

# LA CONTAMINACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DEL CAMPO DE DALÍAS Y DELTA DEL ANDARAX (ALMERÍA)

PULIDO BOSCH, A.\* , NAVARRETE, F.\*\* , MARTÍNEZ VIDAL, J.F.\*\* , MCLINA, L.\*\* , SÁNCHEZ MARTOS,

F.\*\* , VALLEJOS, A.\* Y MARTÍN ROSALES, W.\*

\* Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencias. Granada.

\*\* Dpto. Hidrogeología y Química Analítica. Almería.

## RESUMEN

*En este trabajo se analizan los principales procesos de contaminación de los acuíferos del poniente almeriense, donde además de analizar las consecuencias de los bombeos intensivos en los acuíferos del Campo de Dalías y del Medio y Bajo Andarax, se pasa revista a los principales focos potenciales de contaminación (actividades agrícolas, residuos sólidos urbanos y agrícolas, residuos líquidos urbanos...), haciendo especial énfasis en los procesos de intrusión marina y en las consecuencias de la elevada concentración en boro de las aguas del Andarax.*

*Palabras clave: contaminación, actividades agrícolas, intrusión marina, sobreexplotación, boro.*

## ABSTRACT

*In addition to analysing the consequences of the intensive pumping in the Campo de Dalías and the Middle and Lower Andarax, the principal sources of pollution (agriculture, solid urban and agricultural waste, urban sewage, etc) are examined, placing especial emphasis on seawater intrusion and on the high boron concentration in waters of Andarax aquifers.*

*Key words: pollution, agricultural activities, seawater intrusion, overexploitation, boron.*

## INTRODUCCIÓN

Los acuíferos del Campo de Dalías y del Medio y Bajo Andarax han contribuido con sus recursos al desarrollo económico de la provincia de Almería, para los cual han sido objeto de explotación intensiva durante los últimos 25 años. La actividad agrícola ha sido el principal factor del desarrollo, favorecida por las características climáticas del área (numerosas horas de insolación, temperatura media elevada, vientos adecua-

dos, etc.) y gracias al esfuerzo de los agricultores del área. La actividad económica relacionada con la agricultura supera ampliamente los cien mil millones de pesetas al año. También el turismo ha contribuido -especialmente en algunos sectores del poniente almeriense- al desarrollo del área.

Ambos tipos de demandas -agrícola y urbana- fueron esencialmente abastecidos con aguas subterráneas, en cantidades superiores a los recursos medios anuales, con la creación del consiguiente desequilibrio, traducido por el descenso continuado de los niveles, acompañado frecuentemente por el deterioro de la calidad del agua.

Dado que son, pues, relativamente numerosos los antecedentes existentes sobre la hidrogeología del área (Navarrete, 1992; Martínez Vidal, 1994; Pulido Bosch, 1994), vamos a reducir al mínimo los aspectos descriptivos de ambas áreas, remitiendo al lector a la bibliografía recogida al final del texto. Unos aspectos diferenciales de ambas áreas que conviene resaltar se refieren a la naturaleza dominante de los sistemas acuíferos y al uso actual del medio físico.

Mientras que en el caso del Campo de Dalías son los materiales carbonatados los que disponen de los mayores recursos y reservas de agua, en el Andarax son los materiales detríticos los más importantes. Mientras que en el Campo de Dalías la actividad agrícola podría seguir creciendo -si hubiese suficiente agua disponible-, en el Andarax se asiste a un progresivo abandono de las tierras de cultivo; a ello han contribuido notablemente el deterioro de la calidad de los suelos y de las aguas (Aguilar et al., 1990).

Los resultados que aquí se presentan constituyen una síntesis de aspectos parciales de varios estudios llevados a cabo por miembros de las Universidades de Granada y Almería en el marco de una serie de convenios de investigación firmados con el Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA), a quien agradecemos su especial colaboración, y de otros proyectos financiados por la CICYT (AMB92-0211) o carentes de financiación, como es el caso de la Acción COST-65 de la Unión Europea, del que la Sierra de Gádor-Campo de Dalías constituye un área-piloto (Pulido Bosch y Morell, 1994).

## **EL CAMPO DE DALIAS**

### **Aspectos geológicos**

El Campo de Dalías ocupa una superficie próxima a 330 km<sup>2</sup>. El límite septentrional está constituido por las estribaciones de la Sierra de Gádor, mientras que los bordes restantes los ocupa el mar Mediterráneo (figura 1). El área presenta un relieve relativamente suave, comprendido entre la cota 300 y el nivel del mar; registra una pendiente continuada hacia el mar, rota por la existencia de escarpes y por varias formas cerradas, algunas de gran envergadura, como es la localizada en el entorno de Las Norias-Mojonera (Navarrete, 1992), generadas en favor de una serie de fallas que han actuado muy recientemente (Fourniguet, 1977).

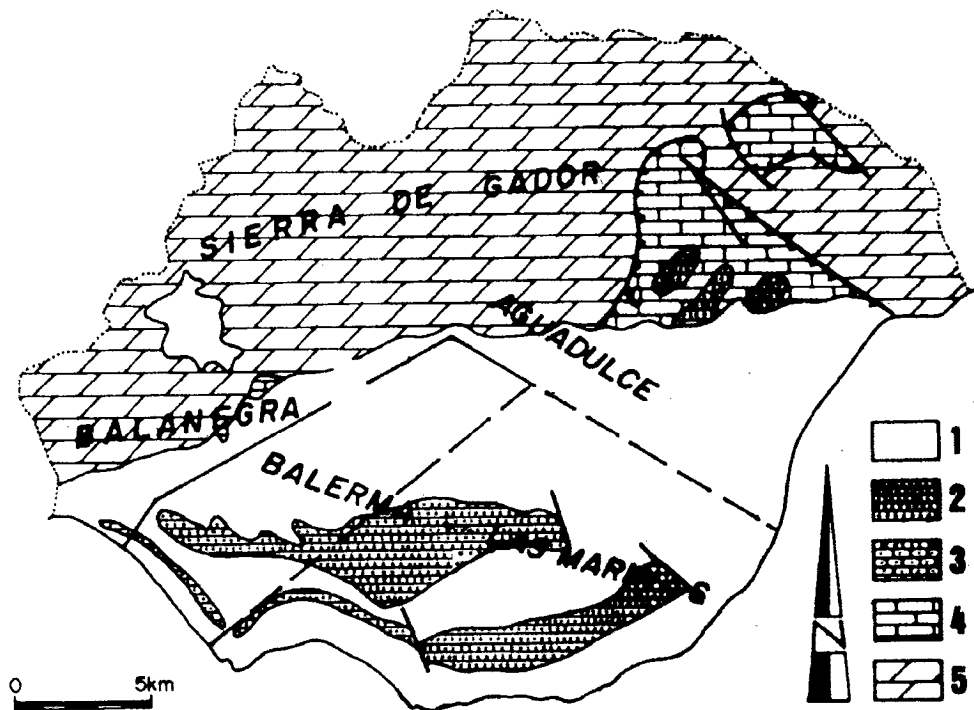


FIG. 1.- Esquema hidrogeológico del borde meridional de la Sierra de Gádor y del Campo de Dalías. 1: Sedimentos cuaternarios; 2: calcarenitas pliocenas; 3: calcarenitas y calizas miocenas; 4: Manto de Felix; 5: Manto de Gádor.

Los terrenos aflorantes se pueden agrupar en dos conjuntos: materiales preorogénicos y materiales postorogénicos. Dentro de los primeros afloran dos unidades distintas: Unidades del Manto de Gádor o Lújar; (Jacquin, 1970; Orozco, 1972); y Unidades del Manto de Felix (Murtas). En las Unidades del Manto de Gádor, de muro a techo, se diferencia un tramo de filitas y cuarcitas sobre el que descansa una potente serie carbonática que posiblemente supere el millar de metros de espesor.

En las Unidades del Manto de Felix, al igual que en los materiales del Manto de Gádor, existe un tramo basal metapelítico y otro superior carbonático. El tramo basal está constituido por filitas, esquistos arcillosos y cuarcitas. El tramo carbonático superior presenta mucha menor potencia que su equivalente de Gádor (normalmente menos de 100 m). Se trata de dolomías, calizas recristalizadas y frecuentemente trituradas. Se asignan edades similares a los tramos equivalentes de Gádor (Permowerfeniense a las metapelitas y Trías medio-superior al tramo carbonático). Estos materiales afloran o subafloran en la mitad oriental del área de estudio.

No se conocen depósitos cuya edad esté comprendida entre el Triásico superior y el Mioceno inferior. Los materiales del Mioceno superior afloran a todo lo largo del borde septentrional del Campo; se trata de biodolomicritas o biomicritas; localmente se sitúan sobre conglomerados de cantos de lava o sobre rocas volcánicas. La potencia del conjunto miocénico llega a sobrepasar 100 m de espesor, aunque hacia el Oeste disminuye de forma apreciable. Por datos de sondeos se conoce que hacia el Sur se produce un cambio de facies hacia margas con yesos y conglomerados.

El Plioceno se encuentra representado por materiales que adquieren espesores notables. Por datos de sondeos se conoce la existencia de un conglomerado basal sobre el que se depositó una formación margosa marina de espesor muy variable, pero que puede superar 700 m. Estas margas afloran en algunos sectores del borde meridional del Campo. Hacia el techo aparecen calcarenitas que culminan la formación; llegan a superar 100 m de potencia y constituyen el relieve aflorante en toda la mitad meridional del Campo. Los materiales de edad cuaternaria están ampliamente representados, con facies muy diversas. Los que presentan mayor desarrollo son los conos de deyección que cubren la falda de la Sierra de Gádor; llegan a superar 150 m de espesor. Existen, además, depósitos cuaternarios más antiguos, marinos. Dentro de las facies continentales, además de los conos de deyección, afloran limos rojos arcillosos, con algunos cantos de cuarzo, que rellenan depresiones topográficas. También afloran depósitos limosos y fangosos relacionados con las salinas, dunas más o menos estabilizadas y sedimentos de playa que bordean el litoral actual.

### **Rasgos hidrogeológicos**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en el Campo de Dalías se diferencian tres unidades, de características internas muy complejas, que son: Aguadulce, Balanegra y Balerna-Las Marinas (Pulido Bosch et al., 1989; figura 1). Estas coinciden sensiblemente con las denominadas por el IGME «Acuífero del Sector Noreste, Acuífero Inferior Occidental y Acuífero Superior Central» (IGME, 1982; Thauvin, 1986; ITGE, 1989, 1991).

Los materiales acuíferos por excelencia corresponden a los tramos carbonáticos de Gádor y, en menor cuantía, a los de Felix; los tramos metapelíticos basales de ambos mantos se comportan como límites prácticamente impermeables e individualizan niveles acuíferos en una misma vertical. Dentro de los materiales postorogénicos, las calcarenitas miocenas y pliocenas y las gravas y arenas de los conos de deyección y de los abanicos aluviales son los de mayor interés acuífero. Las margas pliocenas constituyen la base impermeable de las calcarenitas pliocenas en gran parte del área.

Las unidades de Aguadulce y Balanegra están esencialmente integradas por las calizas y dolomías alpujárrides del manto de Gádor; en la primera de ellas participan también en el almacenamiento los carbonatos de Felix. Hacia el interior del Campo los materiales carbonáticos alpujárrides se encuentran recubiertos por los materiales detríticos que constituyen los grandes conos de deyección. Ello tiene su influencia en el potencial

avance de la contaminación, dado que existe una franja no saturada que puede llegar a superar 100 m de espesor, cuyo poder depurador no es despreciable.

La unidad de Balerna-Las Marinas, constituida por las calcarenitas pliocenas, soporta en su superficie aflorante más de la mitad de la actividad agrícola; el espesor de la franja no saturada es también menos desarrollado en esta unidad, aunque la permeabilidad media del material es sensiblemente inferior a la de los materiales carbonados alpujárrides.

### Las fuentes potenciales de contaminación

La gran concentración de actividades agrícolas sobre el Campo de Dalías y la elevada explotación de los acuíferos que ello conlleva, diversifica de manera notable las posibilidades de contaminación (Pulido Bosch et al., 1994 a); las principales fuentes de contaminación no puntuales son las derivadas de actividades agrícolas -directa o indirectamente- y la explotación desordenada que origina intrusión marina, mientras que las puntuales las integran los residuos líquidos y sólidos urbanos (figura 2).

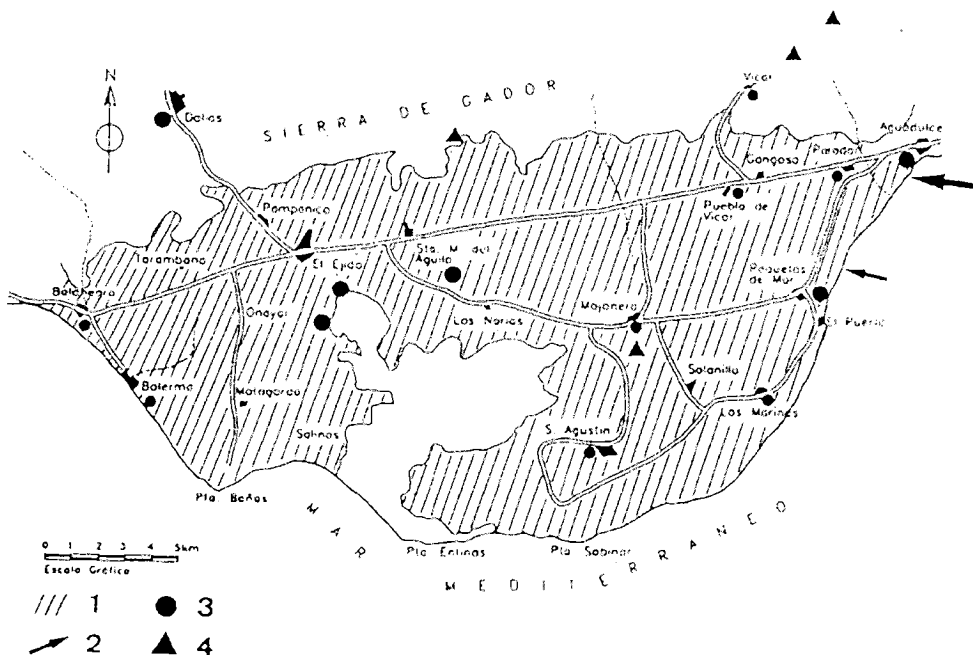


FIG. 2.- Fuentes potenciales de contaminación en el Campo de Dalías. 1: Actividades agrícolas; 2: intrusión marina; 3: residuos líquidos urbanos; 4: vertedero de residuos sólidos urbanos.

## ***Fuentes no puntuales***

### *Actividades agrícolas*

Las actividades agrícolas contaminan las aguas subterráneas con materia orgánica, pesticidas y metales pesados. Ello es debido al uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, insecticidas, herbicidas, fungicidas y plaguicidas. Si se tiene en cuenta que en todo el Campo se cultivan cerca de 16.000 ha, se comprende el elevado impacto teórico que cabe esperar. El contenido en ion nitrato puede ser un constituyente adecuado para caracterizar dicha contaminación. Teóricamente este ion se debe a procesos de nitrificación naturales, descomposición de materia orgánica, contaminación de origen urbano, industrial y ganadero, y al empleo de abonos nitrogenados en las prácticas agrícolas. En el Campo de Dalías disponemos de datos desde el año 1986 hasta el 1992. Los valores más altos se miden en las áreas costeras (Balaneira, Balerna, Guardias Viejas, San Agustín, Roquetas de Mar y Aguadulce) donde se superan los 200 mg/l; en el resto del Campo los valores varían entre 25 y 50 mg/l.

Con anterioridad (Pulido Bosch et al., 1992 a) se hizo una aproximación a la cuantificación del aporte de nitrato al acuífero de Balerna-Las Marinas, que dio como resultado que -para una extensión de 9.000 ha- había unos aportes de 7.500 t/año de nitratos; si lo hiciéramos extensivo a todo el Campo de Dalías (16.000 ha), los aportes serían de 13.200 t/año, que se encontrarían en el suelo, en la zona no saturada, en tránsito a la zona saturada, sometidos a los procesos de transformación correspondientes, incluyendo la vuelta a la atmósfera, dentro del ciclo del Nitrógeno, y en la franja saturada (Westerman, 1987).

En relación con las actividades agrícolas se generan una serie de residuos vegetales y, en el caso concreto del Campo de Dalías, residuos plásticos, debido a que la mayor parte de los cultivos se realizan bajo plástico. Se generan miles de toneladas de residuos vegetales que se acumulan en los lechos de las ramblas y junto a los invernaderos, en las zonas de baldío, etc.; permanecen durante días hasta que son quemados. Esta situación da lugar a la proliferación de plagas y a una cierta contaminación de los acuíferos por el tenue lixiviado que se pueda generar.

En la provincia de Almería se producen unas 16.500 t/año de residuos plásticos de los que el 80 % pertenecen al Campo de Dalías. Se acumulan entre los invernaderos y, generalmente, son quemados. En este año la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, con el apoyo financiero de la UE, ha construido una planta de reciclado de plásticos que pretende solucionar el problema (Pulido Bosch et al., 1994 a). Son escasos los trabajos realizados sobre contaminación por pesticidas en el área; las investigaciones que hemos realizado al efecto (Martínez Vidal et al., 1993), muestran la presencia en aguas subterráneas -entre otros- de tetradifón, carbeneftión, iprodiona, dimetoato y endosulfan, en concentraciones inferiores a 10 ppb.

También se ha llevado a cabo el seguimiento de la evolución en una serie de cationes, entre los que se encuentran Cu, Cr, Ni, Mn, Zn, Pb, Fe, Al, Ba y Cd, los cuales tendrían un origen natural, ligado a las múltiples mineralizaciones existentes en Sierra de Gádor (Jacquin, 1970), y en relación con las aguas residuales, fertilizantes quí-

micos y pesticidas. Los niveles de cationes metálicos encontrados en las aguas subterráneas estudiadas no parecen ser peligrosos para la salud pública, pues no llegan a superar las concentraciones máximas admisibles contempladas en la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990).

### *Intrusión marina*

Sin lugar a dudas, el mayor problema de contaminación en el Campo de Dalías es la invasión del agua de mar; las condiciones para que se diera este fenómeno se manifestaron a partir de 1980 (Thauvin, 1981) cuando, en algunos sectores, se bombeó excesivamente, originando conoides en los que el nivel piezométrico estival se encontraba bajo el nivel del mar, sin que se tuviera constancia en ningún caso de aparición de contenidos salinos elevados. En 1982 el IGME dedicó un volumen a tratar expresamente el tema; la tesis de Thauvin (1986) insiste de nuevo sobre este aspecto.

Los estudios llevados a cabo por nosotros desde el año 1986 (Pulido Bosch et al., 1989) nos permiten hacer una serie de consideraciones. En el acuífero de Balanegra se observan los contenidos salinos más elevados en el área costera, ligados a los materiales pliocenos y que es donde se reconocen otros indicios de intrusión; ésta no se propaga hacia el interior del continente debido a que consideramos que existe desconexión parcial producida por las metapelitas alpujárrides.

En el acuífero de Aguadulce los valores máximos para los iones B, Li y Sr se dan en las proximidades de Aguadulce y de La Gangosa, que es donde se concentran las mayores extracciones; la relación de estos iones con el ion cloruro demuestra que la intrusión marina es relativamente reciente, aunque debe existir algún aporte de estos iones desde los materiales pliocenos.

En el acuífero de Balerna-Las Marinas los valores máximos de boro, estroncio y litio se dan junto a la localidad de Balerna (donde algunas relaciones iónicas indican una incipiente intrusión), y en determinadas áreas ligadas a fracturas localizadas en el interior del acuífero. El origen de los valores elevados de estos elementos puede estar ligado al lixiviado de los sedimentos pliocenos, a aguas congénitas salinas, o a flujos profundos relacionados con fracturas a lo largo de las cuales puede existir flujo de origen profundo.

### *Fuentes puntuales*

#### *Residuos líquidos urbanos*

Salvo en los núcleos importantes de población del Campo, que tienen red de alcantarillado, en el resto los residuos líquidos urbanos van a parar a fosas sépticas, pozos negros u otras variantes que de un modo u otro y con mayor o menor depuración, permiten que el agua residual se infiltre en el terreno. En el municipio de El Ejido se realizó una experiencia de recarga artificial con aguas residuales en el acuífero de Balerna-Las Marinas (Martínez y Fernández, 1989), finalmente abandonada por pro-

blemas técnicos. Se estima que 2 hm<sup>3</sup>/año de este agua se incorporan al acuífero, lo que supone una importante recarga, que puede generar contaminación orgánica y biológica, fundamentalmente (Martínez Vidal et al., 1990).

#### *Vertederos de Residuos Sólidos*

Existen en el Campo de Dalías tres vertederos importantes: uno en el término municipal de El Ejido, situado en la Rambla de la Maleza, sobre materiales cuaternarios permeables, conglomerados y costra calcárea. En el término municipal de Vícar existe otro vertedero incontrolado, en el Barranco del Cura, ubicado sobre calizas y dolomías alpujárrides; también en este mismo término municipal existía otro vertedero que estaba ubicado sobre terrenos permeables muy transmisivos (areniscas y calizas de la formación Vícar), pero en el último año ha sido trasladado a materiales impermeables (filitas alpujárrides). Existe otro pequeño vertedero situado al sur de La Mojonera, igualmente sobre materiales permeables (calcarenitas pliocenas).

Todos los vertederos son incontrolados. La población de derecho en el año 1988 era de unos 80.000 habitantes y si se considera que se generan 0.7 kg por habitante y día, se obtiene un valor cercano a 20.000 t/año de residuos sólidos urbanos en todo el Campo de Dalías.

## **EL MEDIO Y BAJO ANDARAX**

### **Rasgos geológicos**

Las cuencas media y baja del río Andarax se sitúan en el extremo sur de la provincia de Almería; con 250 km<sup>2</sup> de extensión, coinciden con una comarca natural rodeada por las sierras de Gádor, Nevada y Alhamilla, con el Mar Mediterráneo como límite meridional. Su economía está muy ligada al desarrollo de la agricultura, actividad en la que la cantidad y calidad del agua es un factor decisivo. Este agua proviene esencialmente de los recursos subterráneos, dado que el río Andarax carece de regulación y permanece seco la mayor parte del año.

La cuenca del río Andarax coincide con una de las depresiones intramontañosas existentes en las Cordilleras Béticas. El núcleo de Sierra Alhamilla (figura 3) lo forman materiales metapelíticos correspondientes a las unidades nevado-filábrides; el conjunto de Sierra de Gádor y los bordes de Sierra Alhamilla, por el contrario, aparece ocupado por unidades alpujárrides (Manto de Gádor y Felix). Ambas unidades presentan la secuencia típica alpujárride, con un tramo basal metapelítico y otro superior carbonatado. Este último aparece más desarrollado en la Sierra de Gádor. Sondeos realizados en el centro del valle han detectado materiales carbonatados con algunas intercalaciones cuarcíticas que constituyen el sustrato sobre el que se apoya la potente serie neógena de la depresión.



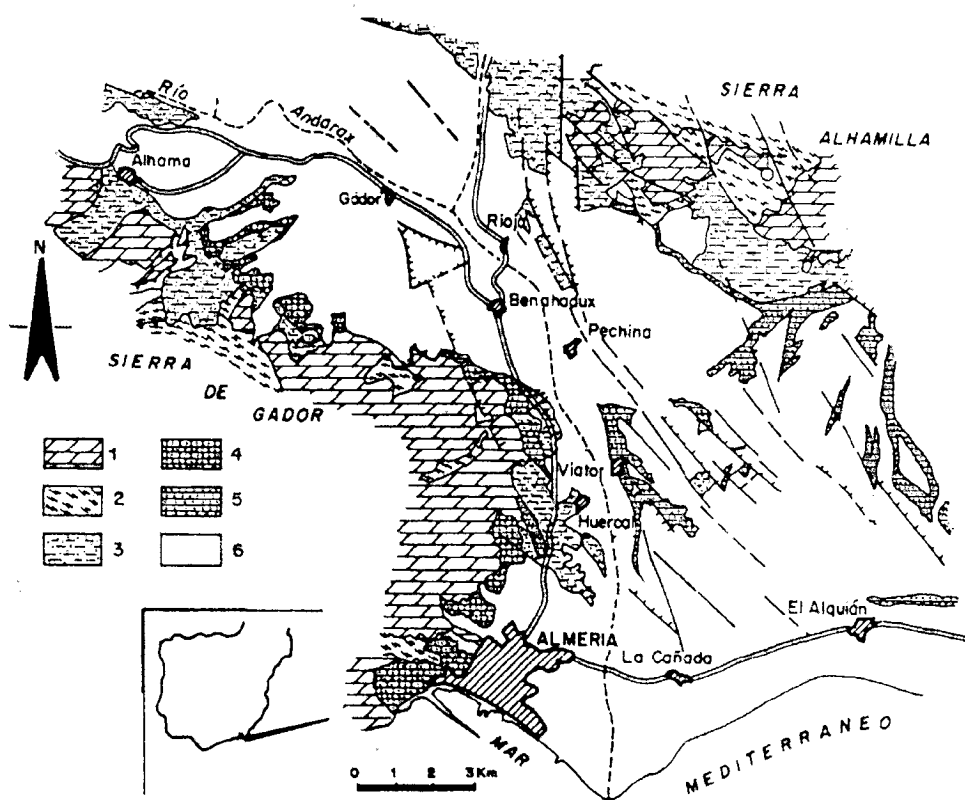


FIG. 3.- Esquema hidrogeológico del Medio y Bajo Andarax. 2: Carbonatos del manto de Gádor; 2: metapelitas del manto de Gádor; 3: margas miocenas; 4: calcarenitas miocenas; 5: margas arenosas pliocenas; 6: sedimentos pliocuaternarios.

Los materiales neógenos presentan notables diferencias de espesor y litología, con rápidos cambios laterales de facies y numerosas discordancias internas, consecuencia de la morfología irregular de la cuenca y de la tectónica activa del área. Los depósitos de edad Mioceno superior afloran en pequeñas superficies; están integrados por una potente serie margosa con intercalaciones arenosas y algunos niveles de yeso de 30-60 m de potencia, situados a techo. Hacia Sierra de Gádor su litología cambia hacia una formación más arenosa de carácter litoral. El máximo espesor de la serie miocena, del orden de 500 m, se alcanza en el borde de Sierra Alhamilla (Iaccarino et al., 1975). Rodeando los relieves de Sierra de Gádor afloran biomicitas arenoso-conglomeráticas y calizas arrecifales de edad Tortoniense y Messiniense. Al sur de Viator aflora una formación margosa-arenosa, de edad Plioceno, que alcanza 150 m de potencia máxima; se dispone de forma discordante sobre los depósitos infrayacentes. Sobre el conjunto Mioceno-Plioceno anterior se deposita una formación deltáica arenoso-limosa con niveles conglomeráticos.

Los materiales cuaternarios ocupan amplias extensiones, especialmente en los sectores de cotas bajas. Los depósitos pleistocenos están formados por niveles conglomerático-arenosos. En la vertiente suroeste de Sierra Alhamilla se distinguen 6 episodios marinos; el más antiguo, correspondiente al Pleistoceno inferior, se sitúa a 150 m s.n.m. En el sector de El Alquíán se presentan superpuestos o solapados, generalmente recubiertos por glaciares y abanicos aluviales (Goy y Zazo, 1982).

### **El marco hidrogeológico**

Los materiales correspondientes a las unidades Nevado-Filábrides tienen un comportamiento acuicludo a acuífero pobre. En las unidades Alpujarrides las metapelitas tienen carácter acuicludo mientras que la serie carbonatada se comporta como acuífero por fisuración y/o karstificación. Los materiales postorogénicos presentan grandes cambios en la permeabilidad; las formaciones margosas miocenas y pliocenas se comportan como acuicludos; los depósitos pliocenos deltáicos y las formaciones detríticas pliocuaternarias y cuaternarias constituyen acuíferos. De acuerdo con esta distribución de materiales, se definen tres unidades hidrogeológicas (Pulido Bosch et al., 1990 y 1991 a; Sánchez Martos, 1990; figura 4) que describimos a continuación.

#### *Acuífero detrítico*

Se extiende a lo largo de todo el sector central del valle. Incluye a los materiales cuaternarios, aluviales y deltáicos junto a los conglomerados arenoso-limosos deltáicos pliocenos. Su espesor oscila entre los 200 m en el área de Santa Fe, y los 20-40 m que poseen los cuaternarios en el delta. Los datos de evolución piezométrica muestran que la superficie ocupada por cotas negativas se ha incrementado en los últimos años en el área deltáica.

#### *Acuífero carbonatado de Sierra de Gádor*

Se extiende a lo largo de todo el borde de la Sierra. Básicamente está integrado por materiales calizo-dolomíticos alpujarrides, y localmente calcarenitas miocenas. Se comporta preferentemente como libre, aunque posee intercalaciones margosas impermeables, que le confieren un carácter confinado en algunos sectores. Su geometría es muy compleja, debido a que la disposición en mantos complica la estructura, con repeticiones de la serie en la vertical y compartimentaciones en bloques que hunden el acuífero hacia el Este. Sus cotas piezométricas descienden con la topografía alcanzando valores negativos en algunos sondeos cercanos a la ciudad de Almería. La evolución piezométrica presentaba un continuo descenso de niveles (Carrasco y Martín, 1988).

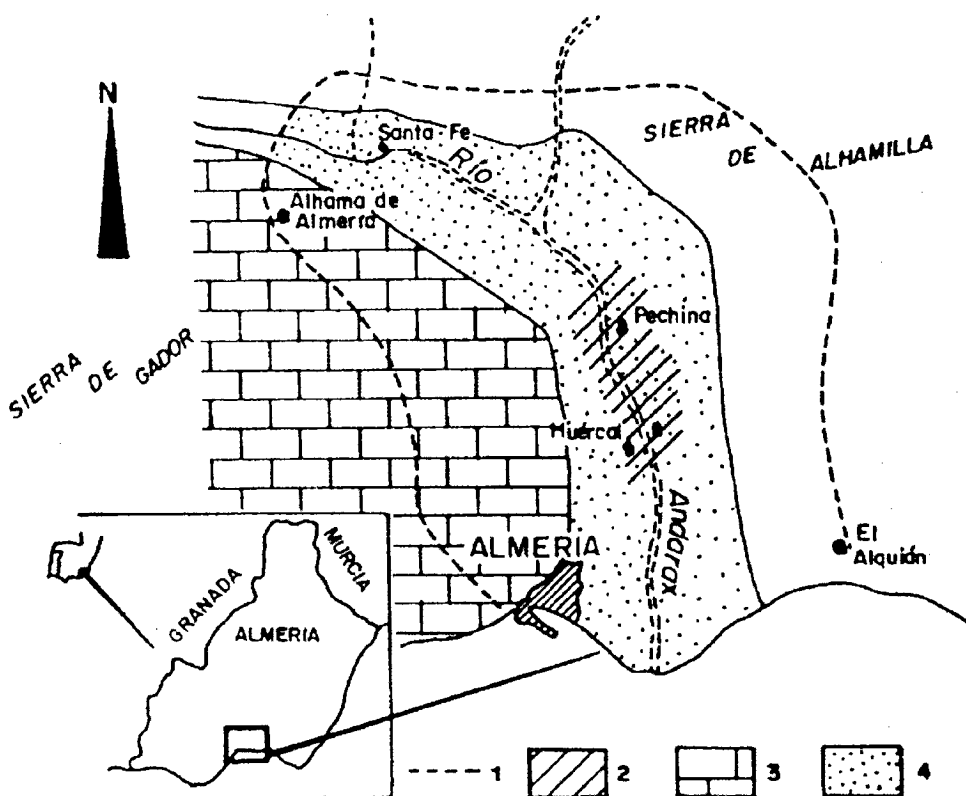


FIG. 4.- Esquema hidrogeológico del Medio y Bajo Andarax. 1: límite aproximado; 2: acuífero profundo; 3: acuífero carbonatado; 4: acuífero detrítico. (Modificado de Pulido Bosch et al., 1991).

### Acuífero profundo

Se detectó con los datos aportados por algunos sondeos ejecutados en el centro del valle. Se trata de un acuífero confinado compartimentado en bloques, con algunos saltos mayores de 200 m. La potencia de materiales carbonatados atravesados en los sondeos totalmente penetrantes oscila entre 80 y 120 m. Los niveles piezométricos muestran cotas bastante estables comprendidas entre 60 y 70 m bajo el nivel del mar. Tanto en este acuífero como en el anteriormente descrito se detecta una anomalía geotérmica positiva (CERÓN et al., 1993); el termalismo del área es bien manifiesto igualmente en los Baños de Sierra Alhamilla (Pulido Bosch et al., 1992 b).

## Las fuentes potenciales de contaminación

### *Aspectos generales*

Los principales focos no puntuales de contaminación se refieren a las actividades agrícolas -abonos, fertilizantes, pesticidas y concentración salina por el reciclado continuo del agua- y la invasión marina, relativamente bien marcada en el área del delta, en donde son visibles varios conoides desde hace más de 30 años. Los focos puntuales, al igual que en el Campo de Dalías, se refieren a los residuos líquidos y sólidos urbanos, esencialmente, al ser prácticamente nula la actividad industrial existente en el área, susceptible de contaminar.

En relación al primer grupo de fuentes de contaminación, en el acuífero carbonatado existen muy escasas evidencias de contaminación de origen agrícola al ser prácticamente nulas las actividades de esta naturaleza sobre los carbonatos; en efecto, los contenidos en nitratos de las aguas presentan valores muy bajos. No sucede lo mismo con los posibles procesos de intrusión marina en donde ya en la década de los ochenta (Carrasco y Martín, 1988) los niveles descendieron notablemente, abandonándose numerosas explotaciones. Nuestros estudios han puesto de manifiesto evidencias hidrogeoquímicas de intrusión en el entorno de la rambla de Belén, a más de 1 km del mar; se trata de aumentos de la conductividad, del contenido en cloruro y de las relaciones iónicas  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  y  $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ .

Ambos procesos contaminantes son más visibles en el acuífero detrítico en donde los suelos están bastante salinizados (Aguilar et al., 1990, y Fernández, 1990); en él la conductividad del agua aumenta con el tiempo, aunque matizada por los períodos húmedos en los que el río lleva un caudal elevado, diluyendo notablemente las aguas del acuífero, al que alimenta de manera dominante. A este respecto, hay que señalar la influencia de los aportes de la rambla de Tabernas, cuyas aguas suelen presentar elevado contenido salino, acorde con la existencia de materiales evaporíticos en su cuenca (Pulido Bosch et al., 1992 c).

Los nitratos, en tanto que caracterizadores de la contaminación de origen agrícola así como de orígenes urbano y ganadero, presentan en este acuífero concentraciones muy variables, entre 0 y 260 mg/l. No obstante hay que precisar que los valores medios se sitúan en torno a 45-50 mg/l; los valores máximos se detectan en el delta -donde la actividad agrícola es máxima- y al SW de Pechina (figura 5).

La intrusión marina se circunscribe a la franja deltáica que es donde los niveles piezométricos se sitúan bajo el nivel del mar gran parte del año; no obstante, hay que precisar que, junto al proceso de influencia antrópica, existe otro de origen natural cuya diferenciación no es nada fácil. En efecto, algunos pozos en las cercanías del aeropuerto, situados a cotas varios metros por encima del nivel del mar, presentan concentraciones salinas de varios miles de ppm. Se debe tratar de aguas que han estado en contacto con materiales de elevado contenido en evaporitas, sin descartar la existencia de materiales saturados en aguas marinas «fósiles» insuficientemente lavados.

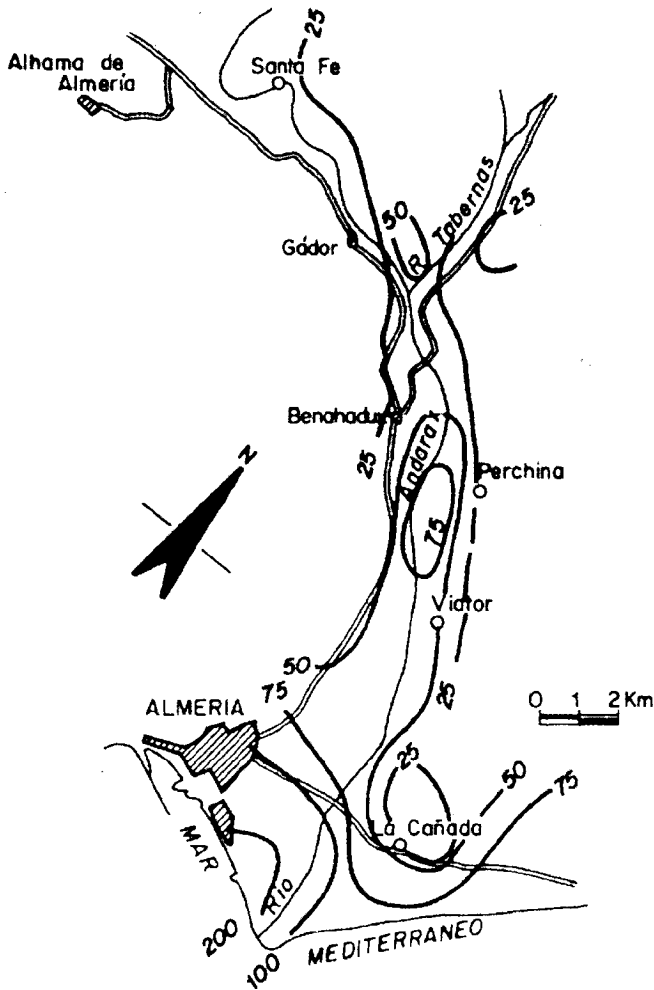


FIG. 5.- Distribución espacial del contenido en NO<sub>3</sub> en las aguas del acuífero detrítico (mg/l). Septiembre 1992.

En el acuífero profundo las aguas presentan elevado contenido salino, anomalía térmica positiva y alta concentración en boro; todo induce a pensar que con el transcurso de la explotación las aguas han sufrido un deterioro continuado de su calidad, cuya conductividad llega a alcanzar los 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Aunque el nivel del agua se encuentra 70 m bajo el del mar, no parece muy factible invocar procesos de intrusión marina para este aumento salino; se trataría más bien de la existencia de una zonación hidrogeoquímica en la vertical, en un acuífero de alimentación muy pobre. Pero el aspecto más relevante de las aguas de este acuífero es su contenido en boro, objeto de análisis

en el siguiente epígrafe. Pese a todo ello, las aguas del acuífero profundo se siguen utilizando en regadíos de hortalizas en el área meridional.

### *Consideraciones sobre el boro y su origen*

El boro es un elemento muy soluble que tiende a concentrarse en ambientes con limitada circulación de agua, tales como evaporitas o salmueras de origen marino o continental (Uhlman, 1991). Incluso algunos autores utilizan diversas relaciones del boro con Li, ClNa, Ca y Sr, junto al contenido isotópico del boro, para distinguir diferentes orígenes de la salinidad (Vengoshi et al., 1991 a; Arad et al., 1988) y estudiar la evolución de las salmueras (Vengoshi et al., 1991 b). También se ha utilizado la relación lineal que muestran el ion cloruro y el boro como indicador de la intrusión marina, cuando ambos iones tienen origen marino (Giménez y Morell, 1992). El origen termal del boro ha sido puesto de manifiesto, ya que aparecen altas concentraciones de boro en áreas geotermales con diferentes características tectónicas, litológicas y régimen hidrológico (Ellis y Mahón, 1977).

Estas tres agrupaciones, definidas en función del origen del boro ligado a ambientes evaporíticos, en relación con la intrusión marina y su origen termal, aparecen en el Bajo Andarax a lo largo de las aguas de los acuíferos detrítico y profundo; no sucede así en el acuífero carbonatado, donde los contenidos son muy bajos, inferiores a 0.6 mg/l y valores medios de 0.20 mg/l. En el acuífero detrítico los contenidos son bastante más elevados (Marín, 1991), alcanzándose máximos de 1.55 mg/l y valores medios de 0.97 mg/l; las concentraciones más bajas son inferiores a 0.25 mg/l y corresponden al área de Gádor-Santa Fe, aguas arriba de la confluencia entre el río Andarax y la rambla de Tabernas (figura 6). Aguas abajo de este punto los contenidos superan siempre los 0.50 mg/l. El análisis de la distribución espacial del contenido en boro permite distinguir tres áreas de máximos: Rioja-rambla de Tabernas, con contenidos superiores a 0.75 mg/l; Huercal-Almería, con concentraciones mayores de 1.5 mg/l; y, finalmente, el sector del delta y norte del aeropuerto con valores que superan 1 mg/l (Pulido Bosch et al., 1994 b).

Al analizar la distribución espacial del contenido en boro ha de considerarse la distribución de los materiales, puesto que coinciden los afloramientos margoso-arenosos miocenos con las máximas concentraciones en boro. Así, entre Huercal de Almería y Almería predominan los afloramientos de margas arenosas miocenas y pliocenas con abundantes intercalaciones yesíferas. También en el entorno de Rioja aparece una banda de materiales margosos miocenos. La naturaleza evaporítica de algunas intercalaciones presentes en estos materiales debe jugar un papel significativo a la hora de interpretar los contenidos anómalos de estos sectores. Otra área con altos contenidos en boro corresponde con el tramo final de la rambla de Tabernas donde existe un rápido incremento en la concentración, hasta alcanzar 1.5 mg/l. Este elevado contenido refleja una vez más la influencia de la circulación subterránea en la rambla de Tabernas, con altas

concentraciones en ion sulfato, principalmente. La pequeña corriente superficial que existe unos 5 km aguas arriba en la rambla de Tabernas muestra elevados valores de sulfatos (1900 - 2100 mg/l) y boro (5 - 9 mg/l). En el delta, los contenidos oscilan entre 1 y 2 mg/l, con los valores más altos en el sector del aeropuerto (1.9 mg/l) en puntos con elevada conductividad (11000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  - 14000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Estas aguas salobres se producen como consecuencia del lavado de materiales cuaternarios de origen marino, lo que obliga a efectuar una desalinización para su uso agrícola.

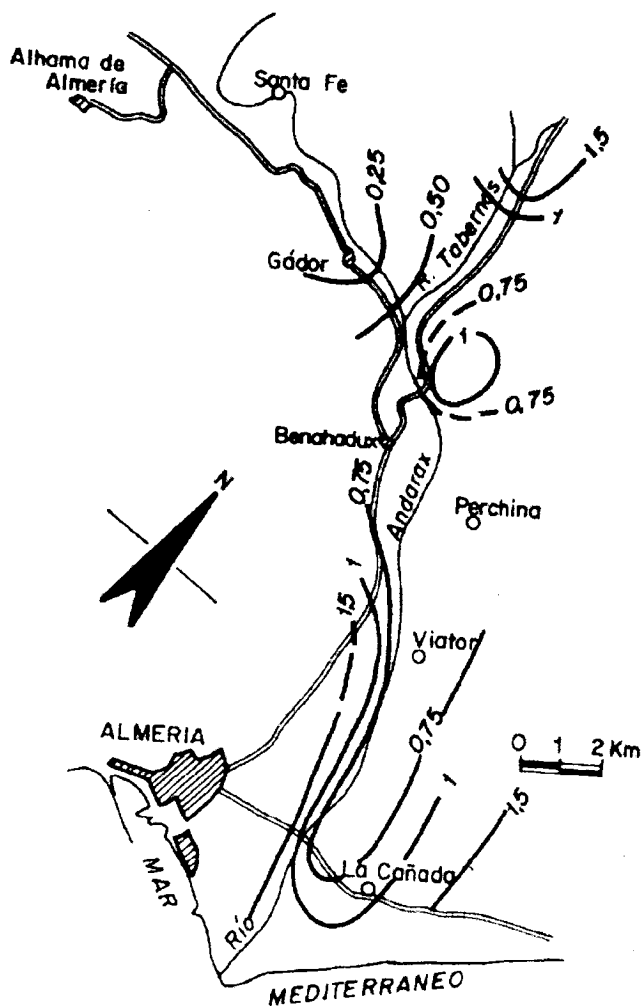


FIG. 6.- Distribución espacial del contenido en boro de las aguas del acuífero detrítico (mg/l) Septiembre 1992.

Se ha efectuado un estudio de correlación con los datos analíticos de las aguas del acuífero detrítico, con el fin de determinar la posible relación del boro con algunos parámetros fisicoquímicos. Los coeficientes de correlación obtenidos son bajos; únicamente superan 0.7 el ion sulfato (0.71), magnesio (0.73) y potasio (0.75). Estos valores se interpretan como confirmación del diverso origen del boro, ligado a las aguas con altos contenidos en sulfato, en relación con la descarga subterránea de la rambla de Tabernas y a la influencia de las intercalaciones evaporíticas de los depósitos miocenos y pliocenos; también, y en menor medida, en relación con la influencia marina, bien por intrusión o por el lavado de materiales cuaternarios de origen marino.

Las aguas del acuífero profundo alcanzan las concentraciones más elevadas de todo el Bajo Andarax; oscilan entre 2 mg/l y 8 mg/l. Estas concentraciones superan claramente el límite máximo tolerable en aguas de riego. La afección es más significativa sobre los cítricos que muestran daños de importancia cuando las aguas de riego alcanzan contenidos superiores a 1 mg/l.

## CONSIDERACIONES FINALES

En lo referente al Campo de Dalías, de lo expuesto se puede constatar que la contaminación es un hecho en relación con dos focos más importantes: la mala gestión del acuífero, en lo que a su explotación se refiere, que ha generado intrusión marina; y las actividades agrícolas, resultado de las cuales son el aumento considerable del contenido en nitratos. Con respecto al primero de los focos, hay que reseñar la importancia que juega la estructura en los procesos de intrusión marina. Mientras que en la unidad de Aguadulce existe clara conexión hidráulica entre el acuífero y el mar, en la de Balanegra hay que concluir que la conexión no existe o se ciñe a la denominada «Escama de Balsanueva» (Thauvin, 1986), dado que a pesar de darse todas las condiciones hidrodinámicas favorables para que se produzca la intrusión desde hace ya una decena de años, ésta no ha sido detectada.

Por otro lado, la compleja geometría de la unidad de Aguadulce unido a la distribución espacial de los bombeos, han tenido como consecuencia el que la intrusión marina suceda según mecanismos complejos; en efecto, las concentraciones salinas más elevadas se detectan a lo largo de las baterías de pozos que bombearon más durante toda la década pasada, sin que entre este sector y el mar se hayan detectado valores generalizados de la conductividad similares a los coincidentes con los «up coning». El reciente abandono de la mayor parte de estos pozos y su sustitución por otros situados más lejos del mar, tendrá su reflejo en la distribución de la salinidad de las aguas, aunque si las cantidades bombeadas se mantienen, lo único que se habrá conseguido habrá sido hacer que la cuña salina penetre mucho más en el interior del continente.

La ausencia de intrusión marina en parte de la unidad de Balerna-Las Marinas vendría a confirmar la ausencia de conexión hidráulica entre las calcarenitas pliocenas y el mar; en efecto, en el sector occidental de la unidad (Onáyar) se detectó la existencia de un gran conoide con niveles piezométricos bajo el nivel del mar, sin que ello



tuviera como consecuencia la aparición de la intrusión marina. Las calcarenitas se acumulan hacia el borde marino, de manera que a lo largo de la línea de costas lo que existen son esencialmente margas arenosas y margas pliocenas bajo los recubrimientos de materiales más modernos.

Con respecto a la contaminación producida por las actividades agrícolas, se pueden destacar los valores alarmantes en las concentraciones de nitratos medidas, así como la preocupante situación generada por la cantidad de plásticos y residuos vegetales almacenados en todo el Campo, ocasionando el consiguiente impacto visual negativo. El acuífero afectado en mayor medida es Balerma-Las Marinas, debido a que sobre él tiene lugar la mayor parte de las actividades agrícolas.

En cuanto a los acuíferos del Medio y Bajo Andarax, el deterioro más manifiesto se detecta en el delta, aunque los procesos de salinización de los suelos y de las aguas afectan a la práctica totalidad del acuífero detrítico. En el delta confluyen todos los procesos que favorecen la contaminación de las aguas, lo que implica un claro deterioro de su calidad, puesto que se añan los procesos a la vez que aumenta su intensidad, consecuencia del uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, lavado de materiales salinos e intrusión marina, dado que el sector costero mantiene algunos períodos del año cotas negativas. A esto hay que unir la deficiente calidad de las aguas subterráneas que alimentan el delta. Sin embargo, en épocas de lluvia y en cortos espacios de tiempo, las aguas superficiales llegan directamente al mar. En estos casos el agua derivada mediante «boqueras» puede utilizarse para el lavado de suelos y la recarga de acuíferos, lo que mejoraría la calidad del agua subterránea, en algunos sectores.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, J. et al. (1990): «Evaluación de suelos y calidad del agua subterránea en el Bajo Andarax (Almería)». *IARA-Univ. de Granada. 3 Vol. Inédito.*
- ARAD, A. (1988): «B. F. Sr as tracers in carbonate aquifers and karstic geothermal systems in Israel». *Proc. XXI Congress. IAH. Vol. II: 921-933.*
- BOE (1990): «Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público». *14/9/1990. Real Decreto 1.138.*
- CARRASCO, A. y MARTÍN, C. (1988): «Hidrogeología de los acuíferos del valle del Andarax (Almería)». *TIAC'88, II: 37-67. Almuñécar (Granada).*
- CERÓN, J.C. et al. (1993): «Thermodynamic equilibria and base temperatures of the karstic waters in the middle and lower Andarax (Almería, Spain)». *In Some Spanish Karstic Aquifers, pp: 225-241.*
- ELLIS, A.J. y MAHÓN, W.A. (1977): «Chemistry and Geothermal Systems». *Academic Press.*
- FERNÁNDEZ, E. (1990): «Capacidad de uso de los suelos en el Bajo Andarax (Almería)». *Tesis Doctoral. Univ. Granada. 195 p.*
- FOURNIGUET, J. (1977): «Sur le Quaternaire marin et la néotectonique du Campo de Dalías (Andalousie, Espagne)». *Acta Geológica Hispánica, XII, 4-6: 90-97.*
- GIMÉNEZ, E. y MORELL, I. (1992): «El boro como indicador de contaminación en la Plana de Castellón». *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Vol. XVI: 285-292.*
- GOY, J.L. y ZAZO, C. (1982): «Niveles marinos cuaternarios y su relación con la neotectónica del litoral de Almería (España)». *Bol. R. Soc. Hist. Nat. (Geol.). 80: 171-184.*

- IACCARINO, S. Et al. (1975): «Litoestratigrafía y bioestratigrafía di alcune serie Neogeniche della Provincia di Almería (Andalusia Orientale, Espagne)». *Ateneo Parmense. Acta Naturalia*, V, II, nº 2: 273-313. Parma.
- IGME (1982): «Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)». 13 tomos. (Difusión restringida). *Minist. Industria y Energía. Madrid*.
- ITGE (1989): «Síntesis hidrogeológica del Campo de Dalías (Almería)». *Minist. Industria y Energía. Madrid*. 164 p.
- ITGE (1991): «Control de la explotación del Campo de Dalías (Almería). 1989-1990». (Difusión restringida). *Minist. Industria y Energía. Madrid*. 77 p.
- JACQUIN, J.P. (1970): «Contribution à l'étude géologique et minière de la Sierra de Gádor (Almería, Espagne)». *Tesis Doctoral. Univ. Nantes*. 501 p.
- MARÍN, A. (1991): «Algunos hechos e hipótesis acerca del contenido en boro en aguas de los acuíferos subterráneos del medio y bajo Andarax (Almería, España). *Actas del III Congreso de Geoquímica. Vol. II: 662-675. Soria*.
- MARTÍNEZ, D. y FERNÁNDEZ, G. (1989): «Plan experimental de recarga con aguas residuales urbanas tratadas en el municipio de El Ejido (Almería)». *La Sobreexplot. de Acuíferos*, pp: 277-286. Almería.
- MARTÍNEZ VIDAL, J.L. et al. (1993): «Relación entre cantidad y calidad de las aguas en Acuíferos Sobreexplotados: Los sistemas acuíferos del Campo de Dalías. Almería (España)». *Workshop on desertification and land use in the Mediterranean Basin. Almería*. 14 p.
- MARTÍNEZ VIDAL, J.L. (1994): «Calidad y contaminación de las aguas, situación de las aguas subterráneas en el Bajo Andarax, y Poniente Almeriense». *El Agua: Presente y Futuro. IEA. Almería*.
- MARTÍNEZ VIDAL, J.L. et al. (1990): «Estudio de la calidad de las aguas de las depuradoras de El Ejido y Sta. María del Aguila». *Ayuntamiento de El Ejido-Dpto. Química Analítica. Almería*. 85 p. anexos.
- NAVARRETE LÓPEZ-CÓZAR, F. (1992): «Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del Campo de Dalías (Andalucía). *Tesis Doctoral. Univ. de Granada*. 435 p.
- OROZCO, M. (1972): «Los Alpujarrides en Sierra de Gádor Occidental». *Tesis Doctoral. Univ. Granada*. 379 p.
- PULIDO BOSCH, A. (1994): «Los recursos hídricos de la provincia de Almería». *Semin. «El Agua: presente y futuro»*. *Inst. Estud. Almer.*(En prensa)
- PULIDO BOSCH, A. y MORELL, I. (1994): «Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas». *National Report Spain. Cost Actron-65.UE. (En prensa)*
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1989): «Caracterización hidrogeoquímica del Campo de Dalías (Almería)». *IARA. Granada*. 265 p.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1990): «Evaluación de la calidad del agua subterránea en el Bajo Andarax (Almería)». *IARA-Univ. Granada (Mem. inédita)*.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1991): «Characterization of the overexploitation in the Middle and Lower basins of the river Andarax (Almería)». *XXIII IAH Congress, I: 563-569*.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1992 a): «Evolución del contenido en nitratos de las aguas de la Unidad Balerna-Las Marinas (Campo de Dalías, Almería)». *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. XVI: 205-214*.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1992 b). *Considérations hydrochimiques sur le thermalisme dans les matériaux carbonatés du Bas et Moyen Andarax (Almería, Espagne)*. *Annales Sci. Univ. Besançon, 11: 215-232*.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1992 c): «Influencia de la rambla de Tabernas en la calidad del agua subterránea del Bajo Andarax (Almería)». *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. XVI: 89-101. Alicante*.
- PULIDO BOSCH, A. et al. (1994 a): «El Campo de Dalías (Almería), un sistema hidrogeológico vulnerable». *Anal. y Evol. Cont. Aguas Subterráneas, T. II: 165-178. Alcalá de Henares*.

- PULIDO BOSCH, A. et al. (1994 b): «Consideraciones sobre la contaminación de las aguas subterráneas en el Bajo Andarax» *Anál. y Evol. Contam. Aguas Subt. T. II: 179-196. Alcalá de Henares.*
- SÁNCHEZ MARTOS, F. (1990): «Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)». *Tesis de Licenciatura. Univ. de Granada.*
- THAUVIN, J.P. (1981): «Riesgos de intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería)». *SIAGA, I: 387-396.*
- THAUVIN, J.P. (1986): «Etude hydrogéologique, modélisation et gestion des aquifères du Campo de Dalías (Province d'Almeria, Espagne). *Thèse Doct. Univ. Nice. 436 p.*
- UHLMAN, K. (1991): «The geochemistry of boron in a landfill monitoring program». *Groundwater Monitoring Review. 11 (4): 139-143.*
- VENGOSHI, A. et al. (1991 a): «Boron isotope geochemistry as tracer for evolution of brines and associated hot springs from the Dead Sea Israel». *Geochim. et Cosm. Acta. 55: 1689-1695.*
- VENGOSHI, A. et al. (1991 b): «Boron isotope geochemistry of Australian salt Lakes». *Geochim. et Cosm. Acta. 55: 2591-2666.*
- WESTERMAN, R.L. (1987). Efficient nitrogen fertilization in agricultural production systems. *In Fairchild, D.M.: Groundwater quality and agricultural practices. Lewis Publ. Michigan: 137-151.*