un mapa de Resistencia Transversal (producto de potencia por resistividad).



**Fig. 93. Conjunto de campañas de SEV efectuadas hasta 1970: L rombo rojo; Lericí verde oscuro; CD azul oscuro; P morado; CM naranja; Perfil 1 y Perfil 2 círculo rojo; MD rosa; MR negro; N azul claro; TS aspás azules. [ficheros SEV40063, SEVLericí35559, SEV40070, SEVCM, SEVPerfil135559, SEVPerfil235559, SEVMD35559, SEVMR35559, SEVN35559, SEVmuroAstier1970]**

En la zona de Marismas hay otro condicionante a tener en cuenta (*Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.*): el relleno plio-cuaternario existente bajo las arcillas saladas o bajo las dunas, está formado por una alternancia de gravas, arenas y arcilla, cuyo contenido en agua es tanto dulce como salada; mientras que las arenas con agua dulce son resistivas, las arcillas y las arenas con agua salada son muy conductoras, lo que imposibilita aun más su diferenciación respecto de una base conductora formada por margas. Por otra parte, las resistividades de los primeros metros del terreno son tan variables (desde 0.5 ohm.m para arcillas saladas hasta miles de ohm.m para arenas secas), que pueden influir mucho en los resultados de los SEV, como se indica en el ejemplo de la Figura 94.



**Fig. 94. Ejemplos de la influencia de la salinidad del agua en la forma de las curvas de SEV y su interpretación (según Astier, 1967). El SEV MD37 está junto al sondeo mecánico BG7 (agua salada), lo que dificulta la presencia de contrastes de resistividad. Para un SEV que se encontrara junto al BG-5 (agua dulce), el resultado sería la mejor visibilidad tanto del tramo resistivo de las arenas, como de su contacto con un basamento conductor (bajada final de la curva).[archivo 23F5.jpg]**

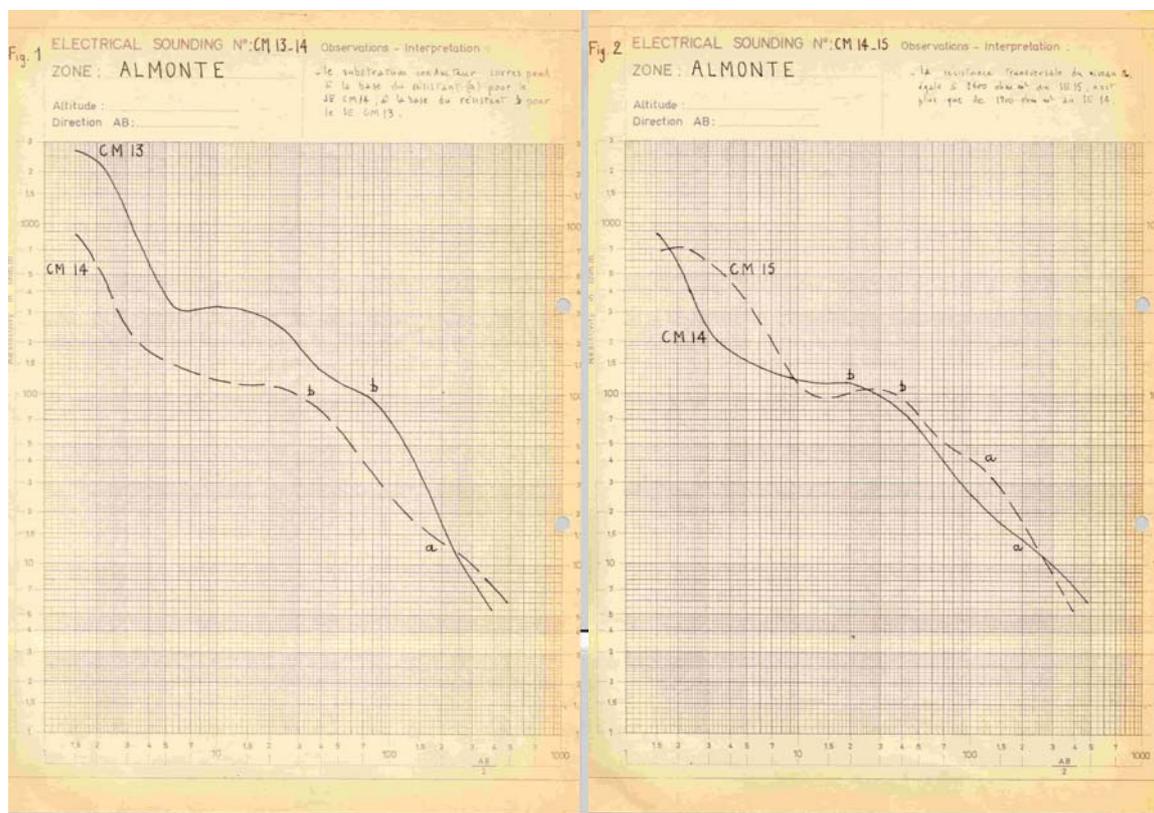
La reinterpretación efectuada en 1970 se apoya en 19 sondeos mecánicos que han cortado el sustrato impermeable, estableciéndose el siguiente cuadro de valores de resistividad (se indica el sondeo mecánico utilizado en la asignación):

Litología	Valores más frecuentes y sondeos mecánicos utilizados	Otros valores
Arenas sahelenses y villafranquienses	100 ohm.m (1000-137, 1000-138, 1001-13 y 1001-188)	150 ohm.m (1001-11)
Arenas de dunas	150 ohm.m (1033-37), 250 ohm.m (1017-42, 1033-34)	450 ohm.m
Arcillas o margas netas	Inferior a 10 ohm.m	
Arcillas arenosas, arenas arcillosas	10- 100 ohm.m	

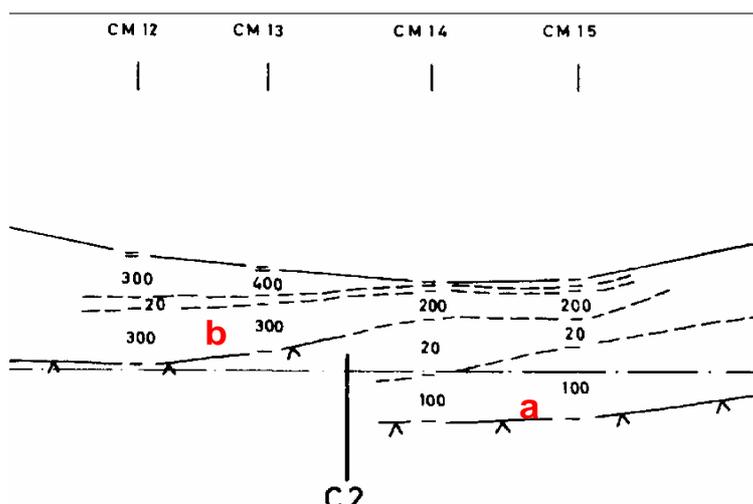
Se tomaron como impermeables las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m y permeables las que tienen más de 80 ohm.m. Se indica que cuando se ha dispuesto de sondeos mecánicos próximos a los SEV, se ha tomado como profundidad del sustrato impermeable la indicada por el sondeo mecánico. El sustrato impermeable, para Astier, no es siempre las margas azules del Mioceno, sino que, en ocasiones, corresponde también a las arcillas arenosas sahelenses o villafranquienses (Plioceno superior). En la interpretación se hace notar que se ha cambiado dos veces de sustrato conductor, al irse desplazando desde el norte hacia el sur, lo que Astier justifica de la siguiente manera:

La cuenca aumenta de potencia y buza en general hacia el Sur, por lo que al dirigirse en esa dirección van apareciendo aflorantes las capas más recientes; cuando éstas son resistivas y lo

suficientemente potentes, acaban por ocultar en los SEV las capas resistivas más antiguas, lo que se ilustra en el tránsito entre el SEV CM 13 al sur y el SEV CM 14 al norte (Figura 95 y 96). En el SEV CM14 tras un resistivo superficial existe una capa conductora de poca potencia y de 20 ohm.m, bajo la cual está el resistivo **b** de 200 ohm.m; la curva indica la existencia de una bajada a un conductor de 20 ohm.m, se ve bien una subida a un resistivo **a** de 100 ohm.m, finalizando en un conductor, base de los niveles acuíferos resistivos. Sin embargo, en el SEV CM13, hacia el Sur, la resistividad superficial es mucho más elevada, se produce una bajada a una capa conductora de muy poca potencia y superficial, bajo la cual se ve bien una subida a un resistivo de 400 ohm.m, antes de aparecer de nuevo la serie anterior: capa poco potente conductora de 20 ohm.m, resistivo **b**, y una bajada, no siendo posible identificar ahora el segundo resistivo **a**. Esto es lo que hace que Astier tome a partir de este punto hacia el Sur el anterior tramo conductor de 20 ohm.m como base de las formaciones acuíferas. No significa por tanto que hidrogeológicamente se haya producido un cambio, sino que geoelectricamente el sustrato conductor visible pasa a ser otro. Sin embargo, el hecho de que hacia el Sur las arenas sahelienses y villafranquienses disminuyen de importancia y son reemplazadas por arcillas puede justificar el cambio de sustrato conductor. Así, desde el SEV CM15 al CM14 (Figuras 95 y 96), se aprecia cómo mientras que el resistivo **b** de 200 ohm.m mantiene su potencia, el resistivo **a** de 100 ohm.m, perteneciente a las arenas previas a las margas de base, disminuye su potencia hacia el Sur, pudiendo interpretarse entonces que bajo el SEV CM13 dicho resistivo **a** ya no existe, lo que justifica más plenamente el cambio de nivel de basamento impermeable.

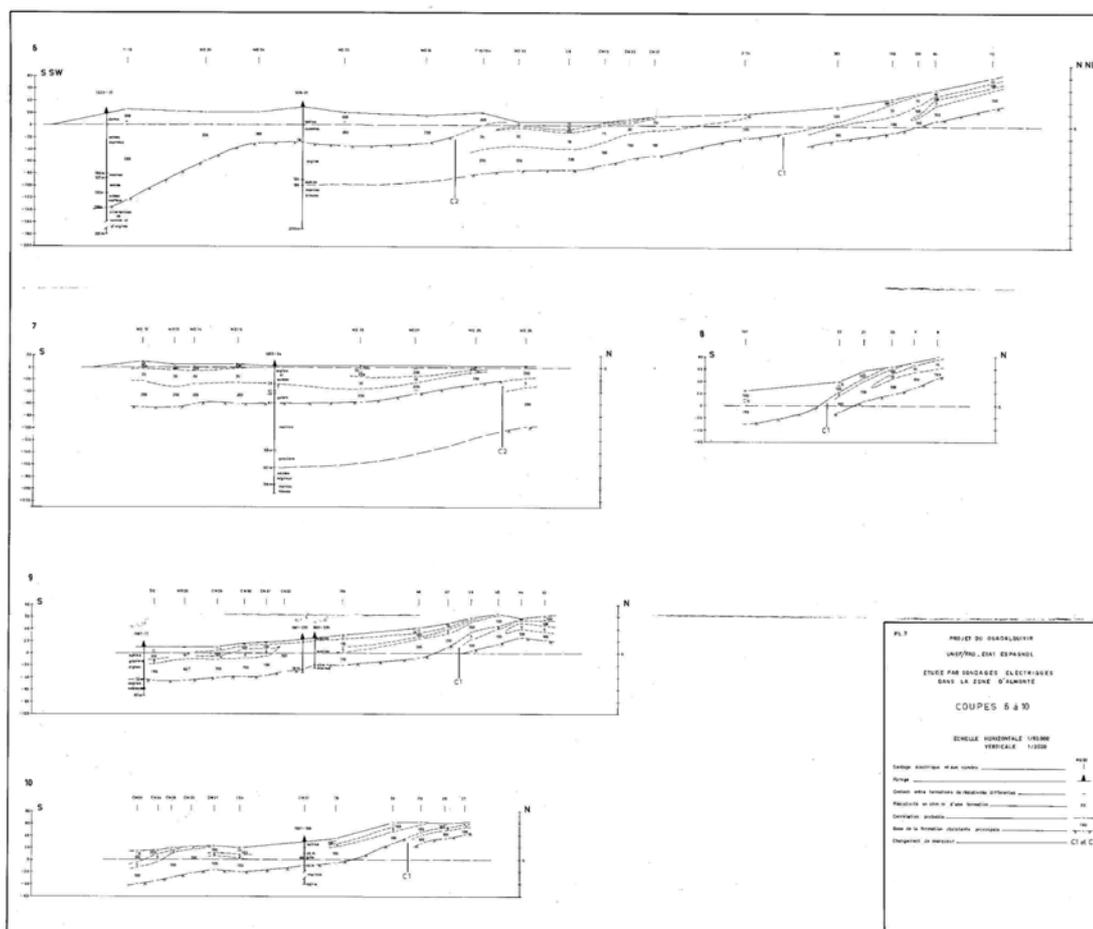


**Fig. 95. Ejemplos dados por Astier para justificar los cambios de sustrato según se desplaza el perfil geoelectrico hacia el Sur. [ficheros 26fig1.tif y 26fig2.tif]**

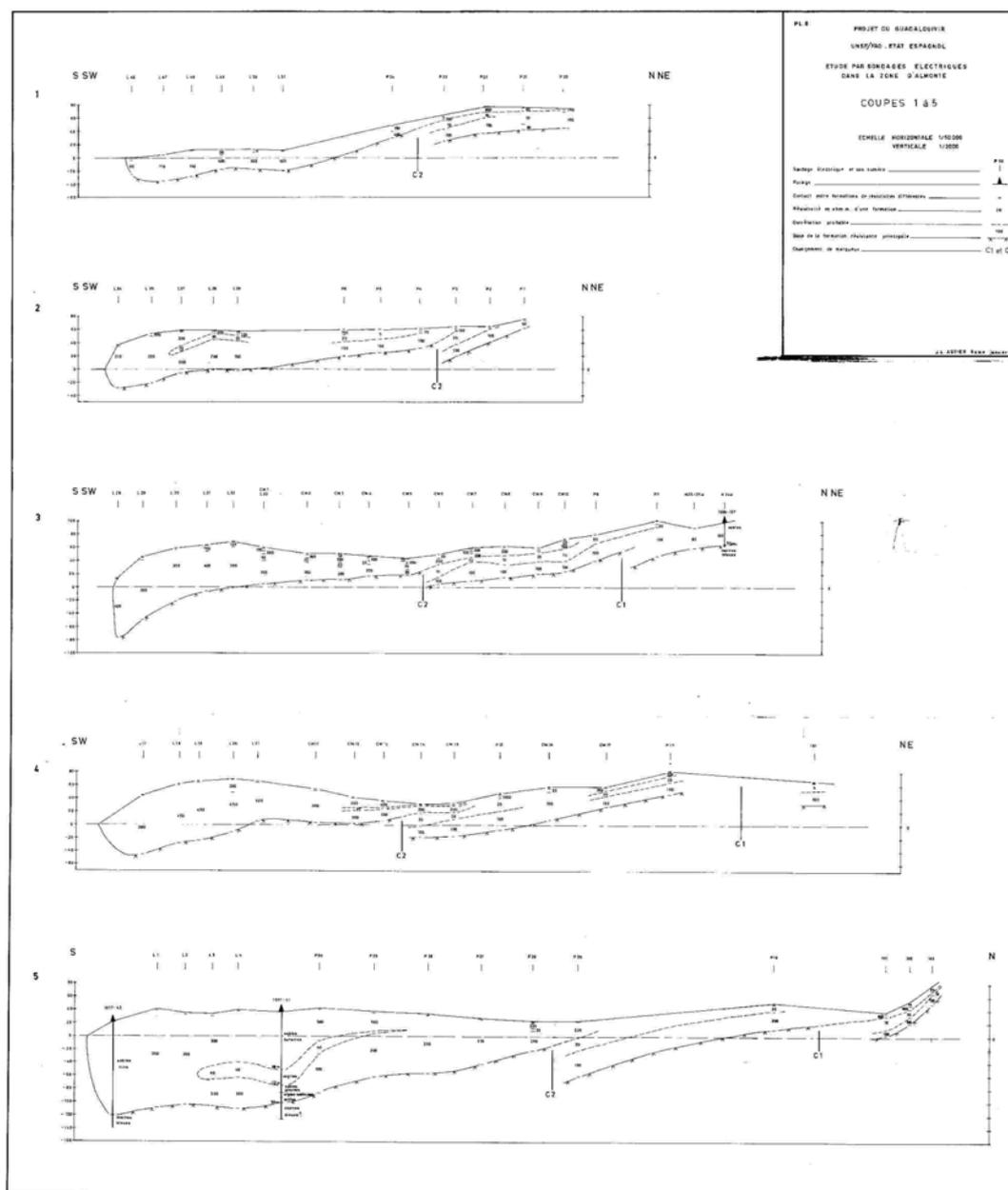


**Fig. 96. Sección geoelectrica indicando el criterio seguido para justificar un cambio en el nivel impermeable elegido como base del acuífero. Las arenas resistivas previas al conductor de base van disminuyendo su potencia hacia el Sur, llegando a no existir a partir de un lugar entre los SEV CM14 y CM13, lo que justifica el adoptar un cambio de basamento conductor. [fragmento fichero 26PL6.tif]**

Teniendo en cuenta estos criterios, se efectuó la reinterpretación, recogiendo la mayoría de los SEV analizados en forma de cortes geoelectricos N-S, representados en las Figuras 97 y 98.



**Fig. 97. Cortes geoelectricos indicando la evolución de las formaciones acuíferos y la situación de los diversos cambios de fondo impermeable considerados (Posición indicada en Figura 99).[Fichero 26PL-7.tif]**



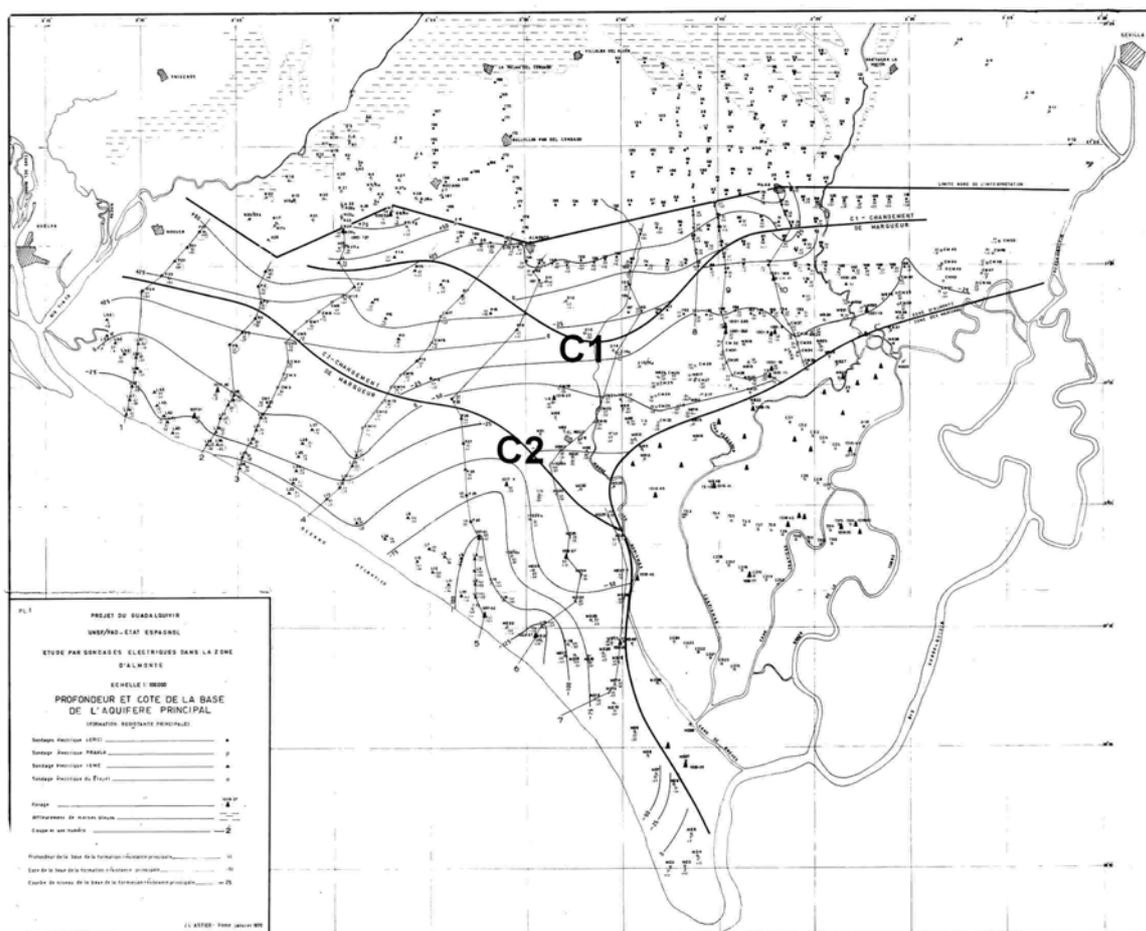
**Fig. 98. Cortes geoelectricos indicando la evolución de las formaciones acuíferos y la situación de los diversos cambios de fondo impermeable considerados. (Posición indicada en Figura 99).[Fichero 26PL-6.tif]**

A partir de estos cortes, se confeccionaron varios documentos que cartografiaban el acuífero:

- Profundidad y cota de la base del acuífero principal (PL1, reproducido en la Figura 99)
- Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m) (PL2, reproducido en la Figura 100)
- Resistividad del acuífero principal (PL3, reproducido en la Figura 101)

Así como el límite entre agua dulce – agua salada en la zona de Marismas, que será comentado en el apartado III- 4 del presente Informe.

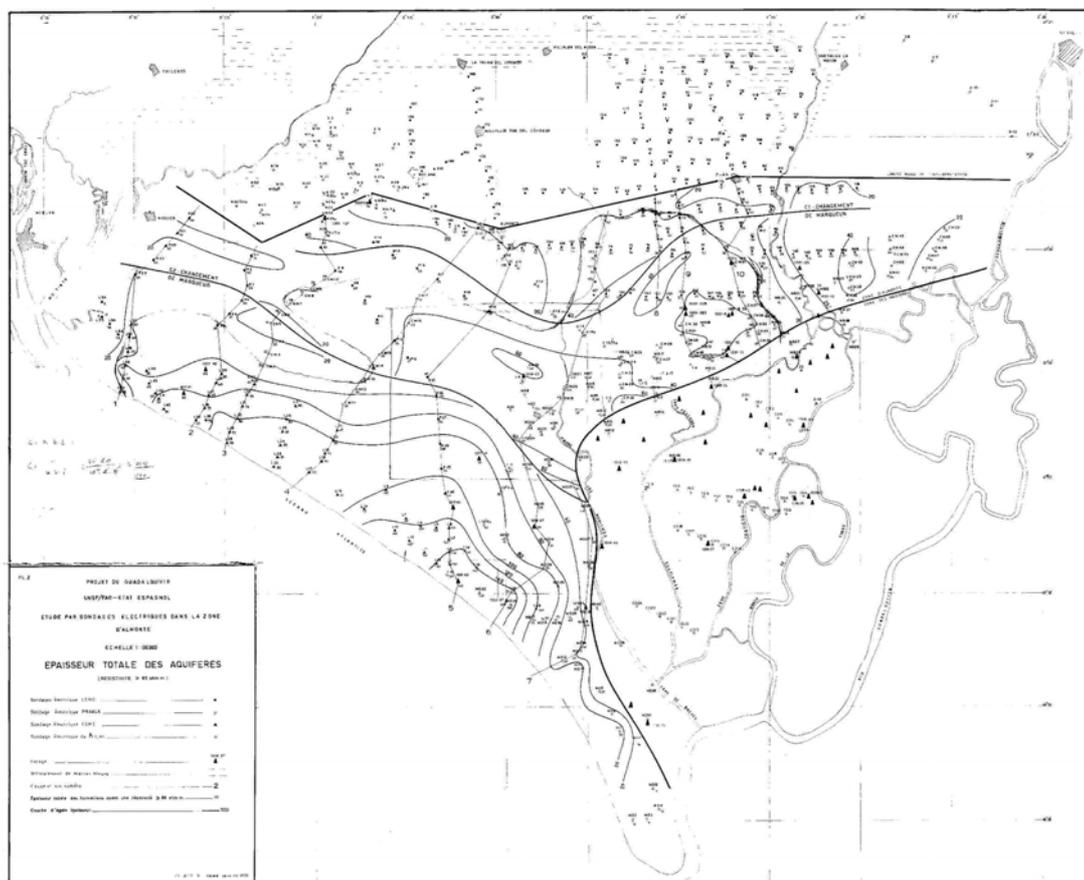
En la Figura 99 se representa el mapa de curvas de nivel de las cotas de la base de la formación resistiva principal, donde se indican las zonas comprendidas por cada marcador de cambio de basamento conductor considerado: corresponde a las margas azules al norte del límite marcado C1, a las arcillas arenosas probablemente sahelenses entre las líneas C1 y C2, y a arcillas más recientes al sur de C2.



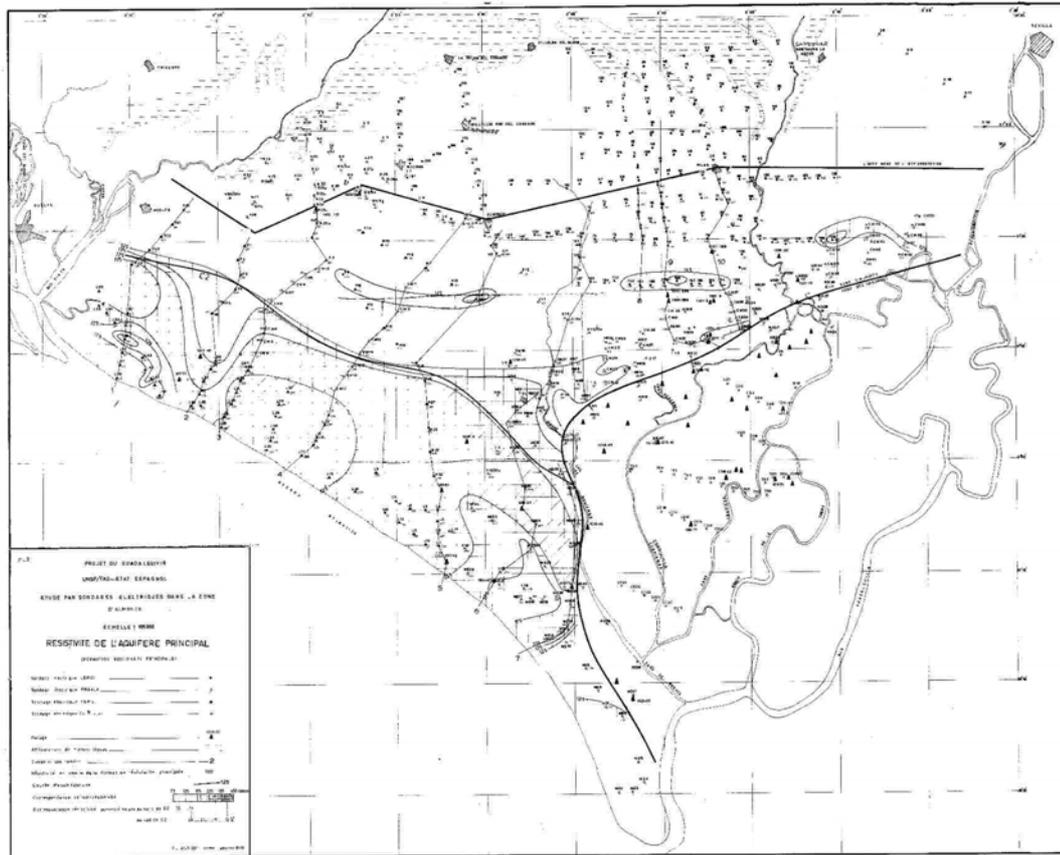
**Fig. 99. Plano PL1 de interpretación efectuado en 1970: profundidad y cota de la base del acuífero principal, con indicación de los diferentes marcadores del sustrato impermeable. Se indica también la posición de los cortes geoelectríficos efectuados (ejemplos en Figuras 97 y 98). [archivo 26PL-1.tif]**

En los cortes geoelectríficos de las Figuras 97 y 98 se aprecia que las intercalaciones arcillosas entre las arenas no son en forma de lentejones, sino de capas continuas de potencia casi igual a la de los niveles de arenas. Esto pone en evidencia que en realidad existen al menos tres niveles de acuíferos, cuya intercomunicación parece problemática. Para trazar un mapa de potencia total de los niveles del acuífero (multicapa) se tomaron los tramos con resistividad superior a 80 ohm.m, considerando estos como los niveles permeables por encima del sustrato, eliminando los lentejones de arcillas. El mapa

de la Figura 100 representa las isóneas de espesor total, lo que permite calcular el volumen del acuífero.



Finalmente, para calcular las reservas de agua, es necesario determinar la porosidad de los niveles permeables, para lo que se utilizó la resistividad eléctrica mediante la Ley empírica de Archie. Para ello, se hizo la hipótesis de que el contenido en arcilla en las arenas acuíferas es muy pequeño, ya que se han individualizado las capas por su resistividad, y para tener en cuenta la resistividad del agua se dispuso de seis muestras (con valores entre 14 ohm.m y 27 ohm.m, a 10 °C). En el mapa PL3, Figura 101, se establece la equivalencia, resistividad-porosidad, en donde la disminución de resistividad de un nivel acuífero va asociada a un aumento de su porosidad.

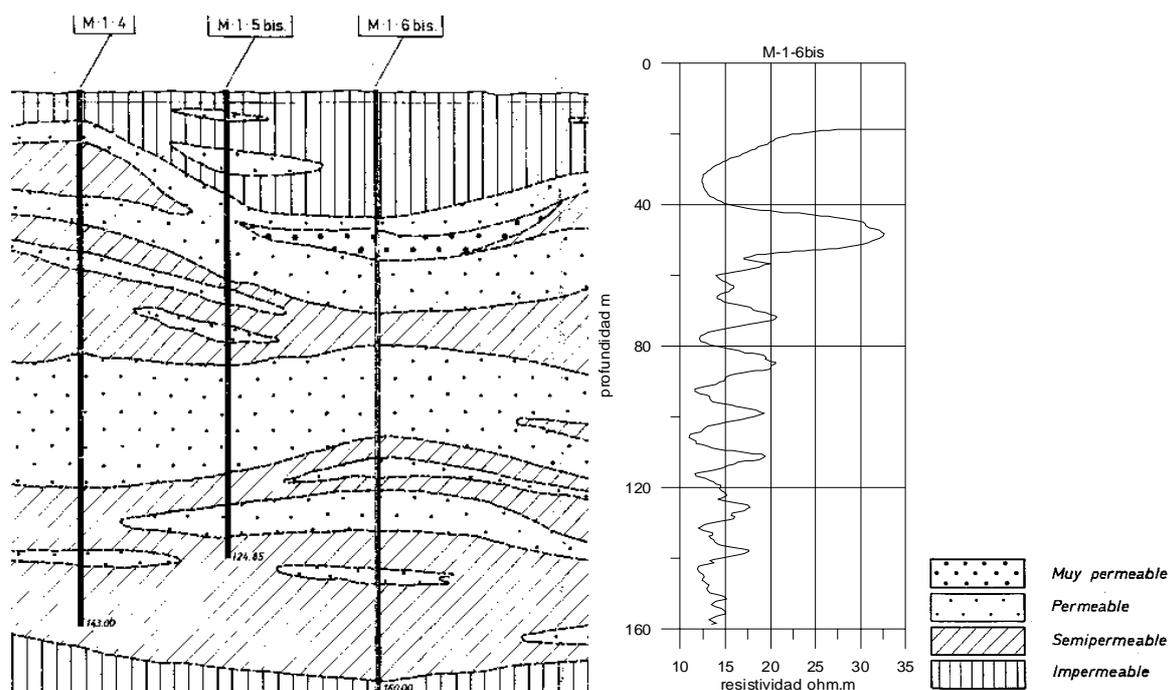


**Fig. 101. Plano PL3 de interpretación efectuado en 1970: resistividad del acuífero principal. La disminución de resistividad va asociada a un aumento de la porosidad. [archivo 26PL-3.tif]**

Tras el análisis efectuado de toda esta información, nuestra opinión es que todos estos documentos tienen total vigencia, y caracterizan el acuífero a la escala 1/100.000 en sus diferentes parámetros. Es por lo tanto el documento que va a utilizarse como base para la subsiguiente revisión.

### III.3.3 Otros documentos

De la testificación geofísica realizada en 10 de los 462 sondeos efectuados en el trabajo ***Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.***, sólo sabemos que se comprobó que hay una clara correlación entre los datos de las testificaciones y las características de permeabilidad esperada de las muestras de los terrenos atravesados, por lo que en la zona de arenas dejaron de realizarse testificaciones, mientras que en el sector de Marismas se consideraron imprescindibles por tratarse de una formación distinta y esperar la aparición de un primer acuífero superior cargado de sales, y ser necesario determinar la interfase agua dulce-salada. Para el sondeo M-1-6bis (único sondeo cuya testificación que se ha podido recuperar), la interpretación en términos hidrogeológicos se indica en la Figura 102; según la testificación de resistividad de la formación, salvo un tramo que supera los 30 ohm.m entre los 40-60 m de profundidad, el resto presenta oscilaciones entre los 10 y 20 ohm.m, con tendencia decreciente con la profundidad. Se aprecia, por tanto, que las resistividades reales de las formaciones acuíferas son inferiores a las resistividades aparentes detectadas por los Sondeos Eléctricos.



**Fig. 102. Testificación eléctrica del sondeo M-1-6bis y columna hidrogeológica.**[ficheros 32PerH-4.tif (fragmento) y 32SondeoM-1-6bis.xls

Posteriormente, en el ***Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972. Ref. 35522*** se efectuaron 68 sondeos mecánicos para reconocimiento geológico e hidráulico, control de calidad del agua y estudio de métodos de captación, que no fueron, que sepamos, utilizados para verificar o reinterpretar los SEV. En ese informe se presenta de nuevo un mapa de espesor total de terreno acuífero, que es una suavización del dibujado anteriormente (Figura 100), y que no incluye la zona de marisma; se

presenta también un mapa de la cota absoluta del fondo impermeable, también suavizado del anterior, representado en la Figura 99, pero omitiendo la distinción entre los diferentes horizontes de base, que pasan a ser considerados aquí todos ellos como las margas azules tortonienses, aunque se advierte que la transición a las arenas sahelienses es progresiva y difícil de definir, aceptando en definitiva que las arenas muy arcillosas o las margas muy arenosas, con resistividades inferiores a los 30 ohm.m, representan en realidad el fondo impermeable de la zona.

Respecto de trabajos posteriores, en el ***Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939*** se efectuaron 10 SEV sobre las margas azules próximas a Niebla, para detectar el acuífero formado por el mioceno de base (Tortoniense de conglomerados, arenas y areniscas calcáreas) que se localiza entre las margas y las pizarras del Paleozoico, poniendo de manifiesto que la resistividad aparente de las margas azules se sitúa en valores entre 4 y 15 ohm.m cuando el SEV no está influenciado por capas más superficiales antes de margas. En el ***Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213***, también se efectuaron de 12 SEV directamente sobre las margas azules entre La Palma del Condado y Villalba de Alcor, con el mismo objetivo que el trabajo anterior: las arenas y limos Sahelienses se manifiestan con una resistividad de 3-12 ohm.m, y las margas en el rango de 2 a 7 ohm.m, lo que ratifica que no siempre pueden diferenciarse las arenas de las margas, y por lo tanto es de esperar que lo será aún menos cuando este contacto se sitúa a mayores profundidades. Igualmente, los SEV medidos en el trabajo ***Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408***, que se localizan junto a sondeos mecánicos que llega a las margas azules a los 51 m, finalizan todos en una capa conductora de 1-12 ohm.m a unos 30 m de profundidad, que habría que adjudicar a las arenas limosas junto con arcillas y gravas del final del Plioceno, sin que se sepa si la diferenciación con las margas azules no es posible por ausencia de contraste geoelectrico y por falta de penetración del dispositivo. Otros trabajos de SEV efectuados posteriormente, como el ***Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655***, no son de interés para la reinterpretación que ahora nos proponemos, al estar realizados en las Marismas, donde el condicionante geoelectrico es muy distinto, como ya ha sido comentado en otros capítulos del presente Informe.

### III.3.4 Planteamiento para la verificación de la interpretación de los SEV

En el capítulo II (“Preparación de datos en forma digital”) del presente Informe se explicó la creación de la base de datos de SEV, de la que forman parte los ficheros PERFILES.xls, de posición de todos los SEV de los que se ha podido recuperar sus datos de campo, y SEV-INTERPRETACION.xls, donde se incorpora la interpretación de cada SEV. En este último fichero se dispone de hasta tres interpretaciones diferentes (Figura 103): la encontrada en los estadillos originales de campo para gran parte de los SEV; la indicada para la campaña L en el Informe 35.559 (en sus Anexos 24 y 25), que presenta ligeras diferencias con la anterior; y, finalmente para muchos SEV se dispone de la nueva reinterpretación conjunta efectuada en el Proyecto *Interpretation d’ensemble des sondages electriques des zones d’Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.*

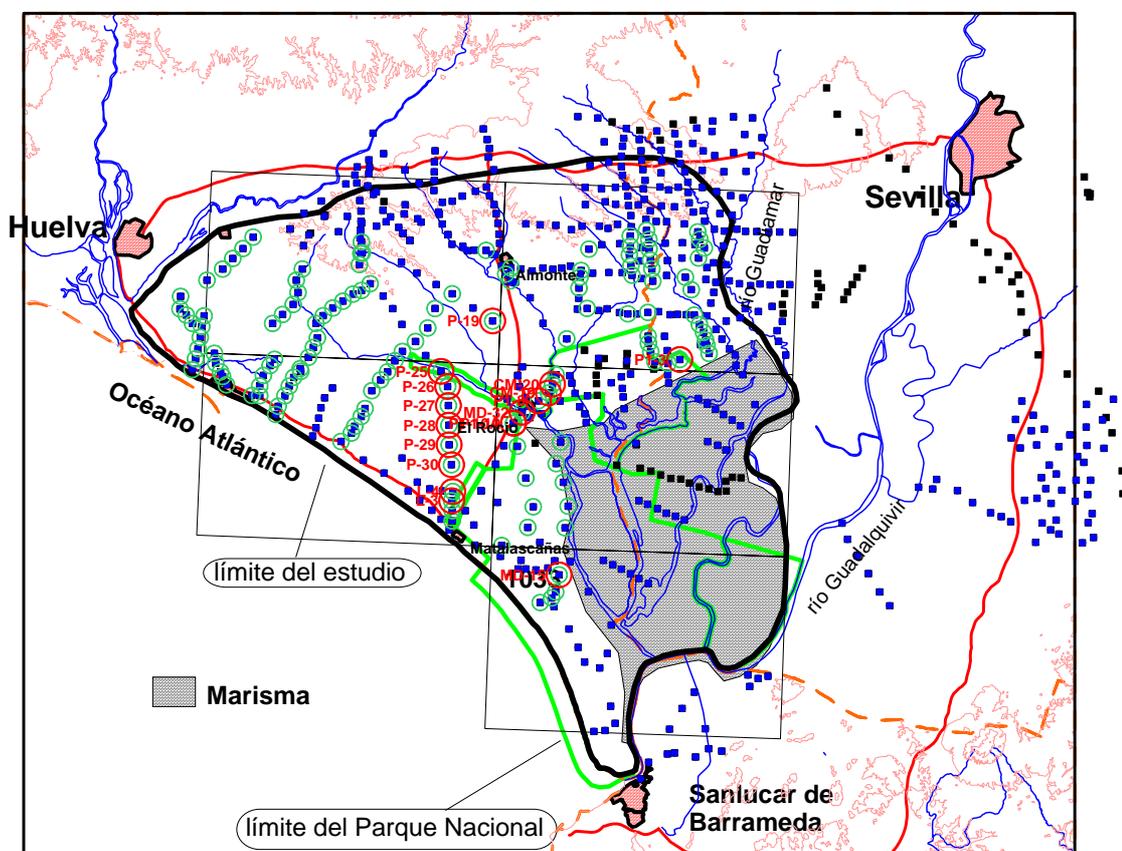
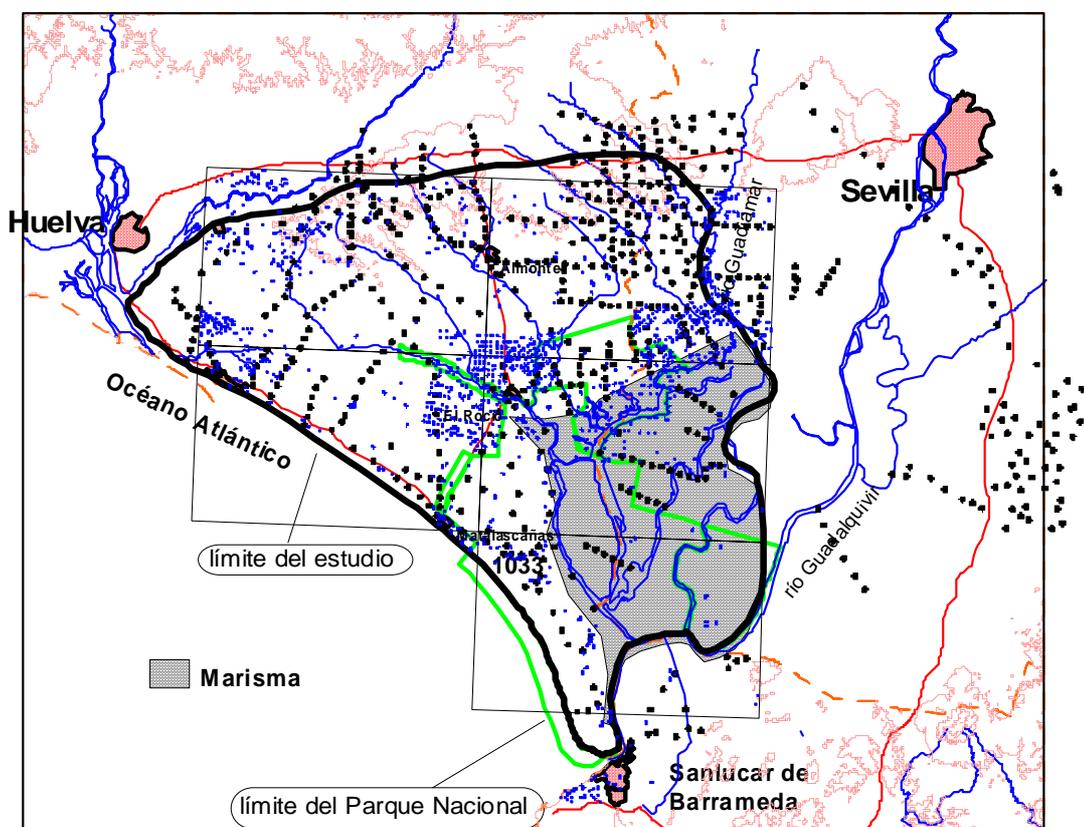


Fig. 103. Posición de todos los SEV recuperados. En negro: no se dispone de interpretación. En azul: SEV de los que se dispone de su interpretación original. Remarcados en verde: SEV que fueron reinterpretados en el informe de 1970. Con círculo exterior rojo: SEV verificados en el presente Informe.

Existen algunas singularidades (ver capítulo II “Preparación de los datos en forma digital” para más información). Así, para los SEV L-4, L-5, L-6, L-8, L-25, L-27, L-28, L-37, L-53 y L-56 de la campaña L (*Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063*), no coinciden algunas interpretaciones encontradas en los estadillos con los datos de los cortes geoelectrónicos. En los SEV de las zonas Perfil1, Perfil2, MD, MP, MR, N y LERICI (*Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin.*

**PRAKLA.1968.Ref. 35559**), se observa que los valores de interpretación que aparecen en los estadillos de las curvas de campo no coinciden exactamente con los de los cortes, habiéndose utilizado para el fichero INTERPRETACION.xls los datos de los cortes geoelectricos. Para las campañas P (**Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070**) y CD (**Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.**) se han utilizado los valores anotados en los estadillos de campo. La reinterpretación efectuada en el trabajo **Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.** está presentada fundamentalmente en forma de cortes geoelectricos (como los ejemplos de las Figuras 97 y 98), que es de donde se han leído los valores de resistividad y profundidad de la interpretación; en algunas ocasiones no es posible saber el valor asignado a la resistividad de la primera capa, habiendo señalado este hecho con marcas de interrogación en el fichero INTERPRETACION.xls. La resistividad de la última capa está solo marcada como "conductor", indicándose con la letra C.

Actualmente (2004) se dispone de mucha más información, sobre todo geológica, procedente de los numerosos sondeos mecánicos efectuados, aunque con una distribución (Figura 104) muy irregular para el conjunto del acuífero. Se ha procedido a intentar una comparación sistemática de las columnas litológicas con los cortes geoelectricos cuando SEV y sondeo mecánico están en una razonable proximidad.



**Fig. 104. Posición de SEV (en negro) y sondeos mecánicos (en azul).[ficheros Base-final.xls, PERFILES(todosSEV).xls]**

El resultado general de esta comparación es que en algunas ocasiones las descripciones de las columnas de los sondeos son excesivamente simples (p.e. arenas para todo el sondeo), no pudiendo establecerse una correspondencia con las variaciones de resistividad; en otras ocasiones, se produce la situación contraria: columnas con una descripción de litología muy variada se corresponden a cortes geoelectricos monótonos. La identificación de las margas que suponen la base impermeable del acuífero tampoco presenta siempre buena correlación entre su localización por resistividad y los cortes geológicos (en el capítulo III-1 “Revisión del mapa del techo de las margas azules” del presente Informe pueden verse más detalles acerca de esta cuestión). En general, parece confirmarse la tendencia a un descenso de la resistividad a medida que aumenta la presencia de tramos arcillosos.

A la vista de esta situación, la revisión de los trabajos geoelectricos se va a abordar en varias etapas:

- efectuar, por muestreo, una verificación de la validez de la interpretación disponible, teniendo en cuenta las nuevas herramientas de cálculo numérico para la inversión de los datos de campo.
- Validar las interpretaciones, teniendo en cuenta el mayor conocimiento geológico aportado por los sondeos mecánicos.
- Ensayar la posible validez de los modelos geoelectricos como soporte de modelos estratigráficos.

### **III.3.5 Verificación de la interpretación**

[Este apartado ha sido realizado con la participación de C. Rey y F. Rubio]

Se ha efectuado una selección de 16 SEV, cuya situación está indicada en la Figura 103, para proceder a una verificación de su interpretación. Para ello se ha seguido tanto el criterio de que hubiera cierta proximidad a sondeos mecánicos, a pesar de la discrepancia entre datos litológicos y de resistividad, como que pertenecieran al mismo corte geoelectrico, a fin de que la continuidad sirva de soporte a la interpretación. Los SEV reinterpretados son:

- corte 5: L-3, L-4, P-19, P-25, P-26, P-27, P-28, P-29, P-30
- corte 6: P1-10, MD-32, P1-8, CM-19, CM-20
- corte 9: P1-3
- corte 7: MD-15

refiriéndose los cortes a los efectuados en el Informe de Astier de 1970 (plano de Figura 99, y cortes en Figuras 97 y 98). La posición de estos SEV puede verse en la Figura 103. Para la interpretación de los SEV se ha utilizado el programa IX1D de Interpex, que permite tanto obtener un modelo de distribución de la resistividad con la profundidad a partir de los datos de campo (AB/2- resistividad aparente), como partir de un modelo profundidad-resistividad y construir su curva de campo teórica.

Partiendo de los datos de los estadillos de campo, para cada SEV se ha trazado su curva de campo AB/2-resistividad aparente, como dato base (curvas reducidas al primer empalme de cambio de MN). Partiendo de la interpretación (resistividad-profundidad) dada por Astier en el Informe de 1970, al que hemos denominado "Modelo Astier70", se ha calculado la correspondiente curva teórica AB/2-resistividad aparente, verificando así el grado de fiabilidad de una interpretación hecha en su día con técnicas manuales y gráficas. Como los valores de resistividad de la primera (a veces de la primera y segunda) y última capa no son conocidos, puesto que se han tenido que leer en documentos gráficos en los que no constan, se ha efectuado una asignación a los mismos, por lo que el modelo final se ha denominado "Revisión Astier70". En cada caso se presenta además la interpretación primera u original efectuada en el Informe de Prakla Ref. 35559 de 1968, respecto del que la modificación introducida en 1970 consistió básicamente en la introducción de una capa resistiva antes de llegar al basamento conductor.

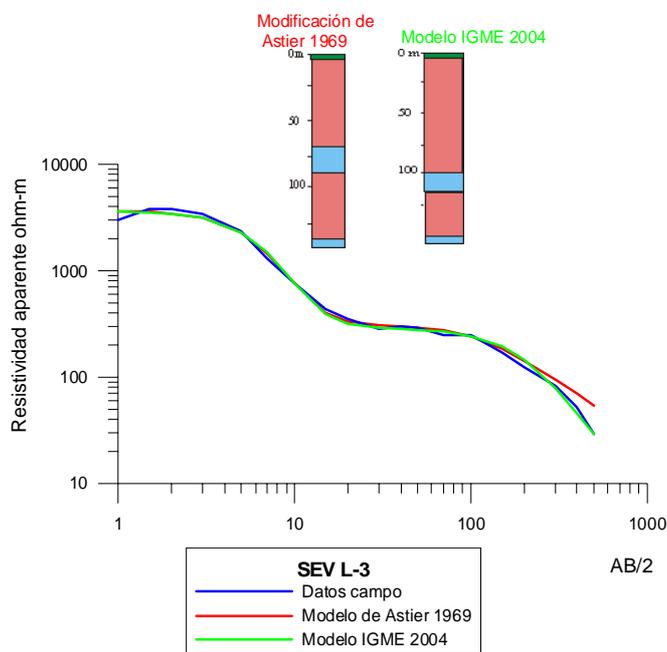
Por otra parte, para cada SEV se ha obtenido además un modelo nuevo ("Modelo IGME04"), mediante reinterpretación de los datos originales de campo, teniendo en cuenta los datos de profundidad de las capas del sondeo mecánico más cercano, y adjudicando resistividades de acuerdo con las correspondientes a una comparación entre sondeo mecánico y SEV de partida; para este modelo se ha calculado igualmente su curva de campo teórica AB/2-resistividad aparente, analizando su grado de aproximación a la anterior. Cuando no se ha dispuesto de información de sondeos próximos, o ésta no es reconciliable con la curva de resistividad inicial, el modelo IGME04 es solamente un modelo de mejor ajuste matemático.

### III.3.5.1 Corte geoelectrico 5

- **SEV L-3**

Introduciendo una resistividad de la primera capa del orden de la existente en el modelo original, la curva teórica de la versión Astier70 se ajusta perfectamente a los datos de campo (Figura 105). El nuevo modelo IGME04 se ha preparado teniendo en cuenta el sondeo mecánico Acebuche-2 (Figura 114), no disponible en 1970. El modelo conseguido no varía sustancialmente respecto del anterior. La diferencia viene marcada por la profundidad a la que se encuentran las capas conductoras y resistivas. Con esta nueva interpretación, la capa conductora coincidiría con la profundidad en que se sitúa en el sondeo una capa de arcillas.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
L-3	34	2,5	3000	3	???	3	3651	3	3607
		68	300	76	300	68,7	299	97	281
			<60	20	40	19,2	35	16	9
				40	300	50	242	38	212
					C		7		2



**Fig. 105. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV L-3**

• **SEV L-4**

La interpretación de 1970 puede aceptarse plenamente; debe tenerse en cuenta que las curvas de campo utilizadas en la presente revisión están ya corregidas de los saltos motivados por los cambios de base, desconociéndose el criterio utilizado originalmente para efectuar los desplazamientos de tramos. Este SEV está situado en las proximidades del sondeo mecánico Acebuche-1 (Figura 114), que ha sido usado para su reinterpretación. Como en el caso anterior las resistividades no varían mucho con respecto a la interpretación de Astier, pero para hacer coincidir mejor la capa de baja resistividad con su posición en el sondeo mecánico, se ha bajado el valor de la resistividad.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res Astier	espesor	res igme
L-4	38	4	5100	2	???	3,6	7000	4	7251
		60	250	78	300	76,4	300	90	316
			<76	24	40	24	40	10	2
				46	300	46	300	184	342
					C		20		2

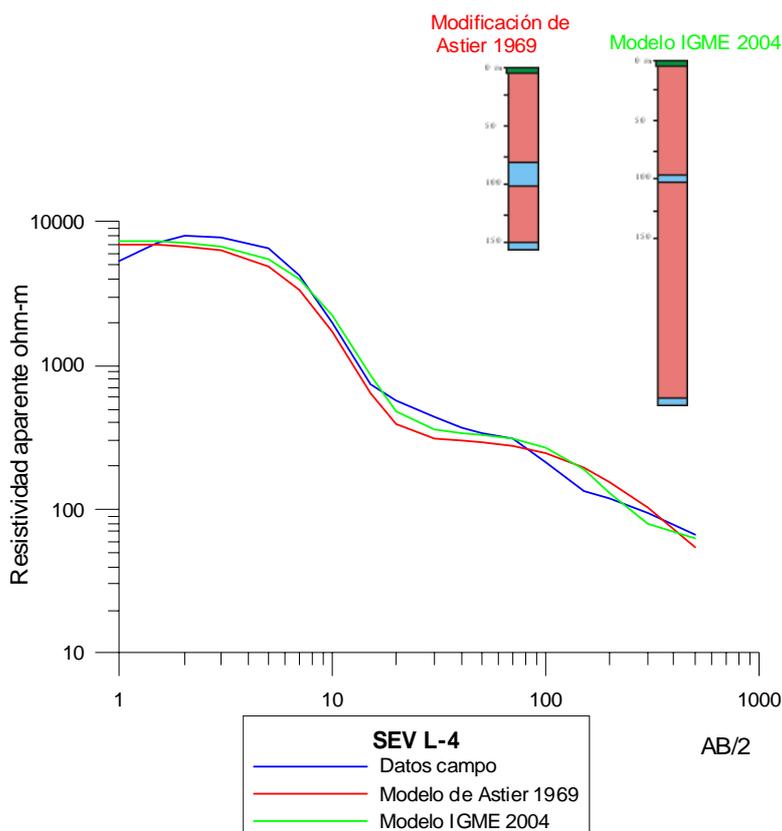


Fig. 106. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV L-4

• **SEV P-30**

Las modificaciones introducidas en el modelo de 1970 son carentes de importancia, justificando la interpretación con su buen ajuste con los datos de campo.

El SEV se encuentra situado entre el sondeo IV-11-6 y el sondeo 1017-41 (Figura 114), del que ya se disponía en 1970 y que fue usado para la interpretación de la capa conductora intercalada en esta zona del perfil 5. En la interpretación IGME04, se ha puesto esta capa conductora a mayor profundidad, por interpolación entre los sondeos mecánicos, resultando en un modelo equivalente al de 1970, con buen ajuste con los datos de campo.

		original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
SEV	COTA	esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-30	43	2,4	21000	2	???	2,7	12849	2,8	12301
		41	530	48	500	50	500	80	406
		143	155	20	40	20	40	10	20
			4	59	300	40	491	30	280
					C		6		14

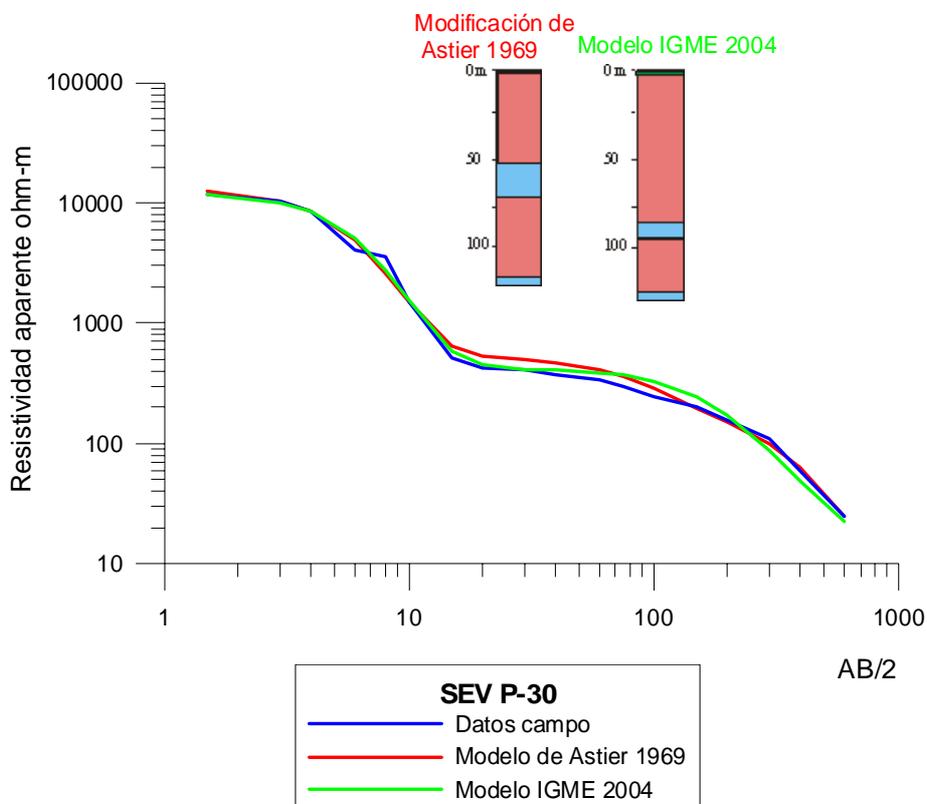


Fig. 107. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-30

• **SEV P-29**

El modelo de 1970 ha precisado de ajustes mínimos para conseguir una buena coincidencia con los valores de campo.

La disponibilidad actual de los sondeos mecánicos IV-11-6, IV-11-1 y IV-4-6 permite, en el modelo IGME04, introducir una capa conductora a mayor profundidad y de 10 m de potencia. En la Figura 108 puede apreciarse cómo este modelo ajusta peor con los datos de campo en la segunda mitad de la curva, que el modelo anterior, por lo que geoelectricamente es probable que el modelo de 1970 represente mejor el terreno.

		original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
SEV	COTA	esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-29	37	1,5	7000	2	???	2	6652	1,7	6274
		39	480	28	500	26	410	60	341
			50	4	???	4	62,5	10	2,8
				66	200	62	195	63	85,2
					C		34		39,6

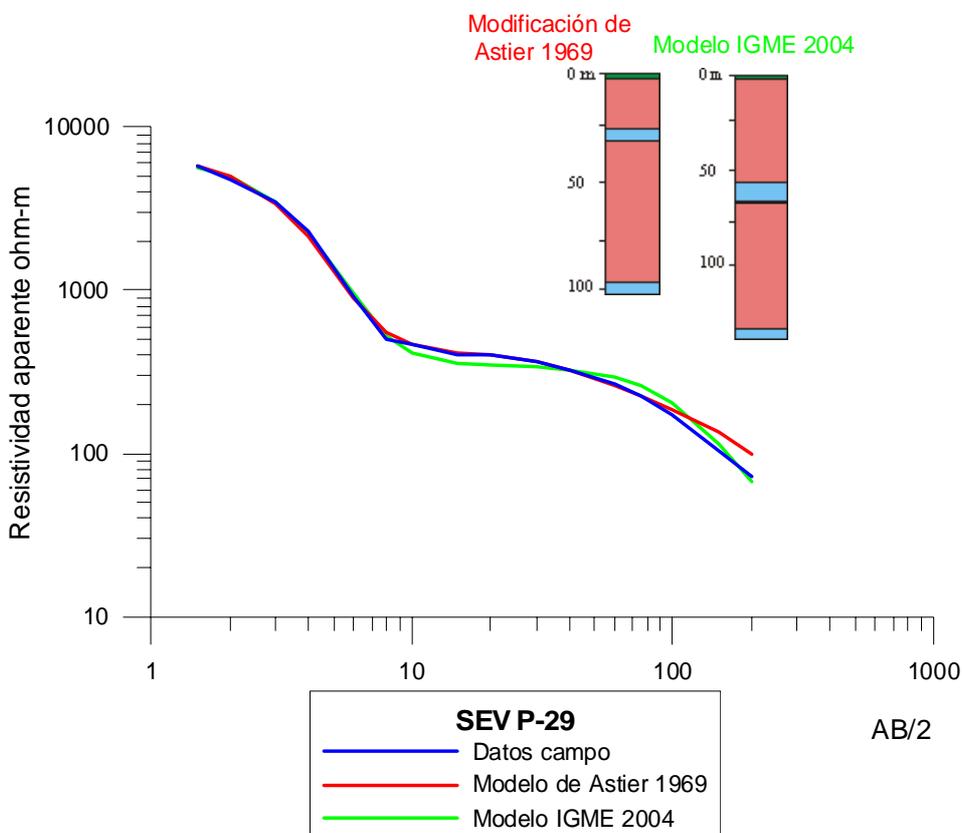


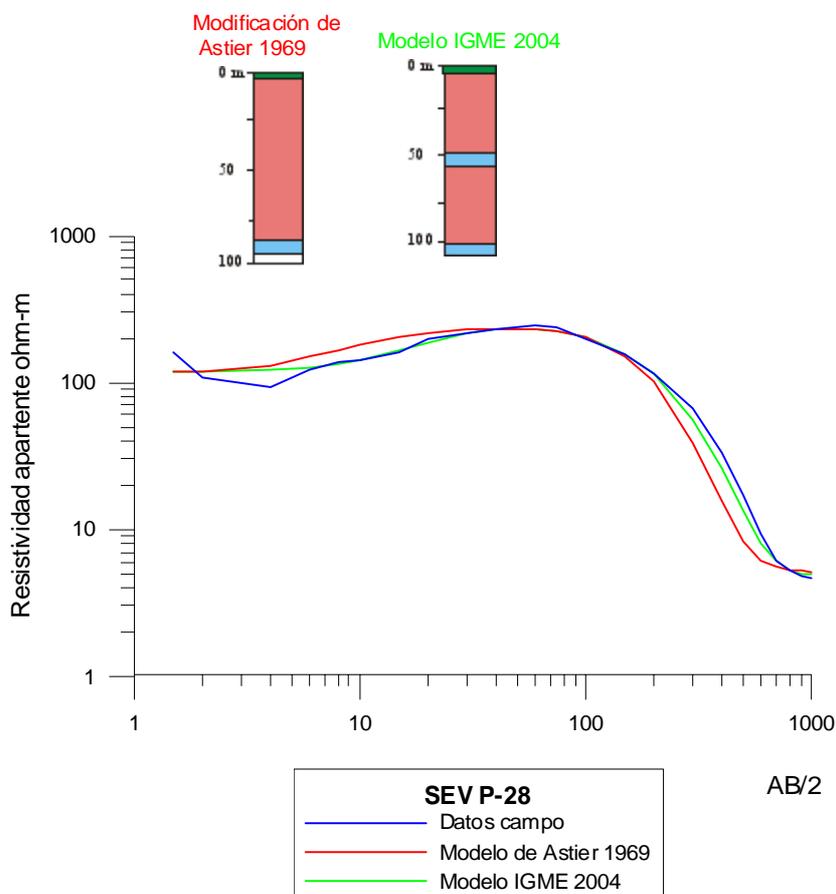
Fig. 108. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-29

• **SEV P-28**

La interpretación de 1970 presenta una cierta desviación respecto de la curva de campo; aunque los desplazamientos de cambios de base pudieran justificarlo, es evidente la necesidad de una segunda capa más conductora que la primera.

Los sondeos mecánicos IV-4-6 y IV-3-3 han servido de apoyo para la preparación del modelo IGME04, situando una capa de arcillas sobre los 50 m de profundidad, no interpretada anteriormente, aunque, sin embargo ambas soluciones son muy equivalentes, presentando las mismas desviaciones respecto de los datos de campo.

		Original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
SEV	COTA	esp.	Resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-28	35	0,6	340	3	???	3	116	6,5	119
		3	68	88	250	88	250	40	300
		105	270		C		5	10	40
			4,5					39	388
									4,7



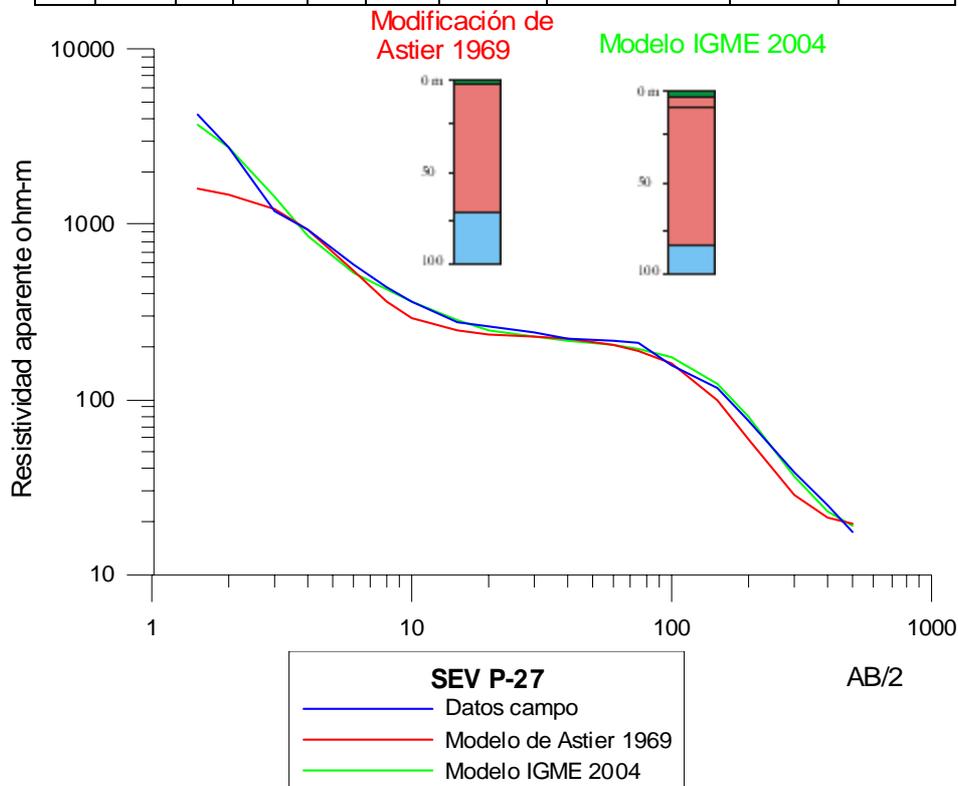
**Fig. 109. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-28**

• **SEV P-27**

Resulta evidente que el modelo de 1970 no ha tenido en cuenta los dos primeros puntos de la curva de campo, lo cual no representa grandes variaciones desde el punto de vista del corte geoelectrico en su conjunto.

Este SEV está situado entre los sondeos mecánicos IV-2-7 y IV-2-6, en los que podría aceptarse que la capa conductora de base está más profunda. El modelo reinterpretado presenta cuatro capas, aunque las dos intermedias se pueden agrupar en una con resistividad parecida. La potencia total de las capas resistivas es de 85 m (algo más que en la interpretación de Astier) y acabarían en el conductor de base. La equivalencia entre modelos ratifica la ambigüedad de la asignación de tramos de resistividad a las columnas de los sondeos, con una gran variación en cortas distancias.

		original		Astier70		revisión Ast70		igme04		
SEV	COTA	esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res Astier	Mod	espesor	res igme
P-27	30	2,2	1700	2	???	2	1700		1	5507
		66	250	67	230	67	230		3,8	538
			17		C		18		80,5	217
										16



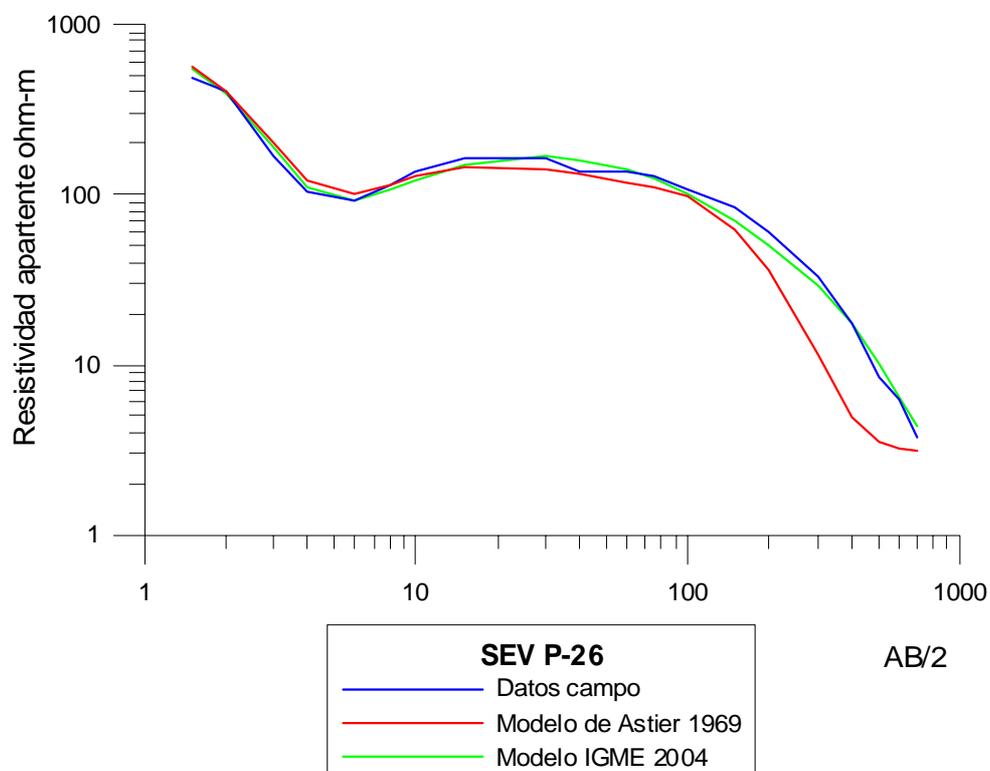
**Fig. 110. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-27**

- **SEV P-26**

El modelo de 1970 se ajusta bien a los datos, presentándose no obstante la misma incertidumbre que en casos anteriores respecto del sistema seguido para eliminar los empalmes de cambio de base.

El sondeo mecánico más próximo a este SEV es el IV-2-1, que a partir de los 40 m tiene un potente tramo de arcillas, como indica el modelo de 1970, que lo sitúa sobre los 45 m. Para conseguir un mejor ajuste, en el modelo igme04 ha sido necesario aumentar la potencia del tramo resistivo, situando el conductor a los 57 m, con una resistividad mayor (43 ohm.m).

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-26	25	2,5	34	1	???	1	850	1	812
		6,5	340	2	???	2	45	2	40
		6	48	8	300	8	300	9	310
		60	110	4	20	4	20	45	120
		130	34	30	250	30	250	137	43
			1,9		C		3		2



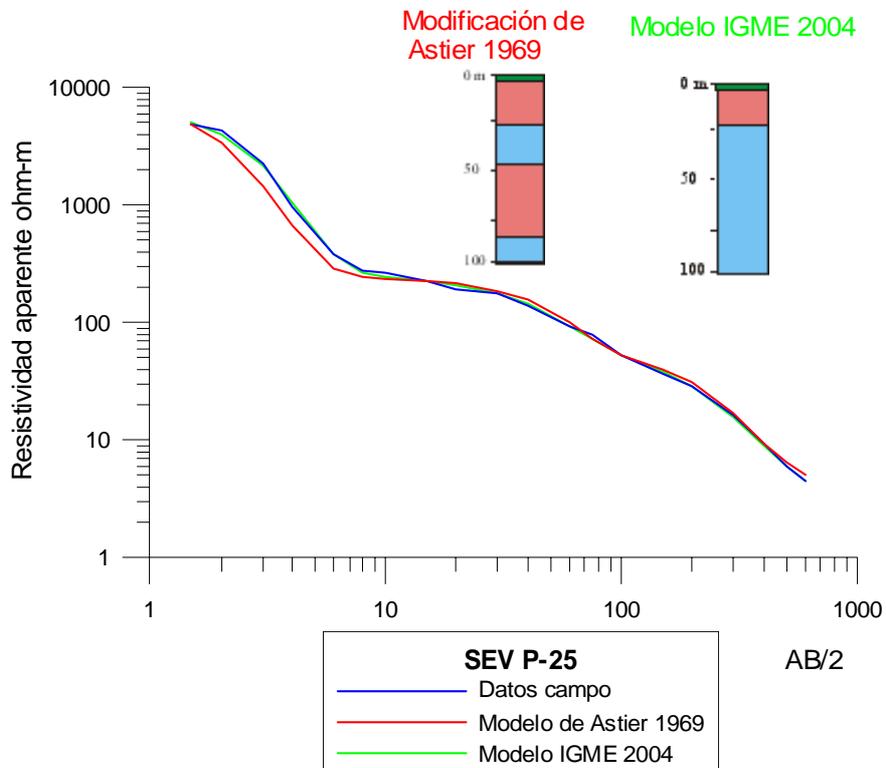
**Fig. 111. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-26**

- **SEV P-25**

El modelo de Astier se ajusta perfectamente a los datos.

En el modelo igme04 se ha tenido en cuenta el sondeo mecánico BG-31, formado por dos niveles principales: uno superior de arenas finas (facies delta-playa) y otro inferior de bioclastos y arcillas (facies de cuenca), que comienza sobre los 20 m de profundidad. El modelo geoelectrico así preparado consigue un buen ajuste con la curva de campo, pero sitúa el nivel de baja resistividad a mucha mayor profundidad. Se trata, de nuevo, de optar por uno u otro modelo geológico, ya que geoelectricamente, ambos son equivalentes.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-25	25	1,3	6000	1	???	1	7500	1,2	6745
		25	230	25	230	25	230	21,7	230
		101	50	20	20	20	20	115	43
				40	100	40	100		3
					C		4		



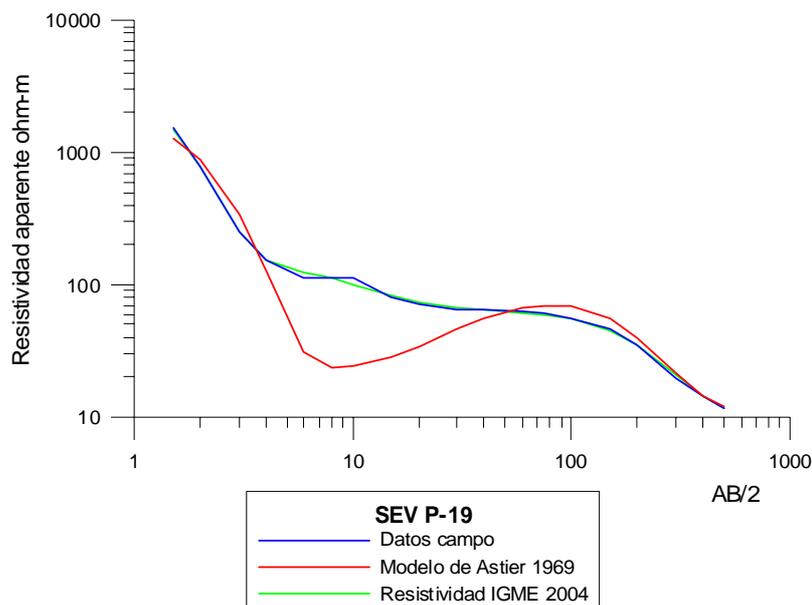
**Fig. 112. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-25**

- **SEV P-19**

El modelo de 1970 no se ajusta a los datos de campo, debido a que la resistividad de 20 ohm.m para la segunda capa resulta demasiado baja.

Este SEV no tiene ningún sondeo mecánico próximo. El modelo de mejor ajuste numérico es equivalente al originalmente efectuado. Por lo tanto, en este caso lo más probable es que el nivel conductor de base se localice a mayor profundidad y debe corresponderse con la continuación del indicado en el extremo norte, antes del cambio de marcador C1 en el perfil 5.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P-19	52	0,7	6400	1	???	1	2000	0,7	4246
		4,2	160	10	20	10	20	4,8	129
		88	80	30	200	30	200	96,3	62,8
			8		C		10		9,4

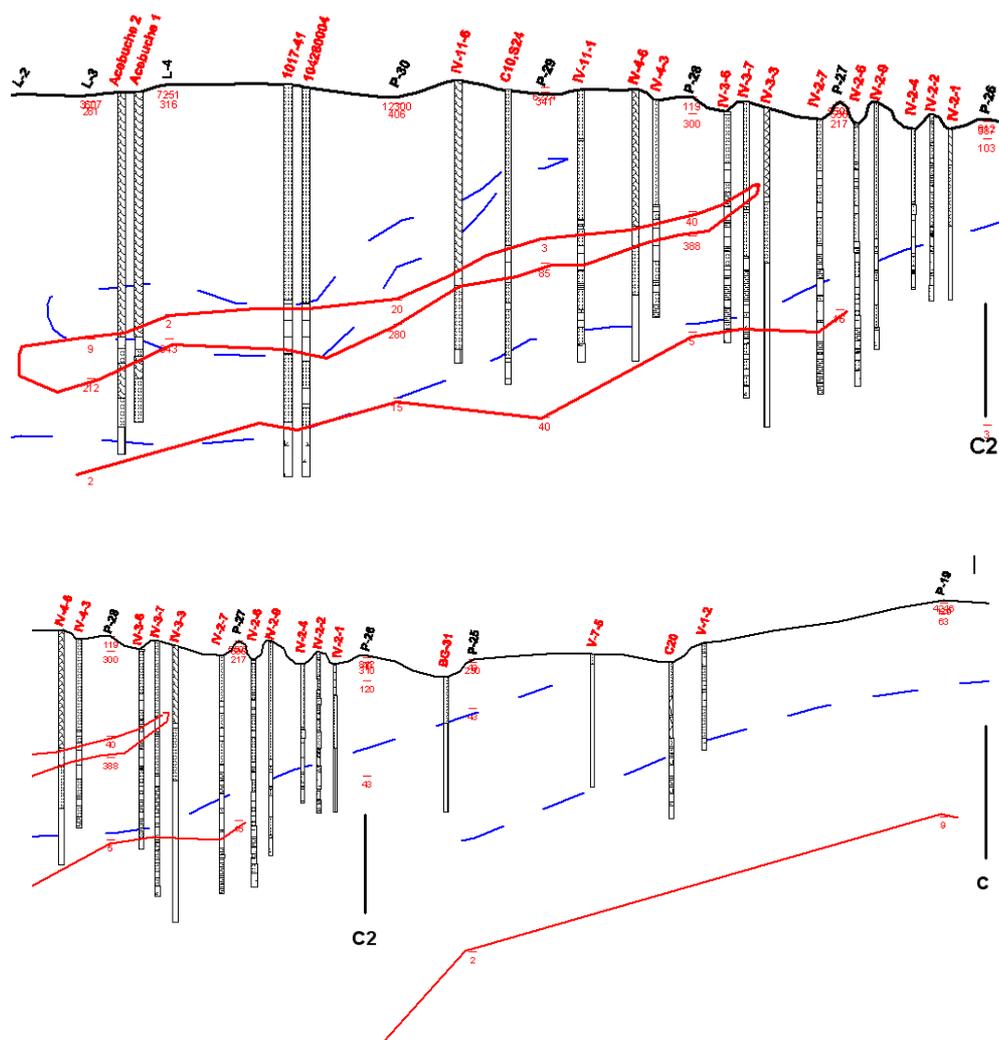


**Fig. 113. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P-19**

De la revisión de estos SEV cabe concluir que, desde el punto de vista de la metodología utilizada, la interpretación realizada en 1970 usando métodos gráficos precisa, en general, de muy pocos retoques para mejorar el ajuste a los datos de campo, respecto de una modelización efectuada con

las herramientas informatizadas actuales. Es preciso, no obstante, recordar que el mejor ajuste numérico no significa mejor ajuste geológico.

Respecto a la mejora que la información de los sondeos mecánicos ahora disponibles puede aportar a la interpretación, es evidente que permite normalmente mejorar los ajustes entre datos de campo y modelo, aunque con resultados no siempre concluyentes, ya que no es infrecuente que la información de las columnas no sea representativa de la distribución de las resistividades en su conjunto. En la parte superior de la Figura 114 se representa el tramo Sur del corte geoelectrico 5, con ambas interpretaciones. La profundidad de la capa intermedia de arcilla es más acorde con los datos de las columnas litológicas en la inversión IGME04; la situación del sustrato conductor es parecida en ambas interpretaciones, con un claro buzamiento hacia el Sur. En la porción Norte (parte inferior de la Figura 114) la modificación se refiere a la profundidad del sustrato conductor, que en el modelo IGME04 está a mayor profundidad (equivalente a la otorgada en la primera interpretación original de estos SEV). Este hecho, sin embargo, no está en contra de la interpretación conceptual efectuada por Astier en 1970, siendo lo más probable que existan ambos marcadores.



**Fig. 114. Corte geoelectrico 5 con la interpretación de 1970 (líneas azules) y 2004 (líneas rojas). Parte superior: tramo sur del perfil. Parte inferior: tramo norte.**

### III.3.5.2 Corte geoelectrico 6

La posición de estos SEV puede verse en la Figura 104.

- **SEV P1-10A**

La interpretación de 1970 es conforme a los datos, con alguna desviación producida por el sistema seguido en el desplazamiento de empalmes.

Este SEV se encuentra entre los sondeos mecánicos IV-12-1 y IV-12-6, presentando ambos capas de arcilla a partir de los 20 m de profundidad, con potencias superiores a los 20 m. La modificación introducida en la interpretación igme04 consigue mejor ajuste con los datos, aunque sin modificar sustancialmente el modelo geológico.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P1-10a	15	???	???	1	???	1	3800	1,2	3057
				19	300	20	300	22,7	209
				40	20	40	20	20	12
				40	200	40	200	70	120
					C		20		10

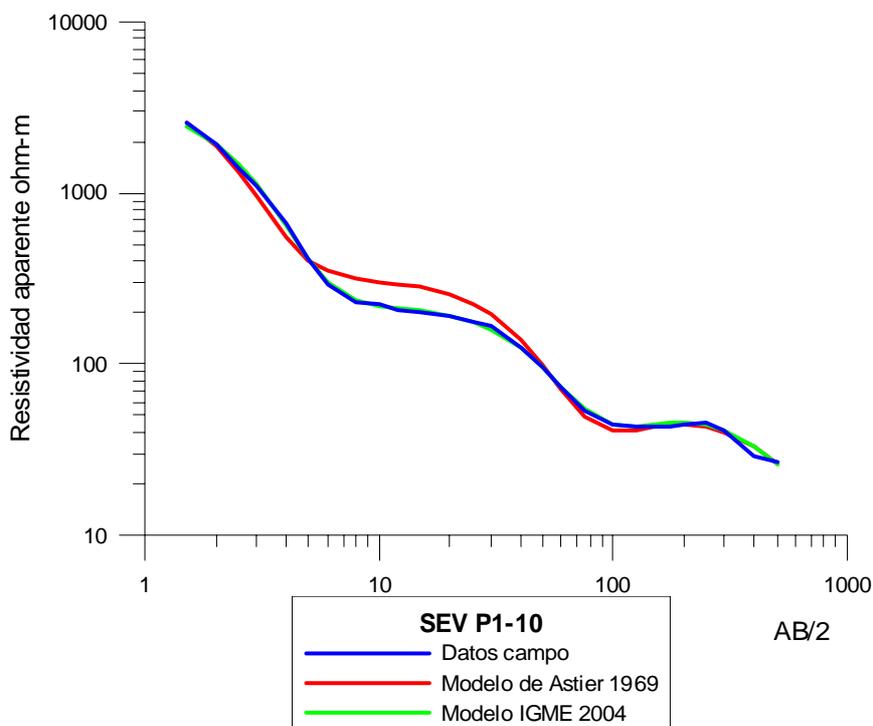


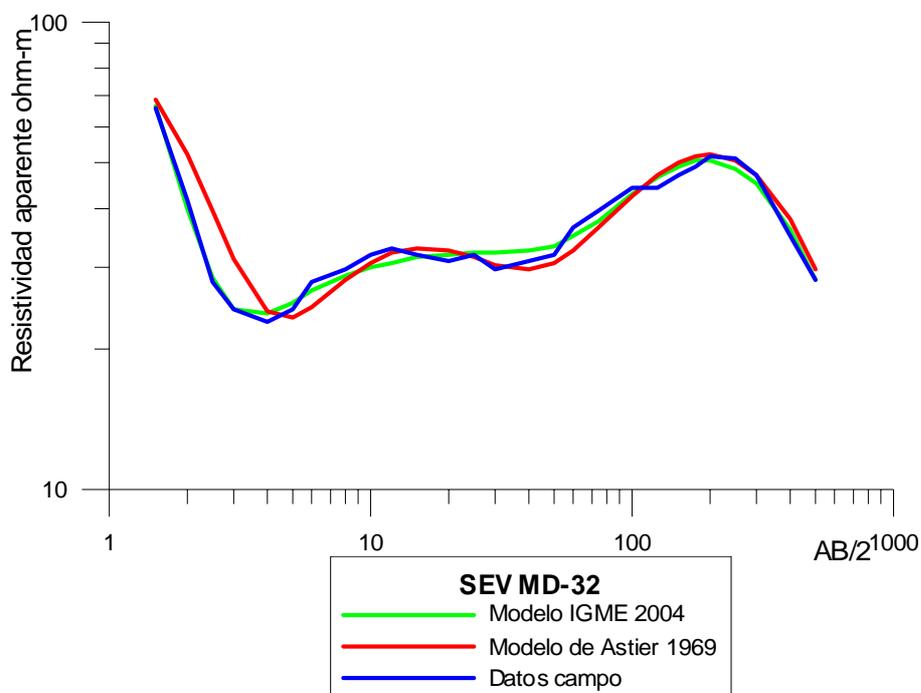
Fig. 115. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P1-10

- **SEV MD-32**

La interpretación de 1970 es compatible con los datos de campo.

El sondeo mecánico más próximo es el IV-6-6, que a los 20 m de profundidad tiene un paquete de arcillas de unos 10 m de potencia. El mejor ajuste se obtiene aumentando la potencia del resistivo tras estas arcillas, lo que sitúa el conductor de base a mayor profundidad que en el modelo anterior.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
MD-32	5	10	55	4	???	1	97,6	0,6	176
		33	20	3	???	1,7	10	0,3	4,6
		86	120	3	???	3	100	22	34
			~ 5	30	20	30	20	9	11
				40	250	40	250	93	105
					C		10		9,5



**Fig. 116. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV MD-32**

• **P1-8**

El modelo adoptado en 1970 indica que los ajustes para empalmar los diversos segmentos de la curva de campo son diferentes de los realizados ahora, por lo que en la Figura 117 se han representado también los datos brutos. Con esta salvedad, el modelo puede quedar suficientemente respaldado por los datos, modificando algo la potencia de las primeras capas.

El sondeo mecánico más próximo es el III-12-11, con una capa de arcillas entre los 20 y los 40 m de profundidad. Sin embargo, el mejor ajuste se consigue elevando este tramo conductor, en mejor coincidencia con el modelo de Astier, aunque el modelo igme04 sitúa el basamento conductor a mayor profundidad.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04		
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme	
P1-8	5	35	15	4	???	1	300	0,7	600	
		60	100	8	10	2	10	9,5	33	
			~ 5	5	100	2	100	22	17	
					27	10	27	10	99	61
					35	200	35	200		13
						C		10		

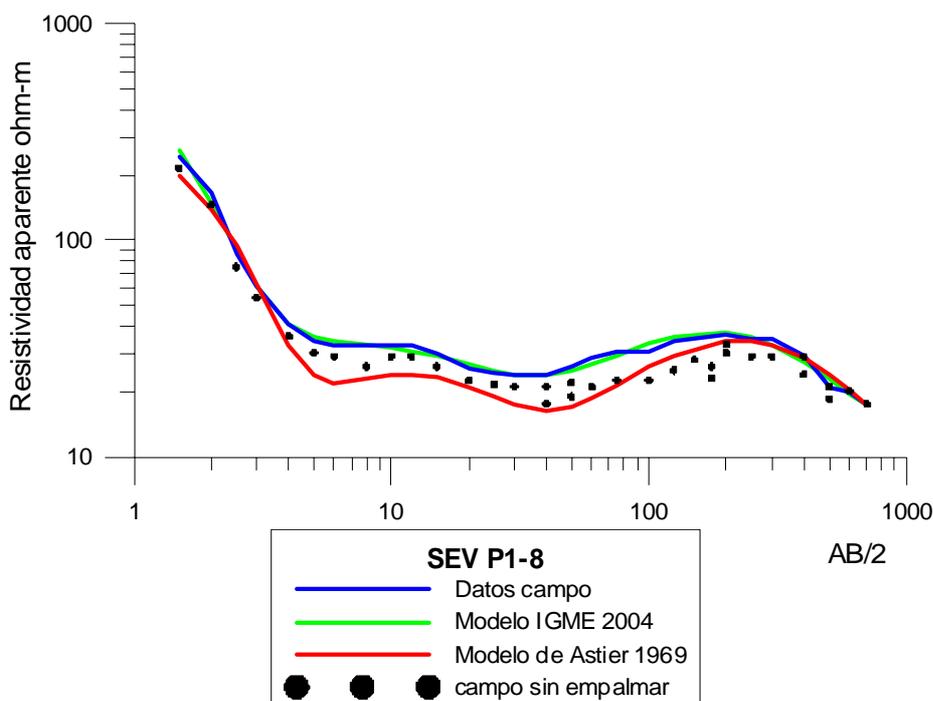


Fig. 117. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P1-8

• **CM-19**

En este caso existe una discrepancia entre la curva teórica del modelo de 1970 y los datos de campo, aunque se mantiene la morfología de la curva. Esta variación no está justificada por los criterios de empalme, que son mínimos en los datos de campo. El sondeo III-12-9 está junto a este SEV, y presenta una capa de arcillas desde los 10 a los 40 m de profundidad. El modelo igme04 recoge esta capa, y como en los SEV anteriores de este perfil, sitúa el conductor de base a mayor profundidad.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
CM-19	6			2	???	2	120	1.8	144
				4	???	4	200	4.1	59
				27	15	27	15	35	30
				37	150	37	150	70	70
					C		10		10

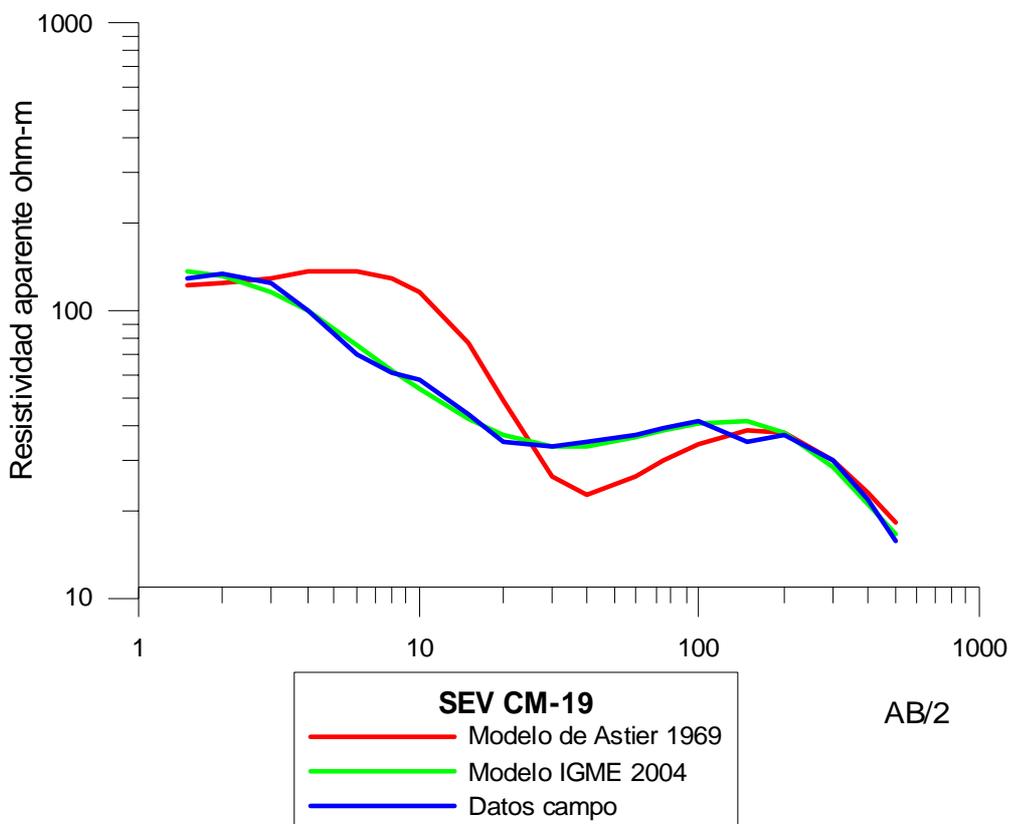


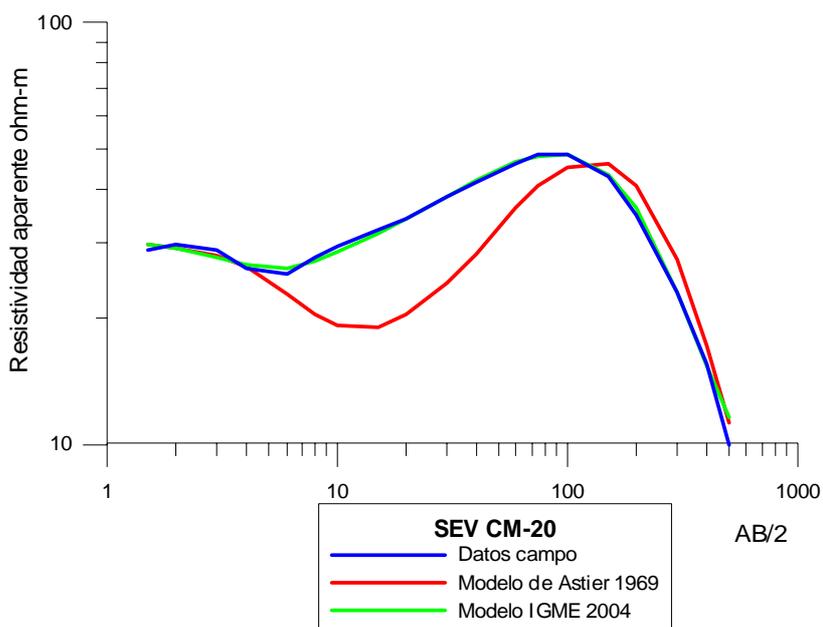
Fig. 118. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV CM-19

• **CM-20**

Para un mejor ajuste a los datos de campo, el modelo de 1970 precisaría modificar la potencia de las primeras capas; no obstante, la secuencia fundamental del modelo adoptado es válida.

Este SEV tiene numerosos sondeos mecánicos próximos: III-12-8, III-11-4, III-11-8, III-11-9, etc., que se caracterizan por ser predominantemente arcillosos en los primeros 15-20 m, pasando luego a arenas. Esta secuencia se ha tomado para el modelo igme04, que consigue un buen ajuste con los datos de campo.

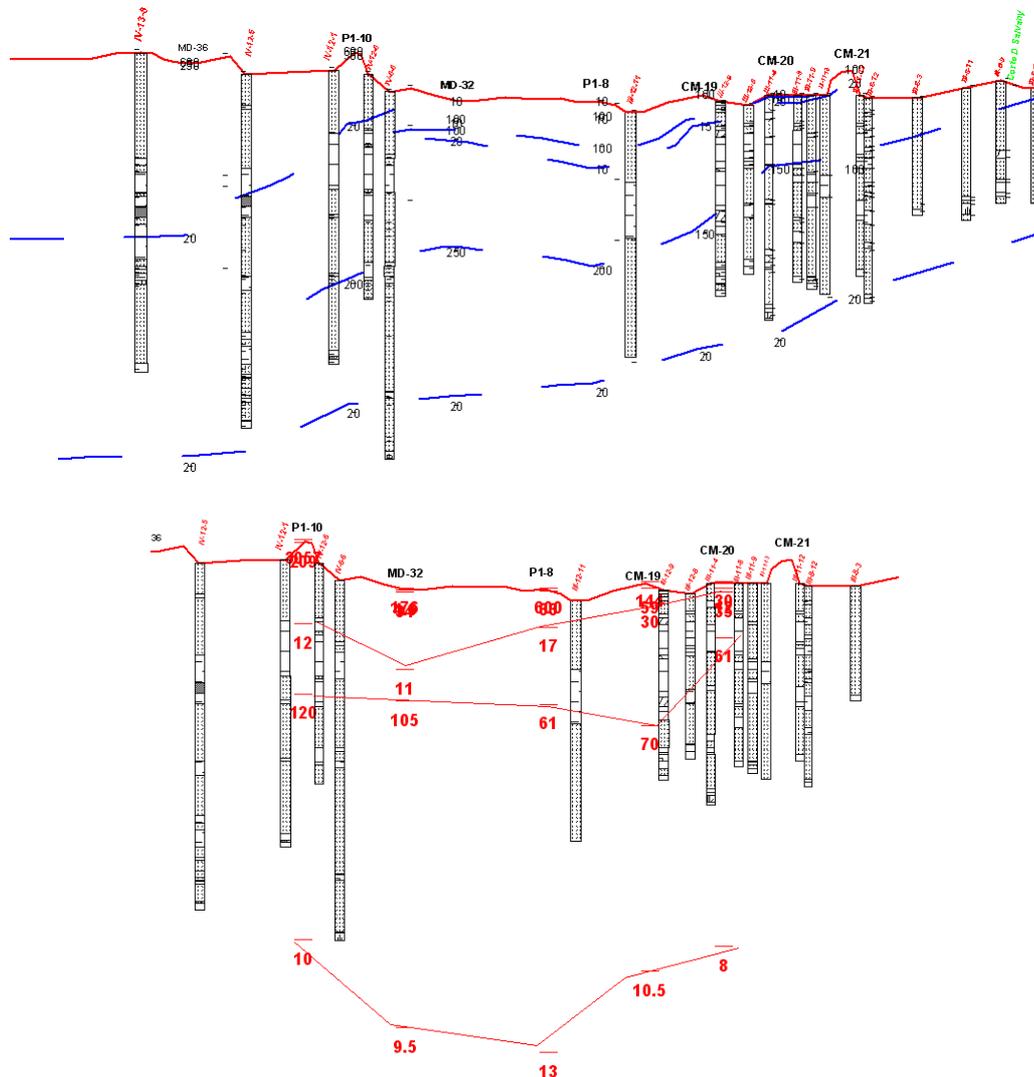
SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		Esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
CM-20	10			3	???	3	30	2	30
				3	???	3	12	1	12
				17	20	17	20	13	35
				42	150	42	150	88	61
					C		5		8



**Fig. 119. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV CM-20**

En su conjunto, para este perfil, la interpretación de 1970 se adapta a los datos de campo, presentando algunas desviaciones posiblemente debidas a diferentes causas: el criterio seguido para empalmar los tramos de la curva (valores medidos con las mismas distancias AB/2 y diferentes distancias MN); probablemente no se tuvieron en cuenta puntos especialmente desviados de un trazado suave de la curva; y se dio más importancia a la continuación de la secuencia a lo largo del perfil, que a justificar las primeras capas, que carecen de interés para el modelo hidrogeológico seguido por Astier.

En la Figura 120 se presenta la parte central del corte geoelectrico 6, que es la considerada en esta revisión. Puede apreciarse que la interpretación de 1970 (parte superior de la Figura 120) representa en términos generales la existencia real de las intercalaciones arcillosas puestas de manifiesto por los sondeos mecánicos. La introducción de nuevos datos litológicos como información previa para la reinterpretación de los SEV se presenta en la parte inferior de la Figura 120. El modelo del perfil es más heterogéneo, como lo es la información de las columnas litológicas, manteniéndose la presencia de una capa potente de arcillas, tras la que se sitúan series más resistivas, y con un fondo nuevamente conductor, pero a mayor profundidad que en el modelo de 1970, lo que no está en total contradicción, ya que en dicho modelo ya se prevé la continuidad de esta interfase, interrumpida en la interpretación por medio de cambios de marcador.



**Fig. 120. Porción central del corte geoelectrico 6. Parte superior: las líneas azules son el resultado de la interpretación efectuada en 1970, con una aceptable correspondencia con los sondeos mecánicos. La parte inferior es el resultado de la reinterpretación de 2004, introduciendo los datos de los sondeos mecánicos.**

### III.3.5.3 SEV MD-15 y P1-3

- SEV MD-15

El modelo adoptado para el SEV MD-15 en 1970 está justificado por los datos de campo, excepto que sería necesario introducir una primera capa, de muy poca potencia y resistividad elevada. En esta zona, junto al antiguo sondeo BG6, se localiza el nuevo sondeo C19 (S50), existiendo una clara contradicción entre ambas columnas litológicas; mientras que el BG6 presenta una capa de arcilla entre los 20 y 45 metros de profundidad, en el C19 dicho tramo está clasificado como arenas, lo que invalidaría la interpretación de 1970 (Figura 122). El modelo preparado en 2004 ha seguido la información del BG6, consiguiendo un buen ajuste con la curva de campo reducida al primer empalme, aunque la capa de gravas, de 72 ohm.m, se sitúa a mayor profundidad que la dada por el sondeo (Figura 122).

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
MD-15	5	12	120	7	200	7	200	1,6	2751
		37	30	24	20	24	20	6	70
		52?	120	35	200	35	200	57	14
			~5		C		5	15	72
									0,5

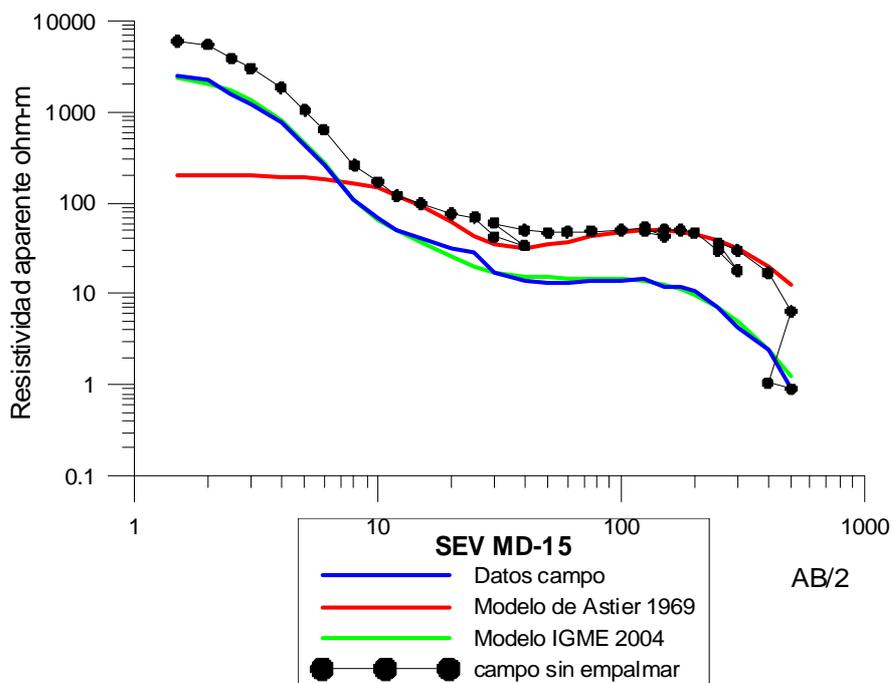


Fig. 121. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV MD-15

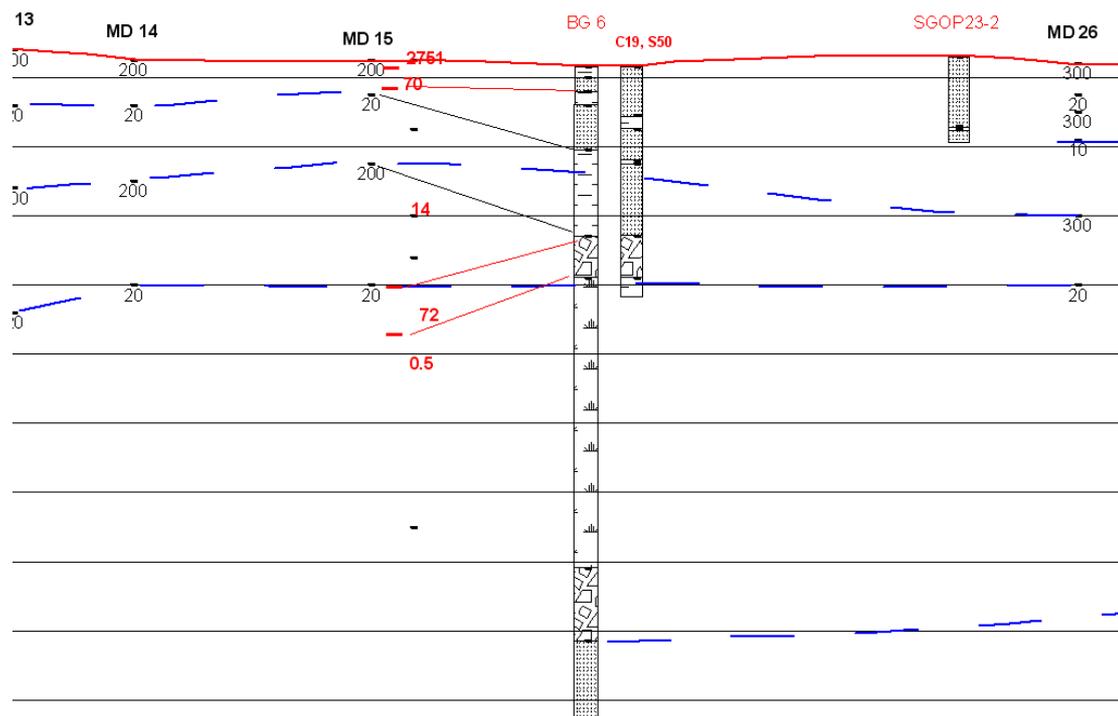
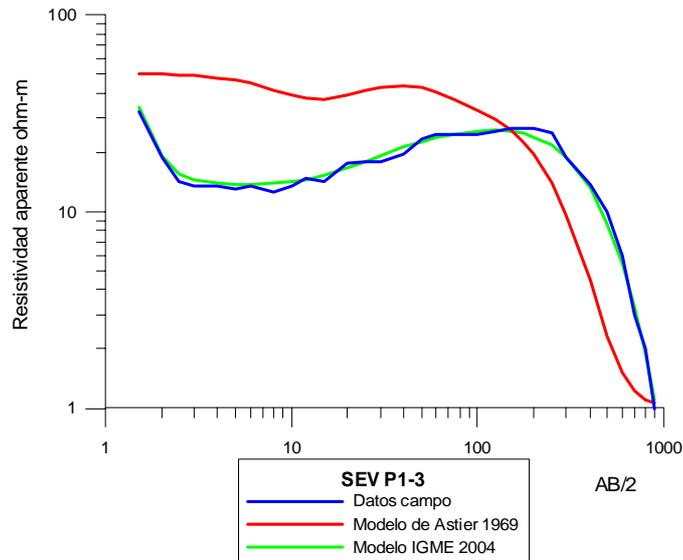


Fig. 122. Fragmento del corte 7, donde se encuentra el SEV MD-15. La interpretación de 1970 son los valores de resistividad en negro y las líneas en color azul. La reinterpretación de 2004 son los valores en rojo.

- SEV P1-3

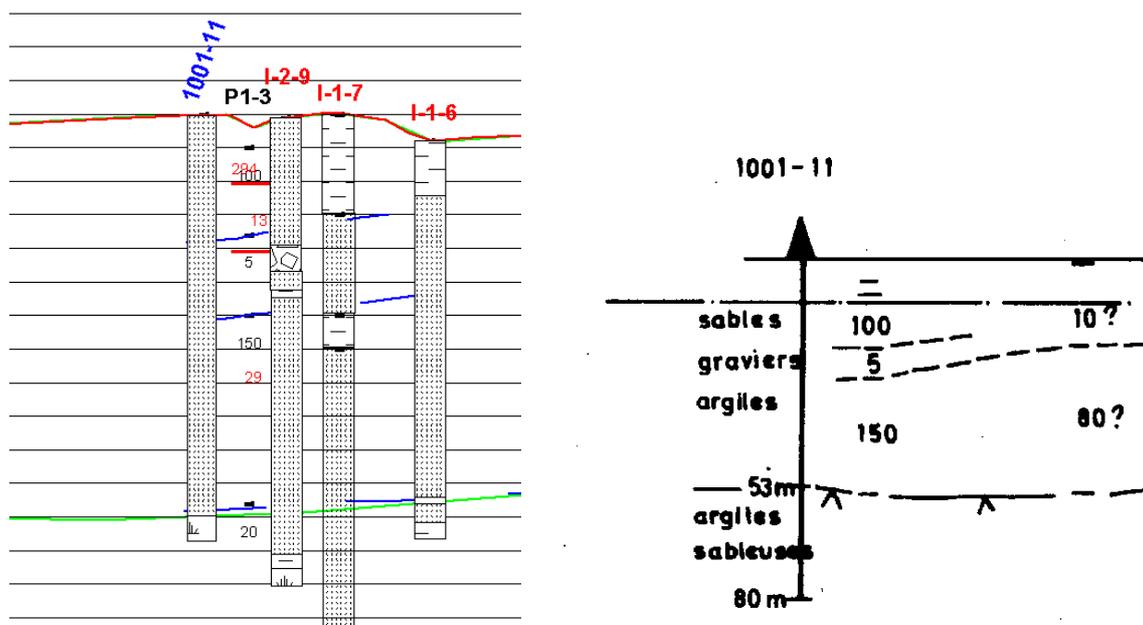
La solución dada para las primeras capas del modelo 1970 no se ajusta bien a los datos de campo, siendo posible que no se tuvieron en cuenta en la interpretación entonces realizada, que buscaba el mantenimiento de un modelo y su confluencia con los datos entonces conocidos.

SEV	COTA	original		Astier70		revisión Ast70		igme04	
		esp.	resis.	esp.	resis.	espesor	res AstierMod	espesor	res igme
P1-3	12	28	18	5	???	5	50	12,5	293,5
		70	50	3	???	3	13	10	13,4
		~ 5	13	100	13	100	188	28,8	
			7	5	7	5		0,1	
			18	150	18	150			
				C		1			



**Fig. 123. Resultado de la revisión de la interpretación del SEV P1-3**

En las proximidades de este SEV se encuentran varios sondeos mecánicos: el antiguo 1001-11, y los nuevos I-2-9, I-2-7 e I-1-6. En la Figura 124 puede apreciarse la disparidad de cortes litológicos que presentan, lo que dificulta la adopción de uno u otro modelo a priori. El ajuste realizado en la interpretación de 2004 es una buena solución para la curva de campo, aunque no representa fidedignamente ninguno de los cortes litológicos. Por otra parte, la descripción del sondeo 1001-11, que encontramos como de arenas casi en toda su profundidad, es distinta de la utilizada en 1970, donde una alternancia de arenas, gravas y arcillas justifica bien la interpretación entonces realizada.



**Fig. 124. Fragmento del corte 9. Comparación de las interpretaciones del SEV P1-3 con los sondeos mecánicos próximos, y diferentes versiones para la columna del sondeo mecánico 1001-11**

### III.3.6 Verificación del nuevo modelo estratigráfico con los cortes geoelectricos

En diversos momentos del presente Informe se ha considerado necesario recoger una descripción de la geología general de la zona estudiada. Así, ya en la Introducción (Capítulo 0) se presentó un extracto de las ideas principales encontradas en los numerosos informes técnicos utilizados, que reflejaba la base de partida en el año 2000. Posteriormente se han ido añadiendo comentarios de especial interés para cada capítulo, siendo los principales los que pueden encontrarse en el apartado I.3.1 de revisión del Informe **Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.**, donde la síntesis geológica era necesaria para poder interpretar los documentos ahí aportados; así mismo se recoge en el apartado I.3.3 la descripción de la geología efectuada en el Informe **Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982.**, que sintetiza todo lo anterior, y se precisa para el estudio realizado en el capítulo III.1 de Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules. Nuevamente, en el capítulo III.2.2 se recurre a describir la geología, esta vez para identificación de reflectores en las líneas sísmicas con que los que poder efectuar un trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión.

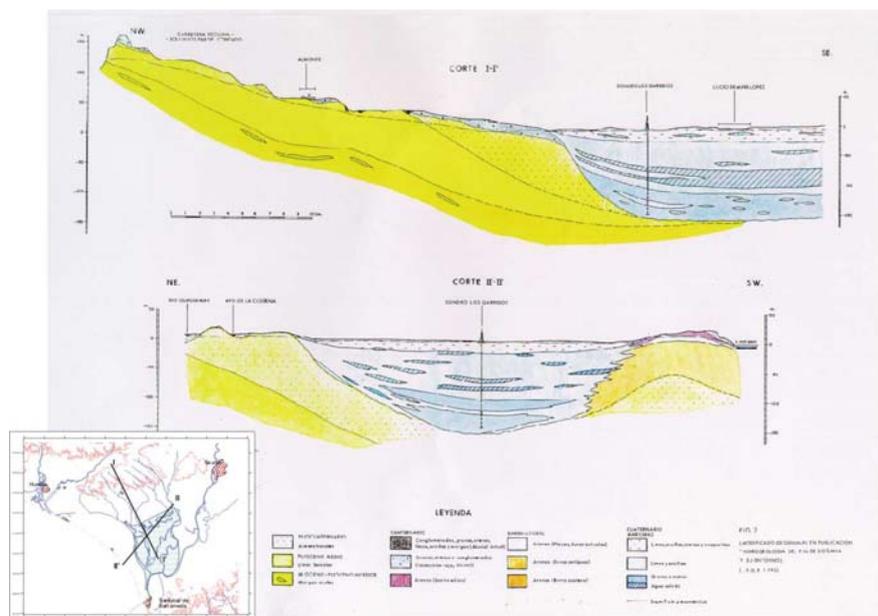
La evolución de conocimientos y nuevas hipótesis, uno de las razones de la revisión de la interpretación de los SEV objeto del presente capítulo, reclama una vez más la presentación de síntesis geológicas, esta vez orientada fundamentalmente a la estratigrafía.

#### III.3.6.1 Síntesis geológica de partida

*[Síntesis del trabajo efectuado por C. Rey]*

Para efectuar un análisis de los cortes geoelectricos desde el punto de vista estratigráfico, se presenta previamente una síntesis de los datos aportados por las descripciones efectuadas en las memorias de las correspondientes hojas MAGNA a escala 1/50.000 (nº 1000, 1001, 1002, 1017, 1018, 1019, 1033, 1034, 1047 y 1048) y 1/200.000 (nº 80-81) y en el informe *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno, IGME, 1992* (descrito en mayor detalle en el apartado I-3.3 del presente informe), para establecer posteriormente una relación con las actuales ideas sobre este entorno sedimentario. Esta síntesis trata de reconciliar las aparentes divergencias existentes entre las diferentes fuentes.

El área estudiada, situada geográficamente en la depresión del Guadalquivir, está formada por depósitos marinos del Neógeno y por depósitos de origen fluvio-marino y eólico cuaternarios. La estratigrafía la divide en una serie de formaciones (Figura 125):



**Fig. 125. Cortes geológicos establecidos en el Informe Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno, IGME 1992.[ficheros 33Plano-4.tif, 33Plano-5.tif]**

**Margas azules (Mioceno superior-Plioceno inferior).** Aflora en toda la zona septentrional y se considera la base impermeable del acuífero. Está constituida por margas de facies típicamente marina con estratificación masiva. Hacia techo aparecen intercalaciones de limos y arenas. La potencia total estimada es de 1200 m. El techo presenta una topografía suave, con cotas descendentes hacia el sur. En la zona de las marismas (donde las margas ya no afloran) la pendiente del techo se acentúa de forma acusada y en las proximidades del Guadalquivir alcanza profundidades de hasta 250 m, y potencias superiores a los 1000 m. Son de color azul claro, gris azulado, en un corte fresco, y en superficie se alteran tomando un color amarillento. Con frecuencia presenta yeso e impregnaciones de óxidos de hierro. Su edad está determinada por la abundante microfauna que contiene, aunque se han datado como andalucenses en el MAGNA 1/50.000 y como Tortoniense Medio en el MAGNA 1/200.000.

**Limos basales (Plioceno medio).** Sobre las margas azules descansan las facies regresivas sahelenses. La regresión producida a finales del Plioceno inferior generó un cambio en la sedimentación, lo que provocó que las margas tuvieran cada vez más contenido en arenas e incluso limos arenosos calizos. El resultado es una formación poco homogénea con zonas donde predominan arenas con limos y otras donde el contenido arcilloso aumenta considerablemente. Según los sondeos, en el Parque Nacional de Doñana, esta unidad está formada por una alternancia de capas arenosas y areniscosas con lumaquelas. La potencia media de estas capas detríticas es del orden de 30 m, pero aumenta en el centro de la depresión, alcanzando bajo las Marismas del Guadalquivir los 60 m.

**Arenas basales (Pliocuaternario).** Suprayacente y discordante con los limos arenoso-calcáreos, se encuentra una formación, de litología muy homogénea y cuya potencia es muy variable según los

afloramientos. Son las arenas basales de los sedimentos terrígenos posteriores a la regresión andaluciense. Son arenas blanco-amarillentas o amarillo-rojizas de granos de cuarzo y en menor proporción de fragmentos de rocas metamórficas. Se superpone discordante sobre los materiales del Plioceno medio. Entre ambas formaciones se observa una costra ferruginosa-conglomerática. Estas arenas constituyen el nivel acuífero más importante. El Plioceno marino está representado en el litoral por unas arenas que se apoyan sobre el Saheliense. En cuanto al Plioceno continental forma un inmenso glacis, que desciende suavemente desde la meseta hercínica hasta el océano Atlántico. La facies es típicamente continental, sin fauna, con alternancias de arenas más o menos gruesas, gravas, conglomerados y bancos arcillosos a menudo verdes. El conjunto tiene un color rojo-naranja. El espesor del Plioceno continental suele ser pequeño (10-30 m), aunque en la región de El Rocío puede alcanzar valores de 100 y 200 m. Esta formación no existe bajo las Marismas, puesto que en el momento de su depósito permanecía un régimen marino en ellas.

**Marismas.** Son sedimentos **cuaternarios** y su génesis no está suficientemente conocida. Durante el Cuaternario antiguo existía una zona de unión entre el mar y la zona actual de la Marisma que empezó a cerrarse parcialmente por la formación de un cordón litoral, dando lugar a una amplia albufera que se colmató con sedimentos de origen continental. Litológicamente se inicia con unos sedimentos groseros de origen fluvio-marino. Los datos de sondeos ponen de manifiesto que en la Marisma existen dos capas bien individualizadas de cantos rodados y gravas. La primera situada entre 50-100 m de profundidad y con un espesor de 5 a 30 m. La segunda es la base del Cuaternario fluvio-marino situada a una profundidad entre 100 y 150 m, y con un espesor de 10 a 30 m. La capa de aluviones más profunda, se apoya directamente sobre las facies sahelenses. Entre las dos capas y por encima de la más superficial aparecen niveles arcillosos de coloraciones grises y azuladas con mucha microfauna, típica de mares poco profundos y aguas salinas. Cartográficamente separan tres términos aunque puede ser uno solo con cambios de facies. La topografía es prácticamente horizontal. De materiales más antiguos a más modernos se distinguen:

QM1. Sedimentos típicos de llanura de inundación, encontrados en sondeos entre 7-25 m. Son limos arcillosos, limolitas y arcillas. Hacia techo hay arena fina. Corresponde a antiguos cauces y márgenes correspondientes a la red fluvial del Guadalquivir.

QM2. Tramo similar al infrayacente compuesto de limolitas arcillosas que se encuentran discordantes con las anteriores.

QM3. Son los sedimentos actuales. Zonas de estancamiento de las aguas de inundación o drenaje de lluvias. Son aguas altamente cargadas en sales.

Los **sedimentos de edad cuaternaria** son los más ampliamente representados en la zona. Una clasificación de las diferentes formaciones cuaternarias podría ser la siguiente:

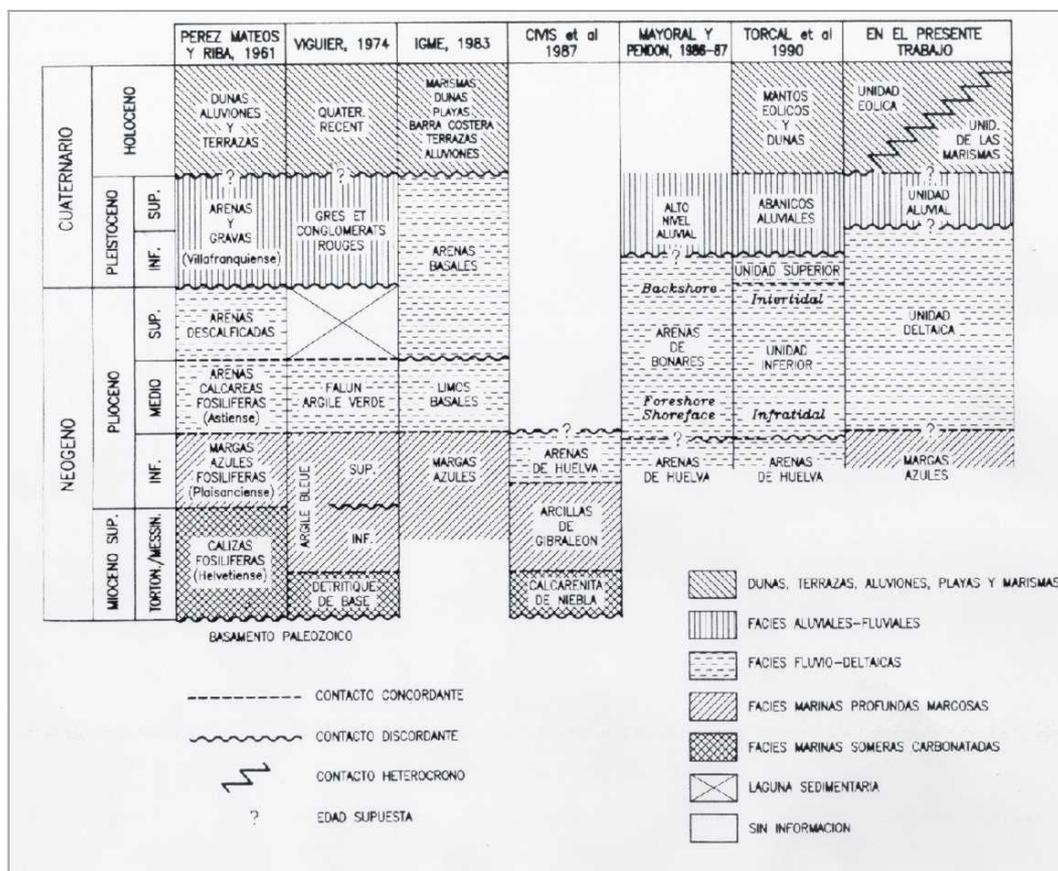
- Formación roja (Glacis aluvial). Compuesta por gravas, arenas y localmente conglomerados. Se sitúan mediante una discordancia erosiva sobre la formación anterior. En algunos puntos son

arenas muy duras cementadas por óxidos de hierro con escasas gravas. En otros puntos son gravas de matriz arenosa y arenas poco cementadas. En otros puntos son gravas sueltas. La potencia es variable de 15 a 20 m. En algunos puntos, a techo de la formación roja aparecen unas margas verdes.

- Manto eólico-Dunas antiguas. Arenas blancas de escaso espesor (20 cm a 3 m). Se encuentra muy degradada y en escasos puntos presenta una morfología dunar.
- Manto eólico-Barrera de Costa. Bordeando la marisma y a lo largo de toda la línea de costa se extiende un sistema eólico en el que pueden distinguirse al menos 2-4 cordones dunares. Lo que se denomina manto eólico es, en realidad, un último avance prácticamente actual de una capa de arenas sin apenas morfología dunar. El origen de estas arenas hay que buscarlo en los materiales infrayacentes, en general arenas basales.
- Terrazas. En los márgenes de los ríos. Conglomerados de cuarcitas, esquistos y pizarras. Matriz limo-arcillosa de color rojo.
- En algunos puntos hay turberas. Concentración de arcillas oscuras con niveles arenosos.
- Las playas están formadas por arenas cuarzoareníticas con escasos feldespatos.
- Los cordones litorales. Desde Ayamonte a Conil, con una altura de 100 m sobre el nivel del mar. Tierra adentro se encuentra un cordón litoral fósil formado por una marga arenosa, de unos 30 m.

Con posterioridad a estas fuentes se ha establecido una nueva presentación (*Salvany y Custodio, 1995. Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. Rev. Soc. Geol. España, 8 (1-2), 21-31*), a partir de los datos litológicos procedentes de 20 sondeos hidrogeológicos realizados en el área de Doñana. En este trabajo se distinguen, por encima de las margas azules del Tortoniense-Plioceno inferior, cuatro unidades detríticas plio-cuaternarias diferentes: 1) Unidad Deltaica, 2) Unidad Aluvial, 3) Unidad Eólica, y 4) Unidad de Las Marismas. Además se distinguen dos dominios litológicos: un dominio occidental, donde están representadas las unidades Deltaica y Eólica y un dominio oriental, donde lo están las unidades Deltaica, Aluvial y de Las Marismas, así como los niveles más modernos de la Unidad Eólica. La distribución de facies y espesores permite interpretar el contacto entre ambos dominios como una falla profunda de dirección NNE-SSO. Esta falla fue principalmente activa durante el Pleistoceno superior, produciendo el hundimiento del dominio oriental simultáneamente con la sedimentación de la Unidad Aluvial. Posteriormente fue fosilizada por los sedimentos holocenos de las unidades Eólica y de las Marismas.

Existen numerosos estudios bioestratigráficos sobre estos depósitos, aunque las edades atribuidas por los diferentes autores no son siempre coincidentes. Un intento de correlación de los niveles estratigráficos definidos por diferentes autores en el sector central y noroccidental del Bajo Guadalquivir se presenta en la Figura 126.



**Fig. 126. Intento de correlación de los niveles estratigráficos definidos por diferentes autores en el sector central y noroccidental del Bajo Guadalquivir (según Salvany y Custodio, 1995).**

Otras fuentes consultadas<sup>1</sup> en el sector central del Bajo Guadalquivir son los sondeos profundos de prospección de hidrocarburos, que permiten reconocer en líneas generales la misma sucesión estratigráfica, pero con mucho mayor espesor. Este aumento de potencia afecta principalmente a las margas azules, cuyo espesor pasa de 60 m en el sector de Huelva hasta los 2000 m en el noreste de la zona aquí estudiada.

Salvany (2003, comunicación personal de aporte al presente Proyecto) ha realizado unos cortes geológicos de dirección N-S y E-O, que muestran la geometría de las unidades estratigráficas, basada en una detallada descripción de las columnas de los sondeos mecánicos. Estos cortes delimitan unos niveles definidos por cinco unidades estratigráficas fundamentales, que aparecen imbricadas y aumentando su buzamiento hacia el S-SO (en dirección al mar). Las cinco unidades descritas en los cortes son, de materiales más antiguos a más modernos:

- Bioclastos y arcillas arenosas: **facies de cuenca**
- Arcillas plásticas, arcillas arenosas: **facies de lagoon**

<sup>1</sup> Perconig, E. 1960-62. Sur la constitution géologique de l'Andalousie Occidentale, en particulier du Basin du Guadalquivir (Espagne méridionale). Bull. Soc. Géol. de France, Livre Mém. Prof. Paul Fallot, 1: 229-256; Perconig, E. y Martínez Díaz, C. (1977). Perspectivas petrolíferas de Andalucía Occidental. Boletín Geológico y Minero, 88-5: 417-433. y Viguiet, C. (1974). Le Néogène de l'Andalousie Nord-Occidentale (Espagne): histoire géologique du Bassin du bas-Guadalquivir. Boletín Geológico y Minero, 88-1: 39-44.

- Arenas finas-medias-gruesas, gravas y bioclastos: **facies delta-playa**
- Gravas, cantos y arenas gruesas-medias: **facies aluviales**
- Arenas finas-medias, muy homogéneo: **facies barrera**

Este autor correlaciona los sondeos mecánicos separando una serie de facies características que pertenecen a un determinado ambiente de sedimentación, sin adjudicación de edades. Asimismo considera que el conocimiento geológico de la parte occidental de la zona es bueno, mientras que la zona oriental del área (donde comienza la Marisma) es más complicada de interpretar. El autor sostiene que ninguno de los sondeos ha alcanzado las margas azules. Las facies descritas se sitúan por encima de los limos basales (de transición entre las margas y todos los tramos superiores). En los sondeos más profundos se pudo llegar a los limos basales (y podrían estar incluidos dentro de la *facies de cuenca*).

Las facies que define pueden situarse en cualquier momento geológico y a cualquier profundidad pues son ambientes sedimentarios, pero aún así hay hechos que destacan y son constantes como es que las *facies barrera* siempre están en la zona de costa; sin embargo en la zona central y de Marisma predominan las *facies delta-playa* y *lagoon*. Además en la zona de Marisma siempre aparecen dos niveles de grava (T1 y T2) que según el autor corresponden a dos terrazas antiguas del río Guadalquivir. Un esquema comparativo entre las hipótesis previas de interpretación del área de Doñana y la establecida por Salvany (2003), mediante cortes geológicos, se puede ver en la Figura 127.

Es lógico pensar que debe existir una relación entre estos ambientes sedimentarios definidos por Salvany y las hipótesis previas esquematizadas en la Figura 127. Aunque ya se ha citado que este autor no da edades ni límites netos entre unas facies y otras, simplemente con la observación de los cortes y su situación geográfica se pueden obtener unas conclusiones. La *facies de cuenca* sería la que aparece como “sustrato” de todos los cortes, correspondería a la base de la unidad deltaica de Salvany y Custodio, 1995 y a los limos basales del informe del IGME, 1992. Las *facies lagoon* y *delta-playa*, se correspondería con la unidad deltaica de Salvany y Custodio, 1995 y las arenas basales del informe del IGME, 1992. Las *facies aluviales* sería el aluvial del Guadalquivir y la *facies barrera* se puede correlacionar con la unidad eólica de Salvany y Custodio, 1995. Aunque esta correlación no es estricta, sirve para tratar de obtener la evolución geológica de la zona, lo que puede corroborarse haciendo uso de las descripciones propuestas por algunos autores de los distintos ambientes sedimentarios que se originan en la zona de unión mar-tierra.

La zona de encuentro entre el mar y la tierra está compuesta por una compleja variedad de medios, que incluyen bahías, estuarios, deltas, marismas, dunas y playas. Para una breve descripción van a seguirse fundamentalmente a *Dabrio, C. 1989. Playas e islas barrera-lagoon. Sedimentología, Vol. I. Coordinador: Alfredo Arche. Editado por el CSIC. Serie: Nuevas Tendencias, 541 pp., y Vilas, F. 1989. Estuarios y llanuras intermareales. Sedimentología, Vol. I. Coordinador: Alfredo Arche. Editado*

por el CSIC. Serie: Nuevas Tendencias, 541 pp. En la Figura 128 se indican los ambientes y subambientes sedimentarios en una costa con islas barrera. En el sistema de isla barrera-lagoon, que es el más complejo dentro de las costas, se distinguen tres grandes conjuntos geomorfológicos: la isla barrera, o cuerpo arenoso que se extiende bordeando la costa, el lagoon o cuerpo de agua confinado tras la barrera, y los caños o canales y deltas mareales asociados que cortan la isla barrera y comunican el lagoon con el mar abierto. Cada uno de ellos se puede dividir en subambientes con procesos sedimentarios característicos, que forman un sistema interrelacionado. Desde la isla barrera hacia el mar se extienden varios subambientes alargados más o menos paralelamente a la costa en los que, a grandes rasgos, disminuye la granulometría en dirección al mar.



Fig. 127. Correlación entre trabajos previos y los nuevos cortes de Salvany 2003 en el área de Doñana.

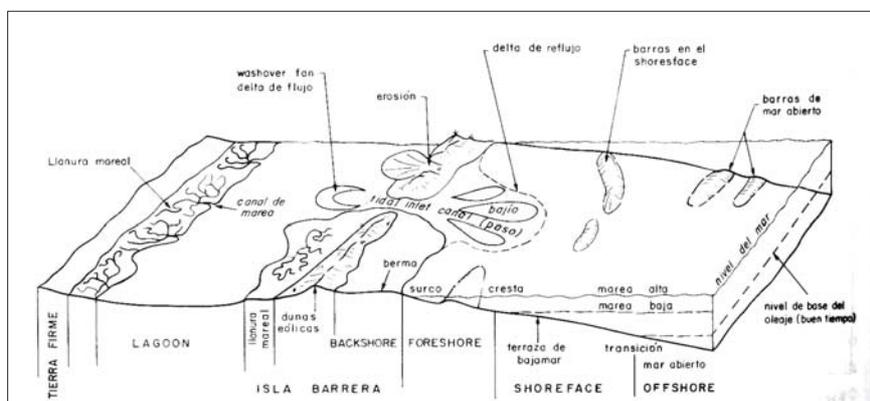
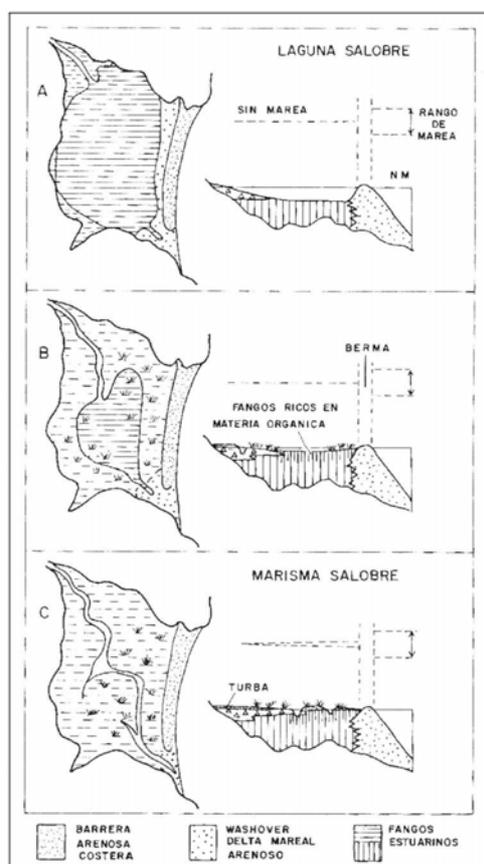


Fig. 128. Ambientes y subambientes sedimentarios en una costa con islas barrera, según Dabrio, 1989.

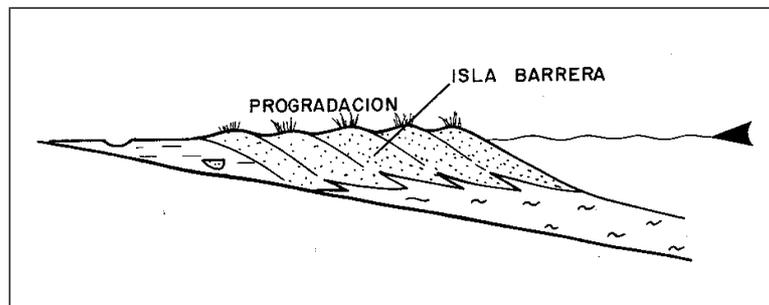
Las lagunas costeras salinas (Figura 129) son pequeñas cuencas que en su origen presentan similitudes con los estuarios. Los aportes fluviales son muy escasos, la isla barrera, barrera arenosa o berma es continua, y únicamente se abren bocanás efímeras durante períodos de temporal por acción de batida de las olas sobre la barrera. En los lagos costeros con poco aporte fluvial, las condiciones salinas se mantienen durante largos períodos y las facies fangosas y bioclásticas se acumulan en la cuenca de baja energía. Con el tiempo las variaciones de salinidad aumentan y se prolongan las condiciones de aguas dulces. Las plantas más salinas son progresivamente reemplazadas por especies más tolerantes a aguas dulces y los sedimentos son reemplazados por fangos ricos en materias orgánicas debidos a aguas dulces. En la Figura 129 se puede ver la evolución de lagunas salobres costeras hasta convertirse en una marisma salobre.



**Fig. 129. Esquema evolutivo de lagoons costeros salinos (aguas salobres), según Vilas, 1989.**

El desarrollo de las playas y sistemas de isla barrera-lagoon, la geometría de los cuerpos sedimentarios y las secuencias de depósito resultantes dependen primariamente de la relación entre la subsidencia, las variaciones relativas del nivel del mar y el tipo y cantidad de sedimento aportado a la costa. En la Figura 130, con un nivel del mar estable y aporte de sedimento abundante existe una progradación de las facies arenosas sobre los depósitos de plataforma marina.

Estos tres esquemas son aplicables a la posible evolución de las facies descritas por Salvany. En este caso las facies se podrían interpretar siguiendo los patrones de los modelos teóricos. Si tomamos como modelo la Figura 129, la *facies cuenca* sería el “sustrato” y la *facies barrera* sería la berma. En la zona de Marisma las arcillas y fangos van rellenando el lagoon y el progresivo aumento en el aporte fluvial hace que estos fangos salinos se sustituyan por fangos más ricos en materias orgánicas de aguas dulces. Esta podría ser una explicación a la interdentación entre las *facies lagoon* y *facies delta-playa* de los cortes de Salvany. Cuando nos situamos en la zona de Marisma la *facies lagoon* será la predominante (con más arcillas), mientras que en zonas hacia el límite del lagoon la facies principal serían las arenas finas y medias, gravas y bioclastos correspondiente a la *facies delta-playa*. La *facies aluvial*, serían niveles de gravas más o menos potentes que corresponden a antiguos cauces del río Guadalquivir y se encuentran en la zona de Marismas.



**Fig. 130. Modelo y morfología de los cuerpos sedimentarios resultantes de la progradación en la línea de costa, según Dabrio, 1989.**

Hay que tener en cuenta que lo que se nombra como Marismas en el informe del IGME 1992 y Salvany y Custodio, 1995 es la parte más superficial de toda la evolución que esquematiza la Figura 129, que se correspondería con el tramo superior del conjunto formado por la *facies delta-playa* y *facies lagoon*.

La morfología progradante que, según los cortes de Salvany, adoptan todos los cuerpos sedimentarios, se adaptaría al modelo descrito en la Figura 130, donde los cuerpos progradan o avanzan hacia la línea de costa como consecuencia del aumento en el aporte de sedimentos que se produce desde el nor-noreste con nivel del mar estable.

### III.3.6.2 Análisis de los cortes geoelectricos

En el apartado III-3.5 se ha verificado que los cortes geoelectricos efectuados en 1970 (Figuras 97 y 98) suponen una buena interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales efectuados: es conforme desde el punto de vista numérico con la que podría efectuarse con los medios actuales de tratamiento de datos, y además es conforme con la mayor información geológica actualmente disponible. La disposición geométrica que manifiestan de los materiales de mayor permeabilidad (resistividad superior a 30 ohm.m) y acuitardos, así como su evolución espacial, puede considerarse correcta en términos generales, sin olvidar la enorme dificultad de establecer correlaciones espaciales en este entorno, ni aun disponiendo de la descripción de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos. La indicación de la existencia de cambio de “marcador” o capa conductora, asimilada al fondo impermeable del acuífero, debe entenderse en términos geofísicos, es decir, detectan la última capa conductora visible en los SEV, ya que debido al buzamiento de las capas hacia el Sur llega un momento en que la profundidad de la situada más hacia el norte, deja de manifestarse en las curvas de campo AB/2-resistividad.

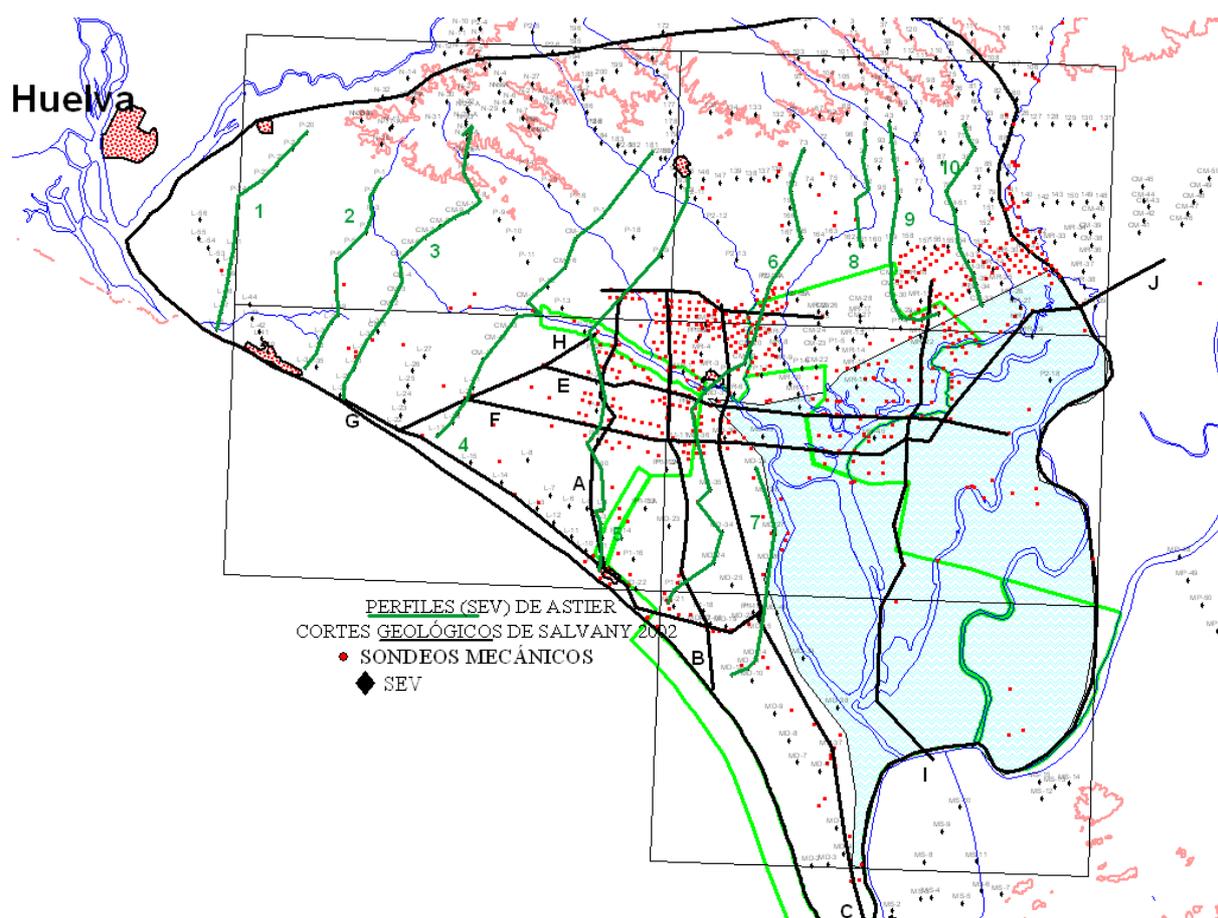


Fig. 131. Situación de cortes geoelectricos de Astier 1970 (en verde) y cortes geológicos de Salvany 2002 (en negro), junto con los SEV y sondeos mecánicos.

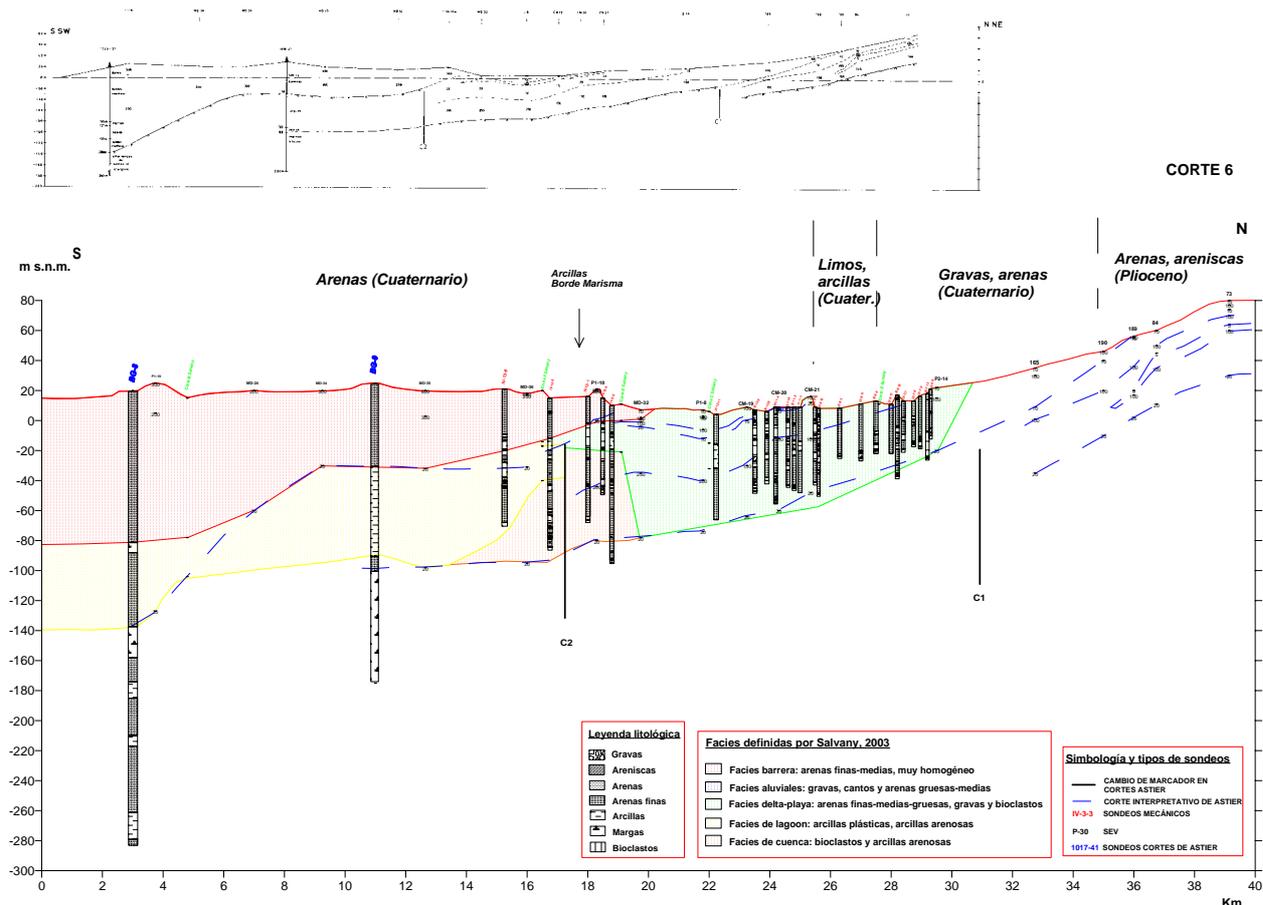
El análisis que nos proponemos realizar ahora va encaminado a averiguar si existe alguna relación entre los ambientes sedimentarios definidos en el apartado anterior y la distribución de la resistividad; es decir, si existe alguna equivalencia entre facies sedimentarias y facies geoelectricas, para lo que se ha dispuesto de los cortes realizados por J. M. Salvany en 2002, aportados como colaboración al presente Proyecto, conteniendo la disposición de las facies sedimentarias definidas según la posición indicada en la Figura 131. En esta misma figura está indicada la posición de los diez cortes geoelectricos efectuados en 1970. Se ha optado por añadir a estos cortes los nuevos sondeos mecánicos existentes no alejados más de 1 km de la traza original de los perfiles, así como la información sedimentaria. Sobre estos cortes geofísico-geológicos, que tratan de integrar toda la información disponible hasta la fecha, se ha realizado el análisis propuesto, comenzado por los cortes 5 y 6, que son los que contienen más información. El resto de cortes tienen más parte interpretativa pues en ellos existe menos información geofísica y geológica.

Los cortes geoelectricos de 1970 incorporados en las figuras siguientes se han extraído de los documentos 26PL-6.tif y 26PL-7.tif.

**CORTE 6.** (Figura 132) Este perfil con longitud total de 36 km y con dirección N-S, se sitúa en la parte central de la zona de estudio. Sobre su trazado se encuentra un gran número de sondeos mecánicos, sobre todo en la parte central. Algunos se sitúan exactamente en la traza del perfil (línea que une los SEV con los que se ha realizado) y otros están proyectados. La mayoría de los sondeos tienen una profundidad entre 40 y 60 m. En el extremo sur del perfil hay dos sondeos profundos: BG-8 (profundidad a cota -280 m) y BG-9 (profundidad a cota -180 m). La geología de superficie indica la existencia de arenas cuaternarias en el sur del perfil y limos, gravas y arenas cuaternarias en el norte. En el extremo norte, donde la topografía se eleva, aparecen materiales más antiguos (arenas y areniscas del Plioceno).

Comenzando con el modelo geofísico, según la interpretación geoelectrica de Astier-1970 (líneas a trazos discontinuos azules, que reproducen el corte original, situado en la misma Figura 132), existen una serie de capas buzando hacia el sur con distintas resistividades. Cuando se realizó esta interpretación sólo se disponía de dos sondeos mecánicos (BG-8 y BG-9) en los que parece estar apoyada parte de la interpretación. La capa de arcillas que se encuentra en el sondeo BG-9 entre -30 y -90 m, delinea una capa poco resistiva, que posteriormente se ve interrumpida por el cambio de marcador C2. La existencia del sondeo mecánico BG-8 situado más al sur, hace que el marcador, que delimita el techo de la capa poco resistiva, descienda hasta -140 m. El resto de la interpretación está hecha únicamente con datos de resistividades. La existencia de los dos cambios de marcadores geoelectricos C1 y C2 viene justificada por la dificultad de apreciar su continuidad en los SEV, debido a la aparición de nuevas capas de mayor resistividad al desplazarse hacia el Sur.

La información aportada por los nuevos sondeos mecánicos permite apreciar que es difícil trazar una continuidad de las capas entre los propios sondeos mecánicos; como ya fue comentado anteriormente, se aprecia una correlación en rasgos generales entre las capas geoelectricas y las litológicas, aunque capas con resistividades bajas interpretadas como continuas, no siempre coinciden con arcillas o margas en los sondeos mecánicos. Por ejemplo esto ocurre entre los SEV MD-32 y P2-14, donde no se aprecia continuidad entre las capas de los sondeos mecánicos, que se corresponda con la adoptada para el corte geoelectrico. En el extremo norte del perfil no existen sondeos mecánicos por lo que no se puede corroborar la interpretación. En el extremo sur del perfil, la potente capa de arcillas del BG-9 no continúa hacia el sur, como se aprecia en el sondeo BG-8, aunque el nivel conductor se correlaciona a -140 m. La mayoría de los sondeos mecánicos finalizan en una capa de margas o arcillas (material poco resistivo). La coincidencia entre la interpretación geoelectrica y los sondeos mecánicos recientes se produce por la existencia clara de un conductor de base en todo el perfil, debido a las margas o arcillas basales en la mayoría de los sondeos mecánicos.



En el corte de la Figura 132 se han dibujado los límites entre las facies indicadas por Salvany, de materiales más antiguos a más modernos:

- Bioclastos y arcillas arenosas: **facies de cuenca**
- Arcillas plásticas, arcillas arenosas: **facies de lagoon**
- Arenas finas-medias-gruesas, gravas y bioclastos: **facies delta-playa**
- Gravas, cantos y arenas gruesas-medias: **facies aluviales**
- Arenas finas-medias, muy homogéneo: **facies barrera**

Estas unidades estratigráficas fundamentales aparecen imbricadas y aumentando su buzamiento hacia el S-SO (en dirección al mar). Hacia el sur, y como ocurrirá en el resto de los cortes, la parte más superficial son unas arenas finas-medias: *facies barrera*. Hacia el norte estas facies pasan a unas arenas finas-medias, gravas y bioclastos: *facies delta-playa*. Intercalaciones de niveles de arcillas se dan en ambos ambientes sedimentarios, deducidos de los datos de los SEV. Determinados sondeos (en concreto IV-13-8, IV-12-5 y IV-12-1) informan de la presencia de bioclastos y arcillas arenosas: *facies de cuenca*. Esta *facies de cuenca* queda como facies aisladas entre la *facies barrera* y la *facies delta-playa*. Por lo tanto, la *facies de cuenca* puede continuar hacia el sur o puede cambiar

a arenas finas de *facies barrera* (se ha interpretado que cambian a *facies barrera*). Hacia el norte del perfil predominan las arenas finas de *facies delta-playa* con niveles de arcilla intercalados.

Aunque el gran detalle en los sondeos mecánicos utilizado en la delimitación de estas facies no puede ser seguido fielmente por métodos eléctricos, se observan las siguientes correspondencias:

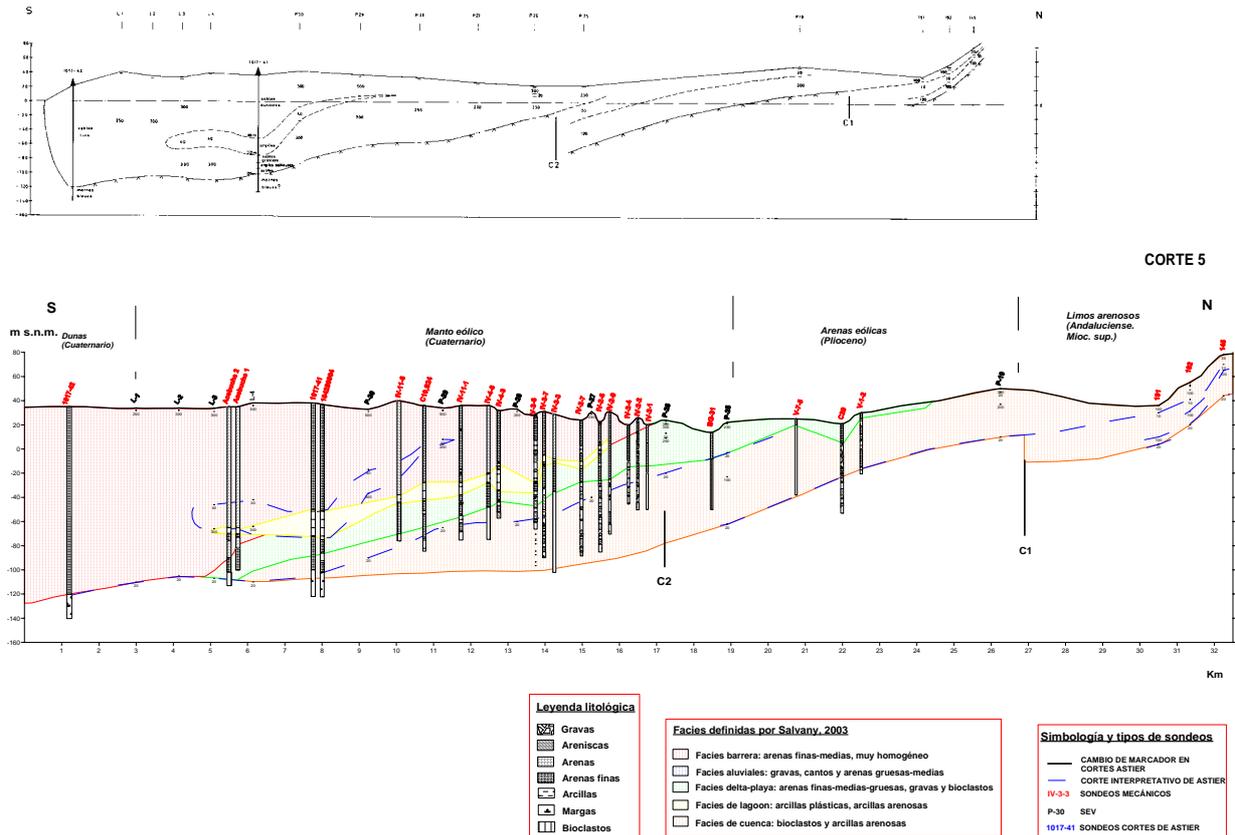
- el buzamiento que tienen todas las capas geoelectricas coincide con el de las facies, hacia el sur
- la facies de delta-playa se corresponde la secuencia geoelectrica desde el Norte hasta el cambio de marcador C2, de alternancia de capas resistivas y conductoras
- en este cambio se produce una falta de continuidad de las capas geoelectricas por aparecer una nueva capa resistiva aflorante, hacia el Sur, que se corresponde con la facies de barrera, y la capa conductora inferior, con la facies de lagoon.
- Los bioclastos y arcillas arenosas, facies de cuenca, no tienen diferenciación eléctrica con la facies de lagoon.

**CORTE 5.** (Figura 133) Este corte tiene una longitud de 31 km. La geología de superficie, según las hojas MAGNA, indica que la parte sur del perfil está cubierta por dunas y el manto eólico del Cuaternario, y la parte norte por arenas eólicas del Plioceno. El extremo norte del perfil más elevado topográficamente, está ocupado por limos arenosos del Andaluciense (Mioceno superior), como en el caso anterior.

Los sondeos mecánicos están concentrados en la parte sur y central del perfil. El perfil geoelectrico está apoyado en los sondeos mecánicos 1017-42 y 1017-41 (parte superior de la Figura 133) formados por arenas, arcillas y margas en la base. La capa de arcillas, de 40 ohm.m, trazada en esta parte del perfil no se ve confirmada por los nuevos sondeos Acebuche 1 y Acebuche 2 (que sólo marcan un nivel poco potente de arcillas entre -70 y -75 m), ni por los realizados más hacia el norte. La reinterpretación de los SEV L-3 y L-4 (ver apartado III-3.5.1) ha mostrado la posibilidad de no incluir esta capa conductora, que ha sido inducida por la información del sondeo mecánico 1017-41. Igualmente, la reinterpretación de los SEV P-30, P-29, P-28, P-27, P-26, P-25 y P-19 (ver apartado III-3.5.1) reafirma la interpretación del año 1970, aunque, con ligeras variaciones, se puede conseguir un mejor ajuste con los sondeos mecánicos actuales.

Como en el corte 6, se puede deducir que el cambio de marcador geoelectrico C2 coincide con la terminación de la facies lagoon y de barrera. De sur a norte como facies más superficial aparecen las arenas finas-medias correspondiente a la *facies barrera*, caracterizadas por alta resistividad. Debajo, y separada por un tramo de arcillas de la facies lagoon (cuya parcial correspondencia con la capa de baja resistividad ya ha sido comentada), aparece la *facies delta-playa* compuesta por arenas finas, gravas y bioclastos, también de resistividad alta. Los sondeos Acebuche-1 y Acebuche-2 son los últimos donde aparece la *facies delta-playa*. Esta facies, bajo estos sondeos, puede pasar lateralmente a la *facies barrera* (arenas finas) o a la *facies de cuenca* (bioclastos y arcillas). Siguiendo

la interpretación de los perfiles anteriores se ha considerado que evoluciona a *facies barrera*, evolución más lógica desde el punto de vista sedimentológico. Bajo las arenas finas de la *facies delta-playa*, se sitúan los bioclastos y arcillas de la *facies de cuenca*, bien constatada por sondeos mecánicos, que tiene algunos niveles de arcillas más potentes y estaría caracterizada por bajas resistividades. Hacia el norte y teniendo en cuenta las resistividades, afloraría esta facies de cuenca en el extremo norte del perfil.

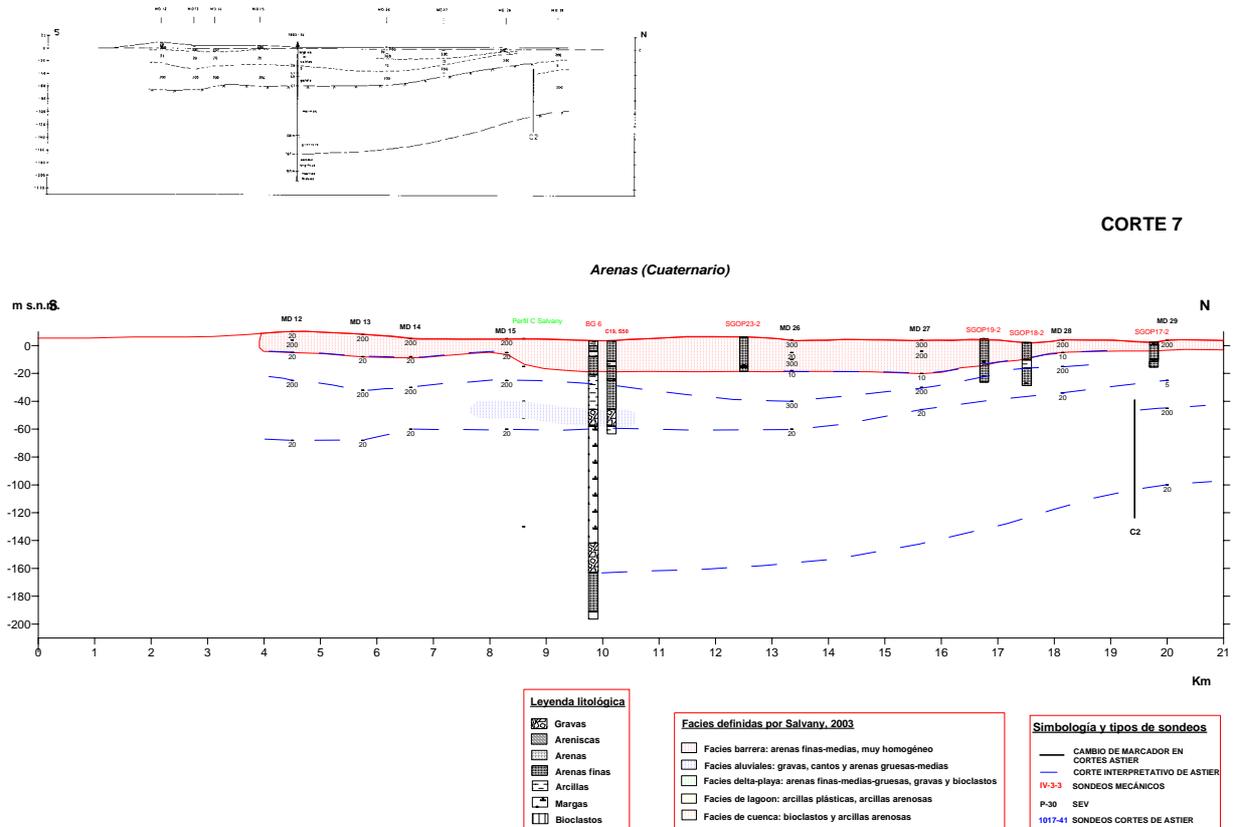


**Fig. 133. Corte 5. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).**

La diferencia con la disposición del corte 6 es que el tramo resistivo anterior al basamento conductor, asignado anteriormente a la facies delta, en este corte puede ser igualmente interpretado como facies de cuenca, en virtud de la información extraída de los sondeos mecánicos. Una continuación hacia el norte de la *facies de cuenca* sería posible siempre y cuando los niveles de arcillas, dentro de esa facies, se hicieran más potentes, como lo indican los SEV, pues se pasaría geológicamente a la unidad de limos arenosos del Andaluciense (Mioceno Superior). La reinterpretación de los SEV P-25 y P-19 muestra que bajo una capa superior resistiva, el resto del SEV está formado por materiales poco resistivos. Al igual que en el corte anterior al terminar los sondeos que detectaban la unidad bioclástica, hacia el sur, no se tienen pruebas de que ésta continúe o que pase a ser la unidad de arenas finas de la *facies barrera*. Sedimentológicamente sería más lógico pensar que la *facies cuenca* termine antes que la *facies delta-playa* y ésta, a su vez, antes que la *facies barrera*, lo que representaría un sistema progradante característico.

**CORTE 7.** (Figura 134) Este corte con una longitud de 15.5 km, dirección N-S, y se sitúa en el límite oeste de la Marisma. Según los mapas geológicos escala 1:50.000 en superficie afloran arenas del Cuaternario. En la interpretación geoelectrica, las capas con diferentes resistividades son casi horizontales, sin presentar el buzamiento pronunciado hacia el sur que aparecen en los cortes 5 y 6. Están apoyadas en el sondeo mecánico 1033-34 (BG 6) (parte superior de la Figura 134). Los sondeos actuales, SGOP23-2, SGOP19-2, SGOP18-2 y SGOP17-2, son de muy poca profundidad, están formados fundamentalmente por arenas con alguna capa de arcilla, y no aportan posibilidad de apoyo a la interpretación eléctrica. El sondeo BG-6 y el corte con el perfil C de Salvany indican que debajo de las arenas existe una sucesión muy potente de arcillas con un nivel de gravas. Estas gravas son interpretadas por Salvany y Custodio (1995) como niveles de terrazas antiguas del río Guadalquivir, y no tienen una diferenciación geoelectrica en el SEV MD15, que las engloba en el tramo resistivo del conjunto arenas-gravas (ver apartado III-3.5.3).

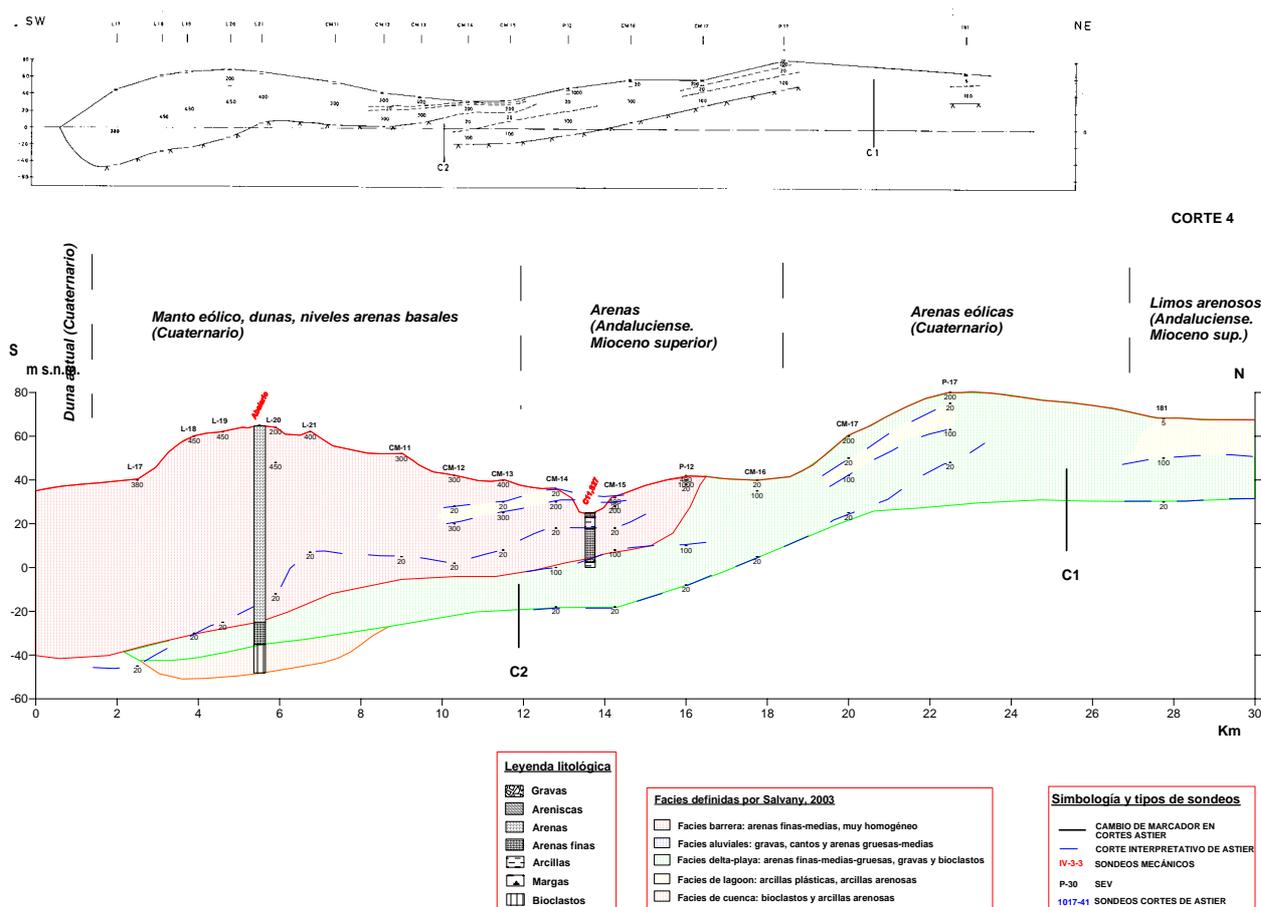
El cambio de marcador entre los SEV MD-28 y MD-29 es debido a que deja de ser evidente en las curvas de campo de los SEV la existencia del conductor profundo detectado en el MD-29. Teniendo en cuenta la información de los cortes anteriores (5 y 6), la capa superior resistiva serían arenas finas muy homogéneas correspondientes a la *facies barrera*, bajo la cual se situaría una capa de arcillas plásticas y arcillas arenosas de la *facies lagoon*.



**Fig. 134. Corte 7. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).**

**CORTE 4.** (Figura 135) Con una longitud 25 km, este corte geoelectrico mantiene las capas de distinta resistividad con buzamiento hacia el sur, al igual que los perfiles 5 y 6. Según la geología superficial existen dunas y manto eólico cuaternario en el sur. Hacia el norte afloran arenas y limos arenosos del Andaluciense (Mioceno superior) con algunos recubrimientos de arenas eólicas cuaternarias.

Existen dos cambios de marcadores geoelectricos. El situado más hacia el sur (C2) coincide en superficie (y según la geología de la hoja MAGNA) con un cambio de litología, pasando de un manto eólico, dunas, y niveles de arenas basales del Cuaternario a unas arenas del Andaluciense-Mioceno superior. El otro cambio de marcador, en el norte del perfil (C1), no coincide con un cambio en los materiales de superficie, estando justificado por el distinto corte geoelectrico entre el SEV P-17 y 181, que provoca la terminación de la capa superficial potente y poco resistiva que se ha interpretado como un nivel de arcillas. El cambio en la litología superficial se manifiesta más hacia el norte con un cambio desde arenas eólicas del Cuaternario a limos arenosos del Andaluciense-Mioceno superior.

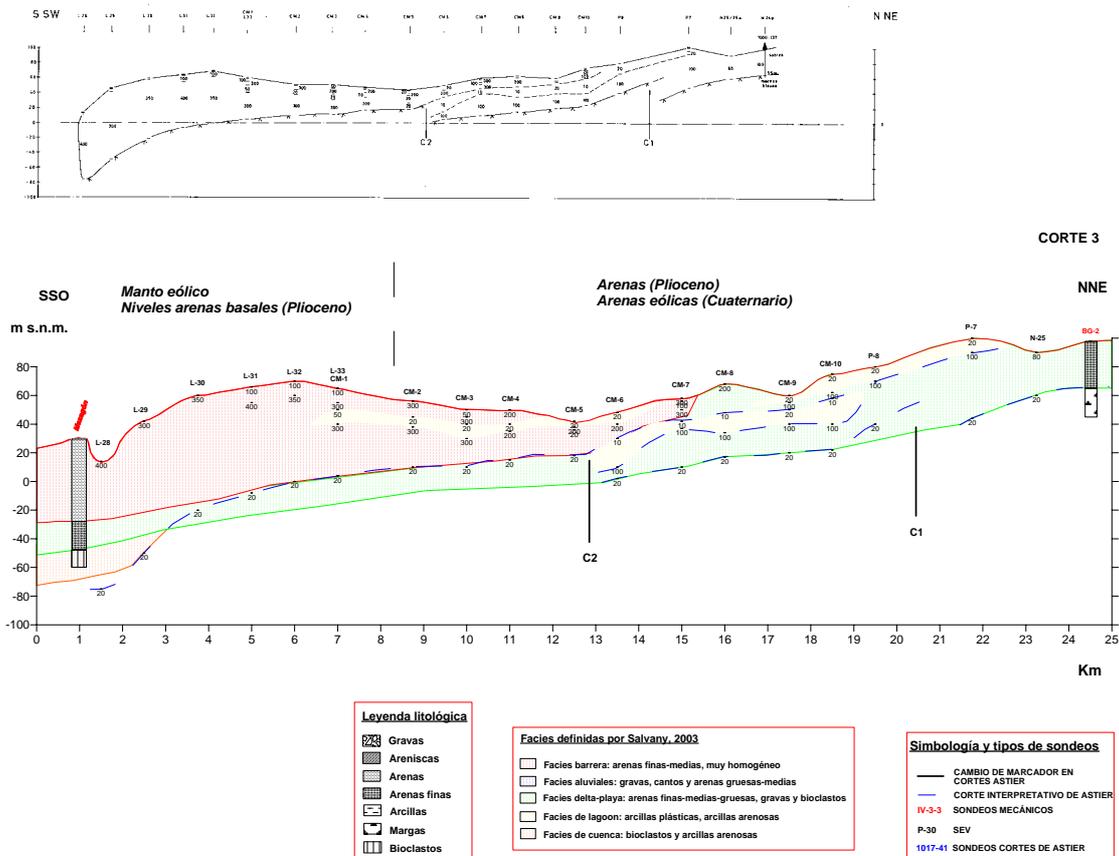


**Fig. 135 Corte 4.** Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).

Siguiendo el mismo esquema que en los cortes 5 y 6, hay un primer nivel de arenas finas interpretado como *facies barrera* que va aumentando de espesor hacia el sur. Estas arenas tienen intercaladas algunas capas de arcillas (deducidas de las resistividades bajas de los SEV). Según el sondeo del Abalario bajo estas arenas se sitúan las arenas finas de la *facies delta-playa* y bajo ellas los bioclastos de la *facies de cuenca*. Según el esquema de resistividades marcado por los SEV y por extrapolación de los cortes anteriores, a la altura del SEV CM-16 comienza a aflorar la *facies delta-playa*, siguiendo la secuencia progradante. Los niveles de arcillas aparecen muy bien marcados por las bajas resistividades de algunas capas dentro de los SEV. Parece evidente que hay un problema de cota en el sondeo mecánico C11,S27. Una vez corregido este problema de cota los niveles de arcillas del sondeo mecánico coincidirían con los obtenidos por los SEV cercanos.

**CORTE 3.** (Figura 136). Tiene con una longitud de 23.5 km, con las capas geoelectricas buzando hacia el sur. La geología superficial indica la existencia de un manto eólico, arenas basales del Plioceno y arenas eólicas cuaternarias. Al igual que en los cortes anteriores, aparecen dos cambios de marcadores, indicativos de diferencias en las curvas de campo de los SEV, y que en este caso no tiene reflejo en la geología de superficie.

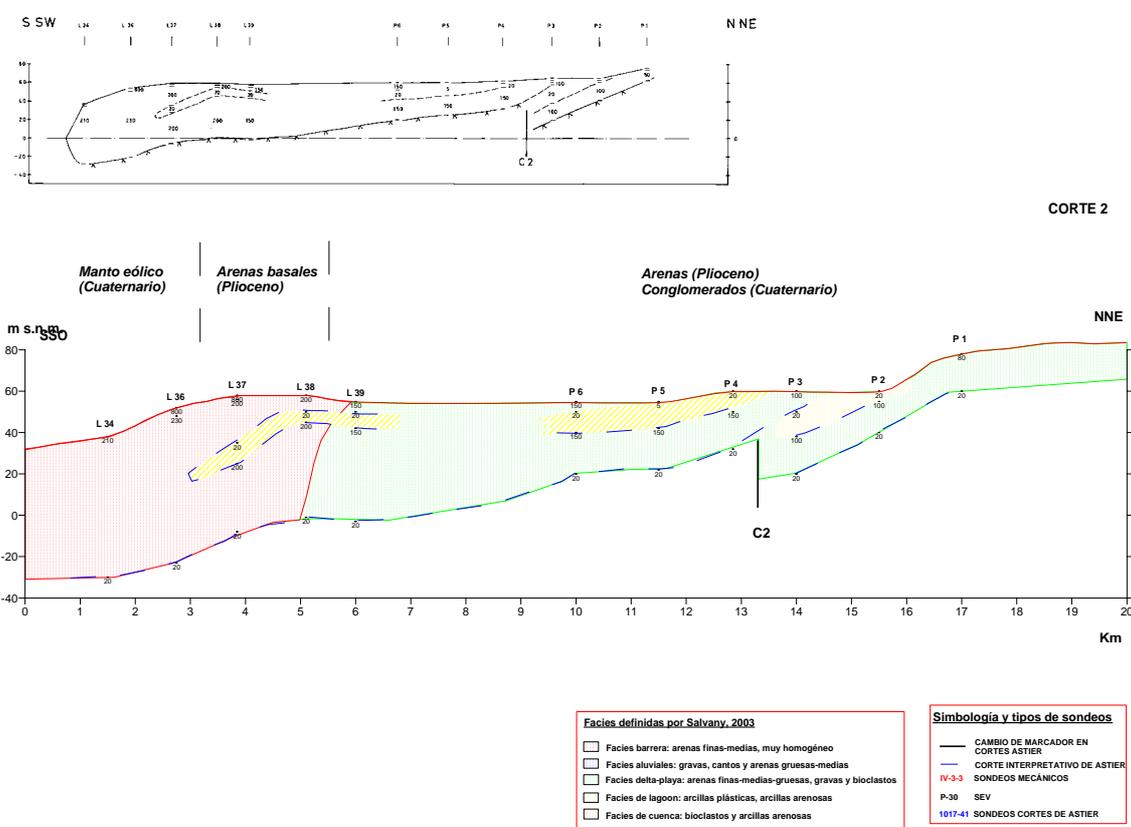
Se dispone de dos sondeos mecánicos: Mazagón y BG-2. El sondeo Mazagón está incluido en los cortes de Salvany (2003) e interpretado con la misma secuencia de facies descrita en los cortes anteriores. La capa superficial de resistividad alta aumenta su potencia hacia el sur del perfil, hasta alcanzar la cota -80 m. Según el cercano sondeo Mazagón, las litologías superficiales serían arenas, arenas finas y bioclastos que son perfectamente compatibles con una resistividad alta, como marca el SEV L-28, próximo al sondeo. En el norte del perfil, el sondeo BG-2 está formado por una capa de arenas superficiales y margas en profundidad, que coinciden perfectamente con el fondo conductor del SEV cercano N-25. Extrapolando la información de facies sedimentarias de los cortes anteriores, el área estaría ocupada por unas arenas finas de facies barrera superficiales en las que se intercalan algunos niveles de arcillas deducidos de los datos de SEV. A la altura del CM-7 y siguiendo la interpretación del perfil 4 aflorarían las *facies delta-playa*.



**Fig. 136 Corte 3. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).**

**CORTE 2.** (Figura 137) En este corte, paralelo al anterior y con una longitud de 15.5 km, las capas geoelectricas buzan también hacia el sur, presentando un cambio de marcador (C2). La capa de mayor resistividad alcanza en el sur una cota de -30 m de profundidad. La geología superficial indica la existencia de un manto eólico y conglomerados cuaternarios y arenas basales del Plioceno.

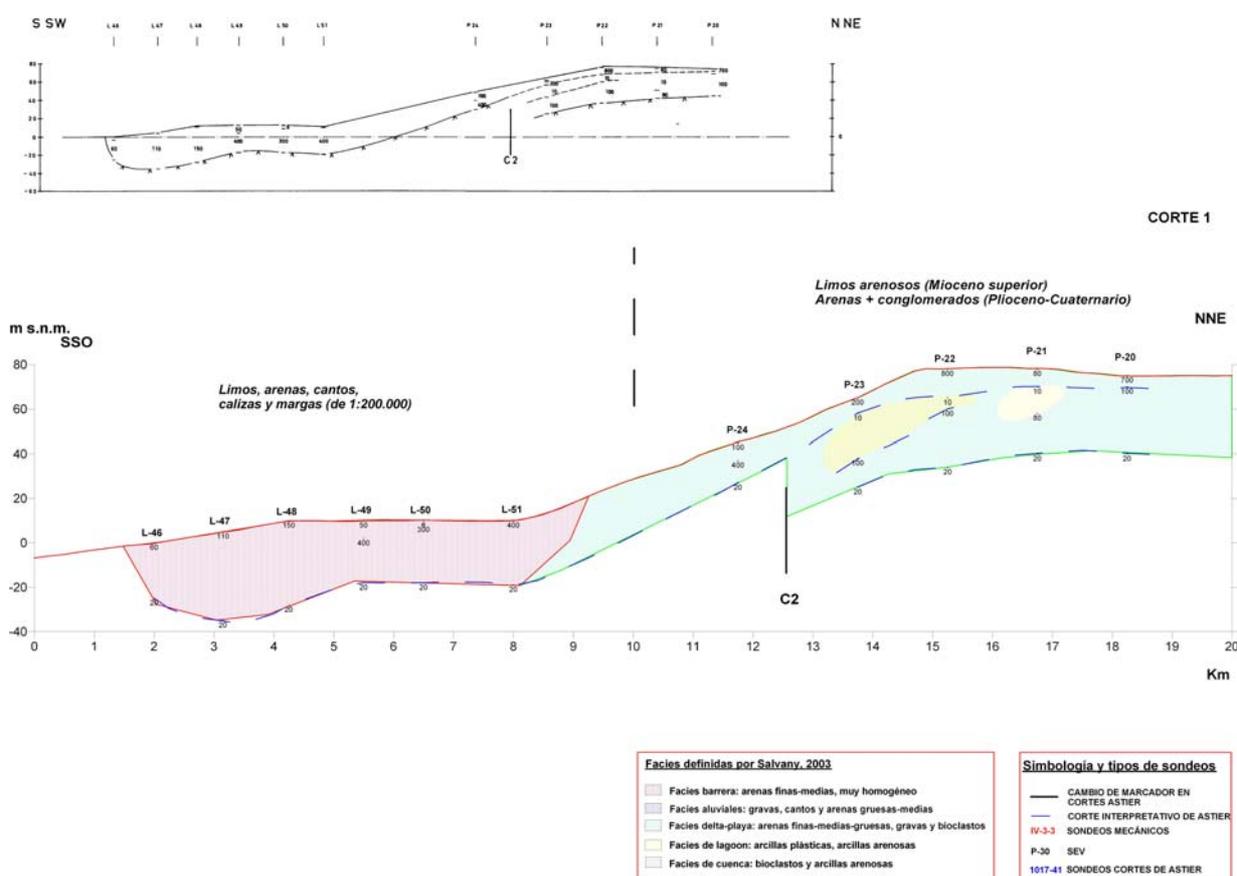
En este corte no se dispone de ningún sondeo mecánico. La interpretación de facie sedimentológicas ha sido extrapolada de los cortes anteriores. Las resistividades altas se han interpretado como arenas finas de *facies barrera* en el sur y *facies delta-playa*, con resistividad alta, pero algo menor, en el norte. Las resistividades bajas interestratificadas serían las arcillas plásticas y arcillas arenosas. Se mantiene la estructura progradante hacia el sur como en los cortes anteriores.



**Fig. 137 Corte 2. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (lineas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).**

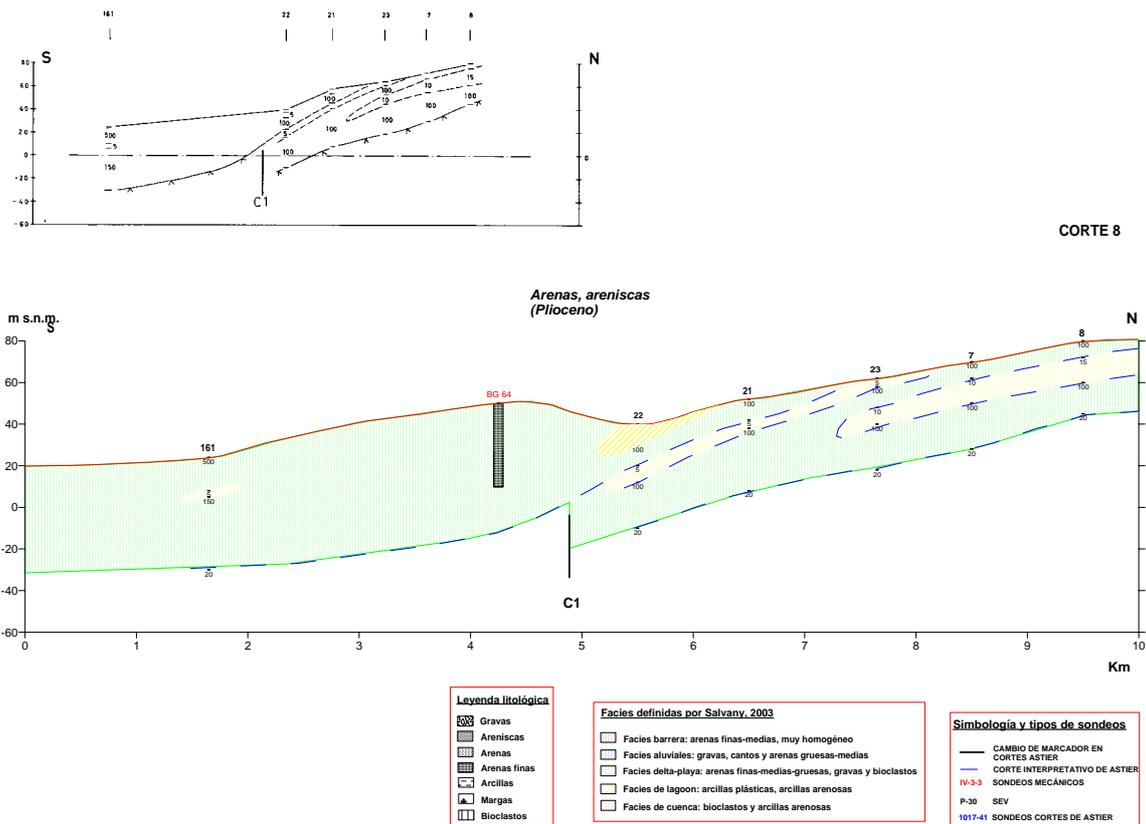
**CORTE 1.** (Figura 138). Es el corte más occidental de todos los estudiados, con una longitud de 16 km. Hacia el norte del perfil la topografía asciende considerablemente alcanzando los 80 m sobre el nivel del mar. La geología superficial está representada por limos arenosos del Mioceno superior y arenas y conglomerados (Plioceno-Cuaternario).

No hay sondeos mecánicos en todo el perfil. Por extrapolación de los perfiles anteriores las resistividades altas estarían producidas por arenas finas-medias muy homogéneas de *facies barrera*, y en el norte del perfil por la *facies delta-playa*. Los niveles de arcillas, deducidos a partir de resistividades bajas en los sondeos eléctricos verticales, también han sido representados. La estructura, al igual que en los perfiles anteriores, es progradante.



**Fig. 138 Corte 1.** Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).

**CORTE 8.** (Figura 139) Este corte, de 8 km de longitud, incluye el sondeo BG-64, cuya columna está formada por arenas y areniscas. En los sondeos eléctricos verticales se detectan capas de baja resistividad, que al igual que en los cortes anteriores se han interpretado como capas de arcillas más o menos continuas y con la misma estructura progradante. En cuanto a las altas resistividades en el Sur del perfil corresponderían a las arenas y areniscas que aparecen en el sondeo, que, según el rango de resistividades procedentes de los cortes anteriores, corresponde a las arenas finas-medias-gruesas, gravas y bioclastos de las *facies delta-playa*. En superficie afloran arenas y areniscas del Plioceno.

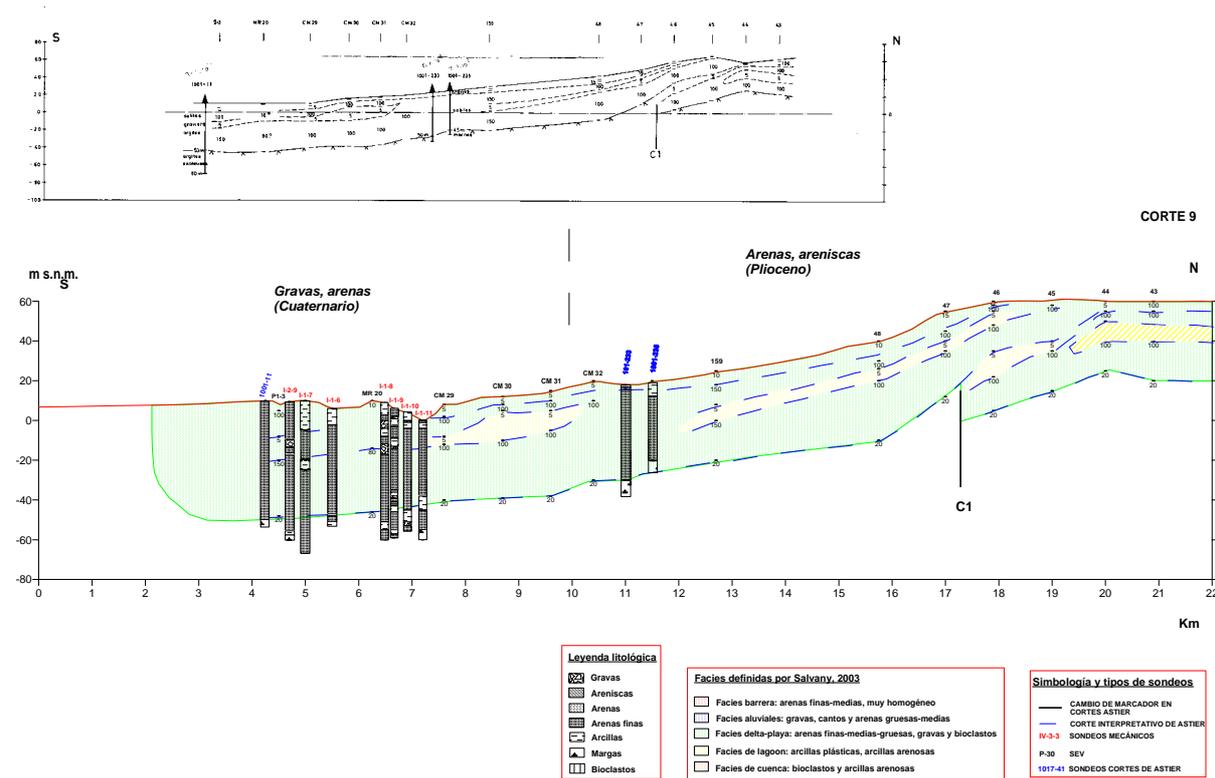


**Fig. 139. Corte 8. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecanicos más próximos y se ha proyectado la distribución de facies geoestratigraficas (en trama de color).**

**CORTE 9.** (Figura 140) Corte situado al este del anterior, con 16 km de longitud. Según la geología superficial la parte sur del perfil está formada por gravas y arenas cuaternarias, y en el norte (parte más alta topográficamente) afloran arenas y areniscas del Plioceno.

Se dispone de diez sondeos mecánicos. Tres de ellos (1001-11, 1001-233 y 1001-235) ya fueron tenidos en cuenta en la interpretación de los perfiles geoelectricos, y muestran una alternancia de arenas y arcillas, finalizando en las margas, que se han tomado como el fondo impermeable del acuífero, de baja resistividad. Los sondeos actuales muestran una alternancia de arenas, arcillas y algunas gravas. El I-1-7 está incluido en el corte I de Salvany, lo que ha permitido interpretar la litología en función de facies sedimentarias.

De los valores de resistividades bajas en los SEV se deducen niveles de arcillas progradantes hacia el sur. Al igual que en el corte anterior, los valores altos de resistividad se atribuyen a las arenas finas-medias-gruesas, gravas y bioclastos de la *facies delta-playa*.

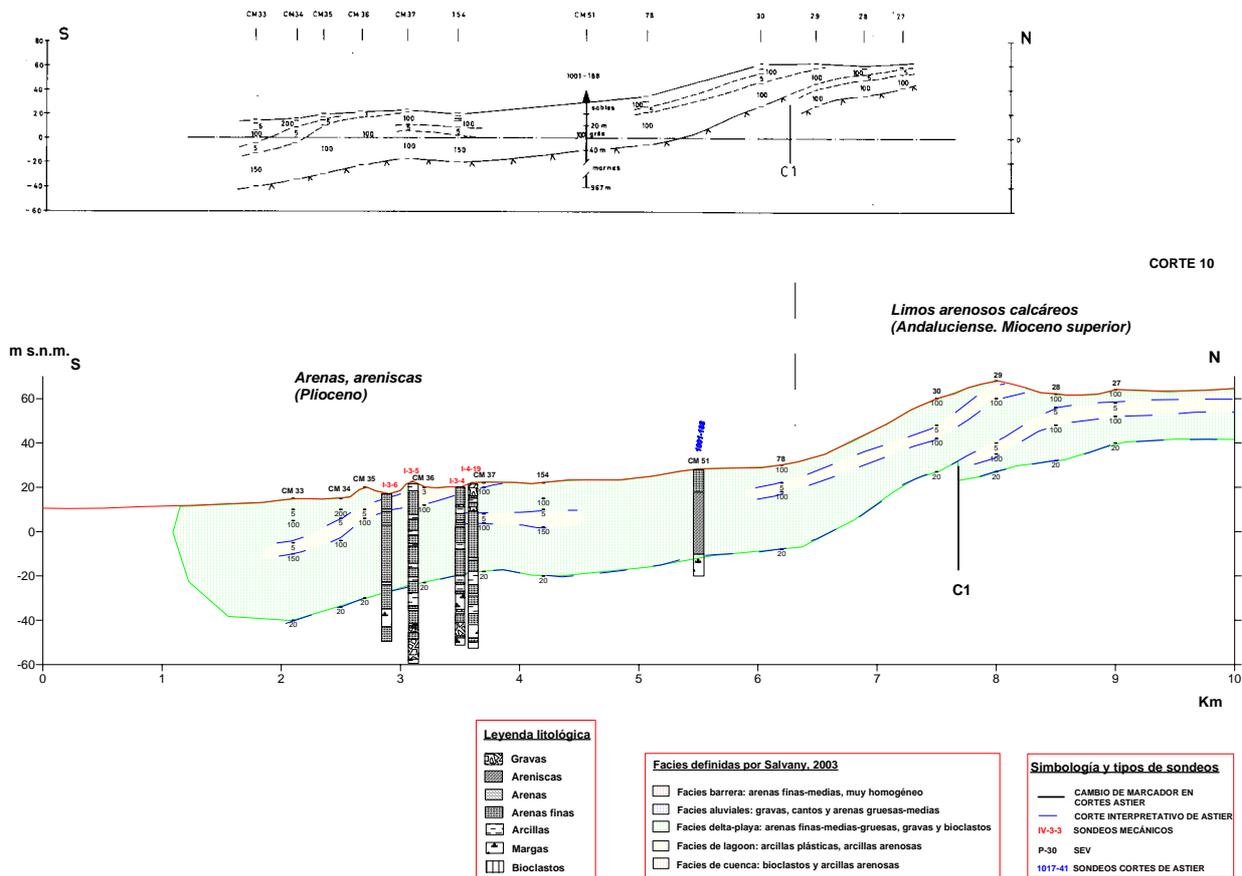


**Fig. 140. Corte 9. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (líneas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado-interpretado la distribución de facies geoestratigráficas (en trama de color).**

**CORTE 10.** (Figura 141) Es el corte más oriental de todos los estudiados, con 7 km de longitud. Según la geología superficial en el área afloran arenas y areniscas del Plioceno en la parte sur del perfil y limos arenosos calcáreos del Andaluciense (Mioceno superior) en el norte, coincidiendo con la máxima altura topográfica.

Se dispone de cinco sondeos mecánicos, habiéndose tenido en cuenta el sondeo 1001-188 en la interpretación geoelectrica, posicionando la base impermeable conductora según las margas situadas tras una secuencia de arenas y areniscas. El resto de los sondeos muestra una alternancia de arenas, arcillas, margas y gravas, de difícil correlación, lo que también imposibilita establecer una correspondencia entre litología y resistividades.

Los niveles de resistividad baja de los sondeos eléctricos verticales se han interpretado como niveles o lentejones de arcillas buzando hacia el sur. Las resistividades altas podrían corresponder a arenas y areniscas de la *facies delta-playa*.



**Fig. 141. Corte 10. Parte superior: perfil geoelectrico de 1970. Parte inferior: sobre las capas geoelectricas (lineas azules) de 1970 se han añadido los sondeos mecánicos más próximos y se ha proyectado e interpretado la distribución de facies geoestratigraficas (en trama de color).**

### III.3.7 Conclusiones

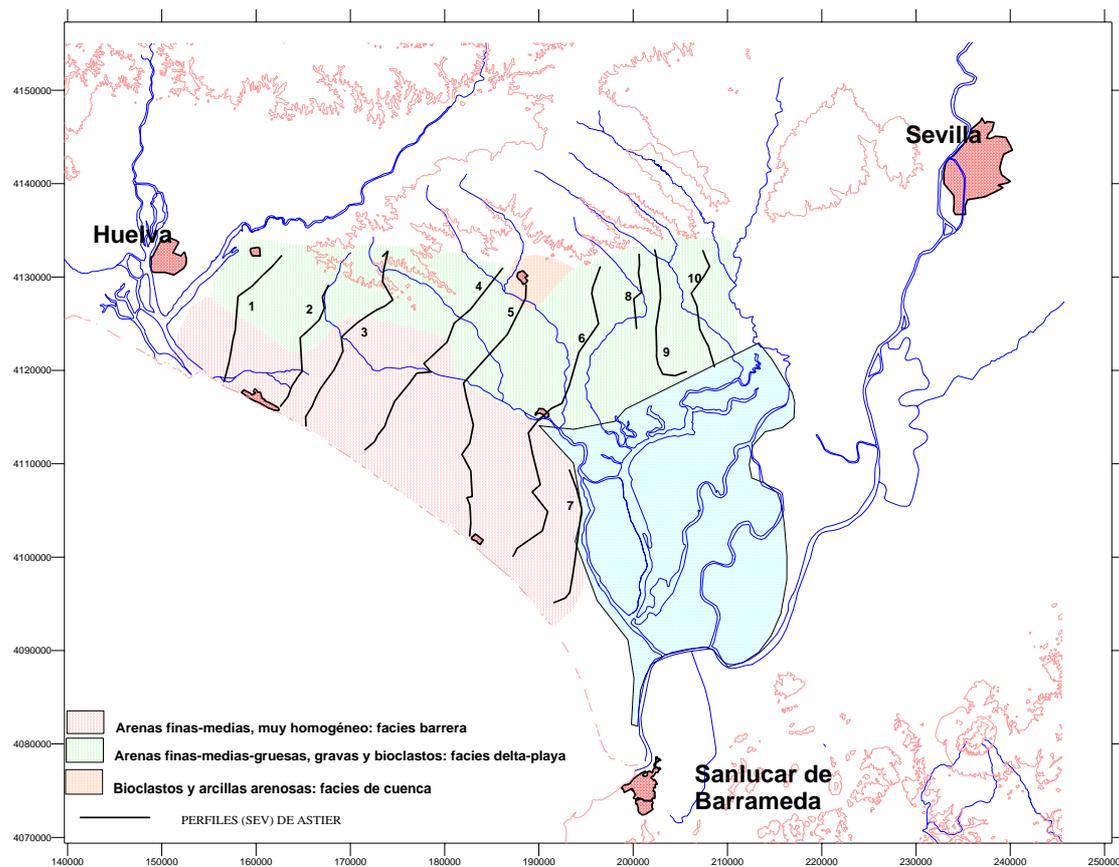
Se han analizado un total de 10 cortes geológicos, con dirección predominante N-S. Siete de los perfiles se sitúan al oeste de la Marisma y llegan hasta las inmediaciones de Huelva, y los tres restantes (de menor longitud) se sitúan al norte de la Marisma. Todos los cortes siguen la traza de los cortes geoelectricos interpretados en 1970. Se han utilizado datos geofísicos (SEV), datos geológicos de sondeos mecánicos, cortes de facies estratigráficas de Salvany (2003), y datos de geología superficial procedentes de los mapas geológicos a escala 1:50.000 y del mapa geológico sintético a escala 1:200.000. No existe una uniformidad en la distribución de los datos. Los sondeos mecánicos, como se puede observar en el mapa de distribución de sondeos mecánicos y SEV de la Figura 131, se concentran en la parte central de la zona de trabajo (en torno al pueblo de Almonte). Hacia el oeste se dispone de muchos menos sondeos mecánicos, siendo necesario recurrir a la extrapolación de los datos. Los cortes 5 y 6 son en los que se ha dispuesto de más información tanto geofísica como geológica.

Los cortes geoelectricos analizados proporcionan una información bastante completa de las características geométricas y litológicas del subsuelo. En estos cortes se marca siempre un fondo conductor, interpretado en su día (1970) como el sustrato impermeable, formado por una secuencia de capas de margas diferenciadas por los marcadores C1 y C2. Estos cambios en algunos casos tienen claro reflejo en la litología de la superficie.

Posteriormente a la preparación de estos perfiles geoelectricos, ha habido nuevos estudios geológicos y geofísicos en la zona. Los últimos cortes geológicos (Salvany, 2003) reflejan estructuras buzantes y progradantes hacia el sur, y se establece la estratigrafía de la zona en facies sedimentarias que representan ambientes de sedimentación. En los cortes que aquí se han representado, sobre la interpretación geoelectrica, se ha superpuesto la división en facies, extrapolada de los cortes originales. Se comenzó el análisis con la interpretación de los cortes 5, 6 y 7, que al situarse cerca de los cortes geológicos A, B y C de Salvany han servido de base para tener un esquema de las formaciones principales. Una vez hechos los cortes 5, 6 y 7, la información se ha extrapolado (con todas las limitaciones que ello conlleva) hacia el oeste (cortes 1, 2, 3 y 4) y hacia el norte de la Marisma (cortes 8, 9 y 10).

Sería demasiado aventurado establecer una relación entre la resistividad y las distintas facies; aún así se pueden establecer algunas relaciones, que ya han sido explicadas en cada uno de los cortes.

Los cortes muestran una secuencia sedimentaria de evolución progradante de facies hacia el sur. La *facies de cuenca* aparece en la parte norte del área y evoluciona (vertical y horizontalmente) a *facies lagoon* y *delta-playa* para acabar con la *facies barrera*, situada siempre en el sur, aflorante y que supone el último estadio evolutivo de la zona. Intercalados aparecen niveles de gravas, en algunos casos potentes, que corresponden a antiguas terrazas del río Guadalquivir. La Figura 142 muestra la disposición de estas facies sobre el mapa de toda el área estudiada.



**Fig. 142. Disposición de facies en superficie, deducida de la interpretación efectuada en los cortes geoelectrónicos.**

Relacionando las facies establecidas en la zona con las resistividades de los sondeos eléctricos verticales (SEV), se llega a la conclusión de que se puede obtener una cierta relación facies sedimentarias/resistividad, aún teniendo en cuenta que existe un solapamiento importante entre ellas. Sin embargo, sin otra información de apoyo, las resistividades no discriminan entre un tipo y otro de facies.

**FACIES BARRERA:** resistividad entre **100-400 ohm.m**. Aunque se pueden dar resistividades en torno a 100 ohm.m, predominan las resistividades altas. En esta facies se obtienen las mayores resistividades de todos los perfiles.

**FACIES ALUVIALES:** son depósitos muy característicos en la zona de la Marisma y que coinciden con resistividades entre **200-300 ohm.m**, aunque su presencia no puede ser individualizada sin datos de sondeos mecánicos.

**FACIES DELTA-PLAYA:** resistividad entre **100-200 ohm.m**. En principio podrían confundirse con las facies barrera, pero la posición estratigráfica y el rango de resistividades ligeramente menor ha

permitido separar estas facies; en los cortes 1, 2 y 3 la separación es puramente interpretativa pues no existen sondeos mecánicos que lo confirmen.

*FACIES DE LAGOON.* Su presencia parece caracterizarse por resistividades entre **0-50 ohm.m**. En la zona de Marisma parece claro que se corresponden con estas facies, pero en el resto de la zona corresponderían a niveles muy conductores de margas o arcillas. La nomenclatura de facies lagoon para todos los cortes parece un poco “aventurada” y lo correcto sería llamar facies lagoon sólo a aquellas que se sitúen bajo la Marisma, dejando los niveles que aparecen en otros cortes simplemente como niveles de arcillas.

*FACIES DE CUENCA:* con resistividad en torno a **100 ohm.m**, se deduce por estratigrafía y relación de imbricación entre facies.



### III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce-agua salada

#### III.4.1 Primera línea de separación trazada en 1968 basándose en la Resistencia Transversal T

Uno de los resultados contenidos en el Informe del Proyecto *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559* es la cartografía de la potencia del acuífero a través de la interpretación de los SEV efectuados. Dado el poco contraste de resistividad entre el sustrato impermeable de las “Margas azules” y los sedimentos arenosos suprayacentes, para dar una mejor idea de la importancia de los paquetes resistivos (acuífero) en toda el área, se decidió utilizar la Resistencia Transversal (producto de potencia por resistividad). A fin de eliminar las situaciones de poco interés hidrogeológico (baja resistividad con gran potencia), se utilizaron solamente los valores de T con resistividad superior a 20 ohm.m, y así mismo se eliminaron las partes donde se sitúan arenas secas superficiales.

Puesto que el agua con un contenido superior a 2 g/l de ClNa tiene una resistividad de  $R_w=3$  ohm.m (a 18°C), la resistividad de una formación con una porosidad del 20% ( $p=0.2$ ), es, según la ley de Archie ( $R = p^{-2} 0.81 R_w$ ), de 61 ohm.m, lo que para una potencia mínima de interés de 20 m supone una resistencia transversal de  $T=1220$ . Con este supuesto, y por comparación con datos de sondeos mecánicos de la zona, valores de T inferiores a 1000 pueden interpretarse como zonas de agua salada. De esta forma, el mapa de T (Anexo 2 del Informe 35559, reproducido por digitalización y nuevo trazado de las curvas en la Figura 143), distribuye el área desde zonas de alto valor hidrogeológico (arenas de la costa  $T>10.000$ ), hasta zonas donde la salinidad o arcillosidad es relevante ( $T<1.000$ ). La línea  $T=1.000$  situada a la derecha del río Guadalquivir indica por lo tanto el primer límite trazado entre agua dulce- agua salada. No obstante, hay que hacer observar que no existen prácticamente SEV que permitan un trazado fidedigno de esta isolínea, sobre todo en la parte central, lo que supone por lo tanto una apreciación muy aventurada de dicho límite, aunque válida para los objetivos entonces perseguidos de trazar una separación entre las zonas explotables y no explotables del acuífero.

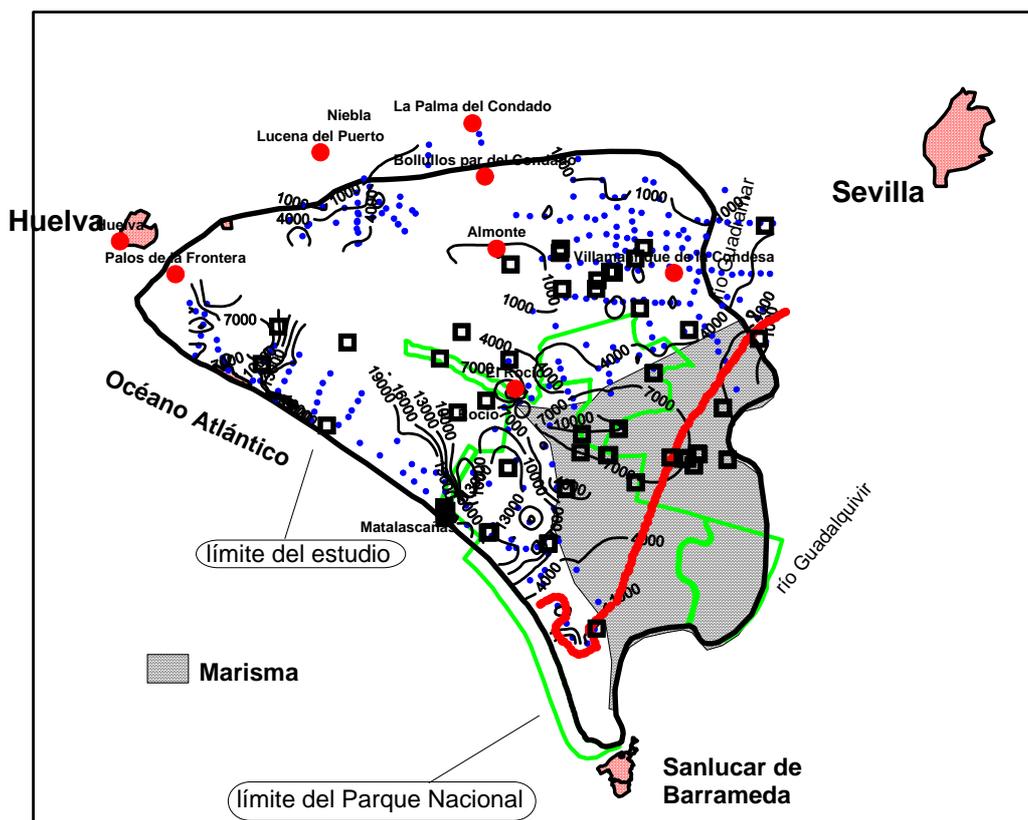


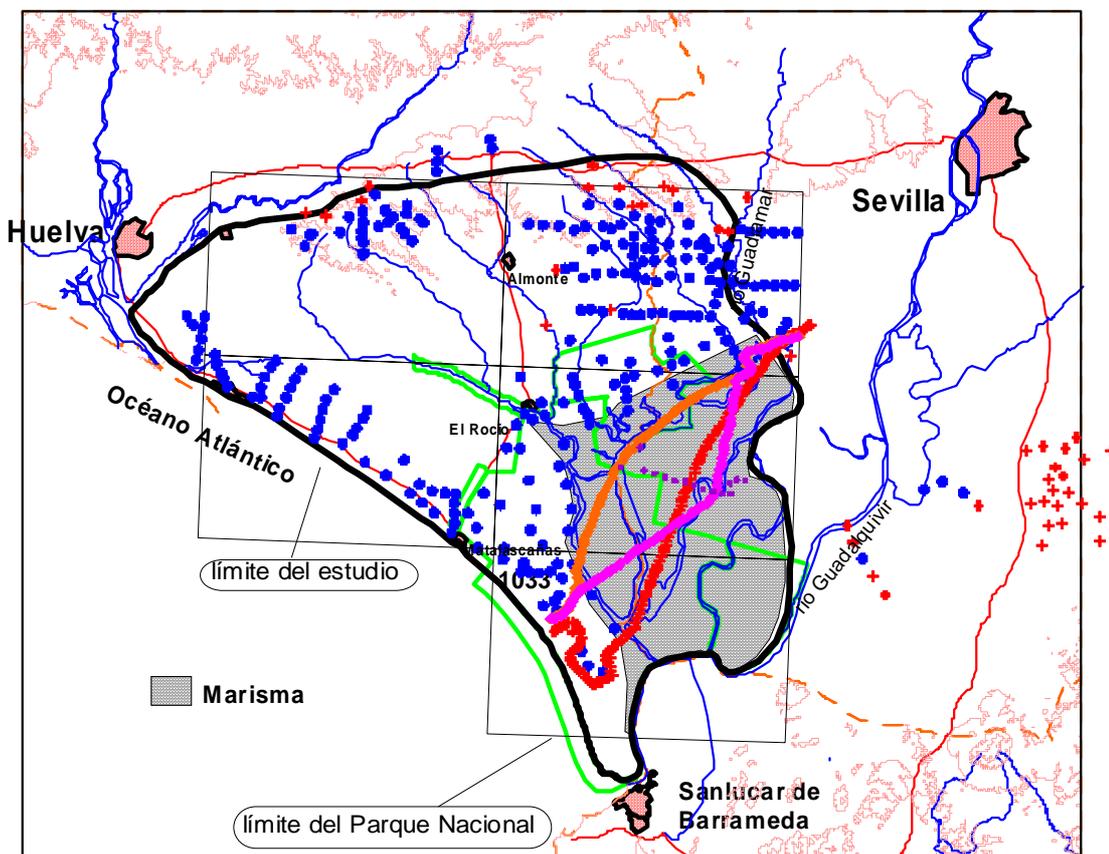
Fig. 143. Mapa de resistencia transversal  $T$  (producto de potencia por resistividad) del acuífero, presentada como Anexo 2 en el Informe de Prakla de 1968. (Ref. 35.559). Los puntos azules son los SEV en los que está basado el mapa. La línea roja indica el límite de valores 1000 ohm.m.m, equivalente a 2 g/l de ClNa disuelto. La línea está trazada sólo con apoyo de la información de SEV en el norte y en el sur, y de los sondeos mecánicos BG (símbolos cuadrados en negro) en la parte central. [ficheros 22linea1000deTAnexo2.txt, 22ProResyTAnexo2.xls, SondeosBG.xls]

### III.4.2 Otras versiones contemporáneas del trazado de la línea

El informe *Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.* utiliza el mismo criterio para trazar una línea que separe la zona de agua dulce y de agua salada. Aunque cronológicamente es precedente del anteriormente expuesto, no fue sin embargo incorporado al Informe Final de Prakla, siendo no obstante algo más completo.

Astier se basa en los valores de la resistencia transversal  $T$  calculada con la resistividad aparente para  $AB=600$  m (aproximadamente entre 60 m y 150 m de profundidad) para los SEV de las zonas MD, MS, MP y MR (mapa reproducido en la Figura 10 del capítulo I). La resistividad del tramo considerado como acuífero está entre 1 y 40 ohm.m, según la salinidad del agua. Basándose en datos de los sondeos mecánicos BG-7 (que sólo atraviesa acuíferos salados, con  $T=400$ ) y BG-5 y BG-6 (con buenos caudales de agua dulce y  $T>5000$ ), se trazó la línea  $T=5000$ , (1000 en el Informe de Prakla), correspondiente aproximadamente a 5-10 ohm.m, como el límite entre agua dulce- agua

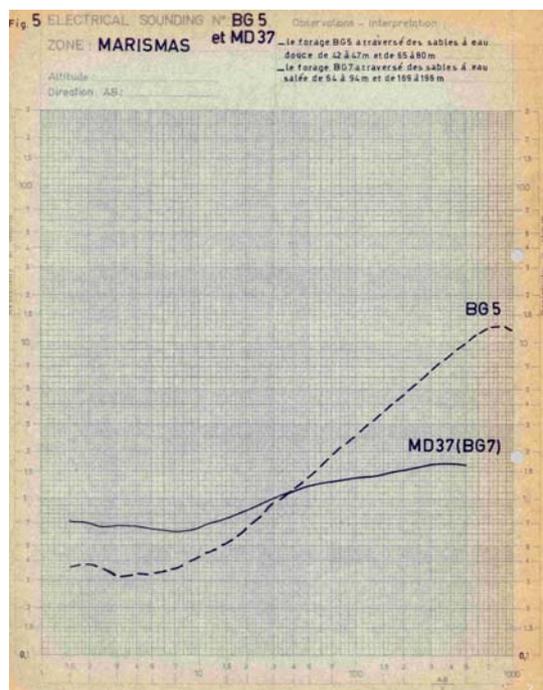
salada, pero matizando que es por debajo de 2000 cuando puede considerarse agua salada. La realización de nuevos SEV en la alineación BG-5 (agua dulce) a BG-1 (agua salada) permitió una mejor definición del trazado del límite (Figura 11 del capítulo I). Estas líneas han sido digitalizadas de los documentos originales y se encuentran trazadas conjuntamente en la Figura 144.



**Fig. 144.** Los puntos indican la posición de los SEV: en azul, con valores de  $T > 1000$  ohm.m.m; en rojo con  $T < 1000$  ohm.m.m; en morado los nuevos SEV TS efectuados en la Marisma para delimitar el trazado de la interfase. La línea roja es el límite de  $T = 1000$  marcado en el Informe de Prakla de 1968 (Figura 143). La línea naranja es el límite  $T = 5000$  ohm.m.m realizado en la interpretación de los SEV en 1967. La línea morada es la nueva posición de la línea  $T = 5000$  ohm.m.m trazada después de hacer los SEV TS entre los sondeos BG1 (agua salada) y BG5 (agua dulce). [ ficheros 22linea1000deTAnexo2.txt, 23linea5000TdePL4.txt, 23linea5000TdePL4b.txt, 22ProResyTAnexo2.xls, SEVMuroAstier1970.xls ]

En este trabajo se pone además en evidencia la importancia que tiene el conocimiento de la salinidad del agua para una correcta utilización de las técnicas geoeléctricas en esta parte del acuífero, ya que el relleno plio-cuaternario de las Marismas (que constituye el acuífero) variará su resistividad: las arcillas y las arenas con agua salada son muy conductoras, mientras que las arenas con agua dulce son resistivas. La existencia de agua salada dificultará la localización de las margas (conductoras) que se suponen como base impermeable del acuífero. Así lo pone de manifiesto el ejemplo proporcionado en la Figura 145.

No obstante, el comportamiento de resistividad de los materiales que se encuentran sobre el relleno plio-cuaternario es muy variable: desde 0.5 ohm.m para arcillas saladas a miles de ohm.m para arenas secas de las dunas. Bajo una capa de 1 ohm.m, cualquier cosa actúa como resistivo, y además estas resistividades tan variables de los primeros metros del terreno pueden influir mucho en los resultados de los SEV.



**Fig. 145 Ejemplos de la influencia de la salinidad del agua en la forma de las curvas de SEV y su interpretación (según Astier, 1967). BG7 agua salada. BG5, agua dulce, donde se alcanzan resistividades mucho mayores y se aprecia la bajada al conductor que supone la base del acuífero. La existencia de agua salada dificulta la localización de dicha bajada en las curvas de SEV.[fichero 23F5.jpg]**

### III.4.3 Nuevas verificaciones del trazado de la línea en 1970

En el **Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.** se realizaron nuevos SEV (denominados CD) sobre la Marisma, con el objeto de mejorar el trazado de la línea de separación entre la parte del acuífero afectada por el agua salada y la parte de agua dulce. Los SEV fueron interpretados con apoyo de los sondeos BG21 y BG26. El límite está trazado para valores de T superiores a 3000, sin que sepamos el criterio seguido para afirmar que este valor equivale a 1.5 g/l de ClNa.

En la Figura 146 se reproduce esta línea junto con las anteriores, obtenida por digitalización de la mostrada en el documento original (Figura 14 de capítulo I).

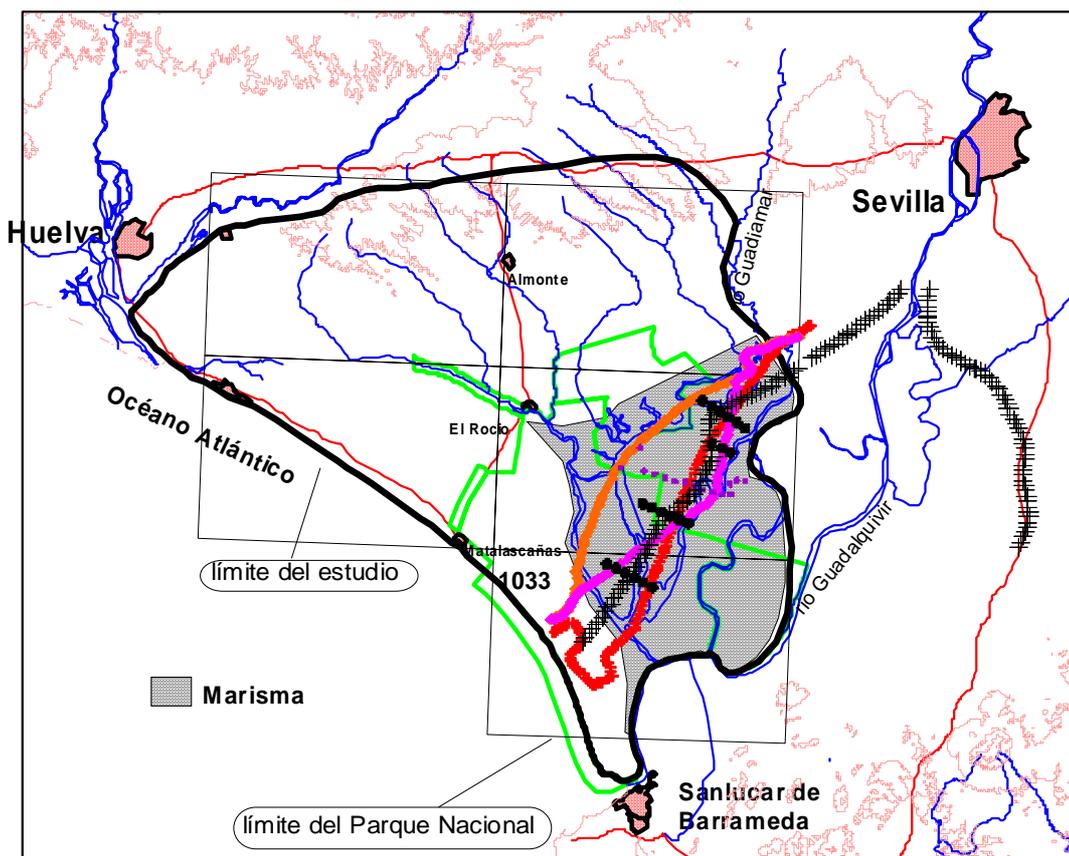


Fig. 146. Línea roja: límite de 1968 para  $T=1000 \text{ ohm.m.m.}$ ; línea naranja: límite de 1967 para  $T=5000$ , modificada a línea morada tras realización de los SEV TS marcados en morado. Línea negra: límite para  $T=3000$  (1.5 g/l) trazada en 1970 con apoyo de los nuevos SEV CD (en negro). [ficheros 22línea1000deTAnexo2.txt, 23línea5000TdePL4.txt, 23línea5000TdePL4b.tx, 25FIGURA-1.xls, SEVmuroAstier1970.xls, SEVCD-Marismas1970.xls]

### III.4.4 Cuantificación del límite establecido

Un poco después de los trabajos realizados entre 1967 y 1968 se encuentra un Informe denominado *Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.*, donde además de hacer la reinterpretación conjunta de 380 SEV, se cuantifica el límite entre agua dulce – agua salada, presentada en la Fig. 21 del capítulo I mediante isolíneas de concentración de ClNa en g/l, obtenidas a partir de los nuevos valores de la resistencia transversal T.

Para la conversión de los valores de resistencia transversal T en valores de concentración utilizaron muestras de agua de diez sondeos mecánicos, realizando análisis de residuo seco en g/l, cuyos valores se han trazado frente al valor de T del SEV más próximo (Figura 147, reproducción de la Figura 20). El conjunto de puntos se adapta aceptablemente a la línea teórica para una capa de potencia de 100 m y porosidad 20 % (valores medios del acuífero, anteriormente obtenidos), en donde la variación de T se debe por tanto a la de la resistividad asociada a la variación de contenido en sales. Con esta equivalencia se trasladaron los valores de T del resto de los SEV a valores de concentración en g/l, adjudicándose el paso a agua salada a partir de 1.5 g/l ( $T=3000 \text{ ohm.m.m.}$ ).

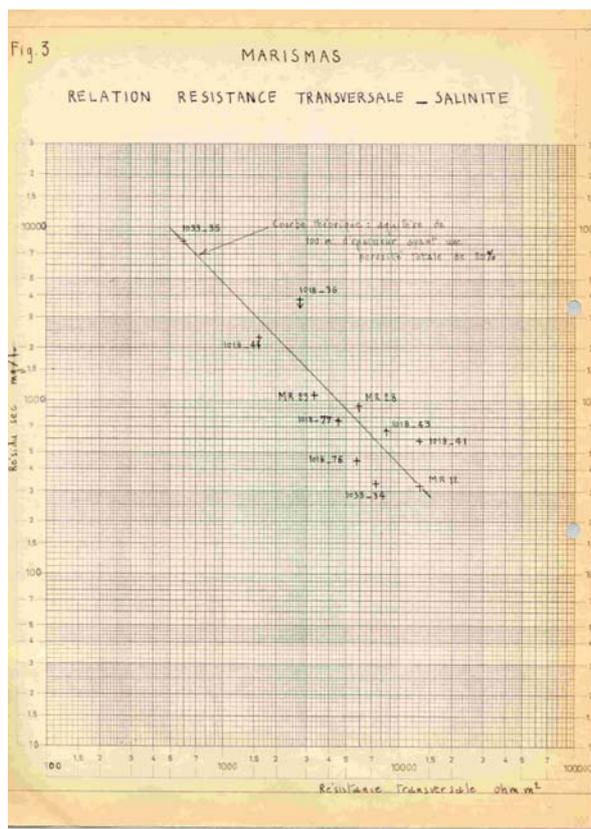


Fig. 147. Criterio utilizado por Astier en 1970 para la conversión de resistencia transversal unitaria  $T$  a salinidad en g/l. Los valores de g/l de  $ClNa$  medidos en sondeos mecánicos se han enfrentado a los valores de  $T$  en SEV próximos, deduciendo así una ley de conversión de  $T$  a concentración. [fichero 26PL-3.tif]

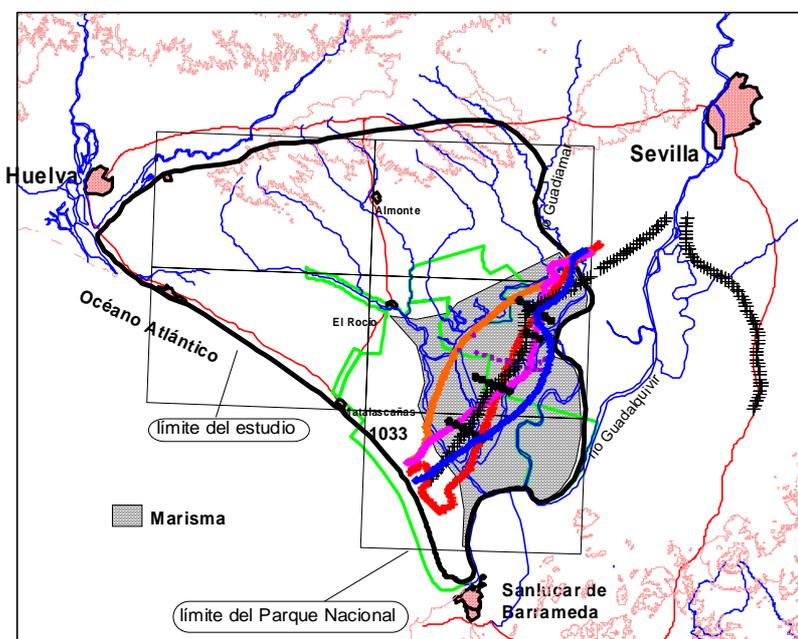


Fig. 148. Nuevo trazado (línea azul) del límite entre agua dulce y agua salada en la zona de Marismas, efectuada por conversión de los valores de  $T$  a concentración en g/l de  $ClNa$  mediante análisis de muestras de agua. Se ha trazado la línea de 2 g/l (aproximadamente  $T=2000$  ohm.m). [ficheros rojo: 22línea1000deTAnexo2.txt, naranja: 23línea5000TdePL4.txt, rosa: 23línea5000TdePL4b.tx, negro: 25FIGURA-1.xls, SEVmuroAstier1970.xls, SEVCD-Marismas1970.xls, azul: 26línea2glddePL5.txt]

En la Figura 148 se reproduce el trazado de esta nueva línea de límite, por digitalización del mapa original de la Figura 21. Aunque se trata de los mismos SEV que los utilizados para definir la línea del informe del IGME de 1970 de la figura 146, aquella fue trazada para  $T=3000$  y ésta para  $T=2000$ , equivalentes aproximadamente a 2 g/l.

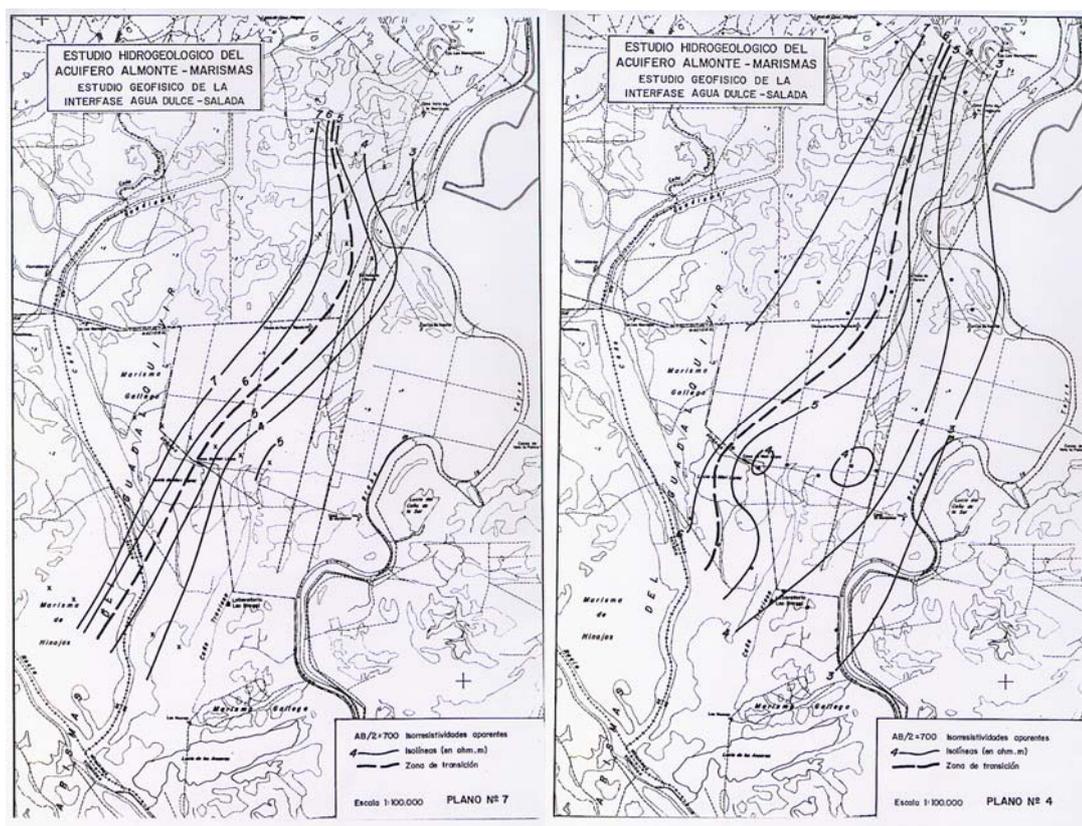
### III.4.5 Nueva verificación de la posición de la línea que separa las partes dulce y salada del acuífero en 1982.

En 1982 se llevó a cabo por el IGME el *Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655*, con el objetivo de verificar si la línea trazada en 1969-70 (Figura 146) para la interfase agua dulce – agua salada en la zona de Marismas, había sufrido alguna evolución. Para ello se midieron 25 SEV con AB/2 del orden de 1000 m, aunque en bastantes casos se superaran los 1500 m, decidiéndose el fin de la medición cuando la curva presentaba una bajada (entrada en terrenos más conductores). Están distribuidos en 4 perfiles, cuya posición puede verse en la Figura 149, perpendiculares a la traza conocida de la interfase, intercalados entre los SEV denominados CD de 1969 (*Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.*, apartado III.4.3 de este capítulo).



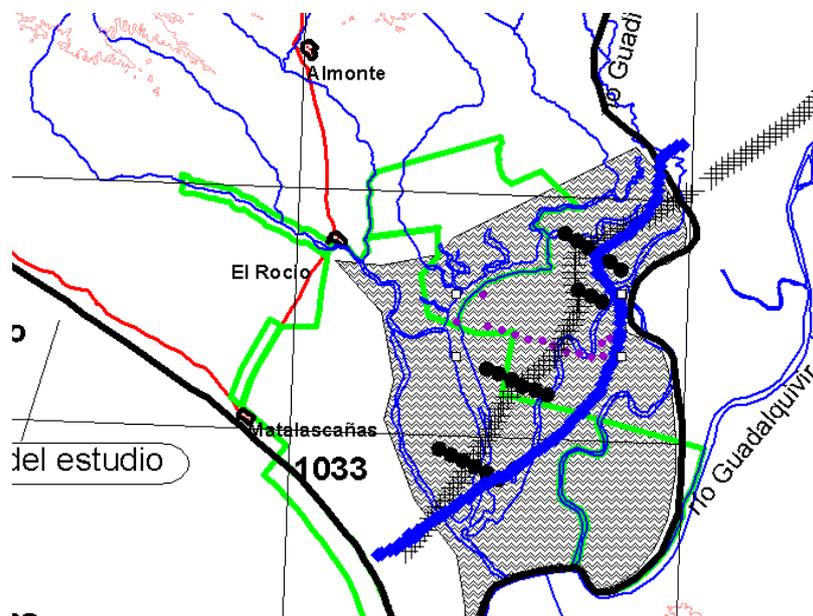
**Fig. 149. Plano de situación de los SEV efectuados en la campaña de 1982 (perfiles 1 a 4), junto con los denominados CD de la campaña de 1969.[fichero 42Plano-1.tif]**

En la interpretación de estos nuevos SEV se encuentran unos niveles superficiales (limos, arcillas, arenas y evaporitas de Marismas) de muy baja resistividad (0.4 ohm.m) y unos limos y arcillas con resistividad entre 1 y 4 ohm.m, seguidos del tramo acuífero constituido por gravas, arenas y conglomerados en matriz arcillosa, que alcanza hasta 200 m y presenta resistividades muy variables con valores entre 30 y 5 ohm.m. Las variaciones se atribuyen a la heterogeneidad en el contenido arcilloso. El último nivel conductor (bajada de las curvas de campo) tiene dos posibles interpretaciones: puede ser debido a un cambio litológico por la presencia de los limos basales o de las margas azules; o puede deberse a un cambio de resistividad por la presencia de agua salada, en cuyo caso este horizonte se atribuye a la zona de transición agua dulce-salada. Con este criterio se dibujaron mapas de curvas de iso-resistividad aparente para varias aperturas de ala (para AB/2 300, 500 y 700 m), estimando que la profundidad correspondiente es del orden de 1/3 a 1/4 de AB. A la zona salinizada se le atribuye resistividades aparentes inferiores a 3-4 ohm.m, y al agua dulce 6-7 ohm.m, utilizando la correlación: 2 g/l  $\rightarrow$  3 ohm.m, 1.5 g/l  $\rightarrow$  4-5 ohm.m y 1 g/l  $\rightarrow$  6 ohm.m, aunque desconocemos los criterios utilizados para establecer esta relación. Estos mismos mapas, un ejemplo de los cuales se encuentra en la Figura 150, se dibujaron también con los valores de los SEV medidos en 1969, no observándose diferencias para la posición de la interfase en 1969 y 1982.



**Fig. 150. Líneas iso-resistivas para  $AB/2=700$  m, según los SEV medidos en 1969 (izquierda) y en 1982 (derecha). Se considera debido al agua salada los valores de resistividad inferiores a 4 ohm.m. El inicio del tramo en bajada de las curvas se produce casi siempre para valores superiores de  $AB/2>700$  m, por lo que consideramos estas curvas como las que mejor representan la situación de la interfase, teniendo menos validez las trazadas por los autores del Informe 35.655 para  $AB/2=$  a 300 y 500 m. [archivo 42Plano-4.tif, 42Plano-7.tif]**

En la figura 151 se reproduce la línea de 1969, que ignora la que fue trazada por Astier en 1970 (apartado III.4.4 de este capítulo) con criterios mejor soportados que los utilizados en 1982 para trasladar los valores de la resistividad a unidades de concentración.



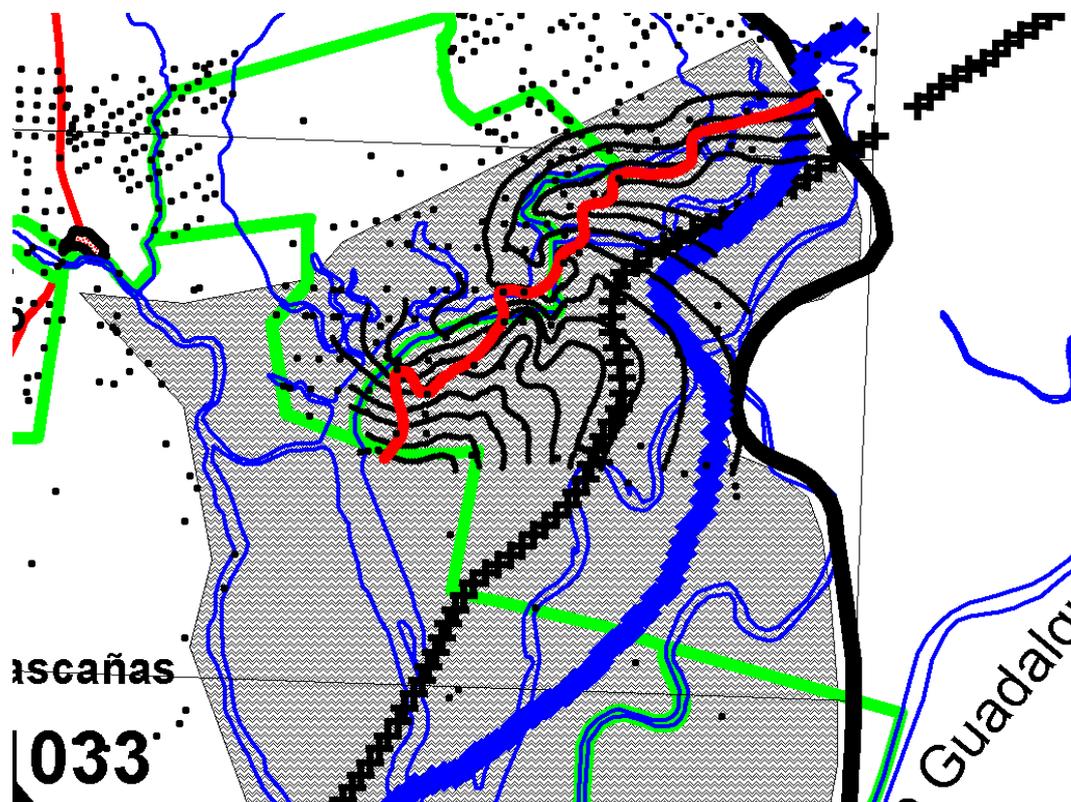
**Fig. 151.** Posición de la interfase (línea de aspas negras) basada en los SEV CD en 1969 (puntos negros), que coincide con la obtenida en 1982 con SEV intermedios a los CD. En morado, los SEV realizados para mejorar el trazado de la interfase en 1969, y en azul la línea trazada en 1970 para un valor de T equivalente a 2 g/l. [ficheros SEVmuroAstier1970.xls, SEVCD-Marismas1970.xls, 26linea2gldePL5.txt, 25FIGURA-1.xls]

### III.4.6 Trazado de la superficie interfase en un área restringida, en 1976.

En el *Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.*, referido a los 462 sondeos mecánicos efectuados entre octubre de 1971 y marzo de 1976 en los sectores de dicha área, se menciona que, con 1133 muestras de agua procedentes de 206 sondeos efectuados en ese proyecto, junto con 56 análisis representativos procedentes del *Proyecto Guadalquivir*, para extender el área contemplada, se trazaron mapas de líneas de igual concentración; dichos mapas no han podido ser encontrados en la realización del presente Proyecto.

La comparación de las concentraciones de las muestras con las mediciones efectuadas con la sonda de resistividad eléctrica, permitieron deducir que con conductividades superiores a 1.7 mS/cm el residuo sólido supera 1 g/l, pudiendo trazarse las curvas de concentración de forma fiable a partir de los valores de conductividad eléctrica.

Se presentan además en este Informe de 1976 dos mapas (planos 31 y 32, reproducidos en las figuras 26 y 27 del capítulo I), de la forma de la interfase en profundidad en la zona regable, aunque sin ninguna explicación sobre la forma en que fueron trazados; estos mapas están reproducidos en las Figuras 152 y 153, mediante digitalización de los originales.

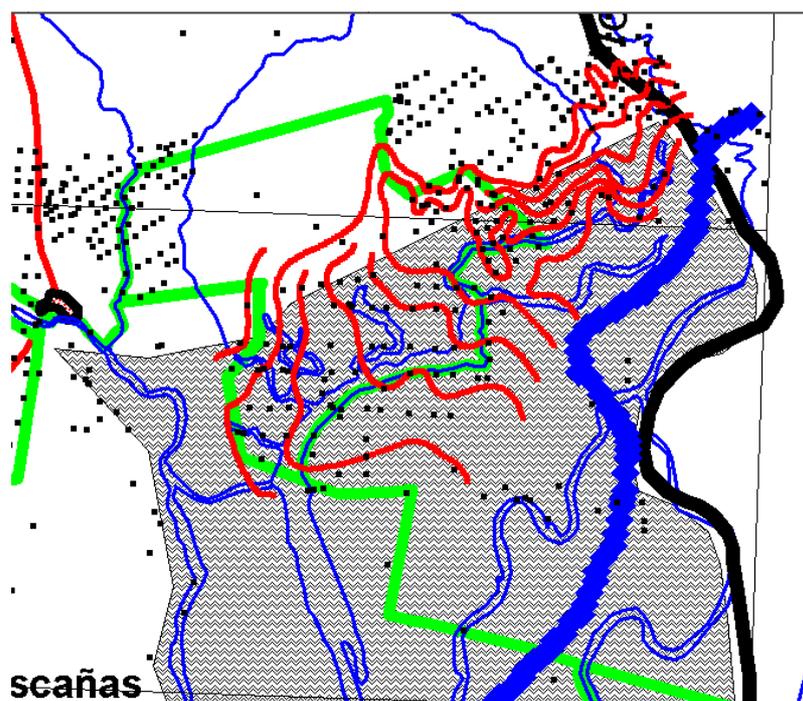


**Fig. 152. Superficie de la interfase en profundidad (curvas en negro), deducida a partir de la salinidad del agua. La línea roja es la intersección de esta superficie con el fondo impermeable. La línea de aspas negras es el límite establecido para  $T=3000$  en 1970. La línea azul es el límite establecido por los valores de  $T$  equivalentes a 2 g/l en 1970, por reinterpretación de los SEV. Los puntos negros son los sondeos mecánicos. [fichero 32PL-31.curvas.xls, 32PL31-contacto.xls, 26línea2gldPL5.txt, 25FGURA-1.xls]**

En el mapa de la Figura 152 se reproducen las curvas del mapa trazado a partir de la salinidad del agua, con el criterio de que la profundidad de la interfase es igual a  $H-(s-0.5)P/37$ , sin que hayamos podido verificar con certeza qué parámetros son los utilizados. Las curvas se han trazado con intervalo de 10 m, y van desde 210 m de profundidad en el Sur hasta 130 m en el Norte. En la misma figura está también trazada la línea de intersección de esta superficie con el fondo impermeable, de tal forma que al norte de dicha intersección el acuífero puede considerarse de agua dulce, y al sur en fase dulce y salada. Las isólinas al sur de esta intersección están trazadas basándose solamente en tres puntos: sondeos BG21, BG 52 y BG20 (ver figura 26 del capítulo I). Como puede apreciarse, la posición de esta interfase, con un fuerte buzamiento hacia el Sur, presenta extrañas formas, y está bastante alejada de la línea de separación entre zonas de agua dulce y salada marcadas hasta 1970 utilizando los valores de la resistencia transversal  $T$  y su equivalencia en g/l a través de análisis de muestras. La porción del mapa apoyada en los sondeos de la zona regable tiene tendencia este-

oeste, pero las curvas pasan bruscamente a un trazado norte-sur al ser extrapoladas a la información de los sondeos BG. Si la línea de contacto de la interfase con el fondo impermeable se considerara como equivalente a las líneas anteriormente trazadas de separación entre zona de agua dulce y de agua salada, la figura 152 permite apreciar la gran distancia entre estos límites. Si realmente todos los sondeos existentes hacia el este de esta línea contienen agua salada, existe una importante contradicción entre esta información y toda la realizada hasta esa fecha. Su trazado es casi coincidente con el efectuado en 1970 (apartado III.4.3 de este capítulo) utilizando el valor de  $T=5000$ , antes de corregir su posición al realizar nuevas mediciones de SEV en el centro de la Marisma (línea naranja de la Figura 146).

El otro documento presentado en este Informe de 1976 es el mismo mapa de la forma de la interfase en profundidad, pero deducido a partir de “la superficie piezométrica”, y que se sitúa más hacia el norte que la superficie anterior. Está representada en la Figura 153 por digitalización del mapa original (Figura 27 del capítulo I).



**Fig. 153. Superficie de la interfase en profundidad, deducida a partir de la “superficie piezométrica”. La línea azul es el límite establecido por los valores de  $T$  equivalentes a 2 g/l en 1970. Los puntos negros son los sondeos mecánicos. [archivo 32PL32-curvas.xls]**

Las isolíneas están trazadas cada 10 m, comenzando en 120 m en el Norte hasta 70 m en el Sur, sin que los valores coincidan con la superficie de la Figura 152. El apoyo de sondeos mecánicos para el trazado de estas líneas es total, aunque no se alcanza a comprender su significado, pasando de ser con tendencia noreste-suroeste en la porción norte, a noroeste-sureste en la porción sur.

### III.4.7 Nuevos trazados de la superficie de la interfase en 1995, mediante testificación de sondeos.

A fin de verificar la evolución de la interfase como consecuencia de las extracciones, en 1995 se llevó a cabo en la zona nororiental del Parque Nacional de Doñana, sectores I y Marismas del Plan de Transformación Agraria el ***Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963.***

Se efectuó una campaña de testificación geofísica de 31 sondeos, con registros de conductividad y temperatura de la columna de agua, y una campaña de muestreo de aguas subterráneas en un total de 34 puntos de agua, para su posterior análisis físico-químico. La testificación se llevó a cabo con dos equipos: 16 sondeos se efectuaron con un Century CompuLog III con medición continua de gamma natural, temperatura, incremento de temperatura y conductividad del fluido, y en los restantes las mediciones fueron efectuadas a intervalos discretos con un aparato Instran 30, con medición de conductividad y temperatura.

Los sondeos testificados se pueden consultar en el capítulo I.4.6 del presente Informe. Los valores de conductividad, reducidos a 25 °C, se han convertieron a concentración en g/l de ClNa equivalente mediante la ecuación:

$$\text{ClNa} = 3.3 C_{25}^{1.14} / (1 + 0.04 C_{25}^{-2.36})$$

que se dice que fue la deducida en el ***Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.*** (Esta ecuación no se ha podido comprobar, siendo la relación de conversión dada por Schlumberger  $\text{ClNa} = (5.19 C_{25})^{-1.05}$ ).

Se trazaron mapas de curvas de igual conductividad y concentración a las cota -25, -50, -75 y -100 m utilizando solamente los valores testificados con el equipo Century. Aunque la salinidad aumenta algo con la profundidad, el resultado general es el presentado en la figura 154, donde se reproduce el mapa de posición de sondeos y de las líneas de igual valor de conductividad general (no referidas a ninguna profundidad).



**Fig. 154. Posición de los sondeos testificados e indicación de las líneas de isoconductividad en 1994, obtenidas por testificación de los sondeos.[archivo 46Fig-5.tif]**

En el trabajo original se hace referencia a las dificultades encontradas para efectuar una comparación de todos los valores medidos, por las diferentes características de los sondeos (posición de filtros, tramos cementados, etc.). Se concluye que la posición de la interfase, cuyo avance sería debido a las extracciones, no se ha modificado desde los trabajos de 1983 del IGME-IRYDA.

En la Figura 155 se han trazado estas curvas de isoconductividad junto con las líneas de separación de agua dulce y salada trazadas en 1970 utilizando los valores de la resistencia transversal. La actual

línea de 2 g/l tiene una posición muy coincidente con las trazadas anteriormente, ratificando la conclusión de este trabajo que no había modificaciones respecto de la situación de 1970.

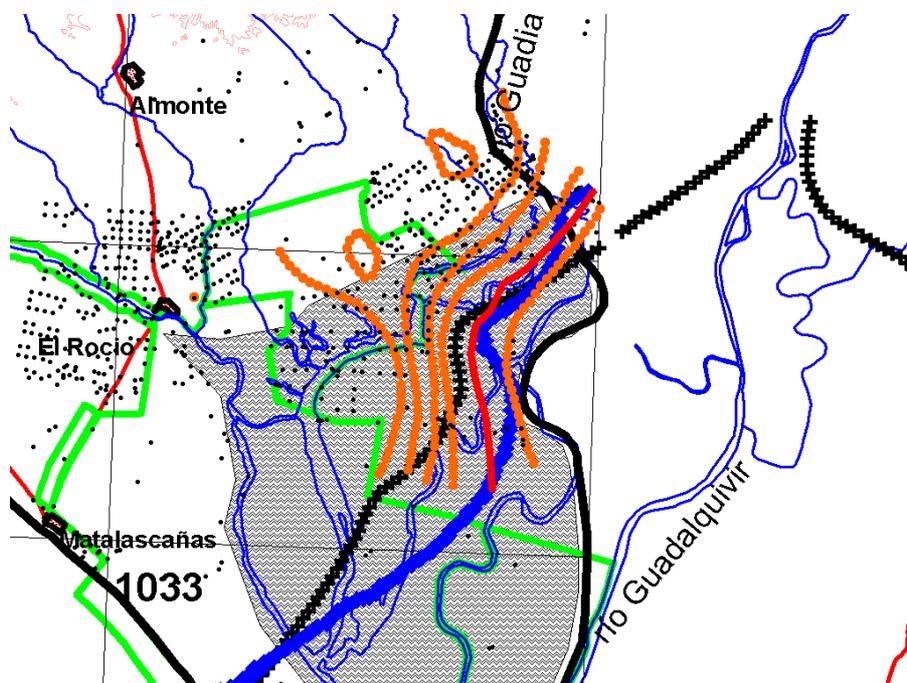


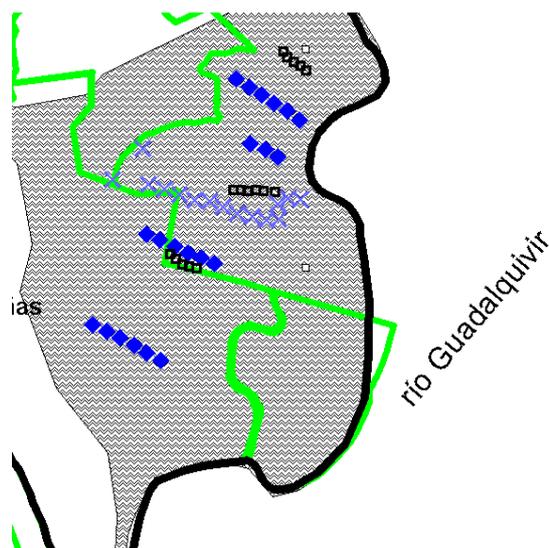
Fig. 155. En naranja: líneas de isoconductividad obtenidas en 1995 por testificación geofísica de sondeos. Los valores son de 0.5-1-1.5-3-20 mS/cm, de Oeste a Este. En rojo se ha marcado la curva de 5 mS/cm, equivalente a unos 2 g/l de ClNa. En negro, línea trazada en 1970 para T=3000, equivalente a 1.5 g/l. En azul, la línea para T=2000 por reinterpretación de los SEV, equivalente a 2 g/l de ClNa, trazada en 1970. [fichero 46Fig-5.xls,26linea2gldePL5.txt, 25FIGURA-1.xls]

### III.4.8 Otras mediciones de la interfase

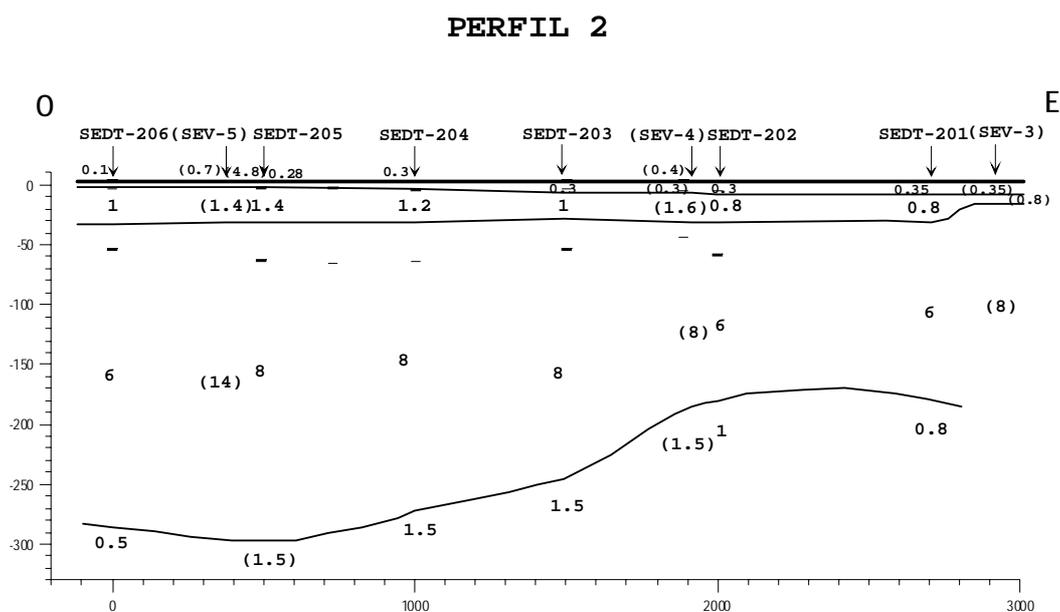
En 1988 se llevó a cabo el proyecto **Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347** para estudiar la respuesta de diferentes métodos geofísicos en la determinación de la geometría de la interfase agua dulce- agua salada en acuíferos costeros, encontrándose la zona de Almonte-Marismas entre los emplazamientos seleccionados. Se midieron 26 SEV repartidos en 4 perfiles a lo largo de la costa, entre Mazagón y Matalascañas, y 16 SEDT en 3 perfiles en el interior de la Marisma, en la misma alineación utilizada en los perfiles de SEV efectuada en 1969 (SEV CD) y 1982 (Informe Ref. 35655).

En los SEV efectuados a lo largo de la costa no se aprecian indicios de contaminación por intrusión. Respecto a los SEDT (efectuados con un equipo Geonics EM-37, con bucles de 40x40 m o 70x70 m, en frecuencias de 25 Hz, 6.25 Hz y 2.5 Hz) están situados (Figura 156) a la altura de Casa Mari López (perfil 1), límite del Parque Nacional Tejada a la altura de la Choza de la Huerta Tejada (perfil 2), y NO de Marijuela (perfil 3). Los tres tienen las mismas características, con nivel piezométrico prácticamente en superficie y muy bajas resistividades. Se diferencian tres tramos geoelectrónicos: conductor A (menos de 5 ohm.m) de arenas cuaternarias; tramo medio B con mayor resistividad (6-18

ohm.m), formación acuífera de arenas pliocuaternarias, y tramo C conductor inferior (menos de 2 ohm.m), de limos margosos pliocenos. En el perfil 1 aparece un primer tramo salino de 5-8 m de espesor, que se apoya en A, con 50-60 m de potencia, estando el sustrato formado por el tramo B. En el perfil 2 (Figura 157) se detecta el tramo C, dando al intermedio una potencia de 110 a 230 m. En el 3, el tramo A tiene 20-35 m y el B 140-270 m. El autor afirma que este resultado coinciden muy bien con los SEV realizados en campañas anteriores, aunque se dice que no se puede saber si la salinidad reflejada por las bajas resistividades se debe a salinización sedimentaria o intrusión marina.



**Fig. 156.** Posición de los SEDT efectuados en 1988: cuadrados negros. Rombo azul: SEV CD de 1970; aspás azules: SEV TS de 1969 [ficheros 44Perfiles.xls, SEVCD-Marismas1970.xls, SEVMuroAstier1970.xls]



**Fig. 157.** Ejemplo de perfil geoelectrico obtenido en las Marismas mediante SEDT. [fichero 44Perfiles.xls]

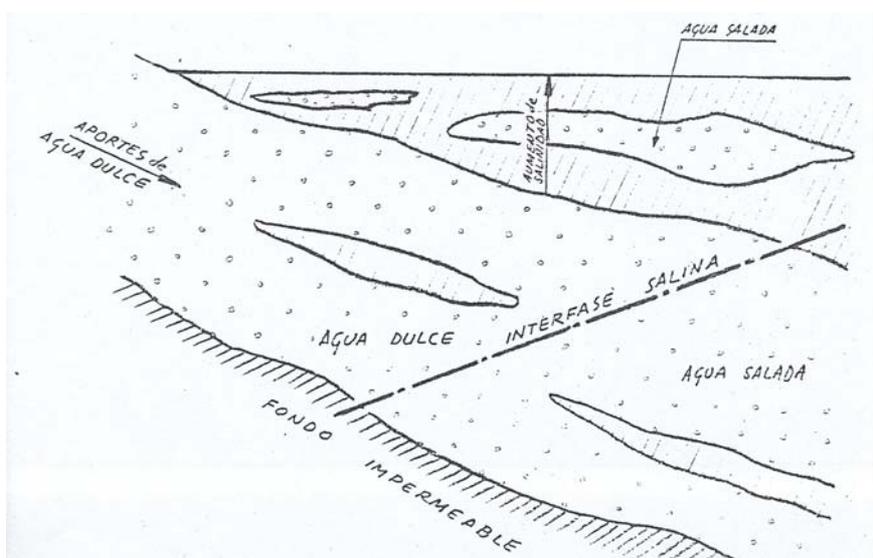
### III.4.9 Conclusiones

De acuerdo con el conocimiento actual (2006), el agua salada existente bajo las Marismas tiene su origen en el proceso de colmatación del estuario del Guadalquivir, durante el cual la zona estaba ocupada por aguas marinas, que durante el relleno quedaron ocluidas en las formaciones geológicas. Posteriormente, por el empuje de las aguas de recarga procedentes de la zona libre del acuífero, el agua salada fue desplazada hacia el Sur: el acuífero cautivo es alimentado lateralmente por el libre de Almonte, cuyas aguas dulces han desplazado parcialmente a las saladas del antiguo estuario del Guadalquivir unos 6 km hacia el Sur-Este desde su posición original, formándose una alineación de alto gradiente de la interfase. En el acuífero libre y en la porción del mismo bajo los sedimentos impermeables de las Marismas, donde pasa a ser semiconfinado, las aguas son de buena calidad y facies bicarbonatada cálcica (conductividad inferior a 1000 uS/cm, equivalente a uno 0.5 g/l de ClNa); hacia el Sur y Sureste, a medida que aumenta el espesor de sedimentos confinantes de marismas, las aguas evolucionan bruscamente hacia facies cloruradas sódicas (más de 20.000 uS/cm, equivalente a unos 10 g/l de ClNa), evidenciando la existencia de una zona de tránsito de agua dulce-agua salada, cuya situación está siendo desplazada hacia las zonas de explotación.

Existen por lo tanto dos zonas de calidad de agua bien diferenciadas, separadas por un frente salino de alto gradiente en las Marismas. En la parte dulce, que corresponde principalmente al acuífero libre, se observa cierta relación entre la calidad del agua y la litología:

- en las dunas y arenas pliocenas no se rebasan los 0.3 g/l
- en las zonas de predominio de las arenas y margas arenosas del Saheliense se llega a los 0.5 g/l, aumentando en los afloramientos hasta 0.75 g/l

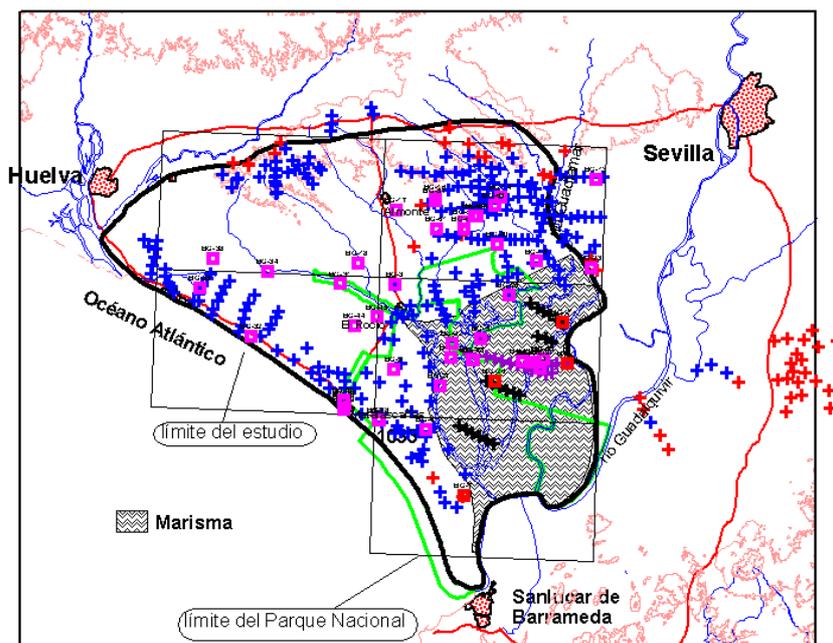
En la Formación Marismas existe un acuífero superficial salado (esquema de la Figura 158), constituido por capas más o menos continuas de arenas y gravas confinadas dentro de un paquete de margas de poca potencia en los bordes, creciendo hasta unos 80 m en el centro de la Marisma. La alta concentración salina obedece a fenómenos de concentración superficial por ascensos capilares del acuífero principal, en carga y surgente. En superficie se superan los 100 g/l, pasando 0.6 g/l en profundidad en el cuaternario reciente (formación de Marismas). La salinidad en profundidad llega a los 35-40 g/l, próxima a la de agua de mar.



**Fig. 158. Esquema de la interfase entre el agua dulce y el agua salada (según Informe IRYDA, 1976) [fichero 32CroquisInterfase.tif]**

La localización de la posición de esta interfase ha formado parte de los estudios realizados en el acuífero desde sus comienzos. Al finalizar los trabajos de campo del Proyecto Guadalquivir sobre 1968, se disponía de un conjunto de SEV, la mayor parte efectuados en la parte libre del acuífero, y de un conjunto de sondeos mecánicos, denominados BG, situados por toda el área (Figura 159). Esta información básica ya permitió detectar la presencia de zonas de agua salada y trazar unos grandes límites para la misma, tanto de forma indirecta a través de los SEV, como por análisis directo del agua de los sondeos. Además, los SEV fueron completándose en el interior de la zona de Marismas, con la sola intención de facilitar la mejora en el trazado de la línea de separación de zonas. Las técnicas utilizadas han ido variando, así como la extensión de los trabajos, que han pasado de contemplar la totalidad de las Marismas a concentrarse en su parte Norte, que fue la declarada como zona regable y donde se efectuaron la casi totalidad de los sondeos mecánicos perforados.

La técnica básica utilizada para efectuar una discriminación del tipo de agua de formación a partir de las medidas de resistividad aparente deducidas de los SEV fue la resistencia transversal T (producto de resistividad por potencia de la capa), como parámetro mejor discriminador de las zonas con mayor interés como acuífero: zonas con valor de resistividad superior a 20 ohm.m y de potencia superior a 20 m, en líneas generales. La existencia de agua salada en la formación puede dar lugar a resistividades muy bajas en potencias medias, dando bajos valores de T, por lo que se utilizó un límite del valor de este parámetro T para indicar la presencia de agua salada.

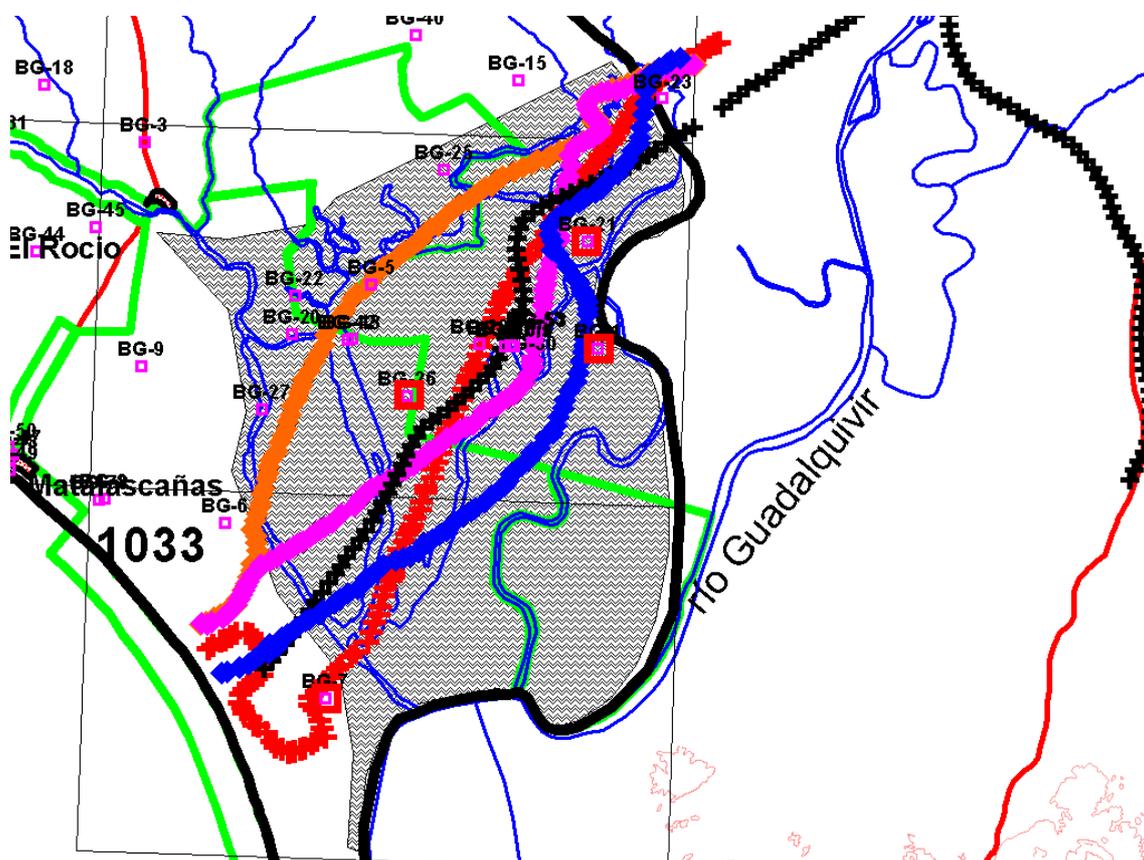


**Fig. 159. Situación de la información básica al finalizar el Proyecto Guadalquivir en 1968: SEV (cruces) y sondeos mecánicos BG (cuadrados). Para los SEV se han indicado en color rojo aquellos que permiten directamente señalar una situación de agua salada. En negro está la campaña CD y en morado la TS, efectuadas a posteriori dentro de la Marisma para permitir un mejor trazado de la interfase entre agua dulce y salada. Para los sondeos BG se han marcado en rojo aquellos en los que nos consta que el agua era salada. [ficheros SondeosBG.xls, 22ProResyTAnexo2.xls, SEVCD-Marismas1970.xls, SEVMuroAstier1970.xls]**

Los valores de partida de las resistividades utilizadas han ido variando, debido a trabajos de revisión y reinterpretación de los SEV. Así mismo, los criterios utilizados para marcar un límite al valor de T también se han ido modificando. En síntesis, estos criterios han sido:

- En 1968, se utiliza  $T=1000$  ohm.m.m, equivalente a una concentración de 2 g/l bajo el supuesto de un 20% de porosidad y 20 m de potencia, trazando la línea roja de la Figura 160, apoyada sólo por mediciones de SEV en los extremos y utilizando la información intermedia de dos sondeos BG.
- La reinterpretación de los mismos SEV en esas fechas, utilizando más sondeos BG para apoyar el trazado de la interfase hace utilizar el valor  $T=5000$  (línea naranja de la Figura 160). La ejecución de nuevos SEV (campaña TS) en la Marisma obliga a modificar su trazado (línea rosa de la Figura 160).
- Nuevos SEV efectuados en 1970 (campaña CD) sobre la Marisma, y la variación del criterio a  $T=3000$  ohm.m.m, suponiendo una equivalencia con 1.5 g/l de ClNa, hace trazar una nueva línea (en negro en la Figura 160).
- En el mismo año, otro estudio con los SEV reinterpretados, establece un criterio más fidedigno de equivalencias entre la T y la concentración, utilizando análisis de agua en sondeos, marcando ahora la línea  $T=3000$  para 1.5 g/l en posición algo distinta de la anterior (línea azul de la Figura 160).

- Posteriormente, en 1982 se efectúan nuevos SEV en la Marisma para verificar la posición de la línea de interfase, utilizando esta vez como criterio la resistividad directamente, poniendo el límite en 4 ohm.m, que se hace equivalente a 1.5 g/l. El resultado es el mismo que el conseguido en 1970 (línea negra de la Figura 160)

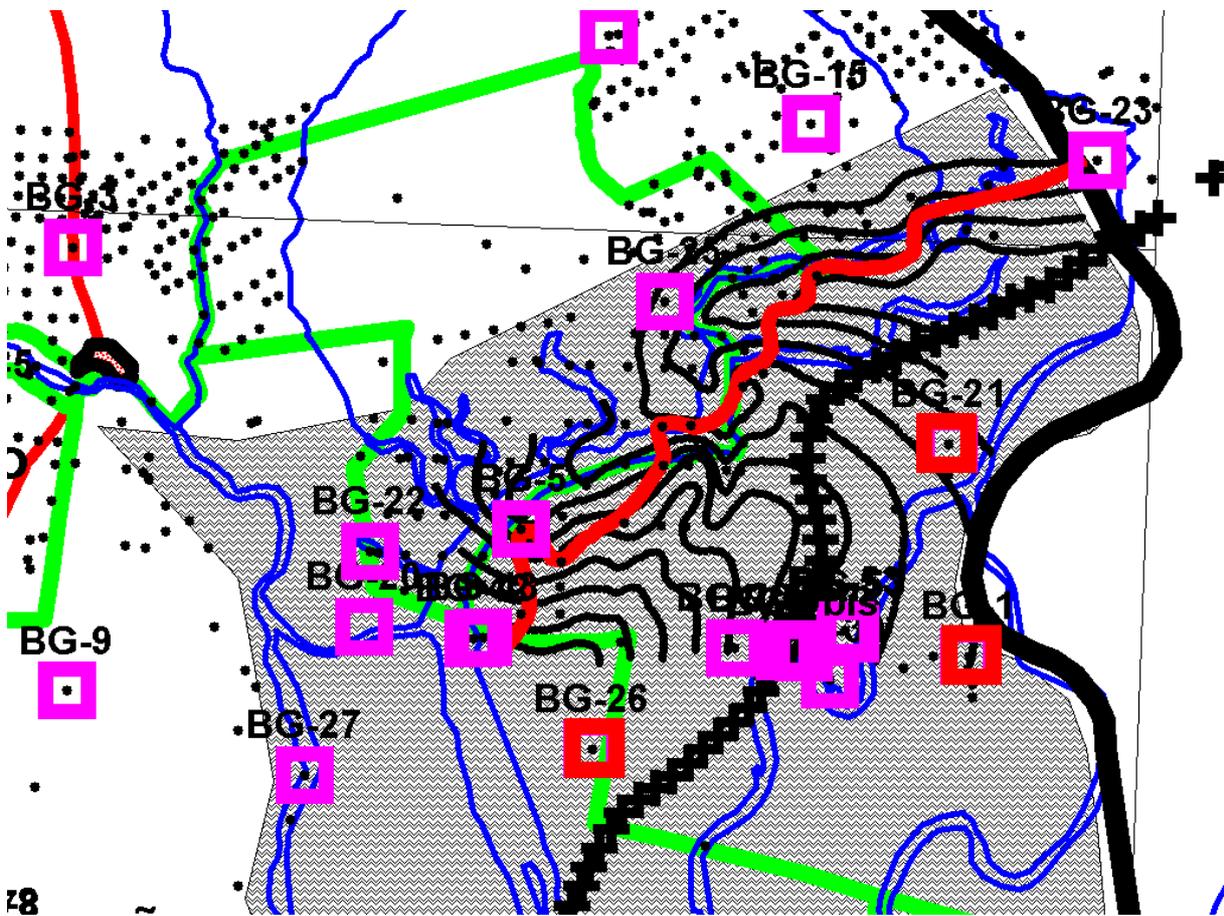


**Fig. 160. Diferentes trazados de una línea que separa la zona de agua dulce y de agua salada. 1968, T=1000: rojo; 1967, T=5000: naranja y rosa; 1970, T=3000: negra; 1970, T=3000, azul. En 1982 se confirma la posición de la línea negra mediante nuevos SEV. [ficheros rojo: línea1000Tde22.txt; naranja: línea5000Tde23.txt; rosa: línea5000Tde23b.txt; negro: 25FIGURA-1.xls; azul: 26línea2gldePL5.txt, sondeosBG]**

A escala regional, el trazado de estas líneas presentan una cierta fiabilidad, aunque en ningún momento puede hablarse del trazado de una interfase, que por su naturaleza es una superficie bi o tridimensional. Con estas líneas, por la forma en que están construidas, se trata de marcar una zona intermedia entre lo que supondría el contacto del agua salada con la base impermeable del acuífero, a partir de donde comienza a existir agua salada, y la zona donde toda el agua es salada. No obstante, hay que tener en cuenta que una interfase no es una superficie de esta naturaleza, es decir, que hay una zona de transición que hace posible la existencia de superficies intermedias entre las de concentración nula de sales, hasta la zona de agua saturada. Entendemos que dependiendo del tipo de estudio que se quiera emprender, será más o menos necesario el intentar conocer la forma de la

interfase utilizando uno u otro criterio: línea de separación de zonas ó superficie(s) de igual concentración.

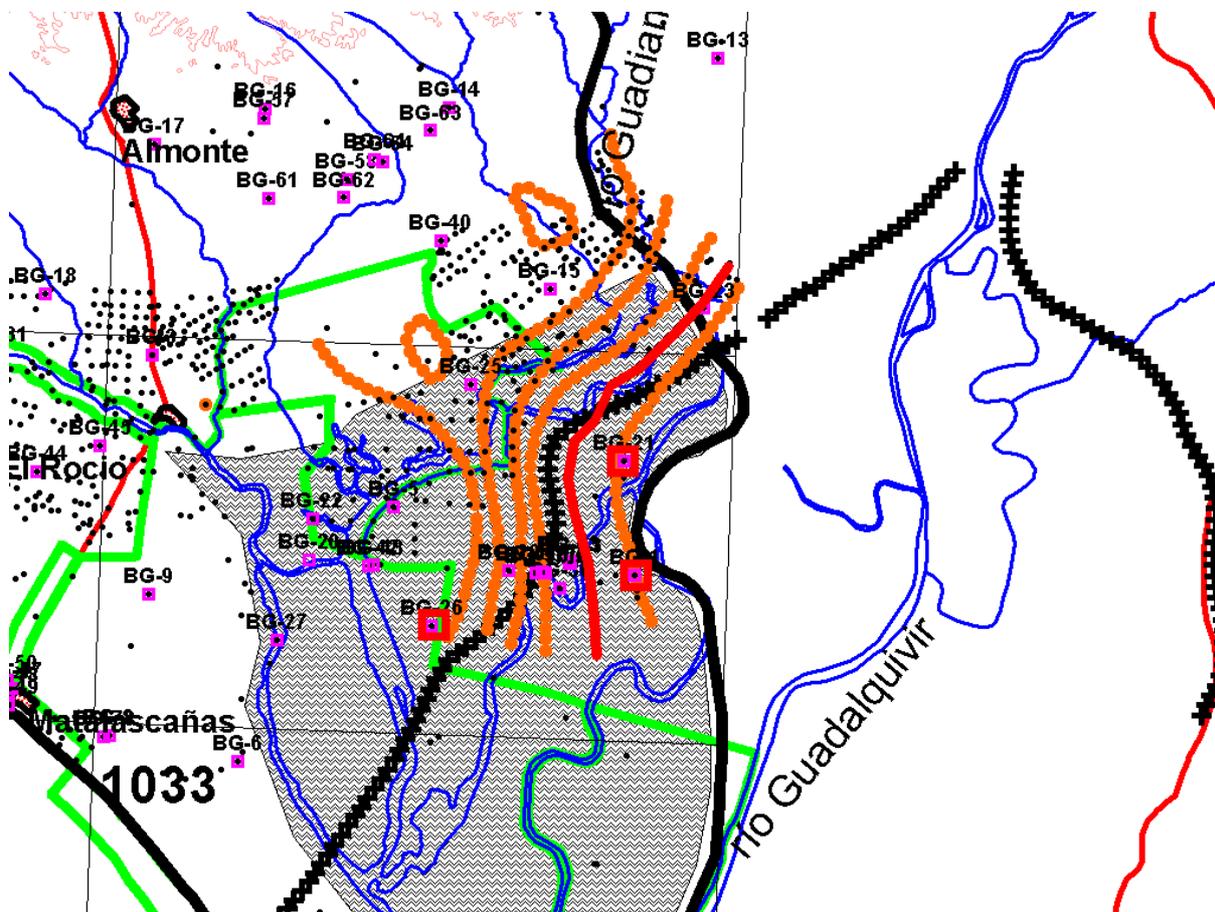
Dentro de los trabajos analizados, el efectuado en 1976, tras la ejecución de un gran número de sondeos mecánicos, se aproxima a lo que sería el trazado de una superficie de interfase. En la Figura 161 se sintetiza el resultado obtenido mediante isolíneas de profundidad de la “interfase” (sin indicación de a qué concentración se refiere), y su contacto con la base impermeable, que sitúa el límite establecido anteriormente hacía el Oeste, lo que en cierta forma ratifica lo que antes dijimos de que dicha línea debe representar algo intermedio entre sólo agua dulce y sólo agua salada.



**Fig. 161.** Líneas de igual profundidad de la interfase entre agua dulce y salada, obtenidas por los sondeos mecánicos realizados en la zona regable (puntos negros) en 1976. La línea roja marca el contacto entre la interfase y la base impermeable. La línea de cruces negras es el límite establecido mediante los valores de la resistencia transversal en 1970 para  $T=3000$ . [Ficheros: SondeosBG.xls, BASE FINAL.xls, 32PL31-curvas.xls, 32PL31-contacto.xls, 25FIGURA-1.xls]

El otro intento de trazar una superficie de interfase fue el realizado en 1995, utilizando las concentraciones calculadas mediante testificación geofísica de la conductividad del agua en sondeos mecánicos. La situación parece ser la de una interfase bastante brusca (en cada sondeo el agua pasa

en muy poco intervalo de profundidad de ser dulce a tener una determinada concentración, que mantiene hasta el final del sondeo), aunque presenta una variación espacial: el agua va siendo más salada de forma paulatina de Oeste hacia el Este. Esto es lo que reflejan las isolíneas de igual conductividad representadas en la Figura 162.



**Fig. 162.** Superficie de la interfase entre agua dulce y agua salada indicada mediante líneas que marcan situaciones de diferente concentración. Los valores son de 0.5-1-1.5-3-20 mS/cm, de Oeste a Este. En rojo se ha marcado la curva de 5 mS/cm. En negro la línea de interfase según valores de T en 1970 para T=3000.[ Fichero 46Fig-5.xls, 25FIGURA-1.xls]

En el fondo, este trazado ratifica el significado de las líneas trazadas utilizando el valor de la resistencia transversal, así como la no variación de la situación de la interfase desde 1968.

Por lo tanto, en nuestra opinión todos estos trabajos son de utilidad para establecer criterios de zonas con agua dulce y con agua salada, teniendo los métodos eléctricos la ventaja de que no presentan las dificultades de los estudios realizados con sondeos mecánicos, donde la posición de los filtros y las mezclas de aguas hace difícil el obtener observaciones de fiabilidad en cuanto al origen de la salinidad. Debe tenerse no obstante en cuenta que es posible que en la zona de Marismas exista más de una superficie de interfase, dada la naturaleza de la salificación de estas capas.



## **INDICE GENERAL EXTENDIDO**

### **TOMO 1**

#### **0. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

**Pag.**

<b>1</b>	0.1 Situación y límites de la zona de estudio
<b>2</b>	0.2 Geología de la zona
<b>6</b>	0.3 Funcionamiento hidrogeológico
<b>10</b>	0.4 Información Geofísica existente
<b>11</b>	0.5 Objetivos generales del Proyecto
<b>12</b>	0.6 Definición de los problemas de índole geofísica actualmente planteados
<b>14</b>	0.7 Definición de la metodología a seguir en el Proyecto

## I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA

### Pag.

- 17 I.1 Introducción histórica de la documentación analizada**
- 21 I.2 Descripción del contenido de los informes parciales del periodo 1967-1976**
- 21** I.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063
- 22** I.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559
- 28** I.2.3 Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.
- 32** I.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070
- 33** I.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.
- 34** I.2.6 Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.
- 41** I.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35.538
- I.3 Descripción del contenido de los informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982**
- 42** I.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.
- 45** I.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.
- 53** I.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649
- I.4 Descripción del contenido de los informes recopilados posteriores al Proyecto Guadalquivir**
- 56** I.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939
- 56** I.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655
- 60** I.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213
- 61** I.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347
- 63** I.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408
- 64** I.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963
- 67 I.5 Datos de campañas de sísmica de reflexión**
- 70 I.6 Sondeos de prospección de hidrocarburos**

## II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL

### Pag.

<b>71</b>	<b>II.1 Tipos de documentos digitales generados</b>
	<b>II.2 Información procedente de informes parciales hasta 1976</b>
<b>73</b>	II.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063
<b>73</b>	II.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559
<b>75</b>	II.2.3 Etude hidrogeologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les resultats de la prospection geophysique. Astier. 1967. Sin Ref.
<b>76</b>	II.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070
<b>77</b>	II.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.
<b>77</b>	II.2.6 Interpretation d'ensemble des sondages electriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.
<b>80</b>	II.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538
	<b>II.3 Procedentes de informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982</b>
<b>81</b>	II.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.
<b>83</b>	II.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.
<b>85</b>	II.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649
	<b>II.4 Procedentes de informes posteriores al Proyecto Guadalquivir</b>
<b>86</b>	II.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939
<b>86</b>	II.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655
<b>87</b>	II.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213
<b>88</b>	II.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347
<b>88</b>	II.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408
<b>88</b>	II.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963
<b>90</b>	<b>II.5 Datos de campañas de sismica de reflexión. "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España", 1990, Ref. 29036.</b>
<b>94</b>	<b>II.6 Base de datos de SEV</b>
	<b>II.7 Adaptación de la base de sondeos mecánicos</b>
<b>100</b>	II.7.1 Bases de partida
<b>102</b>	II.7.2 Proceso de filtrado
<b>103</b>	II.7.3 Base final
<b>106</b>	II.7.4 Baselitologica.xls

**Pag.**

**108** II.7.5 Ficheros para base de datos en ARC/VIEW

**110** **II.8 Cuadro general de ficheros generados**

**Anexo Digital II-a (DocuEscanDigita)**

**Anexo Digital II-b (BaseDatosSEV)**

**Anexo Digital II-c (BaseDatosSondeos)**

### **III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

**Pag.**

- 121 III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules**
- 123** III.1.1 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA. 1968. Ref. 35559
- 126** III.1.2 Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.
- 130** III.1.3 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.
- 133** III.1.4 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.
- 136** III.1.5 Análisis del mapa de cotas del fondo impermeable de 1976.

#### **Anexo Digital III-1 (Margas azules)**

##### **III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión**

- 141** III.2.1 Introducción
- 142** III.2.2 Antecedentes geológicos.
- 149** III.2.3 Información suministrada por los sondeos mecánicos profundos.
- 152** III.2.4 Datos geofísicos sísmicos de partida. Facies sísmicas.
- 156** III.2.5 Metodología seguida en la interpretación de las secciones sísmicas.
- 159** III.2.6 Obtención de las coordenadas de los puntos de tiro. Sistema de control
- 162** III.2.7 Obtención de los tiempos del reflector en las secciones sísmicas.
- 169** III.2.8 Obtención de la velocidad para la conversión tiempo-profundidad
- 173** III.2.9 Mapa de isobatas del techo de las margas azules
- 174** III.2.10 Conclusiones

**177 Anexo III-2.8**

#### **Anexo Digital III-2 (Margas azules Sísmica)**

##### **III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970**

- 191** III.3.1 Objetivos y alcance de esta revisión
- 193** III.3.2 Síntesis de la información geoelectrica sobre el acuífero de Almonte-Marismas de 1970.
- 202** III.3.3 Otros documentos
- 204** III.3.4 Planteamiento para la verificación de la interpretación de los SEV
- 206** III.3.5 Verificación de la interpretación
- 208** III.3.5.1 Corte geoelectrico 5
- 218** III.3.5.2 Corte geoelectrico 6
- 224** III.3.5.3 SEV MD-15 y P1-3
- 227** III.3.6 Verificación del nuevo modelo estratigráfico con los cortes geoelectricos
- 227** III.3.6.1 Síntesis geológica de partida

**Pag.**

- 236** III.3.6.2 Análisis de los cortes geoelectricos  
**251** III.3.7 Conclusiones

**Anexo Digital III-3 (revisión de SEV)**

**III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada**

- 255** III.4.1 Primera línea de separación trazada en 1968 basándose en la Resistencia Transversal T  
**256** III.4.2 Otras versiones contemporáneas del trazado de la línea  
**258** III.4.3 Nuevas verificaciones del trazado de la línea en 1970  
**259** III.4.4 Cuantificación del límite establecido  
**261** III.4.5 Nueva verificación de la posición de la línea que separa las partes dulce y salada del acuífero en 1982.  
**263** III.4.6 Trazado de la superficie interfase en un área restringida, en 1976.  
**266** III.4.7 Nuevos trazados de la superficie de la interfase en 1995, mediante testificación de sondeos.  
**268** III.4.8 Otras mediciones de la interfase  
**270** III.4.9 Conclusiones

**Anexo Digital III-4 (interfase)**

## TOMO 2

### IV REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA

**Pag.**

**IV.1 Introducción**

- 277 IV.1.1 Objetivo y alcance de los ensayos
- 278 IV.1.2 Planificación de los ensayos
- 281 IV.1.3 Trabajos realizados

**IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos**

- 285 IV.2.1 Antecedentes
- 285 IV.2.1.1 Testificaciones con finalidad litológica
- 292 IV.2.1.2 Testificaciones para determinar la salinidad del agua
- IV.2.2 Nueva campaña de testificación realizada en 2002
- 303 IV.2.2.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2002
- 306 IV.2.2.2 Sondeos testificados en la campaña de 2002
- 307 IV.2.2.3 Instrumentación utilizada
- 309 IV.2.2.4 Presentación de los resultados
- 330 IV.2.2.5 Ficheros de datos digitales
- 330 IV.2.2.6 Información proporcionada por los registros
- 333 IV.2.2.7 Comentarios sobre la interpretación de las diagrfías de GN,RI
- 337 IV.2.2.8 Comentarios sobre la interpretación de las diagrfías de GE
- IV.2.3 Campaña de testificación de 2005
- 339 IV.2.3.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2005
- 341 IV.2.3.2 Sondeos testificados en la campaña de 2005
- 343 IV.2.3.3 Instrumentación utilizada
- 344 IV.2.3.4 Presentación de los resultados
- 345 IV.2.3.5 Ficheros de datos digitales
- 346 IV.2.3.6 Información proporcionada por los registros
- 348 IV.2.3.7 Interpretación de los registros

**Anexo Digital IV-2 (Testificación)**

**Anexo IV-2- a: Informe de testificación realizada por IGT**

**Anexo IV-2- b: Informe de testificación realizada por AGS**

**Pag.**

**IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos**

<b>407</b>	IV.3.1 Introducción
<b>407</b>	IV.3.2 Breve explicación de los métodos utilizados en el estudio
<b>407</b>	IV.3.2.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT)
<b>410</b>	IV.3.2.2 Tomografía o Perfil Eléctrico
	IV.3.3 Descripción del trabajo de campo realizado
<b>413</b>	IV.3.3.1 Trabajos de campo
<b>415</b>	IV.3.3.2 Instrumentación empleada
<b>415</b>	IV.3.4 Procesado de los datos y presentación de los resultados
<b>415</b>	IV.3.4.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT)
<b>416</b>	IV.3.4.2 Tomografía eléctrica
<b>418</b>	IV.3.4.3 Ficheros digitales.
<b>418</b>	IV.3.5 Resultados del estudio
<b>419</b>	IV.3.5.1 Zona de VETALENGUA
<b>422</b>	IV.3.5.2 Zona de MARISMILLAS
<b>423</b>	IV.3.5.3 Zona de SANTA OLALLA
<b>424</b>	IV.3.5.4 Zona de PALACIO DE DOÑANA

**Anexo Digital IV-3 (Eléctricos)**

**Anexo IV-3 Informe de trabajos presentado por IGT**

**IV.4 Perfiles de sísmica de reflexión**

<b>427</b>	IV.4.1 Objetivos de los ensayos con el método de sísmica de reflexión
<b>428</b>	IV.4.2 Resultados de las mediciones de velocidad por “down hole”
<b>432</b>	IV.4.3 Ensayos de diversas fuentes de energía para la generación de las señales sísmicas
<b>436</b>	IV.4.4. Ejecución de la campaña de medidas en los perfiles
<b>436</b>	IV.4.4.1 Parámetros de registro
<b>437</b>	IV.4.4.2 Mediciones realizadas
<b>439</b>	IV.4.4.3 Procesado de los registros y presentación de los resultados
<b>442</b>	IV.4.4.4. Ficheros digitales
<b>443</b>	IV.4.5 Comparación de resultados entre fuentes de energía
<b>449</b>	IV.4.6 Análisis de las secciones
<b>449</b>	IV.4.6.1 Sección Doñana-1 (Zona Norte)
<b>451</b>	IV.4.6.2 Sección Doñana- 2 (Zona sondeo BG-8)
<b>454</b>	IV.4.6.3 Sección Doñana- 3 (Zona Palacio de Doñana)
<b>456</b>	IV.4.6.4 Sección Doñana- 4 (Zona Palacio de Marismillas)

**Anexo Digital IV-4 (Sísmica)**

**Anexo IV-4 Informe de la campaña sísmica realizada por IGT**

**Pag.**

**459 IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas. Integración de resultados.**

**461** IV.5.1 Zona de Marismillas

**471** IV.5.2 Zona de Palacio de Doñana

**482** IV.5.3 Zona de Vetalingua

**494** IV.5.4 Zona Norte

**511** IV.5.5 Zona de Santa Olalla

**515** IV.5.6 Zona del BG8

**522** IV.5.7 Zona de Malandar

**Anexo Digital IV-5 (Datos campo IGME)**

**529**

**V RESUMEN Y CONCLUSIONES**



**REFERENCIA de los ANEXOS**  
(en soporte de papel)



**Archivados exclusivamente en el Área de Geofísica del IGME:**

- A- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SONDEOS MECÁNICOS
- B- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS
- C- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SÍSMICA
- D- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA – CARTOGRAFÍA Y VARIOS
- E- COPIAS EN FORMATO A4 DE LOS DOCUMENTOS ESCANEADOS
- F- COPIA PARCIAL DEL INFORME FINAL DE LOS SONDEOS DE LA ZONA REGABLE Y SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA.IRYDA.1976
- G- COPIA PARCIAL DEL INFORME PROYECTO PILOTO DE UTILIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR.FAO. 1972-1975. Ref. 35522
- H- INFORME SOBRE UNOS SEV REALIZADOS EN LAS MARISMAS DEL PUNTAL (SEVILLA). 1970.

**Archivados en el Centro de Documentación del IGME:**

- ANEXO IV-2-a: TRABAJOS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN LA PROVINCIA DE HUELVA. IGT. DICIEMBRE 2002.
- ANEXO IV-2-b: REGISTROS GEOFÍSICOS EN SONDEOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS. AGS. 2005.
- ANEXO IV-3: ENSAYOS GEOFÍSICOS EN EL ÁREA DE DOÑANA. IGT. DICIEMBRE 2001.
- ANEXO IV-4: TRABAJOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN EN EL ACUÍFERO DE ALMONTE-MARISMAS. IGT. 2002-2004
  
- ANEXO ESPECIAL 1- Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir.Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967.
- ANEXO ESPECIAL 2- Projet du Guadalquivir. UNSF/FAO Interprétation d´ensemble des sondages électriques des zones d´Almonte et des Marismas. Astier. 1970.



## **ANEXO A**

### **DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SONDEOS MECÁNICOS**

**Contenido:**

- 1 - Columnas y fichas de sondeos que forman el perfil 1 del informe 35963**
- 2 - Salidas en papel de los ficheros MM.xls y BaseFinal(>20).xls, de la base de datos de sondeos.**
- 3 - Mapa sondeos BG**
- 4 - Ficha de construcción de los sondeos III-11-11, III-11-11bis, III-10-7, III-12-49, IV-5-1**
- 5 - Relación y fichas de sondeos profundos del Archivo de Hidrocarburos.**
- 6 - Ficha de construcción de los sondeos Mazagón-3 y IV, Villarrasa, Niebla I y II, Bonares**

## ANEXO B

### DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS

#### Contenido:

#### 1- Testificaciones procedentes del Informe *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559*

- Fig. 164 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Se presentan copias de los registros originales. Los correspondientes a los sondeos mecánicos BG-6 (34-1033) y BG-7 (35-1033), se han digitalizado.

Sondeo	Nº Invent.	Toponimia	Prof.	FECHA	testificación
BG-6	114310004		210	1968	PS,R,R16-64"
BG-7	114360006		218	1968	PS,R,R64-16"
BG-8	114310005	Charco del Toro	300	1968	PS,R

Con columna litológica y construcción del BG-6

#### 2- Testificaciones procedentes del Informe *Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538,*

- Fig. 165 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Se presentan copias de los registros originales:

sondeo	Nº Invent.	Toponimia	Prof	fecha	testificación
JR-1	P102	Lucio del Lobo	100	1974	GN
M-6-5	114230024		186	1974	GN
M-8-14	114230049		138	1974	GN, PS, R
AM-1	114220018		130	1974	GN,PS,R

Con columna litológica y/o ficha de base datos sondeos IGME

#### 3- Testificaciones procedentes del Informe *Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408,*

Fig. 167 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006:

Sondeo S-2 de Mazagón, digitalizado. (gamma natural, neutrón, gamma-gamma y diámetro del sondeo)

**4-Testificaciones procedentes del *Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963.***

Fig. 169 y 170 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006:

Nº registro	Denominación	testificación	profundidad test	Aparato
114170034	I-2-5	GN,T,dT,C	65	CC
114180079	I-6-2	GN,T,dT,C	65	CC
114220018	AM-1	GN,T,dT,C	120	CC
114220045	AM-5	GN,T,dT,C	87	CC
114230035	AM-10	GN,T,dT,C	98	CC
114220013	M-1-1	GN,T,dT,C	135	CC
114220025	M-2-6	GN,T,dT,C	102	CC
114220037	M-4-3	GN,T,dT,C	105	CC
114230030	M-6-3	GN,T,dT,C	132	CC
114170069	AM-13	GN,T,dT,C	110	CC
114230062	M-7-6	GN,T,dT,C	82	CC
114210156	Pichiricha-4	GN,T,dT,C	105	CC
114160018	L.Anguila-1	GN,T,dT,C	65	CC
114220047	Juncos-1	GN,T,dT,C	65	CC
114240021	C. Bombas	GN,T,dT,C	175	CC
114180096	Pescante	GN,T,dT,C	145	CC
114170034	I-2-5	T,C	60	INS
114180079	I-6-2	T,C	60	INS
114170110	I-4-19	T,C	60	INS
114170120	I-8-8	T,C	60	INS
114220017	AM-3	T,C	80	INS
114170138	AM-12	T,C	80	INS
114220039	M-1-5	T,C	65	INS
114220023	M-2-3	T,C	65	INS
114260002	M-2-7	T,C	65	INS
114220022	M-3-4	T,C	55	INS
114260006	M-4-5	T,C	80	INS
114220014	M-4-7	T,C	95	INS
114230060	M-5-5	T,C	60	INS
114230061	M-6-8	T,C	140	INS
114170073	M-8-4	T,C	65	INS
114270023	Casa Lobo	T,C	48	INS
114280006	Lucio Cangrejo	T,C	105	INS

CC: equipo de medición continua Century Compulog

INS: equipo de medición discreta Instran

Para todos ellos se adjunta esquema de columna litológica

## 5- Testificaciones facilitadas por la UPC

- Fig. 171 del Informe Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

-Testificaciones de los sondeos Vet Lengua S57, Marismillas S59, Palacio Doñana S49, Malandar

sondeo	Nº Invent.	Toponimia	Prof	FECHA	testificacion
C19-S49	114310016	Palacio Doñana	164	15-mar-99	T,C
C19-S49	114310016	Palacio Doñana	164	24-nov-00	T,C
C19-S49	114310016	Palacio Doñana	164	11-jun-96	T,C
MARISM59-C24	114360020	Palacio de Marismillas	289	06-may-97	T,C
MARISM59	114360020	Palacio de Marismillas	289	21-oct-99	T,C
MARISM59	114360020	Palacio de Marismillas	289	01-mar-00	T,C
MARISM59	114360020	Palacio de Marismillas	289	06-may-97	T,C
MARISM59	114360020	Palacio de Marismillas	289	21-oct-99	T,C
VETA57	114360018	Vet Lengua	190	06-may-97	T,C
VETA57	114360018	Vet Lengua	190	01-mar-00	T,C
VETA57	114360018	Vet Lengua	190	01-mar-00	T,C
VETA57	114360018	Vet Lengua	190	21-oct-99	T,C
MALANDAR		Cuartel de Malandar		01-mar-00	T,C

## 6- Testificaciones facilitadas por IGME-SEVILLA

Fig. 172 del Informe Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Campaña CGS (sin fecha)

sondeo	Toponimia	testificación
C1-S1	El Pescante	GN, T,C
C10-S21	El Alamillo *	GN, T,C
C14-S32	El Abalarío *	GN, T,C
C15-S37	Depuradora El Rocio *	GN, T,C
C16-S40	Hotel Coto *	GN, T,C
C17-S41	Guardia Civil Matalascañas *	GN, T,C
C2-S2	Casa Bombas	GN, T,C
C21-S54	Partido Resina *	GN, T,C
C9-S18	Los Mimbrales *	GN, T,C
C4-S5	La Juncosilla (o Portachuelo) *	GN, T,C
C7-S13	Chozas del Raposo *	GN, T,C
C19-S49	Palacio Doñana	GN, T,C
C5-S15	Los Caracoles	GN, T,C
C6-S12	Casa de la Pichiricha	GN, T,C

\* se adjunta esquema de columna litológica y de construcción del sondeo

- Testificaciones realizadas con un equipo Mount-Soupris probablemente en 1996.

sondeo	Toponimia	testificación
C1-S1	El Pescante *	GN
C17-S41	Guardia Civil Matalascañas	GN,T,C
C2-S2	Casa Bombas *	GN
C24-S59	Palacio de Marismillas	GN,PE,C,T,R
C19-S49	Palacio Doñana *	GN
C5-S15	Los Caracoles *	GN
C3-S57	Vetalengua	GN,T,C

Para todos ellos se adjunta esquema de columna litológica y de construcción del sondeo, así como ficha Informe del Sondeo (\*)

### 7- Testificaciones procedentes del sondeo Lucio Mari López efectuada por Tragsa en 1999

Parámetros: Gamma natural, Conductividad y temperatura del fluido de todo el sondeo (157 m), y de PS, Resistividad larga (64") y corta (16") desde el metro 80. Con ficha de construcción del sondeo.

### 8- Testificaciones procedentes del sondeo Poblado Escobar-2 (Veta La Palma, Sevilla). 2004

Facilitado por la Universidad de Salamanca.

Parámetros: Resistividad y temperatura del fluido, gradiente de temperatura, Resistividad Normal 16" y 64", Resistividad lateral, Potencial Espontáneo, Gamma natural, Resistencia monoelectrónica, Verticalidad y desviación. Con Informe completo de AGS y coordenadas sondeo.

### 9- Copia en papel de los datos de litología del fichero BaseLitologica.xls referentes a los sondeos testificados en la campaña de 2002 Y 2004

AM-3, AM-4, AM-5, AM-12

M-1-1, M-6-6

IV-3-3, V-1-9

BG-8

VETALENGUA S56

CASA BOMBAS

PALACIO MARISMILLAS S59

PALACIO DOÑANA S49

LOS CARACOLES

SANTA OLALLA

FEDER IV (HATO RATON)

MARI LOPEZ

MATALASCAÑAS

EL ABALARIO

EL ALAMILLO

LOS MIMBRALES

DEPURADORA

PICHIRICHA

RAPOSO

JUNCOSILLA

PARTIDO RESINA

ASPERILLO

SULFUSARUS

## ANEXO C

### DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SÍSMICA

- **Reproducciones en papel escala 1/20.000 (líneas PF) y 1/10.000 (HV) de las líneas de Hidrocarburos:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

- **Reproducciones en papel tamaño A3 de las siguientes líneas:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39,

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

PF-9, PF-10, PF-11, PF-12, PF,13

MA-01, MA-02, MA-03, MA-04

- **Reproducciones en papel tamaño A3 de las siguientes líneas, con facies marcadas:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39,

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

PF-9, PF-10, PF-11, PF-12, PF,13

MA-04

- **Reproducciones en papel escala 1/5.000 de las líneas registradas en el Proyecto:**

-Perfil Doñana 1 (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 1 Vibro (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 2(tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 3 (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 4 (tiempo twt y profundidad)

## ANEXO D

### DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA – CARTOGRAFÍA Y VARIOS

#### 1- Documentos relativos a la interfase agua dulce-salada

- Informe sobre la intrusión marina 1982 Ref. 35915
- Red de intrusión marina abril 1982 . Ref 35910
- Red de control de acuíferos 1993-94., Ref. 35951

#### 2- Copias de algunos mapas de los informes de Astier 1970 e IRYDA 1976

- **Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.**

PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal: **26PL-1.tif**

- **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.**

- plano 15 (espesores hasta el fondo impermeable): **32PL-15.tif** y **32PL15-curvas.xls**
- plano 16 (cotas del fondo impermeable): **32PL-16.tif** y **32PL16-curvas.xls**
- plano 23 Situación de los perfiles
- plano 24 Perfiles V-1 a V-4
- plano 25 Perfil V-5
- Plano 26 perfiles V-6 a V-8
- Plano 27 perfiles H-1 y H-2
- Plano 28 perfiles H-3 y H-4
- Plano 29 perfil H-5

#### 3- Reproducciones en papel de los mapas cartográficos "Mulhacen" 1:20.000

## **ANEXO E**

### **COPIAS EN FORMATO A4 DE LOS DOCUMENTOS ESCANEADOS**

## **ANEXO F**

### **COPIA PARCIAL INFORME FINAL DE LOS SONDEOS DE LA ZONA REGABLE Y SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA.IRYDA.1976**

Contenido:

- Introducción
- Testificación eléctrica
- Tiempos de perforación
- Hidrogeología del acuífero Almonte-Marismas
- Perfiles litológicos
- Anexo 1-Fichas de datos hidrogeológicos de sondeos
- Planos:
  - 14-Espesor hasta el fondo impermeable
  - 15-Potencia del acuífero
  - 16-Cota del fondo impermeable (sector riego)
  - 41-Cotas del fondo impermeable de todo el acuífero
  - 23 a 29 Perfiles litológicos H y V
  - 31-32 Situación de la interfase en profundidad (sector riego)
  - 37- Datos hidrogeológicos de sondeos fuera de la zona regable

## **ANEXO G**

### **COPIA PARCIAL DEL INFORME PROYECTO PILOTO DE UTILIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR. FAO. 1972-1975. Ref. 35522**

Contenido:

- Copia parcial del informe técnico 1:

Mapa I.2.2 Prospección Geofísica Sondeos Eléctricos Verticales

Mapa I.2.4 Espesor del terreno acuífero

Mapa I.2.5 Fondo impermeable

Mapa I.2.6 Profundidad hasta el agua

Mapa I.2.7 Hidrogeología

- Copia parcial del informe técnico 7

Mapa posición sondeos

Perfiles de resultados hidrogeológicos

Columnas y construcción sondeos: IV-5-1, III-12-49, III-10-7, III-11-11, III-11-11bis

- Copia parcial Informe técnico 4 (Tablas información hidrogeológica sondeos BG)

## **ANEXO H**

### **INFORME SOBRE UNOS SEV REALIZADOS EN LAS MARISMAS DEL PUNTAL (SEVILLA). 1970.**

(Copia del original existente en la Oficina del IGME en Sevilla)

## **ANEXO IV-2-a**

### **TRABAJOS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN LA PROVINCIA DE HUELVA. IGT. DICIEMBRE 2002.**

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos de testificación realizados en 2002. Su contenido se encuentra recogido en el capítulo IV-2. En este Anexo se pueden consultar reproducciones de las testificaciones en formato A3.

## **ANEXO IV-2-b**

### **REGISTROS GEOFÍSICOS EN SONDEOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE- MARISMAS. AGS. 2005.**

Informe original entregado por la empresa AGS, referente a los trabajos de testificación realizados en 2005. Su contenido se encuentra recogido en el capítulo IV-2.

## **ANEXO IV-3**

### **ENSAYOS GEOFÍSICOS EN EL ÁREA DE DOÑANA. IGT. DICIEMBRE 2001.**

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos realizados en las zonas de Vetalegua, Marismillas y Palacio de Doñana de SEDT y Perfil Eléctrico. Su contenido está recogido en el capítulo IV-3: Ensayos previos por métodos eléctricos.

## **ANEXO IV-4**

### **TRABAJOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN EN EL ACUÍFERO DE ALMONTE-MARISMAS. IGT. 2002-2004**

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos de sísmica realizados en las zonas de Norte, sondeo BG-8, Palacio de Doñana y Palacio de Marismillas. Se recogen también los trabajos de ensayos de fuentes sísmicas. Su contenido está recogido en el capítulo IV-4: Perfiles de Sísmica de Reflexión.

## **ANEXO ESPECIAL 1**

### **Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967.**

Informe del supervisor de la campaña de SEV efectuada por Prakla en el Guadalquivir, antes de dar por concluidos los trabajos sobre el terreno. Se refiere a las zonas de Orce, Huescar, Dólar, **Marismas** y Jerez de los Caballeros (campaña hecha por el IGME). Contiene el primer trazado de línea de separación entre agua dulce y salada.

Contiene una Memoria de 19 páginas y 4 Planos:

- PL-1 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´ORCE
- PL-2 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´HUESCAR
- PL-3 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´DOLAR
- PL-4 Interpretation des sondages electriques. ZONE DES MARISMAS. Septembre 1967
- PL-4 Interpretation des sondages electriques. ZONE DES MARISMAS. Octobre 1967

**DOCUMENTO INÉDITO DE GRAN INTERÉS.**

## **ANEXO ESPECIAL 2**

### **Projet du Guadalquivir. UNSF/FAO Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970.**

Este documento puede considerarse la síntesis de todos los trabajos geoelectricos anteriores, y la base para los posteriores estudios hidrogeológicos del Proyecto Guadalquivir. Se trata de la reinterpretación conjunta de 380 SEV, con una Memoria de 10 páginas y los siguientes documentos en escala 1/100.000:

- PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal
- PL 2: Zona Almonte. Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m)
- PL 3: Zona de Almonte. Resistividad del acuífero principal
- PL 4: Zona de Almonte. Profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales.
- PL 5: Zona de Marismas. Límite entre agua dulce – agua salada.
- PL 6 y 7: Cortes geoelectricos de 10 perfiles, a escala 1/50.000, cuya situación se indica en todos los planos anteriores.

Se ha añadido un listado anónimo de profundidad de las margas azules, cuya indicación puede referirse a la denominación de los SEV.

**DOCUMENTO INÉDITO DE GRAN INTERÉS.**



## **PUBLICACIONES EFECTUADAS:**

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2003. **AVANCE DE LOS TRABAJOS GEOFÍSICOS ÚLTIMAMENTE REALIZADOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA, HUELVA, ESPAÑA)**. Libro de Comunicaciones TIAC'03. Alicante. IGME, SERIE HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS Nº 8. TOMO I.2003. pp 177-186. ISBN 84-7840-470-8.

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2004. **NUEVAS TESTIFICACIONES GEOFÍSICAS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS**. IV ASAMBLEA HISPANO-PORTUGUESA DE GEODESIA Y GEOFISICA Figueira da Foz. PORTUGAL. S08.8 pp 367-368.

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2005. **STUDY OF THE SALT WATER- FRESH WATER INTERFACE IN ENVIRONMENTS OF LOW RESISTIVITY: DOÑANA AQUIFER (SPAIN)**. GROUND WATER AND SALINE INTRUSION. SELECTED PAPERS FROM 18<sup>TH</sup> SWIM Cartagena. 2004. pp 435-446. Publicaciones del IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº15. ISBN 84-7840-588-7.Madrid.

PLATA J.L., RIVEIRA M., IBARRA P. 2008. **RECOVERING OLD GEOPHYSICAL DOCUMENTS FOR DEEP AQUIFER RESEARCH**. CD Extended Abstracts Near Surface 2008 EAGE. Cracovia (Polonia). ISBN 978-90-73781-56-6

