

METODOLOGIA DEL ESTUDIO DE INTRUSION MARINA DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)

Resumen

Resume

Introducción

El medio físico

Principales rasgos hidrogeológicos

Metodología del estudio

Aspectos generales

Las redes de control

Las determinaciones analíticas

Elaboración y tratamiento de los datos

Registros verticales de conductividad

Prospección Geofísica Eléctrica

Optimización de las redes de control

Planteamiento

Optimización de los parámetros muestreados

Optimización de los puntos de control

Bibliografía

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España). 1988

**METODOLOGIA DEL ESTUDIO DE INTRUSION MARINA
DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)**

Antonio PULIDO BOSCH*, Fernando NAVARRETE*, José Luis MARTINEZ VIDAL**
Carlos ALONSO***, Antonio MACIAS*, Luis MOLINA*, José BENAVENTE*,
Mario CHICA* y Alberto PADILLA*

* Departamento de Geodinámica e IAGM, Universidad de Granada-CSIC

** Departamento de Química Analítica, Universidad de Granada

*** Instituto Andaluz de Reforma Agraria, Delegación de Almería

RESUMEN

Se expone la metodología seguida para caracterizar, desde el punto de vista hidrogeoquímico, al Campo de Dalías, en los estudios llevados a cabo por la Universidad de Granada, en el marco de un convenio firmado entre este Organismo y el IARA. Se ha puesto un énfasis especial en todos aquellos aspectos relacionados con procesos de intrusión marina, por constituir el mayor peligro de afección a la calidad del recurso. Se comentan los criterios seguidos para seleccionar las redes de control semestral, mensual y diario, así como los posteriores métodos de optimización. También se describe la aplicación de los registros de conductividad en sondeos y la ejecución de geofísica eléctrica resistiva.

RESUME

On expose la méthodologie suivie pour caractériser, du point de vue hydrogéochimique, le Campo de Dalías, dans les études réalisées par l'Université de Grenade, dans le cadre d'un accord signé entre cet organisme et l'IARA. On insiste spécialement sur tous les aspects en rapport avec des processus d'intrusion marine, étant donné qu'ils constituent le plus grand danger d'affection à la qualité de l'eau. On commente les critères suivis pour sélectionner les réseaux de contrôle semestriel, mensuel et journalier, ainsi que les postérieures méthodes d'optimisation. On décrit également l'application des enregistrements de conductivité dans les sondages et l'exécution de géophysique électrique résistive.

INTRODUCCION

Mientras que en el año 1961 sólo se cultivaban 5.200 Has en todo el Campo de Dalías, en la actualidad son del orden de 14.000. Además del aumento de la superficie regada, se ha modificado sensiblemente el sistema de cultivo, de manera que han desaparecido prácticamente los cultivos de cereales, leguminosas, forrajes, etc, para ser sustituidos por hortalizas, esencialmente. Las técnicas de cultivo han mejorado grandemente, tanto en los rendimientos como en los sistemas de riego; la mayoría de los cultivos se hacen en enarenados con gran parte bajo plástico, y se ha incrementado notablemente el área regada por goteo. El Ministerio de Agricultura, a través del desaparecido I.N.C. inicialmente, el IRYDA posteriormente, y la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, a través del

IARA, en la actualidad, han jugado un papel fundamental en este desarrollo agrícola.

El continuo aumento de las extracciones en los acuíferos del Campo de Dalías, como consecuencia de este crecimiento progresivo de la superficie regada, ha comenzado a plantear problemas de cantidad y calidad del recurso. Ante la gravedad de la situación, el Instituto Andaluz de Reforma Agraria solicitó a la Universidad de Granada, a través del Departamento de Hidrogeología (actualmente integrado en el de Geodinámica), la realización de un estudio hidrogeológico para caracterizar, desde el punto de vista hidrogeoquímico, a los acuíferos del Campo de Dalías, con un especial énfasis en todo lo relativo a la intrusión marina. Dicho estudio se inició a finales de 1985 y se ha terminado a finales de 1987. Actualmente se continúa la labor de seguimiento, atendiendo a las recomendaciones del estudio citado (PULIDO BOSCH et al., 1987).

En esta comunicación recogemos los aspectos metodológicos que hemos tenido en cuenta en la realización del estudio, y mostramos algunos ejemplos de los resultados obtenidos con las diferentes técnicas empleadas.

EL MEDIO FISICO

El Campo de Dalías, con unos 330 km² de superficie, se sitúa cerca del límite suroccidental de la provincia de Almería (figura 1). Constituye una llanura litoral suavemente inclinada hacia el mar, interrumpida por la presencia de algunos escarpes relacionados con fenómenos tectónicos recientes, y por algunas formas cerradas, de entre las cuales destaca la del entorno de Las Norias-Mojonera. Todo el borde septentrional del Campo está ocupado por la Sierra de Gádor, alineación montañosa que juega un importante papel en la hidrogeología del Campo.

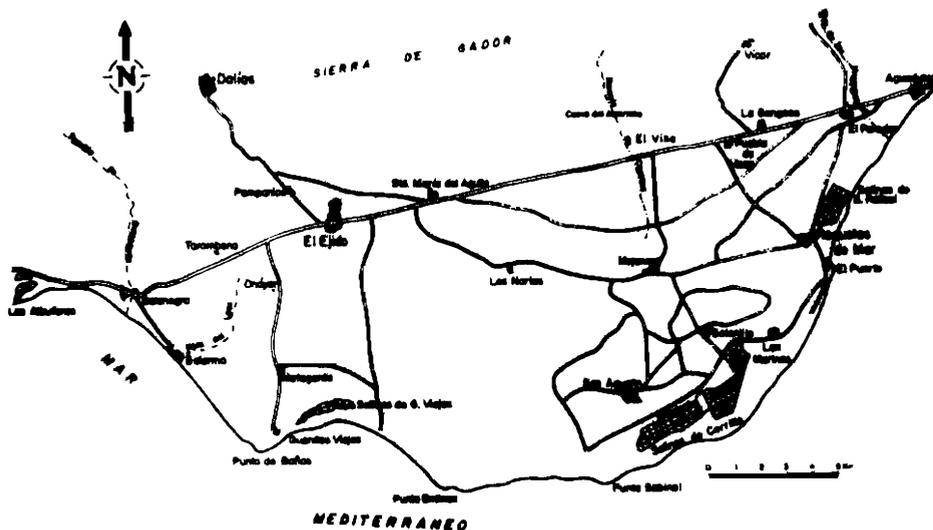


Figura 1.- El Campo de Dalías.

Los materiales que integran el Campo y sus bordes corresponden a dos grandes grupos: prerogénicos y postorogénicos. Los primeros pertenecen al Complejo Alpujarride, a su vez representado por dos mantos diferentes: Gádor (o Lújar) y Felix (o Murtas), estudiados por JACQUIN (1970), OROZCO (1972), ALDAYA et al. (1983) y BAENA et al. (1983), entre otros. La mayor superficie aflorante corresponde al primero de ellos, mientras que el segundo se ciñe a un pequeño sector en la mitad nororiental (figura 2). La base de ambos mantos está constituida por filitas con intercalaciones de cuarcitas (Permo-werfeniense); hacia el techo aparecen calcoesquistos y calizas margosas; una potente sucesión de calizas y dolomías culmina la serie (Triás medio-superior), alcanzándose 1.000 m en el manto de Gádor, y sólo un centenar en Felix.

Los terrenos postorogénicos ocupan el Campo de Dalías propiamente dicho y corresponden a depósitos que representan desde el Mioceno superior al Cuaternario, sin que se conozcan los de edad comprendida entre el Triás superior y el Mioceno medio. Los materiales más antiguos dentro de este grupo pueden ser las rocas volcánicas aflorantes en el tercio NE del Campo, parcialmente cubiertas por calcarenitas tortonienses y conglomerados de cantos de lavas. Los conglomerados, calcarenitas y calizas miocenas (Tortoniense-Andalucense) pueden llegar a superar los 100 m de espesor. Los depósitos de esta edad evolucionan lateralmente, bajo la serie pliocena, hacia facies margosas con yesos y conglomerados, según ponen de manifiesto datos de sondeos.

Los materiales pliocenos margosos, que afloran muy escasamente, pueden superar los 700 m de espesor en la parte central del Campo; presentan un delgado conglomerado de base. Las margas aumentan gradualmente su contenido en materiales detríticos hacia el techo, donde dominan las calcarenitas, que cubren la mitad meridional del Campo; llegan a superar, en algunos sectores, los 100 m de espesor.

Los depósitos cuaternarios de mayor interés hidrogeológico corresponden a los grandes conos de deyección que jalonan la falda de Sierra de Gádor, que pueden superar 150 m de potencia. Además existen otros depósitos marinos (FOURNIGUET, 1975, llega a diferenciar cuatro episodios distintos), limos rojos continentales, dunas, limos de albufera y sedimentos de playa.

En cuanto a la tectónica, además de la relacionada con el plegamiento alpino, responsable de la disposición en mantos de los materiales alpujarrides, la actividad más reciente ha sido especialmente intensa, dando lugar a gran cantidad de fracturas, de gran salto en muchos casos, que compartimentan la cuenca; es de destacar el juego de dirección N 70 E que individualiza el horst de Guardias Viejas. Además y tras la regresión finpliocena, se producen fracturas de al menos tres generaciones, cuyas direcciones dominantes son N 25 E a N-S, E-W y N 120 E.

PRINCIPALES RASGOS HIDROGEOLOGICOS

Los materiales acuíferos por excelencia corresponden a los tramos carbonáticos de Gádor y, en menor cuantía, Felix; los tramos metapelíticos basales de ambos mantos se comportan como prácticamente impermeables y constituyen el sustrato y/o límites impermeables, o individualizan niveles acuíferos en una misma vertical.

Dentro de los materiales postorogénicos son las calcarenitas, miocenas y pliocenas, y las gravas y arenas de los conos de deyección y de los abanicos aluviales, los de mayor interés acuífero. Las margas pliocenas constituyen la base impermeable de las calcarenitas pliocenas en gran parte del área, individualizándolas del resto.

Aunque inicialmente (FERRANDO et al., 1975) se llegaron a definir hasta seis unidades hidrogeológicas dentro del Campo, los estudios posteriores han considerado tan sólo la existencia de tres, con algunas subdivisiones internas (THAUVIN, 1981; IGME, 1982; THAUVIN et al., 1983; DOMINGUEZ et al., 1987). En la figura 3 se muestra un croquis de las mismas, que hemos denominado atendiendo a nombres de núcleos representativos ubicados sobre ellas: Balanegra, Balerna-Las Marinas, Aguadulce (PULIDO BOSCH et al., 1987). Mientras que en la segunda de las unidades son las calcarenitas pliocenas los materiales acuíferos principales; en los otros dos son esencialmente los materiales carbonáticos alpujárrides, junto con calcarenitas pliocenas y los conos de deyección.

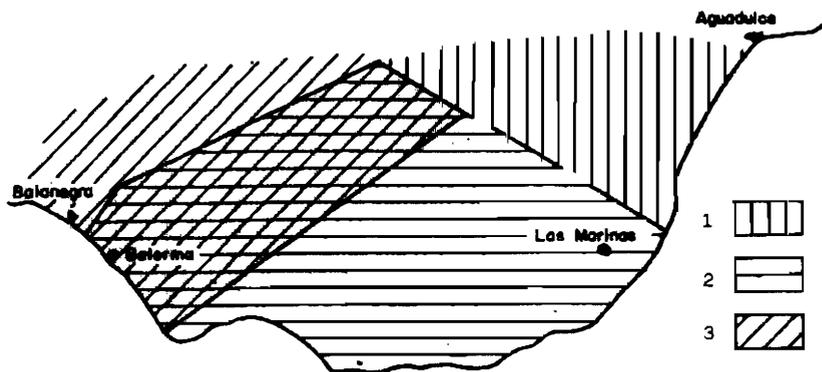


Figura 3.- Esquema de unidades hidrogeológicas. 1: Aguadulce; 2: Balerna-Las Marinas; 3: Balanegra.

En cuanto al funcionamiento, hay que reseñar que la alimentación principal de estas unidades procede de la Sierra de Gádor, sea como entrada lateral oculta, o por escorrentía superficial que termina alimentando a los sistemas; en menor medida, la infiltración de la lluvia caída sobre los propios materiales contribuye a la alimentación. La salida principal, con gran diferencia, corresponde a los bombeos, de manera que se puede afirmar que el sistema se encuentra sobreexplotado.

METODOLOGIA DEL ESTUDIO

Aspectos generales

El objetivo básico del estudio realizado era la caracterización, desde el punto de vista físico-químico, de las aguas del acuífero del Campo de Dalías, con especial énfasis en los posibles procesos de intrusión marina.

El diseño de actividades se hizo pues atendiendo a este ambicioso objetivo básico.

En esta línea, los parámetros esencialmente estudiados han sido los físico-químicos de las aguas, y de forma muy especial los susceptibles de caracterizar la intrusión marina; además y de manera subsidiaria, se tuvieron en cuenta otros tales como profundidad del agua, resistividad de las formaciones, etc. Coincidiendo con los muestreos semestrales se midió el nivel del agua en la mayor parte de los puntos acuíferos cercanos a los de muestreo, lo que ha permitido elaborar sendos mapas de curvas isopiezas orientativas.

No obstante, la actividad inicial en este estudio, mantenida a todo lo largo de la investigación, fue la recopilación exhaustiva de antecedentes geológicos e hidrogeológicos sobre el área; en este sentido merece especial mención la ingente labor llevada a cabo por el IGME, plasmada en una serie de informes técnicos (IGME-IRYDA, 1977; IGME, 1982) y publicaciones, así como en otros documentos que permanecen inéditos (fichas de inventario, controles periódicos, etc) que constituyen un bagaje muy importante. También son muy numerosos los datos procedentes de las actividades del antiguo I.N.C., IRYDA e IARA. Tras el análisis de toda esta documentación se estuvo en condiciones de iniciar las siguientes etapas.

Las redes de control

Con todos los datos de antecedentes se procedió a diseñar tres redes de control de parámetros, con diferente periodicidad: semestral, mensual y diaria. La red semestral se diseñó teniendo en cuenta que los puntos acuíferos seleccionados tuvieran una distribución en el espacio tal que proporcionase información sobre la mayor parte de la superficie objeto de estudio. De todas maneras la preselección, hecha a partir del estudio de antecedentes, hubo de ser retocada a partir de la información obtenida en campo y del reconocimiento sobre el terreno de aspectos tales como facilidad de acceso al punto, posibilidad física de tomar la muestra integrada de agua en sondeos instalados o muestras a distinta profundidad en pozos abiertos, accesibilidad a medidas "in situ" (temperatura, conductividad, nivel piezométrico...), localización del encargado de la instalación, etc.

Basado en estos criterios, en el uso que las aguas tienen, en el acuífero que explotan y en el interés para el estudio de la evolución de la posible intrusión marina, se estableció una red semestral, de 257 puntos de agua, que permitiera el conocimiento de las variaciones hidroquímicas espaciales (en la horizontal y en la vertical). Estos puntos acuíferos aparecen reflejadas en la figura 4.

De los 257 puntos de agua 126 son sondeos, 60 pozos-sondeo y 71 pozos, que se localizan en los términos municipales de Berja (15), El Ejido (120), La Mojonera (13), Vúcar (40) y Roquetas de Mar (69). En cuanto al uso del agua, 14 se destinan a abastecimiento, 19 a riego/abastecimiento, 134 a riego, 30 se sitúan en sectores de riego del IARA y 60 carecen de uso o éste es muy reducido (15 tienen uso doméstico muy limitado). La distribución por acuíferos de los puntos de la red es como sigue: 98 captan el acuífero de Aguadulce, 108 el acuífero libre de Balerma-Las Marinas y 51 el acuífero de Balanegra. De estos últimos, siete explotan conjuntamente el acuífero de

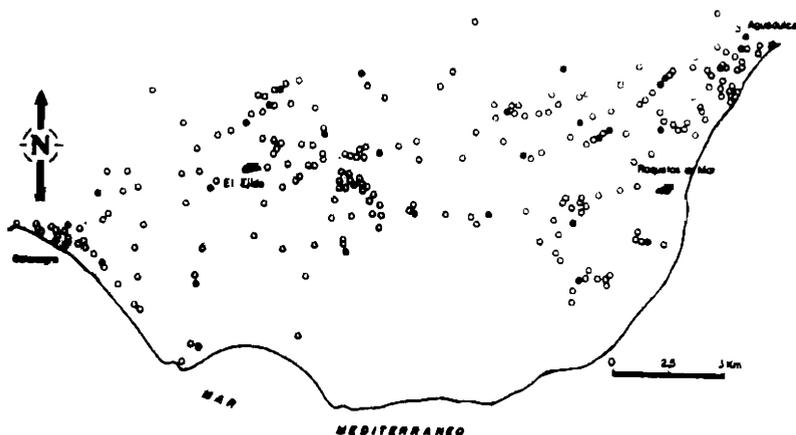


Figura 4.- Red de muestreo semestral. Los círculos rellenos corresponden también a la red mensual.

Balanegra y el acuífero libre de Balerma-Las Marinas, aunque éste tiene poca incidencia en la mezcla.

La red específica de control de periodicidad mensual se planteó seleccionando, de entre los 257 puntos de la red semestral, los que se consideraron más representativos en cada sector y que reunían características óptimas de acceso, localización del encargado, funcionamiento importante en el caso de sondeos instalados, etc. Se llegan a elegir así 31 que son los que en la figura 4 se muestran en círculo relleno. De ellos, 22 son sondeos, 3 pozos-sondeo y 6 pozos), que están ubicados en los términos municipales de Berja (1), El Ejido (14), La Mojonera (3), VÍcar (7) y Roquetas de Mar (6). En esta red hay cuatro pozos que no bombean y del resto de obras de captación, 3 se utilizan para abastecimiento, 1 para abastecimiento y riego, 13 para riego y 10 al servicio de los sectores de riego del IARA; 14 explotan el acuífero de Aguadulce, 9 el acuífero libre de Balerma-Las Marinas y 8 el acuífero de Balanegra.

Determinadas las áreas más susceptibles de intrusión marina, se localizaron, en aquellas, las obras de captación con instalación de explotación que, con funcionamiento frecuente, estuvieran a su cargo personal dispuesto a tomar diariamente una muestra, suministrándole previamente las botellas para su llenado. De los 10 puntos, 9 son sondeos y un pozo; 4 se encuentran radicados en el municipio de Dalías, 3 en el de VÍcar y 3 en el de Roquetas de Mar. Dos de ellos se utilizan para abastecimiento (uno a la población de Almería) y riego, 2 para riego y 6 al servicio de los sectores de riego del IARA. Explotan 6 el acuífero de Aguadulce, 2 el acuífero libre de Balerma-Las Marinas y 2 el acuífero de Balanegra. La finalidad esencial de esta red fue la detección de variaciones de la salinidad de las aguas de bajo periodo, relacionados con oscilaciones bruscas en la posición de la interfase.

Las determinaciones analíticas

Los parámetros medidos in situ fueron conductividad, temperatura y pH, para lo cual se emplearon un conductímetro/termómetro W.T.W. modelo LF-191 con la célula LT-1T, con sonda incorporada de 100 m de cable, y un pH-metro de campo CRISON. Las muestras se tomaron a la salida del tubo en los sondeos instalados, tras al menos 15 minutos de bombeo, y con un hidrocaptor WUIDART, con 150 m de cable, en los puntos carentes de instalación. Los recipientes empleados consistieron en botes de plástico de polietileno.

En las muestras procedentes de las redes de control semestral y mensual se determinaron Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Li^+ , Cl^- , $\text{CO}_3^{=}$, CO_3H^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , F^- , Sr^{++} , Br^- y B^+ . Los métodos seguidos fueron valoración potenciométrica (Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , $\text{CO}_3^{=}$, CO_3H^- , F^-), fotometría de llama (Na^+ , K^+ , Li^+) y espectrofotometría (Sr^{++} , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , B^+ , Br^-).

Todos los resultados obtenidos fueron sometidos a un control para poner de manifiesto la existencia de errores; se empleó para ello el programa QUINIC (PADILLA et al., 1986), el cual permite el cálculo del error de balance, así como una serie de relaciones iónicas de interés para posteriores tratamientos. Cuando el error de balance superaba el 10 %, la muestra era analizada de nuevo.

Las determinaciones analíticas en las muestras procedentes de la red de control diario, diseñada esencialmente para poner de manifiesto procesos rápidos en la intrusión marina, fueron la conductividad y Cl^- .

Elaboración y tratamiento de los datos

Para esta fase del estudio se ha utilizado el paquete de programas realizado por A. Padilla, cuyas características se detallan en PADILLA et al. (1986), con algunas modificaciones específicas. El paquete de programas aludido utiliza lenguaje FORTRAN IV y se ha puesto a punto para un microordenador de DATA GENERAL CORPORATION modelo MPT/100. El soporte del almacenamiento se llevó a cabo en discos flexibles de densidad simple, con una capacidad de 358.000 bytes por unidad.

Una vez introducidos los datos, se efectuaron varios tipos de salidas, correspondientes a (a) listados analíticos con cálculo de algunos parámetros hidroquímicos, (b) cálculo de proporciones iónicas y dibujo en impresora de diagramas triangulares, (c) establecimiento de relaciones entre variables (análisis de regresión), (d) cálculo de parámetros estadísticos básicos (media y varianza) y distribuciones de frecuencias, y (e) análisis multivariante. La más sencilla de las salidas es la propia impresión de los datos introducidos, en un formato cómodo de consultar en el que, además de una serie de códigos de referencia para la identificación del punto y del muestreo, se relacionan los valores de temperatura, pH y conductividad eléctrica y los contenidos iónicos analizados. En este último caso los valores están expresados en forma ponderal (mg/l) y estequiométrica (meq/l).

Este tipo de salida incluye también el cálculo de una serie de parámetros auxiliares de interés hidroquímico, tales como ciertos índices y relaciones iónicas. Así, se determinan índices de cambio de bases, Kr y SAR. Las relaciones iónicas que han sido juzgadas de interés son nueve en total:

Mg/Ca, Cl/HCO₃, SO₄/Cl, Na/Mg, Cl/Mg, SO₄/Na, SO₄/Mg, HCO₃/Na y HCO₃/Ca, y parten de los correspondientes valores iónicos expresados como cantidad en reacción (r). Por último, el programa clasifica el agua en función de la reglamentación (B.O.E., 1982) para consumo humano, en el bien entendido que sólo afecta a los iones analizados y no a otros que no se contemplan en el fichero (se trataría, en este último caso, de constituyentes cuya determinación hidroquímica rutinaria es poco usual); tampoco involucra, lógicamente, a los aspectos microbiológicos. El paquete de programas también realiza el dibujo de análisis en diagramas triangulares porcentuales de los iones mayoritarios.

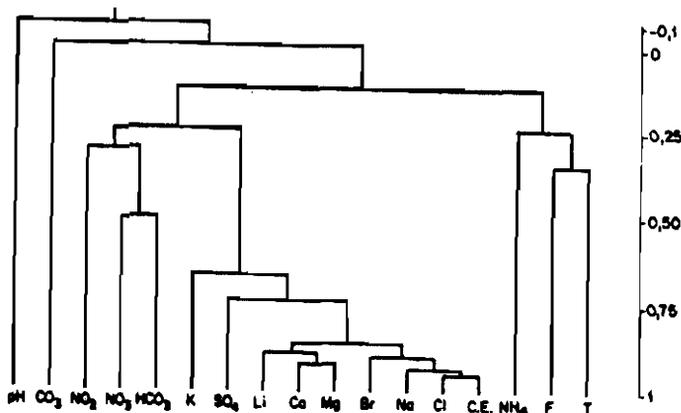


Figura 5.- Dendrograma de variables obtenido con 24 muestras representativas.

El estudio de las relaciones entre variables físico-químicas se ha basado sobre todo, en procedimientos multivariantes de análisis "cluster" y factorial. Para ambos tipos de análisis se ha partido, como parámetro de distancia, de los coeficientes de correlación. El punto de partida en los dos casos es, pues, una matriz simétrica $n \times n$ (n = número de variables consideradas en el análisis). El algoritmo de "clustering" empleado es el sencillo que se describe en DAVIS (1973). De manera sucinta, consiste en seleccionar las mayores similitudes (correlaciones, en este caso) mutuas entre parejas de variables (figura 5). El procedimiento de análisis factorial parte de la obtención de los n autovalores y autovectores (Componentes Principales) de la matriz $n \times n$ de correlaciones y de la estimación de la fracción de la varianza total de los datos explicada por cada uno de tales componentes. En este estudio, además, se han hallado las distribuciones de frecuencias para la mayoría de las muestras de variables. La realización de ensayos específicos de bondad de ajuste de las mismas a la distribución normal cae fuera de los objetivos de esta investigación. No obstante se representaron algunas de tales distribuciones, mediante histogramas de frecuencias relativas, con el objeto de visualizar si la asunción de normalidad, o de cualquier otro tipo de distribución teórica es más o menos plausible.

En lo que respecta a los parámetros estadísticos que ilustran sobre las características de las distribuciones de las variables, el más generalmente utilizado ha sido la media aritmética. En algunos casos, cuando las características de las distribuciones así lo requirieran, se ha complementado este parámetro de centralización con el valor modal (o valores modales, si procedía). Como indicadores de desviación se han calculado la varianza y la desviación típica. Para poder comparar las variabilidades así cuantificadas cuando se referían a variables de diferente magnitud, se ha empleado el coeficiente de variación. Este valor expresa en forma porcentual la desviación típica en unidades de la media correspondiente a cada variable, lo que permite soslayar el citado inconveniente de diferencia de tamaño.

Además de estos tratamientos estadísticos descriptivos, los datos han servido de base para la elaboración de numerosos planos que representan la variación espacial del parámetro medido; el contenido en cada ión mayoritario ha sido cartografiado, diferenciado por unidades hidrogeológicas. También se ha cartografiado la distribución espacial de algunas relaciones iónicas de interés en el estudio de la intrusión marina; concretamente $r_{Mg/rCa}$, r_{Cl/rCO_3H} y $r_{SO_4/rCl}$.

Registros verticales de conductividad

La finalidad esencial de este tipo de registro era la detección precisa del contacto agua dulce-agua salada y su variación con el tiempo. El equipo utilizado fue la sonda de conductividad/temperatura ya citada, por lo que la profundidad total de investigación estuvo condicionada por la longitud total del cable. Dado que son sólo dos de las tres unidades las susceptibles de intrusión, el control se ha ceñido a ellas. Otro condicionante para este tipo de registros ha sido la ausencia de instalación en el punto, pues en caso contrario la sonda no penetraba.

Con estos criterios se seleccionaron 19 puntos, 10 correspondientes al acuífero de Balanegra y los restantes al de Aguadulce; salvo dos, los puntos registrados eran piezómetros específicamente realizados por el IGME para el control de la intrusión marina; de los otros dos puntos, uno fue un sondeo de IARA con instalación desmontada, y un pozo también sin instalar. En la figura 6 se muestra un ejemplo con los dos registros semestrales realizados.

Prospección Geofísica Eléctrica

Los métodos de prospección geofísica eléctrica y más concretamente las modalidades de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Calicatas Eléctricas, son utilizadas con bastante éxito en el seguimiento y control del contacto agua dulce-agua salada; éste ha sido el objetivo de los 18 SEV llevados a cabo en los dos sectores con mayores indicios de intrusión: Balanegra y Aguadulce; se agruparon en cuatro perfiles de orientación sensiblemente perpendicular a la costa. Los sondeos han sido realizados con un equipo GEOTRON con pilas secas de 100 V como fuente de energía. El dispositivo empleado ha sido en todos los casos tetraelectrónico simétrico -Schlumberger-. La abertura de alas ha sido en general pequeña, pues el objetivo esencial fue siempre la localización de un conductor bajo un resistivo, abandonando la continuación del SEV una vez detectado el primero. Un SEV tuvo AB = 130 m, siete 200 m, seis 260 m, tres 320 m y uno 380 m.

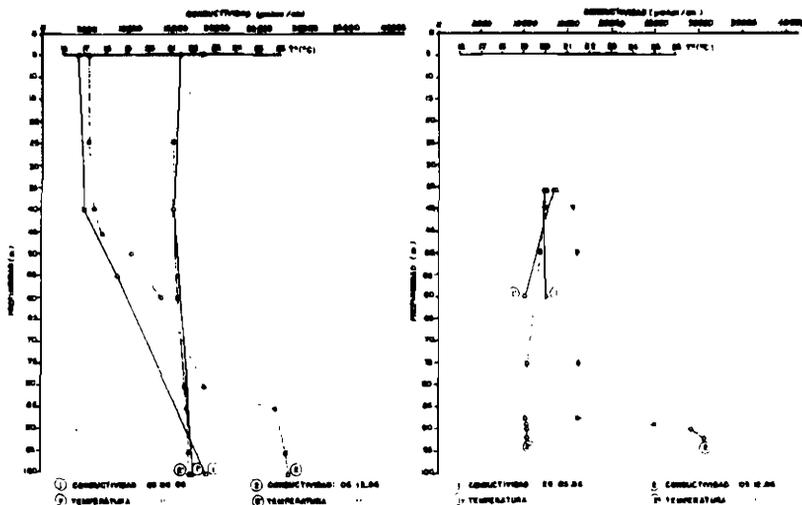


Figura 6.- Ejemplos de registros verticales de conductividad y temperatura.

Los datos fueron interpretados cualitativa y cuantitativamente. La interpretación cualitativa consistió en la realización de los perfiles de isorresistividades. La interpretación cuantitativa se hizo siguiendo un procedimiento clásico en una primera etapa, con posterior ajuste más preciso, de forma automatizada. En efecto, en primer lugar hemos procedido a interpretar cada SEV mediante el método del punto auxiliar y sobre la base de las curvas tipo de EBBERT. De esta interpretación manual se obtuvo un modelo que comprende $2n-1$ parámetros de cada sondeo (n valores de resistividad y $n-1$ datos de espesor).

El modelo inicial sirvió de base a la interpretación automatizada, la cual se hizo en el ordenador ECLIPSE 10.000 de DATA GENERAL, del Centro de Informática de la Universidad de Granada, mediante el programa APASEV (DIAZ et al., 1984). Dicho programa utiliza el Análisis de Sensibilidad para aproximar el resultado satisfactorio y emplea como criterio de bondad de ajuste el error cuadrático medio, entendido como medida de la desviación existente entre el valor medido en el campo y el simulado correspondiente a la interpretación inicial introducida; estos datos iniciales se modifican tras cada iteración aplicando el criterio de minimización del error cuadrático medio.

OPTIMIZACION DE LAS REDES DE CONTROL

Planteamiento

Tras disponer de un año de registro había que plantearse si las redes de control cubrían adecuadamente los objetivos, si eran insuficientes o por

el contraric estaban sobredimensionadas. La optimización de la red de control se puede entender en tanto que referida al número de puntos muestreados, de manera que se obtenga el máximo de información con el menor número de puntos posibles, todo ello sobre la base de unos objetivos a cubrir. Además, la optimización se puede extender al número de parámetros a analizar en cada una de las muestras, partiendo de la base de que la disminución del número de parámetros hace bajar el costo de la labor.

Se procedió a analizar ambas posibilidades; la optimización de los parámetros de muestreo se hizo en base a los resultados de los análisis multivariantes reseñados, mientras que la de las redes de muestreo se planteó a partir de los métodos que aporta la Geoestadística.

Optimización de los parámetros muestreados

A partir de las similitudes calculadas mediante el análisis cluster y los coeficientes de correlación, se puede conocer qué parámetros no precisan ser determinados por guardar un elevado grado de relación con otros de más fácil obtención. El dendrograma de la figura 5 es muy expresivo a este respecto; en el mismo se muestra la similitud existente entre tres variables: conductividad eléctrica, cloruros y sodio, de manera que conocida cualquiera de ellas se puede determinar la otra. Ello es también visible en la matriz de los coeficientes de correlación. Quiere esto decir que, por ejemplo, en la red diaria no habría porqué haber determinado la conductividad eléctrica y el contenido en Cl^- ; con una de las dos habría sido suficiente. Dado que la conductividad es de medida más rápida, este es el parámetro que puede ser retenido para estudios futuros.

En la matriz de coeficientes de correlación calculada se observó también que, aunque con coeficiente algo menor, guardan estrecha relación entre sí los siguientes pares de variables (se indica entre paréntesis el valor del coeficiente de correlación): Conductividad - Magnesio (0.96); Conductividad - Calcio (0.90); Conductividad - Litio (0.95); Conductividad - Bromuro (0.95); Cloruro - Magnesio (0.95); Cloruro - Litio (0.94); Cloruro - Bromuro (0.96); Sodio - Litio (0.94); Sodio - Bromuro (0.95); Sodio - Magnesio (0.93); Magnesio - Calcio (0.96); Magnesio - Litio (0.92); Magnesio - Bromuro (0.93); Calcio - Litio (0.91); Calcio - Amonio (-0.93). Así pues, a partir de los pares de valores se puede determinar la ecuación de la recta de regresión y así obtener unos valores a partir de otros, sin requerir que en cada muestreo se haga el análisis correspondiente.

En resumen, la red de control diario de la intrusión puede mantenerse con un único parámetro a determinar: la conductividad. En cuanto a las redes mensuales, se pueden alternar en las determinaciones aquellos parámetros que tienen coeficientes de correlación con otros superiores a 0.9, de manera a reducir considerablemente las determinaciones en cada muestreo.

Optimización de los puntos de control

Los métodos geoestadísticos constituyen una metodología eficiente para la caracterización numérica de "anomalías" en la distribución espacial y/o temporal de un parámetro geológico. El método a aplicar recibe el nombre de "validación cruzada" y se basa en la aplicación de la técnica de estimación de kriging. El proceso de identificación numérica de anomalías es de fácil elaboración; consiste simplemente en estudiar la representatividad de cada

muestra o dato en función de la distribución estadística de los errores de estimación de la población. Para ello se construye el estimador de krigeage de la variable estudiada (por ejemplo cloruros) $Z_K(x_\alpha)$ en cada punto experimental x_α , comparando dicho valor con el valor real experimental observado $Z(x_\alpha)$. Su estimación se realiza de manera que el dato que se estima no interviene en su estimación ("restitución").

El criterio de selección de anomalías se basa en trabajar punto por punto, y en construir la distribución de los errores experimentales $Z(x_\alpha) - Z_K(x_\alpha)$ para el conjunto de datos $\alpha = 1$ a n ; distribución que se ajusta sin dificultad a una gaussiana de media nula $E[Z(x) - Z_K(x)] = 0$ y de varianza $\sigma^2 = E\{(x) - Z_K(x)\}^2$. Con base en la situación estadística definida se tomará como criterio de definición de valores anómalos, aquel conjunto de datos $Z(x)$, $\beta = 1$ a n' con $n' > n$, cuyos errores experimentales de estimación sean K veces la desviación típica del error teórico de krigeage σ_K . A partir de ésto es fácil calcular para cada punto el estadístico "ZSCORE":

$$\text{ZSCORE} = \frac{Z(x) - Z_K(x)}{K} \quad \begin{array}{l} \text{con: valor "anomalía" si } |ZSCORE| > K \\ \text{valor "regional" si } |ZSCORE| < K \end{array}$$

Esto es equivalente a decir que anomalías son aquellos valores Z que caen fuera del intervalo: $Z_K - K\sigma_K < Z < Z_K + K\sigma_K$. El parámetro K es un valor numérico escogido en función del nivel de probabilidad adoptado; como valores orientativos se puede tomar $K = 1.96$ que representa una probabilidad superior al 95 %, o bien $K = 1$ para una probabilidad del 68 %.

El método sucintamente expuesto tiene la ventaja de ser fácilmente automatizable, por lo que se puede llegar a separar en la población de datos aquellos que son considerados anómalos, en base al modelo probabilístico establecido, y de cartografiarlos en un plano de isovalores que facilite la interpretación de los resultados. El método se ha aplicado al estudio del contenido en cloruro como parámetro más representativo de la calidad del agua (muestreo semestral correspondiente a Mayo-Junio 1986).

La primera etapa del estudio de optimización ha consistido en un análisis estructural; se han calculado los variogramas experimentales del contenido en cloruro de cada uno de los acuíferos del Campo de Dalías, y posteriormente han sido ajustado a los modelos teóricos utilizados en la estimación por krigeage.

A partir de los variogramas teóricos, y para cada acuífero, se ha restituido cada valor de ión cloruro por el método de "validación cruzada". La estimación se ha hecho por krigeage ordinario a partir de los datos más próximos al punto a estimar (aproximadamente 8 puntos). Conocidos en cada punto de medida el valor real y el valor estimado o restituido, se ha calculado la diferencia experimental de ambas cantidades; este incremento, junto con la desviación típica del error de krigeage han servido para calcular el valor del parámetro de optimización "ZSCORE". El signo del "ZSCORE" viene a significar que se da la situación de subestimación (signo negativo) o bien de sobreestimación (signo positivo) por parte del estimador, lo cual refleja la diferencia que existe entre el valor medio del entorno respecto de cada punto de muestreo. Desde el punto de vista de la optimización de la red de control, lo que interesa es analizar el valor absoluto de dicho parámetro, que informa sobre la bondad de la restitución.

En la práctica, los valores más próximos a cero, de posición central en la tabla, identifican aquellos puntos susceptibles de eliminarse en una posible reducción de la red.

La metodología explicada ha servido de base para esta reducción, pero complementada con una serie de criterios que pretenden reflejar la influencia de la realidad del medio físico. Los parámetros en cuestión han sido:

- **Densidad:** se refiere a la distancia entre los puntos muestreados, con las mismas características.
- **Acceso:** ubicación del pozo respecto a los caminos existentes y al estado de los mismos.
- **Localización:** una vez en la captación, facilidad o dificultad para tomar la muestra (dueño, caseta cerrada, salida por tubería, etc).

Hay que tener en cuenta que no se pueden eliminar todos aquellos puntos que den un valor del parámetro ZSCORE igual o inferior a una determinada cantidad, pues se perdería toda la información del sector en cuestión, al tiempo que la estructura de la variable cambiaría totalmente; es ahí donde toman importancia los criterios reseñados, de forma que se conserven aquellos puntos que, aportando la misma información, su muestreo plantee menos problemas tácticos. Hemos planteado tres hipótesis de reducción, consistentes en eliminar el 75 % de los puntos, el 50 % y el 25 %, de forma aproximada. En la figura 7 se refleja la reducción correspondiente al 50 %.

Para la reducción de la red de control mensual, además de los criterios reseñados, hemos considerado también otros factores tales como tiempo de funcionamiento, uso del agua, caudal, idoneidad para detectar posibles procesos rápidos, y representatividad; esto último se refiere al tipo

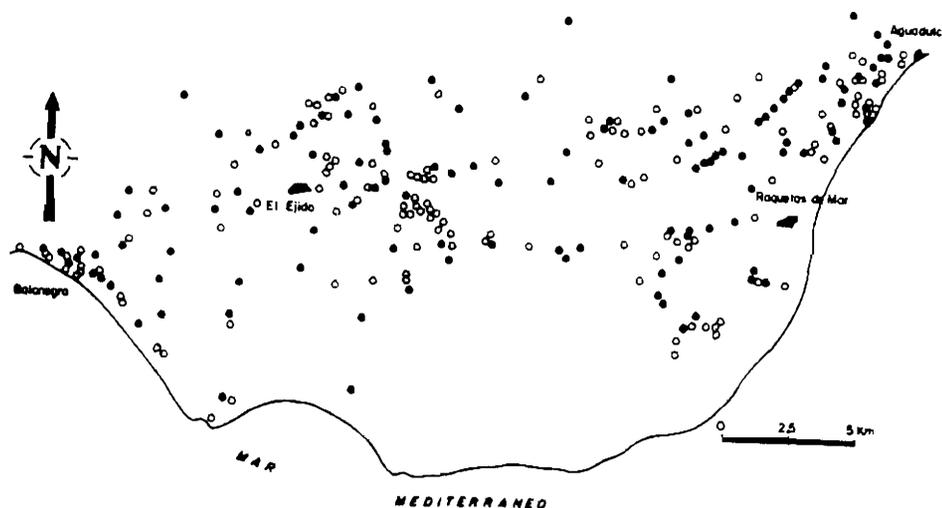


Figura 7.- Red semestral resultante tras aplicar una reducción del 50 % (círculos rellenos).

de captación, potencia de acuífero captado, e instalación. De esta manera la reducción que se propuso contemplaba a su vez dos hipótesis diferentes: un total de cinco puntos acuíferos, en una primera aproximación, mientras que en una hipótesis más restrictiva se eliminarían doce puntos de los treinta y uno que comprende la red actual.

BIBLIOGRAFIA

- ALDAYA, F. et al. (1983). Memoria y Hoja Geológica de Adra 1/50.000. MAGNA. IGME, 60 p. Madrid.
- BAENA, J. et al. (1983). Memoria y Hoja Geológica 1/50.000 Roquetas de Mar. MAGNA. IGME, 34 p. Madrid.
- DAVIS, J.C. (1973). Statistics and Data Analysis in Geology. Ed. J. Wiley, 550 p. New York.
- DIAZ, E., PADILLA, A. y PULIDO BOSCH, A. (1984). Aplicación del análisis de sensibilidad a la interpretación automatizada de Sondeos Eléctricos Verticales. Congr. Nac. Geol. III: 318-332. Segovia.
- DOMINGUEZ, P. y GONZALEZ, A. (1987). Intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería). Hidrogeol. y Rec. Hidr. XII: 101-115. Mallorca.
- FERRANDO, J.A., OCHOA, J. y RUIZ-TAGLE, M. (1975). Características y posibilidades de los acuíferos del Campo de Dalías (Almería). V Jorn. Min. Met. III: 129-144. Bilbao.
- FOURNIGUET, J. (1975). Néotectonique et Quaternaire marin sur le littoral de la Sierra Nevada, Andalousie (Espagne). Tesis Univ. Orléans, 234 p.
- IGME (1982). Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería). (Difusión restringida).
- IGME-IRYDA (1977). Estudio hidrogeológico de la Cuenca Sur. Almería. (Difusión restringida).
- JACQUIN, J.P. (1970). Contribution à l'étude géologique et minière de la Sierra de Gádor (Almería, Espagne). Tesis Univ. Nantes. 501 p.
- OROZCO, M. (1972). Los alpujárrides en Sierra de Gádor Occidental. Tesis Univ. Granada. 379 p.
- PADILLA, A. et al. (1986). Programas para elaboración y tratamiento de datos físico-químicos de interés en Hidrogeología. El Agua en Andalucía I: 437-448. Granada.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1987). Caracterización hidrogeoquímica del Campo de Dalías (Almería). IARA-Dpto. de Geodinámica, Univ. de Granada.
- THAUVIN, J.P. (1981). Riesgos de intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería). SIAGA, I: 389-396. Granada.
- THAUVIN, J.P. y GONZALEZ ASENSIO, A. (1983). Última síntesis hidrogeológica del Campo de Dalías (Almería). III Simp Hidrogeol. VII: 731-737. Madrid.