

Red de control σ/T para el estudio de intrusión marina en Almuñécar (Granada).

Por J. DIAZ CUIEL, D. MARTIN SANCHEZ, A. MALDONADO ZAMORA (*) y M.^a GOMEZ MARTOS (**)

RESUMEN

Intentar crear redes de detección con una distribución geométrica adecuada para determinar con anterioridad la interfase (agua dulce)/(agua salada) supone claras ventajas para controlar dicho avance. En ese sentido, la medida simultánea de conductividad y temperatura de forma continuada en un número suficientemente elevado de sondeos se plantea como la solución óptima.

En este trabajo se expone la experiencia llevada a cabo entre el Instituto Tecnológico Geominero de España (I.T.G.E.) y el Departamento de Ingeniería Geológica de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid (Cátedra de Geofísica Aplicada) en el acuífero costero de Río Verde en Almuñécar (Granada), donde se diseñó, optimizó e instaló una red de control.

En el estudio analítico de los resultados se han buscado una serie de aproximaciones matemáticas que reflejaran de forma sencilla los posibles procesos de avance o regresión de la interfase marina.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, Temperatura, Intrusión Marina, Acuífero Costero. España.

ABSTRACT

It has been considered that stationary and periodical monitoring networks of electrical conductivity and temperature are a suitable technique to determine beforehand the evolution of fresh/saline water interface applied to free coastal aquifer.

In this sense, this paper present the interpretation of results of a useful field application carried out by the Geological and Mining Survey of Spain and the Mining Engineering School of Madrid, in the alluvial quaternary coastal aquifer of River Verde located at the southeastern part of Spain (Almuñécar, Granada).

Diverse and varied mathematical approaches have been tested to reflect in a clear and uncomplicated way the advance and regression phenomena of sea water intrusion.

Key words: Electrical conductivity, Temperature Marine, Intrusion, Coastal aquifer. Spain.

INTRODUCCION

La determinación de la geometría de la interfase (agua dulce)/(agua salada) en áreas costeras, así como su evolución en el tiempo, representa un problema de importancia vital, sobre todo en zonas del litoral mediterráneo en las que, tanto por motivos de riego de cultivos como de superpoblación debida a la afluencia turística, se gene-

ran demandas de abastecimiento superiores en muchos casos a la capacidad de aporte hídrico de la zona.

En la actualidad el control del avance de dicho frente se ha venido realizando a posteriori, a través de muestras de agua de sondeos, pero las dificultades técnicas y el alto coste económico de dicho sistema, sugiere buscar una solución alternativa de este problema.

(*) Departamento de Ingeniería Geológica- E.T.S.I. de Minas de Madrid.

(**) Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia - I.T.G.E.

Entre las técnicas indirectas empleadas cabe señalar la medición de parámetros eléctricos des-

de superficie mediante S.E.V., S.P.I., S.E.D.T., C.E., etc., con buenos resultados en muchos casos. No obstante, estos métodos presentan algunos inconvenientes como son: el alto grado de indeterminación a que estos métodos están sometidos, el elevado coste económico que conlleva la repetición sistemática de este tipo de campañas y la dificultad que entraña el establecimiento de una red de control de estas características.

Con el fin de evitar estos inconvenientes, se ha creado una red experimental de medidas de conductividad y temperatura dentro de sondeos en el acuífero de Río Verde en Almuñécar, cuyos objetivos finales han sido:

- 1) La determinación y seguimiento de la interfase de intrusión marina mediante una red adecuada de control.
- 2) La evaluación de las ventajas de la medida de temperatura para la detección de dicha interfase, en cuanto a su posible antelación respecto a la conductividad.

Ambos objetivos exigen la necesidad de establecer una red con un número elevado de sensores distribuidos espacialmente sobre toda la zona de estudio:

Por lo que respecta al primer objetivo, este tipo de redes nos permiten obtener una información espacial del movimiento de la interfase en su conjunto, pudiendo obviar los efectos que producen los conos de eyección y permitiendo la cuantificación del avance e intensidad de la intrusión marina, y la evaluación de los fenómenos locales causantes de dicha intrusión.

En cuanto al segundo objetivo, las variaciones de temperatura no sólo se producen por fenómenos macroscópicos debidos al movimiento del frente marino, sino también por otros factores más locales tales como:

- Variaciones de transmisividad térmica en las proximidades de cada sondeo.
- Existencia de otros focos térmicos: Antrópicos, evapotranspiraciones, vegetación,...etc.
- Influencia del funcionamiento de la bomba en los sondeos explotados.

Los efectos térmicos que producen estos agentes son prácticamente imposibles de filtrar o eli-

minar, más aún si consideramos la no estacionariedad del estado hídrico. Por este motivo, y tal como se verá más adelante, el estudio de las medidas de temperatura debe hacerse de manera global a través de un conjunto estadístico de medidas que nos permitan eliminar dichos efectos.

1. HIDROGEOLOGIA DEL ACUIFERO

El acuífero de Almuñécar, denominado acuífero del Río Verde por el río que lo atraviesa, se encuentra situado en el sector costero del Suroeste de la provincia de Granada, abarca los términos municipales de Jete y Almuñécar y está limitado al Sur por el Mar Mediterráneo.

Este acuífero está constituido, fundamentalmente, por depósitos aluviales (gravas, arenas y limos) encajados con carácter postorogénico en un potente conjunto de materiales paleozoicos metapelíticos pertenecientes al conjunto Alpujárride. En concreto, los materiales del borde del acuífero son de naturaleza esquistosa y, por tanto, impermeables.

Su superficie es irregular debido a factores estructurales y litológicos, variando en anchura desde 100 metros en angosturas, 900 metros en el sector central y 350 metros en la desembocadura. Su espesor es también variable dentro de un aumento generalizado hacia la costa, llegando a alcanzar los 78 metros de profundidad.

Las precipitaciones sobre los 3.7 km² de afloramientos permeables suponen unas entradas medias de 0.3 hm³/año. El retorno de riego oscila entre 1 y 2 hm³/año y el resto, hasta completar los 8 a 15 hm³/año de recursos totales, corresponde a la infiltración de las aguas superficiales (cuenca vertiente, Río Verde,...) con una descarga subterránea al mar que llega a alcanzar los 7 hm³/año en los años húmedos.

En varios trabajos realizados por BENAVENTE Y CALVECHE (1988) se estableció la distribución espacial y los rangos de variación de la porosidad eficaz (de 13% a 21%), la permeabilidad horizontal (de 0.67 a 153 m/día), la permeabilidad vertical (de 0.69 a 0.07 m/día) y la transmisividad

(de 392 a 6250 m²/día). Estas diferencias se deben al incremento del espesor saturado y de las capas de limos entre el sector de cabecera y el sector de vega.

Estudios recientes de FERNANDEZ-RUBIO (1988) y de JALON (1988) configuran un comportamiento del acuífero de tipo "pistón", con salinizaciones y desalinizaciones casi totales, motivado por el balance entre las extracciones y la recarga y por las características hidrodinámicas del acuífero.

Una revisión de la evolución piezométrica desde 1974 a 1987, con más de 130 puntos inventariados, muestra una clara disminución de los niveles originados por el aumento de la demanda pasando de 6.3 hm³ en 1974 a 22 hm³ en 1987. Esto está suponiendo no sólo el agotamiento de los recursos, sino también de las reservas, lo que implica una degradación paulatina de la calidad del agua por el avance de la intrusión marina con períodos cada vez más cortos de recuperación parcial y un contenido cada vez mayor de sales.

2. DESCRIPCION DE LA RED

La red de medidas está compuesta por una serie de 14 sondas con sensores de conductividad y temperatura, instaladas de manera permanente en el interior de sondeos y piezómetros situados en la zona. De esta manera se consigue una mayor relación señal/ruido entre los efectos provocados por el movimiento del frente marino y los efectos térmicos superficiales.

La campaña de medidas se realizó entre los meses de Julio de 1992 y Junio de 1993. Las lecturas de los valores de conductividad y temperatura han sido realizadas con un instrumento móvil, diseñado por la Cátedra de Geofísica Aplicada (E.T.S.I.M.M.), y con la cadencia preestablecida en función del ritmo de avance esperado.

2.1. Medida de conductividad

De todos es conocida la relación entre conductividad y salinidad del fluido, de forma que el agua pura tiene una conductividad tendente a

cero, mientras que con una determinada concentración de sales, alcanza una conductividad función de la cantidad y el tipo de iones en disolución.

Para cuantificar esta relación debemos conocer, en primer lugar, la concentración equivalente de ClNa para una disolución determinada. Este proceso podemos realizarlo mediante curvas normalizadas (Ábaco Gen-8 de Schlumberger), pero no se puede realizar de forma inversa.

Para encontrar el contenido en ClNa (y por tanto en Cl⁻ multiplicando por 0.6035) debemos encontrar una relación específica para el tipo de disolución que tratemos.

Con este fin hemos desarrollado, en primer lugar, una relación entre la conductividad medida y la equivalente de ClNa para las aguas obtenidas en los sondeos de Almuñécar. Esta relación viene dada por la siguiente expresión:

RELACION CONDUCTIVIDAD TOTAL/CONDUCTIVIDAD EQUIVALENTE ClNa EN ALMUÑÉCAR	
$\sigma_s = 0.18 \cdot \sigma_t^{1.165} \quad (1)$	
σ_t : Conductividad total - σ_s : Conductividad equivalente ClNa	

A continuación, es necesario establecer una relación entre la conductividad del fluido y su concentración equivalente de ClNa. Esta relación, de la que existen múltiples ábacos, se ha obtenido experimentalmente y se ha aproximado a la siguiente expresión matemática:

RELACION CONDUCTIVIDAD / CONCENTRACION (ClNa)	
$c(\text{ClNa}) = \begin{cases} \frac{\sigma - 500}{1500} & \text{si } \sigma > 2000 \mu\text{O/cm} \\ \left(\frac{\sigma}{2000}\right)^{4/3} & \text{si } \sigma < 2000 \mu\text{O/cm} \end{cases} \quad (2)$	
σ : conductividad en $\mu\text{mho/cm}$ - $c(\text{ClNa})$: concentración en gr/l	

2.2. Medida de temperatura (T)

Este parámetro, no sólo es necesario para la corrección de la medida de conductividad cuya forma más conocida viene dada por la relación:

CORRECIÓN DE CONDUCTIVIDAD POR TEMPERATURA	
$\sigma(25) = \sigma(T) \frac{(25 + 21.5)}{(T + 21.5)} \quad (3)$	
$\sigma(25)$: Cond. a 25 °C - $\sigma(T)$: Cond. a la temperatura de medida - T: Temperatura en °C	

sino que puede representar una señal previa al avance de la intrusión marina si suponemos que la difusión de la onda térmica que genera el frente de agua de origen marino llega antes que el propio frente.

Para justificar esta hipótesis se ha realizado una modelización por elementos finitos de dicho proceso. En esta simulación teórica, además de los distintos orígenes del agua de la formación, la profundidad, el gradiente geotérmico y la proximidad de la interfase, se contemplan los ciclos térmicos diario y anual y una conductividad térmica constante. Los resultados obtenidos mediante esta modelización, muestran que las superficies de influencia térmica presentan formas distintas en los momentos de intrusión que en los de regresión marina, tal y como se refleja en los gráficos de la figura nº 1.

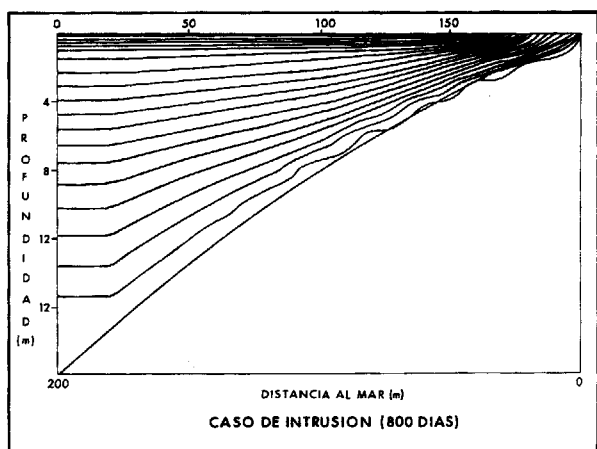
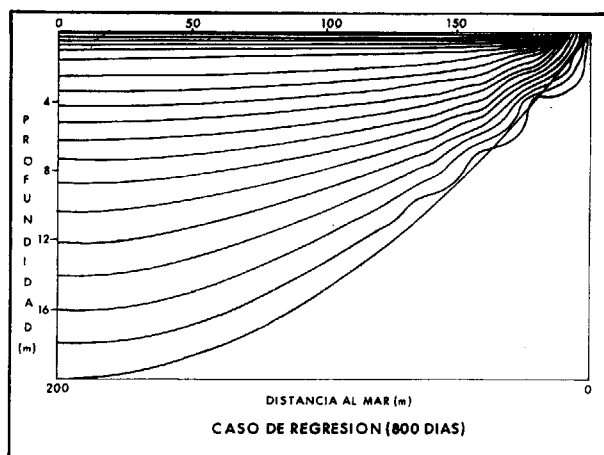


Figura 1.

Como puede verse, según esta modelización, la distribución de isoterma en el subsuelo puede indicarnos con anterioridad la forma y proximidad de la interfase (agua dulce)/(agua salada).

2.3. Descripción de las sondas

Las características iniciales bajo las que se realizó el diseño de las sondas eran:

- Accesibilidad al interior de sondeos explotados.
- Diámetro inferior a la semidiferencia entre la tubería y la bomba.
- Evitar turbulencias helicoidales debidas al funcionamiento del motor.
- Sistemas de sujeción resistentes y fácilmente extraíbles.
- Alta movilidad de fluido en la zona de medida de conductividad.
- Dispositivo de medida de conductividad de campo interior a la sonda.
- Baja inercia térmica.
- Elevada resistencia mecánica y aislamiento eléctrico.
- Bajo coste económico.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se llegó al diseño final de las sondas que aparece en la figura nº 2.

Las características de los componentes principales son: Cuerpo de P.V.C., electrodos para medida de conductividad de Inconel 625 (cuya composición esquemática es Ni (61%)-Cr (21.5%)-Mo (9%)-Nb (3.6%)-Fe (2.5%) y sensor de temperatura AD-590.

Además, se diseñó un lastre rígido que se acopla a las sondas para evitar el movimiento helicoidal sobre la tubería, aunque con ello no se eviten los enganches que se pueden producir con otros cables sin consistencia, como por ejemplo, los utilizados para controlar el nivel de agua.

El acceso a través de las planchas de sujeción de la bomba en la boca del sondeo, se realizó mediante perforación con corona de widia.

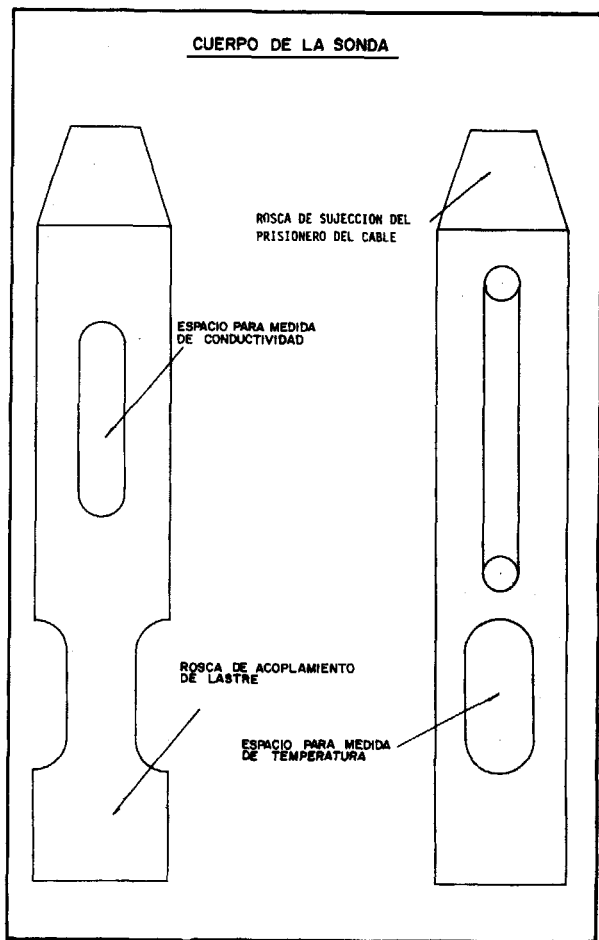


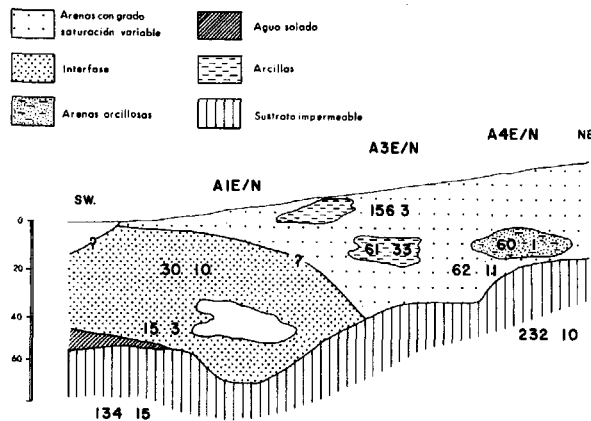
Figura 2. Detalle de las sondas.

2.4. Geometría de la red

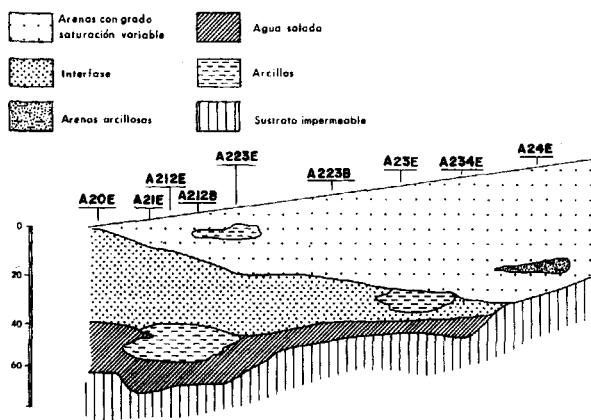
Dado que la interfase (agua dulce)/(agua salada) se adentra en el interior adoptando una forma aproximadamente cóncava y dado que las profundidades de los tramos de tubería filtrante en los sondeos existentes son desconocidas en la mayoría de los casos, se consideró que la mejor manera de analizar este proceso dinámico sería colocar las sondas, siempre que fuera posible, adoptando las siguientes características:

- Distribución espacial equidistante alejándose de la costa.
- Elección de sondeos explotados junto a otros sin extracción.
- Situación de las sondas a una misma cota de profundidad.

Para optimizar esta distribución se realizaron dos campañas de SEV-SPI, cuyos resultados finales se encuentran resumidos en los gráficos de la figura nº 3:



INTERPRETACION GEOLOGICA DE SEV-PI (Febrero 1988)



RESULTADO DE LA CAMPAÑA DE OCTUBRE DE 1988

Figura 3. Sección interpretada de dos campañas de SEV-SIP.

De esta manera se seleccionaron sondeos y pozos con una distancia al mar entre 150 y 2500 metros y se ubicaron las sondas a una profundidad en torno a 20 metros. En la figura nº 4 aparece un croquis de situación de los puntos se-

leccionados, con las últimas cifras del número de registro del I.T.G.E.

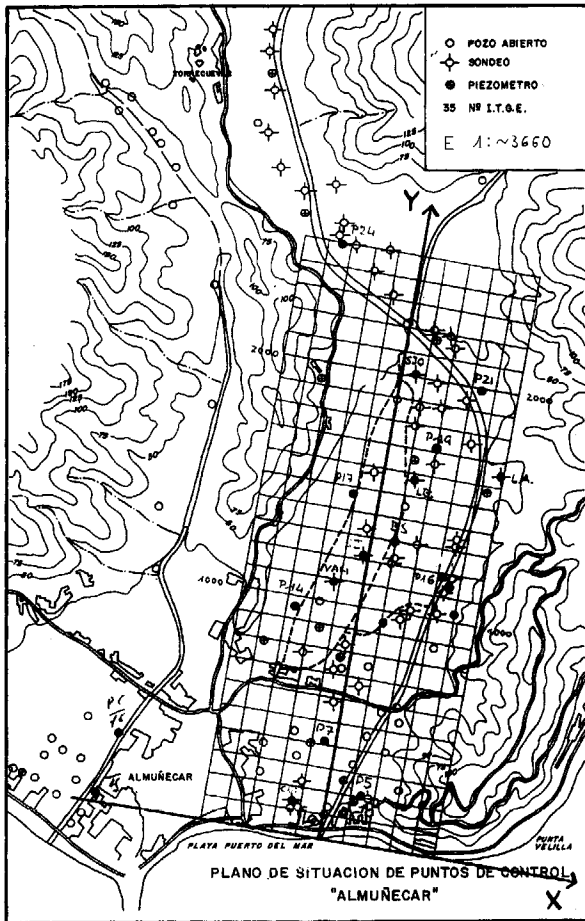


Figura 4. Croquis de situación.

2.5. Programa de medidas

La cadencia preestablecida se estimó en base a los estudios anteriores sobre el acuífero cuyos resultados se encuentran simplificados en el gráfico de la figura nº 5.

Analizando la velocidad de variación de los valores de salinidad de dicho gráfico, se decidió establecer un régimen de medidas semanal durante un período de un año, esto es, desde finales de Junio de 1992, fecha en que concluyó el montaje de las sondas, hasta Junio de 1993.

De esta forma no sólo abarcaríamos la estación otoñal, que es cuando, según los datos refleja-

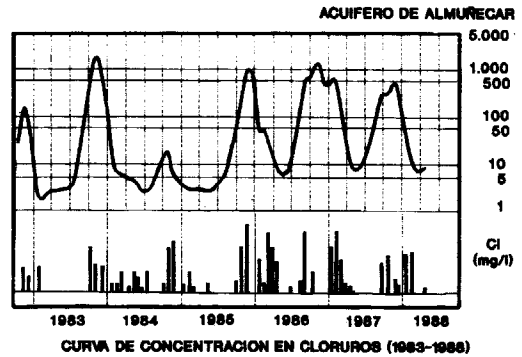


Figura 5. Evolución de los períodos de intrusión (FERNANDEZ-RUBIO).

dos en la figura nº 5, se produce el avance más profundo del frente de salinización, sino que se podría realizar un estudio detallado de la evolución anual de los parámetros de conductividad y temperatura.

Esta elección del intervalo semanal de medidas se ha realizado con un criterio más bien estricto, es decir, el menor posible dentro de las consideraciones económicas, con el fin de evaluar el período óptimo para la ejecución de futuras campañas.

Este intervalo no se ha cumplido de forma exacta cada siete días, por razones de disponibilidad del operador contratado para este servicio, lo cual no supone una alteración importante. Por esa razón el programa final de medidas realizadas quedó según aparece en la tabla 1:

MEDIDAS DURANTE 1992				MEDIDAS DURANTE 1993			
Nº	FECHA	Nº	FECHA	Nº	FECHA	Nº	FECHA
1	2 Julio	15	10 Octubre	28	7 Enero	42	16 Abril
2	12 Julio	16	17 Octubre	29	15 Enero	43	23 Abril
3	19 Junio	17	24 Octubre	30	22 Enero	44	1 Mayo
4	26 Junio	18	30 Octubre	31	29 Enero	45	9 Mayo
5	1 Agosto	19	6 Noviembre	32	5 Febrero	46	15 Mayo
6	8 Agosto	20	12 Noviembre	33	12 Febrero	47	22 Mayo
7	13 Agosto	21	19 Noviembre	34	19 Febrero	48	1 Junio
8	20 Agosto	22	26 Noviembre	35	26 Febrero	49	5 Junio
9	27 Agosto	23	4 Diciembre	36	6 Marzo		
10	3 Septiembre	24	11 Diciembre	37	13 Marzo		
11	10 Septiembre	25	18 Diciembre	38	19 Marzo		
12	17 Septiembre	26	24 Diciembre	39	26 Marzo		
13	24 Septiembre	27	31 Diciembre	40	1 Abril		
14	1 Octubre			41	8 Abril		

Tabla 1. Fechas de medida

No obstante, el programa de medidas no se ha completado en todos los sondeos debido, en parte, a que los sensores de temperatura han ido deteriorándose en bastantes de las sondas instaladas y, en otros casos, a que algunos de los sondeos presentaron, de forma aislada, problemas de acceso a los mismos.

Como computo final, al cabo de un año han resultado impecaderos sólo un 35% de los sensores de temperatura, mientras que los sensores de conductividad no parecen presentar problemas de importancia. No obstante, debemos señalar que se aprecia una ligera variación de las lecturas después de un período de salinización, como si los electrodos hubieran quedado recubiertos con una pequeña capa de sal, aumentando así las lecturas de conductividad.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Las lecturas de conductividad para cada sonda con el equipo diseñado mantienen una relación de tipo logarítmico con el valor de conductividad real del fluido. Esa relación viene dada por la expresión:

$$\text{Conductividad} = K\sigma_1 * (e^{K\sigma_2 * \text{Lectura}} - 1) \quad (4)$$

donde las constantes $K\sigma_1$ y $K\sigma_2$ son las que posteriormente habrá que introducir mediante dos selectores instalados en el instrumento de medida para obtener directamente el valor de conductividad real.

Para la obtención de los valores paramétricos de dichas curvas se ha partido de los datos de lectura del equipo diseñado frente a los valores de conductividad obtenidos con un conductímetro de laboratorio marca YSI para una serie de doce disoluciones con distinta salinidad. Los valores de concentración y conductividad utilizados se muestran en la tabla 2:

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CONCENT	0,4	1,5	3	5	7	10	12	16	19	23	27	32
CONDUCT	1	2,76	5	8	11	15,5	19	24,5	29	36	41	48,5

Tabla 2. Concentración y conductividad de las disoluciones de calibración.

Las concentraciones aparecen expresadas en gr/litro y las conductividades en $\mu\text{mho/cm}$.

Los valores de lectura de conductividad del equipo para cada una de las sondas, en las disoluciones citadas, se han aproximado siguiendo un método de mínimos cuadrados, a una función del tipo (4). Aunque estas constantes se utilizan en gabinete, junto con el instrumento de medida se entregan los valores de dichos parámetros obtenidos para cada sonda.

Por otro lado, los sensores de temperatura de cada sonda se han calibrado con referencia a un termómetro normalizado, aunque en este caso sólo es necesario obtener los valores de calibración para una temperatura de 0°C y para un valor superior a los máximos esperados (en nuestro caso 40°C). Del mismo modo que para la conductividad, el equipo de medida dispone de dos selectores para introducir las constantes $KT1$ y $KT2$ obtenidas para cada sonda.

Las conductividades obtenidas para cada uno de los días de medida se han corregido a 25 grados centígrados. En la tabla 3, a modo de ejemplo, presentamos los valores obtenidos en uno de los días de medida. En dicha tabla aparecen además, los valores de la lectura directa de la sonda sin aplicación de las constantes de calibración.

FECHA - 12/07/92		OPERADOR - A.J. Correa Parra		
SONDA	SONDEO	LECTURA	T (°C)	σ ($\mu\text{S/cm}$)
1	Carmen del Pilar	8600	18,9	8638
2	Piezómetro 5	5490	18,1	5153
4	Piezómetro 7	2500	20,4	2114
8	Piezómetro 14	5500	18,5	8345
10	Vahemosa (San José)	1750	18,5	1283
11	Piezómetro 16	1150	17,7	780
38	Braulio Salas	2980	19,4	3802
13	Piezómetro 17	1200	19,3	1222
14	La Barrosa	900	22,9	965
15	La Alvina	1000	25,3	1026
16	San José Obrero	870	20,3	734
17	Piezómetro 21	1330	16,7	814
20	Piezómetro 24	910	17,7	808
21	Piezómetro 19	1040	20,1	987

Tabla 3. Ejemplo de resultados obtenidos para cada fecha.

3.1. Evolución de los valores para sonda

Con el fin de mejorar la comprensión de los resultados se han representado las curvas de con-

ductividad y temperatura resultantes a lo largo del periodo de registro en cada uno de las sondas instaladas. En la figura nº 6 aparecen algunos ejemplos de dichas evoluciones.

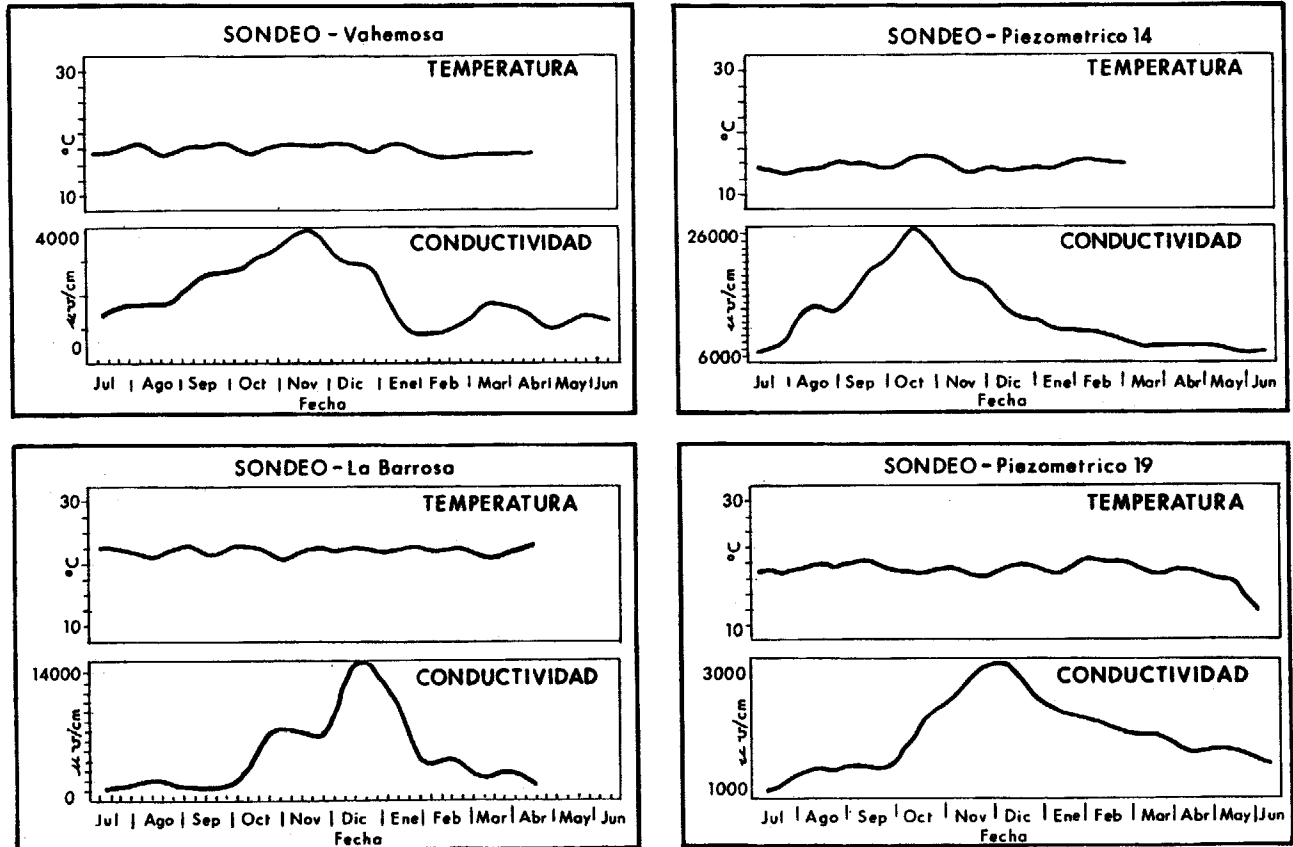


Figura 6. Ejemplos de curvas individuales.

En las curvas de temperatura debemos señalar que los valores medios para cada sonda son muy distintos, obteniéndose valores entre 16 y 25°C. Además, en todos los sondeos se aprecia una distribución de pequeños máximos y mínimos a lo largo del tiempo que no parecen presentar un criterio o ley determinados.

Por otro lado, en las curvas de conductividad debemos destacar las siguientes características:

1: Tanto los rangos de variación de las curvas como los periodos donde se producen los máximos valores de conductividad, no coinciden en todos los sondeos, lo que supone un primer indicio de que la evaluación del proceso de intru-

sión debe realizarse estudiando el conjunto de los sondeos.

2: En todas las sondas, excepto en el piezómetro 24 (el más alejado de la costa), se refleja un au-

mento característico de los valores obtenidos a lo largo del tiempo, los cuales representan los periodos de avance de la intrusión.

3: Los valores máximos oscilan entre 38000 $\mu\text{mho/cm}$ para el sondeo más próximo al mar (Carmen del Pilar) y 1000 $\mu\text{mho/cm}$ para el más distante (Piezómetro 24). Estos valores dependen muy directamente de la posición del sondeo dentro de la cuenca y del grado de explotación de la zona donde se encuentren. De esa forma, encontramos que los piezómetros 21 y 19 y el sondeo San José Obrero poseen máximos similares en torno a 3000 $\mu\text{mho/cm}$. El piezómetro 17 y el sondeo Vahemosa situados en la parte izquierda de la cuenca presentan máximos de

4000 $\mu\text{mho/cm}$, mientras que el sondeo la Alvina situado a la derecha del eje sólo alcanza valores máximos de 1500 $\mu\text{mho/cm}$.

4: Podemos diferenciar distintos intervalos de aparición de los máximos de intrusión. Así, en los piezómetros 5 y 14 es donde antes se detecta dicho fenómeno (entre Julio y Octubre de 1992). En los sondeos de Braulio Salas, La Barrosa y San José Obrero este máximo se produce entre Octubre de 1992 y Febrero de 1993. Y por último, en los Piezómetros 7, 17 y 21 es donde más tarde se manifiesta (entre Febrero y Junio de 1993).

5: La anchura de los intervalos de valores máximos, esto es, el período de tiempo durante el que se producen, también se muestra muy variable. En este sentido, los sondeos Braulio Salas, La Barrosa y San José Obrero, que son sondeos explotados de forma continua, tienen máximos muy anchos llegando a ocupar, como es el caso de Braulio Salas, un período de tiempo que va desde Septiembre de 1992 hasta Febrero de 1993. Este fenómeno también se aprecia en los piezómetros cercanos como el P-16.

Podemos concluir que, tanto la intensidad del fenómeno de intrusión, como el momento en el que se produce y la duración del mismo, resultan ser función directa de la situación en la cuenca y de las condiciones de explotación del sondeo donde se encuentra el sensor, así como de los que le rodean.

3.2. Representación tridimensional de resultados

Para tener una imagen global del proceso definido por las variaciones de conductividad y temperatura hemos representado dichos valores en tres dimensiones mediante un programa comercial. En la figura nº 7 presentamos algunos ejemplos de las superficies obtenidas.

En ellas podemos comprobar como los valores de conductividad reflejan claramente el movimiento de avance y regresión del frente marino. En menor medida, en los valores de temperatura también se aprecia la variación de la concavidad de las superficies de aproximación, tal y como se esperaba de la modelización realizada.

A grandes rasgos, en el conjunto de las superficies de aproximación, podemos diferenciar los siguientes aspectos morfológicos;

Conductividad:

-Se produce un cono de intrusión aproximadamente en el centro de la cuenca, situado entre 900 y 1000 metros desde el mar y un mínimo situado a 450 metros al Sur del eje de la cuenca. Estos fenómenos podrían deberse a datos aislados de dicha zona.

-La forma de la cuña de la interfase marina durante el período de intrusión no es del todo paralela a la línea de costa, sino que se encuentra ligeramente más elevada hacia el Sur. Los sondeos que se encuentran situados al sur del eje definido en la cuenca presentan valores más altos de conductividad.

-Los máximos y mínimos locales se acentúan según aumenta la intrusión y se suavizan a medida que el fenómeno de intrusión disminuye, lo que indica, de nuevo, un carácter local de los agentes responsables de la intrusión.

-En un análisis más detallado de estas superficies podemos diferenciar cuatro períodos de evolución:

1): Julio/Septiembre de 1992. Se caracteriza por una débil bajada de los valores de conductividad en Julio seguido de un aumento progresivo a lo largo de Agosto y Septiembre. Durante este período las superficies se muestran ligeramente convexas.

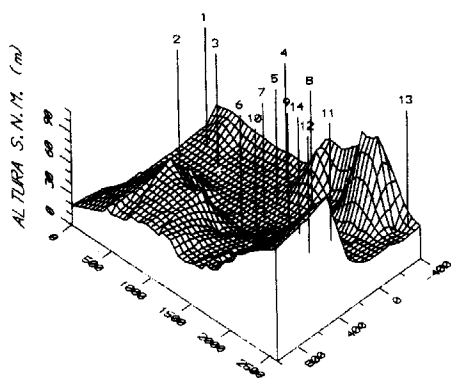
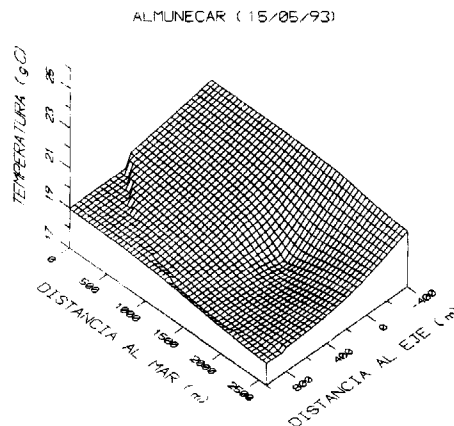
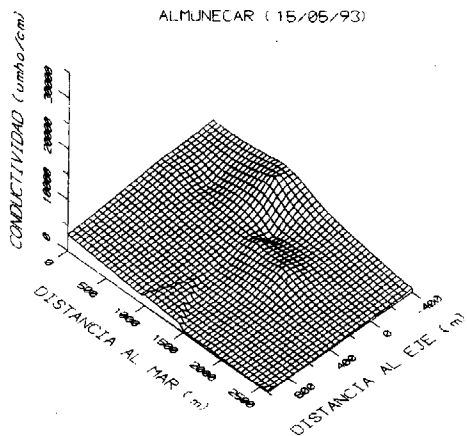
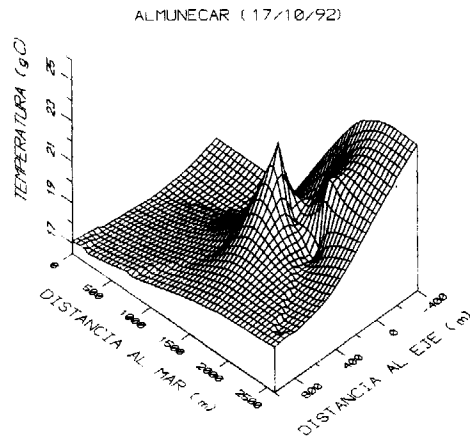
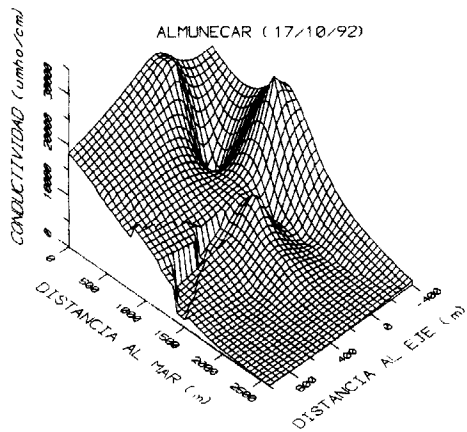
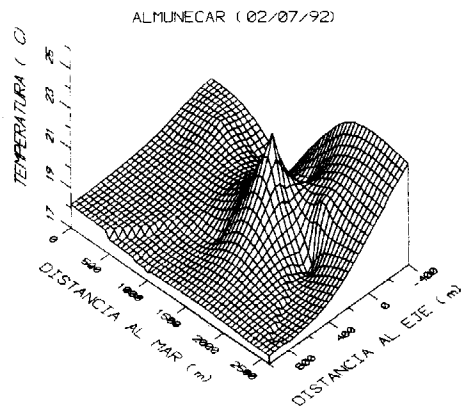
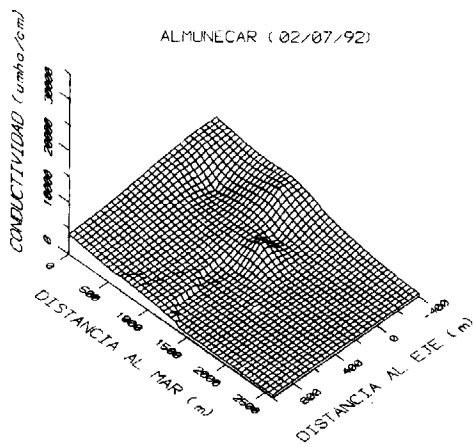
2) Octubre/Diciembre de 1992. Se distingue por una subida brusca, manteniéndose dicho valor durante los meses de Noviembre y Diciembre. La tendencia de estas superficies es a volverse más convexas a medida que aumenta la intrusión.

3) Enero/Abril de 1993. Caracterizado por una bajada progresiva de los valores. Pasamos gradualmente de curvas convexas a cóncavas.

4) Abril/Junio de 1993. Débil aumento de la conductividad. En este período se aprecia una estabilización de la concavidad.

Temperatura:

Existe un máximo al Norte del eje de la cuenca que desaparece en el mes de Marzo de 1993. Es-



CORRESPONDENCIA ENTRE NOMBRES DE SONDEO Y ETIQUETAS ASIGNADAS EN LA SUPERFICIE TOPOGRAFICA DE ALMUNECAR.

<u>NOMBRES DE LOS SONDEOS</u>	<u>ETIQUETAS</u>
Carmen del Pilar	1
Piezómetro 5	2
Piezómetro 7	3
Piezómetro 14	4
Vahemosa	5
Piezómetro 16	6
Braulio Salas	7
Piezómetro 17	8
Barrosa	9
Alvina	10
San José Obrero	11
Piezómetro 21	12
Piezómetro 24	13
Piezómetro 19	14

Figura 7. Superficies de isoconductividad e isotermas.

te máximo se encuentra centrado en torno a 1500 metros de distancia al mar.

-A partir de Agosto las superficies empiezan a hacerse convexas con máximos en la parte central de la cuenca, apareciendo máximos en Noviembre y Diciembre. Después de este período se produce un enfriamiento durante los meses de Enero a Mayo.

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y METODOLOGIA DE TRABAJO

Para la consecución de los objetivos planteados se han desarrollado varios programas de ordenador en lenguaje Basic que realizan tanto los procesos de grabación y corrección de datos, como los de tratamiento e interpretación de resultados. A continuación comentaremos los apartados más reseñables de estos programas.

4.1. Curvas temperatura/tiempo de cada sonda

En el análisis de visu expuesto en el apartado 3.1 sobre las curvas de valores de temperatura en función de la fecha de medida (para cada sonda) se infería que esas curvas no mostraban variaciones que fueran representativas del fenómeno de avance/regresión de la interfase marina.

Con el fin de comprobar matemáticamente la poca representatividad de estas curvas se realizó un análisis de sus frecuencias temporales para ver si mostraban algún período fundamental que coincidiera con los intervalos de intrusión. Para ello se definió un algoritmo mixto entre el Teorema de Euler para coeficientes del desarrollo en armónicos y un proceso numérico iterativo.

Además, dado que la discontinuidad de las curvas podía suponer alteraciones sobre los resultados, se añadió la posibilidad de compararlos con períodos definidos por el usuario. Esto es, los períodos encontrados matemáticamente, al no tener criterios de peso estadístico sobre un intervalo determinado, pueden presentar diferencias con otros períodos obtenidos gráficamente y que, aún no siendo los de mínimo error,

se acoplen a la curva de temperatura/tiempo y tengan un mayor sentido físico.

En la tabla 4 se presentan los períodos principales encontrados para cada una de las sondas.

Nº	SONDEO	PERIODO MATEMATICO	PERIODO GRAFICO
1	Carmen del Pilar	70	300
2	Piezómetro 5	259	260
4	Piezómetro 7	91	250
8	Piezómetro 14	245	240
10	Vahemosa (San José)	189	338
11	Piezómetro 16	63	260
38	Braulio Salas	154	160
13	Piezómetro 17	154	290
14	La Barrosa	154	338
15	La Alvina	168	300
16	San José Obrero	98	200
17	Piezómetro 21	119	320
20	Piezómetro 24	126	280
21	Piezómetro 19	168	50

Tabla 4.

Como puede verse, los períodos determinados analíticamente y los definidos de forma gráfica no coinciden en general, salvo los piezómetros 5 y 14 (con períodos de 252 días = 36 semanas) y el sondeo Braulio Salas (154 días = 22 semanas).

Por otro lado, se aprecia un período matemático medio en torno a 154 días (22 semanas) en un considerable número de sondeos. Mientras que en los sondeos Carmen del Pilar, San José Obrero y los piezómetros 7 y 16 vemos que el período matemático medio es de 80 días (11 semanas).

Las diferencias existentes entre el período medio matemático y el período gráfico puede justificarse en base a la variación que existe en los intervalos de medida.

4.2. Curvas temperatura/distancia

Uno de los objetivos planteados en este trabajo era la evaluación de la medida de temperatura en el control del proceso de intrusión marina. Con este fin hemos realizado un estudio, para el conjunto de las sondas, de los valores de temperatura en función de la distancia a la línea de costa obtenidos para cada fecha de medida.

En una primera aproximación se decidió ajustar estas curvas, para cada fecha de medida, a una función de la distancia X a la línea de costa dada por la expresión:

$$T(X) = T_0 - \Delta T * \left(\frac{X}{\Delta X}\right)^n \quad (5)$$

que tiene cierto parecido con la expresión polinómica utilizada en la modelización teórica y un claro sentido físico si consideramos los parámetros que intervienen en ella como:

T_0 = Temperatura del frente subterráneo en la línea de costa.

T = Gradiente de temperaturas entre el agua subterránea marina y continental.

X = Distancia máxima de avance de la cupa marina en su parte más inferior.

n = Exponente índice del grado de intrusión (de 0 a 1) o el grado de regresión (de 1 a) de la interfase.

Al representar los valores que dicho exponente n- tomaba a lo largo del tiempo se observó que éste no mostraba variaciones significativas, por lo que se investigó qué otro método analítico podía reflejar ciertos factores de estas curvas relacionados con el fenómeno de movimiento de la interfase salina.

En esta línea, se llegó a la conclusión de que la superficie de intersección de las isotermas de la interfase con el plano que representan las cotas donde se encuentran situados los sensores podría aproximarse en 2D a una recta. Así, las pendientes o gradientes de estas rectas nos informarían de las variaciones que sufriera la distribución de dichas isotermas.

De esta forma, en los momentos de avance del frente marino (isotermas convexas) dicha superficie mostraría gradientes más altos que en las etapas de regresión (isotermas cóncavas).

Dichas rectas se han obtenido mediante el método de mínimos cuadrados obteniendo, como más destacables, los siguientes resultados:

–Las ordenadas en el origen (temperatura en la línea de costa) y a 2500 metros (temperatura en el límite de estudio de la cuenca) oscilan 3 o 4

grados y de forma inversa. Esto es, en los momentos en los que dicha ordenada es mayor en la línea de costa, es menor al final de la cuenca.

–Si se representan los valores en las pendientes de dichas rectas (gradientes de temperatura) a lo largo del período de medida (figura nº 8), podemos observar que estas reflejan una oscilación propia del fenómeno de intrusión.

–Dicha curva muestra, entre Octubre y Diciembre de 1992, un claro período de aumento del valor del gradiente térmico, alcanzando valores de 1.15 a 2.4 °C/km.

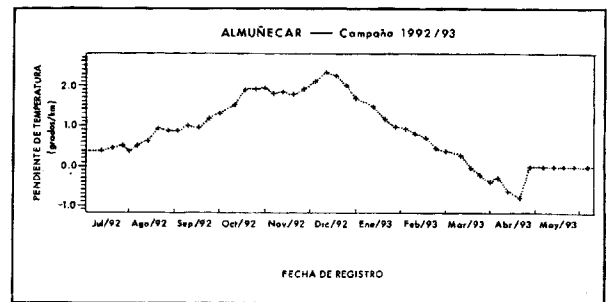


Figura 8. Variación del gradiente de temperatura con el tiempo.

4.3. Detección y seguimiento de la interfase

Dadas las características de los resultados obtenidos, este análisis debe realizarse mediante el estudio de las curvas de conductividad en función de la distancia a la línea de costa para el conjunto de las sondas.

El trabajo expuesto en la presente comunicación se centra en la elección de una distribución óptima de sensores junto con un análisis de los parámetros básicos en el control del fenómeno de la intrusión marina. En un primer esbozo, los factores que influyen principalmente en este proceso son la transmisividad del acuífero, el gradiente vertical de presiones (o concentraciones) del agua del mar y la recarga de agua dulce.

Si consideramos una recarga determinada y dos puntos del acuífero a la misma profundidad bajo el nivel del mar, uno cerca de la costa con al-

ta concentración salina C_A y otro alejado hacia el interior con una concentración menor C_B , la variación de concentración en función de la distancia x a la línea de costa, viene dada por la expresión:

$$dC = \mu (C_A - C_B)dx \quad (6)$$

siendo μ el coeficiente de transmisividad del acuífero. Esta ecuación tiene una solución general de la forma:

$$C(x) = C_A e^{-\mu x} \quad (7)$$

Del mismo modo, dada la proporcionalidad de la conductividad con la concentración de sales, tendremos una expresión similar para $\sigma(X)$ con un valor en el origen σ_0 y un coeficiente de atenuación μ_c . El cálculo de estos coeficientes se ha realizado mediante mínimos cuadrados.

En estas expresiones será el coeficiente σ_0 el que va a representar de forma numérica el estado de avance o regresión del frente salino. De esa forma, cuando el valor de σ_0 aumente, ello indicará un mayor grado de intrusión y viceversa.

Para contrastar esta hipótesis hemos representado en la figura nº 9 la variación de dicho coeficiente a lo largo del tiempo, observándose como queda perfectamente representado el fenómeno de intrusión dentro del período estudiado.

En términos generales, dentro de este acuífero, podemos hablar de un período de intrusión de aproximadamente CINCO meses de duración, abarcando prácticamente las estaciones de Otoño e Invierno.

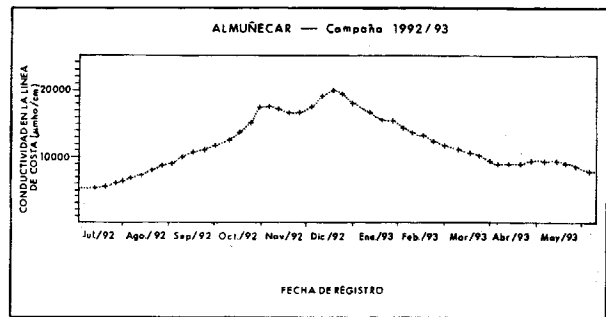


Figura 9. Variación de la conductividad origen con el tiempo.

Conviene resaltar una ligera distinción, dentro del intervalo de valores máximos, de dos máximos menores. El primero de 15 de Octubre a 15 de Noviembre de 1992 y el segundo durante el mes de Diciembre del mismo año.

Aunque la expresión utilizada no es más que una aproximación, para realizar una evaluación final del avance hemos representado en la tabla 5 la situación (distancia a la línea de costa) de varias interfases de conductividad durante los meses de medida.

SITUACION DE LA INTERFASE - ALMUNECA 1992/93				
FECHA	Conductividad en la costa	Distancia (Cd=5750)	Distancia (Cd=2875)	Distancia (Cd=1000)
12/07/92	5291	0	589	1569
13/08/92	7258	219	869	1856
17/09/92	10558	589	1219	2219
17/10/92	13612	806	1456	2456
12/11/92	17127	1019	1681	2494
18/12/92	19821	1156	1819	2494
15/01/93	15512	931	1581	2494
19/02/93	12357	719	1369	2356
19/03/93	10032	519	1169	2169
16/04/93	8861	406	1056	2044
15/05/93	9003	419	1069	2069
05/06/93	7436	231	834	1881

Conductividades en µmho/cm y Distancias en m.

Tabla 5. Situación de la interfase en el período 1992/93.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Temperatura versus conductividad

Si representamos conjuntamente los gráficos finales de conductividad y temperatura (ver figura nº 10) observamos que con la red de medida empleada en este estudio (con un número suficiente de sensores) se puede obtener la determinación de la intrusión marina con cierta antelación.

En este caso, el intervalo de valores máximos marcado en la curva de temperatura muestra una antelación media de NUEVE días sobre el marcado en la curva de conductividad.

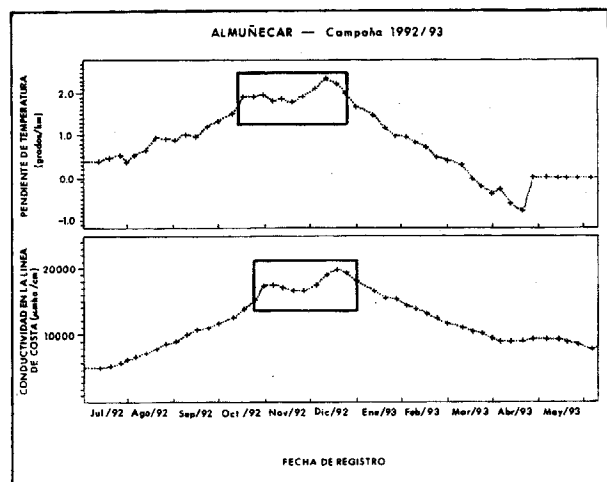


Figura 10. Curvas de gradiente térmico y conductividad origen.

Debemos señalar el fuerte parecido entre las dos curvas, mostrando ambas una suavidad similar a lo largo de todo el período de medida, salvo el tramo final de la curva de temperatura donde aparecen valores nulos de gradiente por tener menos de siete sensores operativos.

5.2. Optimización de la red

En base a lo expuesto en los apartados anteriores podemos concluir que el número de sondeos elegido para la red de control es próximo al mínimo necesario para poder llevar a cabo un análisis de detalle en una cuenca como la estudiada en la presente comunicación.

Esto es, aunque el límite encontrado para obtener aproximaciones matemáticas adecuadas ha sido de siete sondeos, las pérdidas de puntos de medida que puedan producirse y la obligada distribución de los sondeos, hacen prudente considerar siempre un número mayor.

El intervalo de tiempo entre medidas dependerá de las características del acuífero estudiado. Así, dado que el período de intrusión en este acuífero es bastante amplio, el proceso quedaría definido con un número menor de medidas. En nuestro caso, las curvas de la figura nº 10 quedarían igualmente definidas realizando medidas quincenales.

La pérdida de las medidas de temperatura debido, tal y como hemos comentado, a la posible falta de estanqueidad de los sensores, hace recomendable la sustitución de éstos por otros de la misma precisión pero con un aislamiento de mayor calidad, aunque ello conlleve un mayor coste económico.

5.3. Hidrogeológicas

** Si se quiere realizar un análisis de la variación de temperatura en acuíferos del mismo tipo que el aquí estudiado, es necesario el establecimiento de una red apropiada, puesto que las variaciones individuales en un sondeo no son representativas para un fenómeno de tan poca influencia térmica como el proceso de intrusión marina.

** Con una red bien definida de sensores de temperatura se puede predecir el avance de la intrusión marina con una antelación de aproximadamente dos semanas tal y como se aprecia en la figura nº 10.

** La variación media de la temperatura con la distancia (gradiente térmico) y la conductividad extrapolada en la línea de costa, para un conjunto de sensores, son parámetros definitorios en el análisis del movimiento de la interfase salina. De esa forma, en cualquier momento pueden evaluarse el sentido de avance o regresión de dicho fenómeno analizando los valores que alcanzan dichos parámetros en el conjunto de los sondeos, y por lo tanto, en la cuenca.

** Mediante una red adecuada de sensores de conductividad es posible la determinación de una interfase pseudo-estacionaria que defina la posición aproximada del frente de intrusión marina respecto a la línea de costa en profundidad.

** El método desarrollado en este estudio puede ser aplicado a otras cuencas donde las características hidrogeológicas y el entorno socioeconómico sea similar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración a los siguientes organismos:

- Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Excmo. Ayuntamiento de Almuñécar.
- Comisaría de Aguas del Sur de España.

REFERENCIAS

- ALDAYA, F. (1981): Mapa geológico de España (1056) Albuñol (Granada) - ITGE, 36 págs. Madrid.
- ALDAYA, F. (1986): *Los mantos Alpujárrides al Sur de Sierra Nevada*. Tesis Doct. Univ. de Granada (inédita), 527 pag. Granada.
- BENAVENTE HERRERA, J. et al. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del sector Oriental de la Costa de Granada*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo II (171-208).
- BENAVENTE, J. y CALVECHE, A. (1981): *Aspectos hidrogeoquímicos de algunos acuíferos costeros de la provincia de Granada*. I. Simp. Agua Andalucía (731-754), Granada.
- BENAVENTE, J. y CALVECHE, A. (1988): *Estimación de la permeabilidad en el acuífero costero de Almuñécar*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (385-393).
- CALVECHE QUESADA, A. et al. (1988): *Nuevos datos sobre la geometría del acuífero costero de Almuñécar. Aportación al conocimiento de la porosidad eficaz y de las reservas*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (375-384).
- CASTILLO, E. et al. (1986): *Investigación sobre la cuantía y distribución de los déficits de agua para abastecimiento público en la comarca de la Contraviesa (Granada)*. I Simp. Agua Andalucía (471-482), Granada.
- DOMINGUEZ DE LA RASILLA, S. DIAZ CURIEL, J. et al. (1988): *El método de polarización inducida como técnica de apoyo al estudio de las intrusiones marinas. Aplicación a los acuíferos de Almuñécar y Castell de Ferro (Granada)*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (361-373).
- ESTEVEZ, A. et al (1985): *Los Alpujárrides al Sur de Sierra Nevada. Una revisión de su estructura*. Rev. Mediterránea. Serv. Geol. nº 4 (5-32).
- FERNANDEZ-RUBIO R. (1988): *Almuñécar-Intrusión marina. Soluciones a un problema*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (427-438).
- I.T.G.E. (1985): *Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Guadalfeo y sectores adyacentes*. Informe (inédito), Málaga.
- I.T.G.E. (1987a): *Análisis de limnigramas en los acuíferos de Gualchos y Almuñécar*. Nota técnica nº 292 y 311, Málaga.
- I.T.G.E. (1987b): *Análisis de las explotaciones en los acuíferos de Gualchos y Almuñécar*. Nota técnica nº 293, Málaga.
- I.T.G.E. (1987c): *Análisis de las explotaciones en los acuíferos de Gualchos y Almuñécar*. Nota técnica nº 291, Málaga.
- I.T.G.E. (1987d): *Control de la intrusión en los acuíferos de Gualchos y Almuñécar*. Nota técnica nº 291, Málaga.
- JALON, M. (1988): *Nuevos datos sobre el proceso salinización/desalinización del acuífero aluvial de Río Verde (Almuñécar)*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (413-438).
- MOLINA COBOS, A. et al. (1988): *Datos referentes al control de la explotación del acuífero costero del Río Verde (Almuñécar)*. TIAC'88, Almuñécar (Granada), Tomo III (395-412).
- TERRON, E. (1983): *Estudio hidrogeológico y hidrogeoquímico de las ramblas Ancha y de Gualchos (Granada)*. Tesis de Lic. Univ. de Granada (inédita), 237 pag. Granada.

Original recibido: Mayo de 1995.

Original aceptado: Junio de 1995.