



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

PROYECTO PARA EL DESARROLLO DE LA
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION DE
LA INTRUSION SALINA MEDIANTE TECNI
CAS GEOFISICAS EN ACUIFEROS COSTE-
ROS.



I N D I C E

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	3
3. MEDIDAS REALIZADAS Y DURACION DE LA INVESTIGACION	4
4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	6

ANEXOS

Artículos científicos publicados como consecuencia de este trabajo:

1. El Método de Polarización Inducida como técnica de apoyo al estudio de las intrusiones marinas. Aplicación a los acuíferos costeros de Almuñécar y Castell de Ferro (Granada).
Autores: DOMINGUEZ, S.; DIAZ CURIEL; J.; ROZYCKI, A.; MALDONADO ZAMORA, A.
TIAC'88

2. Comparación de técnicas geofísicas en superficie y en sondeo hacia la detección de intrusión marina. Aplicación al Campo de Dalías (Almería).
Autores: DOMINGUEZ, S.; ROZYCKI, A.; Del CAMPO, M.; RAMOS, G.
TIAC'88



1.- INTRODUCCION

La utilización de técnicas geofísicas en la definición del estado y evolución de un proceso de intrusión marina, no ha tenido un papel especialmente relevante en dicho tipo de estudios, aunque el Instituto Tecnológico - GeoMinero de España, en los últimos años, ha desarrollado varios proyectos con el fin de promover su aplicación a este campo.

En esta línea, y a nivel nacional, se han aplicado varios métodos geofísicos que se pueden resumir en:

Métodos de superficie

- Corriente continua.
 - . Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.).
- Polarización Inducida.
 - . Sondeos de Polarización Inducida en el Dominio de Tiempos (S.P.I.).
- Corriente alterna o de campo variable.
 - . Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT).
 - . Perfiles Electromagnéticos en el Dominio de Frecuencias (PEDF).

Métodos en sondeo

- Eléctricos.
 - . Conductividad del fluido del sondeo.
- Temperatura.



Dado que la premisa fundamental en el planteamiento de una campaña de prospección geofísica es la elección de las variables físicas más determinantes y diferenciadoras de aquello que se pretende estudiar (contraste físico), - del anterior resumen cabe concluir que son los parámetros eléctricos los -- más resolutivos en este tipo de estudios. La explicación reside en la elevada influencia del agua de las formaciones en dichos parámetros, puesto que la conducción eléctrica de los medios no metálicos es de tipo iónico.

Ante esta variedad de técnicas a utilizar, cabe preguntarse cual o cuales - resultan más apropiados de emplear pues, aunque es conocido el hecho de -- que, a mayor número de técnicas empleadas, menores son las indeterminaciones interpretativas, la componente económica nos obliga a la elección de el (los) método(s) más rentable(s), en el sentido de máxima información a un - mínimo costo.

Con la finalidad de avanzar en la determinación de la metodología idónea se ha desarrollado este proyecto, trazándose como objetivos preferentes los -- que a continuación referimos.



2.- OBJETIVOS

Los tres objetivos fundamentales resultan claramente diferenciados, pero se complementan perfectamente, y son:

- Comparación de los resultados obtenidos mediante distintas técnicas - geofísicas de superficie, sensibles a cambios de salinidad, cuyos problemas aparecen como resultados del enmascaramiento de la señal por la anisotropía vertical y horizontal, con los obtenidos mediante técnicas geofísicas en sondeo, donde dicho inconveniente se minimiza notablemente, para terminar comparando ambos métodos indirectos con la propia columna litológica obtenida de dicho sondeo. Con el fin de "testear" la resolución de los métodos se tomaron los datos en una zona geológica y geofísicamente compleja.
- En el caso de que, una vez decidida la técnica más resolutive, no lo sea suficientemente como para prácticamente aliviar los problemas de indeterminación interpretativa, elegir y avanzar en el desarrollo del método complementario, tanto de forma teórica como práctica.
- Exponer los resultados obtenidos a la Comunidad Científica en el Simposio Internacional sobre Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (TIAC'88) del 30 de Mayo al 3 de Junio.



3.- MEDIDAS REALIZADAS Y DURACION DE LA INVESTIGACION

Para el desarrollo del primero de los objetivos, se realizaron un total de 2 SEDT, 2 SEV, 2 SPI en un radio de 200 m, alrededor del sondeo A-10, situado en la localidad de Aguadulce (Almería), dentro del Campo de Dalías - (Anexo I).

Los resultados fueron comparados con los obtenidos dentro de dicho sondeo mediante testificación geofísica, realizándose medidas de los siguientes - parámetros:

- Resistividad normal corta con $\overline{AM} = 0.4$ m
- Resistividad normal larga con $\overline{AM} = 1.6$ m
- Resistividad lateral con $\overline{AO} = 1.8$ m
- Resistencia monoelectrónica.
- Potencial Espontáneo.
- Gamma natural.
- Gamma-Gamma.
- Neutrón-Neutrón.
- Diámetro.
- Conductividad y Temperatura antes del desarrollo del sondeo.
- Conductividad y Temperatura después del desarrollo del sondeo.
- Polarización Inducida y Potencial Espontáneo.
- Resistividad focalizada.
- Electromagnético en dominio del tiempo.



Todos los registros de la testificación se obtuvieron de forma continua de 0 a 500 m, excepto los tres últimos parámetros, tomados de forma discreta cada 10 m. Para la adquisición de los datos de Polarización Inducida, Potencial Espontáneo y Resistividad focalizada, se diseñó y construyó por los autores un dispositivo introducible en el sondeo, siguiendo una configuración del tipo "guard-laterolog" con el fin de evitar apantallamiento de las medidas por el lodo conductor, tomándose éstas de 190 a 350 m.

Toda la campaña de adquisición de datos se realizó del 3 al 9 de Febrero de 1988 y remitimos al lector al Anexo I para conocer con detalle los resultados obtenidos.

Para abordar el segundo objetivo y en virtud de las conclusiones deducidas del primero, en cuanto a la necesidad de utilizar técnicas de apoyo al estudio de resistividades, se realizaron un total de 13 SEV - SPI en los acuíferos detríticos de Almuñécar, Castell de Ferro y El Pozuelo, en la provincia de Granada (Anexo II).

Para la obtención de los datos se siguió una metodología inhabitual en este tipo de prospecciones, avanzándose en la técnica de reconstrucción de la curva de despolarización del medio, como paso fundamental en el tratamiento previo de los datos, con más detalle se puede seguir en el Anexo II.

Por último, se interpretaron conjuntamente los datos de polarizabilidad con los de resistividad, siguiendo el método de Seigel modificado por otros autores (ROY y PODDAR, 1981), de donde se pudo concluir la importancia de la medida conjunta de ambos parámetros para la minimización de ambigüedades interpretativas en estudios sobre acuíferos salinizados en general.

La campaña de toma de datos se realizó del 4 al 14 de Abril de 1988.



4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En primer lugar y tras la comparación de medidas en superficie y en sondeo (Fig. 8, Anexo I) en un área estructuralmente compleja como es el Campo de Dalías (Almería) se concluye:

- Las medidas de superficie han de resultar puntuales para evitar recoger información de heterogeneidades laterales que aumentan el ruido geológico. En este sentido, los métodos de corriente variable y, entre ellos, el SEDT demuestra una excelente resolución para los problemas tratados.
- Se comprueba como parámetros utilizados en testificación geofísica sencillos y rápidos de medir, como la temperatura o el potencial espontáneo, pueden apoyar el seguimiento de los procesos de intrusión marina de forma cualitativa.
- La necesidad de utilizar técnicas complementarias a las de resistividad en áreas donde, a pesar de las variaciones en litología y salinidad del acuífero, los contrastes de dicho parámetro no son muy importantes, resulta patente, ya que consigue facilitar la elección del modelo adecuado. En este sentido, los SPI y la testificación geofísica, esta última para obtener datos "in situ", parecen adecuados.

Como complemento a la última conclusión y como resultado de las investigaciones realizadas en los acuíferos cuaternarios de Almuñécar, Castell de Ferro y El Pozuelo (Granada), se pueden establecer las consideraciones finales siguientes:

- . Los métodos en corriente continua tipo SEV sí son realmente utilizados de forma adecuada para la finalidad propuesta en acuíferos sin complejidad estructural elevada y en prospecciones de relativamente somera - profundidad de investigación (hasta 100 m), tanto por motivos científicos como económicos.



- . El parámetro polarizabilidad puede, ciertamente, complementar al parámetro resistividad para reducir ambigüedades en la asignación de parámetros físicos a geológicos, coordinación que resulta aún más necesaria - en el estudio de salinización de acuíferos, en general, tanto para realizar un seguimiento de los mismos como para prospectar niveles no contaminados.
- . El análisis de la curva de despolarización del medio permite no solamente trabajar con el parámetro "polarizabilidad", sino también con la -- "constante de decaimiento", así como evitar la adquisición de datos -- erróneos debidos a otras causas (acoplamiento electromagnético).

A N E X O S

EL METODO DE POLARIZACION INDUCIDA COMO TECNICA DE APOYO
AL ESTUDIO DE LAS INTRUSIONES MARINAS. APLICACION A LOS
ACUIFEROS DE ALMUÑECAR Y CASTELL DE FERRO (GRANADA)

DOMINGUEZ DE LA RASILLA, S.; DIAZ CUIEL, J.; ROZYCKI, A; MALDONA
DO ZAMORA, A.

Departamento de Ingeniería Geológica. Cátedra de Geofísica Aplicada. E.T.S.I.
de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.

RESUMEN

El método de Polarización Inducida constituye una herramienta de apoyo básica a la medición de resistividades en el estudio de acuíferos salinizados por intrusión marina.

Se propone la homogeneización de las medidas de P.I., utilizando el concepto de polarizabilidad a través del análisis de la curva de descarga, tanto por determinar una propiedad intrínseca de la roca, como por la mejora de resultados.

Se aplica la metodología propuesta a los acuíferos cuaternarios de Almuñecar y Castell de Ferro en la Costa del Sol de Granada.

INTRODUCCION

La utilización de varios métodos geofísicos que complementen las medidas de resistividad en acuíferos con hidroquímica y litología variable, como es el caso de los acuíferos detríticos costeros salinizados por intrusión marina, resulta indispensable si se pretende reducir las ambigüedades interpretativas.

El método de polarización inducida puede ser una herramienta importante en este sentido, tanto por las indeterminaciones que evita como por sus posibilidades de utilización simultánea con la medición de resistividades.

Este estudio pretende resaltar la necesidad de su utilización con la finalidad propuesta, planteando una metodología de la toma de datos y ulterior tratamiento.

La presente comunicación forma parte de la línea de investigación de la intrusión marina mediante técnicas geofísicas que el Departamento de Ingeniería Geológica desarrolla en la actualidad en colaboración con ENADIMSA e IGME.

REDUCCION DE AMBIGUEDADES INTERPRETATIVAS. UNA NECESIDAD

La asignación de parámetros físicos tipo resistividad a las características geológicas de una formación, resulta parcialmente subjetiva en virtud de los

conocimientos previos de la zona y de la experiencia del interpretador. En la necesidad de homogeneizar este proceso y con la finalidad de reducir -- las ambigüedades, cada día se tiende más a solucionar un problema geofísico mediante distintas técnicas tratadas conjuntamente.

Un determinado valor de resistividad es función de una gran cantidad de -- variables geológicas. Algo parecido le ocurre a la polarizabilidad de una roca. Pero el peso de dichas variables actúa de distinta forma (WORTHINGTON y COLLAR, 1984), lo cual permite la exclusión de algunas al comparar ambos parámetros entre sí. A esto se añade el distinto comportamiento de los -- dos ante el principio de equivalencia y el de supresión, determinándonos -- mejor, por comparación, el número y situación de las capas.

Así, al estudiar zonas con acuíferos total o parcialmente salinizados, susceptibles de ser confundidos con niveles arcillosos a través del método de resistividades, (tanto en corriente alterna como continua) es inevitable -- la aplicación de la polarización inducida como técnica de apoyo. Este es -- el caso del seguimiento de procesos de intrusión marina en acuíferos detri-- ticos costeros. Con la finalidad de poner en evidencia lo expuesto, se es-- tudieron los acuíferos de Almuñecar y Castell de Ferro, en la Costa del -- Sol de Granada.

METODOLOGIA DE LA ADQUISICION Y ELABORACION DE LOS DATOS

a) Instrumentación y toma de datos

Se realizaron un total de 13 sondeos eléctricos verticales y de polariza-- ción inducida (SEV-PI) con dispositivo Schlumberger y distancia inter-- electrodica final (AB) de 500 m. La instrumentación consistió en un -- transmisor de onda cuadrada Scintrex TSQ-3 (3 kW) con pulsos de carga -- 4 seg y cambios de polaridad alternativa conectado a dos electrodos de -- acero. El receptor Scintrex IPR-10A, obtuvo medidas en seis ventanas de tiempo espaciadas 520 ms desde 260 ms a 3120 ms, con el fin de estu-- diar la curva de descarga. Las lecturas de resistividad se realizaron si-- multáneamente con las de cargabilidad.

Se define cargabilidad (m) como:

$$m = \frac{V_{st}}{V_p} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_s dt + V_r}{t_r \cdot V_p} \quad (\text{mv/v})$$

donde:

V_s = Potencial secundario

V_p = Potencial primario

t_r = Período de integración ($t_2 - t_1$)

V_r = Potencial residual

b) Análisis de la curva de descarga

El estudio de la curva de descarga del medio al ser sometido a una diferencia de potencial V_p durante un pulso de carga T , presenta muchas ventajas respecto a la medición del V_s en una sola ventana, entre las cuales destacan:

- Disminuye los errores instrumentales y de ruidos

Se observa al estudiar la curva total que el ajuste de los puntos a una función exponencial o suma de ellas no coincide perfectamente en algunos casos, sobre todo en medidas realizadas con bajo valor de V_p . Sin embargo, utilizando la totalidad de la curva de descarga medida P se puede disminuir dicho efecto.

- Pérdida de información

Se puede comprobar como dos curvas de descarga distintas pueden tener la misma cargabilidad. Analizando la curva entera comprobaríamos que tanto el punto de corte en $t = 0+$ como el tipo de decaimiento son diferentes.

- Medida intrínseca de la roca

La elección de la ventana de lectura o tiempo de integración se realiza en base a evitar efectos de acoplamiento electromagnético y ruidos en general. Al ser V_s función de la ventana elegida, el valor de m obtenido no será un parámetro intrínseco. Sin embargo, analizando la curva de descarga se puede evitar esta relatividad de la medida expresando la descarga del medio en función del valor de V_s en $t = 0+$ (V_0) y la constante de tiempo de la curva de caída de potencial (τ).

- Duración del acoplamiento EM

El efecto de inducción electromagnética aumenta con el cuadrado de la distancia de los electrodos y las conductividades de los niveles prospectados. Es por lo que no podemos estar seguros de que la ventana no quedará afectada por el efecto de acoplamiento en toda la campaña. Sin embargo, mediante la curva de descarga seremos capaces de determinar en cada posición de los electrodos hasta cuando interviene dicho efecto, para eliminarlo o tenerlo en cuenta.

En general, se puede expresar la descarga del medio al ser sometido a una diferencia de potencial V_p , como una función de tiempo:

$$V_s(t) = a_1 \cdot e^{-t/\tau_1} + a_2 \cdot e^{-t/\tau_2} + \dots + a_n \cdot e^{-t/\tau_n}$$

En la práctica, con el ajuste a una suma de las dos primeras funciones exponenciales más un valor residual hacia el cual la curva de descarga es asintótica, queda perfectamente expresado el fenómeno en la mayo-

ría de los casos:

$$V_s(t) = V_{oA} \cdot e^{-t/\tau_1} + V_o \cdot e^{-t/\tau_2} + V_r$$

donde el primer término es debido, fundamentalmente, a la respuesta inductiva del medio y el segundo a la despolarización del mismo. Con el fin de encontrar el momento en que deja de actuar un efecto y comienza el otro y dados los escasos puntos de lectura de que se dispone, ya que resulta de un compromiso entre rentabilidad y precisión del estudio, se propone la expresión de ajuste:

$$V_s(t) = (V_{oA} + V_o) \cdot e^{-(t/\tau_T)^n}$$

Como herramienta para el estudio previo de la curva, donde el valor de τ_T nos indica dicho instante y n el signo del acoplamiento.

El valor de τ_T alrededor del cual deja de predominar el efecto de acoplamiento se obtiene de la intersección de las funciones $(t/\tau_T)^n$ y t/τ_T . Con este valor se puede hallar el valor de τ de la despolarización neta por el proceso de optimización.

Dado que V_s es función del pulso de carga (T) y bajo la premisa de que el proceso de carga es igual al de descarga (ZONGE et al, 1971):

$$V_o = V_M (1 \cdot e^{-T/\tau_2})$$

donde V_M sería el valor de V_s en $t = 0+$ si $T = \infty$.

Al ser también función del potencial primario (V_p), se deberá expresar respecto a éste, apareciendo la polarización como:

$$P(t) = P_A \cdot e^{-t/\tau_1} + P_M \cdot e^{-t/\tau_2} + P_r$$

donde P_M será la polarizabilidad intrínseca del medio independiente ya de los factores de medida.

Se estudió la curva de descarga en cada posición electródica, tratándose se los datos de forma automática, tal y como aparece en la Fig. 1 y 2, para obtener los valores de P_M , τ_2 y P_A . En la primera de ellas el campo eléctrico está aún por encima de la interfase agua dulce-agua salada, presentándose un acoplamiento positivo. Sin embargo, en la segunda figura, P_M y P_A disminuyen, igualmente que τ , perdiendo el medio capacidad de polarizarse y apareciendo una inducción opuesta al campo creado. Este efecto ocurre al penetrar el campo eléctrico por debajo de la interfase.

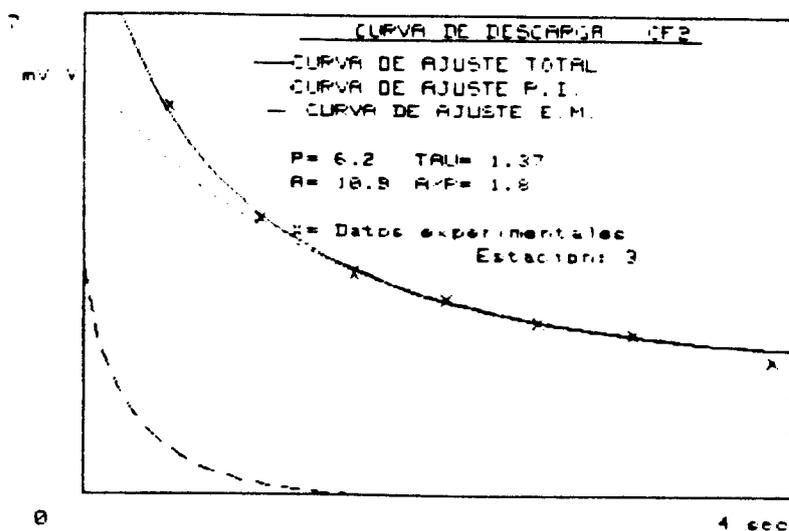
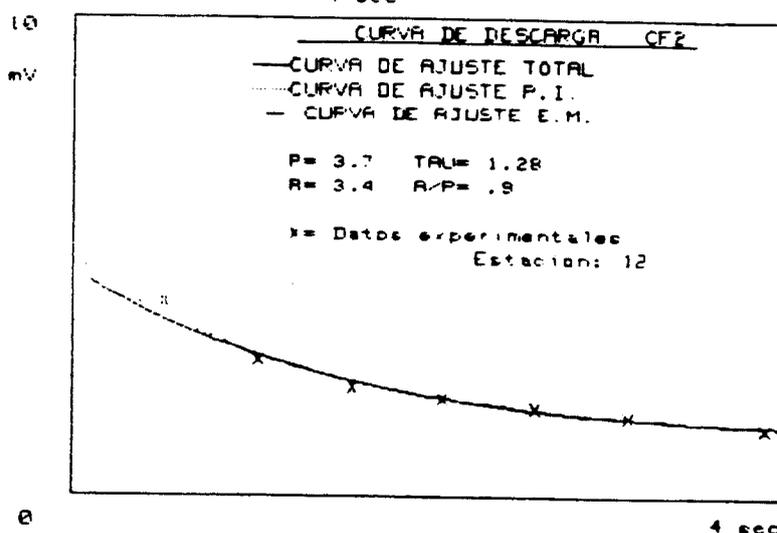


Fig. 1

Fig. 2



Del estudio realizado se observa que el valor medio de τ por encima de la interfase es 1.4 seg, mientras que por debajo es 1.2 seg.

INTERPRETACION

Los datos de resistividad aparente de cada SEV-PI fueron interpretados mediante el ajuste semi-automático de una curva generada a partir de un modelo inicial. El método utilizado para generar dicha curva se basa en la convolución de espesores y resistividades con el filtro de Ghosh.

De otro lado, los datos de polarizabilidad (P_M) fueron interpretados con la misma metodología, variando el aparato matemático que genera las curvas. Para ello nos basamos en la expresión propuesta por Seigel (1959), modificada por ROY y PODDAR (1981), para n capas:

$$P_a(r) = \frac{\rho_a(r)(\rho_i + P_i \cdot \rho_i) - \rho_a(r)(\rho_i)}{\rho_a(r)(\rho_i)} \quad (i = 1, n)$$

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	3
3. MEDIDAS REALIZADAS Y DURACION DE LA INVESTIGACION	4
4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	6

ANEXOS

Artículos científicos publicados como consecuencia de este trabajo:

1. El Método de Polarización Inducida como técnica de apoyo al estudio de las intrusiones marinas. Aplicación a los acuíferos costeros de Almuñécar y Castell de Ferro (Granada).
Autores: DOMINGUEZ, S.; DIAZ CUIEL; J.; ROZYCKI, A.; MALDONADO ZAMORA, A.
TIAC'88

2. Comparación de técnicas geofísicas en superficie y en sondeo hacia la detección de intrusión marina. Aplicación al Campo de Dalías (Almería).
Autores: DOMINGUEZ, S.; ROZYCKI, A.; Del CAMPO, M.; RAMOS, G.
TIAC'88



1.- INTRODUCCION

La utilización de técnicas geofísicas en la definición del estado y evolución de un proceso de intrusión marina, no ha tenido un papel especialmente relevante en dicho tipo de estudios, aunque el Instituto Tecnológico - GeoMinero de España, en los últimos años, ha desarrollado varios proyectos con el fin de promover su aplicación a este campo.

En esta línea, y a nivel nacional, se han aplicado varios métodos geofísicos que se pueden resumir en:

Métodos de superficie

- Corriente continua.
 - . Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.).
- Polarización Inducida.
 - . Sondeos de Polarización Inducida en el Dominio de Tiempos (S.P.I.).
- Corriente alterna o de campo variable.
 - . Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT).
 - . Perfiles Electromagnéticos en el Dominio de Frecuencias (PEDF).

Métodos en sondeo

- Eléctricos.
 - . Conductividad del fluido del sondeo.
- Temperatura.



Dado que la premisa fundamental en el planteamiento de una campaña de prospección geofísica es la elección de las variables físicas más determinantes y diferenciadoras de aquello que se pretende estudiar (contraste físico), - del anterior resumen cabe concluir que son los parámetros eléctricos los -- más resolutivos en este tipo de estudios. La explicación reside en la elevada influencia del agua de las formaciones en dichos parámetros, puesto que la conducción eléctrica de los medios no metálicos es de tipo iónico.

Ante esta variedad de técnicas a utilizar, cabe preguntarse cual o cuales - resultan más apropiados de emplear pues, aunque es conocido el hecho de -- que, a mayor número de técnicas empleadas, menores son las indeterminaciones interpretativas, la componente económica nos obliga a la elección de el (los) método(s) más rentable(s), en el sentido de máxima información a un - mínimo costo.

Con la finalidad de avanzar en la determinación de la metodología idónea se ha desarrollado este proyecto, trazándose como objetivos preferentes los -- que a continuación referimos.



2.- OBJETIVOS

Los tres objetivos fundamentales resultan claramente diferenciados, pero se complementan perfectamente, y son:

- Comparación de los resultados obtenidos mediante distintas técnicas - geofísicas de superficie, sensibles a cambios de salinidad, cuyos problemas aparecen como resultados del enmascaramiento de la señal por la anisotropía vertical y horizontal, con los obtenidos mediante técnicas geofísicas en sondeo, donde dicho inconveniente se minimiza notablemente, para terminar comparando ambos métodos indirectos con la propia columna litológica obtenida de dicho sondeo. Con el fin de "testear" la resolución de los métodos se tomaron los datos en una zona geológica y geofísicamente compleja.
- En el caso de que, una vez decidida la técnica más resolutive, no lo sea suficientemente como para prácticamente aliviar los problemas de indeterminación interpretativa, elegir y avanzar en el desarrollo del método complementario, tanto de forma teórica como práctica.
- Exponer los resultados obtenidos a la Comunidad Científica en el Simposio Internacional sobre Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (TIAC'88) del 30 de Mayo al 3 de Junio.



3.- MEDIDAS REALIZADAS Y DURACION DE LA INVESTIGACION

Para el desarrollo del primero de los objetivos, se realizaron un total de 2 SEDT, 2 SEV, 2 SPI en un radio de 200 m, alrededor del sondeo A-10, situado en la localidad de Aguadulce (Almería), dentro del Campo de Dalías - (Anexo I).

Los resultados fueron comparados con los obtenidos dentro de dicho sondeo mediante testificación geofísica, realizándose medidas de los siguientes - parámetros:

- Resistividad normal corta con $\overline{AM} = 0.4$ m
- Resistividad normal larga con $\overline{AM} = 1.6$ m
- Resistividad lateral con $\overline{AO} = 1.8$ m
- Resistencia monoelectrónica.
- Potencial Espontáneo.
- Gamma natural.
- Gamma-Gamma.
- Neutrón-Neutrón.
- Diámetro.
- Conductividad y Temperatura antes del desarrollo del sondeo.
- Conductividad y Temperatura después del desarrollo del sondeo.
- Polarización Inducida y Potencial Espontáneo.
- Resistividad focalizada.
- Electromagnético en dominio del tiempo.



Todos los registros de la testificación se obtuvieron de forma continua de 0 a 500 m, excepto los tres últimos parámetros, tomados de forma discreta cada 10 m. Para la adquisición de los datos de Polarización Inducida, Potencial Espontáneo y Resistividad focalizada, se diseñó y construyó por los autores un dispositivo introducible en el sondeo, siguiendo una configuración del tipo "guard-laterolog" con el fin de evitar apantallamiento de las medidas por el lodo conductor, tomándose éstas de 190 a 350 m.

Toda la campaña de adquisición de datos se realizó del 3 al 9 de Febrero de 1988 y remitimos al lector al Anexo I para conocer con detalle los resultados obtenidos.

Para abordar el segundo objetivo y en virtud de las conclusiones deducidas del primero, en cuanto a la necesidad de utilizar técnicas de apoyo al estudio de resistividades, se realizaron un total de 13 SEV - SPI en los acuíferos detríticos de Almuñécar, Castell de Ferro y El Pozuelo, en la provincia de Granada (Anexo II).

Para la obtención de los datos se siguió una metodología inhabitual en este tipo de prospecciones, avanzándose en la técnica de reconstrucción de la curva de despolarización del medio, como paso fundamental en el tratamiento previo de los datos, con más detalle se puede seguir en el Anexo II.

Por último, se interpretaron conjuntamente los datos de polarizabilidad con los de resistividad, siguiendo el método de Seigel modificado por otros autores (ROY y PODDAR, 1981), de donde se pudo concluir la importancia de la medida conjunta de ambos parámetros para la minimización de ambigüedades interpretativas en estudios sobre acuíferos salinizados en general.

La campaña de toma de datos se realizó del 4 al 14 de Abril de 1988.



4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En primer lugar y tras la comparación de medidas en superficie y en sondeo (Fig. 8, Anexo I) en un área estructuralmente compleja como es el Campo de Dalías (Almería) se concluye:

- Las medidas de superficie han de resultar puntuales para evitar recoger información de heterogeneidades laterales que aumentan el ruido geológico. En este sentido, los métodos de corriente variable y, entre ellos, el SEDT demuestra una excelente resolución para los problemas tratados.
- Se comprueba como parámetros utilizados en testificación geofísica sencillos y rápidos de medir, como la temperatura o el potencial espontáneo, pueden apoyar el seguimiento de los procesos de intrusión marina de forma cualitativa.
- La necesidad de utilizar técnicas complementarias a las de resistividad en áreas donde, a pesar de las variaciones en litología y salinidad del acuífero, los contrastes de dicho parámetro no son muy importantes, resulta patente, ya que consigue facilitar la elección del modelo adecuado. En este sentido, los SPI y la testificación geofísica, esta última para obtener datos "in situ", parecen adecuados.

Como complemento a la última conclusión y como resultado de las investigaciones realizadas en los acuíferos cuaternarios de Almuñécar, Castell de Ferro y El Pozuelo (Granada), se pueden establecer las consideraciones finales siguientes:

- . Los métodos en corriente continua tipo SEV sí son realmente utilizados de forma adecuada para la finalidad propuesta en acuíferos sin complejidad estructural elevada y en prospecciones de relativamente somera - profundidad de investigación (hasta 100 m), tanto por motivos científicos como económicos.



- . El parámetro polarizabilidad puede, ciertamente, complementar al parámetro resistividad para reducir ambigüedades en la asignación de parámetros físicos a geológicos, coordinación que resulta aún más necesaria - en el estudio de salinización de acuíferos, en general, tanto para realizar un seguimiento de los mismos como para prospectar niveles no contaminados.
- . El análisis de la curva de despolarización del medio permite no solamente trabajar con el parámetro "polarizabilidad", sino también con la -- "constante de decaimiento", así como evitar la adquisición de datos -- erróneos debidos a otras causas (acoplamiento electromagnético).

A N E X O S

EL METODO DE POLARIZACION INDUCIDA COMO TECNICA DE APOYO
AL ESTUDIO DE LAS INTRUSIONES MARINAS. APLICACION A LOS
ACUIFEROS DE ALMUÑECAR Y CASTELL DE FERRO (GRANADA)

DOMINGUEZ DE LA RASILLA, S.; DIAZ CUIEL, J.; ROZYCKI, A; MALDONA
DO ZAMORA, A.

Departamento de Ingeniería Geológica. Cátedra de Geofísica Aplicada. E.T.S.I.
de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.

RESUMEN

El método de Polarización Inducida constituye una herramienta de apoyo básica a la medición de resistividades en el estudio de acuíferos salinizados por intrusión marina.

Se propone la homogeneización de las medidas de P.I., utilizando el concepto de polarizabilidad a través del análisis de la curva de descarga, tanto por determinar una propiedad intrínseca de la roca, como por la mejora de resultados.

Se aplica la metodología propuesta a los acuíferos cuaternarios de Almuñecar y Castell de Ferro en la Costa del Sol de Granada.

INTRODUCCION

La utilización de varios métodos geofísicos que complementen las medidas de resistividad en acuíferos con hidroquímica y litología variable, como es el caso de los acuíferos detríticos costeros salinizados por intrusión marina, resulta indispensable si se pretende reducir las ambigüedades interpretativas.

El método de polarización inducida puede ser una herramienta importante en este sentido, tanto por las indeterminaciones que evita como por sus posibilidades de utilización simultánea con la medición de resistividades.

Este estudio pretende resaltar la necesidad de su utilización con la finalidad propuesta, planteando una metodología de la toma de datos y ulterior tratamiento.

La presente comunicación forma parte de la línea de investigación de la intrusión marina mediante técnicas geofísicas que el Departamento de Ingeniería Geológica desarrolla en la actualidad en colaboración con ENADIMSA e IGME.

REDUCCION DE AMBIGUEDADES INTERPRETATIVAS. UNA NECESIDAD

La asignación de parámetros físicos tipo resistividad a las características geológicas de una formación, resulta parcialmente subjetiva en virtud de los

conocimientos previos de la zona y de la experiencia del interpretador. En la necesidad de homogeneizar este proceso y con la finalidad de reducir -- las ambigüedades, cada día se tiende más a solucionar un problema geofísico mediante distintas técnicas tratadas conjuntamente.

Un determinado valor de resistividad es función de una gran cantidad de -- variables geológicas. Algo parecido le ocurre a la polarizabilidad de una roca. Pero el peso de dichas variables actúa de distinta forma (WORTHINGTON y COLLAR, 1984), lo cual permite la exclusión de algunas al comparar ambos parámetros entre sí. A esto se añade el distinto comportamiento de los -- dos ante el principio de equivalencia y el de supresión, determinándonos -- mejor, por comparación, el número y situación de las capas.

Así, al estudiar zonas con acuíferos total o parcialmente salinizados, susceptibles de ser confundidos con niveles arcillosos a través del método de resistividades, (tanto en corriente alterna como continua) es inevitable -- la aplicación de la polarización inducida como técnica de apoyo. Este es -- el caso del seguimiento de procesos de intrusión marina en acuíferos detriticos costeros. Con la finalidad de poner en evidencia lo expuesto, se es-- tudieron los acuíferos de Almuñecar y Castell de Ferro, en la Costa del -- Sol de Granada.

METODOLOGIA DE LA ADQUISICION Y ELABORACION DE LOS DATOS

a) Instrumentación y toma de datos

Se realizaron un total de 13 sondeos eléctricos verticales y de polariza-- ción inducida (SEV-PI) con dispositivo Schlumberger y distancia inter-- electrodica final (AB) de 500 m. La instrumentación consistió en un -- transmisor de onda cuadrada Scintrex TSQ-3 (3 kW) con pulsos de carga -- 4 seg y cambios de polaridad alternativa conectado a dos electrodos de -- acero. El receptor Scintrex IPR-10A, obtuvo medidas en seis ventanas de tiempo espaciadas 520 ms desde 260 ms a 3120 ms, con el fin de estu-- diar la curva de descarga. Las lecturas de resistividad se realizaron si-- multáneamente con las de cargabilidad.

Se define cargabilidad (m) como:

$$m = \frac{V_{st}}{V_p} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_s dt + V_r}{t_r \cdot V_p} \quad (\text{mv/v})$$

donde:

V_s = Potencial secundario

V_p = Potencial primario

t_r = Período de integración ($t_2 - t_1$)

V_r = Potencial residual

b) Análisis de la curva de descarga

El estudio de la curva de descarga del medio al ser sometido a una diferencia de potencial V_p durante un pulso de carga T , presenta muchas ventajas respecto a la medición del V_s en una sola ventana, entre las cuales destacan:

- Disminuye los errores instrumentales y de ruidos

Se observa al estudiar la curva total que el ajuste de los puntos a una función exponencial o suma de ellas no coincide perfectamente en algunos casos, sobre todo en medidas realizadas con bajo valor de V_p . Sin embargo, utilizando la totalidad de la curva de descarga medida P se puede disminuir dicho efecto.

- Pérdida de información

Se puede comprobar como dos curvas de descarga distintas pueden tener la misma cargabilidad. Analizando la curva entera comprobaríamos que tanto el punto de corte en $t = 0+$ como el tipo de decaimiento son diferentes.

- Medida intrínseca de la roca

La elección de la ventana de lectura o tiempo de integración se realiza en base a evitar efectos de acoplamiento electromagnético y ruidos en general. Al ser V_s función de la ventana elegida, el valor de m obtenido no será un parámetro intrínseco. Sin embargo, analizando la curva de descarga se puede evitar esta relatividad de la medida expresando la descarga del medio en función del valor de V_s en $t = 0+$ (V_0) y la constante de tiempo de la curva de caída de potencial (τ).

- Duración del acoplamiento EM

El efecto de inducción electromagnética aumenta con el cuadrado de la distancia de los electrodos y las conductividades de los niveles prospectados. Es por lo que no podemos estar seguros de que la ventana no quedará afectada por el efecto de acoplamiento en toda la campaña. Sin embargo, mediante la curva de descarga seremos capaces de determinar en cada posición de los electrodos hasta cuando interviene dicho efecto, para eliminarlo o tenerlo en cuenta.

En general, se puede expresar la descarga del medio al ser sometido a una diferencia de potencial V_p , como una función de tiempo:

$$V_s(t) = a_1 \cdot e^{-t/\tau_1} + a_2 \cdot e^{-t/\tau_2} + \dots + a_n \cdot e^{-t/\tau_n}$$

En la práctica, con el ajuste a una suma de las dos primeras funciones exponenciales más un valor residual hacia el cual la curva de descarga es asintótica, queda perfectamente expresado el fenómeno en la mayo-

ría de los casos:

$$V_s(t) = V_{oA} \cdot e^{-t/\tau_1} + V_o \cdot e^{-t/\tau_2} + V_r$$

donde el primer término es debido, fundamentalmente, a la respuesta inductiva del medio y el segundo a la despolarización del mismo. Con el fin de encontrar el momento en que deja de actuar un efecto y comienza el otro y dados los escasos puntos de lectura de que se dispone, ya que resulta de un compromiso entre rentabilidad y precisión del estudio, se propone la expresión de ajuste:

$$V_s(t) = (V_{oA} + V_o) \cdot e^{-(t/\tau_T)^n}$$

Como herramienta para el estudio previo de la curva, donde el valor de τ_T nos indica dicho instante y n el signo del acoplamiento.

El valor de τ_T alrededor del cual deja de predominar el efecto de acoplamiento se obtiene de la intersección de las funciones $(t/\tau_T)^n$ y t/τ_T . Con este valor se puede hallar el valor de τ de la despolarización neta por el proceso de optimización.

Dado que V_s es función del pulso de carga (T) y bajo la premisa de que el proceso de carga es igual al de descarga (ZONGE et al, 1971):

$$V_o = V_M (1 \cdot e^{-T/\tau_2})$$

donde V_M sería el valor de V_s en $t = 0+$ si $T = \infty$.

Al ser también función del potencial primario (V_p), se deberá expresar respecto a éste, apareciendo la polarización como:

$$P(t) = P_A \cdot e^{-t/\tau_1} + P_M \cdot e^{-t/\tau_2} + P_r$$

donde P_M será la polarizabilidad intrínseca del medio independiente ya de los factores de medida.

Se estudió la curva de descarga en cada posición electródica, tratándose se los datos de forma automática, tal y como aparece en la Fig. 1 y 2, para obtener los valores de P_M , τ_2 y P_A . En la primera de ellas el campo eléctrico está aún por encima de la interfase agua dulce-agua salada, presentándose un acoplamiento positivo. Sin embargo, en la segunda figura, P_M y P_A disminuyen, igualmente que τ , perdiendo el medio capacidad de polarizarse y apareciendo una inducción opuesta al campo creado. Este efecto ocurre al penetrar el campo eléctrico por debajo de la interfase.

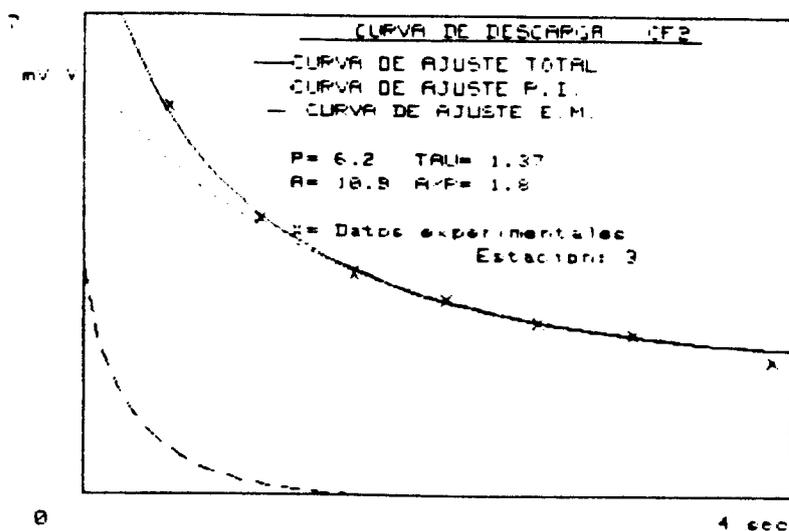
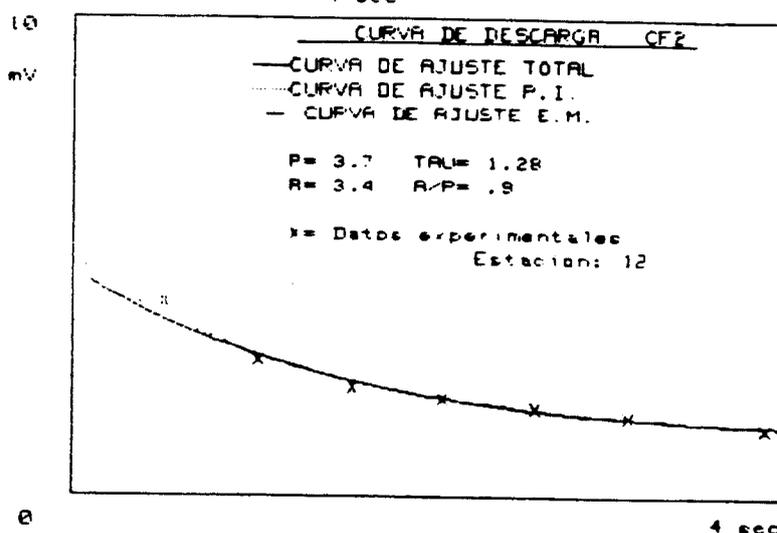


Fig. 1

Fig. 2



Del estudio realizado se observa que el valor medio de τ por encima de la interfase es 1.4 seg, mientras que por debajo es 1.2 seg.

INTERPRETACION

Los datos de resistividad aparente de cada SEV-PI fueron interpretados mediante el ajuste semi-automático de una curva generada a partir de un modelo inicial. El método utilizado para generar dicha curva se basa en la convolución de espesores y resistividades con el filtro de Ghosh.

De otro lado, los datos de polarizabilidad (P_M) fueron interpretados con la misma metodología, variando el aparato matemático que genera las curvas. Para ello nos basamos en la expresión propuesta por Seigel (1959), modificada por ROY y PODDAR (1981), para n capas:

$$P_a(r) = \frac{\rho_a(r)(\rho_i + P_i \cdot \rho_i) - \rho_a(r)(\rho_i)}{\rho_a(r)(\rho_i)} \quad (i = 1, n)$$

donde:

$\rho_a(r)$ = Resistividad aparente en un semiespaciado de electrodos r

ρ_i = Resistividad de la capa i

P_i = Polarizabilidad de la capa i

APLICACION AL ESTUDIO DE LA INTRUSION MARINA EN LOS ACUIFEROS DE ALMUÑECAR Y CASTELL DE FERRO (GRANADA)

a) Acuífero de Río Verde (Almuñecar)

Está constituido por materiales aluviales sueltos conglomeráticos y arenosos, con intercalaciones arcillo-limosas más abundantes hacia la costa.

Durante el período estival, la sobreexplotación de sus recursos genera una inversión del gradiente hidráulico subterráneo, apareciendo el proceso de intrusión marina. Este hecho se presenta favorecido por la existencia de un paleocanal muy permeable, a lo largo del cual se han realizado las medidas, aunque por la misma razón permite la existencia de un proceso de desalinización en período de recarga (FERNANDEZ-RUBIO, 1986).

En la Fig. 3 aparece la situación de los SEV-PI realizados. La interpretación correspondiente al más cercano a la costa aparece en la Fig. 4. - La columna de un sondeo muy próximo señala la presencia de un conglomerado hasta 55 m, a partir del cual comienza el sustrato esquistoso. Según la resistividad existiría un potente nivel limo-arcilloso o un agua saturante salobre. La polarizabilidad elimina la ambigüedad, inclinándose por la última posibilidad.

La Fig. 5 muestra otro ejemplo algo más alejado de la costa. Obsérvese como señala la curva de P_a la posición del sustrato esquistoso, eliminando la ambigüedad que presenta la resistividad.

b) Acuífero de Castell de Ferro

Está formado por depósitos detríticos, más groseros hacia los bordes, -- con un sustrato alpujarride impermeable en la base. La sobreexplotación resulta patente en virtud de los datos hidroquímicos publicados (BENAVENTE y TERRON, 1983).

En la Fig. 6 aparece la situación de los puntos de medida. Entre todas -- ellas hemos seleccionado tres ejemplos. Para el primero, los dos parámetros marcan perfectamente la situación de la interfase (Fig. 7), sólo -- que la polarizabilidad señala la profundidad del sustrato y la resistividad no.

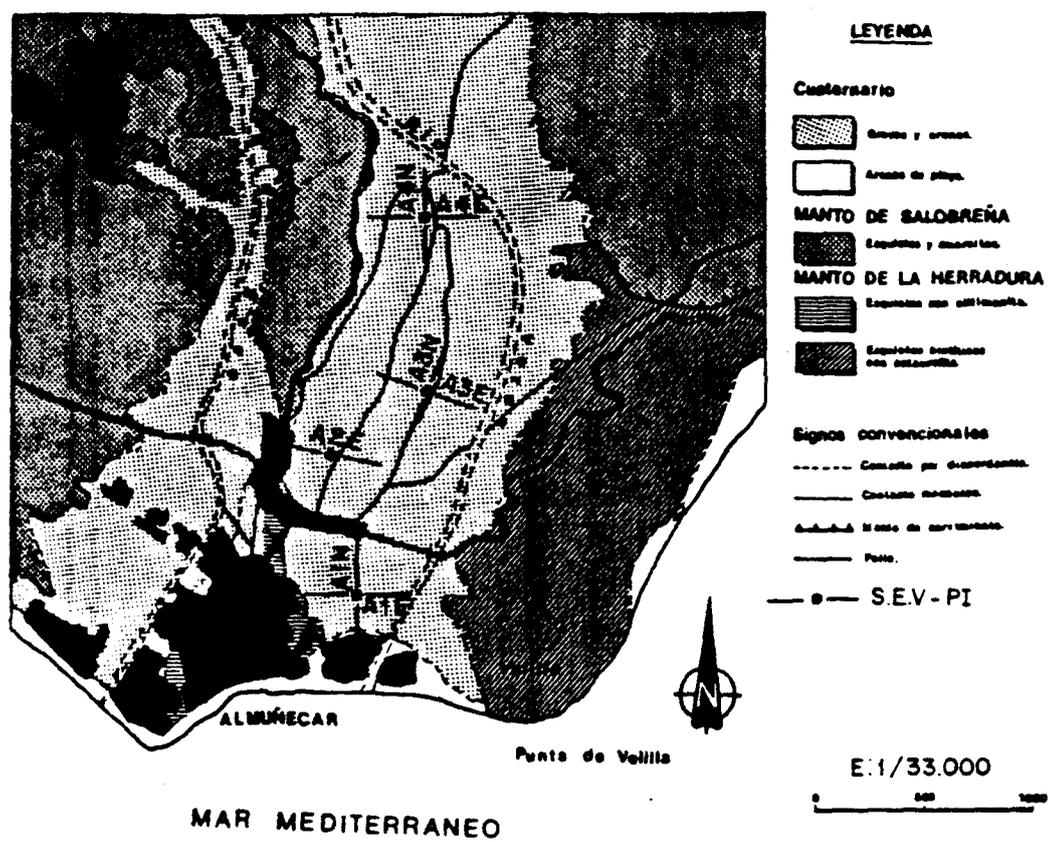


Fig. 3 . Situación geológica (según FERNANDEZ-RUBIO et al.)

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD AFARENTE

S.E.V. Y P.I. numero A1E : Direccion E-W

Error de aproximacion .041

Capa	Resistividad (ohm/m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	123.48	2.6	6
2	282.15	5.5	10
3	32.20	120.0	5
4	86.33		11

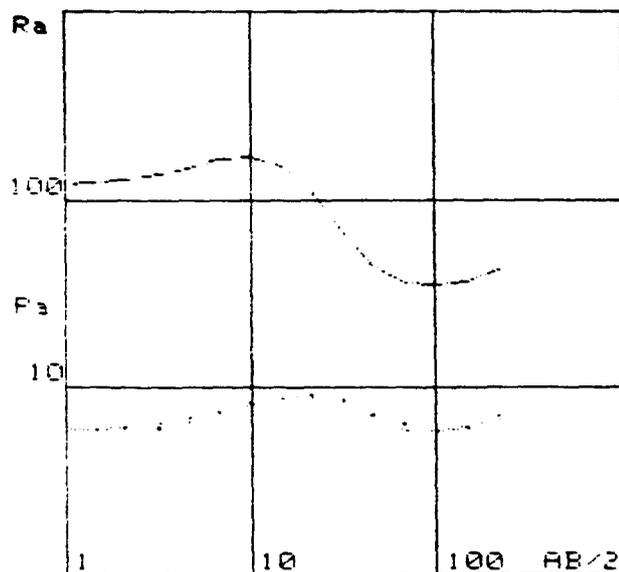


Fig. 4

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD AFARENTE

S.E.V. Y P.I. numero A3E : Direccion E-W

Error de aproximacion .053

Capa	Resistividad (ohm/m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	58.60	2.5	5
2	127.41	5.7	2
3	142.44	28.3	5
4	98.23		20

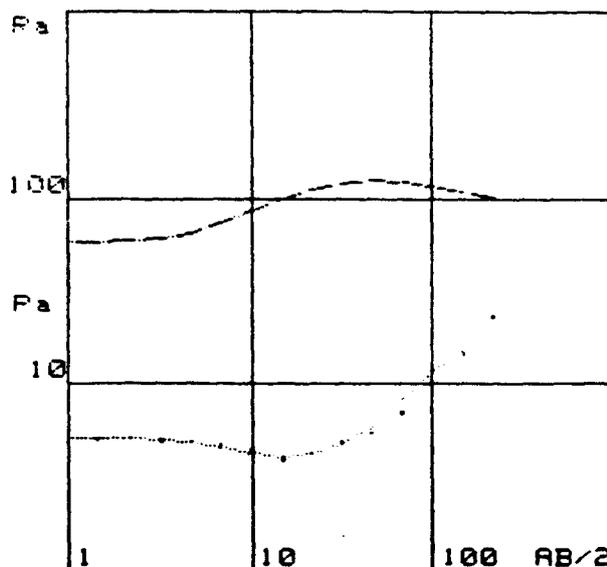


Fig. 5

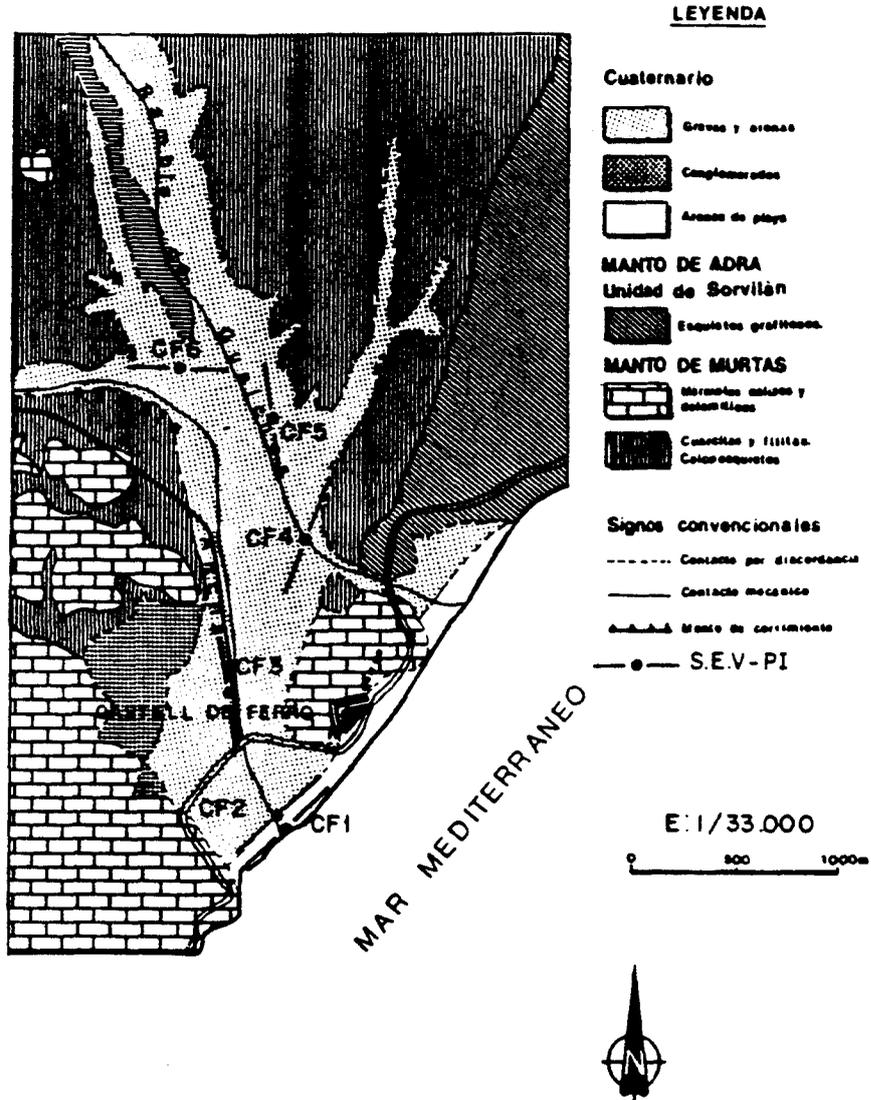


Fig. 6. Situación geológica (según FERNANDEZ-RUBIO et al.)

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD APARENTE

S.E.V. Y F.I. numero CF2 : Direccion NE-SW

Error de aproximacion .042

Capa	Resistividad (ohm/m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	66.52	2.7	5
2	76.10	3.1	8
3	1.68	155.3	1
4	66.93		350

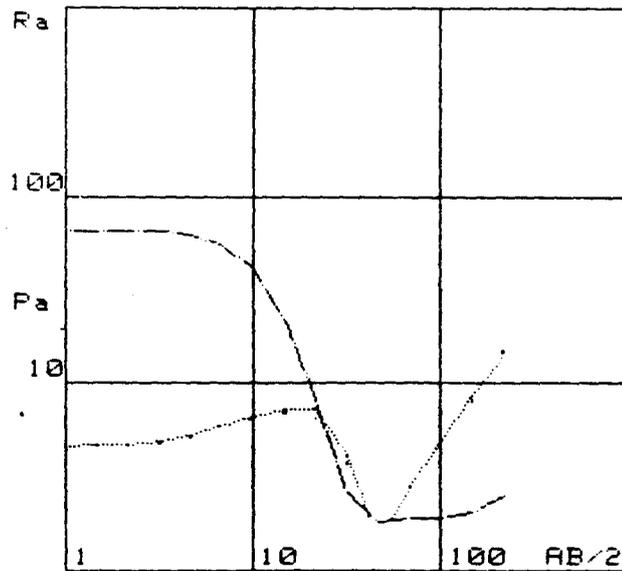


Fig. 7

En la Fig. 8 aparece un ejemplo de localización de la posible interfase según la P_a . La polarizabilidad demuestra que más bien es una zona con importantes niveles limo-arcillosos hasta llegar al sustrato.

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD APARENTE

S.E.V. Y P.I. numero CF4 : Direccion N54E

Error de aproximacion .055

Capa	Resistividad (ohm/m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	295.95	1.5	5
2	121.98	3.0	8
3	155.70	5.2	3
4	186.85	45.3	14
5	32.96		40

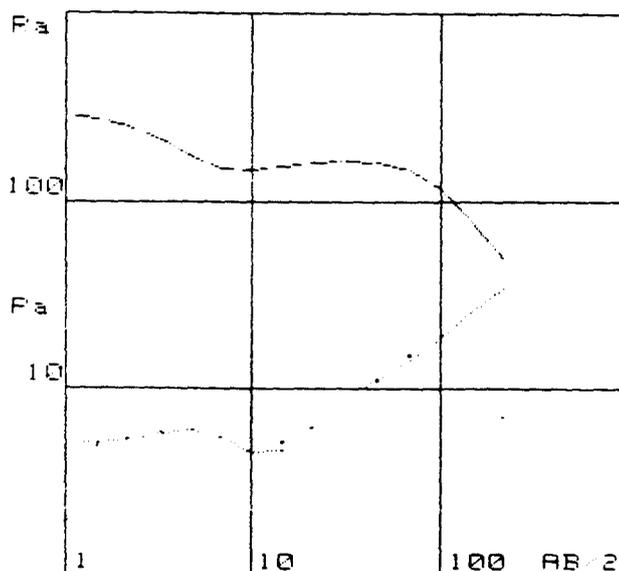


Fig. 8

En la Fig. 9, la más alejada de la costa, el mínimo de resistividad parece corresponder con un acuífero de excelente calidad. La polarizabilidad demuestra que es un horizonte limo-arcilloso.

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD AFARENTE			
S.E.V.-P.I. numero CF6 : Direccion N104E			
Error de aproximacion (Mv) .03			
Capa	RESISTIVIDAD (ohm.m)	Espesor (m)	POLARIZABILIDAD (mV/V)
1	263.82	2.9	7.0
2	372.19	7.1	10.0
3	100.24	56.7	43.0
4	332.08		17.6

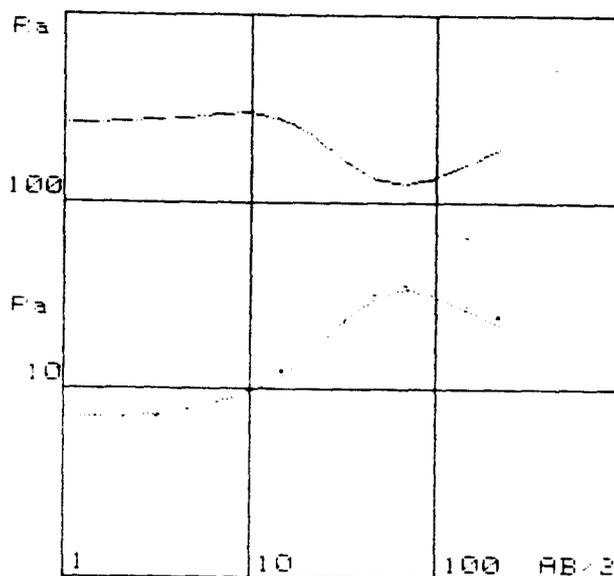


Fig. 9

CONCLUSIONES

La necesidad de utilizar técnicas conjuntas en Geofísica para evitar indeterminaciones en la interpretación, resulta un hecho patente, apareciendo perfectamente conjugados la resistividad y la polarizabilidad.

El tratamiento de la curva de despolarización del medio resulta, a nuestro juicio, más apropiado y más resolutivo que el de una sola ventana de lectura de la cargabilidad, perdiéndose información sobre la forma de despolarizarse y el efecto que determinadas litologías realizan sobre el acoplamiento EM.

Se confirma el importante apoyo que realiza el método de PI al de resistividades, sobre todo durante la asignación de parámetros físicos a geológicos. Esta coordinación resulta aún más necesaria en el estudio de salinización de acuíferos en general, tanto para realizar un seguimiento de los mismos, como para prospectar niveles no contaminados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA) y al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), tanto en sus delegaciones centrales, como provinciales (Granada y Málaga) por su colaboración y ayuda para la consecución de esta investigación.

BIBLIOGRAFIA

IGME (1985)

"Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Guadalfeo 1ª y 2ª fase". Málaga.

ROY, A. y PODDAR, M. (1981)

"A simple derivation of Seigel's time domain induced polarization formula". Geoph. Prosp. 29. 432-437.

SEIGEL, H.O. (1959)

"Mathematical formulation and type curves for induced polarization". -- Geophysics, 24, 3; 547-565.

BENAVENTE, J. y TERRON, E. (1983)

"Características hidroquímicas del acuífero aluvial litoral de Castell de Ferro (Granada)". III Simp. de Hidrogeología. Madrid.

FERNANDEZ-RUBIO, R. et al. (1986)

"Proceso de salinización-desalinización en el acuífero costero del Río Verde (Almuñecar-Granada)". El Agua en Andalucía. Granada.

WORTHINGTON, P.F. y COLLAR, F.A. (1984)

"Relevance of induced polarization to quantitative formation evaluation". - Marine and Petr. Geol. 1.

ZONGE, K.L. et al (1971)

"Comparison of time, frequency and phase measurements in induced polarization". Geoph. Prosp. 20, 3. 628-648.

COMPARACION DE TECNICAS GEOFISICAS EN SUPERFICIE Y EN SONDEO
HACIA LA DETECCION DE INTRUSION MARINA. APLICACION AL CAMPO
DE DALIAS (ALMERIA)

DOMINGUEZ, S. *; ROZYCKI, A. *; DEL CAMPO, M. **; RAMOS, G. ***

* Dpto. de Ingeniería Geológica. Cátedra de Geofísica Aplicada. E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid. Univ. Politécnica de Madrid.

** Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA).

*** Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

RESUMEN

Para la evaluación de la eficacia de las técnicas geofísicas en el seguimiento de intrusiones marinas se efectuaron las medidas con distintos métodos. - Se aplicaron, tanto las medidas en superficie (SEDT, SEV, SPI), como en sondeos mecánicos (R_{NC} , R_{NL} , R_{LAT} , PE, σ , T, γ_n , \emptyset , REDT, RPI).

Las técnicas de testificación geofísica determinaron claramente la interfase agua dulce-agua salada con los parámetros eléctricos y de temperatura, proponiéndose éste último junto con el PE como parámetros aconsejables para el seguimiento cualitativo del proceso.

Dentro de las técnicas geofísicas de superficie, para el modelo geológico estudiado, el más exacto resultó el método SEDT.

El método de P.I. disminuye la ambigüedad del modelo geológico construido a través de las técnicas geofísicas. Se obtienen mejores resultados si se procede a la descomposición factorial de los datos de P.I.

INTRODUCCION

La detección de procesos de intrusión marina en acuíferos costeros, provocando su salinización, está adquiriendo un notable interés por las consecuencias económicas que ello implica. No es casual que se presente en áreas de importantes inversiones agrícolas, donde el clima favorecedor para cultivos extratempranos en invernaderos y la ausencia de aportes superficiales provocan la sobreexplotación de sus recursos hídricos subterráneos.

En este sentido, y como método indirecto, la Geofísica puede tener un importante papel. Son escasos, sin embargo, los estudios realizados con esta finalidad y, aún menos, en áreas geológicamente complejas como son los acuíferos carbonatados fuertemente tectonizados.

Esta investigación pretende examinar las técnicas y metodologías óptimas en el estudio de dichos acuíferos con difícil resolución geofísica. Para ello se han aplicado la mayoría de las técnicas geofísicas sensibles a parámetros físicos variables con la salinidad, realizándose medidas en superficie y en

sondeo ("in situ") para comprobar su resolución.

SITUACION GEOLOGICA

Para este estudio se eligió el sondeo A-10, situado en la localidad de Aguadulce (Almería) dentro del Campo de Dalías y alrededor del cual se realizaron las medidas de superficie (Fig. 1).

En general se trata de una sucesión de dolomías alpujarrides fracturadas pertenecientes al Manto de Gador con intercalaciones esquistosas y que constituyen el denominado Acuífero Inferior Noroeste (IGME). A techo aparece un término detrítico pliocuaternario perteneciente al Acuífero Superior Noroeste - (s.l.) IGME). Un esquema de las columnas litoestratigráficas obtenidas en dicho sondeo y otro muy próximo aparecen en la Fig. 2.

METODOLOGIA UTILIZADA

En un estudio a fondo, este problema deberá ser atacado, en una primera fase, dentro de un ámbito espacial, es decir, determinando la exactitud real de cada técnica en la determinación de la interfase agua dulce-agua salada correlacionando con medidas "in situ" a un tiempo fijo. Posteriormente, analizar la resolución de dichas técnicas en diversos instantes, comparándolas con parámetros hidrológicos dentro de un ámbito temporal.

En esta investigación nos hemos limitado a estudiar la primera fase, utilizando medidas, tanto en superficie como en sondeo para compararlas con los datos litológicos e hidrogeológicos.

Las medidas de superficie se efectuaron, tanto sobre el propio sondeo, como a una distancia siempre menor a 200 en la dirección del sondeo A-11, con lo cual dada la proximidad y la similitud de las columnas litológicas, las medidas pueden ser atribuibles al sondeo A-10 (Fig. 2).

Igualmente, tanto las medidas de superficie como las de sondeo se realizaron en fin de semana para intentar evitar las alteraciones hidrogeológicas en tiempo inferior al de toma de datos, como consecuencia de explotaciones próximas.

TECNICAS DE SUPERFICIE

a) Instrumentación y toma de datos

Se realizaron dos sondeos electromagnéticos en dominio de tiempo (SEDT) con bobina receptora centrada en el bucle emisor. La longitud de este último fue de 200 m x 200 m. El instrumental utilizado, de la casa CRONE fue programado con tiempo de emisión 10 ms y tiempo de rampa 0.5 y 1 ms. La señal recibida fue tratada mediante filtros y volcada a un computador IBM PC en el campo para una interpretación preliminar.

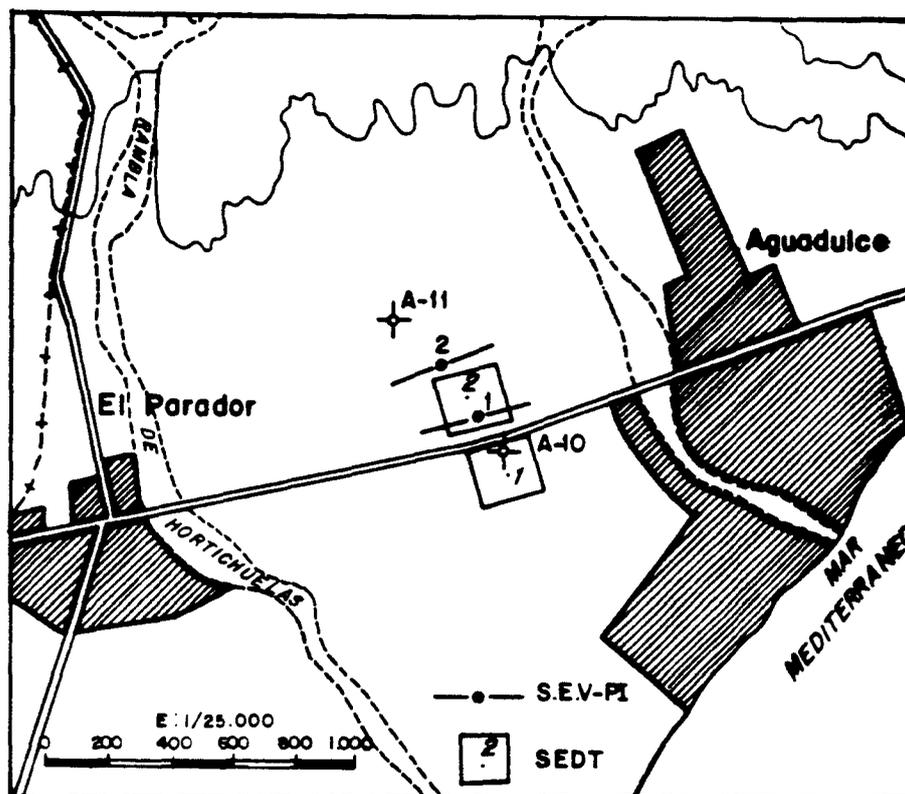


Fig. 1.- Situación del estudio

Igualmente, se realizaron dos sondeos de polarización inducida (SPI) y eléctricos verticales (SEV) con dispositivo tipo SCHLUMBERGER simétrico y distancia interelectrónica final AB de 1440 m. Como fuente de corriente se utilizó un transmisor SCINTREX TSQ-3 (3 kW) con pulsos de duración 4 seg y electrodos de acero. El receptor, marca SCINTREX IPR-10 A, fue conectado a electrodos impolarizables de cobre.

Se define cargabilidad (m) como:

$$m = \frac{V_s \cdot 1000}{V_p}$$

Siendo V_s el potencial secundario y V_p el primario y expresándose m en -mv/v.

Se tiene, a su vez, V_s como:

$$V_s = \frac{1}{t_r} \int_{t_1}^{t_2} V_s dt + V_r$$

donde t_r es el período de integración ($t_2 - t_1$) y V_r el potencial residual.

Se tomaron las medidas de cargabilidad en seis ventanas con períodos de integración de 520 mseg desde 260 mseg a 3120 mseg. Las lecturas de resistividad se realizaron conjuntamente con las de cargabilidad

b) Tratamiento e interpretación

Los datos del SEDT fueron tratados, tanto en la interpretación preliminar como en la definitiva, por el programa ARRTI LAYERED EARTH INVERSION - para pasar de los datos de voltaje de la curva de descarga a un modelo -- adecuado de resistividades y espesores mediante inversión de alta resolución (Fig. 3).

En lo que respecta a la interpretación de los datos de resistividad aparente (ρ_a), se utilizó igualmente un procedimiento de cálculo automático interactivo para optimizar el ajuste a la curva ρ_a de campo. El aparato matemático se basa en la resolución de la ecuación:

$$\rho_a(r) = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda$$

siendo r la semidistancia interelectrónica de emisión $T(\lambda)$ una transformada de la función núcleo y $J_1(\lambda r)$ la función de Bessel de primera especie y orden uno.

Para ello se realizará la convolución de espesores y resistividades, con

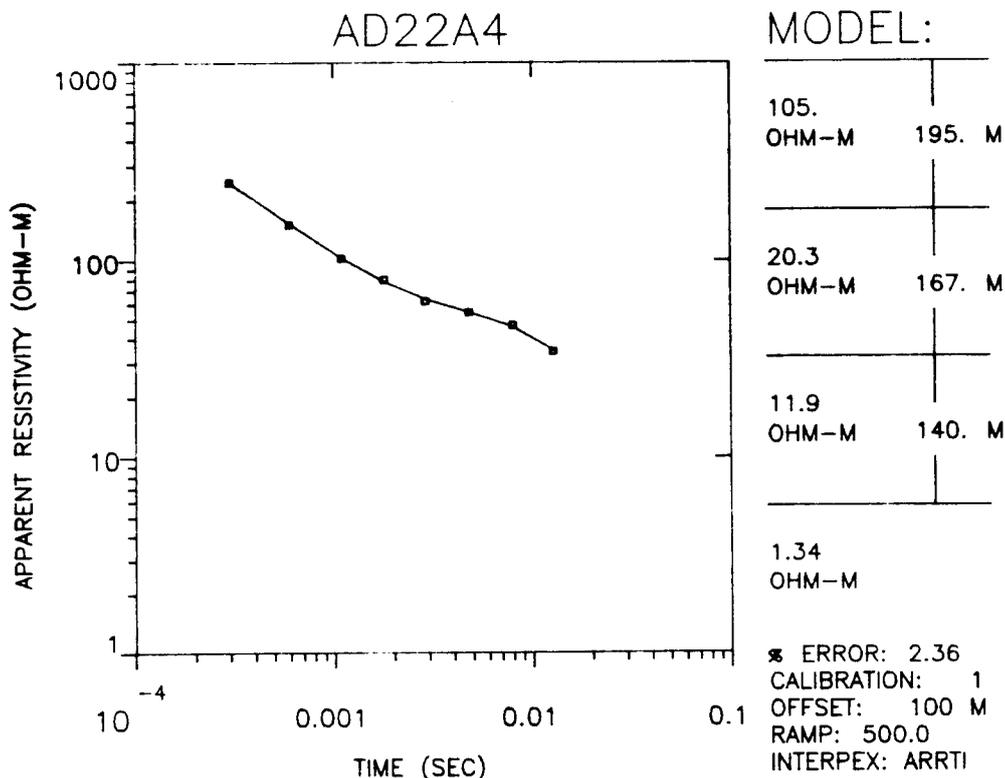


Fig. 3

el filtro de Ghosh (GHOSH, 1971).

En ambos casos los modelos fueron seleccionados en función de la semejanza con los datos geológicos y el mínimo error de ajuste.

El tratamiento de los datos de polarización inducida consistió en analizar la curva de descarga del medio al ser sometido a pulsos de carga (T) de 4 seg con cambios de polaridad. Para ello se ajustó la variación de potencial secundario con el tiempo a una suma de dos funciones exponenciales, donde la primera reflejara la superposición del acoplamiento electro magnético a la polarización inducida y la segunda únicamente la polarización del medio más una componente residual.

$$V_s(t) = V_{s1} \cdot e^{-t/\tau_1} + V_{s2} \cdot e^{-t/\tau_2} + V_r$$

De esta forma se obtiene el valor del potencial secundario en el momento de desconectar el circuito de emisión sin efecto de acoplamiento electro magnético ("SKIN"), valor que nos permite calcular la polarizabilidad, definida como:

$$P = \frac{V_0}{V_p}$$

donde V_0 es el potencial del campo secundario en $t = 0 +$ y V_p el potencial del campo primario.

De esta forma el parámetro P corregido en función del pulso de carga se presenta mucho más intrínseco de la roca que la propia m (DOMINGUEZ et al, 1988).

Para un medio estratificado, el valor de la polarizabilidad intrínseca P_i se convierte en polarizabilidad aparente P_a , la cual, basándonos en SEIGEL (1959) y con las modificaciones efectuadas por algunos autores (ROY y PODDAR, 1981), puede expresarse:

$$P_a(r) = \frac{\rho_a(r) (\rho_i + P_i \cdot \rho_i) - \rho_a(r) (\rho_i)}{\rho_a(r) (\rho_i)}$$

La Fig. 4 representa las curvas de ρ_a y P_a obtenidas en el SEV PI 1 y el modelo con ellas obtenido mediante interpretación automática. Obsérvese como la P_a señala espectacularmente la zona con intrusión marina, al contrario que la ρ_a .

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD APARENTE

S.E.V. Y P.I. número A10 : Dirección N70E

Error de aproximación .032

Capa	Resistividad (ohm/m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	641.31	3.6	6
2	252.10	15.5	8
3	466.24	20.0	20
4	105.52	251.0	3
5	46.49		40

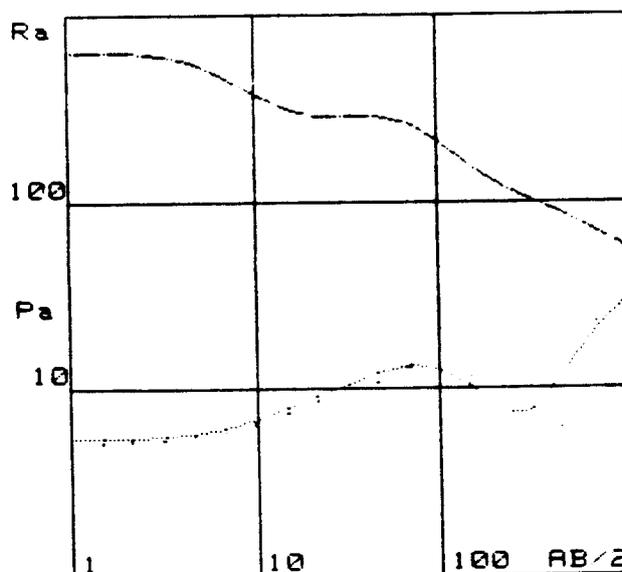


Fig. 4

c) Comparación de resultados

A partir de la comparación de los modelos resultantes se puede concluir - que el SEV presenta en estas zonas una gran determinación hasta una escasa profundidad y a partir de los cuales el SEDT le domina en resolución y penetración. El SPI, aunque presenta las mismas características que el --SEV, reduce notablemente la ambigüedad a la hora de decidir la existencia o no de salinización del acuífero. La presencia de un mínimo de polarizabilidad tan característico (ROY y ELLIOT, 1980), así como elevados valores de constante de tiempo indican la aparición de dicho proceso.

De otro lado, dada la posibilidad de ajuste de modelos relativamente diferentes en las tres técnicas, no van a permitir la determinación exacta de la interfase agua dulce-agua salada, aunque siempre será más aproximada, por supuesto, la obtenida mediante SEDT.

MEDIDAS EN SONDEO

a) Instrumentación y toma de datos

Las medidas realizadas en el sondeo A-10, dentro de la localidad de Aguadulce (Almería), se pueden agrupar en registros discretos y continuos. Para los primeros, se utilizó la misma instrumentación que en superficie, - aunque los dispositivos fueron diferentes. En el caso del registro discreto electromagnético en dominio de tiempo (REDT) la bobina receptora se sitúa en una sonda introducible en el sondeo, realizándose las medidas de - 100 a 500 m, cada 10 m. El bucle emisor, concéntrico al sondeo, mantiene la misma geometría que en el SEDT.

Igualmente para el registro discreto de polarización inducida en dominio de tiempo (RPI) se utilizó un dispositivo en una sonda siguiendo una configuración tipo "guard-laterolog" diseñada por los autores para focalizar el campo eléctrico creado (Fig. 5). La toma de datos se realizó con la -- misma metodología que en superficie, con intervalos de medida cada 10 m, desde 190 a 350 m.

En lo que respecta a las medidas continuas, se utilizó un equipo MOUNT SURPRISE 3000 NB, registrándose los parámetros físicos:

- Resistividad normal corta con AM = 0.4 m (R_{NC})
- Resistividad normal larga con AM = 1.6 m (R_{NL})
- Resistividad lateral con AO = 1.8 m (R_L)
- Resistencia monoelectrónica (R)
- Potencial Espontáneo (PE)
- Gamma natural (γ_n)
- Conductividad (σ) y Temperatura (T)
- Diámetro (ϕ)

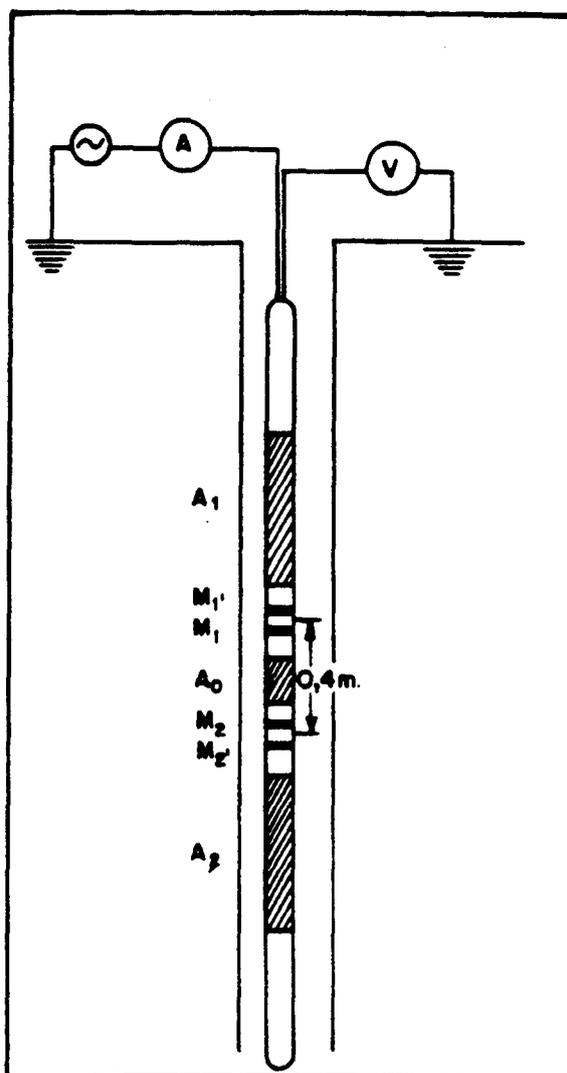


Fig. 5. Sonda de medidas discretas de polarizabilidad

Los dos últimos parámetros se registraron, tanto antes de desarrollar el sondeo, como después.

b) Tratamiento e interpretación

El tratamiento de los datos se realizó, en el caso de los registros discretos, de forma similar a los tomados en superficie, exceptuando el REDT cuyas medidas aparecen expresadas en unidades de campo magnético. En dicho parámetro se realizó un análisis de pendientes para obtener una mayor determinación en la situación de las posibles variaciones, apareciendo en las Figuras 6 y 7, todos los registros corregidos, tanto discretos co

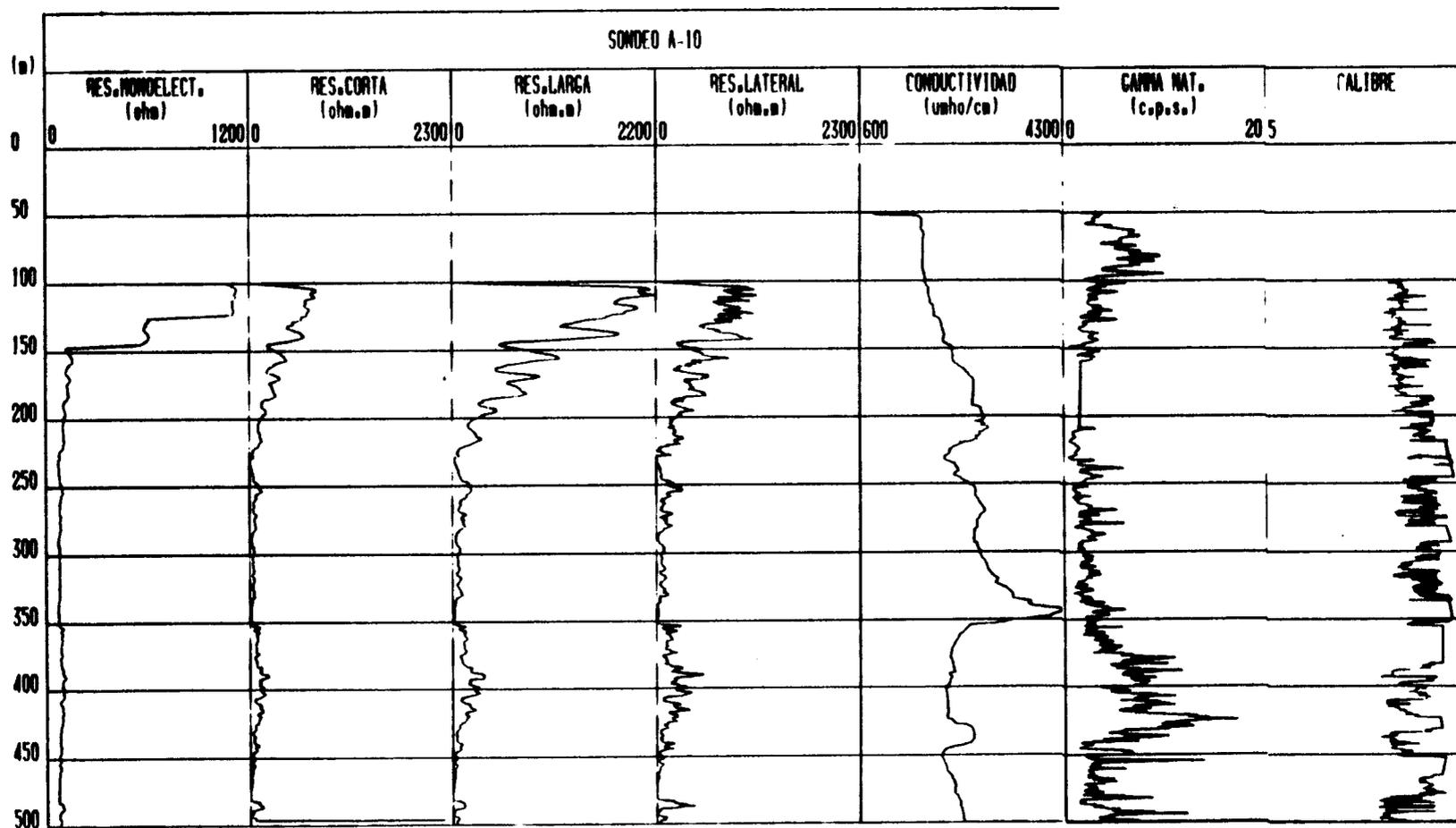


Fig. 6. Testificación geofísica en el sondeo A-10

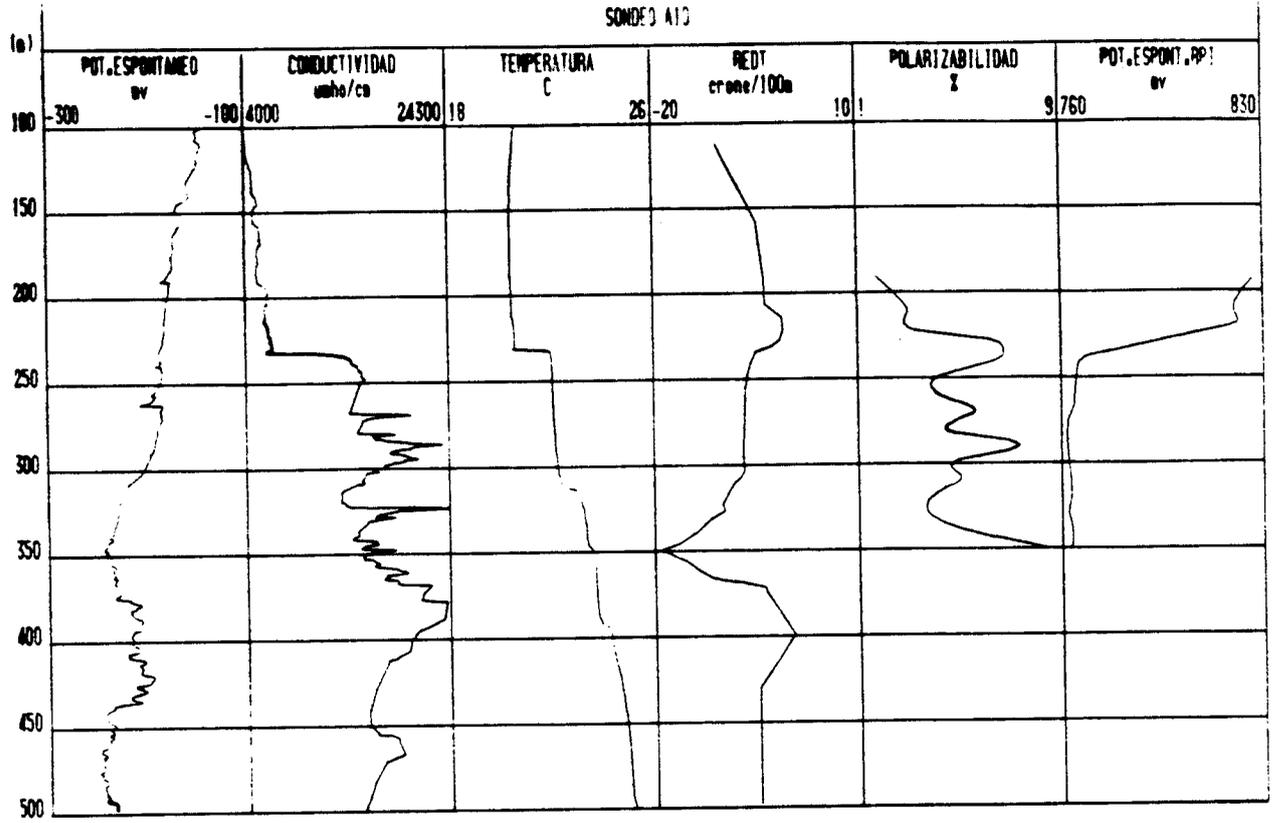


Fig. 7. Testificacion geofísica en el sondeo A-10

mo continuos, realizados en el sondeo A-10.

c) Comparación de resultados

Se puede observar la eficacia de la testificación geofísica, comprobándose como casi todos sus parámetros están afectados, de una u otra forma, - por el contraste de salinidades. Así, la relación de resistividad obtenida por dispositivos largos y cortos oscilará cerca de la unidad en la zona ya contaminada. El PE presenta desplazamientos de su base y efectos - "Sawtooth" (SEGESMAN y TIXIER, 1958) en la zona cercana a la interfase, - como consecuencia de importantes invasiones de lodo al aumentar la permeabilidad con la posible "descarbonatación" de la caliza (CUSTODIO, 1982), efecto observable también con el diámetro.

Los registros de conductividad, obtenidos con la sonda "Loreto" (NAVAS - et al, 1987), se muestran muy sensibles a los cambios de salinidad, tanto antes como después de la limpieza del sondeo, señalando las zonas de acceso referente al sondeo. En lo que respecta a la temperatura, queda demostrada la eficiencia de este parámetro para la determinación de la interfase agua dulce-agua salada en sondeo, tanto por su sensibilidad como por la carencia de mantenimiento y recalibrado que otros parámetros precisan.

Los registros discretos no resultan tan espectaculares. Así, el REDT, -- tras un tratamiento por gradiente, detecta un aumento progresivo de la -- conductividad, señalando la zona de interfase y otra entrada más profunda de agua salada. Este comportamiento es habitual cuando el sondeo corta la zona que provoca el contraste de resistividades. En lo que respecta al RPI parece ser, sobre todo, sensible a los niveles más arcillosos, presentando, en general, valores de polarizabilidad más altos.

En general, todos los registros apuntan a la situación de la interfase en 240 m, apareciendo otro posible acceso preferente de agua salada al sondeo a 340 m.

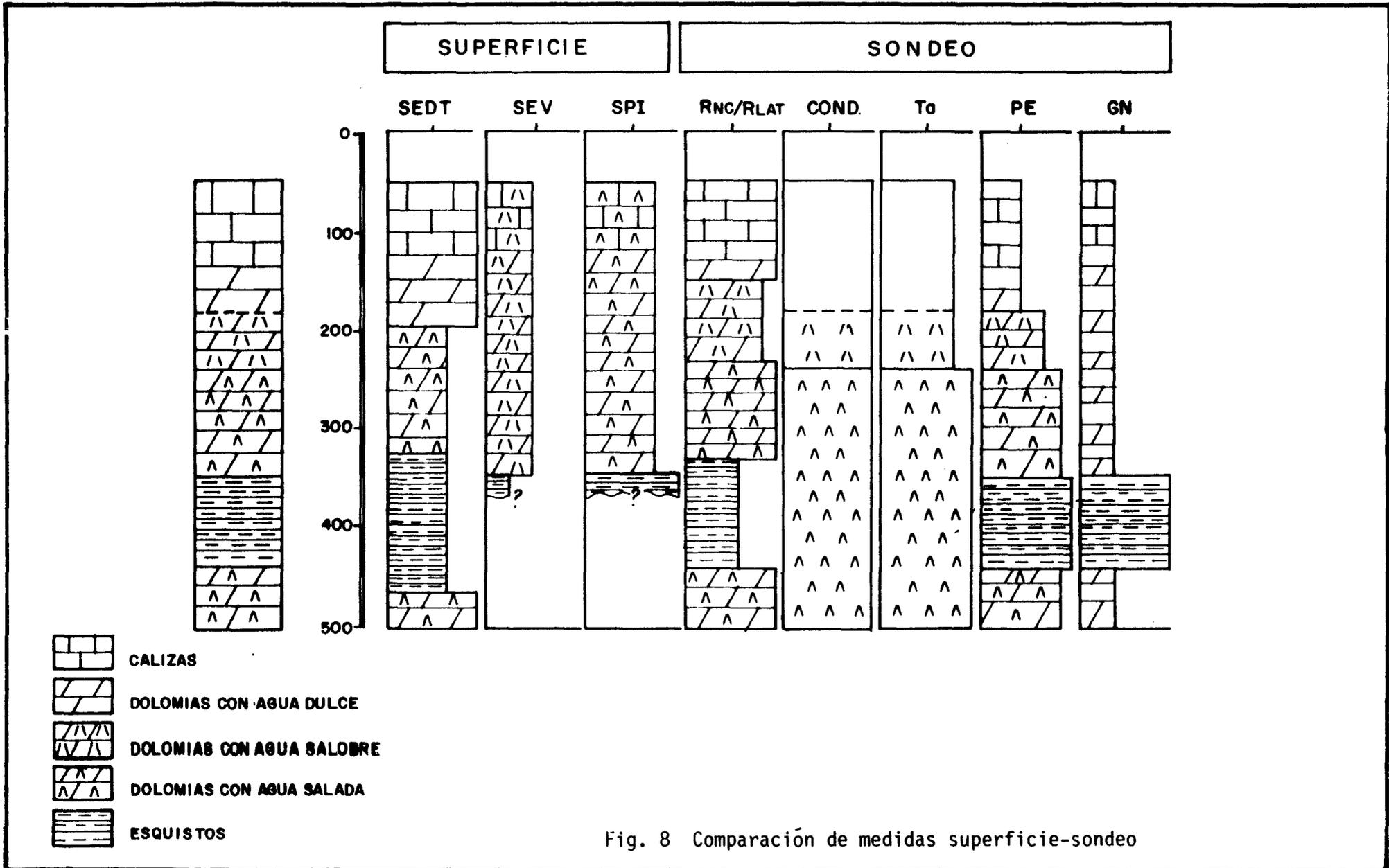
COMPARACION DE MEDIDAS SUPERFICIE-SONDEO

En la Fig. 8 se pretende reflejar la vulnerabilidad de cada una de las técnicas geofísicas utilizadas a los cambios litológicos e hidroquímicos más importantes. Para ello, y a partir de todos los datos recogidos, se ha construido una columna geológica simplificada, con la cual se comparan.

Señalaremos que para la interpretación de cada una de las técnicas se ha utilizado toda la información disponible, tanto del resto de ellas, como de datos geológicos y geofísicos previos. La finalidad era comprobar la resolución de cada parámetro en el límite de sus posibilidades de éxito.

CONCLUSIONES

En áreas donde, a pesar de las variaciones en litología y salinidad del acuífero, los contrastes de resistividades no son muy importantes se deberá, por un lado, utilizar técnicas auxiliares que faciliten los problemas de ambigüedad interpretativa (SPI, testificación geofísica). Por otra parte se intentarán establecer las leyes de variación de los parámetros físicos medidos en -



sondeo ("in situ") dada la necesidad de establecer continuos controles en -- sondeo al carecerse de exactitud en la determinación de la interfase agua - dulce-salada en estas áreas complejas desde superficie.

Se considera importante el análisis de la polarización inducida mediante el estudio de la curva de descarga, ya que permite obtener otros parámetros -- (constante de tiempo e influencia de la inducción electromagnética), relacio nados también con la salinidad del acuífero.

Por último, se comprueba como parámetros sencillos y rápidos de medir, como la temperatura o el potencial espontáneo, pueden apoyar el seguimiento de - los procesos de intrusión marina de forma cualitativa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Instituto Geológico y Minero de España -- (IGME) y a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA), tanto en sus delegaciones centrales como provinciales (Almería), su colabora ción y ayuda en las investigaciones realizadas.

BIBLIOGRAFIA

CUSTODIO, E. (1982)

"Calidad del agua y protección de los acuíferos kársticos ante la contamina ción". Reunión Monográfica sobre el karst. Larra 82.

DOMINGUEZ, S. et al. (1988)

"El Método de Polarización Inducida como técnica de apoyo al estudio de las intrusiones marinas. Aplicación a los acuíferos de Almuñecar y Castell de Ferro (Granada)". Simp. Internacional "TIAC'88" (Granada).

GHOSH, D.P. (1971)

"Inverse filter coefficient for the computation of apparent resistivity -- standard curves for horizontal stratied earth". Geoph. Prosp. 19, 769-775.

IGME (1982)

"Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)".

NAVAS, J.J. et al. (1987)

"Aplicaciones y resultados obtenidos de la sonda de testificación "Loreto". Simp. Int. Rec. Hidr. Canarias Agua 2000.

ROY, K.K. y ELLIOT, H.M. (1980)

"Resistivity and IP survey for delineating saline water and fresh water zo-- nes". Geoexploration, 18. 145-162.

ROY, A. y PODDAR, M. (1981)

"A simple derivation of Seigel's time domain induced polarization formula".
Geoph. Prosp. 29. 432-437.

SEGESMAN, F. y TIXIER, M.P. (1959)

"Some effects of invasion on the SP curve". Jour. Petr. Tech. 19.

SEIGEL, H.O. (1959)

"Mathematical formulation and type curves for induced polarization". --
Geophysics, 24, 3; 547-565.